



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

**MODELACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y
DESCARGA DE AGUA EN GLACIARES
DEL NORTE CHICO Y CHILE CENTRAL**

**REALIZADO POR:
CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS
ÁRIDAS**

S.I.T. N° 382

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2015

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Unidad de Glaciología y Nieves
Geógrafo PhD. Sr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda**

**Inspector Fiscal
Geóloga M^a Belén Varela Mattatall**

CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS ÁRIDAS

**Jefa de Proyecto
Dra. Shelley MacDonell**

**Profesionales
MSc. Sr. Sebastián Vivero Andrade
MSc. (c) Sr. Dennys Caro Paredes
Geógrafo Sr. Rodrigo Ponce Rementería
Geógrafo Sr. Cristián Campos Valdivia**

**Profesionales asociados
Dr. James McPhee Torres
Dra. Francesca Pellicciotti
Dr. (c) Álvaro Ayala Ramos**

Resumen

Este informe presenta los resultados de las mediciones y modelaciones glaciológicas, meteorológicas e hidrológicas realizadas en el Norte Chico y Chile Central. Se incluyen los resultados del monitoreo del glaciar Tapado y los glaciares rocosos Tapado y Llano de las liebres en el Norte Chico, así como también los glaciares San Francisco, Bello, Pirámide y Yeso en Chile Central. Se presentan las mediciones de balance de masa glaciológico, condiciones meteorológicas de superficie, análisis de caudales y mediciones de albedo en el glaciar Tapado. También se presentan los resultados del monitoreo de temperatura superficial e interna y la medición de velocidad de los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado. En la zona de Chile Central, se presentan las mediciones de balance de masa glaciológico de los glaciares Bello y Pirámide, las condiciones meteorológicas de los glaciares San Francisco, Pirámide, Bello y Yeso, así como también análisis de caudal, medición de albedo y líneas de nieve.

Se ejecutó un modelo de balance de energía superficial en los glaciares en estudio, así como también la modelación del factor grado día y un índice de temperatura mejorada. Adicionalmente, se realizó el modelamiento hidro-glaciológico en las áreas de estudio utilizando el modelo TOPKAPI-ETH. También se ejecutó un modelamiento del régimen térmico de los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado con el fin de estudiar las relaciones entre la temperatura media anual de la superficie, con el desarrollo y distribución del permafrost. Por último, se detalla una bitácora de las actividades realizadas en terreno por parte del CEAZA en conjunto con la Universidad de Chile en los glaciares del Norte Chico y Chile Central. Las actividades se centran principalmente en la instalación de instrumental avanzado para la medición de variables meteorológicas y fluviométricas sobre cuerpos de hielo, además de la medición de diversas variables sobre los glaciares y glaciares rocosos.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 <i>Objetivo General</i>	17
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
1.2 GLACIARES EN ESTUDIO EN EL NORTE CHICO	18
1.2.1 <i>Glaciar Tapado</i>	18
1.2.2 <i>Glaciar rocoso Las Tolas</i>	19
1.2.3 <i>Glaciar rocoso Llano de las Liebres</i>	19
1.3 GLACIARES EN ESTUDIO EN CHILE CENTRAL	20
1.3.1 <i>Glaciares Bello y Yeso</i>	21
1.3.2 <i>Glaciar San Francisco</i>	22
1.3.3 <i>Glaciar Pirámide</i>	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO	24
2.2 BALANCE DE MASA GEODÉSICO	30
2.2.1 <i>Generación de MED satelitales</i>	30
2.3 MONITOREO FOTOGRAFÉTICO	31
2.3.1 <i>Albedo distribuido</i>	32
2.3.2 <i>Mapeo de la línea de nieve y estimación de la línea de equilibrio</i>	33
2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA	33
2.4.1 <i>Radiación neta</i>	35
2.4.2 <i>Intercambio de calor turbulento</i>	35
2.4.3 <i>Flujos de energía en el subsuelo y temperatura de superficie</i>	36
2.5 MEDICIONES DE CAUDALES	38
2.6 MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO	39
2.6.1 <i>Descripción del modelo TOPKAPI-ETH</i>	39
2.6.2 <i>Construcción del modelo TOPKAPI-ETH para las cuencas en estudio</i>	42
2.7 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TÉRMICO DE LA CAPA ACTIVA DE GLACIARES ROCOSOS	47
2.7.1 <i>Monitoreo de las temperaturas superficiales</i>	47
2.7.2 <i>Monitoreo de las temperaturas subsuperficiales</i>	47
3. BALANCE DE MASA	50
3.1 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO EN EL GLACIAR TAPADO	50
3.2 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO EN CHILE CENTRAL	68

3.2.1	<i>Mediciones glaciológicas</i>	68
3.3	BALANCE DE MASA GEODÉSICO	93
3.3.1	<i>Balance de masa geodésico en Chile Central</i>	93
3.3.2	<i>Balance de masa geodésico en el glaciar Tapado</i>	95
3.3.3	<i>Mediciones de la topografía superficial del glaciar Tapado</i>	96
3.3.4	<i>Mediciones de la topografía superficial del glaciar Bello</i>	103
4.	MONITOREO DE LA SUPERFICIE GLACIAR MEDIANTE REGISTRO FOTOGRÁFICO	105
4.1	MONITOREO EN EL NORTE CHICO	105
4.1.1	<i>Albedo</i>	105
4.1.2	<i>Líneas de nieve</i>	107
4.1.3	<i>Video</i>	109
4.2	MONITOREO EN CHILE CENTRAL	109
4.2.1	<i>Albedo</i>	109
4.2.2	<i>Líneas de nieve</i>	114
4.2.3	<i>Video</i>	116
5.	METEOROLOGÍA	117
5.1	CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA SUPERFICIE DEL GLACIAR TAPADO	117
5.1.1	<i>TAWS1 glaciar cubierto Tapado</i>	117
5.1.2	<i>TAWS2 glaciar Tapado</i>	119
5.1.3	<i>Comparación datos meteorológicos Norte Chico</i>	122
5.2	CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA CENTRO	124
5.2.1	<i>Glaciar San Francisco</i>	124
5.2.2	<i>Glaciar Pirámide</i>	127
5.2.3	<i>Glaciar Pirámide (Vaisala)</i>	130
5.2.4	<i>Glaciar Bello</i>	132
5.2.5	<i>Glaciar Yeso</i>	135
5.2.6	<i>Glaciar Yeso (Vaisala)</i>	138
5.2.7	<i>Comparación datos meteorológicos Chile Central</i>	141
6.	MODELACIÓN DE ABLACIÓN	144
6.1	RESULTADOS DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA	144
6.1.1	<i>Modelación del factor grado día (PDD) y el índice de temperatura mejorada (ETI)</i>	171
7.	MEDICIONES DE CAUDALES	179
7.1	ANÁLISIS DEL CAUDAL EN LA CERCANÍA GLACIAR TAPADO Y DE LOS GLACIARES ROCOSOS.	179
7.2	ANÁLISIS DEL CAUDAL EN LAS CERCANÍAS DE LOS GLACIARES SAN FRANCISCO, PIRÁMIDE, BELLO Y YESO	191
7.2.1	<i>Glaciar San Francisco</i>	191

7.2.2	<i>Glaciares Yeso, Bello y Pirámide</i>	196
8.	MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO	205
8.1	RESULTADOS DEL MODELAMIENTO	205
8.1.1	<i>Glaciar Tapado</i>	209
8.1.2	<i>Glaciar Bello, Yeso y Pirámide</i>	213
8.1.3	<i>Glaciar San Francisco</i>	221
9.	RÉGIMEN TÉRMICO DE LA CAPA ACTIVA DE LOS GLACIARES ROCOSOS	224
9.1.1	<i>Análisis de temperaturas superficiales</i>	224
9.1.2	<i>Análisis de Temperaturas subsuperficiales</i>	244
10.	MEDICIONES DE VELOCIDAD	253
10.1	MEDICIONES DE VELOCIDAD EN EL GLACIAR TAPADO	253
10.2	MEDICIONES DE VELOCIDAD EN EL GLACIAR BELLO	254
10.3	MEDICIONES DE VELOCIDAD EN LOS GLACIARES ROCOSOS	255
10.3.1	<i>Glaciar rocoso Tapado</i>	255
10.3.2	<i>Glaciar rocoso Llano de las Liebres</i>	258
11.	CONCLUSIONES	261
12.	BIBLIOGRAFÍA	266
13.	ANEXOS:	271
13.1	CÁLCULO DE LAS GRADIENTES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN EL NORTE CHICO Y CHILE CENTRAL	271
13.2	ARCHIVOS DIGITALES	274

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE ACCESO A GLACIARES TAPADO Y LLANO DE LAS LIEBRES.....	20
FIGURA 2. MAPA DE ACCESO A GLACIARES DE CHILE CENTRAL.....	23
FIGURA 3. BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR DE VALLE TÍPICO. EN LA ZONA DE ACUMULACIÓN SE GANA MÁS MASA DE LA QUE SE PIERDE, MIENTRAS EN LA ZONA DE ABLACIÓN SE PIERDE MÁS MASA DE LO QUE SE GANA EN UN AÑO. LA LÍNEA DE EQUILIBRIO ES EL LUGAR DONDE EL BALANCE ES CERO.	25
FIGURA 4: TIPO DE MARCO DE ABLACIÓN CON SENSOR DE DISTANCIA ULTRASÓNICO (SR50), INSTALADO EN EL GLACIAR YESO (15- 10-2014).	27
FIGURA 5. MARCO DE ABLACIÓN INSTALADO CERCA DE LA CALICATA EN LA ZONA DESCUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO, ADEMÁS DE LA MEDICIÓN CON GPS DIFERENCIAL (23-10-2014).	28
FIGURA 6: ESQUEMA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN USADO EN ESTE ESTUDIO	41
FIGURA 7: PRINCIPALES ELEMENTOS EN EL MODELO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL GLACIAR TAPADO.....	44
FIGURA 8: PRINCIPALES ELEMENTOS EN EL MODELO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL ESTERO YESO EN TERMAS DEL PLOMO. ...	45
FIGURA 9: PRINCIPALES ELEMENTOS DEL MODELO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL ESTERO MORALES EN PUENTE CONAF.....	46
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE LOS MTD SOBRE LOS GLACIARES ROCOSOS LLANO DE LAS LIEBRES, TAPADO Y ÁREAS ADYACENTES. FUENTE IMAGEN: DGA (2010).	48
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES DE PERMAFROST EN PROFUNDIDAD SOBRE LOS GLACIARES ROCOSOS LLANO DE LAS LIEBRES Y TAPADO. FUENTE IMAGEN: DGA (2010).....	49
FIGURA 12. MAPA DE UBICACIÓN DE BALIZAS (TC), ESTACIONES (TAWS), MARCOS DE ABLACIÓN (TMA) Y PUNTOS INTERMEDIOS (PID) EN EL GLACIAR TAPADO, DURANTE LAS TEMPORADAS 2013-2014 Y 2014-2015. FUENTE IMAGEN: GEOEYE, 12-04- 2010.....	53
FIGURA 13: PERFIL DE LA DENSIDAD DE LA CALICATA REALIZADA EN EL GLACIAR CUBIERTO TAPADO, EL DÍA 24 DE OCTUBRE DE 2014.....	54
FIGURA 14: PERFILES DE LAS CALICATAS REALIZADAS EN EL GLACIAR DESCUBIERTO TAPADO, MOSTRANDO LA DENSIDAD (g cm^{-3}) Y LA PROFUNDIDAD (CMS). A LA IZQUIERDA SE OBSERVA LA CALICATA REALIZADA EN LA TEMPORADA 2013-2014 Y A LA DERECHA SE MUESTRA LA CORRESPONDIENTE A LA TEMPORADA 2014-2015.	55
FIGURA 15. ARRIBA: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA1 ENTRE EL 22 DE NOVIEMBRE DE 2013 Y 10 DE ENERO DE 2014. ABAJO: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA1 ENTRE EL 23 DE OCTUBRE DE 2014 Y EL 12 DE DICIEMBRE DE 2014.....	56
FIGURA 16. ARRIBA: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA2 ENTRE EL 24 DE NOVIEMBRE DE 2013 Y 10 DE ENERO DE 2014. ABAJO: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA2 ENTRE EL 23 DE OCTUBRE DE 2014 Y 2 DE FEBRERO DE 2015.	57
FIGURA 17. ARRIBA: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA3 ENTRE EL 22 DE NOVIEMBRE DE 2013 Y 19 DE MARZO DE 2014. ABAJO: CAMBIOS TOPOGRÁFICOS MEDIDOS EN TMA3 ENTRE EL 23 DE OCTUBRE DE 2014 Y 12 DE DICIEMBRE DE 2014.....	59

FIGURA 18: ACUMULACIÓN (A), ABLACIÓN (B) Y BALANCE DE MASA (C) DISTRIBUIDO DEL GLACIAR TAPADO DESCUBIERTO DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014. FUENTE IMAGEN: GEOEYE 12-04-2010.	65
FIGURA 19: ACUMULACIÓN (A), ABLACIÓN (B) Y BALANCE DE MASA (C) DISTRIBUIDO DEL GLACIAR TAPADO DESCUBIERTO DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015. FUENTE IMAGEN: GEOEYE 12-04-2010.	66
FIGURA 20. MAPA GENERAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS BALIZAS, ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y CALICATAS EN EL GLACIAR PIRÁMIDE PARA TODOS LOS AÑOS HIDROLÓGICOS. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-12-2013.	69
FIGURA 21: PERFIL QUE INDICA LA PROFUNDIDAD Y LA DENSIDAD DE LA NIEVE PARA LA CALICATA REALIZADA EL DÍA 5 DE NOVIEMBRE DE 2013 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.	71
FIGURA 22: PERFIL QUE INDICA LA PROFUNDIDAD Y LA DENSIDAD DE LA NIEVE PARA LA CALICATA REALIZADA EL DÍA 10 DE OCTUBRE DE 2014 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.	71
FIGURA 23: PERFIL QUE INDICA LA PROFUNDIDAD Y LA DENSIDAD DE LA NIEVE PARA LA CALICATA REALIZADA EL DÍA 22 DE OCTUBRE DE 2015 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.	72
FIGURA 24: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDO EN EL GLACIAR PIRÁMIDE DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014, MEDIANTE POLÍGONOS DE THIESSEN. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-12-2013.	77
FIGURA 25: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDO DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE, MEDIANTE POLÍGONOS DE THIESSEN. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-12-2013.	78
FIGURA 26: ACUMULACIÓN DISTRIBUIDA EN METROS DE AGUA EQUIVALENTE PARA EL GLACIAR PIRÁMIDE DURANTE LA TEMPORADA 2015-2016. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-12-2013.	79
FIGURA 27. MAPA GENERAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE BALIZAS Y ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN EL GLACIAR BELLO. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 04-01-2014.	83
FIGURA 28: PERFIL DE CALICATA AÑO 2014-2015 (A) Y 2015-2016 (B)	86
FIGURA 29: ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDA DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014, MEDIANTE POLÍGONOS DE THIESSEN EN EL GLACIAR BELLO. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 04-01-2014.	90
FIGURA 30: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDA MEDIANTE POLÍGONOS DE THIESSEN DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015 EN EL GLACIAR BELLO. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 04-01-2014.	91
FIGURA 31: ACUMULACIÓN MEDIANTE POLÍGONOS DE THIESSEN EN EL GLACIAR BELLO, TEMPORADA 2015-2016 IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 04-01-2014.	92
FIGURA 32. CAMBIOS DE ELEVACIÓN PROMEDIO POR RANGOS DE ELEVACIÓN. IZQUIERDA: GLACIAR BELLO. CENTRO: GLACIAR YESO. DERECHA: GLACIAR PIRÁMIDE.	95
FIGURA 33. CAMBIOS DE ELEVACIÓN PROMEDIO POR RANGOS DE ELEVACIÓN EN EL GLACIAR TAPADO DESCUBIERTO.	96
FIGURA 34. PERFIL TRANSVERSAL SOBRE LA PARTE DESCUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO (NOVIEMBRE 2013). IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	98
FIGURA 35. PERFIL LONGITUDINAL SOBRE LA PARTE CUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO (NOVIEMBRE 2013). IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	99
FIGURA 36. PERFILES REALIZADOS SOBRE LA PARTE DESCUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO (OCTUBRE 2014). ARRIBA: EJEMPLO DEL PERFIL A-B. ABAJO: UBICACIÓN DE LOS PERFILES REALIZADOS. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	100
FIGURA 37. CONDICIONES DE LA SUPERFICIE DEL GLACIAR AL MOMENTO DE REALIZAR EL PERFIL TRANSVERSAL.	101

FIGURA 38. PERFIL LONGITUDINAL SOBRE LA PARTE CUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO (OCTUBRE 2014). IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	102
FIGURA 39. LOCALIZACIÓN DE LOS PERFILES DE GPS EN EL GLACIAR BELLO. AÑOS 2014 Y 2015.	103
FIGURA 40. PERFIL GPS EN EL GLACIAR BELLO. AÑO 2014.	104
FIGURA 41. PERFIL GPS EN EL GLACIAR BELLO. AÑO 2015.	104
FIGURA 42. MAPAS DE ALBEDO DISTRIBUIDO EN EL GLACIAR TAPADO PARA ALGUNAS FECHAS SELECCIONADAS (TEMPORADA 2013-2014).	106
FIGURA 43. MAPAS DE ALBEDO DISTRIBUIDO EN EL GLACIAR TAPADO PARA ALGUNAS FECHAS SELECCIONADAS (TEMPORADA 2014-2015).	107
FIGURA 44. MAPA DE LÍNEAS DE NIEVE Y LÍNEA DE EQUILIBRIO PARA EL GLACIAR TAPADO, DELIMITADA PARA LAS TEMPORADAS 2013-2014 Y 2014-2015. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	108
FIGURA 45. ESTADO DE LA CÁMARA FOTOGRÁFICA AUTOMÁTICA DEL GLACIAR PIRÁMIDE EL DÍA 5-12-2014.	110
FIGURA 46. MAPAS DE ALBEDO DISTRIBUIDO EN LOS GLACIARES BELLO (ARRIBA) Y PIRÁMIDE (ABAJO) PARA ALGUNAS FECHAS SELECCIONADAS (TEMPORADA 2014). IMAGEN: LANDSAT 8, 23-03-2014.	111
FIGURA 47. MAPAS DE ALBEDO DISTRIBUIDO EN LOS GLACIARES BELLO (ARRIBA) Y PIRÁMIDE (ABAJO) PARA ALGUNAS FECHAS SELECCIONADAS (TEMPORADA 2014-2015). IMAGEN: LANDSAT 8, 23-03-2014.	113
FIGURA 48. MAPAS DE LAS LÍNEAS DE NIEVE Y DE EQUILIBRIO DEL GLACIAR PIRÁMIDE PARA LAS TEMPORADAS 2014 Y 2014-2015. IMÁGENES: LANDSAT 8, 23-03-2014 (IZQUIERDA) Y 28-01-2015 (DERECHA).	114
FIGURA 49. MAPAS DE LAS LÍNEAS DE NIEVE Y DE EQUILIBRIO DEL GLACIAR BELLO PARA LAS TEMPORADAS 2014 Y 2014-2015. IMÁGENES: LANDSAT 8, DEL DÍA 23 DE MARZO DE 2014 (IZQUIERDA) Y 28 DE ENERO DE 2015 (DERECHA).	115
FIGURA 50. DATOS METEOROLÓGICOS EN ESTACIÓN TAWS1 SOBRE GLACIAR CUBIERTO DURANTE TODO EL PERÍODO ANALIZADO.	119
FIGURA 51. DATOS METEOROLÓGICOS EN ESTACIÓN TAWS2 SOBRE GLACIAR DESCUBIERTO PARA AMBAS TEMPORADAS.	122
FIGURA 52: GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL GLACIAR TAPADO, EN LAS DOS UBICACIONES (CUBIERTO Y DESCUBIERTO) PARA AMBAS TEMPORADAS... ..	123
FIGURA 53. MAPA DEL GLACIAR SAN FRANCISCO MOSTRANDO LA BALIZA INSTALADA (ASTERISCO) Y LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA (ESTRELLA). FUENTE IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 29-12-2013.	125
FIGURA 54. DATOS METEOROLÓGICOS DE ESTACIÓN SAN FRANCISCO PARA TODA LA TEMPORADA.	127
FIGURA 55: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS INSTALADAS EN EL GLACIAR PIRÁMIDE EN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS SEÑALADOS. FUENTE IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES-ASTRIUM 28-12-2013.	128
FIGURA 56. DATOS METEOROLÓGICOS DE ESTACIÓN DEL GLACIAR PIRÁMIDE PARA TODAS LAS TEMPORADAS.	130
FIGURA 57. DATOS METEOROLÓGICOS DE LA ESTACIÓN VAISALA UBICADA A AGUAS ABAJO DEL GLACIAR PIRÁMIDE.	132
FIGURA 58. DATOS ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN GLACIAR BELLO PARA TODAS LAS TEMPORADAS.	134
FIGURA 59. MAPA CON LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL GLACIAR YESO. FUENTE IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-12-2013.	136
FIGURA 60. DATOS ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN GLACIAR YESO EN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2013 Y 2014.	138
FIGURA 61. DATOS METEOROLÓGICOS DE LA ESTACIÓN YESO (VAISALA) UBICADA A UN COSTADO DEL GLACIAR.	140

FIGURA 62. COMPARACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y VELOCIDAD DEL VIENTO PARA LAS ESTACIONES UBICADAS EN LOS GLACIARES PIRÁMIDE, SAN FRANCISCO, BELLO Y YESO (GEUS Y VAISALA) PARA LA TEMPORADA 2013-2014.	141
FIGURA 63. COMPARACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y VELOCIDAD DEL VIENTO PARA LAS ESTACIONES UBICADAS EN LOS GLACIARES PIRÁMIDE (GEUS Y VAISALA), SAN FRANCISCO, BELLO Y YESO PARA LA TEMPORADA 2014-2015.	142
FIGURA 64. VALIDACIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA USANDO ABLACIÓN TOTAL.	151
FIGURA 65: VALIDACIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA USANDO TEMPERATURA SUPERFICIAL.	152
FIGURA 66. TAPADO ALTO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	156
FIGURA 67: BELLO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	157
FIGURA 68: YESO ALTO. FLUJOS MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	158
FIGURA 69: SAN FRANCISCO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	159
FIGURA 70: GLACIAR TAPADO CUBIERTO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	160
FIGURA 71: GLACIAR PIRÁMIDE. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2013-2014.	161
FIGURA 72: TAPADO ALTO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	162
FIGURA 73: BELLO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	163
FIGURA 74: YESO ALTO. FLUJOS MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	164
FIGURA 75: SAN FRANCISCO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	165
FIGURA 76: GLACIAR TAPADO CUBIERTO. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	166
FIGURA 77: GLACIAR PIRÁMIDE. FLUJOS DE ENERGÍA MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	167
FIGURA 78: YESO ALTO. FLUJOS MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	168
FIGURA 79: SAN FRANCISCO. FLUJOS MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2015-2016.	169
FIGURA 80: YESO ALTO. FLUJOS MEDIOS HORARIOS. TEMPORADA 2014-2015.	170
FIGURA 81: RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS CALIBRADOS DEL MODELO ETI.	175
FIGURA 82: CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO ETI Y TI (SIMULADO) CON EL DERRETIMIENTO CALCULADO POR EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA (OBSERVADO). TEMPORADA 2013-2014.	176
FIGURA 83: CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO ETI Y TI (SIMULADO) CON EL DERRETIMIENTO CALCULADO POR EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA (OBSERVADO). TEMPORADA 2014-2015.	177
FIGURA 84. CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO ETI Y TI (SIMULADO) CON EL DERRETIMIENTO CALCULADO POR EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA (OBSERVADO). TEMPORADA 2015-2016.	178
FIGURA 85. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LAS CERCANÍAS DEL GLACIAR TAPADO. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	179
FIGURA 86. CURVAS DE DESCARGA DETERMINADAS PARA LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DS, RGO Y RGO' EN CUENCA TAPADO PARA LOS PERIODOS 2013-2014 Y 2014-2015.	182
FIGURA 87. MEDICIONES REGISTRADAS EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN CUENCA TAPADO. SE MUESTRAN LOS FLUJOS DE CAUDAL PROMEDIO DIARIO ESTIMADOS A PARTIR DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DS, RGO Y RGO' PARA EL PERIODO 2013-2015.	183

FIGURA 88. UBICACIÓN DE PUNTOS DE AFORO EN RÍO COLORADO, NORTE CHICO. IMAGEN: GOOGLE EARTH CNES/ASTRIUM 28-04-2013.....	185
FIGURA 89. REGISTROS METEOROLÓGICOS VERSUS CAUDALES EN ESTACIÓN DS.....	190
FIGURA 90. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN ESTERO MORALES.	191
FIGURA 91. CURVAS DE DESCARGA DETERMINADAS PARA LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EM_A Y EM_B EN ESTERO MORALES PARA EL PERIODO DE MEDICIÓN 2013-2015.	194
FIGURA 92. MEDICIONES REGISTRADAS POR LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN ESTERO MORALES. SE MUESTRAN LOS FLUJOS DE CAUDAL PROMEDIO DIARIO ESTIMADOS A PARTIR DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EM_A Y EM_B PARA EL PERIODO 2013-2015.....	195
FIGURA 93. FOTOGRAFÍAS EN EM_A HACIA EL NORTE, EL DÍA 11-10-14 (IZQUIERDA) Y EL DÍA 18-12-14 (DERECHA).	196
FIGURA 94. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS Y AFOROS MANUALES EN ESTERO YESO.	197
FIGURA 95. CURVAS DE DESCARGA DETERMINADAS PARA LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EY_E Y EY_F EN ESTERO YESO PARA EL PERIODO DE MEDICIÓN 2013-2014.....	201
FIGURA 96. ESTACIONES FLUVIOMÉTRICA EN ESTERO YESO. SE OBSERVA (A) LA ESTACIÓN EY_G EL 11-02-15, (B) ESTACIÓN EY_F EL 13-01-15, Y (C1 Y C2) ESTACIÓN EY_E EL 11-02-2015 MOSTRANDO CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE SEDIMENTOS DURANTE EL DÍA.	202
FIGURA 97. CAUDALES REGISTRADOS EN LA ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EY_E Y EY_F EN ESTERO YESO DURANTE EL PERIODO 2013-2014.....	203
FIGURA 98: BALANCE DE MASA EN FUNCIÓN DE LA ELEVACIÓN Y ÁREA PARA LAS TEMPORADAS 2013-14 Y 2014-15 PARA EL GLACIAR TAPADO.....	210
FIGURA 99: COMPARACIÓN DE CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA CUENCA DEL GLACIAR TAPADO	211
FIGURA 100: RESUMEN DEL APOORTE PLUVIAL, NIVAL Y GLACIAR EN LA CUENCA DEL GLACIAR TAPADO	212
FIGURA 101: CALIBRACIÓN DE GRADIENTES DE PRECIPITACIÓN. PARA CADA SITIOS A LA IZQUIERDA SE PRESENTA LA ALTURA DE NIEVE OBSERVADA Y LA DERECHA LA SIMULADA; PI= PIRÁMIDE, BE=BELLO; 13 Y 14 SE REFIEREN A LAS TEMPORADAS 2013 Y 2014. EN EL CASO DE BELLO, LOS DATOS MEDIDOS SOBRE LOS 4250 M SNM SE DENOMINAN L Y LOS DATOS MEDIDOS POR SOBRE ESE LÍMITE SE DENOMINAN H.....	214
FIGURA 102: VALIDACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE (A) Y ESTACAS DE ABLACIÓN (B). PARA CADA SITIOS A LA IZQUIERDA SE PRESENTA LA ALTURA DE NIEVE OBSERVADA Y LA DERECHA LA SIMULADA; PI= PIRÁMIDE, BE=BELLO; 13 Y 14 SE REFIEREN A LAS TEMPORADAS 2013 Y 2014. EN EL CASO DE BELLO, LOS DATOS MEDIDOS SOBRE LOS 4250 M SNM SE DENOMINAN L Y LOS DATOS MEDIDOS POR SOBRE ESE LÍMITE SE DENOMINAN H.	215
FIGURA 103: VALIDACIÓN DE ALBEDO DISTRIBUIDO Y ÁREA CUBIERTA DE NIEVE EN EL GLACIAR BELLO. SE COMPARAN LOS DATOS DE ALBEDO DISTRIBUIDO DERIVADOS DE LAS FOTOGRAFÍAS TOMADAS EN EL CURSO DE ESTE PROYECTO Y LA SIMULACIÓN DE TOPKAPI-ETH PARA LA MISMA ÁREA. EL ÁREA CUBIERTA DE NIEVE ES CALCULADA USANDO UN UMBRAL EN EL ALBEDO DE 0,3.....	216
FIGURA 104: CALIBRACIÓN DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO LINEALES EN EL ALMACENAMIENTO NIVAL Y GLACIAR EN EL GLACIAR BELLO Y YESO.	217

FIGURA 105: BALANCE DE MASA EN FUNCIÓN DE LA ELEVACIÓN Y ÁREA PARA LAS TEMPORADAS 2013-14 Y 2014-15 PARA LOS GLACIARES BELLO, YESO Y PIRÁMIDE.	218
FIGURA 106: CAUDALES SIMULADOS EN LA SALIDA DE LOS GLACIARES BELLO, YESO Y PIRÁMIDE	219
FIGURA 107: RESUMEN DEL APOORTE PLUVIAL, NIVAL Y GLACIAR EN LA CUENCA DEL ESTERO YESO EN TERMAS DEL PLOMO.	220
FIGURA 108: BALANCE DE MASA EN FUNCIÓN DE LA ELEVACIÓN Y ÁREA PARA LAS TEMPORADAS 2013-2014 Y 2014-2015 PARA EL GLACIAR SAN FRANCISCO.....	221
FIGURA 109: CAUDALES SIMULADOS EN LA SALIDA DEL GLACIAR SAN FRANCISCO.	222
FIGURA 110: RESUMEN DEL APOORTE PLUVIAL, NIVAL Y GLACIAR EN LA CUENCA DEL ESTERO MORALES EN PUENTE CONAF.	223
FIGURA 111: EJEMPLO TÍPICO DE SITIOS CON RÉGIMENES TÉRMICOS TIPO 2 Y 3 EN EL ÁREA DE ESTUDIO. (A) RÉGIMEN TIPO 2 EN SITIO X2, ÁREA DEL GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES; (B) RÉGIMEN TIPO 3 SITIO X015, ÁREA DEL GLACIAR ROCOSO TAPADO.....	237
FIGURA 112. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN Y DIAGRAMA DE CAJA PARA LAS VARIABLES DEL MODELO SEGÚN AÑO HIDROLÓGICO:(A) AÑO HIDROLÓGICO 2012-2013; (B) AÑO HIDROLÓGICO 2014-2015.....	241
FIGURA 113: TEMPERATURAS PROMEDIO, MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA AÑO HIDROLÓGICO EN LA ESTACIÓN LIEBRES 1. ..	245
FIGURA 114: PROMEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURAS (°C) SUBSUPERFICIALES EN LA ESTACIÓN LIEBRES 1, GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES.	246
FIGURA 115: TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUAL ESTACIÓN LIEBRES 1, GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES.....	246
FIGURA 116: TEMPERATURAS PROMEDIO, MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA AÑO HIDROLÓGICO EN LA ESTACIÓN LIEBRES 2. ..	247
FIGURA 117: PROMEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURAS (°C) SUBSUPERFICIALES EN LA ESTACIÓN LIEBRES 2, GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES.	248
FIGURA 118: TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUAL Y SU EVOLUCIÓN CON LA PROFUNDIDAD EN ESTACIÓN LIEBRES 2, GLACIAR ROCOSO, LLANO DE LAS LIEBRES.	248
FIGURA 119: TEMPERATURAS PROMEDIO, MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA AÑO HIDROLÓGICO EN LA ESTACIÓN TAPADO 1, GLACIAR ROCOSO TAPADO.	249
FIGURA 120: PROMEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURAS (°C) SUBSUPERFICIALES EN LA ESTACIÓN TAPADO 1, GLACIAR ROCOSO TAPADO.....	250
FIGURA 121: TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUAL Y SU EVOLUCIÓN CON LA PROFUNDIDAD EN ESTACIÓN TAPADO 1, GLACIAR ROCOSO TAPADO.....	250
FIGURA 122: TEMPERATURAS PROMEDIO, MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA AÑO HIDROLÓGICO EN LA ESTACIÓN TAPADO 2, GLACIAR ROCOSO TAPADO.	251
FIGURA 123: PROMEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURAS (°C) SUBSUPERFICIALES EN LA ESTACIÓN TAPADO 2, GLACIAR ROCOSO TAPADO.....	252
FIGURA 124: TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUAL Y SU EVOLUCIÓN CON LA PROFUNDIDAD EN ESTACIÓN TAPADO 2, GLACIAR ROCOSO TAPADO.....	252
FIGURA 125. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA MEDIDOS EN EL GLACIAR TAPADO CUBIERTO DURANTE LOS AÑOS 2013 Y 2014. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.....	254

FIGURA 126. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA MEDIDOS EN EL GLACIAR TAPADO DURANTE DICIEMBRE DE 2013 Y OCTUBRE DE 2014. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.	257
FIGURA 127. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA MEDIDOS EN EL GLACIAR LLANO DE LAS LIEBRES DURANTE ABRIL DE 2014 Y MAYO DE 2015. IMAGEN: GEOEYE, 12-04-2010.....	260

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. LISTADO DE IMÁGENES ASTER ESTÉREO UTILIZADAS	30
TABLA 2: VALORES DE AJUSTE PARA LOS BLOQUES DE IMÁGENES.....	31
TABLA 3. ALBEDO TEÓRICO PARA DISTINTAS SUPERFICIES DE NIEVE Y HIELO, EN PORCENTAJE (CUFFEY Y PATERSON, 2010).	32
TABLA 4: MÓDULOS DE CÁLCULO DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA.....	37
TABLA 5: CRITERIOS PARA CALCULAR LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y ESPESOR DE DETRITOS EN CADA SITIO DE ESTUDIO	37
TABLA 6: ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA RED DGA Y CEAZA-MET USADAS PARA LA DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS	42
TABLA 7: GRADIENTES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	42
TABLA 8. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y LOCALIZACIÓN DE LAS CINTAS TERMISTORAS.	49
TABLA 9. UBICACIÓN DE LAS BALIZAS, ESTACIONES Y CALICATA DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014 EN GLACIAR TAPADO.	51
TABLA 10. PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESPESOR Y DENSIDAD DE NIEVE EN LA TEMPORADA 2013-2014 EN GLACIAR TAPADO. LOS PUNTOS FUERON MEDIDOS ENTRE EL 22 Y 24 DE NOVIEMBRE DE 2013, CON LA EXCEPCIÓN DE TCUMBRE.	51
TABLA 11. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES, BALIZAS Y CALICATAS EN GLACIAR TAPADO DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015..	52
TABLA 12. PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESPESOR Y DENSIDAD DE NIEVE AL FIN DEL INVIERNO 2014. LOS PUNTOS FUERON MEDIDOS ENTRE EL 21 Y 23 DE OCTUBRE DE 2014 EN GLACIAR TAPADO.	52
TABLA 13. EMERGENCIA PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (EN PARÉNTESIS) DE LOS MARCOS DE ABLACIÓN ENTRE EL 22 DE NOVIEMBRE DE 2013 AL 19 DE MARZO DE 2014.	60
TABLA 14. EMERGENCIA PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (EN PARÉNTESIS) DE LOS MARCOS DE ABLACIÓN ENTRE EL 23 DE OCTUBRE DE 2014 AL 2 DE FEBRERO DE 2015.....	61
TABLA 15. EMERGENCIA Y ESPESOR DE LA CAPA DE DETRITOS DE LAS BALIZAS INSTALADAS SOBRE EL GLACIAR CUBIERTO TAPADO, TEMPORADA 2013-2014.	61
TABLA 16. EMERGENCIA Y ESPESOR DE LA CAPA DE DETRITOS DE LAS BALIZAS INSTALADAS SOBRE EL GLACIAR CUBIERTO TAPADO, TEMPORADA 2014-2015.	61
TABLA 17. ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA PUNTUAL EN METROS DE AGUA EQUIVALENTE (M A.E.) PARA LA SECCIÓN DESCUBIERTA Y CUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO, PARA TEMPORADAS 2013-2014 Y 2014-2015.	62
TABLA 18. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE BALANCE DE MASA Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2013. B_w = BALANCE DE INVIERNO; B_s = BALANCE DE VERANO; B_n = BALANCE NETO; SIN = SENO; RAD = RADIACIÓN SOLAR POTENCIAL (PROMEDIO DIARIO). N =NÚMERO DE OBSERVACIONES.	63
TABLA 19. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE BALANCE DE MASA Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2014. B_w = BALANCE DE INVIERNO; B_s = BALANCE DE VERANO; SIN = SENO; RAD = RADIACIÓN SOLAR POTENCIAL (PROMEDIO DIARIO). N =NÚMERO DE OBSERVACIONES.	64
TABLA 20. ESTADÍSTICAS DE REGRESIÓN PARA EL BALANCE DE INVIERNO (B_w) DEL AÑO HIDROLÓGICO 2013. F = VALOR F DEL TEST DE ANOVA; P = PROBABILIDAD DE SIGNIFICACIÓN; T = VALOR T DE LA DISTRIBUCIÓN DE STUDENT; R^2 : COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN; R^2_{ADJ} : COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN AJUSTADO PARA MÚLTIPLE VARIABLES INDEPENDIENTES; MSE : ERROR CUADRÁTICO MEDIO; $E.S.$ = ERROR ESTÁNDAR;.....	64

TABLA 21. ESTADÍSTICAS DE REGRESIÓN PARA EL BALANCE DE VERANO PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2013 (B_s).	64
TABLA 22. ESTADÍSTICAS DE REGRESIÓN PARA EL BALANCE DE INVIERNO (B_w) DEL AÑO HIDROLÓGICO 2014.....	64
TABLA 23. ESTADÍSTICAS DE REGRESIÓN PARA EL BALANCE DE VERANO PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2014 (B_s).	64
TABLA 24: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDO DEL GLACIAR DESCUBIERTO TAPADO, LA CUAL MUESTRA EL PROMEDIO GENERAL Y EN PARÉNTESIS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR, PARA AMBAS TEMPORADAS.	67
TABLA 25: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA DISTRIBUIDO DEL GLACIAR CUBIERTO TAPADO, LA CUAL MUESTRA EL PROMEDIO GENERAL Y EN PARÉNTESIS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR, PARA AMBAS TEMPORADAS.	67
TABLA 26. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS, BALIZAS DE NIEVE Y HIELO, PUNTOS INTERMEDIOS DE MEDICIÓN, ASÍ COMO TAMBIÉN LAS CALICATAS DE AMBOS AÑOS HIDROLÓGICOS.	70
TABLA 27. PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESPESOR Y DENSIDAD DE NIEVE EN PRIMAVERA DE 2013. LOS PUNTOS FUERON MEDIDOS ENTRE EL 6 DE NOVIEMBRE Y 17 DE DICIEMBRE DE 2013 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.....	73
TABLA 28. PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESPESOR Y DENSIDAD DE NIEVE EN PRIMAVERA DE 2014. LOS PUNTOS FUERON MEDIDOS ENTRE EL 1 DE OCTUBRE Y EL 4 DE DICIEMBRE DE 2014 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.....	73
TABLA 29. PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESPESOR Y DENSIDAD DE NIEVE EN PRIMAVERA DE 2015. LOS PUNTOS FUERON MEDIDOS EL DÍA 22 DE OCTUBRE DE 2015 EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.	74
TABLA 30. ESPESOR DE LA CAPA DE DETRITOS Y LAS EMERGENCIAS DE LAS BALIZAS PARA HIELO EN EL GLACIAR PIRÁMIDE, ENTRE EL 29 DE ENERO AL 15 DE ABRIL DE 2014.	75
TABLA 31. ESPESOR DE LA CAPA DE DETRITOS Y LAS EMERGENCIAS DE LAS BALIZAS EN EL GLACIAR PIRÁMIDE PARA LA ABLACIÓN DEL HIELO, ENTRE EL 4 DE DICIEMBRE DE 2014 AL 8 DE MARZO DE 2015.....	75
TABLA 32. ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN DE LA NIEVE, COMO TAMBIÉN LA ABLACIÓN DEL HIELO EN EL GLACIAR PIRÁMIDE DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014.	80
TABLA 33. ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN DE LA NIEVE Y HIELO EN EL GLACIAR PIRÁMIDE DURANTE EL PERÍODO ANUAL DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015.	80
TABLA 34. ACUMULACIÓN DE LA NIEVE EN EL GLACIAR PIRÁMIDE DURANTE EL PERÍODO ANUAL DURANTE LA TEMPORADA 2015-2016.....	81
TABLA 35: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA PROMEDIO TOTAL (DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN PARÉNTESIS) DEL GLACIAR POR AÑO HIDROLÓGICO EN EL GLACIAR PIRÁMIDE.	81
TABLA 36. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN, BALIZAS Y CALICATA REALIZADA EN EL GLACIAR BELLO, DURANTE AMBAS TEMPORADAS.	84
TABLA 37: UBICACIÓN DE LAS BALIZAS INSTALADAS EL 22 DE OCTUBRE DE 2015 EN EL GLACIAR BELLO.	85
TABLA 38: UBICACIÓN, EMERGENCIA DE LA BALIZA MEDIDA EN LOS DÍAS 16 DE ENERO, 14 DE MARZO Y 15 DE ABRIL DE 2014, ADEMÁS DE LA ABLACIÓN TOTAL PARA EL GLACIAR BELLO DURANTE LA TEMPORADA ESTIVAL.....	86
TABLA 39: EMERGENCIA (E) Y ALTURA DE NIEVE (HN) EN CENTÍMETROS (CM) DE LAS BALIZAS MEDIDAS ENTRE LOS DÍAS 10 DE OCTUBRE DE 2014 Y 8 DE ABRIL DE 2015 EN EL GLACIAR BELLO.	87
TABLA 40. LARGO DE LAS BALIZAS MEDIDAS, ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA PARA EL GLACIAR BELLO DURANTE LA TEMPORADA ESTIVAL 2014-2015.	88
TABLA 41: ACUMULACIÓN TEMPORADA 2015-2016, DATOS OBTENIDOS EL 22-10-2015	89

TABLA 42: ACUMULACIÓN, ABLACIÓN Y BALANCE DE MASA PROMEDIO TOTAL DEL GLACIAR POR AÑO HIDROLÓGICO EN EL GLACIAR BELLO (EN PARÉNTESIS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR)	93
TABLA 43. RESUMEN DE LOS VALORES DE CAMBIO DE ELEVACIÓN, VOLUMEN Y BALANCE DE MASA EN LOS GLACIARES DE CHILE CENTRAL.....	94
TABLA 44. RESUMEN DE LOS VALORES DE CAMBIO DE ELEVACIÓN, VOLUMEN Y BALANCE DE MASA EN EL GLACIAR TAPADO.	96
TABLA 45. SENSORES INSTALADOS EN TAWS1 EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO.	118
TABLA 46. SENSORES INSTALADOS EN TAWS2 EN LA MARCO DE ESTE PROYECTO.....	121
TABLA 47. SENSORES INSTALADOS EN SAN FRANCISCO EN LA MARCO DE ESTE PROYECTO.....	125
TABLA 48. SENSORES INSTALADOS EN EL GLACIAR PIRÁMIDE EN LA MARCO DE ESTE PROYECTO.	129
TABLA 49. SENSORES INSTALADOS EN LAS CERCANÍAS DEL GLACIAR PIRÁMIDE EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO.	131
TABLA 50. SENSORES INSTALADOS EN EL GLACIAR BELLO EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO.	133
TABLA 51. SENSORES INSTALADOS EN EL GLACIAR YESO EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO.....	137
TABLA 52. SENSORES INSTALADOS EN LAS CERCANÍAS DEL GLACIAR YESO EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO.	139
TABLA 53: DATOS DISPONIBLES DIRECTAMENTE EN CADA GLACIAR PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2013-2014.....	145
TABLA 54: DATOS DISPONIBLES DIRECTAMENTE EN CADA GLACIAR PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2014-2015.....	146
TABLA 55: DATOS DISPONIBLES DIRECTAMENTE EN CADA GLACIAR PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2015-2016.....	147
TABLA 56: CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS USADOS PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA DURANTE LA TEMPORADA 2013-2014.....	148
TABLA 57. CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS USADOS PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA DURANTE LA TEMPORADA 2014-2015.....	148
TABLA 58. CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS USADOS PARA EL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA DURANTE LA TEMPORADA 2015-2016.....	149
TABLA 59. VALIDACIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA USANDO ÍNDICES DE EFICIENCIA. TEMPORADA 2013-2014.	150
TABLA 60. VALIDACIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA USANDO ÍNDICES DE EFICIENCIA. TEMPORADA 2014-2015.	150
TABLA 61. RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2013-2014 [W/m ²].	154
TABLA 62: RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2014-2015 [W/m ²].	154
TABLA 63: RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA. TEMPORADA 2015-2016 [W/m ²].	154
TABLA 64: RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA. TEMPORADA 2013-2014.	155
TABLA 65: RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA. TEMPORADA 2014-2015.	155
TABLA 66: RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA. TEMPORADA 2015-2016.	155
TABLA 67: RESULTADOS DEL MODELO ETI. TEMPORADA 2013-2014.	173
TABLA 68: RESULTADOS DEL MODELO TI. TEMPORADA 2013-2014.	173
TABLA 69: RESULTADOS DEL MODELO ETI. TEMPORADA 2014-2015.	173
TABLA 70: RESULTADOS DEL MODELO TI. TEMPORADA 2014-2015.	174

TABLA 71. RESULTADOS DEL MODELO ETI. TEMPORADA 2015-2016.....	174
TABLA 72. RESULTADOS DEL MODELO TI. TEMPORADA 2015-2016.	174
TABLA 73. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN ZONA NORTE.....	179
TABLA 74. AFOROS EN ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN ZONA NORTE.....	180
TABLA 75. LUGARES DE AFORO PUNTUALES.	185
TABLA 76. MEDICIONES DE CAUDALES PUNTUALES EN RÍO COLORADO.	186
TABLA 77. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CERCA DEL GLACIAR SAN FRANCISCO.....	192
TABLA 78. AFOROS REALIZADOS EN EL ESTERO MORALES.....	192
TABLA 79. UBICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN ESTERO YESO.	198
TABLA 80. SITIOS DE AFORO A LO LARGO DEL ESTERO YESO.....	198
TABLA 81. AFOROS REALIZADOS EN ESTERO YESO.	198
TABLA 82: PARÁMETROS CALIBRADOS EN LAS CUENCAS ESTUDIO	206
TABLA 83. ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO TAPADO AL 20-11-2014.	225
TABLA 84: ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO TAPADO AL 18-05-2015.	226
TABLA 85. ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO TAPADO AL 02-12-2015.	227
TABLA 86. ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES AL 13-12-2013.....	228
TABLA 87: ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES AL 15-05-2015.	229
TABLA 88. ESTADO DE LOS MTDs INSTALADOS EN EL GLACIAR ROCOSO LLANO DE LAS LIEBRES AL 11-12-2015.....	230
TABLA 89. ASOCIACIÓN ENTRE LAS VARIABLES SEGÚN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS ANALIZADOS (COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PEARSON, P).	238
TABLA 90. CONDICIONES DE SITIO SEGÚN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS ESTUDIADOS (RESÚMENES DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS PARA LAS VARIABLES CATEGÓRICAS).....	239
TABLA 91. COEFICIENTES E INDICADORES PARA EL MODELO M1 DE MGST PARA DIFERENTES TEMPORADAS DE ANÁLISIS.....	242
TABLA 92. COEFICIENTES E INDICADORES PARA EL MODELO M2 DE MGST PARA DIFERENTES TEMPORADAS DE ANÁLISIS.....	242
TABLA 93. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOCALIZACIÓN DE LAS CINTAS TERMISTORES.....	244
TABLA 94. DESPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA PARA LA ZONA CUBIERTA DEL GLACIAR TAPADO, ENTRE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE NOVIEMBRE DE 2013 Y OCTUBRE DE 2014.....	253
TABLA 95. DESPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA PARA EL GLACIAR BELLO, ENTRE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE FEBRERO DE 2015 Y ABRIL DE 2015.....	255
TABLA 96. COORDENADAS DE LAS BASES FIJAS UTILIZADAS PARA EL LEVANTAMIENTO GPS.....	255
TABLA 97. DESPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA EN EL GLACIAR ROCOSO TAPADO, ENTRE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE DICIEMBRE DE 2013 Y DICIEMBRE DE 2014.	256
TABLA 98. DESPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA EN EL GLACIAR ROCOSO LLANO DE LA LIEBRES, ENTRE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE ABRIL DE 2014 Y MAYO DE 2015.	259

1. INTRODUCCIÓN

En las cuencas de los ríos Elqui (Región de Coquimbo) y Maipo (Región Metropolitana) es posible identificar numerosos glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos. En zonas semiáridas, estos cuerpos de hielo constituyen reservas de agua dulce potencialmente importantes. Sin embargo, la respuesta de estos cuerpos de hielo frente a variaciones del clima actual y futuro representa una incógnita tal y como el grado de contribución actual de derretimiento de hielo al caudal de las principales cuencas hidrográficas de las regiones. En el marco de la licitación llevada a cabo por la Dirección General de Aguas (DGA), el Laboratorio de Glaciología de CEAZA, con apoyo del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y el *Eidgenössische Technische Hochschule* (ETH) de Suiza, se desarrolló y ejecutó un proyecto para estudiar: i) el balance de masa y la descarga de agua de los glaciares Tapado, Bello, Yeso, Pirámide y San Francisco; ii) la dinámica superficial de los glaciares rocosos Tapado y Llano de las Liebres; y iii) la descarga de agua del glaciar rocoso Las Tolas. El estudio ha permitido entender de mejor manera el funcionamiento de estos cuerpos de hielo en relación a las condiciones climáticas, así como su importancia en los ciclos hidrológicos regionales. Con ello, se propone avanzar en el conocimiento nacional sobre la naturaleza de las reservas hídricas asociadas a masas de hielo, así como también a su potencial evolución futura.

El presente informe representa todos los resultados logrados hasta la etapa final del proyecto. En particular se exponen todas las mediciones, análisis y resultados de los datos obtenidos durante los años hidrológicos 2013-2014, 2014-2015 y del periodo entre octubre y diciembre del 2015, en las cuencas de los ríos Elqui y Maipo. Las actividades de terreno se realizaron entre octubre de 2013 y enero de 2016, en las cuales el personal de CEAZA ha instalado y mantenido los elementos necesarios para llevar a cabo el monitoreo y estudio de forma completa. Durante esta etapa del proyecto se ha mantenido una red de estaciones meteorológicas, balizas, cámaras fotográficas automáticas, sensores de temperatura, termistores de profundidad y fluviómetros, entre otros equipos. El instrumental mencionado permite contar con datos de buena calidad para cumplir con los objetivos propuestos en este proyecto y de esta manera comprender mejor la interacción entre el clima y los glaciares, además de develar su importancia en el ciclo hidrológico local.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo General*

Desarrollar e implementar un monitoreo meteorológico y fluviométrico continuo en cuencas de alta montaña, con la finalidad de aplicar modelos glacio-hidrológicos para aumentar el conocimiento acerca de la contribución hídrica de las masas de hielo ubicadas en los Andes del Norte Chico y Chile Central. Asimismo, se busca utilizar las variables registradas para realizar el balance de masa en los glaciares y determinar su evolución interanual en el periodo en estudio.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Instalar y mantener una red de monitoreo de variables meteorológicas en glaciares del Norte Chico y Chile Central para cuantificar la transferencia de energía entre la atmósfera y las masas de hielo.
- Cuantificar y comparar el aporte hídrico de los glaciares investigados a las cuencas del Elqui y Maipo.
- Estimar la escorrentía de derretimiento proveniente de glaciares, implementando y calibrando técnicas de aforo químico, y comparando dichas mediciones con aforos convencionales utilizando molinete.
- Utilizar modelos de acumulación y ablación para realizar el balance de masa y energía anual en glaciares.
- Analizar la sensibilidad de modelos de balance de masa utilizados.
- Comparar las respuestas de glaciares investigados a condiciones climáticas actuales.
- Instalar equipos fotográficos automáticos próximos a los glaciares con el fin de determinar variaciones de albedo, de la posición de la línea de nieve y la altura de la línea de equilibrio.
- Monitorear y analizar la estructura térmica de los glaciares rocosos investigados.

1.2 GLACIARES EN ESTUDIO EN EL NORTE CHICO

La zona de estudio tiene un clima semiárido, con precipitaciones bajas, fuertes variaciones diurnas en la temperatura y de la radiación solar, y una humedad relativa generalmente baja. El clima representa una transición entre el clima hiper árido del desierto de Atacama al norte, y el clima más mediterráneo al sur de la Zona Central de Chile. A gran escala la zona de estudio se encuentra bajo la influencia de la interacción de varios factores atmosféricos, oceánicos y orográficos que determinan la distribución espacial de los principales elementos del clima en gran parte de la zona cordillera en el Norte de Chile (Garreaud, 2009; Kalthoff et al., 2002). Los principales factores son: el Anticiclón del Pacífico, la Corriente de Humboldt y la compleja topografía. Esta última se caracteriza por la presencia de los valles transversales (de oeste a este) y el macizo de la Cordillera de los Andes. El Anticiclón del Pacífico corresponde a un sistema semipermanente de altas presiones situado cerca de los 35°S, 90°O en enero y los 25°S, 90°O en julio (Kalthoff et al., 2002). Esta situación produce un flujo de masas de aire del suroeste hasta aproximadamente 10 km costa afuera. Debido a lo persistente de este sistema de circulación atmosférica anti ciclonal, se produce el bloqueo casi permanente de los sistemas frontales causantes de las precipitaciones, lo que genera y da forma al carácter semiárido de la zona. El efecto local del océano está restringido. Mientras cerca de la costa la corriente fría de Humboldt resulta en la formación de niebla costera, la cual penetra solamente hasta pocas decenas de kilómetros en el Valle de Elqui, y más al interior se observan cielos mayormente despejados. Sin embargo, en los años en que se presenta el fenómeno de El Niño y La Niña en el océano Pacífico se producen importantes anomalías climáticas en la cordillera: con El Niño, por ejemplo, las precipitaciones pueden duplicarse o, más aún, triplicarse (Fiebig-Wittmaack et al., 2012).

1.2.1 *Glaciar Tapado*

Glaciar de montaña ubicado en la parte superior del río La Laguna (30°08'32"S, 69°55'39"O). Comprende una extensión de 2,23 km², de los cuales 0,99 km² corresponden a la parte libre de detritos. El aporte de caudal de este glaciar va hacia el río La Laguna, el cual es importante afluente del río Elqui. Su exposición es principalmente sur y la parte superior del glaciar sobrepasa los 5500 m snm. Es uno de los glaciares mejor estudiados en la zona norte del país.

Para acceder a este glaciar se debe tomar la ruta internacional CH-41 (Figura 1). Desde La Serena son 211 km hasta el desvío que sale del camino internacional y se interna por un terreno irregular mediante una huella que es apta solo para vehículos 4x4. Se continúa por esta huella por unos 3 km hasta un punto en donde no es posible seguir por vehículo. Desde este punto hay que caminar por un sendero de montaña durante 2 horas, hasta el frente del glaciar descubierto que se encuentra ubicado a los 4700 m snm.

1.2.2 Glaciar rocoso Las Tolas

Al este del glaciar Tapado se ubica el glaciar rocoso activo Las Tolas ($30^{\circ}9'14''\text{S}$, $69^{\circ}54'41''\text{O}$). Su extensión es de $0,3 \text{ km}^2$ y se encuentra ubicado entre los 4250 y 4500 m snm. A este glaciar se accede por la ruta internacional CH-41 hasta el kilómetro 211 (Figura 1), en el cual hay que desviarse con dirección oeste y continuar por una huella por 3 km hasta el frente del glaciar rocoso.

1.2.3 Glaciar rocoso Llano de las Liebres

Es un glaciar rocoso activo de una extensión de $0,68 \text{ km}^2$, ubicado entre los 3600 y 4300 m snm. Se encuentra localizado al sur del glaciar Tapado en las cercanías de la Ruta 41-CH ($30^{\circ}15'1''\text{S}$, $69^{\circ}56'47''\text{O}$). Este glaciar ha sido estudiado desde 2009, midiéndose desplazamiento superficiales, temperaturas subsuperficiales y superficiales. Mediciones geofísicas mediante GPR revelaron que este glaciar posee un núcleo de hielo masivo con espesores que fluctúan entre los 15 a 30 m (DGA, 2012a).

El acceso a este glaciar rocoso se hace por la ruta internacional CH-41 hasta el kilómetro 199 (Figura 1), en donde se deja el vehículo y se continúa a pie por una escarpada ladera que conduce al frente del glaciar rocoso, desde el vehículo hasta el frente del glaciar rocoso es 1 hora de marcha aproximadamente.

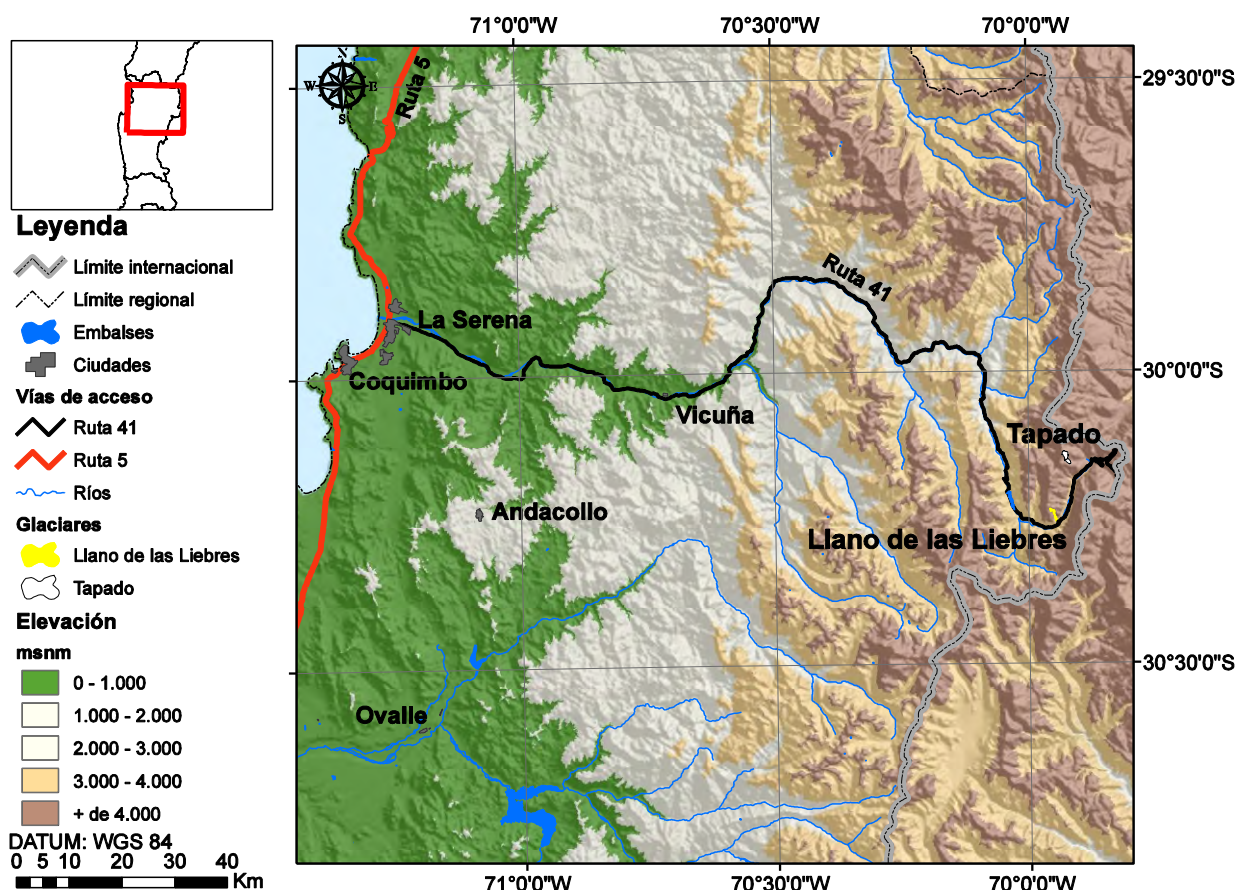


Figura 1. Mapa de acceso a glaciares Tapado y Llano de las Liebres.

1.3 GLACIARES EN ESTUDIO EN CHILE CENTRAL

En la Zona Central de Chile existe un ciclo anual de precipitación bien definido, caracterizado por un máximo invernal y un periodo estival con un monto significativamente menor que va aumentando hacia el sur (Cartes, 2009). En la zona de la cordillera de los Andes se distinguen los climas Templados de tipo Mediterráneo con Estación Seca Prolongada y Frío de Altura tal como especifica la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). El primero se desarrolla prácticamente en todos los sectores bajos donde tienen lugar los principales cursos de aguas. Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. Los Andes registra una temperatura media anual de 15,2°C pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 27°C durante el día. Por los efectos del relieve, en el sector centro de la cuenca, se presentan áreas de mayor sequedad y montos menores de precipitación. En sectores más elevados, las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios anuales mayores.

Por otra parte, el clima frío de altura se localiza en la Cordillera de los Andes de Chile Central por sobre los 3000 m snm. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas, caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta cordillera (DGA, 2004). A altas altitudes, las precipitaciones líquidas solo ocurren durante tormentas convectivas ocasionales (Garreaud, 2009).

Otros autores (Miller, 1976) complementan esta descripción añadiendo características de climas semiáridos tales como una alta radiación, muy correlacionada con las temperaturas y la ausencia casi completa de precipitaciones en la estación seca, aunque muy concentradas en los meses de invierno (Ohlanders et al., 2013), con la excepción de tormentas de verano pertenecientes a fenómenos orográficos y una alta oscilación térmica tanto diaria como estacional (Barrett et al., 2009).

1.3.1 Glaciares Bello y Yeso

Ambos glaciares están ubicados en la cabecera del río Yeso y son los mayores contribuyentes de caudal de la estación fluviométrica localizada en el río el Yeso en Termas del Plomo. La cobertura de glaciares en la cuenca aguas arriba del glaciar Pirámide es de alrededor de 6,25 km² en donde el glaciar Bello contribuye con 4,21 km² y el glaciar Yeso con 2,03 km². Los glaciares Bello y Yeso son descubiertos, siendo muy probable que aporten con una importante cantidad de caudal al río Yeso en Termas del Plomo, dado su tamaño respecto al resto de glaciares que se ubican en las cercanías.

El acceso a estos glaciares se realiza por el sector de Termas del Plomo (Figura 2), desde donde hay que caminar en dirección norte por el estero Yeso por 6 horas para llegar al frente de los glaciares Yeso y Bello. En este punto se puede ingresar al glaciar Bello caminando por sus morrenas centrales. Ingresar al glaciar Yeso por tierra es complejo y peligroso, ya que su fuerte pendiente y grietas presentes hacen que esta maniobra sea riesgosa, por lo que solo se ingresa vía aérea.

1.3.2 Glaciar San Francisco

Glaciar ubicado en las inmediaciones de la Monumento Natural el Morado en la cuenca del río Maipo. De exposición sur, este glaciar presenta importantes acumulaciones de nieve en invierno, siendo importante reserva de agua en verano. Mediciones de balizas en el periodo hidrológico 2012-2013 mostraron que incluso en el mes de diciembre existe nieve sobre el glaciar, cuando en los alrededores y en el valle esta ha desaparecido. Es una de las cuencas mejor controladas por la DGA con una estación fluviométrica operando actualmente en el Estero Morales y una estación meteorológica en el valle de la cuenca de operación anual. A esto se le suman dos estaciones meteorológicas de uso estival que fueron instaladas por la Universidad de Chile (DGA, 2012b).

Es un glaciar de acceso complejo dada sus abundantes grietas y cascadas, así como por las avalanchas que se producen debido a la inestabilidad de la nieve que se deposita en las laderas. El traslado debe realizarse mediante el uso de helicóptero para evitar los riesgos mencionados arriba (Figura 2).

1.3.3 Glaciar Pirámide

Cuerpo cubierto de detritos que se ubica en un valle limítrofe con Argentina. Este glaciar contribuye al río el Yeso desembocando de manera dispersa en el estero ubicado en el valle del estero Yeso en varios cauces. Los primeros aforos realizados por la Universidad de Chile (DGA, 2012b) indican que el estero Pirámide aporta con cerca del 38% del caudal registrado en el río Yeso en Termas del Plomo en verano. Su área es de 4,39 km² y su parte más baja se localiza en 33°36'36"S, 69°54'22"O.

Los cauces nacientes del glaciar Pirámide presentan distinta concentración de material suspendido lo que sugiere una compleja dinámica dentro de él, tanto de flujos sub-superficiales como superficiales. Su acceso es simple desde el punto de vista logístico cuando no se presenta nieve. En invierno es posible identificar sectores de riesgo de avalanchas.

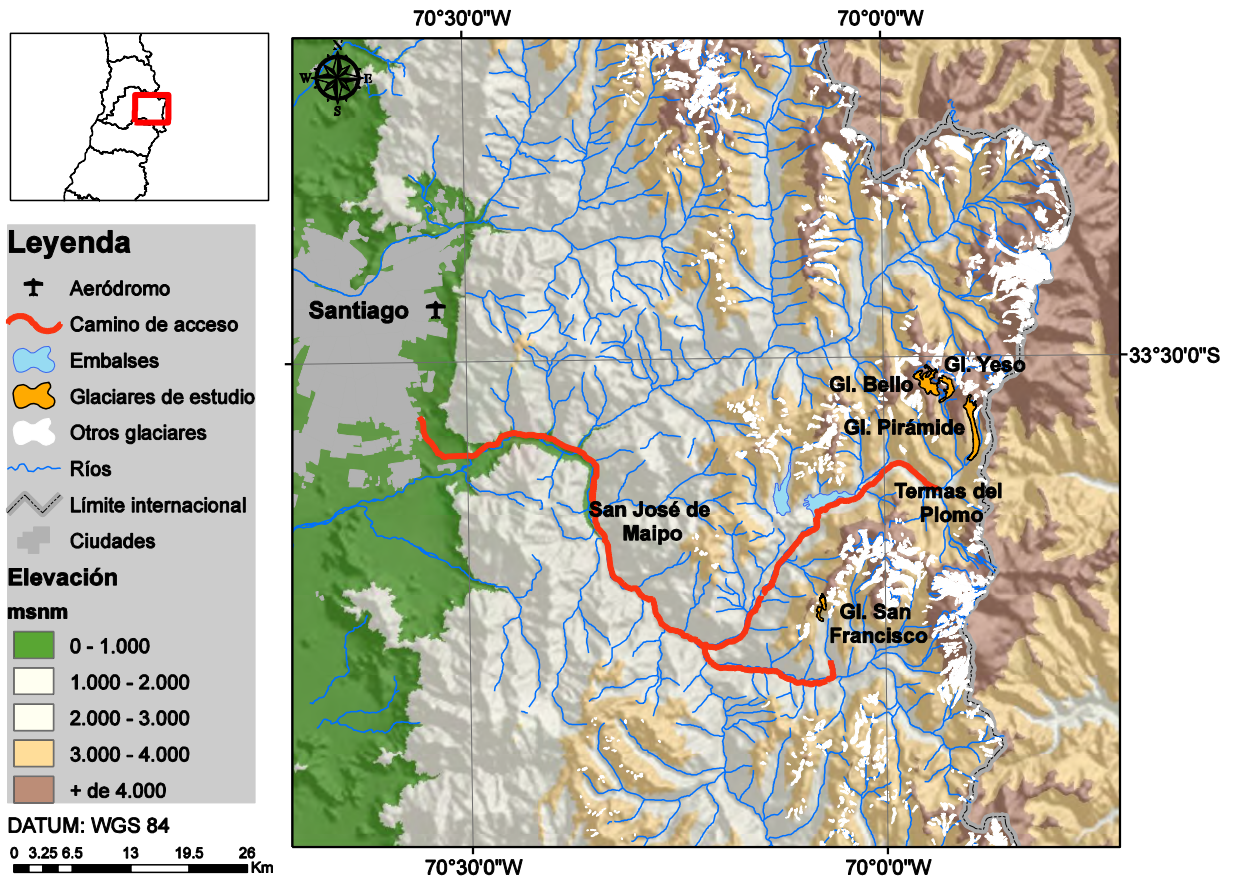


Figura 2. Mapa de acceso a glaciares de Chile Central.

2. METODOLOGÍA

2.1 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO

El balance de masa es un indicador de la relación existente entre el clima y el glaciar, es decir, que las variaciones climáticas resultan en cambios directos sobre la superficie del glaciar, sea por variaciones en las tasas de acumulación de nieve o de ablación de nieve y hielo. En contraste, la respuesta dinámica de un glaciar a las variaciones climáticas, es decir, el retroceso o avance de un glaciar ocurre cuando sucede un periodo prolongado de balance de masa negativo o positivo y con un desfase en el tiempo en relación a los cambios climáticos.

El balance de masa (b) de un glaciar representa el equivalente de agua que gana o pierde un glaciar en un tiempo y punto determinado, la cual se expresa en metros de agua equivalente (m a.e). En términos simples, es la diferencia entre la cantidad de agua depositada en forma de nieve y la cantidad de agua perdida por ablación (derretimiento, sublimación, erosión, desprendimiento del frente) en la superficie del glaciar durante un periodo de tiempo determinado (dt). Matemáticamente el balance de masa b en un punto x del glaciar se puede explicar con la ecuación siguiente (Kaser et al., 2003):

$$b(x) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{b}(x,t) dt \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde $\dot{b}$ es la tasa de balance de masa en tiempo. Generalmente se mide el balance de masa *anual* de un glaciar, a lo largo del año hidrológico, o sea, desde el inicio del invierno hasta el final del verano. Por convención el año hidrológico en el hemisferio se define desde el 1 de mayo al 31 de abril. En regiones donde el clima tiene un fuerte carácter estacional, tal como en la Cordillera de los Andes del Norte Chico y de Chile Central, la acumulación de nieve ocurre en su mayoría durante el invierno y la ablación ocurre en gran parte en el verano. Así el balance de masa anual del glaciar se puede explicar de la siguiente forma:

$$b_n = b_w + b_s = c_t + a_t \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde b_n es el balance neto, b_w el balance de invierno, b_s el balance verano, c_t la acumulación y a_t la ablación total. En realidad puede ocurrir un poco de ablación durante el invierno y también un poco de acumulación durante el verano, lo que hace que $b_w < c_t$

y $b_s < a_t$, pero no afecta al cálculo del balance neto a lo largo del año hidrológico. El balance de masa puede medirse entre fechas fijas, como al inicio y fin del año hidrológico (sistema de fechas fijas, en inglés: *'fixed date system'*). El otro método conocido como el método estratigráfico (en inglés: *stratigraphic method*), define el balance de masa en relación con la estratigrafía de la nieve, identificando el horizonte en el manto de nieve que corresponde a la capa que se formó al fin del verano anterior, independientemente de la fecha calendario asignada a esta. En la práctica, en la mayoría de los estudios de campo se ocupa un sistema combinado con estos dos métodos (Mayo et al., 1972).

En este informe se ocupa el sistema combinado, es decir, que el balance de invierno se mide en referencia con la capa dura (que en la mayoría de los casos es hielo), interpretada como la que se formó al fin del verano anterior, pero visitando el glaciar como mínimo 3 ocasiones por temporada.

Un glaciar de valle típico puede ser separado en una zona de acumulación más alta, donde el balance de masa anual es positivo, y una zona más baja donde el balance anual es negativo, siendo ambas zonas separadas por la *línea de equilibrio* donde el balance es cero (Figura 3).

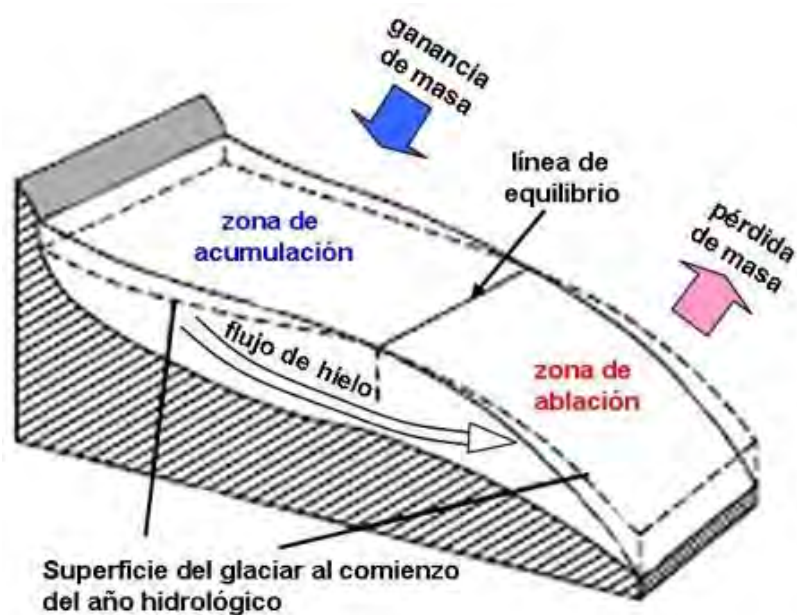


Figura 3. Balance de masa de un glaciar de valle típico. En la zona de acumulación se gana más masa de la que se pierde, mientras en la zona de ablación se pierde más masa de lo que se gana en un año. La línea de equilibrio es el lugar donde el balance es cero.

El gradiente vertical del balance ($GVB = db/dz$ en mm a.e. m^{-1}) representa la evolución del balance en función de la altitud del glaciar. El GVB, llamado también coeficiente de

actividad del glaciar (Hooke, 2005) es de valor elevado en la zona baja de los glaciares tropicales, donde depende de los procesos de ablación: sobrepasa generalmente los 10 mm m⁻¹ y se ubica muchas veces cerca de los 20 mm m⁻¹ (Francou y Pouyand, 2004). Sin embargo, presenta una disminución en la zona alta del glaciar, ya que allí depende sobre todo del régimen de acumulación, que varía con la altura y la topografía (orientación, vientos dominantes, avalanchas, etc.). El GVB resulta en un flujo de hielo desde la parte alta hacia la parte baja de un glaciar común. El flujo actúa como compensación debido a la pérdida de masa en la parte inferior del glaciar (Figura 3).

El método glaciológico o directo (Ostrem y Brugman, 1991) para la medición del balance de masa se basa en mediciones de espesor y densidad de nieve, con el objeto de estimar la acumulación y cambios topográficos en balizas insertadas en la superficie del glaciar que, a su vez, ayudan a calcular la ablación en un punto determinado del cuerpo de hielo.

En los glaciares de la zona central y norte de Chile, las superficies son frecuentemente cubiertas de penitentes de nieve y hielo. En el glaciar Tapado los penitentes pueden alcanzar los dos metros de altura y en menor medida en los glaciares de la zona central. En este tipo de superficie, las tasas de ablación y espesor de nieve pueden variar mucho en un área pequeña, haciendo difícil de medir el balance de masa en un solo punto. Por lo anterior, se ha optado por calcular la cantidad de nieve acumulada en un punto específico. Para ello se mide la ablación con los cambios de emergencia en tres arcos de ablación instalados en la sección inferior del glaciar descubierto Tapado, además de sacar el promedio del espesor de nieve en 9 sectores de muestra dentro de un cuadrilátero de aproximadamente 3 x 3 m en los dos extremos de los marcos. Adicionalmente se instala un marco de ablación asociado a un sensor de distancia ultrasónico (SR50) en la mitad de la estaca, en los glaciares cubierto Tapado, Bello, San Francisco, Yeso y Pirámide (Figura 4), ésta debe tener como mínimo de altura de 50 cm sobre la superficie. Cada arco instalado consiste en dos estacas de aluminio verticales insertada a ~4 m en el glaciar y separadas entre sí por una distancia (D) de 3-4 m. A su vez, se encuentran unidas por una estaca transversal (Figura 5).

A cada visita de los marcos instalados en el glaciar Tapado descubierto se mide la distancia vertical $z(x)$, entre la superficie y la estaca transversal, a cada 0,20 m a lo largo de la baliza ($x = 0, 0,20, \dots, D$), usando una sonda de avalancha graduada. Se calcula la emergencia promedio (Z) del arco como el promedio de los valores $z(x)$ y de las mediciones realizadas alrededor de los marcos. Los cambios topográficos se miden

de una visita a la otra como dZ/dt . Para los restantes marcos de ablación, los datos se obtienen mediante los registros del sensor SR50, cada 10 min (instantáneo) y cada 1 hora (promedio), lo que permite generar datos continuos de la ablación en ese marco.

El perfil de densidad del manto de nieve se midió en dos calicatas, una en el glaciar descubierto, la otra en el glaciar cubierto en el caso del Glaciar Tapado y una calicata en Bello y Pirámide, respectivamente, por temporada de análisis. La ubicación de los distintos puntos de observaciones se presenta en la Figura 12 en el Glaciar Tapado, en la Figura 20 en el caso del Glaciar Pirámide y en la Figura 27 para el Glaciar Bello.



Figura 4: Tipo de marco de ablación con sensor de distancia ultrasónico (SR50), instalado en el glaciar Yeso (15-10-2014).



Figura 5. Marco de ablación instalado cerca de la calicata en la zona descubierta del glaciar Tapado, además de la medición con GPS diferencial (23-10-2014).

Para extrapolar el balance a todo el glaciar se utilizan diversos puntos de medición (balizas, calicatas, sondeos de puntos intermedios) organizados en una red definida. El principio básico es de ponderar el balance medido en un punto por el área del rango relativo del glaciar (*Francoy y Pouyaud, 2004, p.7*), según la expresión:

$$B = \int_A b(x) dA \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde B es el balance neto del glaciar en unidades de volumen ($\text{m}^3 \text{ a.e.}$). Para facilitar la comparación entre distintos glaciares se ocupa el *balance específico* ($\bar{B}$):

$$\bar{B} = \frac{B}{A} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Este es el balance de masa puntual promedio en la superficie (m a.e.). Para este caso se omite el macrón sobre el B , y por convención B se refiere siempre al balance específico (B_n, B_w, B_s).

El método tradicional de extrapolación es de trazar contornos de igual valor a partir de las observaciones puntuales de balance de masa (*Ostrem y Burgman, 1991*). Esto requiere que las observaciones sean suficientes y bien distribuidas a la superficie del glaciar. El método es ideal para glaciares con superficie suave y de fácil acceso. Sin embargo, requiere un extenso trabajo para instalar y mantener la red de puntos de observación, por lo que no es el caso de los glaciares estudiados. La fuerte relación entre el balance de masa y la altitud hace que se pueda extrapolar un número más

limitado de observaciones puntuales del balance de masa al resto del glaciar, usando el gradiente vertical del balance (*Fountain & Vecchia*, 1999). En glaciares donde otros factores puedan influir sobre el balance de masa, tales como el sombreado topográfico, la redistribución de la nieve por el viento y la presencia de detritos sobre la superficie, este método simplificado puede no funcionar, como es el caso del glaciar Tapado, Pirámide y Bello. Por lo tanto, algunos autores han buscado relaciones con otras variables topográficas, tales como la radiación solar incidente potencial (*Young & James*, 1976). Las condiciones difíciles de acceso al glaciar Tapado (presencia de penitentes, fuerte pendiente en la parte media del glaciar, y la gran altura geográfica del lugar) sólo permitieron instalar tres marcos de ablación y en el caso de los glaciares Bello, Pirámide, Yeso y San Francisco, sólo se pudieron instalar a un costado de las estaciones meteorológicas. Por esta razón el método de contornos no se pudo aplicar. Por lo tanto, se realizaron relaciones estadísticas entre los factores topográficos (radiación, exposición, pendiente, altitud) y los valores del balance de masa para extrapolar las observaciones al resto de la superficie del glaciar Tapado y así calcular el balance de masa específico del glaciar (B). Las funciones utilizadas para extrapolar los datos del glaciar descubierto Tapado son:

$$b_w = \alpha + \beta_1 P + \beta_2 \sin A + \beta_3 R \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$b_s = \alpha + \beta_1 Z + \beta_2 R \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde α es el intercepto, β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes de la regresión, P es la pendiente en grados, $\sin A$ es el seno de la exposición, R es la radiación solar potencial (promedio diario) y Z es la altitud.

Para el caso de los glaciares de Chile Central, esto es, Bello y Pirámide, se decide ocupar el método de extrapolación de polígonos de Thiessen con la delimitación del glaciar. Este método se ha ocupado en otros glaciares aledaños como el Glaciar Echaurren (Wolaver, 1999) y en otros en el Norte Chico como el Glaciar Guanaco (CECS, 2012). Aunque no se recomienda usar métodos automáticos de SIG para realizar extrapolaciones con los datos medidos (Kaser et al., 2003); el uso de polígonos de Thiessen permite una primera aproximación hacia la distribución del balance de masa, la acumulación y la ablación. Esto permite que en futuros trabajos se pueda discutir métodos más cercanos a la realidad de cada uno de los glaciares analizados. Adicionalmente, la red de puntos permite el uso de esta metodología por sobre otras (por ejemplo, pendiente, krigging, IDW2, etc.).

2.2 BALANCE DE MASA GEODÉSICO

El balance de masa geodésico es un método complementario al balance de masa tradicional (Cogley, 2009), el cual se basa en la comparación de dos Modelos de Elevación Digital (MED) adquiridos en un glaciar durante un periodo de tiempo determinado (Fischer, 2011). La sumatoria de las diferencias de elevación en todo el glaciar es equivalente al cambio de volumen de hielo, siendo posteriormente convertido a balance de masa asumiendo una densidad de hielo de 900 kg m^{-3} .

Los MEDs requeridos por este método pueden ser generados por medio de diferentes técnicas, entre las que se pueden nombrar: LIDAR, GPS, interferometría de radar, fotogrametría aérea y satelital. La fotogrametría satelital permite la generación de MED que abarcan grandes superficies, pero su uso normalmente se ve restringido por su resolución espacial. Sin embargo, Berthier et al. (2004) demostraron que es posible medir de manera precisa cambios de elevación en un glaciar mediante imágenes satelitales de mediana resolución (15 m), como son los sensores SPOT y ASTER.

2.2.1 Generación de MED satelitales

El sensor ASTER, el cual está a bordo del satélite TERRA, tiene capacidades estereoscópicas al tomar dos imágenes de un lugar desde distintos ángulos durante su recorrido orbital. Estas imágenes cubren un área de $60 \times 60 \text{ km}$, con una resolución de 15 m y con una relación base/altura de 0,6. Las imágenes satelitales utilizadas para la generación de los MEDs consisten en 4 pares de imágenes estéreo (Tabla 1). Estas imágenes fueron seleccionadas respondiendo a criterios de disponibilidad, ausencia de nubes y representatividad de los cuerpos de hielo en cuestión. Sin embargo, las fechas utilizadas no son coincidentes con las fechas utilizadas en los balances de masa glaciológicos, por lo que cualquier comparación tiene que realizarse con cautela.

Tabla 1. Listado de imágenes ASTER estéreo utilizadas

Fecha	Región	ID
27/02/2014	Chile Central	ASTL1A 1402271445141402280145
5/05/2015	Chile Central	ASTL1A 1505051445351505069027
22/03/2014	Tapado	ASTL1A 1403221450181403240294
19/12/2014	Tapado	ASTL1A 1412191450261412209076

Se utilizó un único ajuste de bloque multitemporal mediante un mínimo de 4 puntos de control (X, Y, Z), los cuales fueron seleccionados en cada región, además de varios

puntos de enlace distribuidos por todas las imágenes (Tabla 2). Esto permite que se calculen de manera simultánea todos los modelos geométricos de las imágenes, vinculándolos todos en conjunto. Adicionalmente, los modelos de elevación generados para cada fecha presentan una mejor exactitud relativa y una mayor consistencia entre las fechas, permitiendo obtener una señal más clara de los cambios de elevación (Soruco et al., 2009). De esta manera se logra eliminar posibles desajustes entre los MEDs de la misma región, generando un único bloque ajustado para 2 pares de imágenes estéreo. La evaluación de la triangulación indica valores menores a un pixel de exactitud en los modelos (Tabla 2).

Tabla 2: Valores de ajuste para los bloques de imágenes

Región	Imágenes	Puntos de control y enlace ()	Triangulación RMSE
Chile Central	2 pares estéreo	4 (20)	0,011
Tapado	2 pares estéreo	5 (100)	0,003

Posteriormente, se generaron mediante técnicas fotogramétricas 2 MEDs por región. Estos MEDs fueron evaluados individualmente para detectar posibles errores en los valores de altura. Se evaluaron las diferencias de elevación en lugares estables fuera de los glaciares para determinar posibles sesgos. Estas diferencias arrojaron valores promedio cercanos a 0 m, lo cual indica que los MEDs generados están adecuadamente ajustados y no presentan desviaciones importantes. Posteriormente, se calcularon los cambios de elevación promedios por bandas de elevación cada 100 m. Asumiendo una distribución gaussiana de los datos centrada en el promedio, la incertidumbre en los cambios de elevación es reducida sustancialmente valores inferiores a 1 m (Berthier et al., 2004).

2.3 MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO

El albedo es la fracción entre la radiación solar reflejada y la radiación solar incidente, expresándose comúnmente en valores que oscilan entre 0 y 1 (sin unidades). Entre los diversos tipos y variedades de coberturas naturales, la nieve y el hielo presentan los más altos valores de albedo, por lo que pequeños cambios en el albedo de estas coberturas pueden significar un gran impacto en su balance de energía (Cuffey y Paterson, 2010).

El albedo de la nieve fresca es generalmente alto ($\sim 0,8$) en comparación a las demás coberturas naturales, pero va declinando con el paso del tiempo, alcanzando valores bajos en hielo con detritos ($\sim 0,2$). A medida que el tamaño de los granos de la nieve se incrementa, tanto en nieve con derretimiento y sin derretimiento, el albedo se va

reduciendo. Como ejemplo, la Tabla 3 presenta el albedo que caracteriza distintas superficies de nieve y hielo.

Tabla 3. Albedo teórico para distintas superficies de nieve y hielo, en porcentaje (Cuffey y Paterson, 2010).

	<i>Intervalo</i>	<i>Promedio</i>
Nieve seca	80 – 97	84
Nieve húmeda	66 – 88	74
Neviza	43 – 69	53
Hielo limpio	34 – 51	40
Hielo ligeramente sucio	26 – 33	29
Hielo sucio	15 – 25	21
Hielo cubierto de detritos	10 – 15	12

El albedo en un punto en particular puede ser calculado mediante mediciones de radiación solar incidente y reflejada, usando un juego de radiómetros orientados hacia el suelo y cielo. Dicho albedo es un parámetro importante para el cálculo de balance de energía en un glaciar (Cuffey y Paterson, 2010; Hooke, 2005). Sin embargo, los valores puntuales de albedo necesitan ser distribuidos en la superficie de los glaciares, a modo de poder calcular el balance de energía de toda la superficie. Corripio (2004) desarrolló una metodología que permite relacionar los valores de albedo puntuales con los valores de reflectancia obtenidos desde una cámara fotográfica. Algunas experiencias recientes ocupando esta metodología son en el Glaciar Pichillancahue (Rivera et al., 2008) y en el Glaciar Tapado durante la temporada de ablación 2011-2012 (DGA, 2012a).

2.3.1 Albedo distribuido

Tres equipos fotográficos secuenciales Harbortronics fueron instalados en las cercanías de los glaciares Tapado, Bello y Pirámide. El equipo secuencial consiste en una cámara CANON modelo EOS digital Rebel XS (22,2 x 14,8 mm de dimensiones del sensor), un disparador electrónico Digisnap, una batería de litio y un panel solar de 12 volts. Las cámaras fueron enfocadas hacia los glaciares con una distancia focal de 18 mm. Las fotografías diarias fueron tomadas a las 13:00 horas, almacenando las imágenes en el formato nativo de la cámara (*.CR2). Se transformaron todas las fotografías de las 13:00 horas a formato *.TIF para el posterior procesamiento. Adicionalmente, la resolución original de las fotografías se redujo en un 50% para acelerar el procesamiento, no evidenciándose cambios en los resultados finales.

La transformación de las fotografías digitales en valores de albedo espacial consiste en dos partes principales. La primera parte consiste en la georeferenciación de la fotografía oblicua, mediante la aplicación de una proyección perspectiva de la fotografía sobre un MED del área de estudio. Para esta transformación es necesario conocer: (1) La posición de la cámara fotográfica en coordenadas UTM (x,y) y la elevación de la misma (z), la resolución de la imagen y la distancia focal. (2) La posición del punto central de la imagen en coordenadas UTM (x,y) y su elevación (z). Una vez establecida la relación entre cada pixel de la imagen y el DEM, la imagen es georeferenciada en el mismo sistema espacial de referencia (WGS 1984 UTM huso 19S).

La segunda parte consiste en la transformación de la imagen georeferenciada en valores de albedo, mediante datos meteorológicos obtenidos desde la estación meteorológica instalada en el glaciar. Para la transformación de los valores digitales de la imagen en valores de albedo son necesarios: (1) El albedo puntual, temperatura, humedad relativa, fecha y hora de captura de la imagen. (2) las coordenadas de la estación meteorológica. (3) una imagen que contenga la transmitancia de la atmósfera (valores estimados usando un modelo de transferencia radiativa como MODTRAN) para cada pixel del MED. (4) un mapa de visibilidad del cielo para cada pixel del MED. (5) los ángulos entre la posición de la cámara y la normal a la superficie para cada pixel del MED.

2.3.2 Mapeo de la línea de nieve y estimación de la línea de equilibrio

El set completo de fotografías georeferenciadas se empleó para delinear manualmente el límite visible entre la nieve o neviza y el hielo mediante una plataforma SIG. Adicionalmente, se ocuparon imágenes satelitales Landsat 7 y 8 para completar algunos días en que la línea de nieves se encontraba fuera del ángulo visual de la cámara. Para estimar la línea de equilibrio de los glaciares analizados, se consideró que la última línea de nieve al final del verano corresponde con la línea de equilibrio glaciar para dicha temporada (Chinn, 1995).

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA

El modelo de balance de energía consiste en un conjunto de ecuaciones que caracterizan los procesos de intercambio de energía más relevantes para superficies de hielo y nieve (Tabla 4). Usando un modelo de balance de energía, es posible evaluar el resultado de procesos que también influyen en el balance de masa, tales como la fusión, la sublimación y el recongelamiento sobre superficies glaciales o al interior de la cobertura

nival. De esta manera, a partir de la acumulación nival y el balance de energía es posible cerrar el balance de masa; sea en forma puntual (por ejemplo: Pellicciotti et al. (2008) y MacDonell et al. (2013)) o distribuida (Arnold et al., 2006; Hock y Holmgren, 2005; Mölg et al., 2008).

El modelo utilizado en este estudio fue escrito y ejecutado en el software MATLAB y fue desarrollado en base a los códigos y rutinas usadas por Reid y Brock (2010), Reid et al. (2012), Brock y Arnold (2000), Pellicciotti et al. (2005, 2008, 2009) y Carenzo (2012). En estos trabajos se escribieron las rutinas para el modelamiento de los flujos de energía radiativos, los flujos de energía turbulentos y los flujos de energía conductivos en los detritos, la cobertura nival y el perfil de hielo. Durante este estudio se agregaron los módulos de sublimación de nieve en saltación y suspensión y el flujo de agua al interior de la cobertura nival.

Las ecuaciones del balance de energía son resueltas en pasos de tiempo de 10 minutos en los sitios de Tapado y San Francisco, mientras que en los glaciares de Yeso, Bello y Pirámide se usaron pasos de tiempo de 1 hora. Sin embargo, en ambos casos fue necesario resolver un sub-paso de tiempo de 30 segundos para evitar inestabilidades numéricas. Mientras que para los 3 m más cercanos a la superficie se utilizó una discretización de 25 mm, para las secciones más profundas del hielo glaciar se usó una discretización de 3 m hasta llegar a los 15 m. A esta profundidad se utilizó una condición de borde para la temperatura de -5°C . Los resultados obtenidos fueron posteriormente validados mediante el uso de estacas de ablación, sensores de la superficie de nieve y temperaturas superficiales.

Para calcular un balance de energía es necesario medir o estimar varios parámetros y propiedades de la cobertura nival, el hielo glaciar, los detritos que cubren la superficie y la superficie misma. En este estudio, los valores de rugosidad superficial aerodinámica y densidad de nieve o hielo fueron estimados en base a las observaciones disponibles y a los valores sugeridos en la literatura (Tabla 5). Para el modelamiento del balance de energía sobre glaciares cubiertos se usó una conductividad, calor específico y densidad de detritos de $0.94 [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$, $948 [\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$ y $1496 [\text{kg m}^{-3}]$, respectivamente (Reid y Brock, 2010).

La disponibilidad de energía depende del balance de los flujos de calor radiativos de onda corta (Q_i) y larga (L), flujos turbulentos sensibles (Q_H) y latentes (Q_E) y flujos de calor sub-superficiales (Q_S), de acuerdo a:

$$Q_M = Q_I + L + Q_H + Q_E + Q_S \quad \text{Ecuación (7)}$$

En la Ecuación (7), Q_M es la energía disponible para fusión, proceso que ocurrirá cuando existe un superávit neto de energía; mientras que un déficit neto llevará a procesos de acumulación por depositación directa de hielo a través de flujos positivos de calor latente (de haber agua disponible). A la inversa, ocurrirán procesos de sublimación cuando los flujos de calor latente sean negativos. Algunos de los módulos más importantes del modelo de balance de energía son:

2.4.1 Radiación neta

El flujo total de radiación corresponde a la suma de la radiación neta de onda corta (Q_I) y los flujos de radiación neta de onda larga (L). La radiación de onda corta ($K\downarrow$) incidente sobre una superficie horizontal se mide directamente en cada estación meteorológica automática. Por otro lado, el valor de $K\uparrow$ también es medido y permite calcular el albedo. Para calcular el flujo neto de radiación de onda larga (L), se comparó la radiación de onda larga incidente ($L\downarrow$) con la radiación de onda larga emitida ($L\uparrow$). La temperatura superficial puede ser estimada a partir de la radiación de onda larga mediante la ley de Stefan-Boltzman:

$$L \uparrow = \sigma \epsilon_s T_s^4 \quad \text{Ecuación (8)}$$

donde: σ es la constante Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); ϵ_s corresponde a la emisividad de la superficie (1,0); y T_s es la temperatura de la superficie (K).

2.4.2 Intercambio de calor turbulento

Los flujos turbulentos de calor fueron modelados por medio de un método "bulk" que usa mediciones de temperatura del aire y presión de vapor. Los flujos de calor sensible (Q_H) y latente fueron calculados por medio de las ecuaciones siguientes:

$$Q_H = \rho_{aire} c_p k^2 u \frac{(T_a - T_s)}{\left(\ln\left(\frac{z_h}{z_0}\right) - \Psi_m\right) \left(\ln\left(\frac{z_h}{z_{0t}}\right) - \Psi_h\right)} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$Q_L = \rho_{aire} \omega L_v k^2 u \frac{(e_a - e_s)/P_a}{\left(\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right) - \Psi_m\right) \left(\ln\left(\frac{z_m}{z_{0e}}\right) - \Psi_h\right)} \quad \text{Ecuación (10)}$$

dónde: ρ_a es la densidad del aire; c_p es el calor específico del aire a presión constante ($1.010 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); k es la constante de von Karman (0,4); u es la velocidad del viento;

T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) a una altura z_h (m); T_s es la temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{C}$); Ψ_m y Ψ_h son las correcciones de estabilidad atmosférica; ω es el radio del peso molecular del vapor de agua y el aire seco (0,622); e_a es la presión de vapor de agua en el aire (hPa) a una altura z_m (m); e_s es la presión de vapor en la superficie (asumiendo que la capa de aire en contacto con la superficie está saturado) (hPa); P_a es la densidad del aire a nivel medio del mar ($1,29 \text{ kg m}^{-3}$); L_v es la constante de calor para la evaporación ($2,514 \text{ MJ kg}^{-1}$), valor que es reemplazado por la constante de calor para sublimación, L_s ($2,848 \text{ MJ kg}^{-1}$) en caso de que T_s esté bajo el punto de fusión; z_0 es la longitud de la rugosidad para el intercambio de momentum; z_{0t} es la longitud de la rugosidad para el intercambio de temperatura y z_{0e} es la longitud de la rugosidad para el intercambio de humedad. A estas ecuaciones, se agregaron las correcciones de estabilidad de Monin-Obukhov (Monin y Obukhov, 1954).

2.4.3 *Flujos de energía en el subsuelo y temperatura de superficie*

El flujo de energía en el subsuelo (Q_s) se obtiene del balance entre la radiación de onda corta que penetra la superficie (Q_{PS}) y el flujo de calor conductivo. El monto de Q_{PS} se estima usando un decaimiento exponencial según las ecuaciones detalladas en Bintanja y Van den Broecke (1995). El flujo de energía en el subsuelo es entonces calculado como una función de la conductividad y el calor específico del material (nieve, hielo o detritos).

La temperatura de superficie se calcula por medio de un proceso iterativo, tal que T_s llega a un valor en donde la radiación neta es igual a los flujos de calor turbulentos y a los flujos de calor del subsuelo. Si la temperatura resultante es mayor que el punto de fusión, entonces la energía adicional corresponde al calor latente de fusión.

Tabla 4: Módulos de cálculo del modelo de balance de energía

Módulo	Método de cálculo o referencia
Sublimación de nieve en saltación y suspensión	Modelos PBSM (Prairie blowing snow model) y Snowmodel [Pomeroy <i>et al.</i> , 1993; Liston y Sturm, 1998]
Flujos turbulentos	Teoría de similitud de Monin-Obukhov [Monin y Obukhov, 1954; Carenzo, 2012; Dadic <i>et al.</i> , 2012]
Flujos de calor internos en la capa de detritos	Basado en el balance de energía descrito en Reid y Brock (2010) y Reid <i>et al.</i> (2012)
Penetración de la radiación de onda corta en la cobertura nival	Bintanja y Van den Broecke (1995)
Flujos de agua al interior de la cobertura nival	Basado en Essery <i>et al.</i> (2013)

Tabla 5: Criterios para calcular la rugosidad superficial y espesor de detritos en cada sitio de estudio

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Rugosidad superficial aerodinámica	Espesor de detritos
Norte	Tapado	Alto	Basado en los datos de marcos de ablación. El valor cambia desde 1 mm hasta 200 mm para simular la formación de penitentes. El valor de 200 mm para penitentes es extraído de Wagnon <i>et al.</i> (1999)	-
		Cubierto	20 mm [Reid y Brock, 2010]	0,3 m (medido)
Central	Pirámide		Nieve = 1 mm (valor estándar) Detritos = 20 mm [Reid y Brock, 2010]	0,15 m (medido)
	San Francisco		Nieve = 1 mm (valor estándar) Hielo = 2 mm [Reid y Brock, 2010]	-
	Bello		Nieve = 1 mm (valor estándar) Hielo = 2 mm [Reid y Brock, 2010]	-
	Yeso		Nieve = 1 mm (valor estándar) Hielo = 2 mm [Reid y Brock, 2010]	-

2.5 MEDICIONES DE CAUDALES

Para evaluar la contribución de los glaciares al caudal de los ríos, se realizaron mediciones de caudales a las salidas de los glaciares y glaciares rocosos. La medición de caudal es un buen complemento de las mediciones glaciológicas tradicionales para estimar el balance de masa de cada glaciar. Se realizaron aforos por lo menos una vez cada dos meses de cada verano en cada una de las cuencas, para complementar mediciones realizadas previamente. Ya que el flujo saliendo de los exutorios de los glaciares presenta alta turbulencia, el método velocimétrico puede sufrir reducciones en su precisión. Por consiguiente, se utilizó la metodología de aforo mediante trazadores químicos para estimar el caudal a partir de la conductividad eléctrica del agua, previa inyección de una masa conocida de cloruro de sodio (NaCl). El flujo de agua saliendo del glaciar rocoso Tapado es bastante constante durante el día. En este caso también se usará el método de aforo químico para la medición del caudal, ya que experiencias anteriores durante el verano de 2010 demostraron un buen desempeño en este mismo sitio. Se instalaron sensores automáticos ('divers') de altura de agua en los exutorios principales de cada glaciar. Dichos sensores también miden de manera continua la temperatura y la conductividad del agua, permitiendo identificar efectos de congelamiento sobre el sensor de presión. Se calcularon caudales a partir de las alturas de agua medidas por los sensores, combinadas con las curvas de descarga obtenidas a partir de las campañas de aforo. La medición continua otorgada por los sensores de altura de agua permite analizar el ciclo diario de caudales, así como también los efectos de la nubosidad y otros factores sobre el almacenamiento de agua en los glaciares. En el caso del glaciar Pirámide, el caudal aportado por su derretimiento es calculado como la diferencia de los valores medidos en el río Yeso en Termas del Plomo y del estero Bello; lo anterior, por cuanto no existe un único cauce de sección regular que conduzca las aguas del glaciar.

2.6 MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO

2.6.1 Descripción del modelo TOPKAPI-ETH

El modelo hidrológico TOPKAPI (del inglés *TOPographic Kinematic APproximation and Integration*) fue desarrollado originalmente por los equipos del Prof. E. Todini en la Universidad de Bolonia y Cinza Mazzetti en la compañía italiana PROGEA (Ciarapica y Todini, 2002; Liu y Todini, 2002). Desde sus primeras versiones, TOPKAPI trabaja de forma completamente distribuida en el espacio e incluye parametrizaciones explícitas de los principales procesos físicos del ciclo hidrológico. Su principal característica es el uso del modelo de onda cinemática y el coeficiente de Manning para simular el flujo superficial horizontal. De esta manera el modelo permite simular la hidrología de una cuenca mediante embalses cuyos coeficientes pueden ser derivados de propiedades físicas.

El modelo usado en este estudio corresponde a una mejora importante de la versión original y fue desarrollado en el grupo de Hidrología y Manejo de Recursos Hídricos (HWRM) del Instituto de Ingeniería Ambiental (IfU) del Instituto Tecnológico Federal de Zúrich (ETH-Zurich) (Fatichi et al., 2014; Paschalis et al., 2014; Ragettli y Pellicciotti, 2012). Esta versión es denominada TOPKAPI-ETH. Como resultado de los cambios realizados el modelo incluye ahora las siguientes funcionalidades:

- Considera la cobertura nival y los glaciares descubiertos y cubiertos.
- Puede ser operado en computadores de capacidad estándar con tiempos de simulación razonables.
- Incluye estructuras artificiales como embalses y extracciones.
- Incluye procesos geomorfológicos como transporte de sedimentos, erosión de laderas y deslizamientos de tierra.

Cada celda del modelo está dividida en los siguientes compartimentos de agua: un compartimento superficial, un compartimento sub-superficial sujeto a evapotranspiración, un compartimento sub-superficial no sujeto a evapotranspiración y un almacenamiento subterráneo opcional. El flujo entre los compartimentos es modelado de acuerdo a un conjunto de ecuaciones no lineales. La evapotranspiración es calculada usando la ecuación de Makkink (de Bruin y Lablans, 1998).

Uno de los módulos más importantes añadidos recientemente al modelo TOPKAPI-ETH es el módulo de nieve y glaciares. Estos módulos incluyen:

- El modelo de derretimiento ETI para nieve y glaciares (Pellicciotti et al., 2005).

- El derretimiento de glaciares cubiertos mediante una parametrización análoga al modelo ETI (Carenzo et al., 2015).
- El flujo de hielo glaciar (Ragettli, 2014).
- El flujo de agua de derretimiento al interior del glaciar (Hock, 2005)
- El modelo resuelve en cada iteración el balance de masa de cada celda generando flujos de agua superficiales y subterráneos. Los flujos superficiales son entonces dirigidos hacia las celdas inferiores y a los cauces mediante el uso de la onda cinemática.

Al incorporar el modelo ETI en TOPKAPI-ETH se realiza la combinación de modelos expresada en las bases del presente proyecto.

El modelo TOPKAPI-ETH ya ha sido usado en la zona de los Andes semiáridos de Chile central, principalmente por el trabajo de doctorado de Silvan Ragettli en el ETH-Zurich (Ragettli, 2014; Ragettli y Pellicciotti, 2012; Ragettli et al., 2013). En este trabajo se construyó el modelo para la cuenca del río Juncal en embalse Hornitos.

Para la aplicación del modelo TOPKAPI es necesario realizar los siguientes pasos preliminares:

- Cálculos de las propiedades topográficas a partir del modelo de elevación digital (DEM): aspecto, pendiente y la fracción de cielo visible de cada celda (SVF, sky view factor).
- Cálculo de los cauces principales a partir de las propiedades topográficas y comparación con los cauces reales.
- Definición de unidades espaciales: Es necesario definir la distribución espacial de las unidades hidrológicas más importantes. En este caso, las unidades más importantes son el área glaciar, el área glaciar cubierta por detritos, los tipos de suelos y el uso de suelos.

TOPKAPI-ETH sólo necesita como variables de entrada la precipitación, temperatura y cobertura de nubes promedio diaria. La radiación de onda corta potencial incidente es calculada internamente por TOPKAPI-ETH usando el DEM y el SVF. Para calcular la radiación de onda corta efectiva se multiplica esta última variable por la cobertura de nubes promedio diaria.

Una vez terminadas estas etapas preliminares de construcción del modelo fue posible realizar la calibración y validación. Para esto se siguió la metodología detallada en la Figura 6 la cual está basada en el trabajo realizado por Ragettli y Pellicciotti (2012) y Ragettli et al. (2014). El principio seguido es calibrar los parámetros que definen cada

proceso hidrológico por separado cada vez que se cuente con un set de datos independientes. Por ejemplo, los parámetros que controlan el derretimiento en TOPKAPI-ETH, a través del modelo ETI, son calibrados usando solamente los resultados del modelo de balance de energía. Otro ejemplo corresponde a los parámetros que controlan el decaimiento del albedo, los cuales son calibrados usando solamente los datos de las estaciones meteorológicas. De esta forma es posible solucionar en parte el problema de la equifinalidad de los modelos hidrológicos (Beven, 2001; Kirchner, 2006). La última etapa corresponde a la calibración de los parámetros que no son medidos en terreno, tales como el espesor y la conductividad de las distintas capas de suelo. Esta etapa fue realizada de forma manual mediante el uso de las mediciones de caudal.

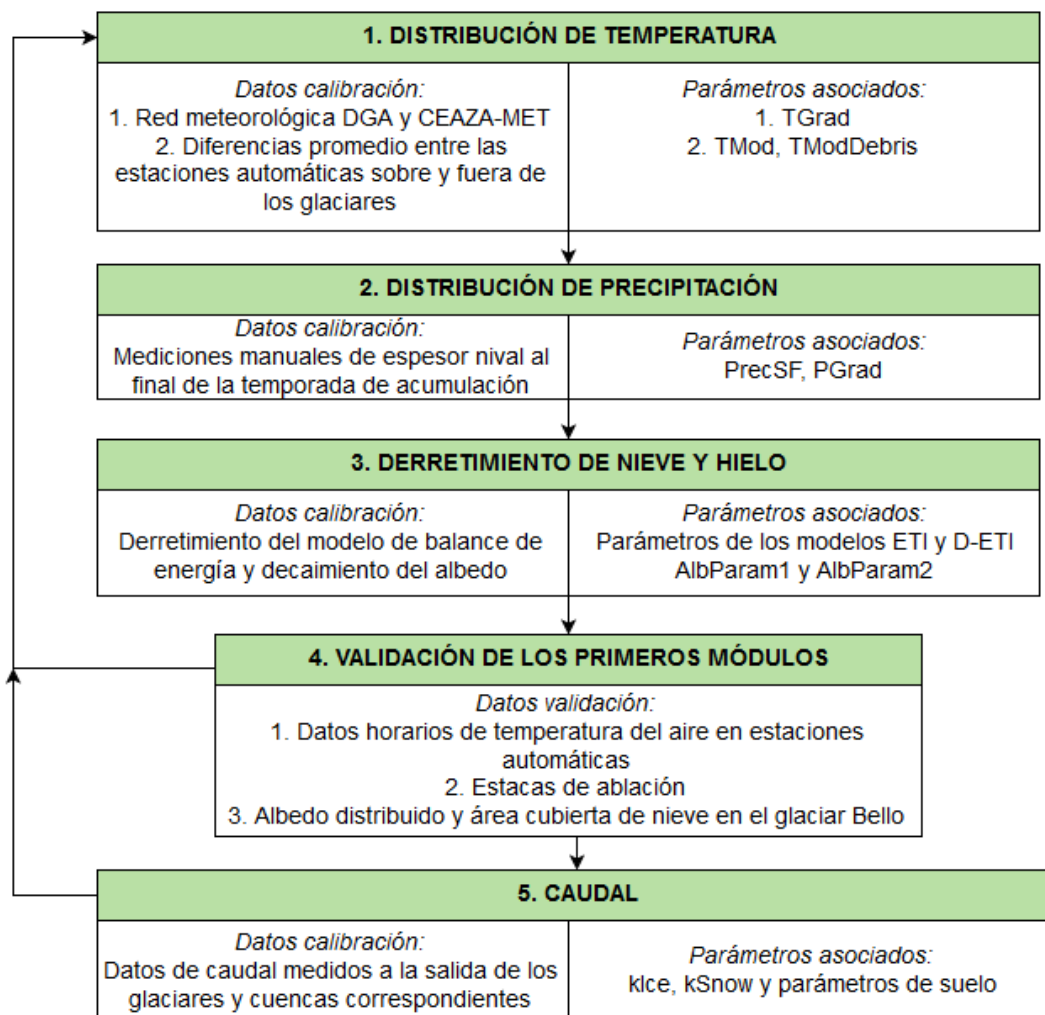


Figura 6: Esquema de calibración y validación usado en este estudio

2.6.2 Construcción del modelo TOPKAPI-ETH para las cuencas en estudio

Se construyeron tres modelos hidrológicos para este estudio, correspondientes a las siguientes cuencas:

- Glaciar Tapado
- Río del Yeso en termas del Plomo (incluye los glaciares Bello, Yeso y Pirámide)
- Estero Morales en puente CONAF (incluye al glaciar San Francisco)

En la Figura 7 a la Figura 9 se presentan las cuencas modeladas incluyendo los glaciares y ríos de la zona. Por otro lado, en la Tabla 6 se muestran las estaciones meteorológicas de la red DGA y CEAZAMET usadas en este estudio para el cálculo de gradientes de precipitación y temperatura.

En la Tabla 7 se detallan las estrategias seguidas en cada cuenca para la definición de gradientes de precipitación y temperatura. El modelo es ejecutado a escala horaria en todas las cuencas en estudio.

Tabla 6: Estaciones meteorológicas de la red DGA y CEAZA-Met usadas para la distribución de variables meteorológicas

Nombre	Coordenadas (Lat, Lon)		Elevación [msnm]
La Laguna	-30,203	-70,037	3215
Glaciar Tapado (Estación base)	-30,157	-69,914	4318
Paso Aguas Negras	-30,191	-69,83	4775
Aguas Panimávida	-33,806	-70,070	2237
Laguna Negra (Estación base)	-33,666	-70,108	2780
Embalse El Yeso (Estación base)	-33,677	-70,089	2475

Tabla 7: Gradientes de precipitación y temperatura

Cuenca	Precipitación		Temperatura	
Glaciar Tapado	Gradiente logarítmico, definido como en Ragettli et al. (2013), calibrado usando las estaciones de la red meteorológica de la DGA y las mediciones de cobertura nival al final de la temporada de acumulación en el glaciar Tapado.	2013-14: 19.9, -165.67 2014-15: 4.26, -34.71	Gradientes horarios derivados de la red meteorológica DGA y CEAZA-Met	-

Río del Yeso en Termas del Plomo	Gradiente logarítmico, definido como en Ragettli et al. (2013), calibrado usando las estaciones de la red meteorológica de la DGA y las mediciones de cobertura nival al final de la temporada de acumulación en el glaciar Bello. En el proceso de calibración se encontró que por sobre los 4250 m snm hay una reducción de la precipitación provocada probablemente por remoción mecánica por efecto del viento.	2013-14: 7,3708, - 56,595 2014-15: 2,5701, - 19,026	Gradientes medios mensuales derivados de la red meteorológica de la DGA	[°C/km] Ene= 7,06 Feb= 6,44 Mar= 5,94 Abr= 5,56 May= 5,30 Jun= 5,16 Jul= 5,14 Ago= 5,24 Sep= 5,46 Oct= 5,80 Nov= 6,26 Dec= 6,84
Estero Morales en puente CONAF	Gradiente logarítmico, definido como en Ragettli et al. (2013), calibrado usando las estaciones de la red meteorológica de la DGA y las mediciones de cobertura nival al final de la temporada de acumulación en el glaciar Bello. En el proceso de calibración se encontró que por sobre los 4250 m snm hay una reducción de la precipitación provocada probablemente por remoción mecánica por efecto del viento.	2013-14: 7,3708, - 56,595 2014-15: 2,5701, - 19,026	Gradientes medios mensuales derivados de la red meteorológica de la DGA	[°C/km] Ene= 7,06 Feb= 6,44 Mar= 5,94 Abr= 5,56 May= 5,30 Jun= 5,16 Jul= 5,14 Ago= 5,24 Sep= 5,46 Oct= 5,80 Nov= 6,26 Dec= 6,84

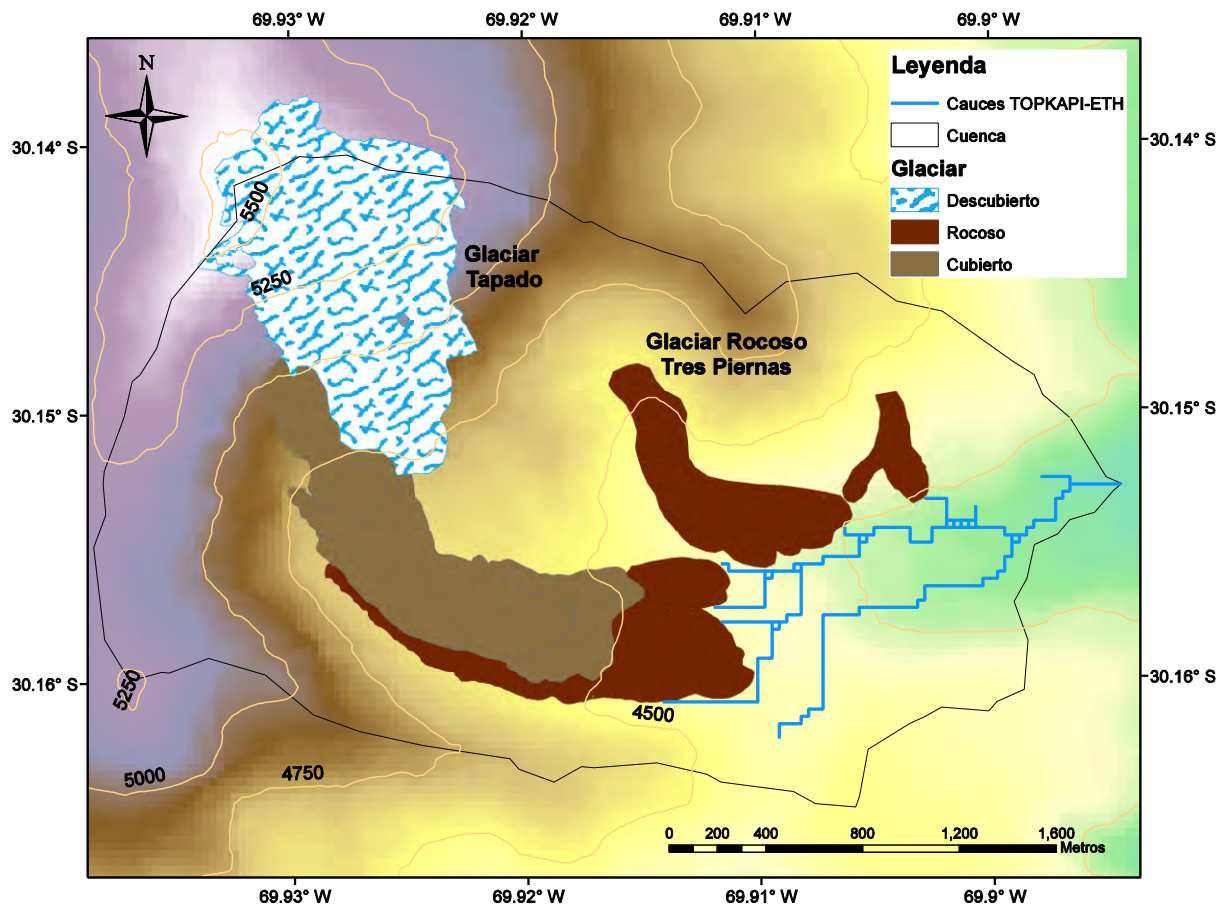


Figura 7: Principales elementos en el modelo hidrológico de la cuenca del glaciar Tapado.

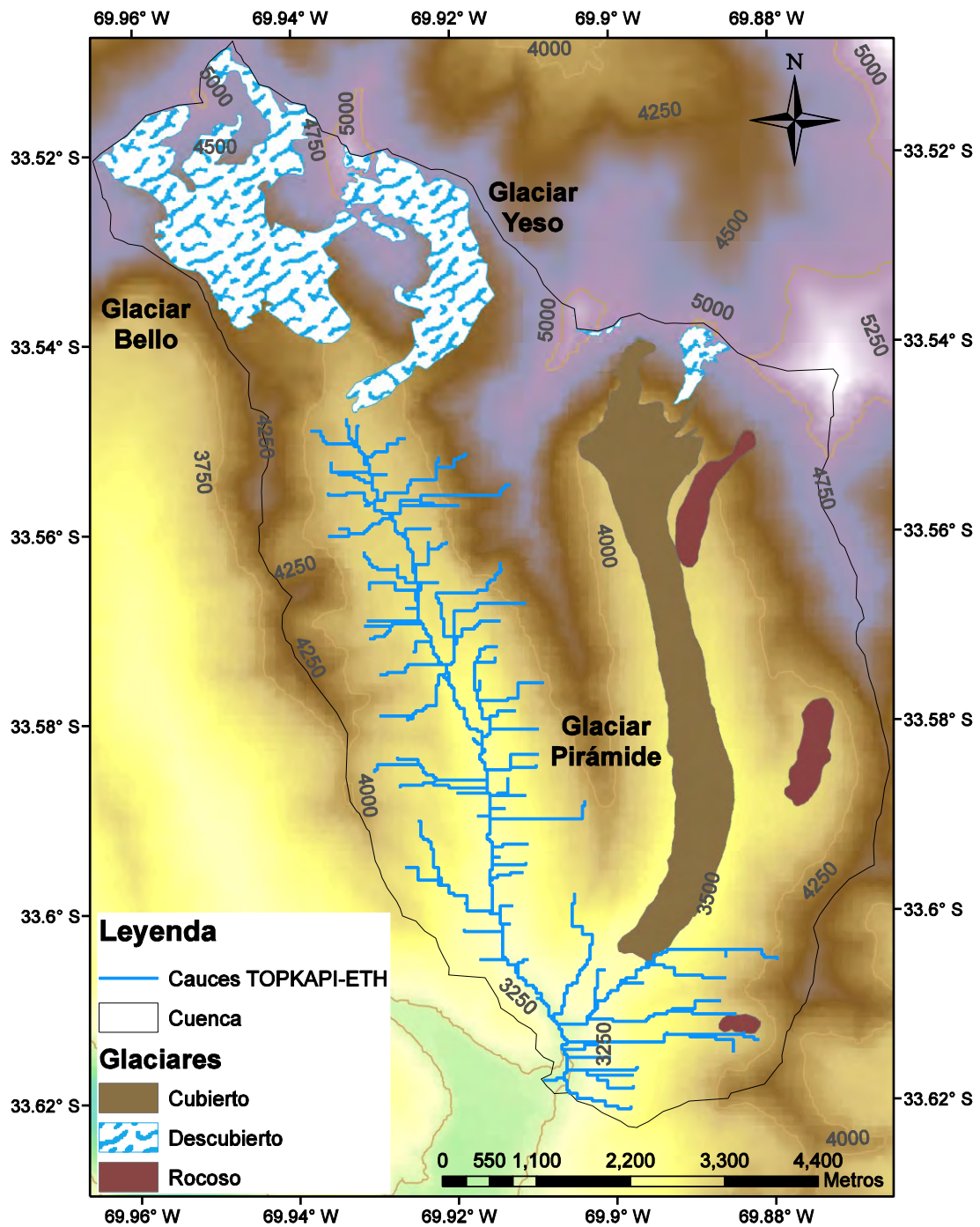


Figura 8: Principales elementos en el modelo hidrológico de la cuenca del estero Yeso en Termas del Plomo.

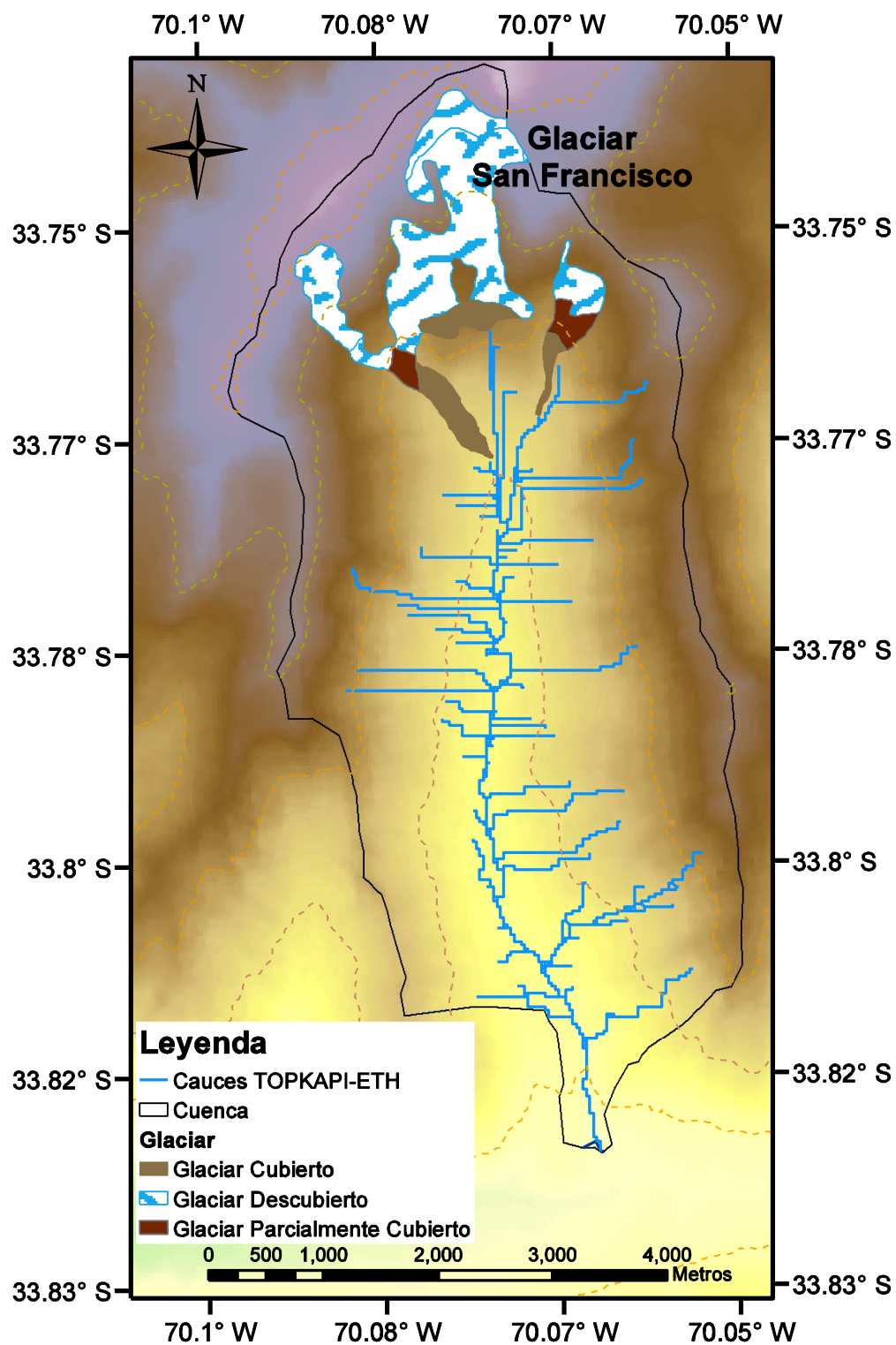


Figura 9: Principales elementos del modelo hidrológico de la cuenca del estero Morales en puente CONAF.

2.7 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TÉRMICO DE LA CAPA ACTIVA DE GLACIARES ROCOSOS

2.7.1 *Monitoreo de las temperaturas superficiales*

El monitoreo de las temperaturas superficiales tiene por objetivo realizar mediciones de la temperatura en la superficie y detectar la presencia de cubierta de nieve sobre los glaciares rocosos y áreas adyacentes. Las mediciones de temperatura superficiales en los glaciares rocosos Llano de las Liebres, Tapado y en áreas adyacentes, comenzaron en el mes de diciembre 2009 y se han mantenido hasta diciembre de 2015. Se han utilizado un total de 38 registradores de temperatura (*Miniature Temperature Datalogger*, MTD) HOBO® Pro v2 (U23-004). Este tipo de MTD de dos canales posee un sensor externo de temperatura conectado a través de un cable de 1,9 m de largo, además de un sensor interno de temperatura dentro de la caja del MTD. El sensor interno se ubica a 5 cm bajo la superficie, cubierto por algunas rocas, el sensor externo está a 50 cm en una pequeña estaca de PVC. Cada MTD registra datos de temperatura con un intervalo de 30 minutos. Los sensores han sido distribuidos de acuerdo a criterios de altitud, exposición a la radiación solar y la presencia de la cubierta de nieve. Originalmente 19 MTD fueron localizados, tanto en el glaciar rocoso Llano de las Liebres como en el glaciar rocoso Tapado. Ambas zonas han sido monitoreadas constantemente por personal de CEAZA desde noviembre 2013 hasta diciembre de 2015. La Figura 10 muestra la distribución de los MTD en los glaciares rocosos.

2.7.2 *Monitoreo de las temperaturas subsuperficiales*

Las mediciones de temperatura subsuperficiales en los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado comenzaron en el mes de abril 2010 (DGA, 2010) y se han mantenido en forma constante hasta diciembre de 2015. Cada glaciar rocoso cuenta con 2 estaciones de temperatura de permafrost en profundidad (Figura 11). En todas las estaciones se han utilizado dataloggers marca HOBO-U30 con cintas termistoras E348-S-TMB-M006 / E348-S-TMB-M017. Las estaciones están localizadas en zonas planas, tanto en la parte baja como superior de ambos glaciares rocosos. En el glaciar rocoso Llano de las Liebres se alcanzaron profundidades de 2,67 m en el punto Liebres 1 (Parte alta) y 7,64 m. en liebres 2 (Parte Baja) Por otro lado, en el glaciar rocoso Tapado se alcanzaron profundidades de 2,07 m en Tapado 1 (Parte alta) y 2,4 m en Tapado 2 (parte baja) (Tabla 8). El comportamiento interno de la capa activa y el permafrost ha sido estudiado en numerosos casos a través de la medición de las temperaturas en profundidad, por medio de perforaciones (Barsch, 1996; Trombotto y Borzotta, 2009).

En general las temperaturas en el permafrost varían en función de factores externos, como la radiación y el calor advectivo, acumulación de nieve, influencias paleoclimáticas y sedimentológicas. La caracterización del permafrost y su desarrollo a largo plazo requiere de mediciones del régimen térmico superficial y subsuperficial para determinar la profundidad de la capa activa, la profundidad y variación de la línea 0°C y de los gradientes geotérmicos. Es por esto que el objetivo de la instrumentación de estos glaciares rocosos es medir temperaturas subsuperficiales para conocer el régimen térmico de la capa activa y mejorar el conocimiento acerca de las relaciones entre el permafrost y el clima.

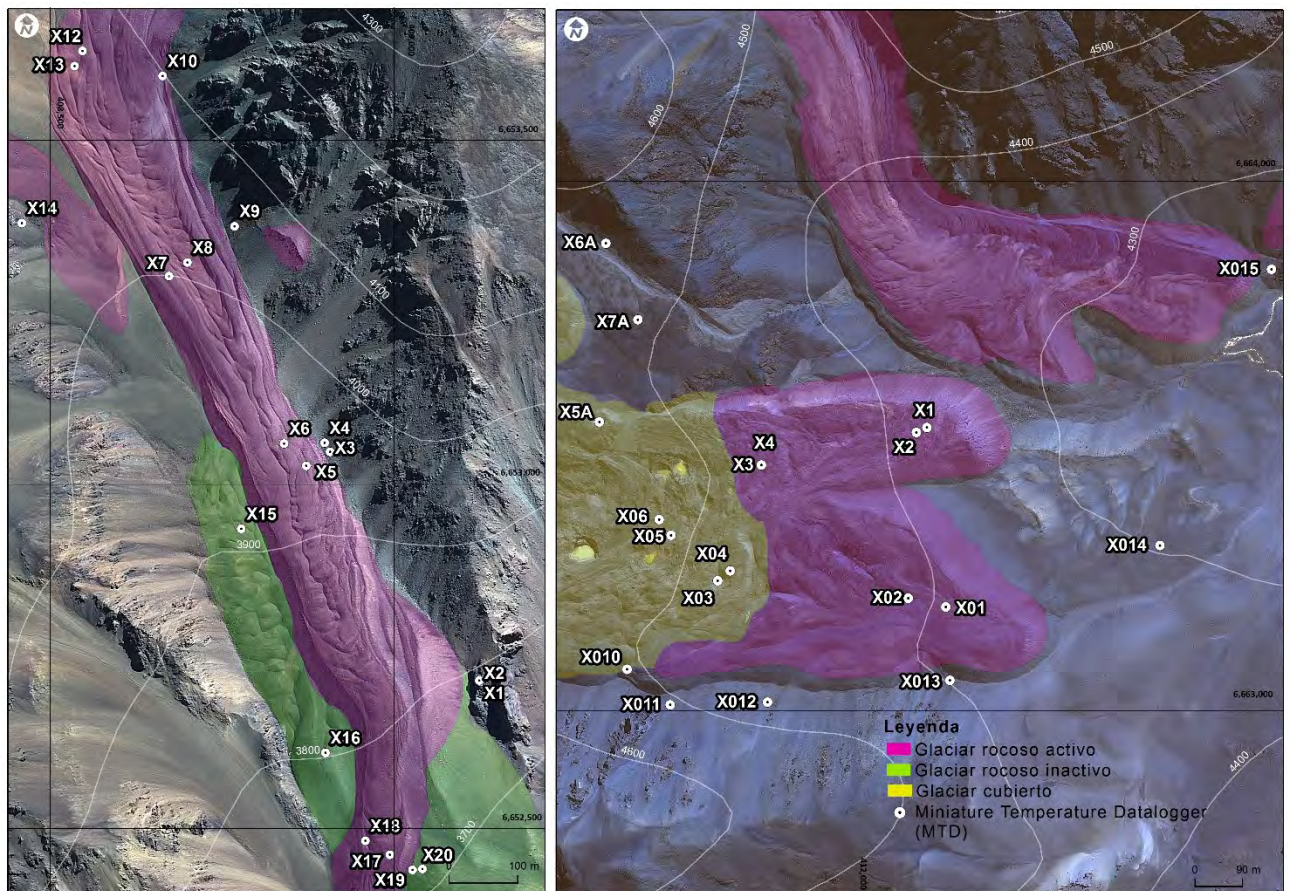


Figura 10. Distribución de los MTD sobre los glaciares rocosos Llano de las Liebres, Tapado y áreas adyacentes. Fuente Imagen: DGA (2010).

Tabla 8. Resumen de las principales características y localización de las cintas termistoras.

<i>Fecha de instalación</i>	<i>Nombre Estación</i>	<i>Elevación (m s.n.m.)</i>	<i>Norte* (m)</i>	<i>Este* (m)</i>	<i>Profundidad vertical** (m)</i>
2010-04-12	Liebres 1	4.050	408.613,0	6.653.475,6	-2,67
2010-04-12	Liebres 2	3.786	408.992,9	6.652.463,9	-7,64
2010-04-13	Tapado 1	4.440	411.988,7	6.663.517,9	-2,07
2010-04-13	Tapado 2	4.405	412.154,5	6.663.498,1	-2,4

* Coordenadas en el Datum WGS 84 – UTM 19 Sur

** Profundidad a la cual se alcanzó hielo o roca masiva.

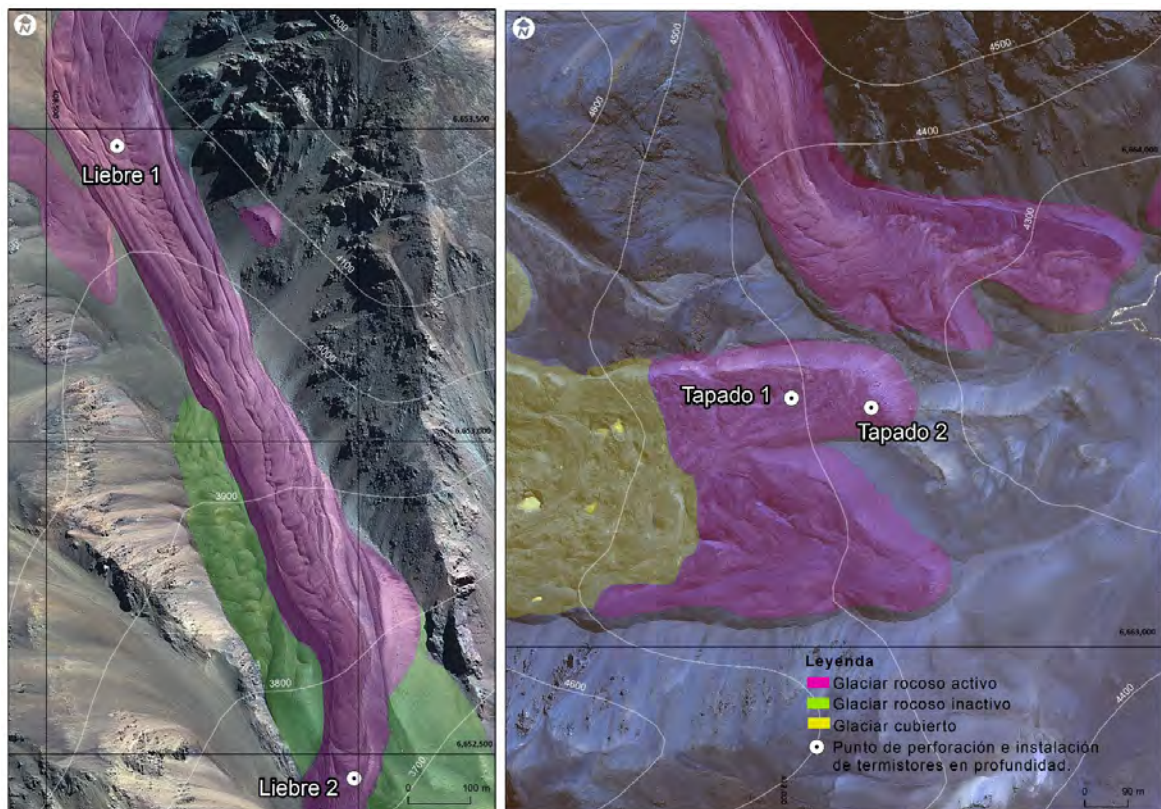


Figura 11. Distribución de las estaciones de permafrost en profundidad sobre los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado. Fuente Imagen: DGA (2010).

3. BALANCE DE MASA

3.1 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO EN EL GLACIAR TAPADO

Durante la temporada 2013-2014, se hicieron las primeras mediciones en la sección descubierta y cubierta del glaciar Tapado en noviembre de 2013, que consisten en 3 marcos de ablación (las que se definen con el prefijo TMA) en la zona descubierta, 2 estaciones meteorológicas (prefijo TAWS) y 5 balizas (prefijo TC) en la zona cubierta. Lo mismo se ha realizado durante el mes de octubre de 2014, pero los 3 marcos de ablación instalados en la sección descubierta fueron colocados en lugares distintos, pero similares a la temporada anterior. Adicionalmente, se instalaron y mantuvieron dos estaciones meteorológicas automáticas (TAWS) en ambas zonas del glaciar en ambas temporadas, así como una calicata realizada en el glaciar descubierta en la temporada 2013-2014 y 2 calicatas (descubierta y cubierta) en la temporada siguiente.

Los puntos de medición de espesor de nieve de la temporada 2013-2014 se presentan en la Tabla 9. Los datos del largo de las balizas, espesor de nieve y agua equivalente se observa en la Tabla 10. El espesor de nieve varía entre 1,62 m y 1,96 m en la zona de ablación del glaciar y fue 0 m en la zona cubierta. Para convertir las mediciones a agua equivalente, se ocupó la densidad promedio de la calicata ($0,43 \text{ g cm}^{-3}$). Debido al acceso difícil a la parte media y alta del glaciar (fuerte pendiente, una caída de hielo y grietas), no se mide el espesor de nieve arriba del TMA1. Adicionalmente, existe una medición de una baliza en la parte de acumulación del glaciar (TCumbre), que fue incluido en este informe.

Durante la temporada 2014-2015 el espesor de nieve varía entre 0,38 y 0,98 m en la zona de ablación del glaciar. En la zona cubierta del glaciar, ninguna de las 5 balizas registró nieve acumulada durante las mediciones de octubre. Para convertir las mediciones a agua equivalente, se ocupó la densidad promedio de la calicata de esa temporada ($0,33 \text{ g cm}^{-3}$). En el punto TMA1 se registró el monto de acumulación más alto, alcanzando los 0,85 m de espesor nieve. También es el punto de mayor elevación de toda la red de puntos en el glaciar. Adicionalmente se incorporan 3 puntos intermedios (las cuales se denominan PID) que son mediciones intermedias realizadas en la zona de ablación del glaciar descubierta. En la Tabla 11 se muestran las ubicaciones de las balizas, marcos de ablación, estaciones y calicatas durante dicha temporada y en la Tabla 12 se muestra el largo de las balizas, espesor de nieve y agua equivalente para dicha temporada.

En la zona cubierta del glaciar se instalaron 3 nuevas balizas de ablación (TC1, TC2 y TC4), reemplazando las balizas que colapsaron durante la temporada 2013-2014. Las balizas TC3 y TC5 mantuvieron su misma posición. La red de balizas en el glaciar cubierto no registró nieve acumulada, aunque se observó la presencia de parches de nieve aislados en algunas zonas cóncavas. La calicata en la zona cubierta se realizó en uno de estos parches de nieve (Tabla 12). En la Figura 12 se presenta un mapa del glaciar Tapado con los distintos puntos de medición para ambas temporadas.

Durante el periodo entre octubre y diciembre del 2015, se procedió a reinstalar los tres marcos de ablación en la zona descubierta del glaciar tapado. En la totalidad de los puntos intermedios se midieron espesores de nieve de más de 3 m.

Tabla 9. Ubicación de las balizas, estaciones y calicata durante la temporada 2013-2014 en glaciar Tapado.

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
TAWS1	411176	6663510	4570
TAWS2	410919	6664151	4775
TMA1	410859	6664256	4814
TMA2	410910	6664143	4773
TMA3	410927	6664079	4760
TCumbre	410827	6665221	5355
TC1	410883	6663909	4655
TC2	410921	6663812	4634
TC3	410950	6663658	4608
TC4	411075	6663553	4580
TC5	411243	6663439	4574
Calicata T	410914	6664146	4773

Tabla 10. Puntos de medición de espesor y densidad de nieve en la temporada 2013-2014 en glaciar Tapado. Los puntos fueron medidos entre el 22 y 24 de noviembre de 2013, con la excepción de TCumbre.

Punto	Largo Baliza [m]	Espesor [m] (Desviación estándar [m])	Número de mediciones	Densidad [g cm ⁻³]	Agua equivalente [m a.e.]
TAWS1	-	0	1	(0,43)	0
TAWS2	-	3,00	1	(0,43)	1,29
TMA1	6	1,62 (0,74)	59	(0,43)	0,69
TMA2	6	1,96 (0,65)	45	(0,43)	0,83
TMA3	6	1,76 (0,51)	41	(0,43)	0,75
TCumbre**	4	0,19 (-)	9	(0,43)	0,08
TC1	2	0	9	(0,43)	0
TC2	2	0	9	(0,43)	0
TC3	2	0	9	(0,43)	0
TC4	2	0	9	(0,43)	0
TC5	2	0	9	(0,43)	0
Calicata T	-	1,10	1	0,43	0,47
Calicata TC*	-	-	-	-	-

* No hubo suficiente nieve para hacer una calicata

** Se midió el día 3 de abril de 2014.

Tabla 11. Ubicación de las estaciones, balizas y calicatas en glaciar Tapado durante la temporada 2014-2015.

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
TAWS1	411176	6663510	4570
TAWS2	410973	6664160	4767
TMA1	410977	6664228	4785
TMA2	410973	6664160	4767
TMA3	410962	6664094	4745
PID1	410998	6664158	4771
PID2	410968	6664198	4775
PID3	410962	6664133	4769
TC1	410883	6663909	4655
TC2	410921	6663812	4634
TC3*	410950	6663658	4608
TC4	411075	6663553	4580
TC5*	411243	6663439	4574
Calicata T	410973	6664160	4775
Calicata TC	411140	6663530	4572

Tabla 12. Puntos de medición de espesor y densidad de nieve al fin del invierno 2014. Los puntos fueron medidos entre el 21 y 23 de octubre de 2014 en glaciar Tapado.

Punto	Largo Baliza [m]	Espesor (Desviación estándar [m])	Número de mediciones	Densidad [g cm ⁻³]	Agua equivalente [m a.e.]
TAWS1	-	0	1	(0,37)	0
TAWS2	-	0,55 (0,45)	1	(0,33)	0,18
TMA1	4	0,86 (0,27)	35**	(0,33)	0,28
TMA2	4 y 3,75	0,51 (0,38)	35**	(0,33)	0,17
TMA3	4	0,44 (0,36)	37**	(0,33)	0,15
PID1	-	1,10	1	(0,33)	0,36
PID2	-	0,70	1	(0,33)	0,23
PID3	-	0,60	1	(0,33)	0,20
TC1	2	0	9	(0,37)	0
TC2	2	0	9	(0,37)	0
TC3*	2	0	9	(0,37)	0
TC4	2	0	9	(0,37)	0
TC5*	2	0	9	(0,37)	0
Calicata T	-	0,84	1	0,33	0,28
Calicata TC	-	0,9	1	0,37	0,34

*Balizas instaladas el 26 de noviembre de 2013

**Mediciones realizadas bajo el marco de ablación y alrededores.

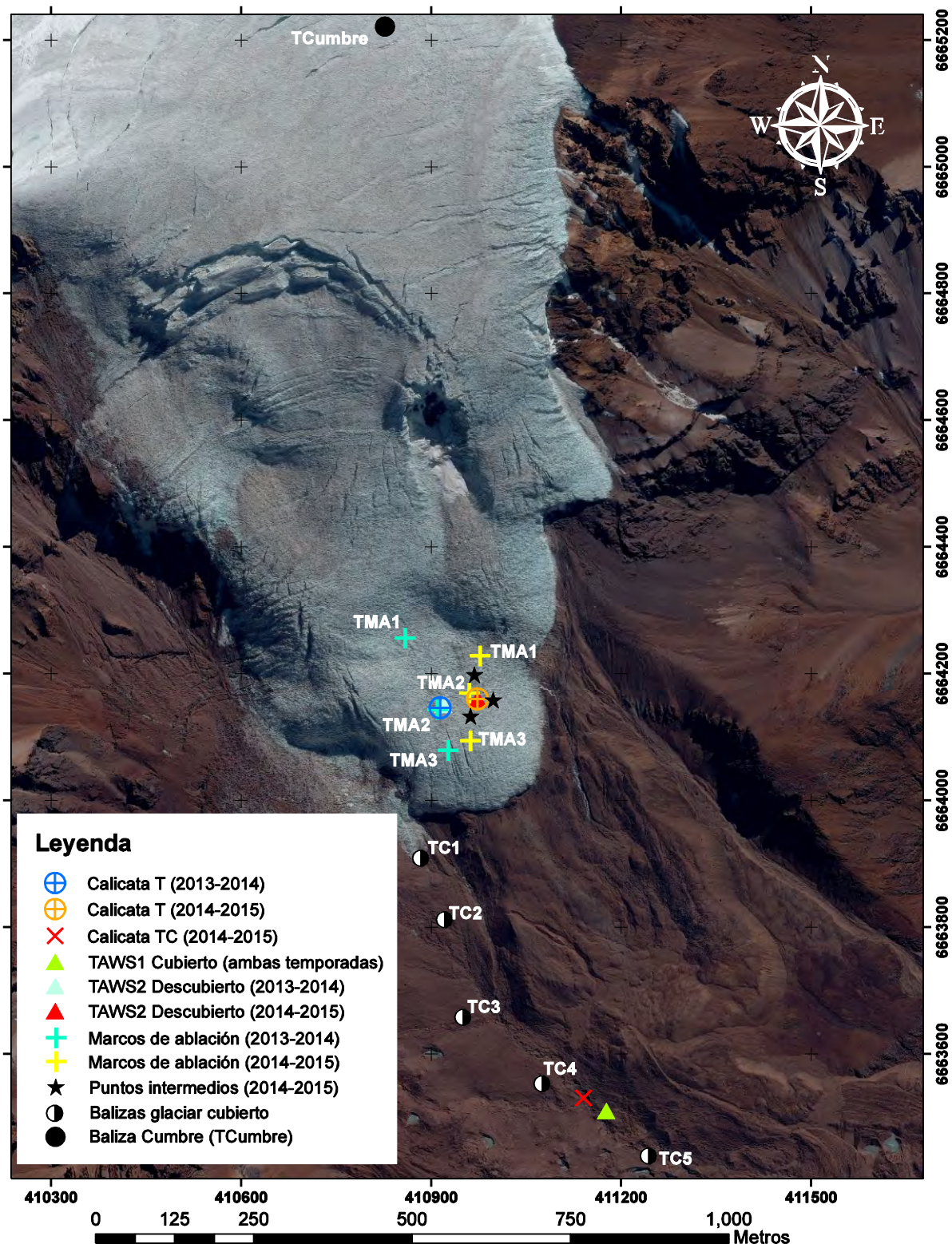


Figura 12. Mapa de ubicación de balizas (TC), estaciones (TAWS), marcos de ablación (TMA) y puntos intermedios (PID) en el glaciar Tapado, durante las temporadas 2013-2014 y 2014-2015. Fuente Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

La calicata se realizó durante la temporada 2014-2015, excavándose en un costado de la estación, la cual tuvo una profundidad de 90 cm. Para la temporada 2013-2014, no

hubo suficiente nieve para realizar la calicata. El perfil de la calicata se puede observar en la Figura 13. Esta calicata fue realizada el día 24 de octubre de 2014 y el agua equivalente en promedio del perfil fue de 0,33 m a.e.

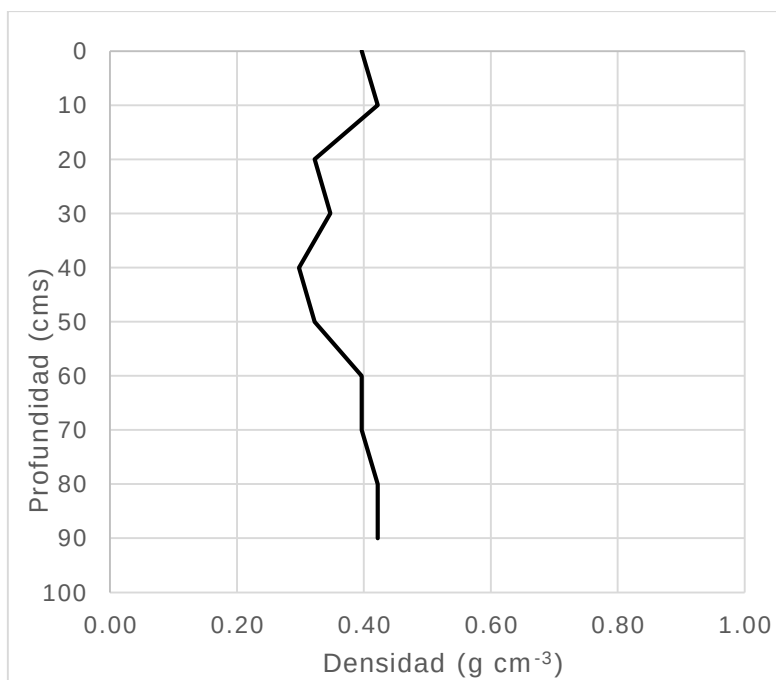


Figura 13: Perfil de la densidad de la calicata realizada en el glaciar cubierto Tapado, el día 24 de octubre de 2014.

Para la temporada 2013-2014 se realizó una calicata a un costado de la estación meteorológica en la zona descubierta del glaciar. Esta calicata tuvo una profundidad de 110 cm y fue realizada el día 22 de octubre de 2013. El agua equivalente promedio del perfil realizado fue de 0,47 m a.e. Para la temporada 2014-2015 también se realizó una calicata a un costado de la estación meteorológica instalada para esa temporada, la cual fue realizada el día 22 de octubre de 2014. Esta calicata tuvo una profundidad de 90 cm y el total de agua equivalente promedio según el perfil realizado es de 0,28 m a.e. Los perfiles de dichas calicatas se pueden observar en la Figura 14.

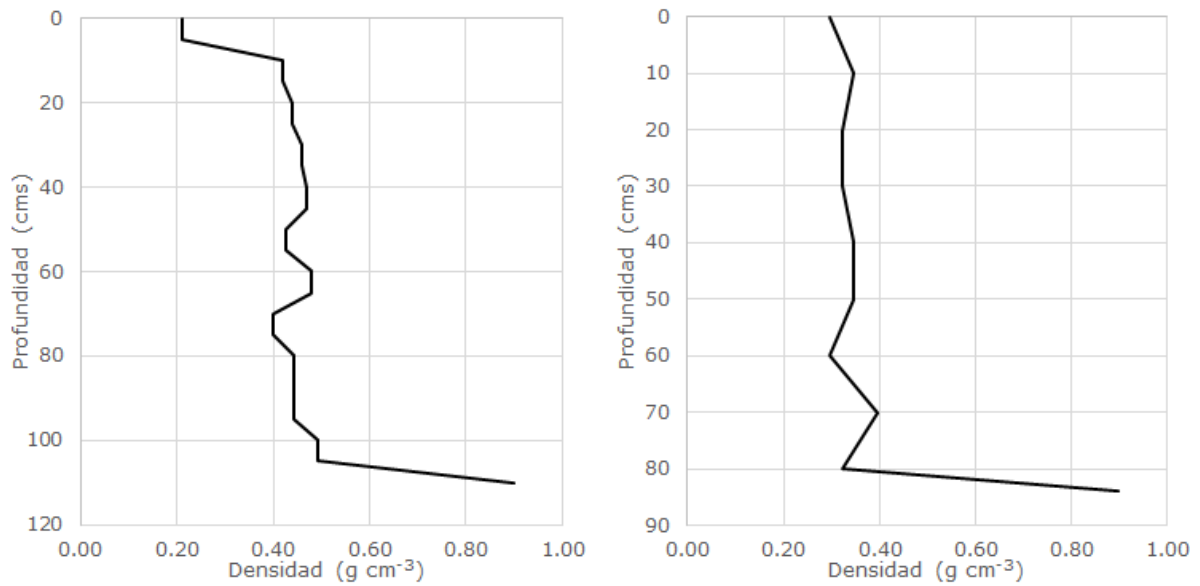


Figura 14: Perfiles de las calicatas realizadas en el glaciar descubierto Tapado, mostrando la densidad (g cm^{-3}) y la profundidad (cms). A la izquierda se observa la calicata realizada en la temporada 2013-2014 y a la derecha se muestra la correspondiente a la temporada 2014-2015.

En Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se muestran los marcos de ablación del glaciar Tapado, los cuales iniciaron las mediciones el 22 de noviembre de 2013 (TMA1 y TMA3) y 24 de noviembre de 2013 (TMA2) y finalizaron el día 10 de enero de 2014 para TMA1 y TMA2 y el día 19 de marzo de 2014 para TMA3. La razón principal de que no existan datos posteriores al 10 de enero en TMA1 y TMA2, es que estos marcos de ablación fueron destruidos por el viento y el gran desarrollo de penitentes, a los cuales solo pudo resistir TMA3. Posteriormente, se muestran los marcos de ablación del glaciar Tapado, correspondiente a las mediciones que se iniciaron el día 23 de octubre de 2014 y finalizaron el día 12 de diciembre de 2014 para TMA1 y TMA3, y el día 2 de febrero de 2015 para TMA2. La razón principal de que no existan datos para toda la temporada de verano es que los marcos de ablación colapsaron por el gran desarrollo de penitentes, al igual que la temporada anterior, de los cuales solamente TMA2 consiguió resistir hasta febrero de 2015. TMA1 y TMA3 colapsaron durante el mes de enero de 2015.

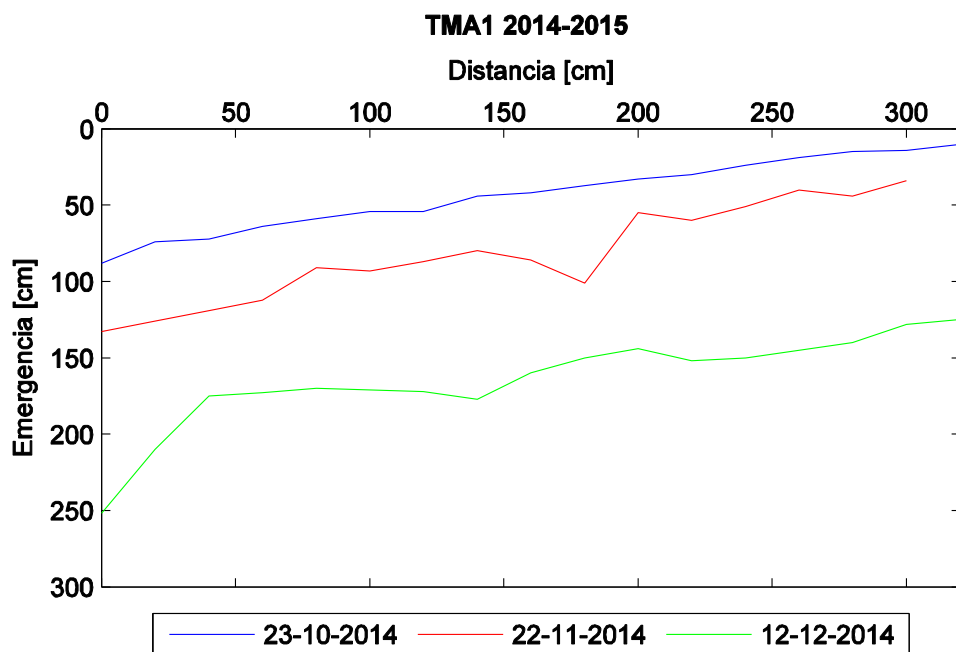
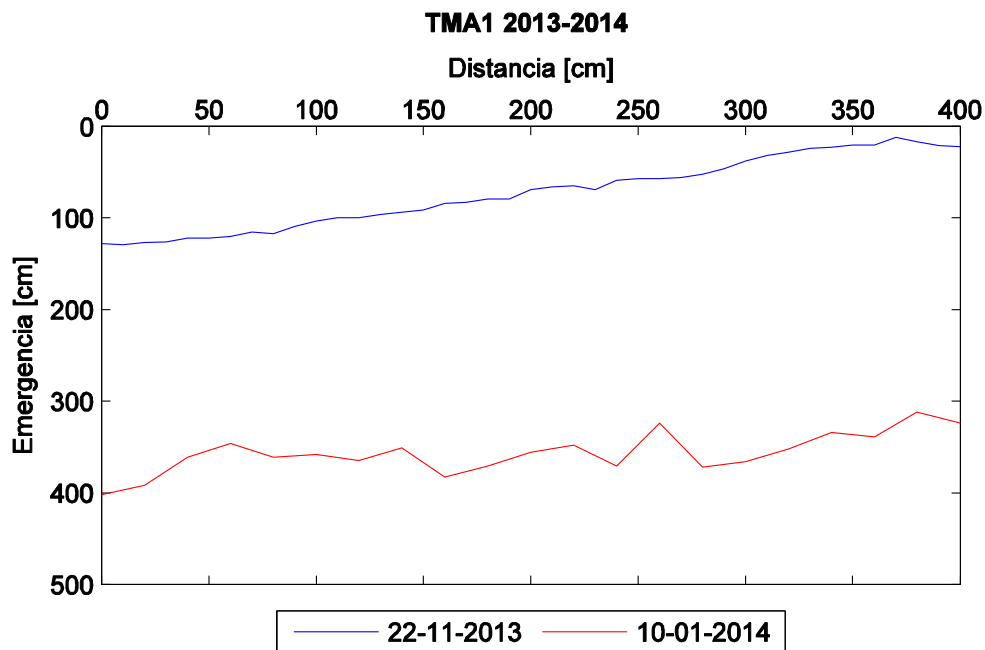


Figura 15. Arriba: Cambios topográficos medidos en TMA1 entre el 22 de noviembre de 2013 y 10 de enero de 2014. Abajo: Cambios topográficos medidos en TMA1 entre el 23 de octubre de 2014 y el 12 de diciembre de 2014.

Como se observa en la Figura 15, TMA1 bajó su perfil en aproximadamente 4 m en la última medición realizada durante la temporada 2013-2014. También se puede observar la rugosidad presente en la medición del 10 de enero de 2014, lo que evidencia el

desarrollo de penitentes en ese lugar. La superficie de nieve de TMA1 en la temporada siguiente bajó en promedio 121 cm entre el 23 de octubre hasta el 12 de diciembre de 2014. No se observa una clara evolución de la rugosidad de la superficie, ya que en esta parte del glaciar no se registraron penitentes durante el periodo de medición. En febrero de 2015 este marco de ablación estaba totalmente colapsado por los grandes penitentes que había en el lugar. Adicionalmente, por razones de seguridad, se evitó la marcha por campos de penitentes de este tamaño (mayores a 3 m de altura), la que puede ser potencialmente peligrosa.

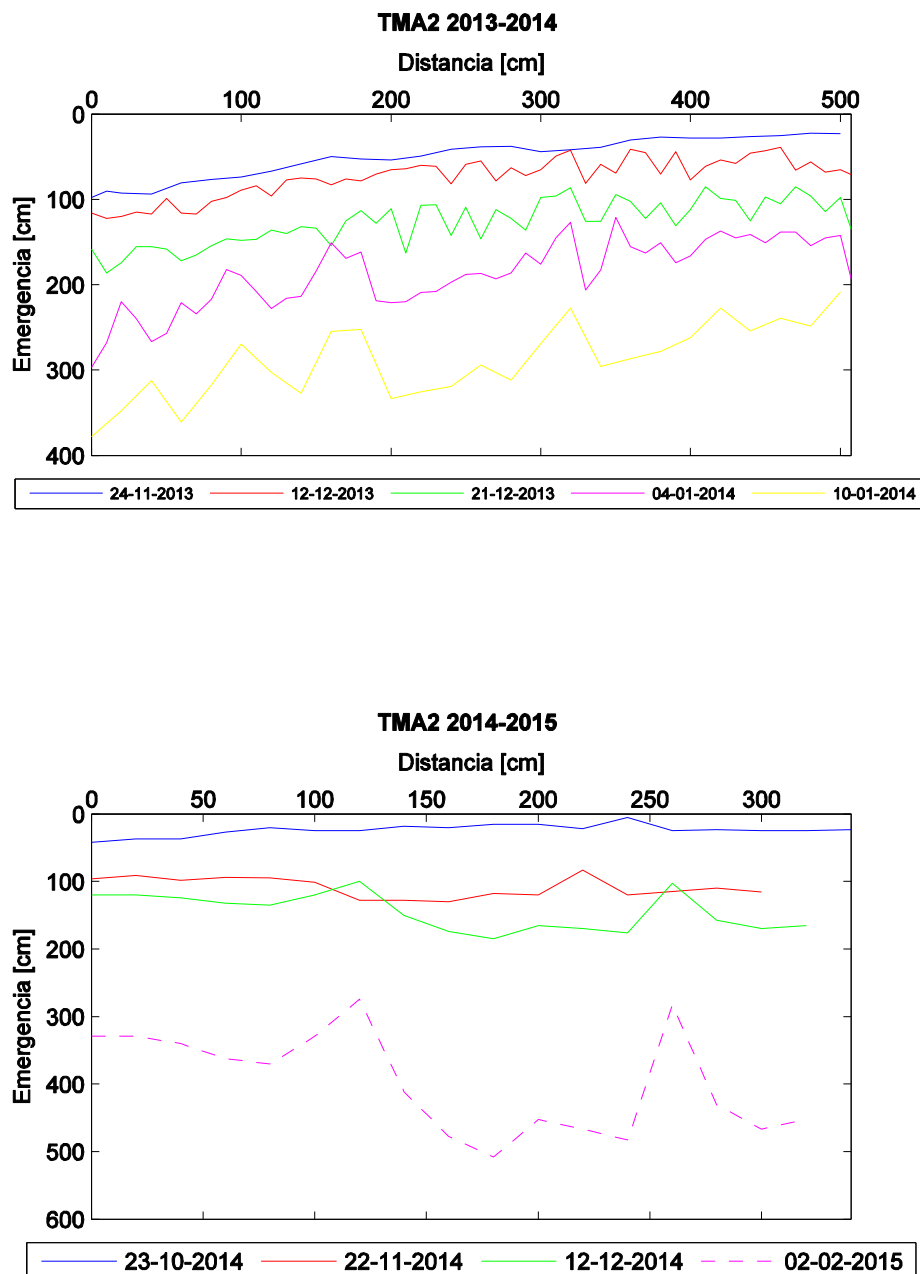


Figura 16. Arriba: Cambios topográficos medidos en TMA2 entre el 24 de noviembre de 2013 y 10 de enero de 2014. Abajo: Cambios topográficos medidos en TMA2 entre el 23 de octubre de 2014 y 2 de febrero de 2015.

En TMA2 que tiene una serie de mediciones más continua, se puede observar la evolución de la rugosidad y la ablación presentes en este lugar, lo que indica el proceso de formación de penitentes hasta mediados del verano 2014 (Figura 16). Esto va asociado con la ablación que alcanzó cerca de los 400 cm y la altura de los penitentes que llegó hasta cerca de los 90 cm en la última medición (entre 150 a 180 cm de distancia en el marco de ablación). Durante la temporada 2014-2015 en TMA2 se pudieron registrar aproximadamente 5 m de ablación total el 2 de febrero de 2015 a los 180 cm de distancia. La línea segmentada del 2 de febrero de 2015 corresponde a la ablación reconstruida de la medición de un poste del marco de ablación, el cual fue el único poste que estaba erigido sobre el hielo, ya que el resto del marco de ablación estaba colapsado y fuera del hielo. Se presume que el colapso fue producto del fuerte viento y de la gran ablación registrada durante la temporada de verano. En la Figura 16 se puede apreciar la evolución de la rugosidad del hielo y el desarrollo de penitentes de aproximadamente 2 m de alto.

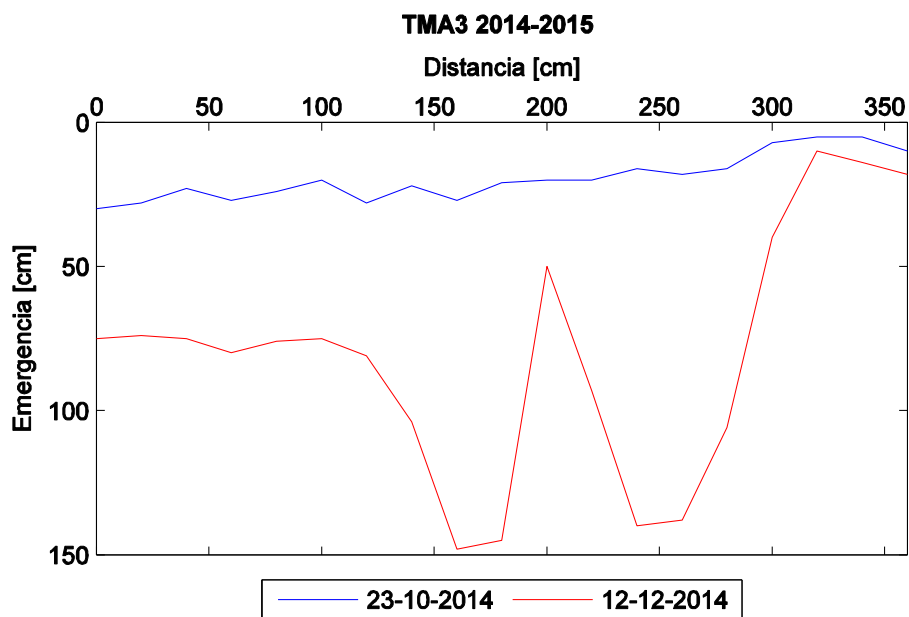
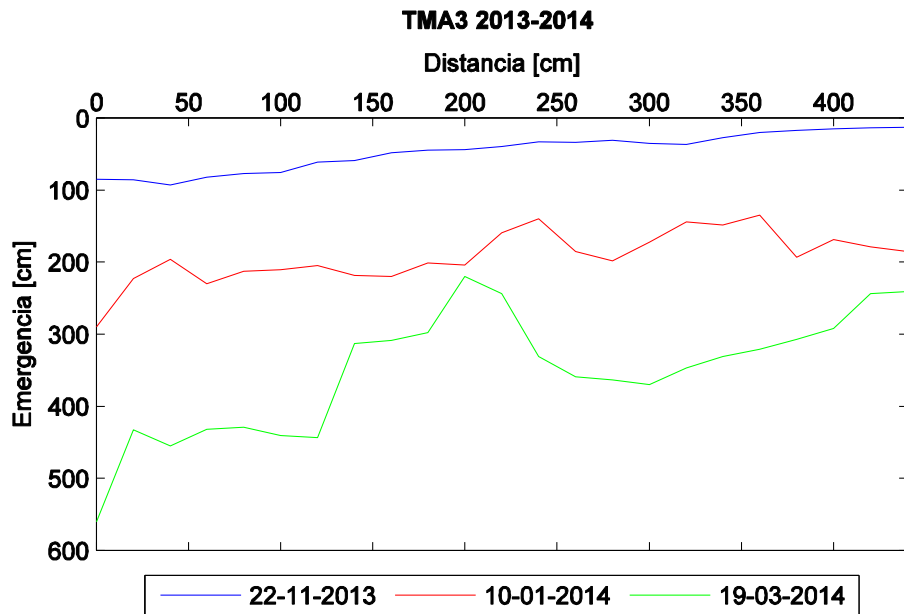


Figura 17. Arriba: Cambios topográficos medidos en TMA3 entre el 22 de noviembre de 2013 y 19 de marzo de 2014. Abajo: Cambios topográficos medidos en TMA3 entre el 23 de octubre de 2014 y 12 de diciembre de 2014.

En TMA3 que posee la serie temporal completa durante la temporada 2013-2014, pero con sólo 3 mediciones, se puede observar las diferencias importantes en la rugosidad superficial, principalmente hacia el día 19 de marzo de 2014, donde se observaron penitentes y grietas (Figura 17). Además, se observa la ablación que bajó hasta más de 500 cm en esa fecha. Al igual que la medición de los marcos de ablación anteriores, se

puede observar la evolución de la rugosidad y la ablación. Para la temporada 2014-2015, TMA3 se registró una ablación promedio de 50 cm entre el 23 de octubre y el 12 de diciembre de 2014. Se observa el desarrollo de un gran penitente de hielo de alrededor de 1 m de alto (Figura 17). Este marco de ablación se encuentra cercano a un área de grietas y zanjas de hielo, que se pueden apreciar en la línea del 12 de diciembre. Datos posteriores no fueron registrados por el colapso del marco de ablación, el desarrollo de grandes penitentes y grietas en la zona.

En la Tabla 13 y la Tabla 14, muestran las emergencias promedio y desviación estándar de los marcos de ablación de ambas temporadas, así como también la diferencia entre la primera y la última medición de dichos marcos.

En la Tabla 13 se puede observar que en TMA1 bajó 2,84 m entre el 22 de noviembre de 2013 y el 10 de enero de 2014, en TMA2 bajó hasta esa fecha 2,38 m y en TMA3 aproximadamente 1,45 m. En esta última bajó en marzo hasta 3,04 m. Los datos de desviación estándar sirven para entender la rugosidad superficial asociada a penitentes, siendo el valor más alto el día 19 de marzo en TM3, lo que indica una rugosidad más alta. Finalmente la ablación fue mayor en la parte más alta (TMA1), lo cual, por escasez de mediciones, no se puede considerar como representativa.

En la Tabla 14, que corresponde a la temporada 2014-2015, se observa que la mayor ablación ocurrió en TMA2, debido a que fue el único marco de ablación que se conservó operativo hasta febrero de 2015. Si se compara la ablación desde el 23 de octubre de 2014 hasta el 12 de diciembre de 2014, TMA1 y TMA2 tienen una ablación equivalente de 1,21 m, mientras que TMA3 tiene una de 0,61 m. Los datos de desviación estándar sirven para entender la rugosidad superficial asociada al desarrollo de los penitentes, siendo el valor más alto el día 2 de febrero en TMA2, lo que indica una rugosidad más alta. Finalmente, los mayores montos de ablación fueron registrados en la parte media y alta (TMA1 y TMA2), aunque debido a la temprana interrupción de las mediciones en TMA1 no se puede considerar del todo representativa.

Tabla 13. Emergencia promedio y desviación estándar (en paréntesis) de los marcos de ablación entre el 22 de noviembre de 2013 al 19 de marzo de 2014.

Marco	22-11-2013 [m]	24-11-2013 [m]	12-12-2013 [m]	21-12-2013 [m]	04-01-2014 [m]	10-01-2014 [m]	19-03-2014 [m]	Diferencia primera y última medición [m]
TMA1	0,73 (0,38)	-	-	-	-	3,57 (0,22)	-	2,84
TMA2	-	0,51 (0,24)	0,74 (0,23)	1,26 (0,26)	1,87 (0,40)	2,89 (0,44)	-	2,38
TMA3	0,47 (0,26)	-	-	-	-	1,92 (0,35)	3,51 (0,84)	3,04

Tabla 14. Emergencia promedio y desviación estándar (en paréntesis) de los marcos de ablación entre el 23 de Octubre de 2014 al 2 de febrero de 2015.

Marco	23-10-2014 [m]	22-11-2014 [m]	12-12-2014 [m]	02-02-2015 [m]	Diferencia primera y última medición [m]
TMA1	0,43 (0,23)	0,82 (0,32)	1,64 (0,31)	-	1,21
TMA2	0,24 (0,08)	1,09 (0,15)	1,45 (0,27)	3,98 (0,75)	1,21* - 3,74
TMA3	0,19 (0,07)	-	0,81 (0,43)	-	0,61

*Al 12 de diciembre de 2014.

Adicionalmente, se instalaron en la temporada 2013-2014, 5 balizas de ablación en la sección cubierta del glaciar Tapado, ordenadas en forma altitudinal de mayor a menor. En ellas se pudo medir el espesor de la capa de detritos y la emergencia de la baliza. En la Tabla 15, se puede observar los resultados obtenidos a partir de la medición de las balizas desde el 22 de noviembre de 2013 al 20 de marzo de 2014. En octubre de 2014 se instalaron 3 balizas de ablación nuevas en la sección cubierta del glaciar Tapado, además de mantener 2 balizas instaladas desde la temporada anterior, completando una red de 5 balizas. En la Tabla 16, se puede observar los resultados obtenidos a partir de la medición de las balizas desde el 21 de octubre de 2014 al 15 de mayo de 2015.

Tabla 15. Emergencia y espesor de la capa de detritos de las balizas instaladas sobre el glaciar cubierto Tapado, temporada 2013-2014.

Baliza	Largo Baliza (m)	Espesor de detritos (m)	Emergencia de la baliza (m) [22-11-2013]	Emergencia de la baliza (m) [10-01-2014]	Emergencia de la baliza (m) [20-03-2014]
TC1	2	0,07	0,93	1,75	-
TC2	2	0,08	0,88	1,68	-
TC3	2	0,20	0,75	1,14	1,48
TC4	2	0,20	0,75	1,23	-
TC5	2	0,30	1,40	1,61	1,64

Tabla 16. Emergencia y espesor de la capa de detritos de las balizas instaladas sobre el glaciar cubierto Tapado, temporada 2014-2015.

Baliza	Largo Baliza (m)	Espesor de detritos (m)	Emergencia de baliza (m) [21-10-2014]	Emergencia de baliza (m) [12-12-2014]	Emergencia de baliza (m) [03-02-2015]	Emergencia de baliza (m) [15-05-2015]
TC1	2	0,03	0,42	0,95	-	-
TC2	2	0,08	0,9	1,83	-	-
TC3	2	0,20	1,52	1,56	1,70	-
TC4	2	0,20	0,88	1,4	-	-
TC5	2	0,30	1,65	1,66	1,66	1,66

De la información que se puede extraer de la Tabla 15, correspondiente a la temporada 2013-2014, es que dos de las balizas (TC1 y TC2) se cayeron y una baliza fue removida por el desarrollo inesperado de una laguna termokarst (TC4) antes del día 20 de marzo de 2014, midiéndose solo TC3 y TC5 hacia finales del verano. El espesor de detritos aumenta desde TC1 a TC5, ya que esta última tiene una altitud más baja, mientras la diferencias entre las mediciones de emergencia de la baliza entre el 22 de noviembre y el 10 de enero son mayores en TC1 y bajando esta diferencia hacia TC5. De hecho, esta

última tuvo muy poca variación entre el 10 de enero y el 20 de marzo de 2014 (3 cm), lo que tendría explicación debido al espesor de detritos presentes. Para la temporada 2014-2015, indicada en la Tabla 16 se puede extraer que el espesor de detritos es menor en la parte superior del glaciar cubierto y va aumentando a medida que baja la altura, observándose en algunas zonas cercanas a TC1 numerosas secciones de hielo descubierto, sin mostrar grandes diferencias con la temporada anterior. Las balizas TC1, TC2 y TC4 salieron del hielo antes de febrero de 2015, debido a la gran ablación. Durante el mes de mayo de 2015 solo TC5 se encontraba en pie y operativa. La baliza TC5 registra muy poca variación de emergencia, debido al grueso espesor de la capa de detritos (30 cm). En resumen, existe una relación entre el espesor de detritos y la ablación del hielo para ambas temporadas.

A partir de los datos presentados, se pudo calcular el balance de masa puntual en los marcos de ablación (TMA1 a TMA3) en la sección descubierta y en las balizas en la sección cubierta (TC1 a TC5) para ambas temporadas. Hay que considerar que sólo se pudo calcular acumulación en la sección descubierta, ya que la nieve presente en las balizas en la sección cubierta no era significativa (solo parches de nieve). En la Tabla 17, se expone la acumulación, la ablación y el balance de masa anual en metros de agua equivalente (m a.e.).

Tabla 17. Acumulación, ablación y balance de masa puntual en metros de agua equivalente (m a.e.) para la sección descubierta y cubierta del glaciar Tapado, para temporadas 2013-2014 y 2014-2015.

Punto	Acumulación 2013-2014 (m a.e.)	Ablación 2013-2014 (m a.e.*)	Balance de masa 2013-2014 (m a.e.)	Acumulación 2014-2015 (m a.e.)	Ablación 2014-2015 (m a.e.*)	Balance de masa 2014-2015 (m a.e.)
TMA1	0,69	1,79**	-1,10**	0,28	0,67***	-0,39***
TMA2	0,83	1,21**	-0,38**	0,17	3,22	-3,06
TMA3	0,75	1,16	-0,41	0,15	0,47***	-0,33***
TC1	0	0,74**	-0,74**	0	0,48***	-0,48***
TC2	0	0,80**	-0,80**	0	0,84***	-0,84***
TC3	0	0,73	-0,73	0	0,16	-0,16
TC4	0	0,48**	-0,48**	0	0,47***	-0,47***
TC5	0	0,24	-0,24	0	0,01	-0,01

* Conversión de ablación de hielo glaciar a agua equivalente consideró una densidad teórica de $0,90 \text{ g cm}^{-3}$.

** Monto de ablación entre 22-11-2013 y 10-01-2014, es decir, no representa la temporada completa.

*** Monto de ablación entre 23-10-2014 y 12-12-2014, es decir, no representa la temporada completa.

Lo que se puede concluir con los datos presentados en la Tabla 17, con la acumulación y ablación de Tapado cubierto y descubierta para ambas temporadas, es que en general, el glaciar posee un balance de masa negativo, esto es, está perdiendo masa durante las

mediciones realizadas en los últimos 2 años. Para la sección descubierta, para ambas temporadas, fue mayor en TMA1 (-1,10 y -0,39 m a.e. respectivamente) y menor en TMA3 (-0,41 y -0,33 m a.e.), mostrando solamente diferencias importantes de ablación en TMA2, la cual la última temporada fue mayor (-3,06 m a.e.). Para la sección cubierta, muestra que la mayor pérdida de masa se produce en las balizas TC1 (-0,74 y -0,48 m a.e.) y TC2 (-0,80 y -0,84 m a.e.), así como también se manifiesta en el balance de masa total de ambas temporadas. En TC5, que posee mayor cubierta detrítica, la ablación fue mucho menor, principalmente en la última temporada (-0,01 m a.e.).

Comparando la ablación de todos los marcos de ablación durante el mismo período en los años hidrológicos 2013 y 2014, se puede concluir que la ablación promedio de los tres marcos de ablación entre el 22 de noviembre de 2013 y el 10 de enero de 2014 fue de -0,55 m a.e., mientras que, para el mismo período para el año hidrológico 2014, la ablación fue de -0,44 m a.e. Lo que quiere decir que hubo mayor ablación durante este período el año 2013, esto se debe a que este año hubo mayor cantidad de nieve disponible para la ablación. Se presume que, tomando en cuenta toda la temporada de ablación del año hidrológico 2014 habrá mayor ablación que el año 2013, debido a que el hielo glacial permaneció expuesto a la atmósfera por mayor tiempo debido a las escasas precipitaciones nivales registradas en el invierno anterior.

En lo que respecta al balance distribuido del glaciar Tapado descubierta para ambas temporadas, los resultados para ambas temporadas son disímiles. Esto se debe principalmente al período de datos analizado, como también a las distintas condiciones de acumulación y ablación de ambos años hidrológicos. En la Tabla 18 se muestran los coeficientes de correlación para cada una de las variables para el año hidrológico 2013 y en la Tabla 19 se muestra para el año hidrológico 2014. Además, en la Tabla 20 se muestran las estadísticas de regresión para el balance de invierno (o acumulación) para el año hidrológico 2013; en la Tabla 21 para el balance de verano del año hidrológico 2013; en la Tabla 22 se muestran las estadísticas para el balance de invierno para el año hidrológico 2014 y finalmente en la Tabla 23 para el balance de verano para el año hidrológico 2014 (que abarca desde 23-10-2014 hasta el 12-12-2014).

Tabla 18. Coeficiente de correlación entre balance de masa y variables topográficas para el año hidrológico 2013. b_w = balance de invierno; b_s = balance de verano; b_n = balance neto; SIN = seno; RAD = Radiación solar potencial (promedio diario). n=número de observaciones.

<i>Balance de masa</i>	<i>Altitud</i>	<i>Pendiente</i>	<i>SIN(aspecto)</i>	<i>RAD</i>
B_w (n=5)	-0,12	-0,09	0,23	0,21
B_s (n=4)	0,91	-0,16	-0,53	0,61

Tabla 19. Coeficiente de correlación entre balance de masa y variables topográficas para el año hidrológico 2014. b_w = balance de invierno; b_s = balance de verano; SIN = seno; RAD = Radiación solar potencial (promedio diario). n =número de observaciones.

<i>Balance de masa</i>	<i>Altitud</i>	<i>Pendiente</i>	<i>SIN(aspecto)</i>	<i>RAD</i>
B_w ($n=8$)	0,54	0,46	0,30	-0,26
B_s ($n=4$)	0,73	0,88	0,07	-0,22

Tabla 20. Estadísticas de regresión para el balance de invierno (b_w) del año hidrológico 2013. F = valor F del test de ANOVA; p = probabilidad de significación; t = valor t de la distribución de Student; r^2 : coeficiente de determinación; r^2_{adj} : coeficiente de determinación ajustado para múltiple variables independientes; mse: error cuadrático medio; E.S. = error estándar;

<i>F</i>	<i>p</i>	<i>r²</i>	<i>r²_{adj}</i>	<i>mse</i>
0,63	0,70	0,66	-0,38	0,13
<i>Término</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>E.S.</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
Intercepto	-24,32	18,76	-1,30	0,42
Pendiente	0,15	0,11	1,30	0,42
SIN_A	1,30	0,20	1,09	0,47
RAD	0,06	0,04	1,33	0,41

Tabla 21. Estadísticas de regresión para el balance de verano para el año hidrológico 2013 (b_s).

<i>F</i>	<i>p</i>	<i>r²</i>	<i>r²_{adj}</i>	<i>mse</i>
9,62	0,22	0,95	0,85	0,07
<i>Término</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>E.S.</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Intercepto	-15,62	3,61	-4,33	0,14
Altitud	0,002	0,001	3,41	0,18
RAD	0,014	0,009	1,54	0,37

Tabla 22. Estadísticas de regresión para el balance de invierno (b_w) del año hidrológico 2014.

<i>F</i>	<i>p</i>	<i>r²</i>	<i>r²_{adj}</i>	<i>mse</i>
0,73	0,59	0,35	-0,13	0,01
<i>Término</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>E.S.</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
Intercepto	-3,62	4,56	-0,79	0,47
Pendiente	0,036	0,02	1,14	0,32
SIN_A	0,002	0,04	0,04	0,97
RAD	0,002	0,01	0,82	0,46

Tabla 23. Estadísticas de regresión para el balance de verano para el año hidrológico 2014 (b_s).

<i>F</i>	<i>p</i>	<i>r²</i>	<i>r²_{adj}</i>	<i>mse</i>
0,67	0,65	0,57	-0,27	0,08
<i>Término</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>E.S.</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
Intercepto	-0,56	11,82	-0,05	0,97
Altitud	0,001	0,001	1,11	0,47
RAD	-0,008	0,029	-0,27	0,83

En la Figura 18 se observan los mapas de acumulación, ablación y balance de masa distribuido para el período 2013-2014 y en la Figura 19 para la temporada 2014-2015.

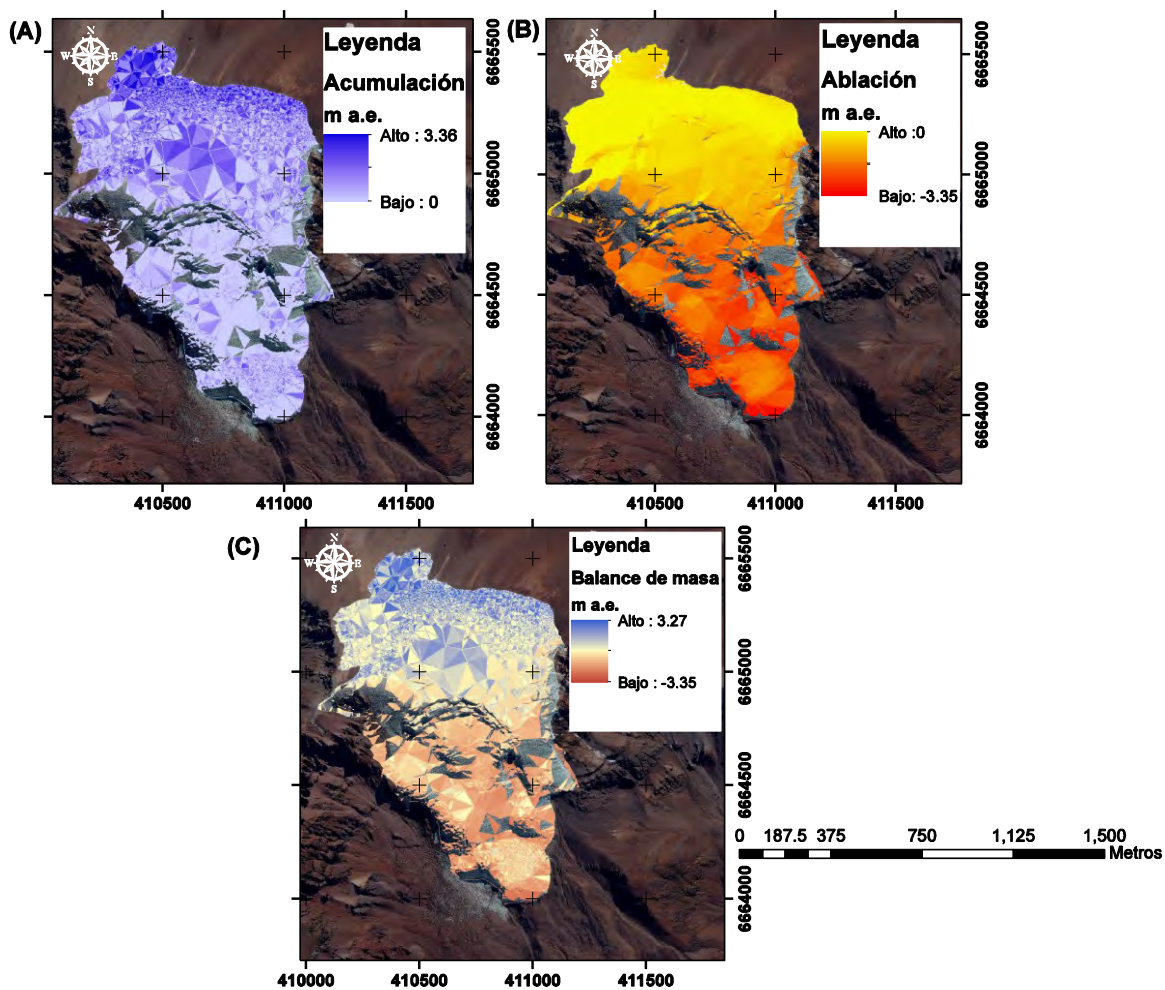


Figura 18: Acumulación (A), ablación (B) y balance de masa (C) distribuido del glaciar Tapado descubierto durante la temporada 2013-2014. Fuente imagen: Geoeye 12-04-2010.

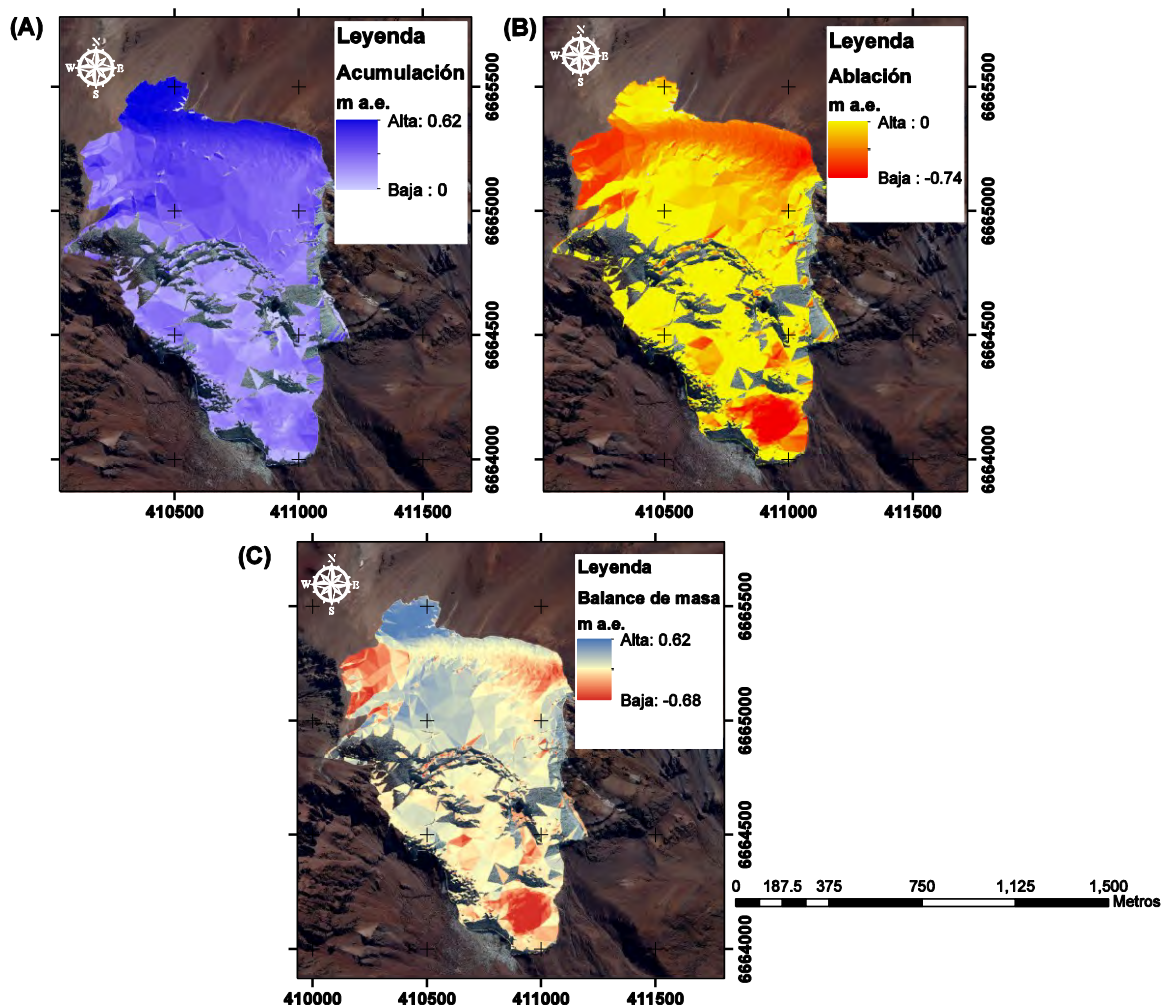


Figura 19: Acumulación (A), ablación (B) y balance de masa (C) distribuido del glaciar Tapado descubierto durante la temporada 2014-2015. Fuente imagen: Geoeye 12-04-2010.

Como se observan en las figuras, las zonas donde existe mayor acumulación es en la parte superior del glaciar descubierto (donde se encuentra la baliza TCumbre) y la ablación es mayor en la parte inferior (donde se ubican los marcos de ablación). Los resultados en el balance de masa, para la primera temporada se observa un balance positivo en la parte superior del glaciar (color verde) y negativo en la parte inferior (color naranja). En la segunda temporada, debido a la escasez de datos de ablación para los meses de febrero y marzo, los resultados indican que existe una importante ablación en la parte inferior del glaciar, pero los resultados se observan poco claros en la parte superior del glaciar, con zonas con balance positivo (verde) y negativo (naranja).

Los datos promediados por año hidrológico de la acumulación, ablación y balance de masa distribuido en el glaciar descubierto Tapado, se pueden ver en la Tabla 24, además de la desviación estándar o variabilidad de los datos.

Tabla 24: Acumulación, ablación y balance de masa distribuido del glaciar descubierto Tapado, la cual muestra el promedio general y en paréntesis la desviación estándar, para ambas temporadas.

Año hidrológico	Acumulación [m a.e.]	Ablación [m a.e.]	Balance de masa [m a.e.]
2013	0,25 (1,27)	0,75 (0,77)	-0,50 (1,80)
2014	0,30 (0,13)	0,001 (0,28)*	0,29 (0,24)**
Promedio	0,28	0,38	-0,11

*Monto de ablación entre 23-10-2014 y 12-12-2014, es decir, no representa la temporada completa.

**Corresponde al período entre el 23-10-2014 y el 12-12-2014, esto es, no corresponde a la temporada completa.

A pesar de que el año hidrológico 2014 no tiene la serie completa debido al colapso de los marcos de ablación y que los datos no son representativos de la temporada completa, se puede ver que la variabilidad de la acumulación fue considerablemente menor que el año hidrológico 2013. Es importante también considerar que existen más datos de acumulación en el último año, lo cual la regresión es más representativa que el año anterior, que solo se hicieron con los marcos de ablación y la estación meteorológica.

Los datos promediados por año hidrológico de la acumulación, ablación y balance de masa distribuido en el glaciar cubierto Tapado, se pueden ver en la Tabla 25, además de la desviación estándar o variabilidad de los datos.

Tabla 25: Acumulación, ablación y balance de masa distribuido del glaciar cubierto Tapado, la cual muestra el promedio general y en paréntesis la desviación estándar, para ambas temporadas.

Año hidrológico	Acumulación [m a.e.]	Ablación [m a.e.]	Balance de masa [m a.e.]
2013	0 (0)	0,60 (0,23)	-0,60 (0,23)
2014	0 (0)	0,39 (0,32)*	-0,39 (0,32)*
Promedio	0	0,50	-0,50

*No se consideran todas las balizas, debido a que algunas salieron del hielo a mitad de temporada, por la alta ablación.

En relación al glaciar cubierto de Tapado, se desprende de la tabla que el año hidrológico 2013, tuvo mayor pérdida de masa en relación al año 2014, pero estos datos hay que tomarlos con cautela, ya que el año hidrológico 2014, la medición de la mayoría de las balizas se realizaron solamente hasta febrero de 2015, es decir, no considera la temporada de ablación completa. Por otro lado, en ninguno de los años hidrológicos, se

registró acumulación, ya que las balizas fueron instaladas el año 2013 cuando no había nieve. El año hidrológico 2014, estas balizas fueron medidas y reinstaladas cuando la nieve ya había desaparecido casi por completo en esta zona del glaciar.

3.2 BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO EN CHILE CENTRAL

3.2.1 *Mediciones glaciológicas*

3.2.1.1 **Glaciar Pirámide**

En este glaciar, se instalaron y se midieron 8 balizas para la medición de la nieve (las que se muestran con el prefijo P0) para la temporada 2013-2014. Adicionalmente se instalaron otras 9 para el hielo (prefijo PI) y para la medición de la nieve y hielo en la temporada 2014-2015. Además se hicieron calicatas en la parte central del glaciar y una medición en la estación meteorológica (PAWS1), la cual fue trasladada para la temporada 2014-2015. El día 23 de octubre de 2015 se reinstalaron las balizas en dicho glaciar en la misma ubicación que las temporadas anteriores y las mediciones intermedias se realizaron en los mismos lugares que el año anterior.

La distribución de los puntos en el glaciar se puede observar en la Figura 20 y la ubicación de dichos puntos con sus coordenadas, así como las mediciones intermedias (prefijo MI), se muestran en la Tabla 26.

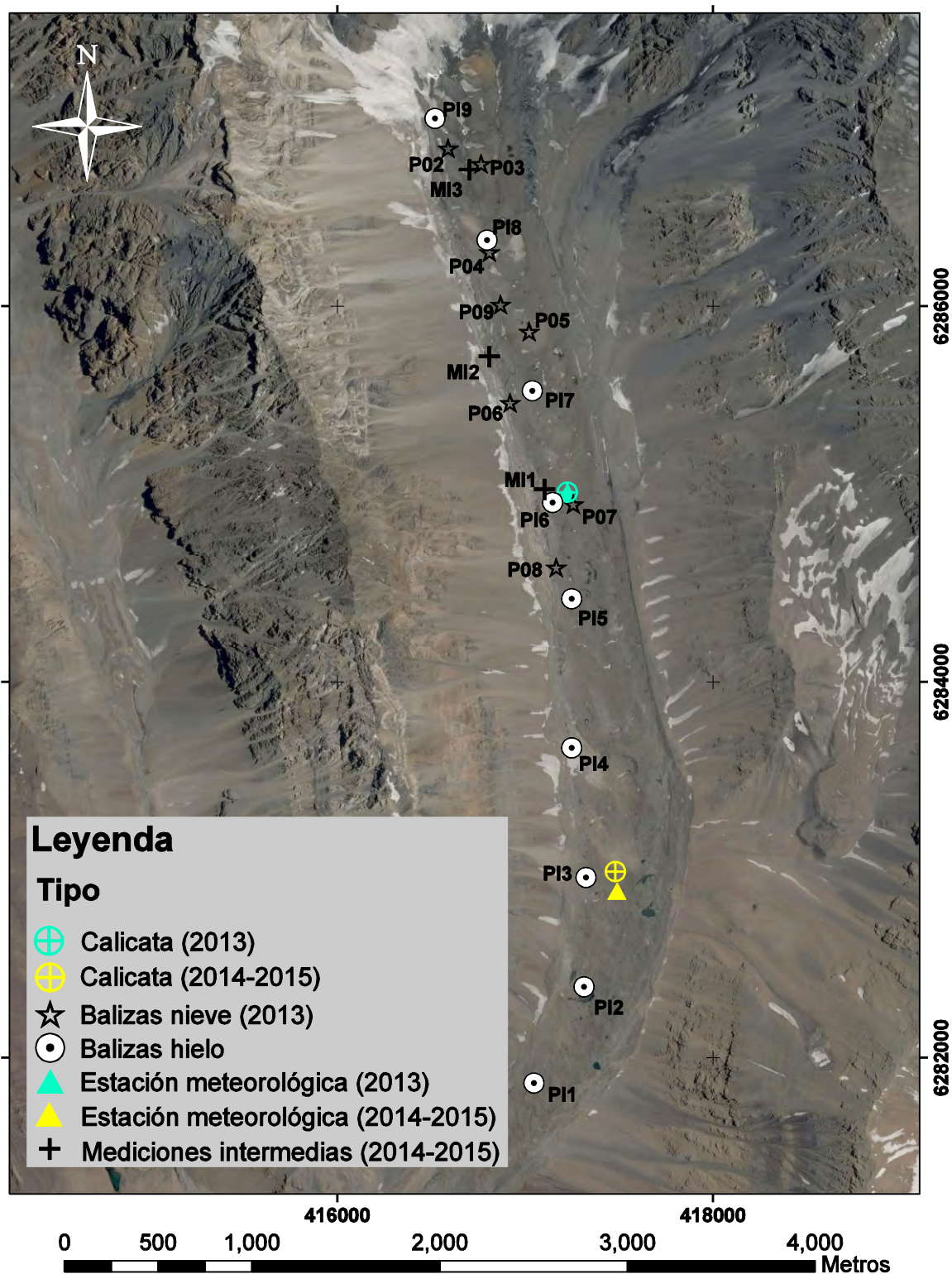


Figura 20. Mapa general de la distribución de las balizas, estaciones meteorológicas y calicatas en el glaciar Pirámide para todos los años hidrológicos. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-12-2013.

Tabla 26. Ubicación de las estaciones meteorológicas, balizas de nieve y hielo, puntos intermedios de medición, así como también las calicatas de ambos años hidrológicos.

Punto	Años	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
PAWS1	2013	417222	6285012	3675
PAWS1	2014-2015	417487	6282887	3459
P02	2013	416588	6286839	3849
P03	2013	416763	6286758	3843
P04	2013	416807	6286287	3794
P05	2013	417020	6285864	3765
P06	2013	416917	6285486	3723
P07	2013	417254	6284945	3651
P08	2013	417163	6284609	3629
P09	2013	416868	6286008	3781
PI 1	Todos	417044	6281865	3340
PI 2	Todos	417312	6282377	3360
PI 3	Todos	417323	6282960	3435
PI 4	Todos	417246	6283650	3508
PI 5	Todos	417246	6284443	3598
PI 6	Todos	417144	6284956	3671
MI 1	2014-2015	417103	6285024	3680
PI 7	Todos	417037	6285551	3708
MI 2	2014-2015	416808	6285730	3742
PI 8	Todos	416796	6286353	3796
MI 3	2014-2015	416702	6286725	3832
PI 9	Todos	416517	6287001	3836
Calicata P	2013	417222	6285012	3675
Calicata P	2014-2015	417478	6282992	3461

Las calicatas fueron realizadas en los tres años hidrológicos, a un costado de la estación meteorológica (en sus distintas ubicaciones). Durante el primer año, la calicata fue realizada el día 5 de noviembre de 2013. El perfil se puede ver en la Figura 21. La profundidad de dicha calicata es de 2,20 m hasta alcanzar el detrito, el promedio de densidad es de $0,58 \text{ g cm}^{-3}$ y el agua equivalente es de 1,14 m a.e. En dicha calicata se encontraron algunas capas de hielo.

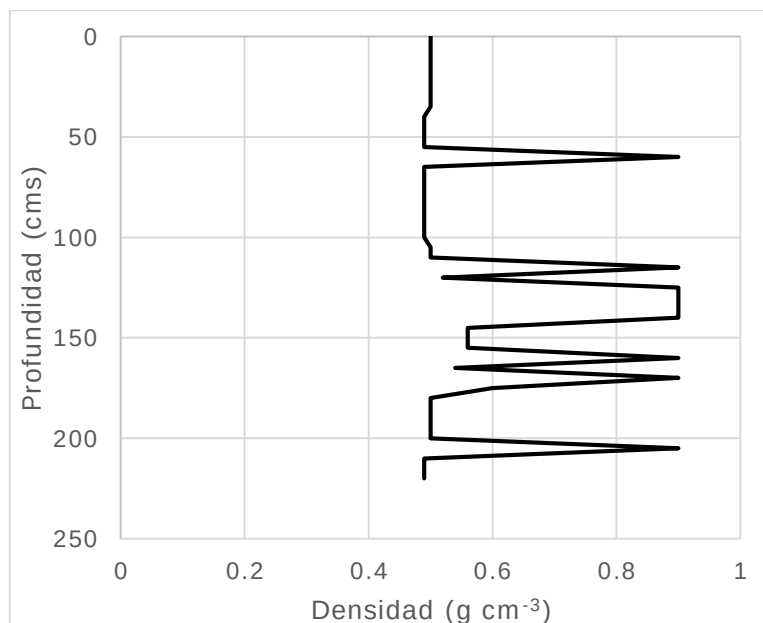


Figura 21: Perfil que indica la profundidad y la densidad de la nieve para la calicata realizada el día 5 de noviembre de 2013 en el glaciar Pirámide.

Para el año siguiente, la calicata se hizo el día 10 de octubre de 2014. El perfil se puede ver en la Figura 22. La profundidad de dicha calicata es de 70 cm hasta llegar al detrito, el promedio de densidad es de 0,28 g cm⁻³ y el agua equivalente para esa temporada es de 0,17 m a.e. A diferencia del año anterior, no se encontraron capas de hielo.

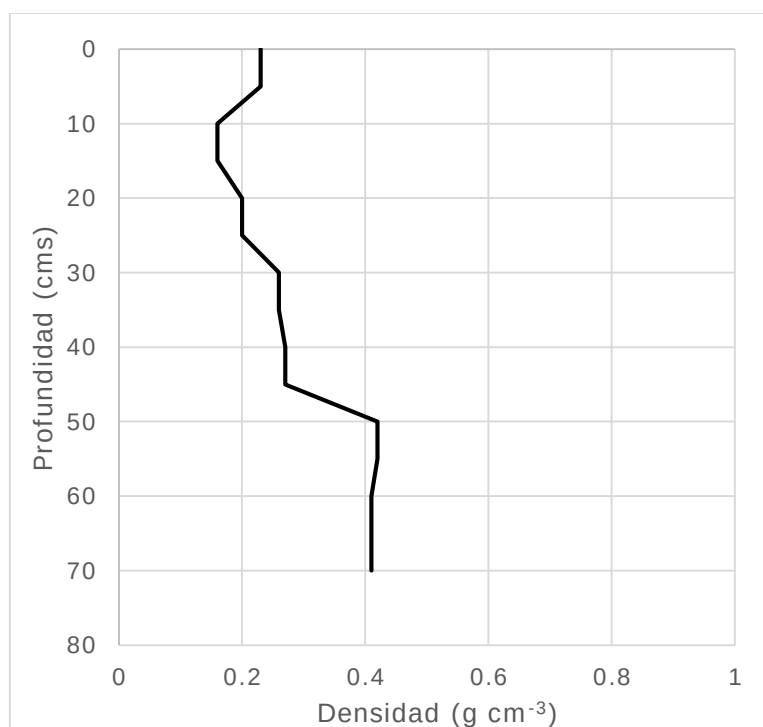


Figura 22: Perfil que indica la profundidad y la densidad de la nieve para la calicata realizada el día 10 de octubre de 2014 en el glaciar Pirámide.

Finalmente se realizó una última calicata el día 22 de octubre de 2015. El perfil se puede ver en la Figura 23. La profundidad de dicha calicata es de 170 cm hasta llegar al detrito, el promedio de densidad es de $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ y el agua equivalente para esa temporada es de 0,61 m a.e. Al igual que el año anterior, no se encontraron capas de hielo.

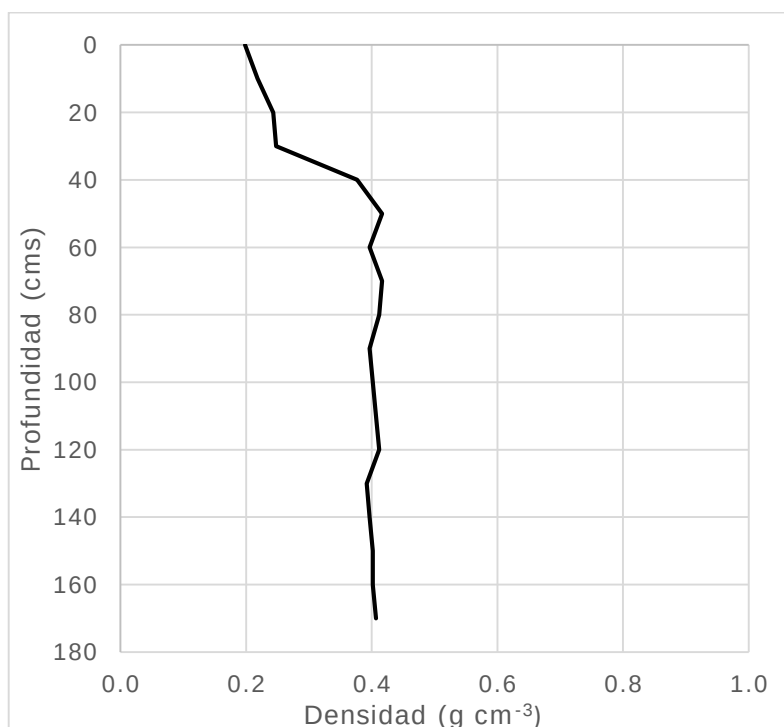


Figura 23: Perfil que indica la profundidad y la densidad de la nieve para la calicata realizada el día 22 de octubre de 2015 en el glaciar Pirámide.

Los puntos de medición de espesor de nieve para el año hidrológico 2013 se presentan en la Tabla 27. El espesor de nieve varía entre 1,3 m y 2,26 m sobre el glaciar. Para convertir las mediciones a agua equivalente, se ocupó la densidad promedio de la calicata medida en noviembre de 2013 ($0,58 \text{ g cm}^{-3}$). Para el año hidrológico 2014, los puntos de medición de espesor de nieve están en la Tabla 28. El espesor de nieve medido el día 1 de octubre de 2014, varía entre 0,47 y 2,83 m sobre el glaciar. Para convertir las mediciones en agua equivalente (m a.e.), se ocupó la densidad promedio de la calicata de esa temporada ($0,28 \text{ g cm}^{-3}$). Finalmente para el año hidrológico 2015, los resultados de la medición se muestran en la Tabla 29. El espesor de nieve medido el día 22 de octubre de 2015, varía entre 1,42 y 2,96 m sobre el glaciar. Para ese año, se hizo la conversión a agua equivalente (m a.e.) usando la densidad promedio de la calicata ($0,36 \text{ g cm}^{-3}$).

Tabla 27. Puntos de medición de espesor y densidad de nieve en primavera de 2013. Los puntos fueron medidos entre el 6 de noviembre y 17 de diciembre de 2013 en el glaciar Pirámide.

Punto	Largo Balizas (m)	Altura de nieve 6-11-2013 (m)	Altura de nieve 23-11-2013 (m)	Altura de nieve 17-12-2013 (m)	Número de mediciones	Densidad (g cm ⁻³)	Agua equivalente (m a.e.)
PAWS1	-	2,20	-	-	1	(0,58)*	1,28
P02	3	-	1,30	0	1	(0,58)*	0,75
P03	3	1,76	-	-	1	(0,58)*	1,02
P04	3	2,26	1,64	0,09	1	(0,58)*	1,31
P05	3	2,20	1,47	0	1	(0,58)*	1,28
P06	3	-	1,56	0,11	1	(0,58)*	0,90
P07	2	1,76	1,00	0	1	(0,58)*	1,02
P08	3	-	1,64	0	1	(0,58)*	0,95
P09	3	-	1,87	0	1	(0,58)*	1,08
Calicata P	-	2,20	-	-	1	0,58	1,28

*Se estima mediante densidad en calicata.

Tabla 28. Puntos de medición de espesor y densidad de nieve en primavera de 2014. Los puntos fueron medidos entre el 1 de octubre y el 4 de diciembre de 2014 en el glaciar Pirámide.

Punto	Largo Balizas (m)	Altura de nieve 1-10-2014 (m)	Altura de nieve 4-12-2014 (m)	Número de mediciones	Densidad (g cm ⁻³)	Agua equivalente (m a.e.)
AWS1	-	0,47	0	1	(0,28)*	0,13
PI 1	1,5	0,80	-	9	(0,28)*	0,22
PI 2	1,5	0,93	0	9	(0,28)*	0,26
PI 3	6	0,52	0	9	(0,28)*	0,15
PI 4	6	2,45	1,18	9	(0,28)*	0,69
PI 5	3	2,15	0,60	9	(0,28)*	0,60
PI 6	3	1,74	0,50	9	(0,28)*	0,49
MI 1	-	1,08	-	1	(0,28)*	0,30
PI 7	6	0,83	0	9	(0,28)*	0,23
MI 2	-	1,85	-	1	(0,28)*	0,52
PI 8	6	2,33	0,07	9	(0,28)*	0,65
MI 3	-	2,15	-	1	(0,28)*	0,60
PI 9	6	2,83	0,43	9	(0,28)*	0,79
Calicata P	-	0,60	-	1	0,28	0,17

*Se estima mediante densidad en calicata.

Tabla 29. Puntos de medición de espesor y densidad de nieve en primavera de 2015. Los puntos fueron medidos el día 22 de octubre de 2015 en el glaciar Pirámide.

Punto	Largo Balizas (m)	Altura de nieve 22-10-2015 (m)	Número de mediciones	Densidad (g cm ⁻³)	Agua equivalente (m a.e.)
AWS1	-	0,60	1	(0,36)*	0,22
PI 1	3	1,42	9	(0,36)*	0,51
PI 2	3	1,73	9	(0,36)*	0,62
PI 3	3	2,92	9	(0,36)*	1,05
PI 4	3	2,85	9	(0,36)*	1,03
PI 5	3	2,67	9	(0,36)*	0,96
PI 6	3	2,96	9	(0,36)*	1,07
MI 1	-	1,64	9	(0,36)*	0,59
PI 7	3	2,73	9	(0,36)*	0,98
MI 2	-	2,30	9	(0,36)*	0,83
PI 8	3	2,67	9	(0,36)*	0,96
MI 3	-	2,89	9	(0,36)*	1,04
PI 9	3	2,54	9	(0,36)*	0,91
Calicata P	-	1,70	1	0,36	0,61

*Se estima mediante densidad en calicata.

En general, los datos del espesor de nieve para la temporada 2013-2014, no responden a ningún patrón altitudinal (a diferencia con lo que sucede en el glaciar Tapado). Solamente las balizas P04, P05 y P09 (adyacentes entre sí), son las que posee un espesor mayor de nieve. A partir de la visita del día 29 de enero de 2014 en adelante, todas las balizas estaban sin nieve. Para la medición del día 1 de octubre de 2014, correspondiente a la siguiente temporada, poseen un cierto patrón altitudinal, con excepciones como PI 6 y PI 7. Las balizas PI 4 y PI 9 son las que poseen un espesor mayor de nieve. Para la segunda medición en diciembre de 2014, las balizas PI 2, PI 3 y PI 7 estaban sin nieve; el resto estaban cubiertas completamente de nieve, con valores que no responden al patrón altitudinal. A partir de la tercera medición realizada el día 10 de febrero de 2015, todas las balizas instaladas en el glaciar Pirámide estaban sin nieve; lo mismo sucede para la última visita el día 8 de abril de 2015.

Para la medición del día 22 de octubre de 2015, existe una leve relación altitudinal, pero existiendo lugares intermedios con poca acumulación (por ejemplo MI 1). Pero a diferencia de los años anteriores, solo 2 balizas (PI 1 y PI 2) y 1 medición intermedia (MI 1) estuvieron por debajo de los 2 m de nieve promedio, siendo un año con mayor espesor de nieve que los años hidrológicos anteriores.

Los resultados de las balizas instaladas sobre hielo durante la temporada 2013-2014, se observan en la Tabla 30, que a diferencia del anterior, estaban distribuidos

uniformemente dentro del glaciar Pirámide. La baliza PI1 no se midió el día 15 de abril de 2014, ya que se encontraba fuera del hielo. En la Tabla 31 se exponen las emergencias de las balizas que no estaban cubiertas con nieve, para el análisis de la ablación del hielo en el glaciar Pirámide durante la temporada 2014-2015. Adicionalmente se incluye el espesor de detritos medidos en cada una de las balizas instaladas. Por condiciones meteorológicas adversas, la baliza PI 9 no se midió en la tercera medición el día 10 de febrero de 2015 (tormentas eléctricas).

Tabla 30. Espesor de la capa de detritos y las emergencias de las balizas para hielo en el glaciar Pirámide, entre el 29 de enero al 15 de abril de 2014.

Punto	Largo Balizas (m)	Espesor de detritos (m)	Emergencia 29-01-2014 (m)	Emergencia 14-03-2014 (m)	Emergencia 15-04-2014 (m)
PI 1	1,5	0,20	0,45	1,00	-
PI 2	1,5	0,35	0,45	0,70	0,66
PI 3	6	0,20	0,80	1,60	1,86
PI 4	6	0,50	0,78	1,45	1,45
PI 5	3	0,27	0,09	1,58	1,65
PI 6	3	0,10	0,52	1,13	1,24
PI 7	6	0,13	0,64	1,08	1,15
PI 8	6	0,12	0,84	1,40	1,22
PI 9	6	0,02	0,40	1,45	1,55

Tabla 31. Espesor de la capa de detritos y las emergencias de las balizas en el glaciar Pirámide para la ablación del hielo, entre el 4 de diciembre de 2014 al 8 de marzo de 2015.

Punto	Largo Balizas (m)	Espesor de detritos (m)	Emergencia 4-12-2014 (m)	Emergencia 10-02-2015 (m)	Emergencia 8-04-2015 (m)
PI 1	1,5	-	-	-	-
PI 2	1,5	0,37	0,88	1,08	1,08
PI 3	6	0,18	2,19	3,27	3,77
PI 4	6	0,15	-	3,22	3,51
PI 5	3	0,32	-	2,34	2,59
PI 6	3	0,12	-	2,40	2,62
PI 7	6	0,02	1,32	2,72	4,20
PI 8	6	0,07	-	2,59	3,00
PI 9	6	0,03	-	-	4,36

En lo que respecta a la ablación del hielo durante la temporada 2013-2014, es mayor en PI 3 donde llega casi a 2 m, pero en PI 2 la emergencia es muy baja. Estos resultados no hacen correlación con la altitud o la posición dentro del glaciar. En lo que respecta a la emergencia de las balizas durante la temporada 2014-2015, son mayores en PI 7 y

PI 9 donde son superiores a 4 m, pero en PI 2 la emergencia es muy baja. Esta última se debe a que existen deslizamientos laterales que podría aportar con detritos, lo cual se manifiesta en la no variación entre el 10 de febrero y el 8 de abril de 2015. Para el caso de PI1, no se pudieron obtener resultados de la emergencia de dicha baliza, debido a que hubo un colapso parcial de material detrítico en el lugar, la cual destruyó y enterró dicha baliza. Estos resultados no poseen correlación con la altitud ni con la ubicación dentro del glaciar. Sin embargo, existe una leve relación entre el espesor de detritos y la variación de las emergencias para ambas temporadas que fueron analizadas. Para el año hidrológico 2015, no se hicieron mediciones de ablación de hielo, debido a que, hasta la fecha, las balizas aún se encuentran con presencia de nieve.

Para la realización del balance de masa distribuido en el glaciar Pirámide, se usaron los datos de las balizas de nieve y hielo combinadas para la temporada 2013-2014, así como también la calicata y la estación meteorológica, para poder determinar la acumulación, ablación y balance de masa distribuido, mediante polígonos de Thiessen, los que se observan en la

Figura 24. Para el balance de masa distribuido de la temporada 2014-2015, se usaron las mismas balizas instaladas sobre hielo en la temporada anterior, además de mediciones intermedias con sondas, calicata y estación meteorológica para determinar la acumulación; las balizas para determinar la ablación y posteriormente el balance de masa. Los resultados para esa temporada se observan en la
Figura 25.

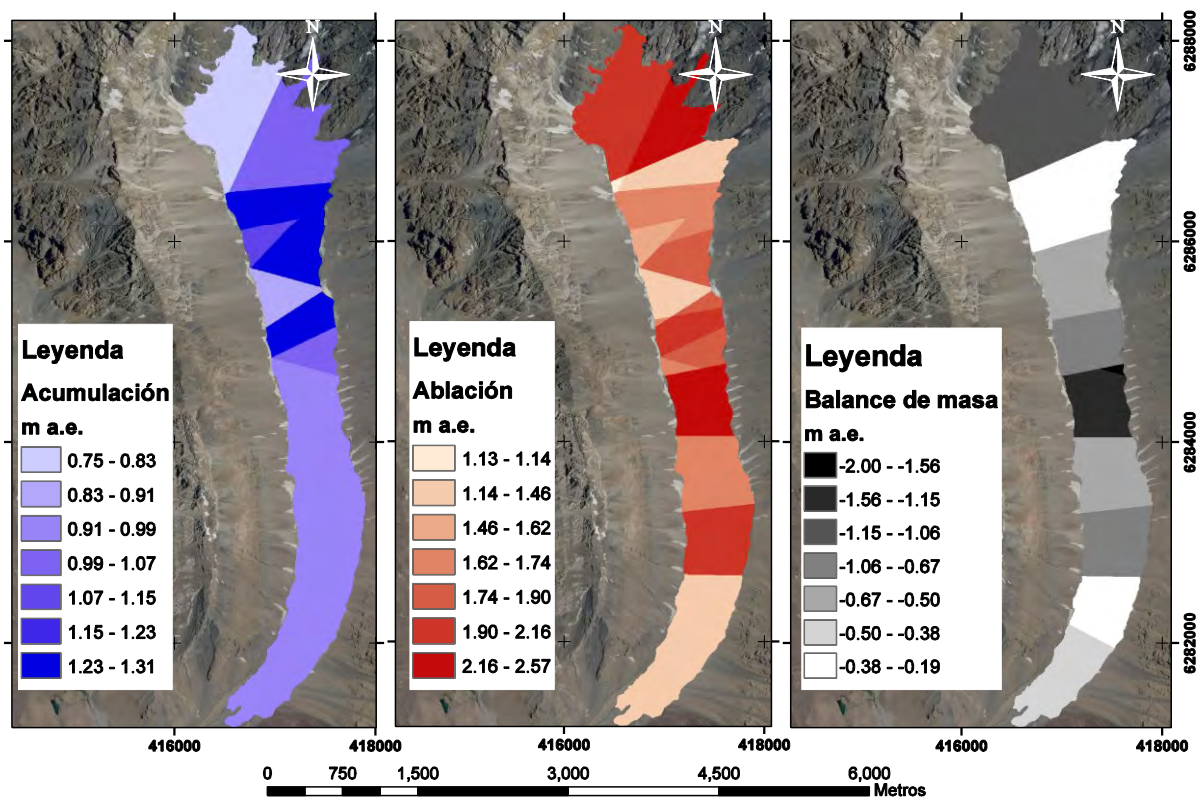


Figura 24: Acumulación, ablación y balance de masa distribuido en el glaciar Pirámide durante la temporada 2013-2014, mediante polígonos de Thiessen. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-12-2013.

Para la temporada 2013-2014, la distribución de acumulación fue difícil, debido a que no existen mediciones en la sección inferior del glaciar, no así sucedió en el caso de la ablación y el balance de masa. Como se puede observar, no existe un patrón altitudinal en la acumulación ni en la ablación, así como tampoco en el balance de masa. Solo existe una relación con el espesor de detritos, como fue expuesto anteriormente.

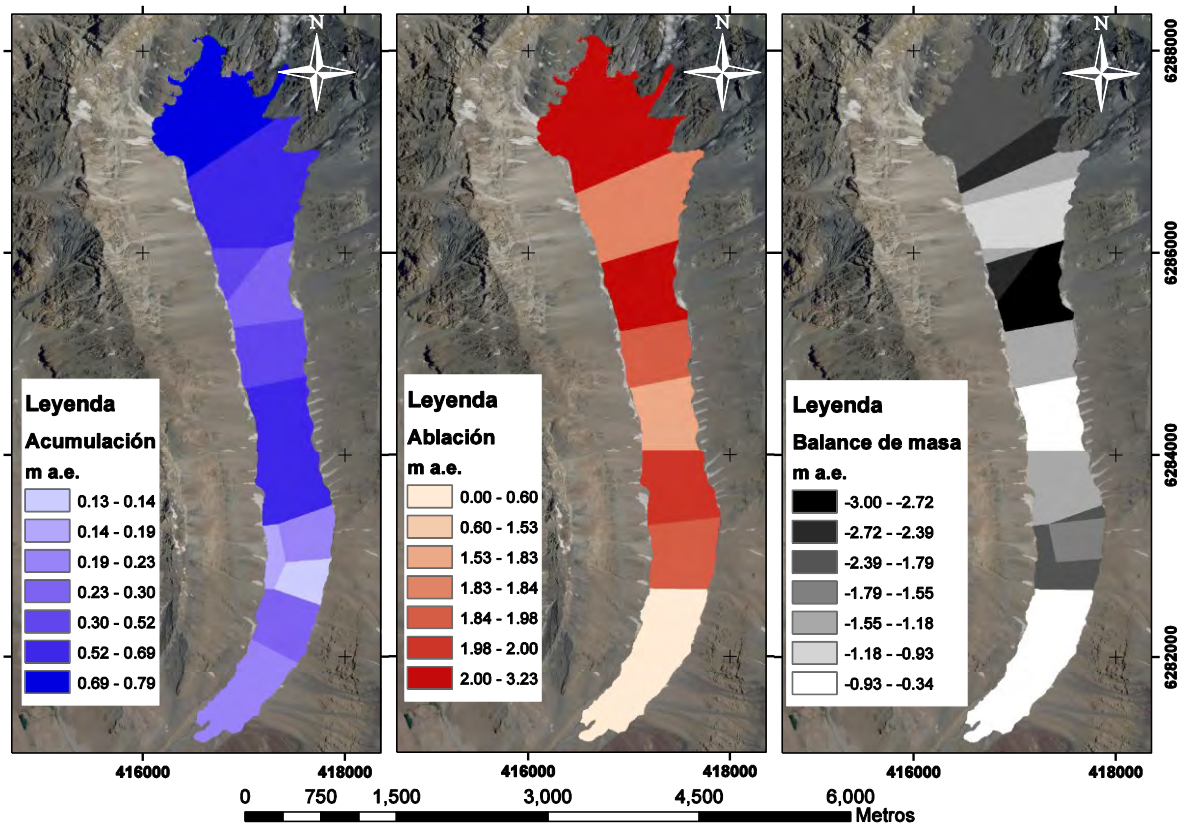


Figura 25: Acumulación, ablación y balance de masa distribuido durante la temporada 2014-2015 en el glaciar Pirámide, mediante polígonos de Thiessen. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-12-2013.

Para la temporada 2014-2015, como existen más datos medidos de acumulación dentro del glaciar, se puede ver una cierta relación altitudinal, principalmente en la cabecera, pero también una importante acumulación en el centro del glaciar. La ablación en cambio, es mayor en la parte central superior del glaciar y en la cabecera, donde la cobertura de detritos es menor. Finalmente el balance de masa muestra una pérdida mucho mayor en el centro superior del glaciar y una ablación muy baja en el frente del glaciar cubierto. Como en el balance de masa de ambas temporadas, resultaron disímiles entre sí desde el punto de vista espacial, se puede considerar que este glaciar tiene un comportamiento variable, dependiendo de la temporada, la cual es difícil determinar un patrón.

Finalmente para la temporada 2015-2016 existen hasta la fecha, solo mediciones de acumulación en el glaciar Pirámide, las cuales permiten definir la distribución de la nieve acumulada a partir de las balizas instaladas y las mediciones intermedias realizadas, las cuales se pueden observar en la Figura 26.

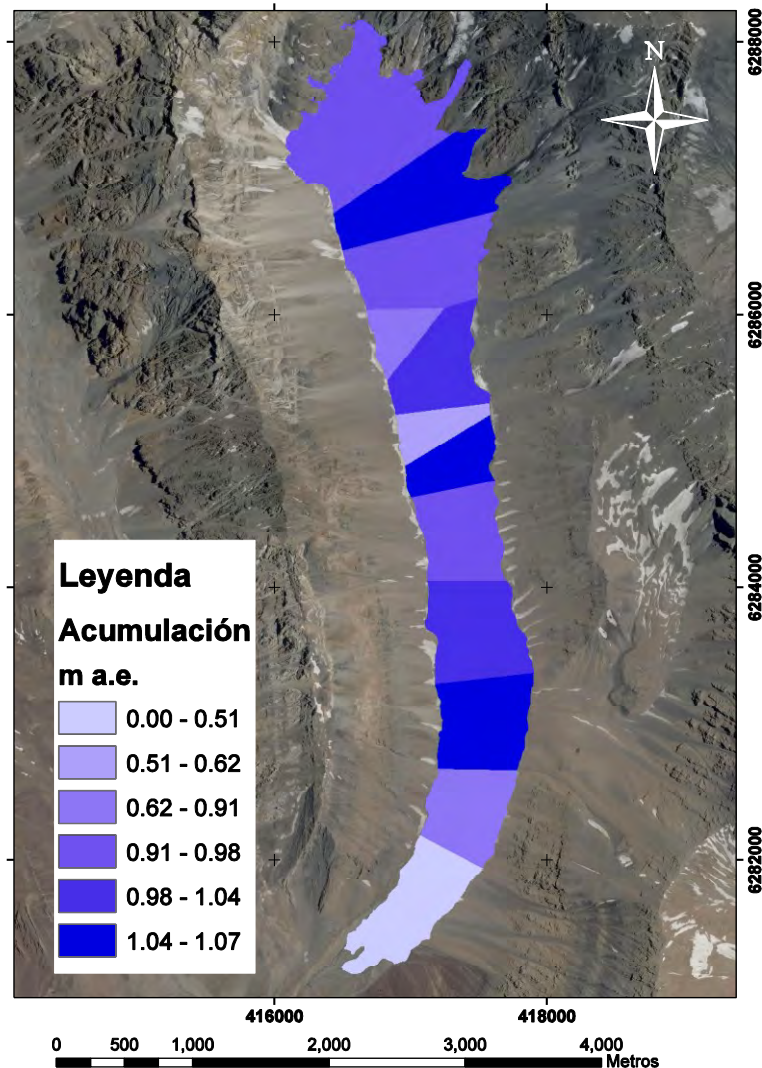


Figura 26: Acumulación distribuida en metros de agua equivalente para el glaciar Pirámide durante la temporada 2015-2016. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-12-2013.

Para la temporada 2015-2016, la acumulación tiene un cierto patrón altitudinal, pero, por la configuración del glaciar, no permite definir una gradiente clara de acumulación para dicha temporada, considerando que existen mediciones en el centro del glaciar que son inferiores a los 60 centímetros de agua equivalente.

A partir de estos datos, se puede analizar la acumulación, ablación y balance de masa puntual de todas las temporadas, ya que para la temporada 2013-2014 se tuvo que estimar la acumulación de las balizas instaladas en hielo, usando los polígonos anteriormente expuestos, las que se muestran en la Figura 24. Esta dificultad no está presente en las temporadas siguientes, ya que se usaron las mismas balizas, las que se muestra en la Figura 25 para 2014-2015 y en la Figura 26 para 2015-2016.

Tabla 32. Acumulación y ablación de la nieve, como también la ablación del hielo en el glaciar Pirámide durante la temporada 2013-2014.

Punto	Acumulación (m a.e.)	Ablación de nieve (m a.e.)	Ablación de hielo (m a.e.**)	Ablación total (m a.e.)	Balance de masa (m a.e. ***)
P02	0,75	0,75	-	-	-
P03	1,02	1,02	-	-	-
P04	1,31	1,31	-	-	-
P05	1,28	1,28	-	-	-
P06	0,90	0,90	-	-	-
P07	1,02	1,02	-	-	-
P08	0,95	0,95	-	-	-
P09	1,08	1,08	-	-	-
PI 1	0,95*	0,95*	0,50	1,45	-0,50
PI 2	0,95*	0,95*	0,19	1,14	-0,19
PI 3	0,95*	0,95*	1,06	2,01	-1,06
PI 4	0,95*	0,95*	0,67	1,62	-0,67
PI 5	0,95*	0,95*	1,56	2,51	-1,56
PI 6	1,28*	1,28*	0,72	2,00	-0,72
PI 7	0,90*	0,90*	0,51	1,41	-0,51
PI 8	1,31*	1,31*	0,38	1,69	-0,38
PI 9	0,75*	0,75*	1,15	1,90	-1,15

* Estimada según método de polígonos de Thiessen de área cercana a la baliza instalada en nieve (P0).

** Desde el 29 de enero hasta el 15 de abril de 2014.

*** Se ocupa la densidad de nieve promedio en la calicata (0,58 g cm⁻³) y densidad de hielo teórica (0,90 g cm⁻³).

Tabla 33. Acumulación y ablación de la nieve y hielo en el glaciar Pirámide durante el período anual durante la temporada 2014-2015.

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Acumulación (m a.e.)	Ablación (m a.e.)	Balance de masa (m a.e. *)
PI 2	417312	6282377	3360	0,26	0,60	-0,34
PI 3	417323	6282960	3435	0,14	1,98	-1,84
PI 4	417246	6283650	3508	0,69	2,00	-1,31
PI 5	417246	6284443	3598	0,60	1,53	-0,93
PI 6	417144	6284956	3671	0,49	1,84	-1,35
PI 7	417037	6285551	3708	0,23	3,23	-3,00
PI 8	416796	6286353	3796	0,65	1,83	-1,18
PI 9	416517	6287001	3836	0,79	3,18	-2,39

*Se ocupa la densidad de nieve promedio en la calicata (0,28 g cm⁻³) y densidad de hielo teórica (0,90 g cm⁻³).

Tabla 34. Acumulación de la nieve en el glaciar Pirámide durante el período anual durante la temporada 2015-2016.

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Acumulación (m a.e.)
PI 1	417044	6281865	3340	0,51
PI 2	417312	6282377	3360	0,62
PI 3	417323	6282960	3435	1,05
PI 4	417246	6283650	3508	1,03
PI 5	417246	6284443	3598	0,96
PI 6	417144	6284956	3671	1,07
PI 7	417037	6285551	3708	0,98
PI 8	416796	6286353	3796	0,96
PI 9	416517	6287001	3836	0,91

*Se ocupa la densidad de nieve promedio en la calicata ($0,36 \text{ g cm}^{-3}$) y densidad de hielo teórica ($0,90 \text{ g cm}^{-3}$).

En comparación con las primeras 2 temporadas, se muestra que el glaciar está con un balance de masa en general negativo, pero siendo considerablemente mayor en la temporada 2014-2015, con valores que superan los 2 m a.e. de pérdida en algunas de las balizas. En la primera temporada, todas las balizas perdieron menos de 2 m a.e., lo que indica que la temporada 2013-2014 se perdió menos masa que la temporada siguiente. Esto se debe principalmente por la poca acumulación de nieve durante los meses de invierno de 2014, que repercutió en una mayor ablación en el verano de 2015. Para la última temporada, no es posible determinar el balance de masa, ya que hasta la fecha, aún existe presencia de nieve en las balizas, pero se estima, por el espesor de la nieve, que debiese ser similar a la primera temporada.

En resumen, el balance de masa general del glaciar Pirámide, esto es, promedio total por superficie del glaciar, se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35: Acumulación, ablación y balance de masa promedio total (desviación estándar en paréntesis) del glaciar por año hidrológico en el glaciar Pirámide.

Año hidrológico	Acumulación [m a.e.]	Ablación [m a.e.]	Balance de masa [m a.e.]
2013	0,99 (0,16)	1,77 (0,35)	-0,77 (0,39)
2014	0,50 (0,23)	2,10 (0,90)	-1,59 (0,82)
2015	0,90 (0,17)	-	-
Promedio*	0,75	1,94	-1,18**

* Se consideran solo los datos disponibles.

** Corresponde al promedio de los años hidrológicos 2013 y 2014.

Con ello se confirma que el año hidrológico 2014 hubo mayor pérdida de masa en el glaciar Pirámide, comparado con el año anterior y que, respecto a la acumulación, el primer y último año son similares. También, mediante el cálculo de la desviación

estándar, muestra que la ablación y el balance de masa del año hidrológico 2014, fue más heterogénea que respecto al año 2013. Finalmente, estos valores están en concordancia con otros estudios realizados en glaciares cubiertos (Bozhinskiy et al., 1986; Sugiyama, 2003).

3.2.1.1 Glaciar Bello

Para el caso de este glaciar, se instalaron 9 balizas distribuidas a lo largo de la línea central del glaciar, que se pueden observar en la Figura 27. Adicionalmente, para la temporada 2014-2015 se midieron 2 balizas ajenas (balizas instaladas por otro proyecto), las cuales igualmente sirven como mediciones complementarias. La baliza más alta (B1) se encuentra a 4416 m snm mientras la más baja (B9) se encuentra a 3996 m snm.

Las mediciones de ablación de nieve y hielo durante la temporada 2013-2014 se hicieron los días 16 de enero, 14 de marzo y 15 de abril de 2014. Las mediciones de ablación de nieve y hielo durante la temporada 2014-2015 se hicieron los días 1 de octubre; 4 y 26 de diciembre de 2014; 27 de febrero de 2015 y 15 de abril de 2015. El día 27 de febrero de 2015, se procedió a reinstalar 6 balizas en la parte superior del glaciar, ya que las balizas antiguas estaban fuera del hielo producto de la alta ablación registrada. Finalmente el día 22 de octubre de 2015, se reinstalaron todas las balizas del glaciar bello y se procedió a medir la acumulación de la temporada 2015-2016.

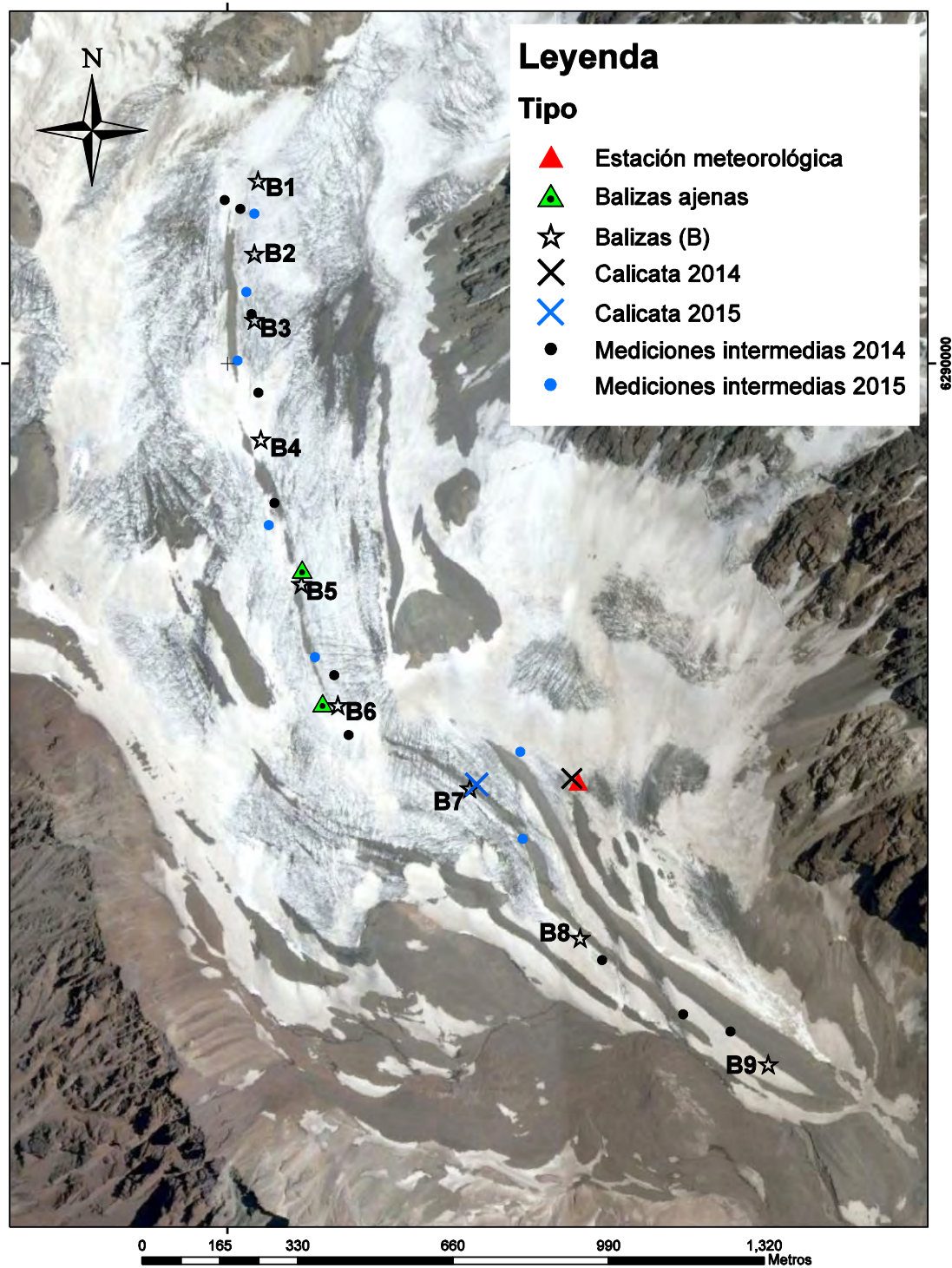


Figura 27. Mapa general de la distribución de balizas y estación meteorológica en el glaciar Bello. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 04-01-2014.

En la Tabla 36 se puede observar la ubicación de la estación, las balizas instaladas y medidas, así como también las calicatas y mediciones intermedias (MI). A diferencia de los otros glaciares, existen diferencias en la ubicación entre las temporadas, lo que se debe al desplazamiento que tuvo el glaciar durante estas dos temporadas de medición, lo que es un insumo adicional para determinar el movimiento del glaciar. Las balizas instaladas el 22 de octubre de 2015 se ubican en los mismos puntos que las balizas anteriores, salvo la B 9 (ver Tabla 37).

Tabla 36. Ubicación de la estación, balizas y calicata realizada en el glaciar Bello, durante ambas temporadas.

<i>Punto</i>	Temporada 2013-2014			Temporada 2014-2015		
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
<i>AWS Bello</i>	412744	6289113	4134	412744	6289113	4134
B 1	412064	6290386	4408	412064	6290388	4416
MI 1	-	-	-	411994	6290347	4400
MI 2	-	-	-	412027	6290328	4392
B 2	412054	6290230	4395	412057	6290233	4392
MI 3	-	-	-	412051	6290105	4373
B 3	412054	6290099	4382	412057	6290093	4372
MI 4	-	-	-	412065	6289938	4351
B 4	412069	6289840	4338	412070	6289839	4332
MI 5	-	-	-	412099	6289704	4320
Ajena	-	-	-	412158	6289563	4313
B 5	412158	6289532	4305	412156	6289533	4305
MI 6	-	-	-	412226	6289339	4285
B 6	412238	6289270	4271	412234	6289276	4271
Ajena	-	-	-	412201	6289280	4267
Grietas	-	-	-	-	-	-
MI 7	-	-	-	412257	6289212	4250
B 7	412511	6289096	4167	412514	6289099	4172
B 8	412742	6288778	4089	412748	6288782	4102
MI 8	-	-	-	412795	6288734	4065
MI 9	-	-	-	412967	6288619	4031
MI 10	-	-	-	413067	6288583	4023
B 9	413147	6288510	3998	413147	6288514	3996
Calicata	-	-	-	412730	6289120	4143

Tabla 37: Ubicación de las balizas instaladas el 22 de octubre de 2015 en el glaciar Bello.

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)
B1	412064	6290357	4397
MI	412057	6290318	4379
B2	412053	6290241	4392
MI	412040	6290152	4382
B3	412057	6290098	4370
MI	412021	6290006	4356
B4	412073	6289834	4336
MI	412087	6289657	4315
B5	412158	6289536	4304
MI	412185	6289377	4291
B6	412228	6289328	4287
MI	412621	6289176	4116
B7	412528	6289104	4167
MI	412626	6288991	4141
B8	412743	6288780	4092
B9	412909	6288636	4048
calicata	412528	6289107	4160

La primera calicata en el glaciar Bello se realizó el día 1 de octubre de 2014. Tuvo una profundidad de 1,70 m hasta llegar al hielo, en el cual la densidad promedio fue de 0,31 g/cm³ y el agua equivalente de dicha medición es de 0,53 m a.e. La calicata del año 2015 se realizó el 22 de octubre, tuvo una profundidad de 235 cm una densidad promedio de 0,38 g/cm³ y registró 0,9 m a.e. Los datos específicos de dichas calicatas se pueden observar en la Figura 28. Para la temporada 2013-2014, se considera como medición, la calicata realizada en el glaciar Pirámide en dicha temporada. Todos los datos detallados pueden observarse en el anexo digital.

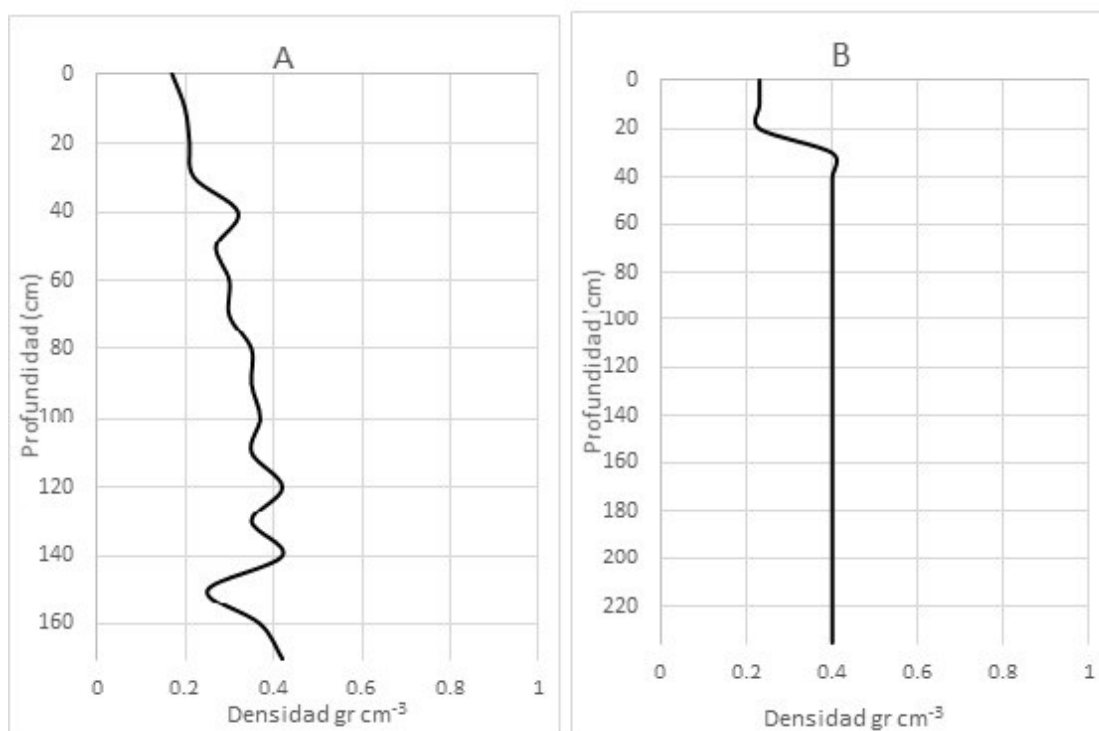


Figura 28: Perfil de calicata año 2014-2015 (A) y 2015-2016 (B)

Durante la temporada 2013-2014 no se midió acumulación ya que las balizas se instalaron en enero de 2014, por lo que la acumulación se estimó a partir de los datos del sensor de altura de nieve de la AWS de Bello. La ablación se calculó utilizando la densidad teórica del hielo ($0,9 \text{ gr cm}^{-3}$). Todos estos datos se pueden observar en la Tabla 38, la cual muestran las emergencias de las balizas medidas en el glaciar Bello a distintas fechas, además de la ablación total en metros y m a.e.

Tabla 38: Ubicación, emergencia de la baliza medida en los días 16 de enero, 14 de marzo y 15 de abril de 2014, además de la ablación total para el glaciar Bello durante la temporada estival.

Punto	Largo Baliza (m)	Acumulación 15-11-2013 (m)	Emergencia 16-01-2014 (m)	Emergencia 14-03-2014 (m)	Emergencia 15-04-2014 (m)	Ablación total (m)	Ablación total (m a.e.)
<i>AWS Bello</i>	-	0,28	-	-	-	-	-
B 1	3	-	0,40	-	1,09	0,69	0,62
B 2	3	-	0,35	1,49	1,74	1,39	1,25
B 3	3	-	0,22	-	2,08	1,86	1,67
B 4	3	-	0,38	-	1,23	0,85	0,77
B 5	3	-	0,22	1,04	1,09	0,87	0,78
B 6	3	-	0,16	-	-	-	-
B 7	3	-	0,23	1,72	1,81	1,58	1,42
B 8	3	-	0,19	1,53	1,69	1,50	1,35
B 9	3	-	0,22	1,32	1,49	1,27	1,14

Los datos de la altura de nieve y sus emergencias de las balizas, así como también la altura de nieve medida en los puntos intermedios, correspondientes a la temporada 2014-2015, se pueden observar en la Tabla 39. El alza que se produce en la altura de nieve entre el 4 y el 26 de diciembre de 2014, se produce por un evento de precipitación detectado. Lo mismo sucede para el día 8 de abril de 2015.

Tabla 39: Emergencia (E) y altura de nieve (hn) en centímetros (cm) de las balizas medidas entre los días 10 de octubre de 2014 y 8 de abril de 2015 en el glaciar Bello.

Punto	Nro.	01-10-2014		04-12-2014		26-12-2014		10-02-2015		27-02-2015		08-04-2015	
	Mediciones	E	hn	E	hn	E	hn	E	hn	E**	hn	E	hn
B1	9	*	71	*	3	151	24	-	-	37	0	132	8
MI1	1	-	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI2	1	-	158	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	9	*	105	114	3	193	33	-	-	158	0	190	5
MI3	1	-	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	9	*	81	114	5	127	35	165	0	37	0	166	12
MI4	1	-	118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B4	9	*	148	*	33	114	-	380	0	75	0	116	11
MI5	1	-	211	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ajena	9	58	191	201	85	250	-	385	0	-	0	-	-
B5	9	*	101	*	12	107	29	250	0	122	0	180	8
MI6	1	-	147	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B6	9	*	173	*	24	-	62	274	0	33	0	89	8
Ajena	9	-	-	210	21	247	-	247	0	-	-	-	-
Grietas													
MI7	1	-	230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B7	9	*	125	178	3	135	65	-	-	-	-	-	-
B8	9	*	290	*	115	-	72	-	-	-	-	-	-
MI8	1	-	230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI9	1	-	166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI10	1	-	115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B9		*	257	*	174	-	92	255	0	-	-	-	-

* Balizas bajo la nieve, por lo que no se pudo medir la emergencia.

** Balizas nuevas instaladas el 27 de febrero de 2015. Los guiones indican que no hubo medición.

Para la temporada 2013-2014 solamente existen datos de acumulación asociados a la estación meteorológica AWS Bello, en el marco de ablación instalado el 15 de noviembre de 2013 (2,12 m). Un punto importante de comparación es ver la altura de nieve para la misma fecha en 2014 en la misma estación (1,36 m), lo cual indica que la temporada 2013-2014, hubo más acumulación de nieve en ese punto de medición en el glaciar Bello.

En la Tabla 40 se muestra el largo de las balizas, así como también los resultados de los cálculos de acumulación, ablación y el balance de masa puntual para la temporada 2014-2015 en el glaciar Bello.

Tabla 40. Largo de las balizas medidas, acumulación, ablación y balance de masa para el glaciar Bello durante la temporada estival 2014-2015.

<i>Punto</i>	Largo Balizas (m)	Acumulación (m.a.e.)	Ablación (m.a.e.)	Balance de masa (m.a.e.)
B 1	3	0,22	2,87	-2,65
B 2	3	0,33	1,79	-1,47
B 3	3	0,25	3,50	-3,25
B 4	3,85	0,46	3,28	-2,83
Ajena	-	0,59	1,82	-1,22*
B 5	3	0,31	2,63	-2,31
B 6	3	0,54	2,26	-1,72
Ajena Grietas	-	0,71	0,86	-0,14*
B 7	3	0,39	1,46	-1,07**
B 8	3	0,90	-	-
B 9	3	0,80	2,16	-1,36***

* No representa temporada completa, desde el 1-10-2014 hasta 10-02-2015.

** No representa temporada completa, desde el 4-12-2014 hasta que salió del hielo (entre el 26-12-2014 y el 10-02-2015).

*** No representa temporada completa, desde el 1-10-2014 hasta que salió del hielo (posterior al día 10-02-2015).

El día 22 de octubre de 2015 se reinstalaron las 9 balizas en el glaciar Bello, ya que las balizas anteriores estaban fuera del hielo y bajo el manto de nieve. Adicionalmente se midieron 8 puntos de mediciones intermedias (MI). Cada baliza y medición intermedia se compone de 9 mediciones cada una, de la cual se obtiene el promedio, que es el valor observado en la tabla de resumen de mediciones de acumulación (Tabla 41).

Tabla 41: Acumulación temporada 2015-2016, datos obtenidos el 22-10-2015

Punto	Altura de nieve (cm)	Emergencia (cm)	Acumulación (m a.e.)
<i>B1</i>	137	121	0,52
<i>MI</i>	195	-	0,74
<i>B2</i>	260	87	0,99
<i>MI</i>	199	-	0,75
<i>B3</i>	186	105	0,71
<i>MI</i>	241	-	0,91
<i>B4</i>	282*	103	1,07*
<i>MI</i>	258	-	0,98
<i>B5</i>	230	56	0,87
<i>MI</i>	300*	-	1,14*
<i>B6</i>	255	57	0,97
<i>Mi</i>	229	-	0,87
<i>B7</i>	158	91	0,60
<i>MI</i>	300*	-	1,14*
<i>B8</i>	272*	51	1,03*
<i>B9</i>	240*	0	0,91*

* Mediciones con valores superiores a 3 m, fueron promediadas como 3 m.

En la temporada 2013-2014, la ablación total no tiene una relación altitudinal, siendo el punto de mayor ablación B3 ubicado al centro del glaciar, mientras alrededor a éste se ubica el punto con menor ablación, por lo que se puede entender que la distribución de la ablación total es irregular, probablemente por desplazamientos. La baliza B6 no apareció el día 14 de marzo ni tampoco el día 15 de abril de 2014.

En la temporada 2014-2015 la mayor pérdida de masa ocurrió en la baliza B3 con 3,5 m a.e. de ablación. Por otro lado, la menor ablación se registró en el punto B2, con 1,5 m a.e. Estos datos muestran que la ablación en dicho período no muestra un patrón altitudinal claro, al igual que la temporada anterior. Esto se debe a que la zona de monitoreo del glaciar tiene poca variación altitudinal. El balance de masa de todos los puntos fue negativo, esto quiere decir que el glaciar Bello perdió más masa en verano de la que recupera en invierno, en ambas temporadas.

Durante la temporada 2015-2016 las mediciones de acumulación muestran que este año la cantidad de nieve en el glaciar Bello fue superior a los 2 años hidrológicos anteriores, ya que acumuló en promedio de 0,89 m a.e. puntual, mientras que el año

hidrológico 2013-2014 y 2014-2015 solo 0,28 m a.e. y 0,5 m.a.e, respectivamente. En términos generales el glaciar acumula mayor cantidad de nieve en la zona inferior, producto de la depositación de nieve debido al transporte por viento.

Para el balance de masa distribuido en el glaciar Bello, se realizaron polígonos de Thiessen para todas las temporadas. Para la temporada 2013-2014, se realizó el balance de masa del glaciar (ver Figura 29) desde la primera medición el día 16 de enero de 2014. Esta misma metodología se ocupó para la acumulación, ablación y balance de masa distribuida en la temporada siguiente, como se muestra en la Figura 30.

A partir de la información entregada por las balizas, se puede observar que, para las dos temporadas, la parte central asociada a la baliza B 2 es la que tiene mayor ablación en el glaciar Bello. Esto se debe a las características propias de ese sector, que posee baja pendiente.

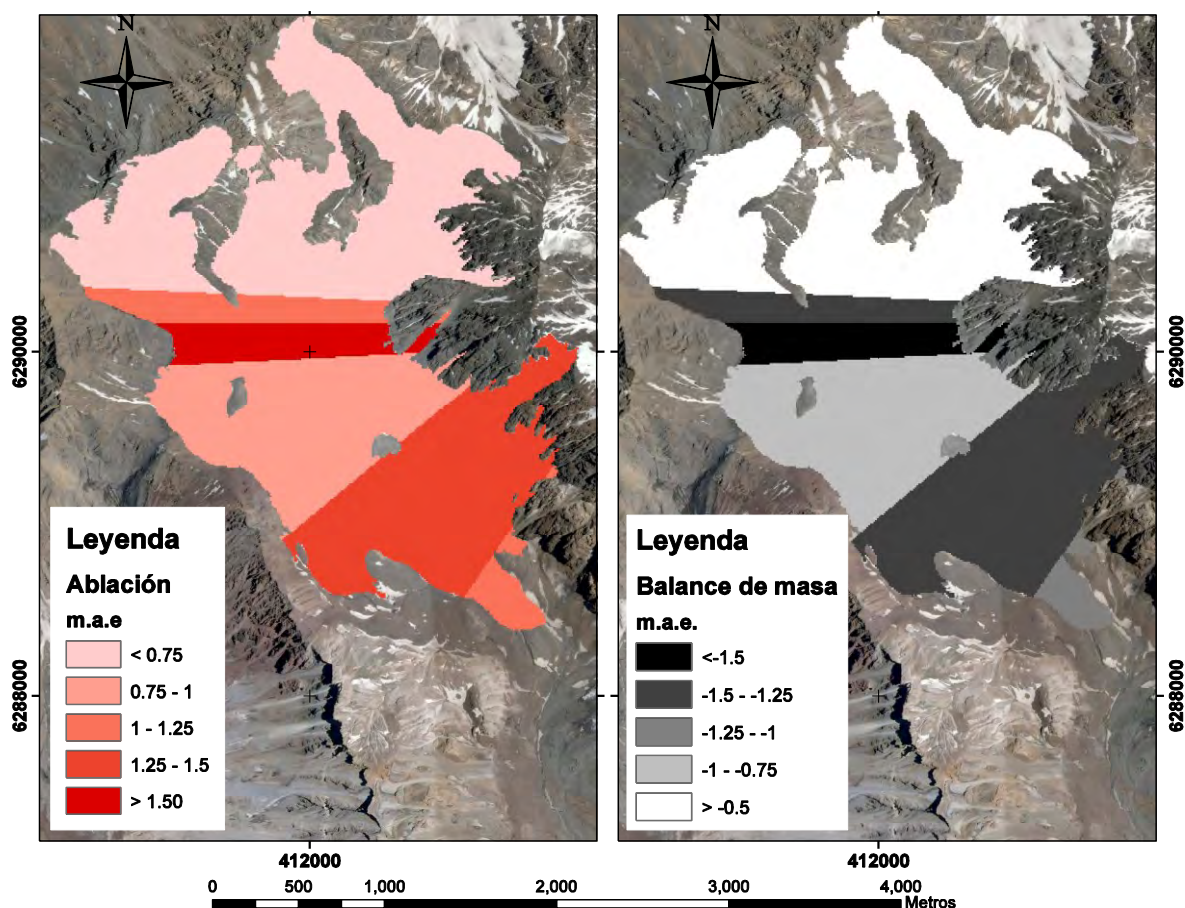


Figura 29: Ablación y balance de masa distribuida durante la temporada 2013-2014, mediante polígonos de Thiessen en el glaciar Bello. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 04-01-2014.

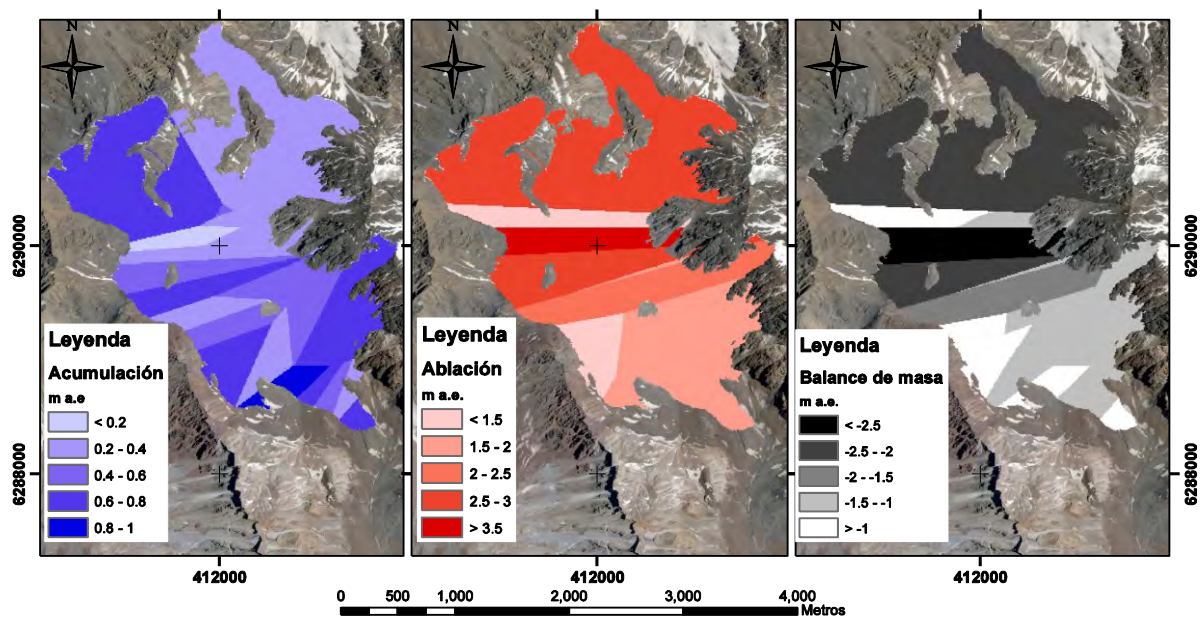


Figura 30: Acumulación, ablación y balance de masa distribuida mediante polígonos de Thiessen durante la temporada 2014-2015 en el glaciar Bello. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 04-01-2014.

Durante la temporada 2014-2015 en el glaciar Bello, el balance de masa distribuido muestra una acumulación que no tiene relación altitudinal, pero que tiende levemente a acumularse más hacia el suroeste, lo que está relacionado al transporte de nieve por viento o avalanchas laterales. Para la ablación, el sector central (al igual que la temporada anterior) posee mayor pérdida de masa, por la configuración propia de ese sector y una ablación menor hacia el frente del glaciar (probablemente por la alta acumulación). Finalmente el balance de masa muestra una situación peculiar, en donde la cabecera pierde más masa que el frente del glaciar y, en forma considerable, el sector asociado a la baliza B2, por lo cual este glaciar posee un comportamiento atípico durante la temporada 2014-2015.

La temporada de acumulación 2015-2016 muestra, al igual que los años anteriores, una mayor acumulación en la parte media e inferior del Glaciar Bello (Figura 31), esto debido al transporte por viento que arrastra nieve desde las zonas altas del glaciar y las deposita en la zonas más bajas.

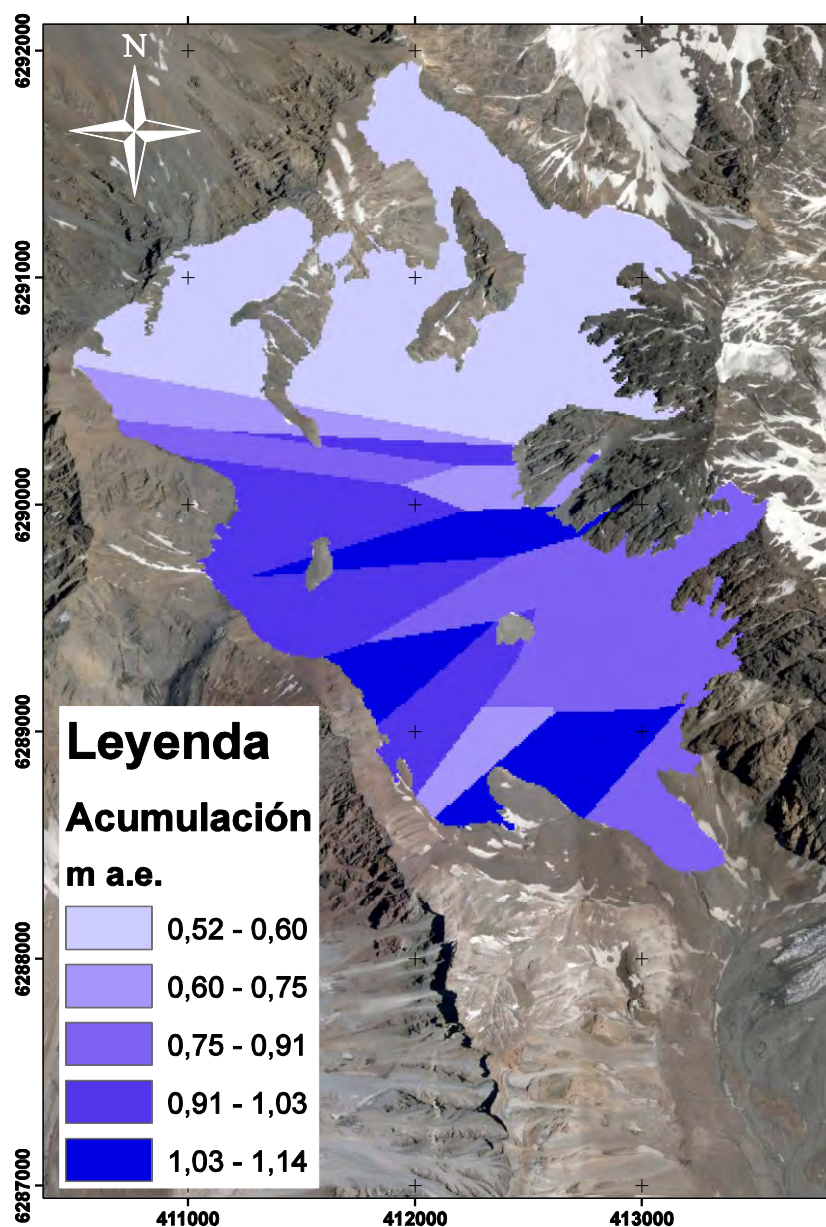


Figura 31: Acumulación mediante polígonos de Thiessen en el glaciar Bello, temporada 2015-2016 Imagen: Google Earth CNES/Astrium 04-01-2014.

Finalmente en la Tabla 42 se muestra una tabla resumen, con el promedio y la desviación estándar de la acumulación, ablación y balance de masa del glaciar Bello, por superficie, en los tres años hidrológicos analizados.

Tabla 42: Acumulación, ablación y balance de masa promedio total del glaciar por año hidrológico en el glaciar Bello (en paréntesis la desviación estándar).

Año hidrológico	Acumulación [m a.e.]	Ablación [m a.e.]	Balance de masa [m a.e.]
2013	-	0,98 (0,34)	-0,98 (0,34)
2014	0,47 (0,20)	2,31 (0,56)	-1,84 (0,68)
2015	0,77 (0,21)	-	-
Promedio*	0,62	1,65	-1,41**

* Se consideran sólo los datos disponibles, promediado por variable.

** Es el promedio entre los años hidrológicos 2013 y 2014.

Con ello se confirma que el último año hidrológico (2015), fue el que tuvo mayor acumulación y el año hidrológico 2014 fue el que tuvo mayor ablación y, por ende, mayor pérdida de masa en el glaciar. Adicionalmente, la tasa de ablación fue más heterogénea en el año hidrológico 2014, esto es, hubo zonas con mucha ablación y otras con poca ablación, la cual se ve reflejada en el dato de la desviación estándar del balance de masa de ese año.

3.3 BALANCE DE MASA GEODÉSICO

3.3.1 Balance de masa geodésico en Chile Central

El balance de masa geodésico para Chile Central se realizó en los glaciares Bello, Yeso y Pirámide. De estos glaciares, solo Bello y Pirámide tienen conjuntamente mediciones de balance de masa glaciológico. Cabe recordar que el balance de masa geodésico está calculado entre el 27-02-2014 y 5-05-2015, fechas de obtención de las imágenes satelitales utilizadas para generar los respectivos MEDs.

El glaciar Pirámide presentó un balance de masa negativo (-2,32 m a.e), el cual fue mayor que los otros dos glaciares aledaños (Tabla 43). Con respecto a los rangos de elevación, el glaciar Pirámide presentó cambios de elevación negativos en casi toda su superficie (Figura 32). En el rango de elevación de 3900-4000 m, el glaciar mostró un cambio de elevación promedio de 1,72 m. Esto puede reflejar en cierta medida la presencia de acumulación por avalanchas al final de la época estival e inicios de periodo de acumulación para el año 2015. Sobre este rango de elevación, los cambios de elevación promedio fueron bastante moderados y cercanos a valores de 0 m (es decir, sin cambios significativos), siendo esta la área con mayor pendiente del glaciar.

El glaciar Bello presentó un balance de masa moderadamente negativo (-1,89 m a.e.), y similar al glaciar Yeso (Tabla 43). Con respecto a los rangos de elevación, el glaciar Bello presentó cambios de elevación negativos en casi toda su superficie (Figura 32). En el rango de elevación de 4600-4700 m, el glaciar mostró un cambio de elevación promedio de 0,22 m. En este caso, este rango es el que presenta una de las mayores pendientes en el glaciar.

El glaciar Yeso presentó un balance de masa negativo (-1,70 m a.e.), el cual fue menor que los otros dos glaciares (Tabla 43). Este glaciar mostró cambios de elevación promedio negativos en casi todos los rangos de elevación. Entre los 4600-4700 m presentó un valor promedio positivo de 0,69 m.

Tabla 43. Resumen de los valores de cambio de elevación, volumen y balance de masa en los glaciares de Chile Central.

Glaciar	Área (km ²)	Cambio promedio elevación (m)	Cambio de volumen (10 ⁶ m ³)	Balance de masa (m a.e.)
Bello	4,21	-2,1	-8,88	-1,89
Yeso	2,03	-1,89	-3,84	-1,70
Pirámide	4,39	-2,57	-11,31	-2,32

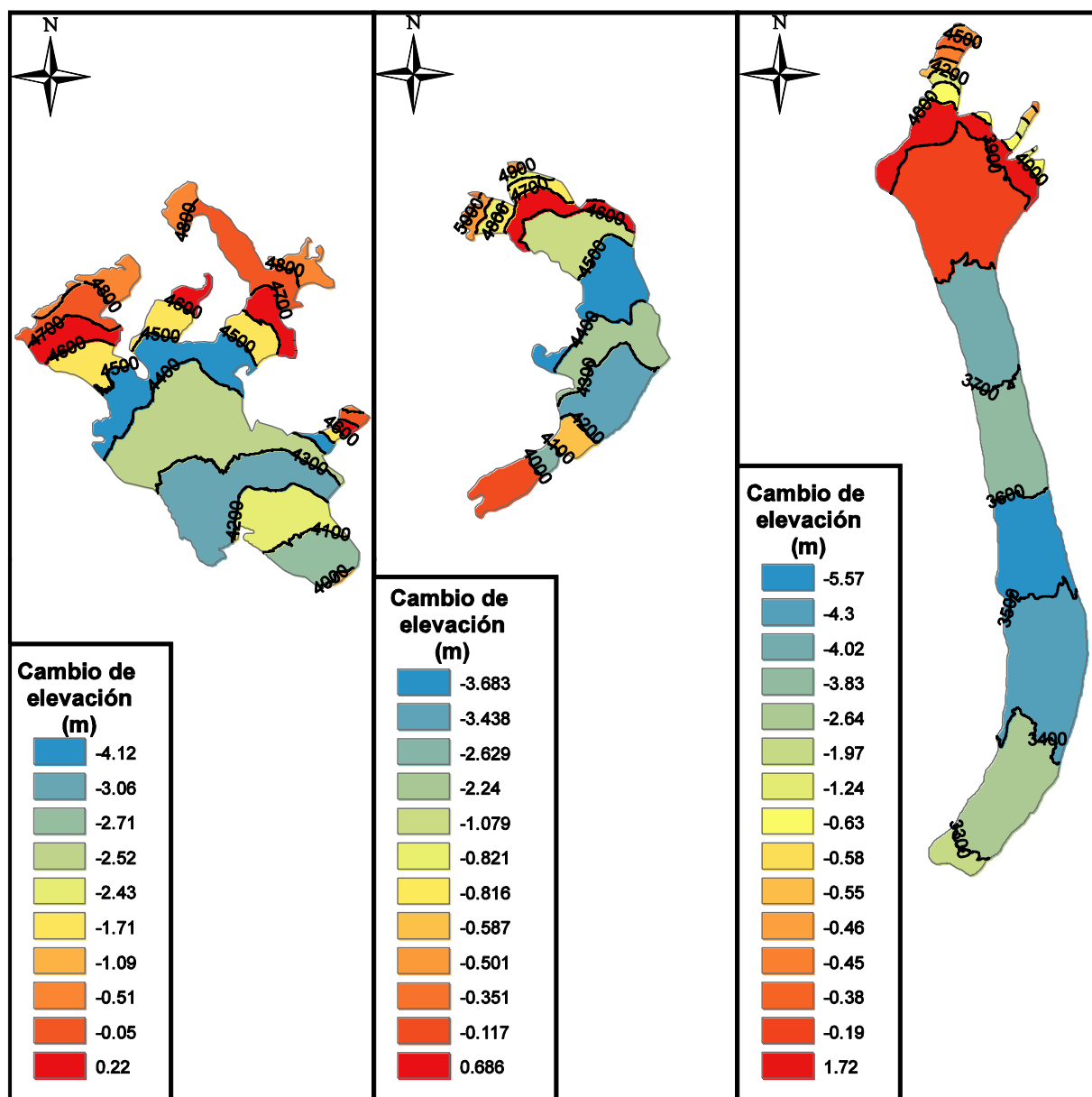


Figura 32. Cambios de elevación promedio por rangos de elevación. Izquierda: glaciar Bello. Centro: glaciar Yeso. Derecha: glaciar Pirámide.

3.3.2 Balance de masa geodésico en el glaciar Tapado

Se calculó el balance de masa geodésico para el glaciar Tapado en su zona descubierta. Cabe recordar que el balance de masa geodésico está calculado entre el 22-03-2014 y 19-12-2014, fechas de obtención de las imágenes satelitales utilizadas para generar los respectivos MEDs.

El glaciar Tapado presentó un balance de masa moderadamente positivo (0,35 m a.e.), y bastante cercano al equilibrio durante el periodo analizado (menos de un año). Con

respecto a los rangos de elevación, el glaciar Tapado presentó cambios de elevación negativos por sobre los 5100 m. En el rango de elevación de 4600-4700 m, el glaciar mostró un cambio de elevación promedio de 6,38 m. En este caso, este rango es el que corresponde a la parte frontal del glaciar y puede verse influenciado por nieve remanente del periodo anterior.

Tabla 44. Resumen de los valores de cambio de elevación, volumen y balance de masa en el glaciar Tapado.

Glaciar	Área (km ²)	Cambio promedio elevación (m)	Cambio de volumen (10 ⁶ m ³)	Balance de masa (m a.e.)
Tapado	1,04	0,39	0,37	0,35

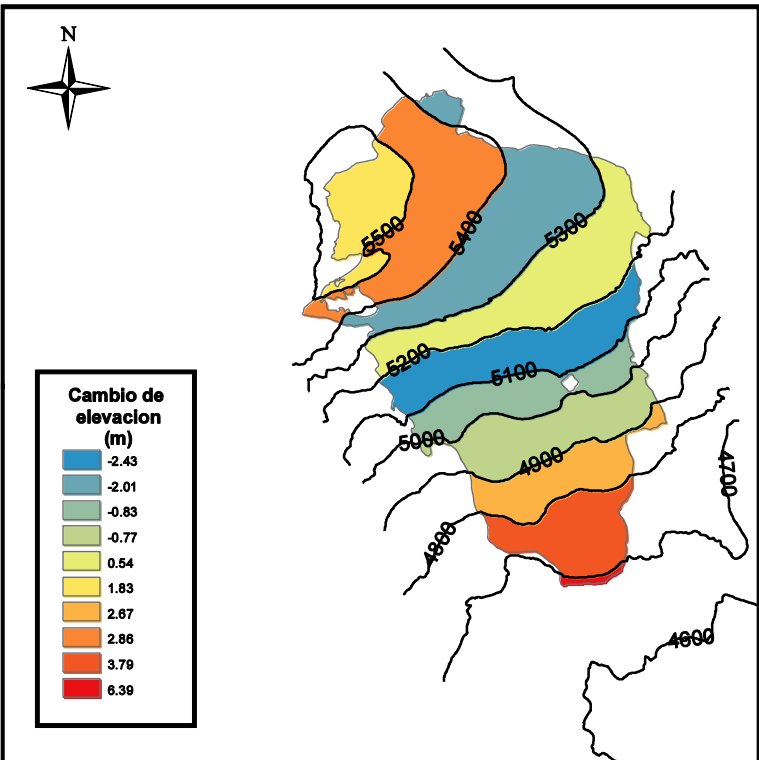


Figura 33. Cambios de elevación promedio por rangos de elevación en el glaciar Tapado descubierto.

3.3.3 Mediciones de la topografía superficial del glaciar Tapado

Durante los días 25 y 26 de noviembre de 2013 se realizaron 3 perfiles cinemáticos en el glaciar Tapado. A modo de mantener la antena lo más vertical posible durante el desplazamiento en el glaciar, la antena del GPS fue conectada a un mástil instalado en una mochila. Debido a la pérdida de la señal durante un perfil longitudinal en la parte descubierta del glaciar, solo se incluyen dos perfiles realizados.

El primer perfil se realizó en la zona descubierta del glaciar Tapado el día 25 de noviembre de 2013 (Figura 34). El perfil se inicia en el punto "A" y termina en el punto "B", presentando principalmente nieve y pequeños penitentes. La altura máxima es de 4769 m snm en un sector cercano al punto "A" y la mínima es de 4755 m snm. Se obtuvieron un total de 69 puntos con una altura promedio de 4762 m snm.

Se realizó un perfil longitudinal en la zona cubierta del glaciar Tapado el día 26 de noviembre de 2013. El perfil recorre desde el Punto "A" hasta el punto "B" (Figura 35), pasado por las 5 balizas de ablación instaladas en esta parte del glaciar. La altura máxima en "A" es de 4617 m snm, mientras que la mínima es de 4509 m snm en un surco antes de llegar al punto "B". Se obtuvieron un total de 358 puntos distribuidos a lo largo del perfil, presentando una altura promedio de 4559 m snm.

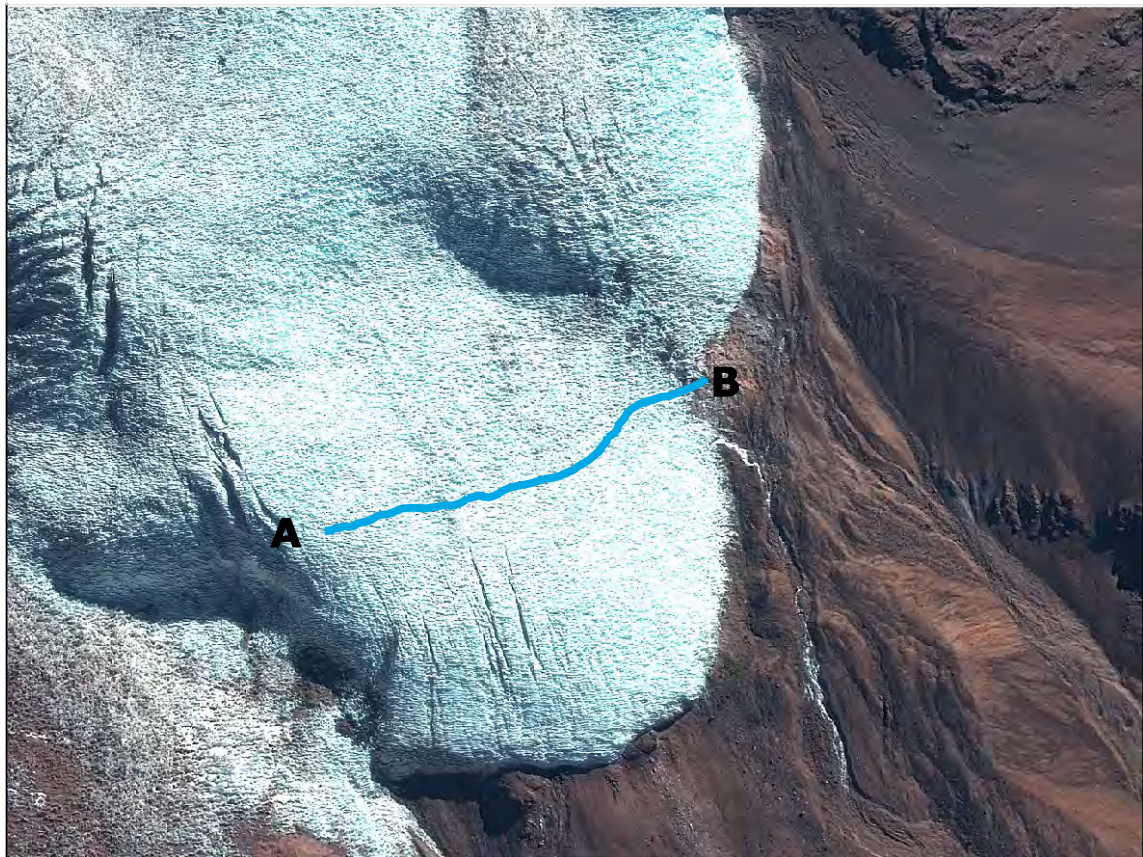
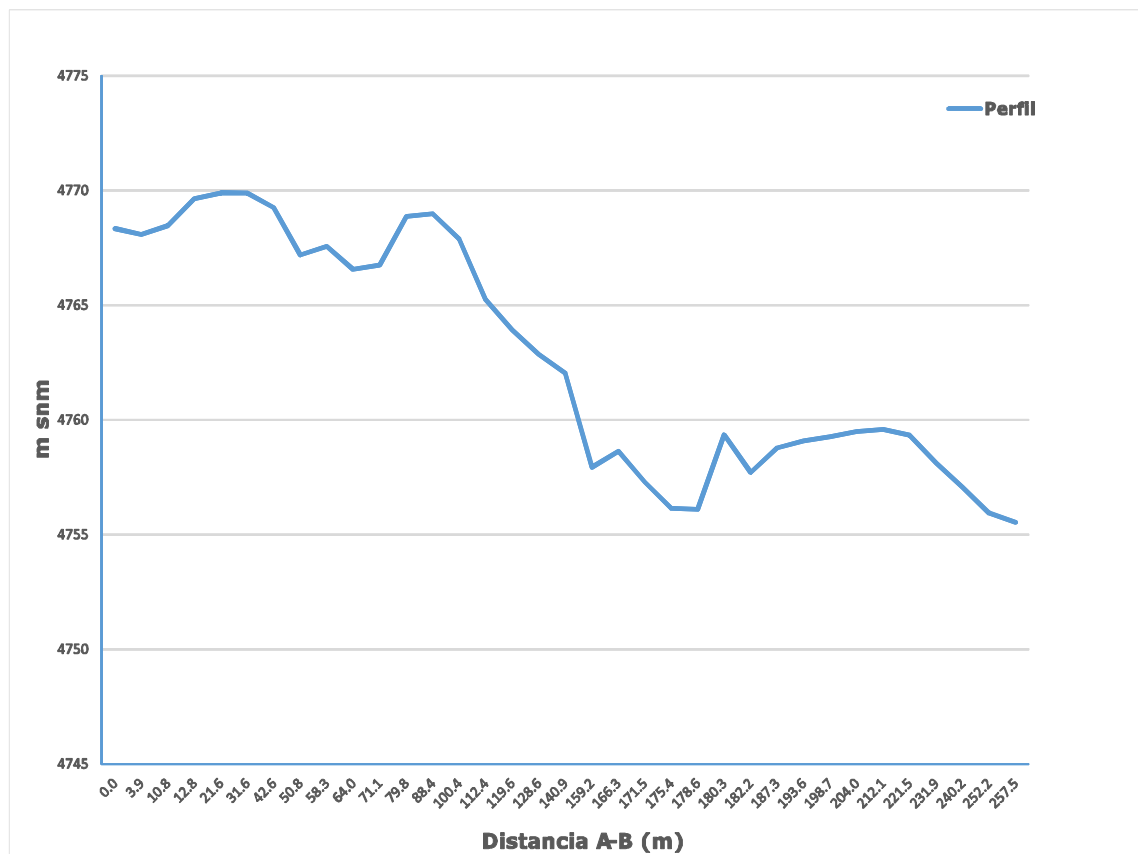


Figura 34. Perfil transversal sobre la parte descubierta del glaciar Tapado (noviembre 2013). Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

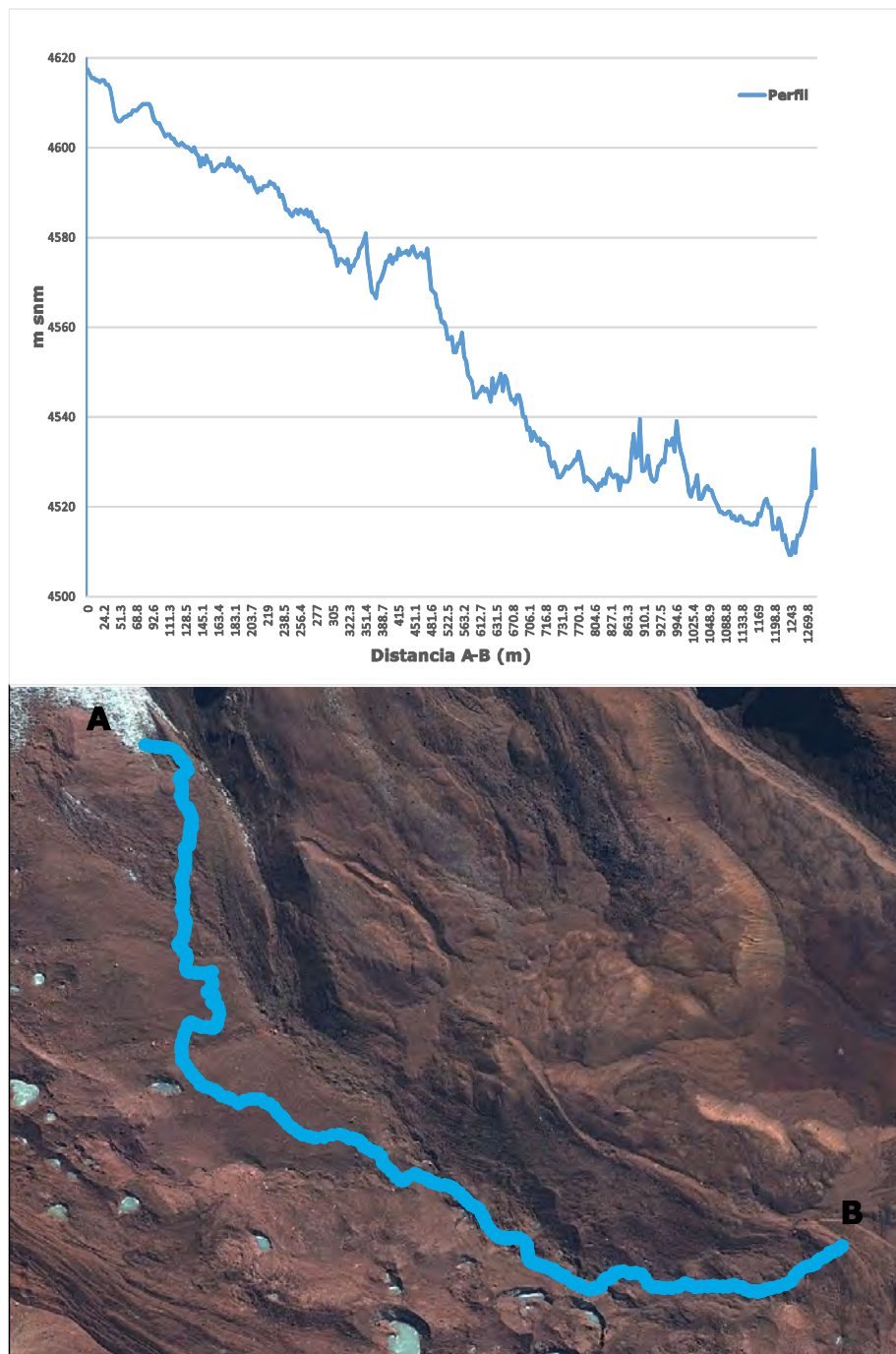


Figura 35. Perfil longitudinal sobre la parte cubierta del glaciar Tapado (Noviembre 2013). Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

Durante el día 23 de octubre de 2014 se midieron 3 perfiles cinemáticos en la zona de ablación del glaciar Tapado. El primer perfil se realizó en la zona descubierta del glaciar Tapado (Figura 36). El primer perfil se inicia en el punto "A" y termina en el punto "B", presentando principalmente nieve (Figura 37). Los otros 2 perfiles corresponden al C-D y D-E (Figura 36). La altura máxima para el perfil A-B es de 4768 m snm en un sector cercano al punto "A" y la mínima es de 4753 m snm. La altura promedio de todo el perfil transversal A-B fue de 4762 m snm.

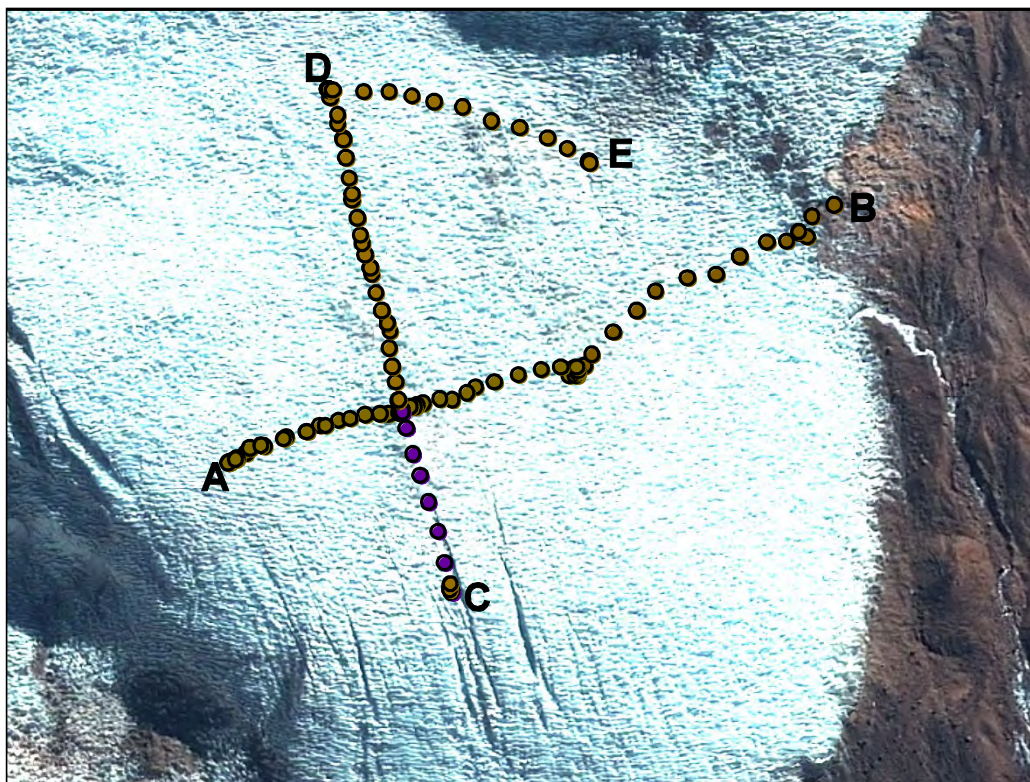
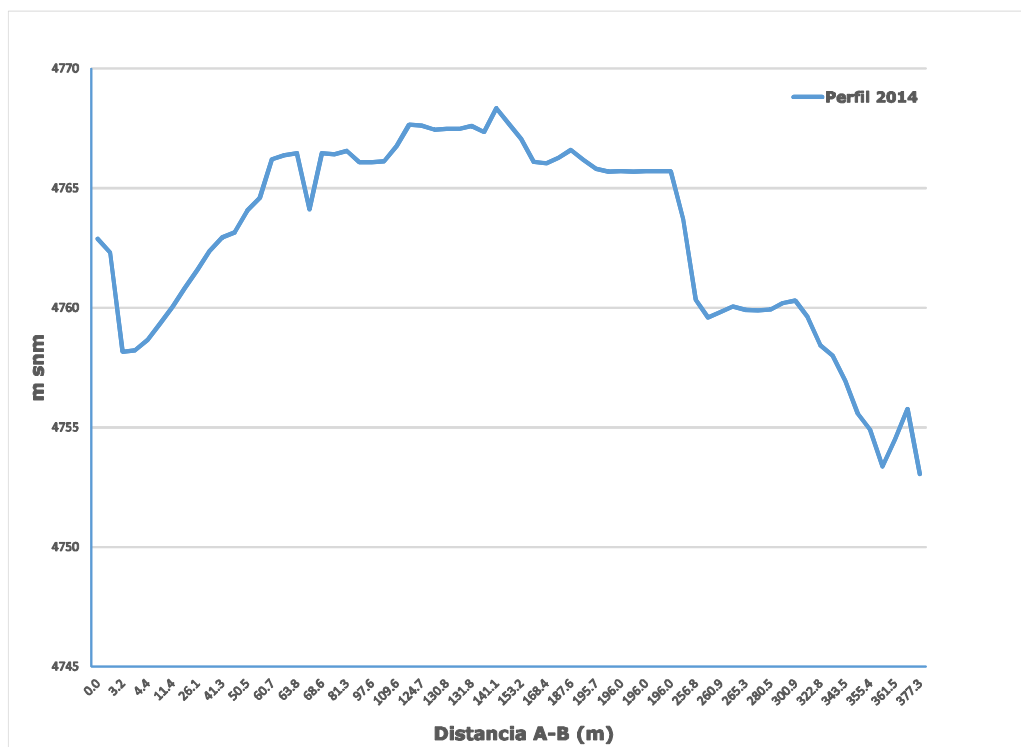


Figura 36. Perfiles realizados sobre la parte descubierta del glaciar Tapado (octubre 2014). Arriba: ejemplo del perfil A-B. Abajo: ubicación de los perfiles realizados. Imagen: GeoEye, 12-04-2010



Figura 37. Condiciones de la superficie del glaciar al momento de realizar el perfil transversal.

Se realizó un perfil longitudinal en la zona cubierta del glaciar Tapado el día 23 de octubre de 2014. El perfil recorre desde el Punto "A" hasta el punto "B" (Figura 38), pasado por las 5 balizas de ablación instaladas en esta parte del glaciar. La altura máxima en "A" es de 4616 m snm, mientras que la mínima es de 4535 m snm antes de llegar al punto "B". La altura promedio de todo el perfil en la zona cubierta es de 4562 m snm.

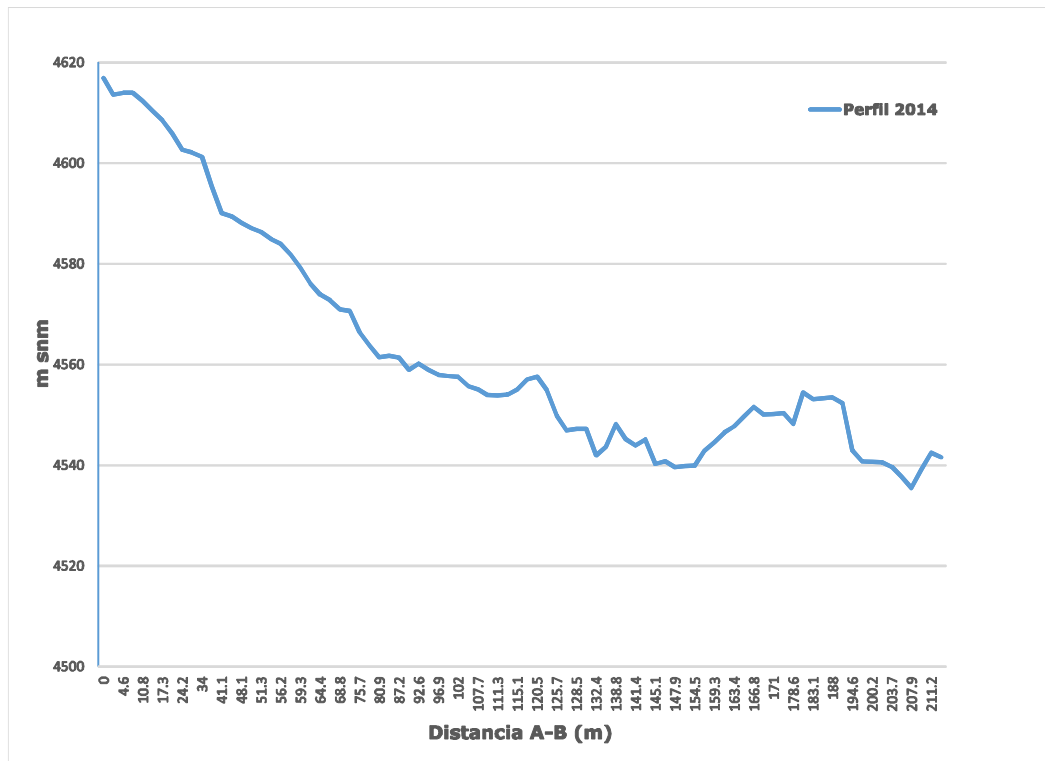


Figura 38. Perfil longitudinal sobre la parte cubierta del glaciar Tapado (octubre 2014). Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

3.3.4 Mediciones de la topografía superficial del glaciar Bello

Hasta noviembre de 2015 se han realizado dos perfiles longitudinales en el glaciar Bello. El primer perfil fue realizado el 1-10-2014 y el segundo perfil fue realizado el 22-10-2015 (Figura 39). En ambos perfiles la antena del GPS fue conectada a un mástil instalado en una mochila, de manera de mantener la antena lo más vertical posible durante el desplazamiento sobre el glaciar. Cabe mencionar que los perfiles no son del todo coincidentes, debido a ligeros cambios en la ruta de bajada del glaciar por la presencia de grietas y otros obstáculos.

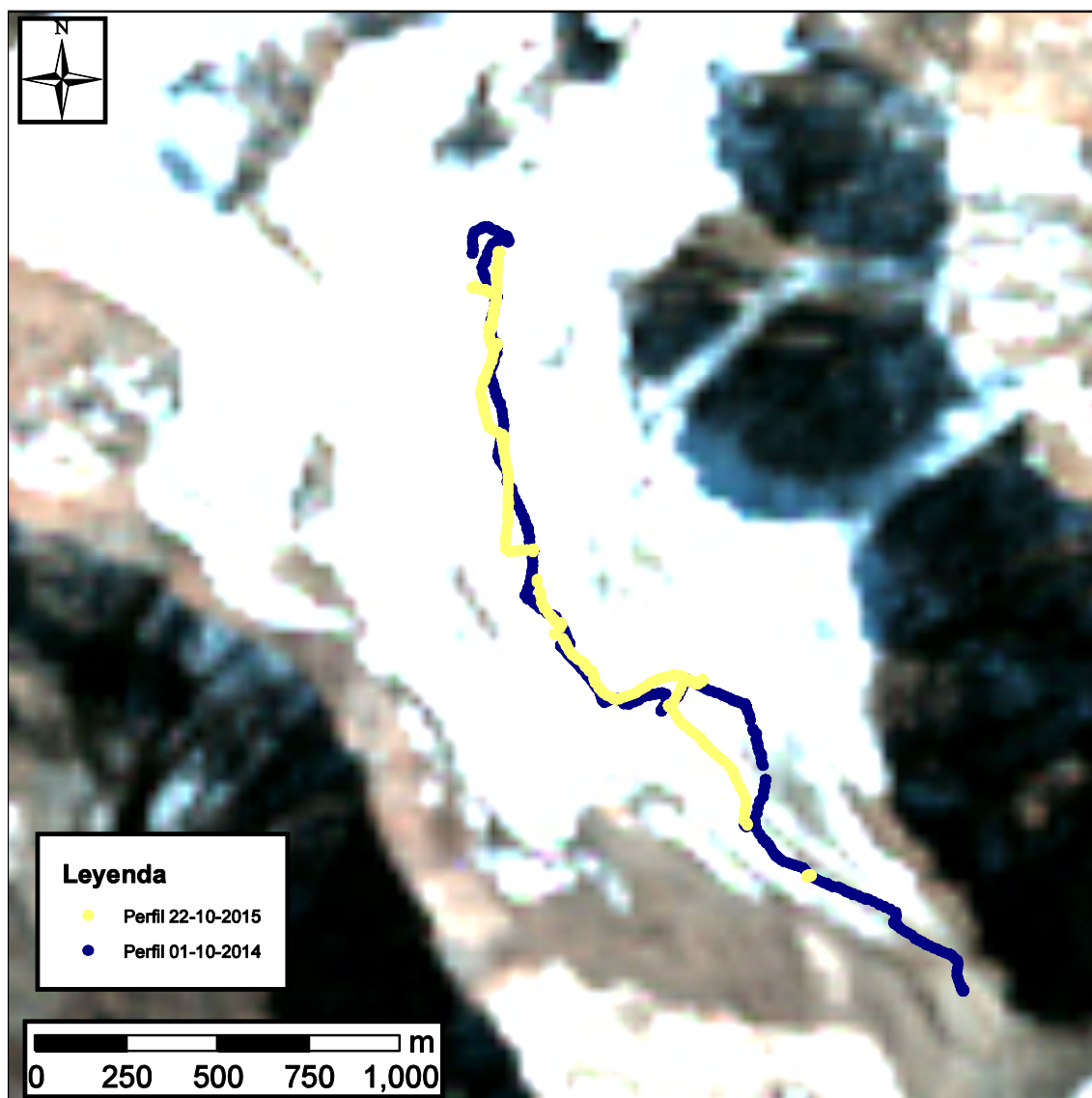


Figura 39. Localización de los perfiles de GPS en el glaciar Bello. Años 2014 y 2015.

El primer perfil se realizó en la zona central del glaciar Bello el día 1 de octubre de 2014 (Figura 39). El perfil se inicia en el punto desde la parte alta del glaciar pasando por la zona de grietas en la parte media del glaciar, llegando a la parte frontal más baja del

glaciar. La altura máxima es de 4416 m snm y la mínima es de 3935 m snm. Se obtuvieron un total de 424 puntos con una altura promedio de 4210 m snm.

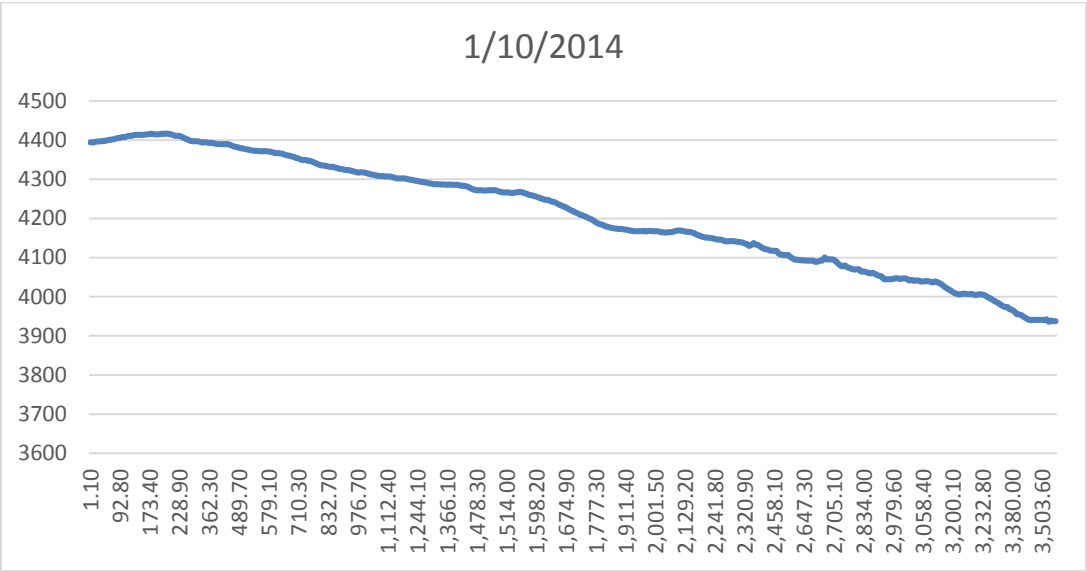


Figura 40. Perfil GPS en el glaciar Bello. Año 2014.

El segundo perfil se realizó en la zona central del glaciar Bello el día 22 de octubre de 2015 (Figura 41). El perfil se inicia en el punto desde la parte alta del glaciar pasando por la zona de grietas en la parte media del glaciar, llegando a la parte frontal más baja del glaciar. La altura máxima es de 4409 m snm y la mínima es de 4044 m snm. Se obtuvieron un total de 494 puntos con una altura promedio de 4279 m snm.

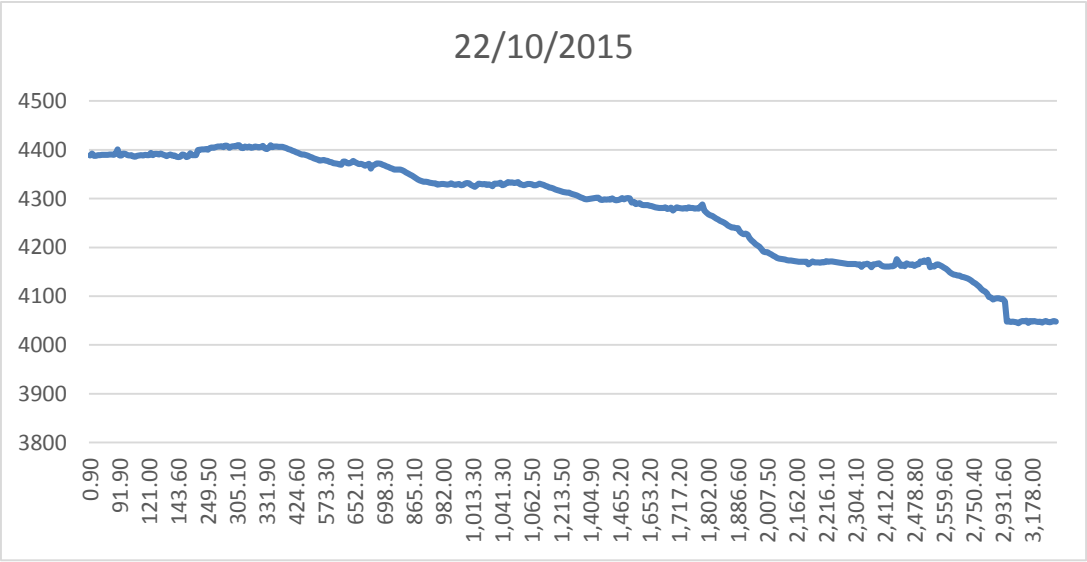


Figura 41. Perfil GPS en el glaciar Bello. Año 2015.

4. MONITOREO DE LA SUPERFICIE GLACIAR MEDIANTE REGISTRO FOTOGRÁFICO

4.1 MONITOREO EN EL NORTE CHICO

4.1.1 Albedo

El primer periodo del análisis para el glaciar Tapado es entre el 25 de noviembre de 2013 al 20 de mayo de 2014, mientras que el segundo periodo analizado es entre el 13 de diciembre de 2014 al 1 de mayo de 2015. Durante noviembre y diciembre de 2015 no se pudo contemplar el análisis del albedo debido a la ausencia de estaciones meteorológicas funcionando en la superficie del glaciar. Con anterioridad al 13 de diciembre de 2014, la cámara fotografía automática sufrió una desprogramación en su reloj interno, capturando las fotografías en horarios nocturnos. De total de días abarcados en todos los periodos, solamente se procesaron las fotografías durante días completamente despejados (sin la presencia de nubes). Esto es debido a que el método requiere de condiciones de cielo despejados para una correcta estimación del albedo distribuido (Corripio, 2004). Las series temporales de 2013-2014 y 2014-2015 de mapas de albedo del glaciar Tapado están incluidas en el anexo digital.

La Figura 42 muestra la evolución de los albedos en el glaciar Tapado durante el periodo de ablación de la temporada 2013-2014. Al principio del periodo, se evidencian albedos altos en la parte superior del glaciar con valores de albedo cercanos al 0,7. Los valores de albedo disminuyen hacia la parte frontal del glaciar descubierto, siendo todavía más reducidos en el área cubierta del glaciar Tapado (valores cercanos a 0,3). A finales del mes de febrero, los valores de albedo en la parte alta y baja del glaciar son más uniformes con valores que fluctúan entre 0,3 y 0,2. En la parte cubierta del glaciar, los valores del albedo son bastante bajos por lo general, fluctuando alrededor de 0,15.

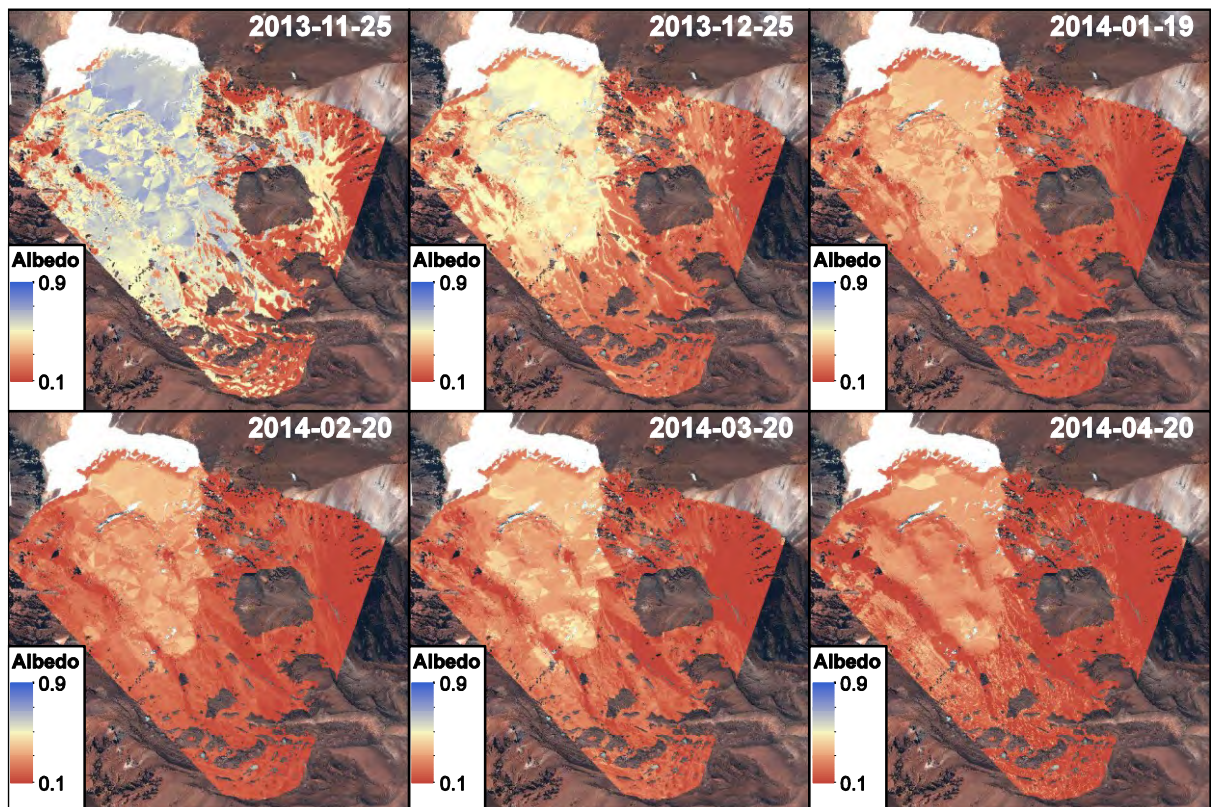


Figura 42. Mapas de albedo distribuido en el glaciar Tapado para algunas fechas seleccionadas (temporada 2013-2014).

La Figura 43 muestra la evolución de los albedos en el glaciar Tapado durante el periodo de ablación 2014-2015. Al principio del periodo, se evidencian valores medios en la parte superior del glaciar con valores de albedo cercanos a 0,4. Los valores de albedo disminuyen hacia la parte frontal del glaciar descubierto con valores cercanos a 0,3. A finales del mes de febrero, los valores de albedo en la parte alta y baja del glaciar sufren un aumento considerable, con valores que fluctúan entre 0,6 y 0,4. Durante el mes de marzo, los valores vuelven a disminuir, llegando a valores que fluctúan entre 0,4 y 0,2. Durante el mes de abril, Los valores de albedo llegan a los máximos durante el periodo, debido a un gran evento de precipitación ocurrido a finales de marzo de 2015. En la parte cubierta del glaciar, los valores del albedo son bastante bajos por lo general, fluctuando alrededor de 0,15, llegando a ser modificados solamente después de grandes eventos de precipitación (como en febrero y marzo del 2015).

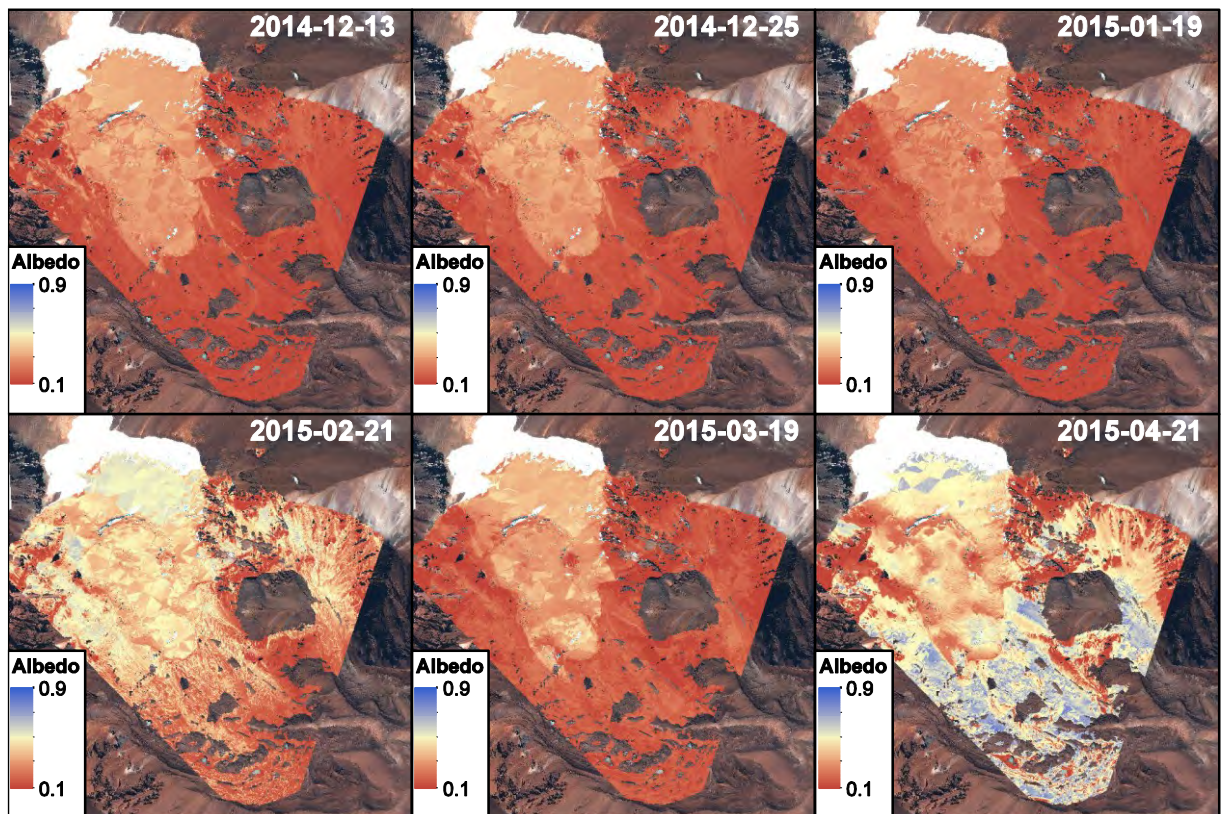


Figura 43. Mapas de albedo distribuido en el glaciar Tapado para algunas fechas seleccionadas (temporada 2014-2015).

4.1.2 Líneas de nieve

En la Figura 44, se puede observar las líneas de nieve y las líneas de equilibrio para las temporadas 2013-2014 y 2014-2015 realizadas en el glaciar Tapado, mediante el uso de la cámara automática instalada al sur del glaciar. Debido al ángulo visual de la cámara, no permite ver la parte superior ni trasera del glaciar, que pueda permitir una mayor continuidad en la definición de las líneas de nieve, así como también de la línea de equilibrio. El criterio para la delimitación de este último es la línea de nieve más alta registrada (21 de abril de 2014 y 23 de marzo de 2015, respectivamente), debido a que, a partir de esas fechas, se detectan eventos de precipitación nival.

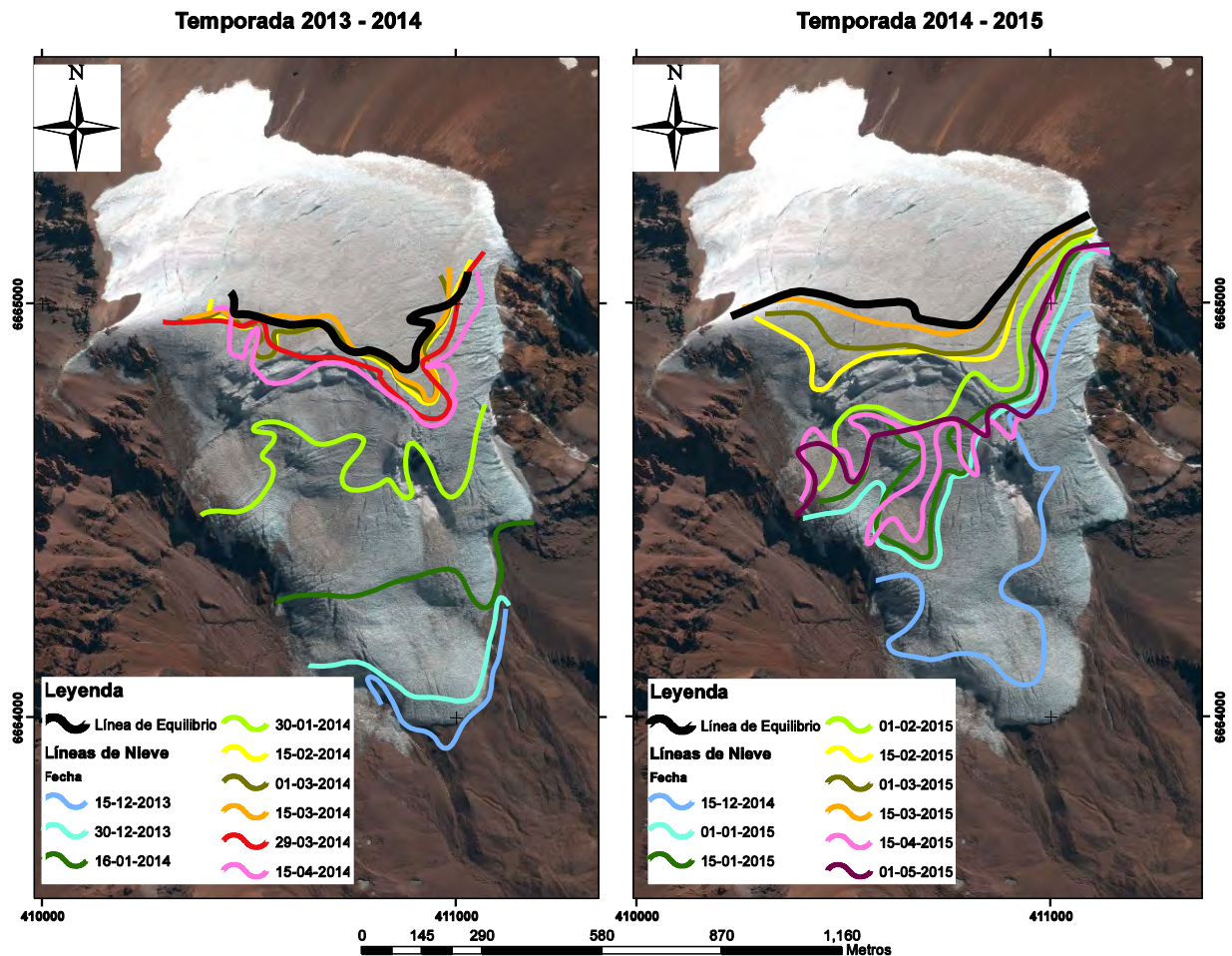


Figura 44. Mapa de líneas de nieve y línea de equilibrio para el glaciar Tapado, delimitada para las temporadas 2013-2014 y 2014-2015. Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

Se puede observar que las líneas de nieve son distintas a fechas similares entre ambas temporadas. La más notoria se observa el 15 de diciembre, que en 2013 estaba fuera del glaciar, mientras en 2014 estuvo dentro de ella. Para el 30 de diciembre de 2013, la línea de nieve estaba cercano al frente del glaciar, mientras que el 1 de enero de 2015 estuvo en la zona media, lo que da cuenta de la menor presencia nival en invierno de 2014. Los días siguientes, las líneas de nieve tienden a ser más similares, esto es para los meses de enero, febrero y marzo, las cuales están ubicadas sobre la zona de grietas del glaciar para estos dos últimos meses. El cambio importante sucede en abril, debido a que a fines de marzo de 2015, un evento de precipitación nival considerable afectó al glaciar, alterando la línea de nieve hasta debajo de la zona de grietas, lo que dista considerablemente de lo sucedido en abril de 2014, que estaban cercanas a la línea de equilibrio del glaciar.

En resumen, las líneas de equilibrio en ambas temporadas son similares, siendo la correspondiente a la temporada 2014-2015 más alta que la anterior, debido a que

durante el invierno de 2014 hubo menos eventos de precipitación nival que durante el año 2013.

4.1.3 Video

En el anexo digital se incluyen 2 videos en formato mp4 elaborados con las fotografías de la cámara secuencial del glaciar Tapado para las temporadas 2013-2014 y 2014-2015. Los videos muestran el comportamiento de la respectiva línea de nieve en el glaciar. En la elaboración de los videos, se ocuparon fotografías diarias adquiridas a las 1:00 pm para ambas temporadas. Para la temporada 2013-2014 se ocuparon las 154 fotografías adquiridas por la cámara, mientras que para la temporada 2014-2015 se ocuparon solo 149 de las 207 fotografías adquiridas por la cámara. Esto último fue debido a que las primeras 58 fotografías entre el 15 de octubre y el 11 de diciembre de 2014 fueron capturadas en horarios nocturnos (causado por una desprogramación en la cámara), por lo cual esas fotografías no se incluyeron en los análisis.

4.2 MONITOREO EN CHILE CENTRAL

4.2.1 Albedo

El primer periodo de análisis para el glaciar Pirámide es entre el 27 de febrero (fecha de instalación de la cámara automática) al 15 de mayo de 2014. El segundo periodo de análisis es entre el 6 de diciembre de 2014 al 8 abril de 2015. En este último, el menor periodo analizado en el glaciar Pirámide se debe a un problema ocasionado por un derrumbe en el sector de la cámara, dejándola inhabilitada para tomar fotografías del glaciar entre octubre y noviembre de 2014 (Figura 45). Durante noviembre y diciembre de 2015 no se pudo contemplar el análisis del albedo debido a que la cámara no pudo ser instalada por la presencia de una cornisa de nieve. Para el glaciar Bello el primer periodo de análisis es entre el 27 de febrero (fecha de instalación de la cámara automática) al 15 de mayo de 2014. El segundo periodo es entre el 23 de octubre de 2014 al 1 de abril de 2015. Durante noviembre y diciembre de 2015 no se pudo contemplar el análisis del albedo debido a que la estación meteorológica instalada en el glaciar Bello se encontraba totalmente sepultada por un manto de nieve. Del total de días abarcados, solamente se procesaron las fotografías durante días completamente despejados (sin la presencia de nubes). Esto es debido a que el método requiere de condiciones de cielo despejados para una correcta estimación del albedo distribuido (Corripio, 2004). Las series temporales de mapas de albedo para las temporadas 2014 y 2014-2015 están incluidas en el anexo digital.



Figura 45. Estado de la cámara fotográfica automática del glaciar Pirámide el día 5-12-2014.

La Figura 46 muestra la evolución de los albedos en los glaciares Bello y Pirámide durante el periodo de ablación del año 2014. En general, el glaciar Pirámide presenta valores de albedo bajos cercanos al 0,15 debido a su cubierta de detritos. Por el contrario, el glaciar Bello presenta valores de albedo más altos cercanos a 0,3 y 0,4. Los albedos son modificados temporalmente después de algunos eventos de precipitación nivosa, depositando nieve fresca que aumenta el valor del albedo, alcanzando valores de albedo cercanos al 0,7.

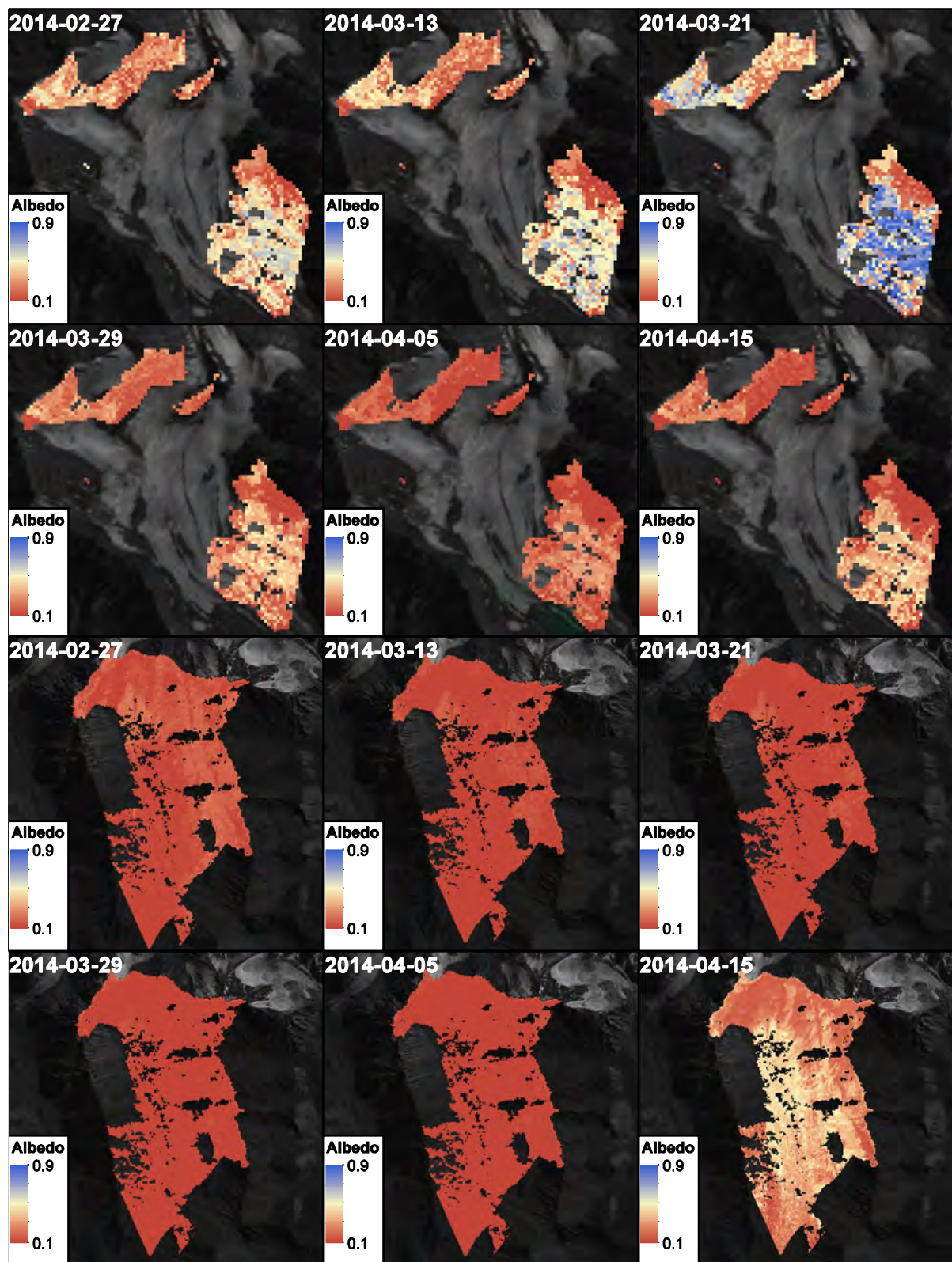


Figura 46. Mapas de albedo distribuido en los glaciares Bello (arriba) y Pirámide (abajo) para algunas fechas seleccionadas (temporada 2014). Imagen: Landsat 8, 23-03-2014.

La Figura 47 muestra la evolución de los albedos en los glaciares Bello y Pirámide durante el periodo de ablación 2014-2015. En general, el glaciar Pirámide presenta valores de albedo bajos cercanos al 0,15 debido a su cubierta de detritos. Por el contrario, el glaciar Bello presenta valores de albedo más altos cercanos a 0,4 y 0,6. Los albedos son modificados temporalmente después de algunos eventos de precipitación nivosa, depositando nieve fresca que aumenta el valor del albedo, alcanzando valores de albedo cercanos al 0,8 como los observados en el mapa de albedo del 2 de diciembre de 2014.

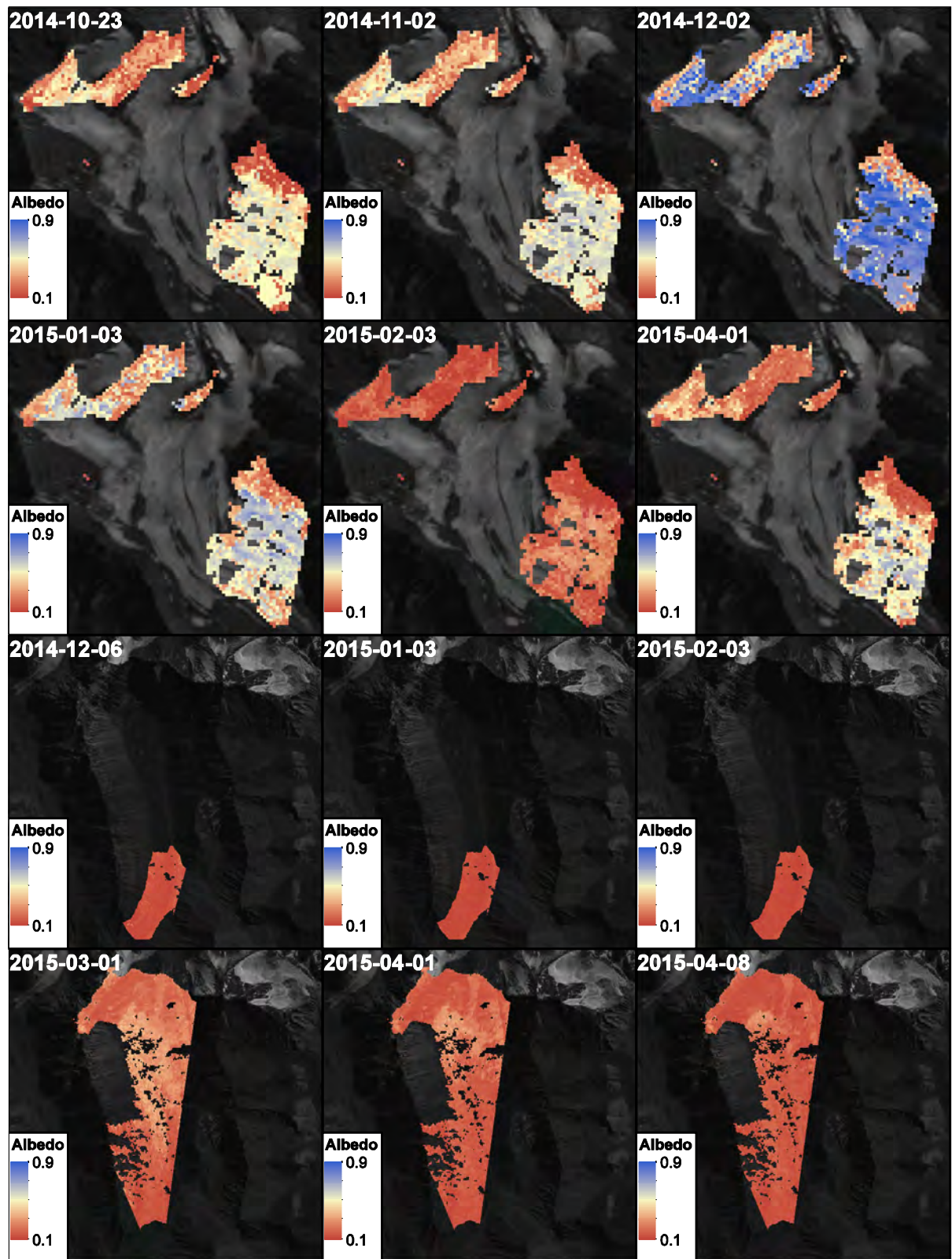


Figura 47. Mapas de albedo distribuido en los glaciares Bello (arriba) y Pirámide (abajo) para algunas fechas seleccionadas (temporada 2014-2015). Imagen: Landsat 8, 23-03-2014.

4.2.2 Líneas de nieve

En la Figura 48 se observan las líneas de nieve delimitadas en el glaciar Pirámide y las líneas de equilibrio para las temporadas 2014 y 2014-2015. En las líneas de nieve, se delimitaron mediante el uso de las fotografías obtenidas por la cámara automática ubicada al sur del glaciar, además de imágenes satelitales de apoyo, para los días en que la cámara no cubría la parte superior del glaciar (diciembre 2014 a febrero 2015) y para la delimitación de la línea de equilibrio para el año 2014. Para la realización de esta última, se usó en el período 2014-2015, la fotografía del día 23 de marzo de 2015.

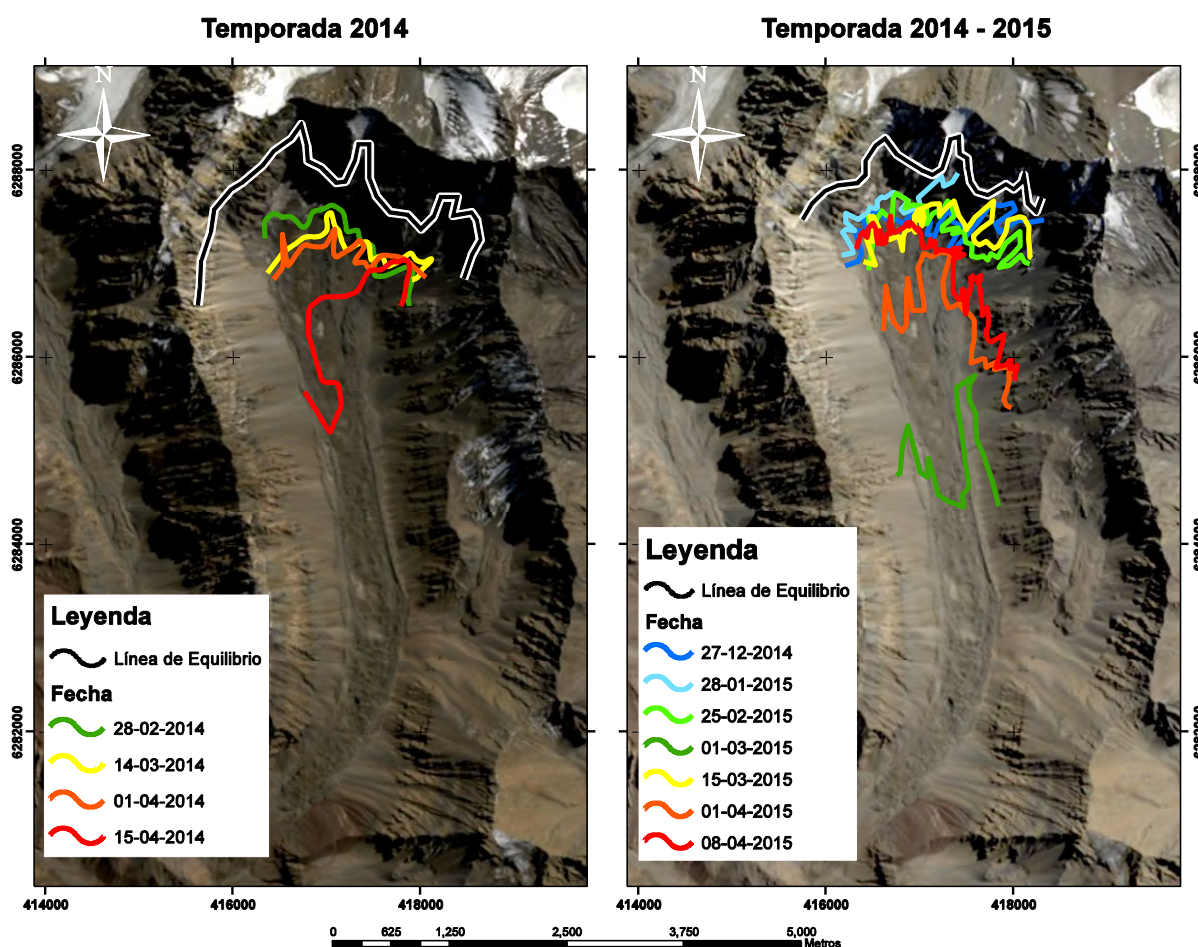


Figura 48. Mapas de las líneas de nieve y de equilibrio del glaciar Pirámide para las temporadas 2014 y 2014-2015. Imágenes: Landsat 8, 23-03-2014 (izquierda) y 28-01-2015 (derecha).

Al hacer la comparación entre ambas temporadas, la línea de equilibrio en este glaciar posee escasas diferencias, no así las líneas de nieve delimitadas. Para el mismo período, el 28 de febrero de 2014 la línea de nieve estuvo más alta, cercana a la cabecera; mientras el 1 de marzo de 2015, estuvo al centro del glaciar, debido principalmente a un evento de precipitación nival el día anterior. Para mediados de marzo, la línea de

nieve de 2014 estuvo más baja que la misma fecha en 2015; no así para el 1 de abril, que fue inverso. Es importante destacar que la delimitación de las líneas de nieve es especialmente sensible a eventos de precipitación nivales estivales, principalmente en este glaciar, por lo tanto, es difícil hacer una comparación a la misma fecha de las líneas de nieve a distintas temporadas.

En la Figura 49 se puede observar la comparación de las líneas de nieve y de equilibrio para las dos temporadas de análisis en el glaciar Bello. Al igual que el anterior, se usó para su delimitación, la cámara automática instalada al sur del glaciar, como también el apoyo de imágenes satelitales para las zonas no cubiertas por la cámara. Con ello, se pudo realizar, para la temporada 2014, desde el 27 de febrero al 15 de abril y la temporada siguiente, desde el 2 de noviembre de 2014 al 7 de abril de 2015. Para las líneas de equilibrio, se usaron las mismas imágenes que en el caso del glaciar Pirámide.

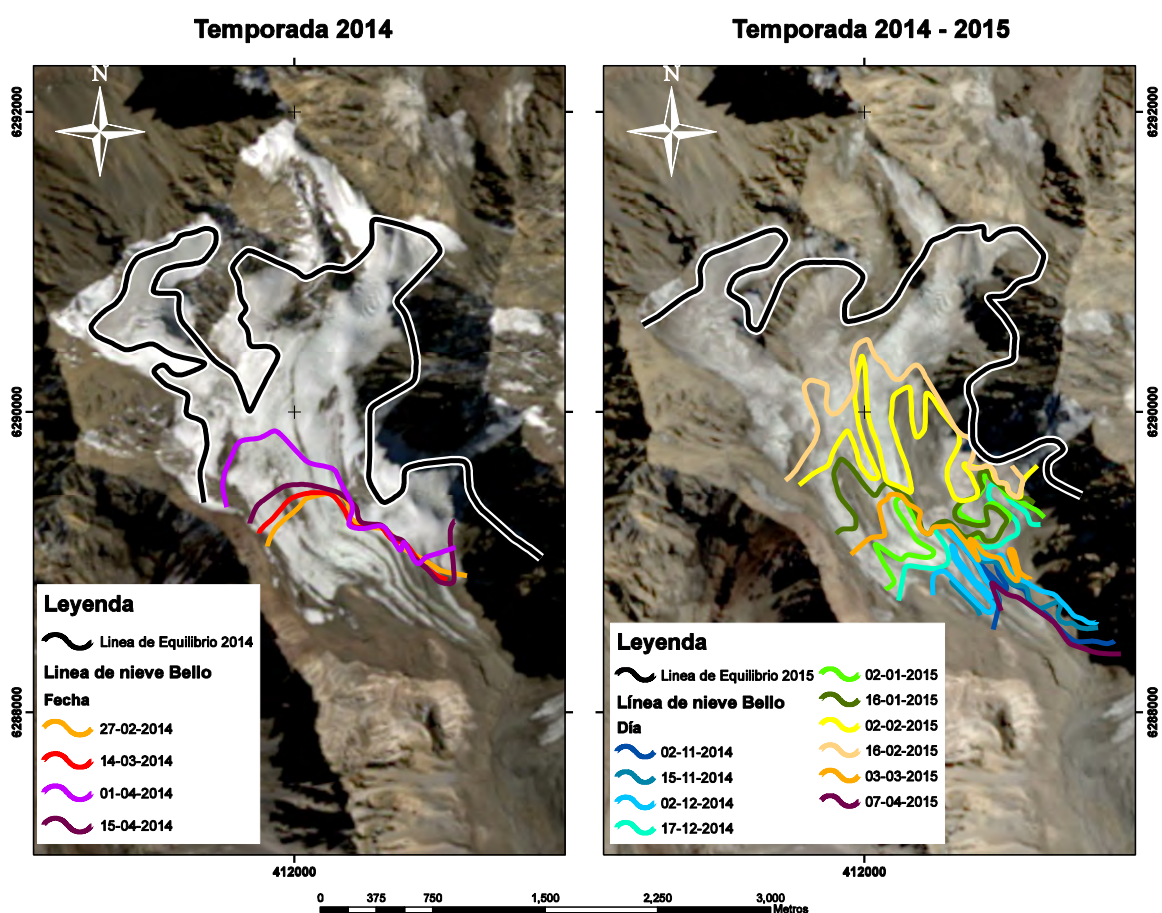


Figura 49. Mapas de las líneas de nieve y de equilibrio del glaciar Bello para las temporadas 2014 y 2014-2015. Imágenes: Landsat 8, del día 23 de marzo de 2014 (izquierda) y 28 de enero de 2015 (derecha).

Se puede observar para ambas temporadas, que existen diferencias importantes en la delimitación de la línea de equilibrio, siendo la primera temporada, más baja que la

segunda. Respecto a las líneas de nieve, son similares en el mismo período (27-02-2014 y 03-03-2015), pero no hay más datos de los meses de noviembre, diciembre y enero de la temporada anterior, que permita comparar el comportamiento de las líneas de nieve en las mismas fechas a distintas temporadas, que se puede observar en lo complejo de las líneas dibujadas en la temporada 2014-2015 desde el 2-11-2014 hasta el 16-02-2015. A pesar de ello, estas líneas de nieve son un aporte para la delimitación de las líneas de equilibrio en el glaciar Bello.

4.2.3 Video

En el anexo digital se incluyen cuatro videos en formato mp4 elaborados con las fotografías de las cámaras secuenciales de los glaciares Bello y Pirámide, los cuales muestran el comportamiento de las respectivas líneas de nieve en los glaciares estudiados durante las temporadas 2014 y 2014-2015. Para el glaciar Bello los videos incluyen las 48 fotografías adquiridas por la cámara automática durante la temporada 2014 y 189 fotografías durante la temporada 2014-2015. Para el glaciar Pirámide los videos incluyen las 49 fotografías adquiridas por la cámara automática durante la temporada 2014 y 115 fotografías adquiridas durante la temporada 2014-2015. Todos los videos fueron elaborados con las fotografías adquiridas a las 1:00 pm.

5. METEOROLOGÍA

5.1 CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA SUPERFICIE DEL GLACIAR TAPADO

5.1.1 TAWS1 glaciar cubierto Tapado

La estación meteorológica automática "TAWS1" fue instalada el día 21-11-2013 en la zona cubierta de detritos del glaciar Tapado directamente sobre los detritos que cubren el glaciar (sin la presencia de cobertura nival). Durante la misma oportunidad, se excavó un pozo de 0,8 m de profundidad al lado de la estación sin alcanzar el hielo glaciar. La estación fue visitada el día 10-01-2014 y los datos fueron descargados. Debido a un problema de conexión no detectado, la estación quedó funcionando solamente con la batería entre los días 21-11-2013 y 20-01-2014. Posteriormente, la estación cesó su funcionamiento al llegar a su mínimo voltaje. La estación fue reconectada por personal de la DGA a finales de enero de 2014, comenzando nuevamente con la captura de datos el día 1-02-2014. La estación permaneció instalada y operativa durante el invierno de 2014. Fue visitada el día 21-10-2014 y los datos fueron descargados. Todos los parámetros fueron revisados y la estación funcionaba correctamente. Posteriormente, se realizó la mantención y descarga de datos durante las siguientes fechas: 12-12-2014, 22-12-2014, 3-2-2015 y 18-5-2015. El día 22-12-2014 el marco del sensor de altura de nieve SR50 fue reinstalado.

La estación TAWS1 se encuentra programada para adquirir datos cada 10 minutos, guardando un promedio de los datos cada una hora. Para el día 15-5-2015, fecha en que se descargaron los datos por última vez, la estación posee un registro de 12734 datos por cada variable (promedios horarios). Las mediciones de la estación incluyen radiación de onda corta y larga (incidente y reflejada), temperatura y humedad relativa (aspirados artificialmente), velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, y los cambios en la altura de la superficie (Tabla 45). Adicionalmente, la estación incluye mediciones del ángulo de inclinación con respecto a la vertical.

Tabla 45. Sensores instalados en TAWS1 en el marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Young	2,2
Radiómetro neto	CNR4	2,1
Sensor de altura de superficie	SR50	2,06 (2013-2014) y 0,39 (2014-2015)
Termómetro	Young	2,09
Termómetro ventilado	Young	2,1
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	411176 E; 6663510 S	
Altura	4570 m	
Fecha de instalación	21-11-13	
Fecha de ajuste de los instrumentos	22-11-13 y 22-12-14 (SR50)	
Condiciones de la superficie	Con detritos (sin nieve)	

Durante el periodo de registro de datos la velocidad del viento muestra un promedio de $2,79 \text{ m s}^{-1}$, registrando un máximo de 18 m s^{-1} , no mostrando un ciclo diario claro, pero con alzas en ciertos días de invierno. La temperatura aspirada tiene un valor promedio de $-2,37^{\circ}\text{C}$, logrando un máximo de $14,87$ y un mínimo de $-24,49$. La humedad relativa aspirado presenta un valor promedio de $29,85\%$, el mínimo es de $1,02\%$ y el máximo alcanza $97,8\%$ de humedad relativa. Cabe señalar que cuando la humedad relativa sube de 70% en esta estación hay muchas probabilidades que se esté desarrollando un evento de precipitación. La radiación de onda corta incidente muestra un promedio de $273,64 \text{ w m}^{-2}$, con un valor máximo de 1287 w m^{-2} se puede ver en la Figura 50 que a partir de abril el valor máximo de radiación diario baja de los 1000 w m^{-2} y tiene sus valores mínimos en junio. Los datos completos están incluidos en el anexo digital.

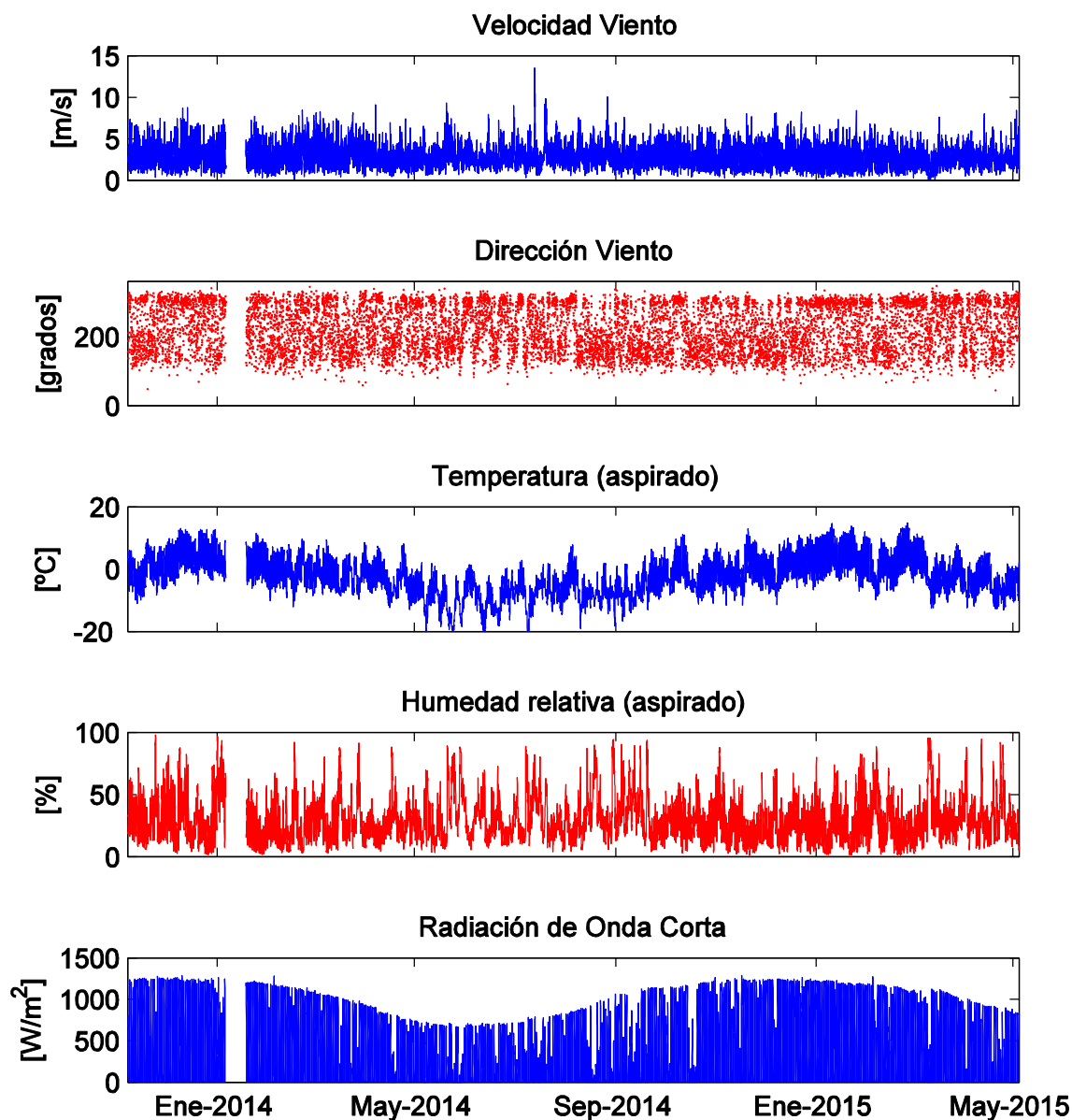


Figura 50. Datos meteorológicos en estación TAWS1 sobre glaciar cubierto durante todo el período analizado.

5.1.2 TAWS2 glaciar Tapado

La estación meteorológica automática "TAWS2" fue instalada el día 22-11-2013 en la zona de ablación del glaciar Tapado, sobre la cubierta de nieve remanente del periodo invernal. La estación fue visitada y nivelada los días 21-12-2013 y 12-12-2014. El día 04-01-2014 la estación es visitada nuevamente, encontrándose seriamente inclinada debido al rápido desarrollo de penitentes sobre el glaciar. La estación es visitada nuevamente el día 10-01-2014 para realizar la descarga de los datos y la respectiva mantención. Durante la última visita realizada a la estación el día 19-03-2014 se

procedió al desmantelamiento de la misma. Se constató que la estación estaba colapsada debido a la inestabilidad del trípode en una superficie de grandes penitentes. Debido a esto, se evidenció que el eje central del anemómetro fue dañado. Posteriormente, se constató que la estación sufrió un problema desconocido de programación, perdiéndose los datos después del día 10-01-2014.

La estación meteorológica fue reinstalada el día 19-11-2014 para los registros de la temporada 2014-2015. El día 12-12-2014 se detectó un problema en el regulador de voltaje (ver ficha "Tapado_2014-12-12" en el anexo digital). El día 22-12-2014 la estación es visitada nuevamente para ser puesta en funcionamiento. La estación es visitada nuevamente el día 2-02-2015 para realizar la descarga de los datos y la respectiva mantención. La estación se encontraba en perfecto funcionamiento, pero gravemente inclinada debido al gran desarrollo de penitentes. Durante la última visita realizada a la estación el día 10-03-2015 se procedió al desmantelamiento de la misma. Se constató que la estación estaba colapsada debido a la inestabilidad del trípode en una superficie de grandes penitentes, pero todos los instrumentos se encontraban sin daños.

La estación TAWS2 se encuentra programada para adquirir datos cada 10 minutos, guardando un promedio de los datos cada una hora. Durante la primera temporada cuenta con un total de 7.033 mediciones en cada uno de los sensores. Para la segunda temporada cuenta con un total de 2.183 mediciones en cada uno de los sensores (promedios horarios). Las mediciones de la estación incluyen radiación de onda corta y larga (incidente y reflejada), temperatura y humedad relativa (aspirados artificialmente), velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, y los cambios en la altura de la superficie (Tabla 46). Adicionalmente, la estación incluye mediciones del ángulo de inclinación con respecto a la vertical. Estos datos de inclinación exponen la rapidez con que la estación pierde su posición vertical, debido a la generación de una superficie irregular causada por la aparición y desarrollo de penitentes. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

Tabla 46. Sensores instalados en TAWS2 en la marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Young	2,1
Radiómetro neto	CNR4	1,9
Sensor de altura de superficie	SR50	1,58 (2013-2014) y 1,13 (2014-2015)
Termómetro	Young	2,05
Termómetro ventilado	Young	2,06 (2013-2014) y 2,10 (2014-2015)
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	410919 E; 6664151 S	
Altura	4775 m	
Fecha de instalación	22-11-13 y 19-11-2014	
Fecha de ajuste de los instrumentos	22-11-13 y 19-11-2014	
Condiciones de la superficie	Con nieve	

Los datos de velocidad de viento no muestran un ciclo diario claro, el valor promedio de $1,8 \text{ m s}^{-1}$, (Figura 51), llegando a un máximo de 18 m s^{-1} el día 28 de diciembre de 2013. La temperatura aspirada mostró un promedio de $-0,75^{\circ}\text{C}$ con un mínimo de $-12,8^{\circ}\text{C}$ el día 21 de noviembre de 2014 a las 4:00 y una máxima de $10,9^{\circ}\text{C}$ el día 8 de marzo de 2015 a las 13:00. Con respecto a la humedad relativa aspirada presenta un marcado ciclo diario alcanzando sus máximos valores durante las horas de la noche. El promedio es de 42,89%. La radiación Onda corta incidente presenta un promedio de 396 w m^{-2} , siempre superando los 1200 w m^{-2} durante días despejados. Y bajando de 1000 w m^{-2} cuando hay nubosidad abundante. Hacia el final del registro (20-2-2015 aproximadamente), la estación presentó una gran inclinación, por causa del desarrollo de grandes penitentes en el glaciar Tapado. Por esta razón el radiómetro registró datos con valores muy bajos (Figura 51), que no fueron incluidos en el cálculo. Los datos brutos completos están incluidos en el anexo digital. Comparando estos datos con los de la estación TAWS1 se puede observar que la velocidad de viento promedio es igual en ambas estaciones, salvo a fines de verano de 2015, cuando la estación se cayó y no midió correctamente. La temperatura promedio es más baja en la estación TAWS2, por encontrarse a mayor altura, mientras que la humedad relativa es más alta que TAWS1 y la radiación de onda corta son similares, aunque con diferencias entre las temporadas (principalmente por efecto de la inclinación).

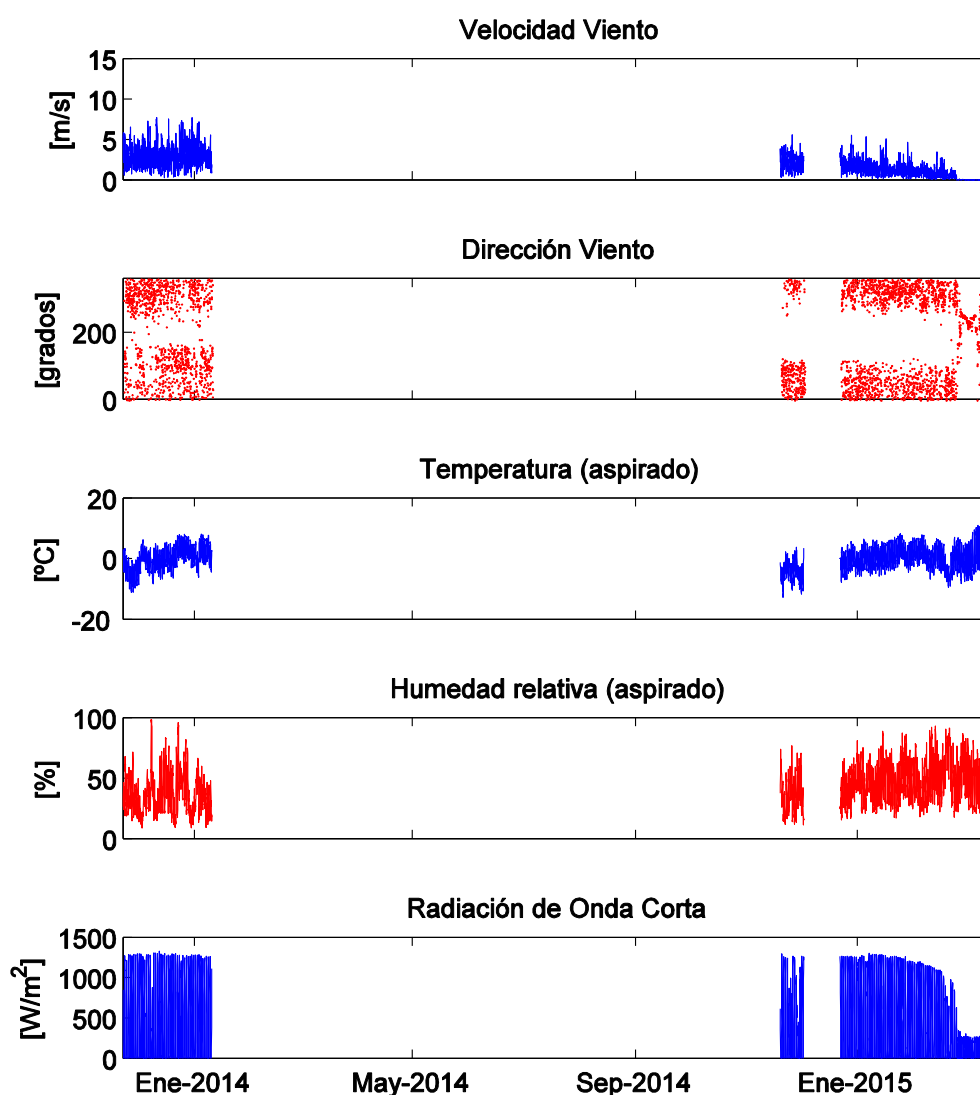


Figura 51. Datos meteorológicos en estación TAWS2 sobre glaciar descubierto para ambas temporadas.

5.1.3 Comparación datos meteorológicos Norte Chico

Finalmente en la Figura 52 se muestra un gráfico comparativo entre las estaciones ubicadas en el glaciar Tapado, para ambas temporadas, en las variables meteorológicas de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, que permite ver las diferencias existentes entre la zona cubierta y descubierta.

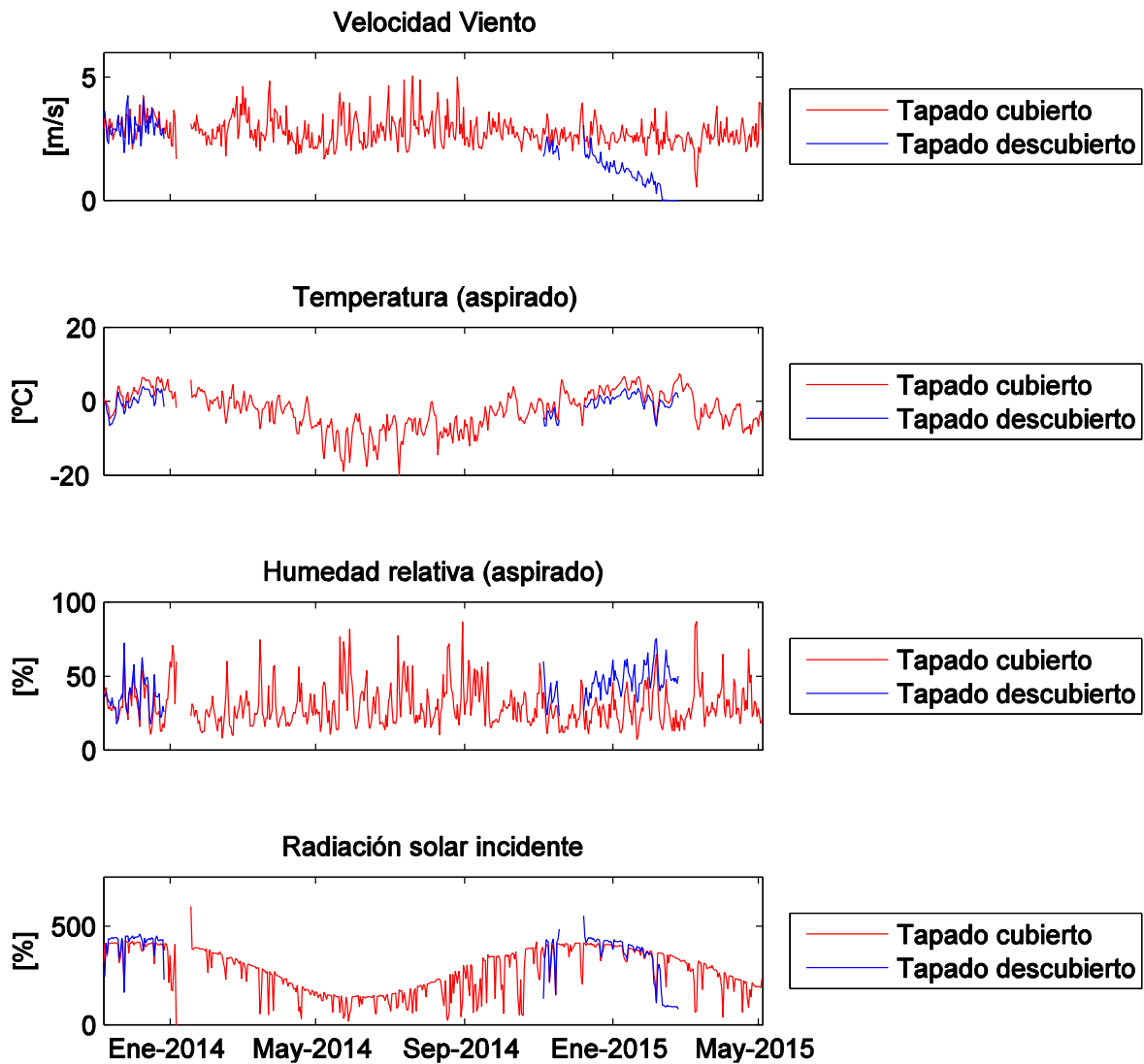


Figura 52: Gráfico comparativo de la velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar incidente en el glaciar Tapado, en las dos ubicaciones (Cubierto y descubierto) para ambas temporadas.

A partir de los datos que se muestran en la Figura 52, la velocidad del viento es menor en el glaciar Tapado descubierto ($1,8 \text{ m s}^{-1}$ versus $2,79 \text{ m s}^{-1}$ en el glaciar cubierto). Esta diferencia se debe a la acción de los penitentes, que se observa en forma más clara en los meses de febrero y marzo de ambas temporadas.

Para hacer la gradiente de temperatura, se compararon los promedios de la temperatura de ambas estaciones, con los períodos de datos coincidentes ($-0,75^{\circ}\text{C}$ en Tapado descubierto y $-0,31^{\circ}\text{C}$ en cubierto), lo cual muestra que la gradiente es de $-0,18^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de altura.

Para el caso de la precipitación, durante todas las temporadas, se compararon estaciones meteorológicas con pluviómetros ubicadas en la cuenca, pero que no

corresponden al proyecto (La Laguna Embalse y Tapado Morrena), las cuales indican que la gradiente es de 19,36 mm por cada 100 m de altura. Para más detalles ver anexo 13.1 "Cálculo de las gradientes de temperatura y precipitación en el Norte Chico y Chile Central".

5.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA CENTRO

5.2.1 *Glaciar San Francisco*

La estación meteorológica fue instalada el día 6 de noviembre de 2013, sobre el glaciar San Francisco. Anteriormente fue probado su funcionamiento en Santiago desde el 21 al 30 de octubre de 2013. A partir de las 14:20 del 5 de noviembre, la estación empieza a registrar los datos hasta las 10 horas del día 15 de abril de 2014, que es el último registro, siendo desmantelada y retirada ese mismo día. Posteriormente fue reinstalada el día 1 de octubre de 2014, probando su funcionamiento con anterioridad en Santiago. La estación registró datos hasta el 8-4-2015, fecha en que fue desmantelada y retirada del glaciar por personal de CEAZA. Esta estación posee una serie continua, esto es, no tiene saltos en las fechas de registro. En general, los registros de dicha estación de temperatura, viento, radiación onda corta y larga y presión atmosférica son correctos. La única excepción sucede con el sensor de altura de nieve (SR50), que a partir del día 20 de febrero de 2014, entregó datos erróneos y en enero de 2015, cuando se cayó el marco de ablación.

Posteriormente el día 29 de septiembre de 2015, por malas condiciones meteorológicas, esta estación que debería ser instalada en el glaciar, se instala provisionalmente en Baños Morales (CONAF) hasta el día 22 de octubre de 2015, cuando un segundo intento fallido de instalación deja sin funcionamiento la estación hasta su posterior instalación en noviembre de 2015.

En la Figura 53 se puede observar la ubicación de la estación con respecto al glaciar y en la Tabla 47 las características de los sensores instalados, como también la metadata de la estación. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

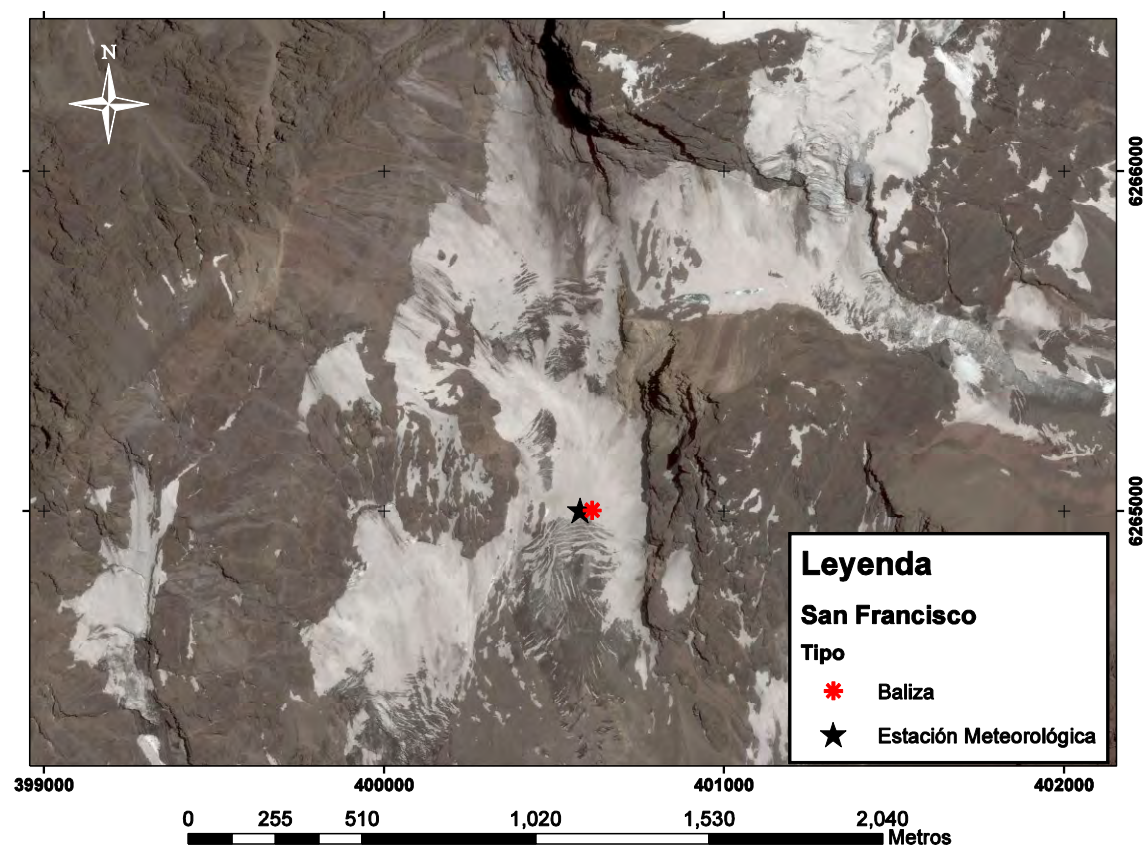


Figura 53. Mapa del glaciar San Francisco mostrando la baliza instalada (asterisco) y la estación meteorológica (estrella). Fuente imagen: Google Earth CNES/Astrium 29-12-2013.

Tabla 47. Sensores instalados en San Francisco en la marco de este proyecto

Sensor	Tipo	Altura inicial(m)
Anemómetro (dirección y velocidad de viento)	Young	2,28
Radiómetro neto	CNR4	2,4
Sensor de altura de superficie	SR50	2 (2013-2014) y 0,5 (2014-2015)
Termómetro	Young	2
Termómetro ventilado	Young	1,9
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	E 400612 N 6265003	
Altura	3466	
Fecha de instalación	06-11-2013 y 1-10-2014	
Fecha de ajuste de los instrumentos	4-12-2014 (SR50)	
Condiciones de la superficie	Cubierto de nieve	

La velocidad del viento alcanza raramente valores por sobre los 10 m s^{-1} . El promedio de ésta fue de $2,8 \text{ m s}^{-1}$; la mínima fue de 0 m s^{-1} y la máxima fue de $13,55 \text{ m s}^{-1}$. El patrón diario de la velocidad del viento es inverso a la temperatura, esto es, mientras menor temperatura, que coincide en la noche, aumenta la velocidad del viento.

La temperatura se aprecia en promedio entre los -5°C y los 10°C . Las mayores temperaturas se presencian en enero para ir bajando progresivamente en los meses posteriores. Existen registros de temperaturas bajo los cero grados en marzo y con mayor intensidad en abril de 2014, así como en octubre, noviembre y ciertos días de diciembre.

La humedad relativa se muestra más cambiante influenciada en gran parte por actividad convectiva en época de verano. Es así como esta alcanza valores cercanos al 100% en enero y febrero lo que se condice con las visitas a terreno donde se presenció presencia de nubes en las cercanías del glaciar y muchas veces precipitaciones intermitentes y débiles. El patrón diario de la humedad relativa en días sin precipitaciones indica que ésta aumenta cuando hay menor temperatura. El promedio en la estación es de 49,13%.

La radiación solar incidente de onda corta en este mismo periodo presenta un promedio de $234,73 \text{ w m}^{-2}$, los valores superan los 1000 w m^{-2} durante los días despejados de verano. Para el mes de marzo se aprecia una disminución en la radiación máxima, ya que los valores no superan los 1000 w m^{-2} . Todos estos datos se pueden observar en la Figura 54.

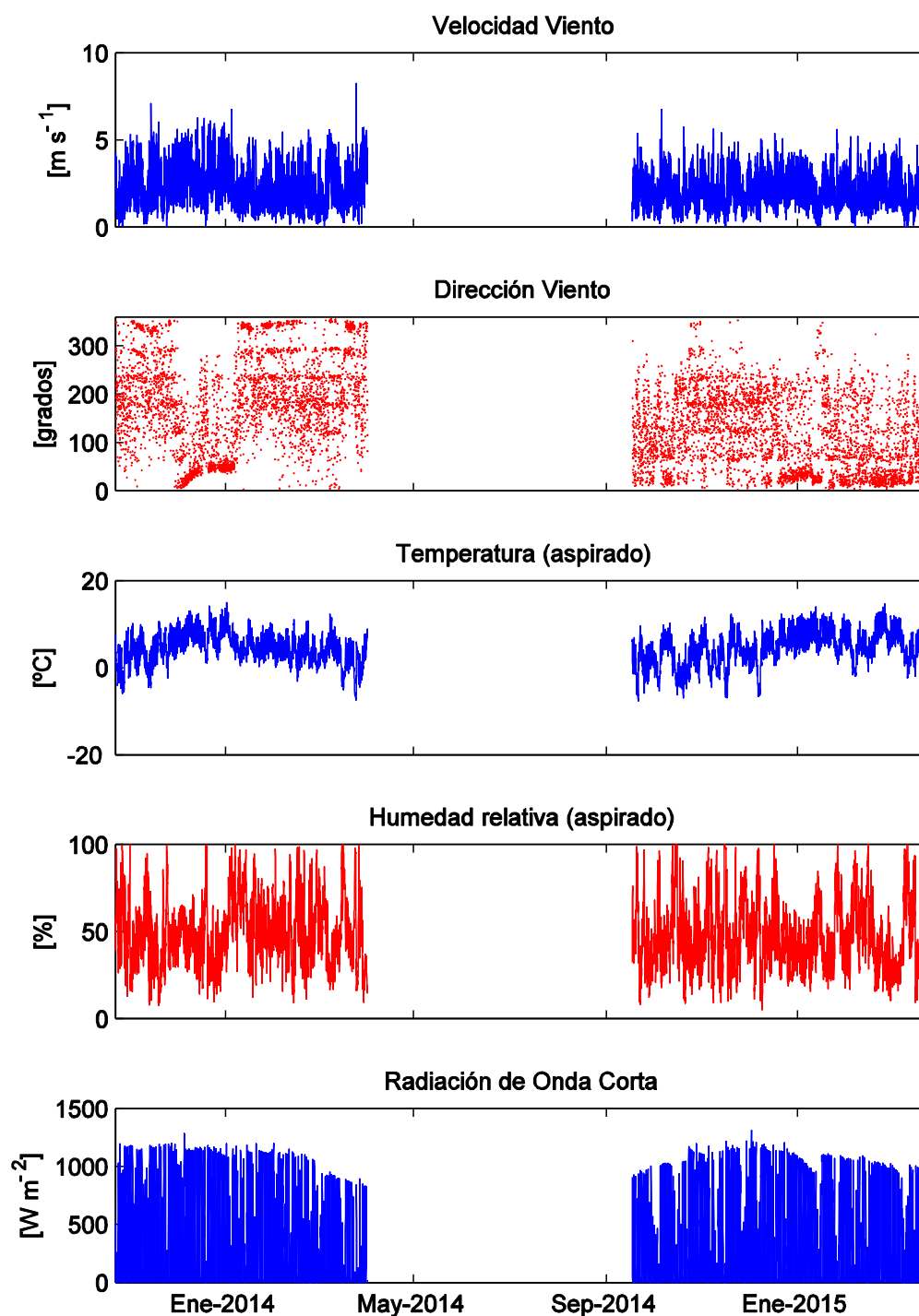


Figura 54. Datos meteorológicos de estación San Francisco para toda la temporada.

5.2.2 Glaciar Pirámide

Esta estación fue instalada el día 6 de noviembre de 2013, la cual fue probada dicha estación entre el 22 al 30 de octubre de 2013 para verificar su funcionamiento en la Universidad de Chile, Santiago. No ha sido retirada del glaciar desde entonces, solamente se cambió su ubicación en abril de 2014 desde el punto 417222 Este, 6285012 Norte (UTM, huso 19S) hasta el punto 417353 Este, 6282990 Norte (UTM,

huso 19S) (Figura 55). Tiene disponibilidad de datos desde el 6 de noviembre de 2013 hasta el día 8 de abril de 2015 y posee una serie continua durante todo el periodo de registro. En la Tabla 48 se puede observar los sensores instalados en dicha estación, así como también la metadata de la estación. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

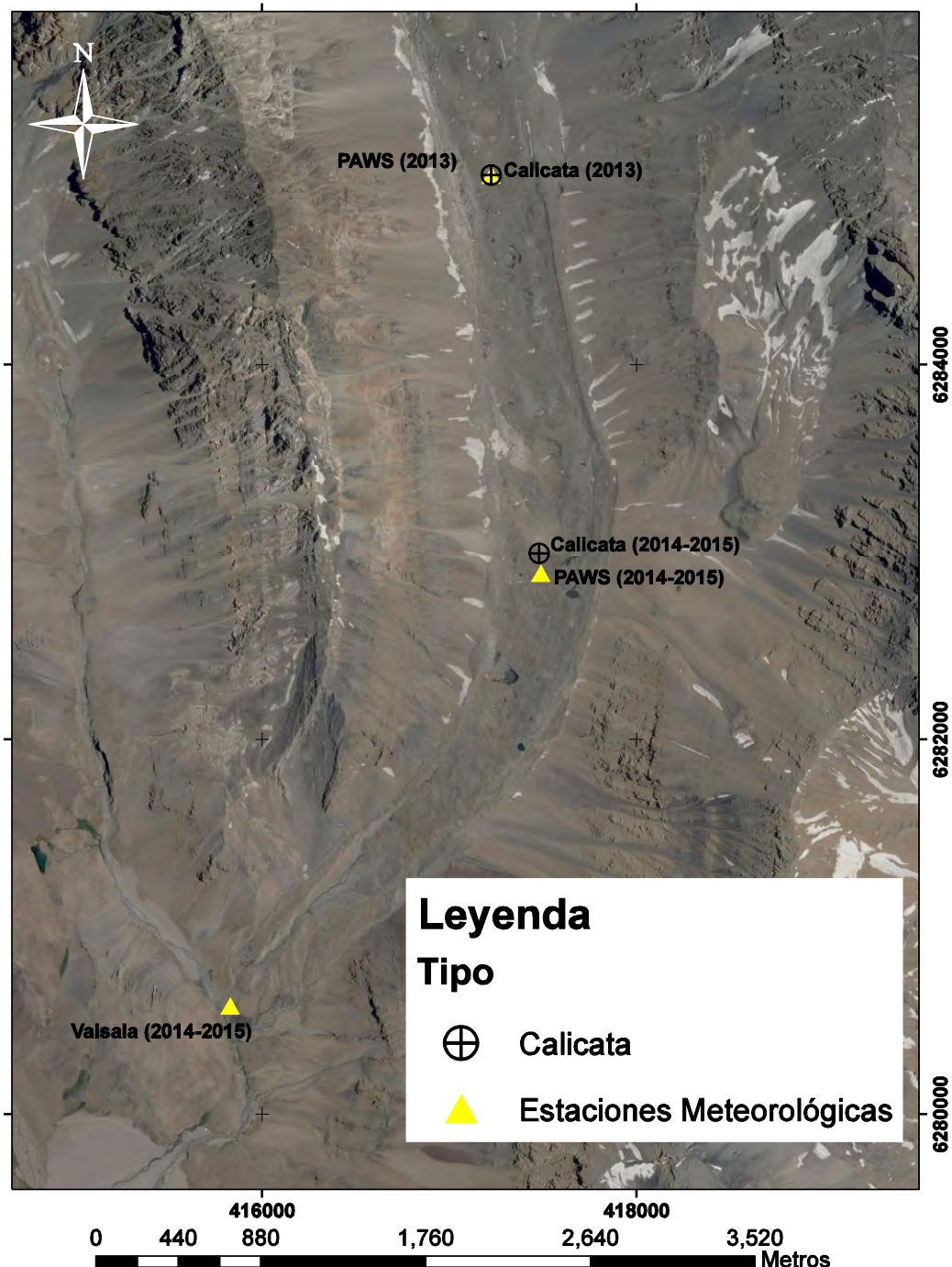


Figura 55: Ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas en el glaciar Pirámide en los años hidrológicos señalados. Fuente imagen: Google Earth CNES-Astrium 28-12-2013.

Los datos en general poseen una serie continua, exceptuando el día 15 de abril de 2014 entre las 15:50 y las 19:20 hrs, que fue el momento en que se hizo el traslado de la estación meteorológica. El sensor de distancia ultrasónico y el sensor de radiación de onda corta incidente, entre el 22 de diciembre de 2013 al 16 de enero de 2014 se desajustó por inclinación de la estación. Los sensores funcionaron en general con algunos inconvenientes, ya que el sensor de radiación de onda larga emitida, que entre el 13 al 17 de febrero de 2014, entregó datos erróneos.

Tabla 48. Sensores instalados en el glaciar Pirámide en la marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Young	2
Radiómetro neto	CNR4	2
Sensor de altura de superficie	SR50	2
Termómetro	Young	2
Termómetro ventilado	Young	2
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	417222 Este, 6285012 Norte (2013-2014) 417353 Este, 6282990 Norte (2014-2015)	
Altura (m)	3675 m (2013-2014) 3459 m (2014-2015)	
Fecha de instalación	5-11-2013 y 15-04-2014	
Fecha de ajuste de los instrumentos	6-11-2013, 11-02-2015 (SR50)	
Condiciones de la superficie	Cubierto de nieve (2013-2014) – Detritos (2014 - 2015) – Cubierto de nieve (Primavera 2015)	

Para el caso de la velocidad del viento, la máxima fue de $19,6 \text{ m s}^{-1}$ el día 2 de agosto de 2014 y el promedio fue de $3,81 \text{ m s}^{-1}$. Debido a la inclinación de la estación, los datos entre el 21 de diciembre de 2013 al 16 de enero de 2014 no son confiables.

Los valores de temperatura muestran un promedio anual de $1,21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lo que es bastante alto para este lugar, sugiriendo que el núcleo del glaciar se encuentra en estado de degradación. La Humedad relativa tiene un promedio de 40,93% y es mayor en invierno que en verano. La radiación de onda corta incidente posee un promedio de $208,77 \text{ w m}^{-2}$. Estos datos al ser el registro de casi 2 años completos no pueden ser comparados con los datos de los glaciares vecinos, ya que las demás estaciones solo registran el período de verano. Los valores de velocidad del viento, temperatura, humedad y radiación solar de onda corta para todo el período se pueden observar en la Figura 56.

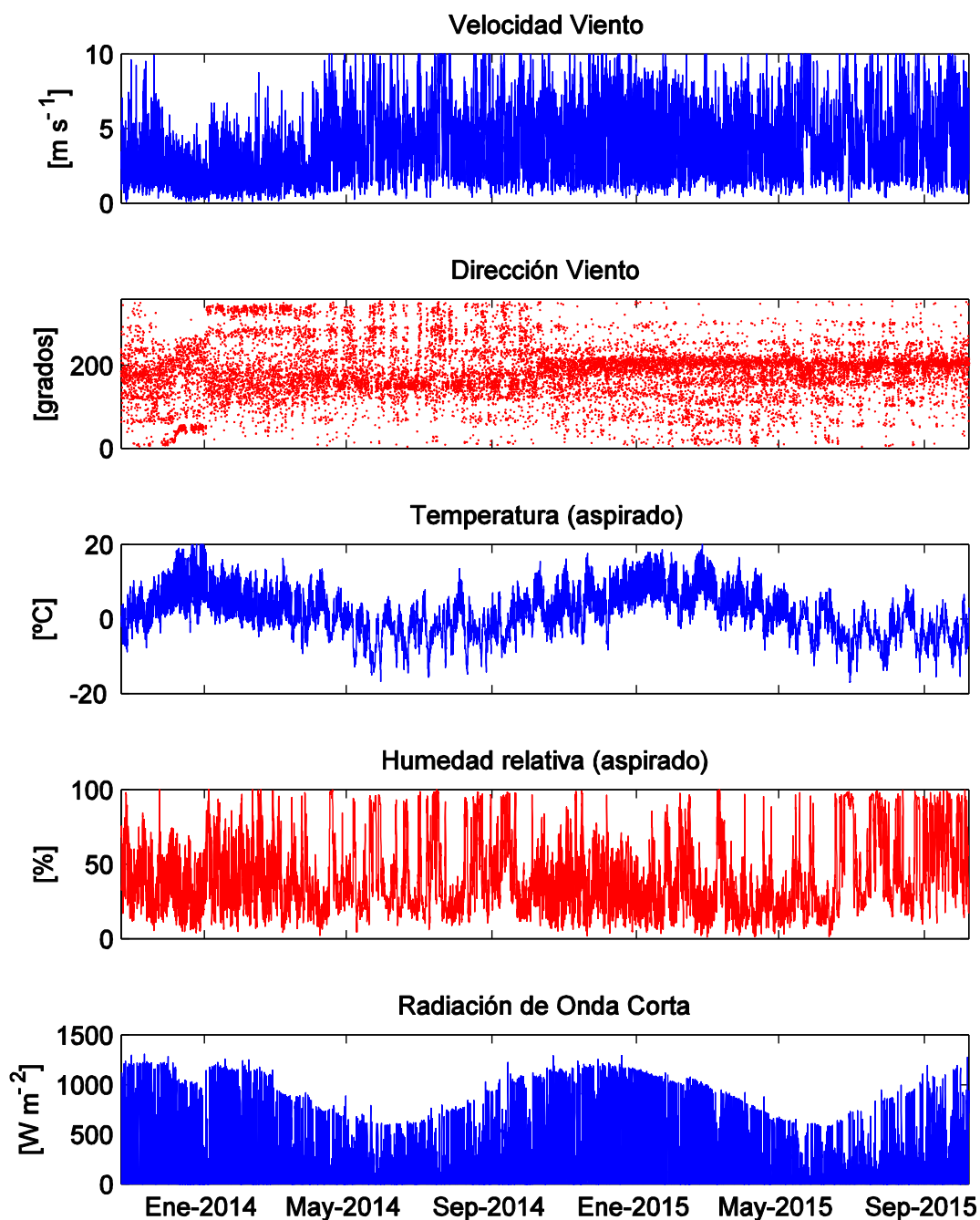


Figura 56. Datos meteorológicos de estación del glaciar Pirámide para todas las temporadas.

5.2.3 Glaciar Pirámide (Vaisala)

Esta estación originalmente fue instalada en las cercanías del glaciar Yeso, específicamente al oeste de la zona de ablación de dicho glaciar (Figura 55). Fue instalada por la DGA el día 15 de noviembre de 2013. Posteriormente, el día 5 de noviembre de 2014, personal de la DGA realizó un cambio en la ubicación de esta estación, quedando ubicada aguas abajo del exutorio del glaciar Pirámide.

A diferencia del resto de las estaciones, esta estación tiene un datalogger marca Vaisala, la cual posee un sistema de registros distinta al resto de las estaciones meteorológicas del proyecto. Las características de los sensores instalados, así como la metadata de la estación, se puede observar en la Tabla 49. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

Tabla 49. Sensores instalados en las cercanías del glaciar Pirámide en el marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Vaisala	2,58
Radiómetro neto	Vaisala	1,32
Termómetro	Vaisala	1,40
Pluviómetro	Vaisala	1,68
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	415828 Este 6280577 Norte	
Altura (m snm)	3022	
Fecha de instalación	5-11-2014	
Fecha de ajuste de los instrumentos	5-11-2014	
Condiciones de la superficie	Rocas	

La serie de datos registrados en esta estación van desde el 5 de noviembre de 2014 hasta el 7 de febrero de 2015. La velocidad de viento alcanzó un promedio de $3,1 \text{ m s}^{-1}$, y una máxima de $11,4 \text{ m s}^{-1}$, registrado el 26 de febrero de 2015 a las 0:00. La temperatura tiene un promedio de $9,6^{\circ}\text{C}$, una máxima de $23,1^{\circ}\text{C}$ y una mínima de $-4,4^{\circ}\text{C}$, registrándose las mayores temperaturas del período de registro a principios del mes de noviembre de 2014. La Humedad relativa tiene un promedio de 33%, una máxima de 99,8% y una mínima de 4%. La radiación de onda corta incidente tiene un promedio de 240 w m^{-2} y una máxima de 1006 w m^{-2} . El sensor registró altos montos de radiación solar durante los meses de noviembre y diciembre, mayores a los registrados en enero y febrero. Los datos de velocidad de viento, temperatura, humedad relativa y radiación de onda corta registrados en la estación, se puede observar en la Figura 57.

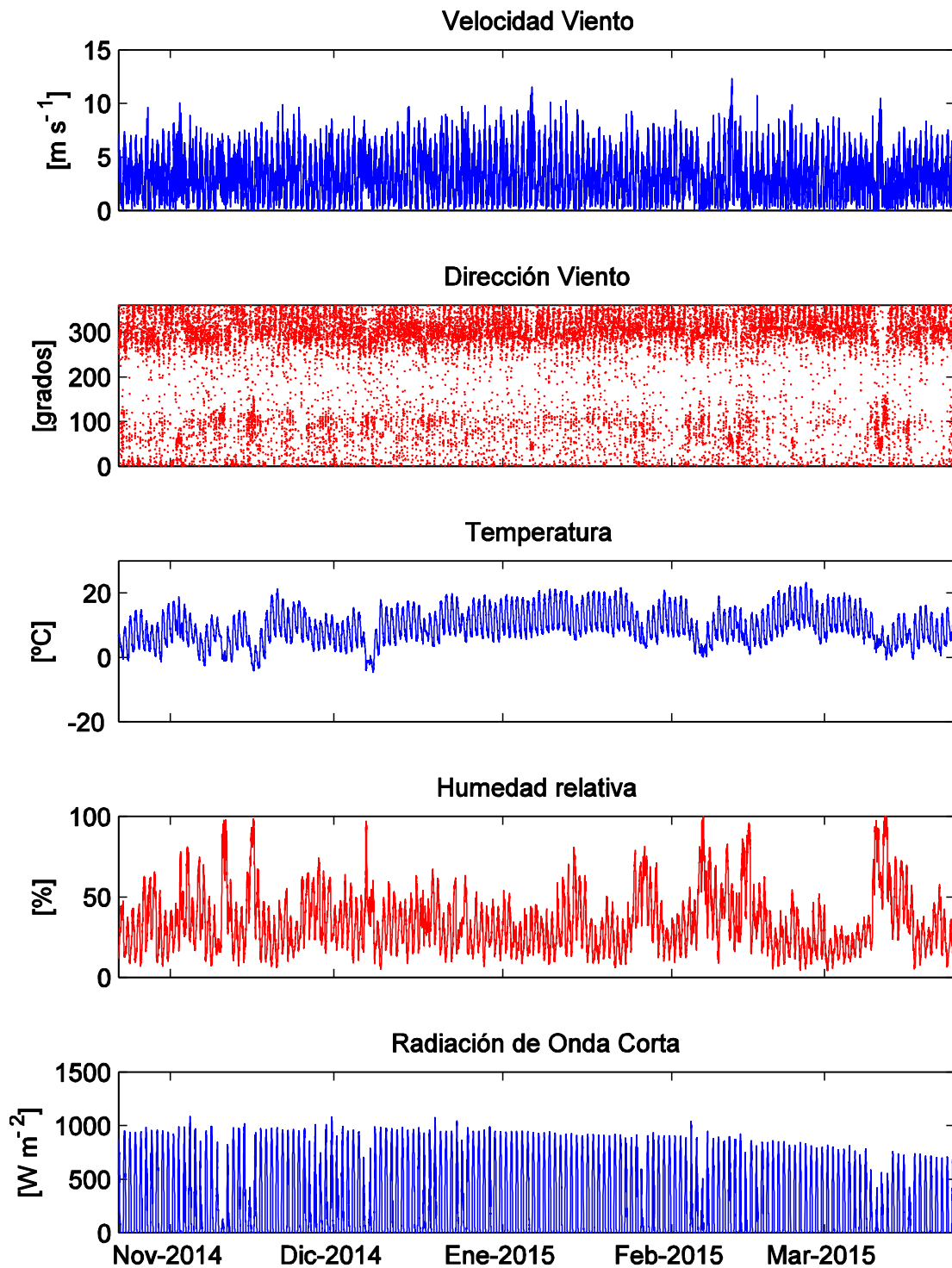


Figura 57. Datos meteorológicos de la estación Vaisala ubicada a aguas abajo del glaciar Pirámide.

5.2.4 Glaciar Bello

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada sobre el glaciar Bello, en la zona de ablación, en un sector plano cercano a las morrenas centrales del glaciar sin presencia de penitentes. Fue instalada el 14 de noviembre de 2013 por personal de la DGA y la

estación fue visitada el 16 de enero de 2014, donde se hizo su mantención y descarga de datos. Fue reinstalada el 1 de octubre de 2014 por personal de CEAZA y de la Universidad de Chile. Tiene registros cada 1 hora, a diferencia de las otras estaciones que poseen registro cada 10 minutos. La serie de datos de la estación está interrumpida entre el 20 de enero y el 6 de febrero de 2014, debido a problemas en el voltaje. Adicionalmente, a partir del día 20 de marzo (2014 y 2015), la estación tuvo problemas en su programación y registró datos cada 3 horas. Esta estación fue retirada el día 15 de abril de 2014, donde fue desmantelada. Después de su reinstalación, fue visitada el 4 de diciembre de 2014, donde se hizo su mantención, descarga de datos y cambio de altura del marco del SR-50. La serie de datos está completa desde el 1 de octubre de 2014 hasta el 8 de abril de 2015, fecha en que se visitó por última vez.

Desde el día 6 de agosto de 2015, la estación meteorológica se encontró sepultada con una capa gruesa de nieve, la cual deja de registrar datos útiles, aunque la transmisión satelital sigue funcionando y enviando datos. Para la visita del día 22 de octubre de 2015, la estación aún no se ha podido encontrar bajo la nieve. La estación fue encontrada el día 27 de enero de 2016, parcialmente cubierta y con problemas en el travesaño, la cual se realizó mantención. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital. Los datos de los sensores instalados y la metadata de la estación, se puede observar en la Tabla 50.

Tabla 50. Sensores instalados en el glaciar Bello en el marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Young	2,3
Radiómetro neto	CNR4	2,15
Sensor de altura de superficie	SR50	1,50 (2013-2014) y 0,50 (2014-2015)
Termómetro	Young	2,1
Termómetro ventilado	Young	2,1
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	412744 Este 6289113 Norte	
Altura (m)	4134	
Fecha de instalación	14-11-2013 y 1-10-2014	
Fecha de ajuste de los instrumentos	15-11-2013 y 1-10-2014	
Condiciones de la superficie	Nieve	

La temperatura aspirado promedio en dicha estación hasta la última descarga de datos (8 de abril de 2015) es de $-0,76^{\circ}\text{C}$, siendo la mínima $-12,13^{\circ}\text{C}$ y la máxima $12,24^{\circ}\text{C}$. La velocidad del viento promedio es de $3,39 \text{ m s}^{-1}$. La humedad relativa aspirada fue en promedio $37,65\%$, la mínima fue de $3,73\%$ y la máxima un 100% . Con respecto a la radiación de onda corta incidente registró un promedio de 302 W m^{-2} y una máxima de $1481,9 \text{ W m}^{-2}$. Desde noviembre hasta marzo la radiación de onda corta incidente máxima diaria superó los 1000 W m^{-2} , para disminuir después de marzo. Los datos de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa (aspirado) y radiación de onda corta, se pueden observar en la Figura 58.

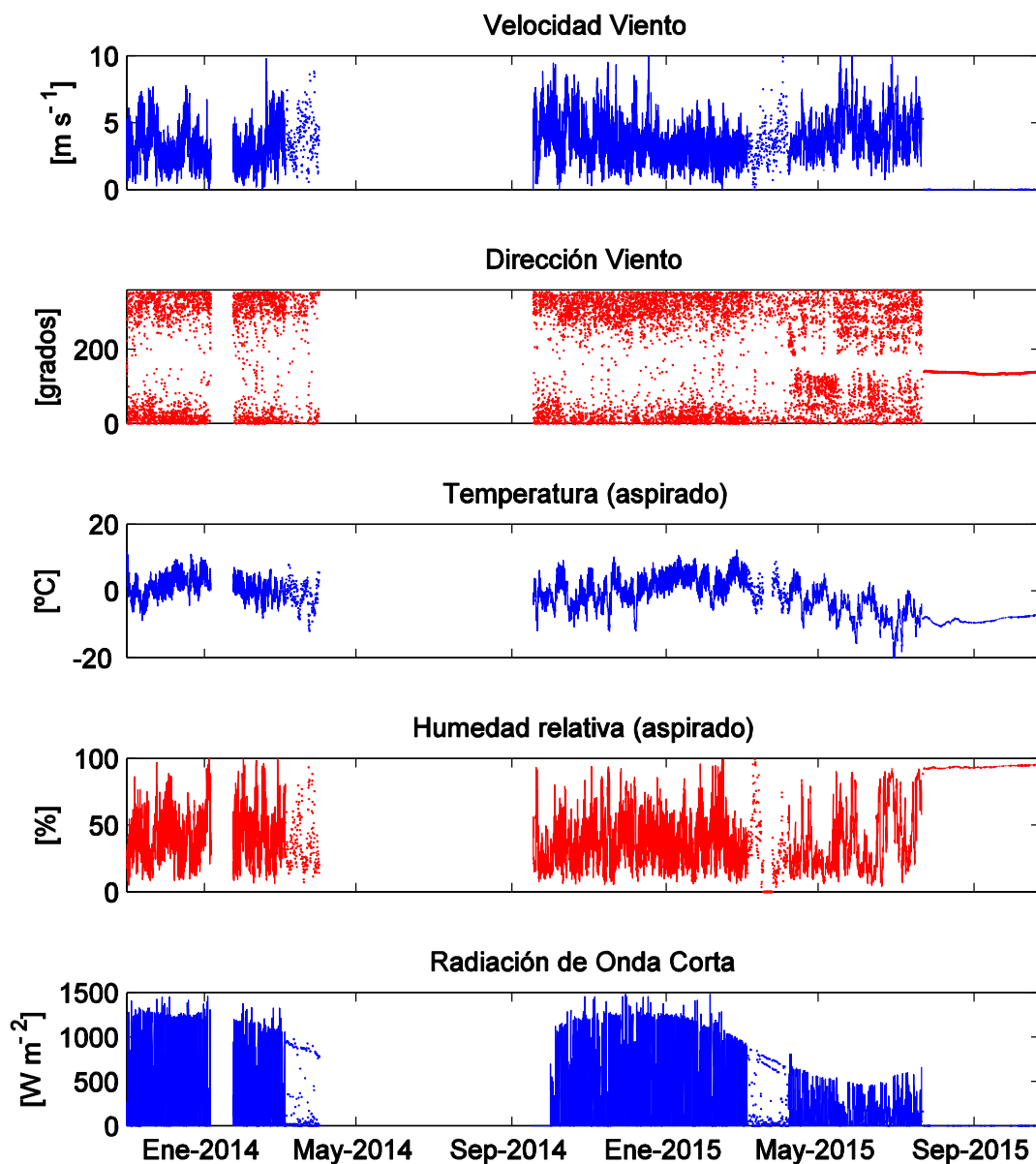


Figura 58. Datos estación meteorológica en glaciar Bello para todas las temporadas. Los datos posteriores al 8 de abril de 2015 son obtenidos de la transmisión satelital y desde el día 6 de agosto de 2015, la estación se encuentra sepultada bajo una capa indeterminada de nieve.

5.2.5 *Glaciar Yeso*

La estación del glaciar Yeso se instaló el 15 de noviembre de 2013 por personal de la DGA, está ubicada en una zona alta del glaciar Yeso a 4428 m snm, en medio de campos de grietas en una zona de difícil acceso por tierra. Se instaló sobre una superficie cubierta de nieve (Tabla 51). El 16 de enero de 2014 personal de CEAZA y Universidad de Chile visitaron la estación para su mantención y descarga de datos, encontrando la estación desnivelada producto del desarrollo de penitentes en la nieve, aunque los instrumentos siguen funcionando sin daños visibles. Finalmente la estación es desmantelada y retirada del glaciar el día 15 de Abril de 2013 por personal de CEAZA.

Posteriormente se instaló el 1 de octubre de 2014, no quedando operativa, ya que el personal de CEAZA no tuvo tiempo de terminar el trabajo por el deterioro de las condiciones meteorológicas. Posteriormente, personal de la DGA visita esta estación el 5 de noviembre de 2014, quedando operativa. El 4 de diciembre de 2014 personal de CEAZA visitó la estación para su mantención y descarga de datos. También se ajustó la altura del sensor SR-50. La estación se visitó nuevamente el día 10 de febrero de 2015, constatándose de que estaba parcialmente dentro de una grieta y sin su batería, la cual se precipitó dentro de la grieta. Posteriormente, personal de CEAZA regresa a la estación de Yeso el día 24 de febrero para reemplazar la batería y dejar la estación operativa. Finalmente la estación es desmantelada y retirada del glaciar el día 8 de Abril de 2015. Posteriormente el día 22 de octubre de 2015, se decide reinstalar el glaciar en el mismo lugar, dejando operativa la estación, con su marco de ablación instalado. Se constató que el espesor de nieve es superior al largo del marco de ablación (mayor a 3 m). El mapa con la ubicación de la estación se puede observar en la Figura 59 y todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

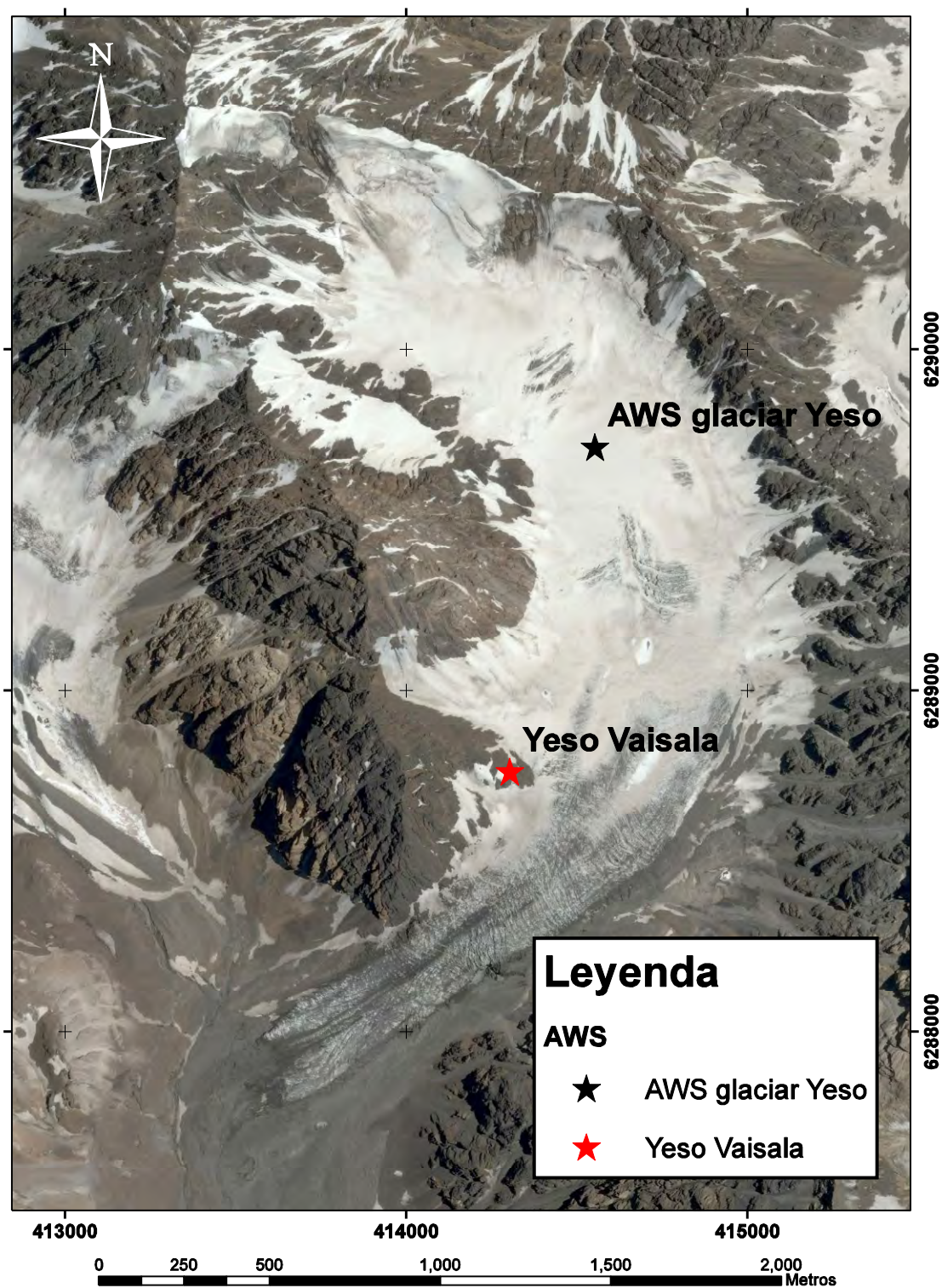


Figura 59. Mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas en el glaciar Yeso.
Fuente imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-12-2013.

Tabla 51. Sensores instalados en el glaciar Yeso en el marco de este proyecto

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Young	2,03 (2013-2015) 2,24 (2015-2016)
Radiómetro neto	CNR4	1,61 3,5 (2013-2014)
Sensor de altura de superficie	SR50	1,4 (2014-2015) 0,49 (2015-2016)
Termómetro		1,88 1,68 (2013-2014)
Termómetro ventilado		1,98 (2014-2015) 1,90 (2015-2016)
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)		414554 Este 6289714 Norte
Altura (m)		4428
Fecha de instalación		15-11-2013, 1-10-2014 y 22-10-2015
Fecha de ajuste de los instrumentos		15-11-2013 y 4-12-2014
Condiciones de la superficie		nieve

Los datos obtenidos desde de la estación meteorológica del glaciar Bello muestran valores similares a los de la estación meteorológica del Yeso (Figura 60), con algunas diferencias. La velocidad de viento promedio en la estación del glaciar Yeso es de $2,4 \text{ m s}^{-1}$ llegando a un máximo de $9,78 \text{ m s}^{-1}$. La temperatura promedio fue de $-1,8^{\circ}\text{C}$, la máxima fue de $11,6^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura mínima fue de $-15,78^{\circ}\text{C}$. La humedad relativa también presenta valores cercanos al 100% en varios puntos como lo fueron en particular para el día 18-01-2014 y el 15-03-2014 donde se realizaron visitas a terreno. No obstante, en el día mencionado en enero no se presenta una disminución significativa en la radiación, como si se aprecia en día de marzo. Esto ocurre porque la nubosidad y las condiciones más húmedas se hacen presentes de diferentes maneras. En el primer caso, la nubosidad apareció a las 15:00 horas permitiendo que la radiación solar alcanzara un valor cercano al de un día despejado a medio día. Después de esa hora, las condiciones cambiaron drásticamente. No obstante, el día 15 de marzo de 2014 la nubosidad estuvo presente desde primeras horas de la mañana, asociada a un núcleo frío en altura. La humedad en promedio es de 45,37%, mayor que la detectada en el glaciar Bello, pero la radiación solar no presenta grandes diferencias con el glaciar Bello.

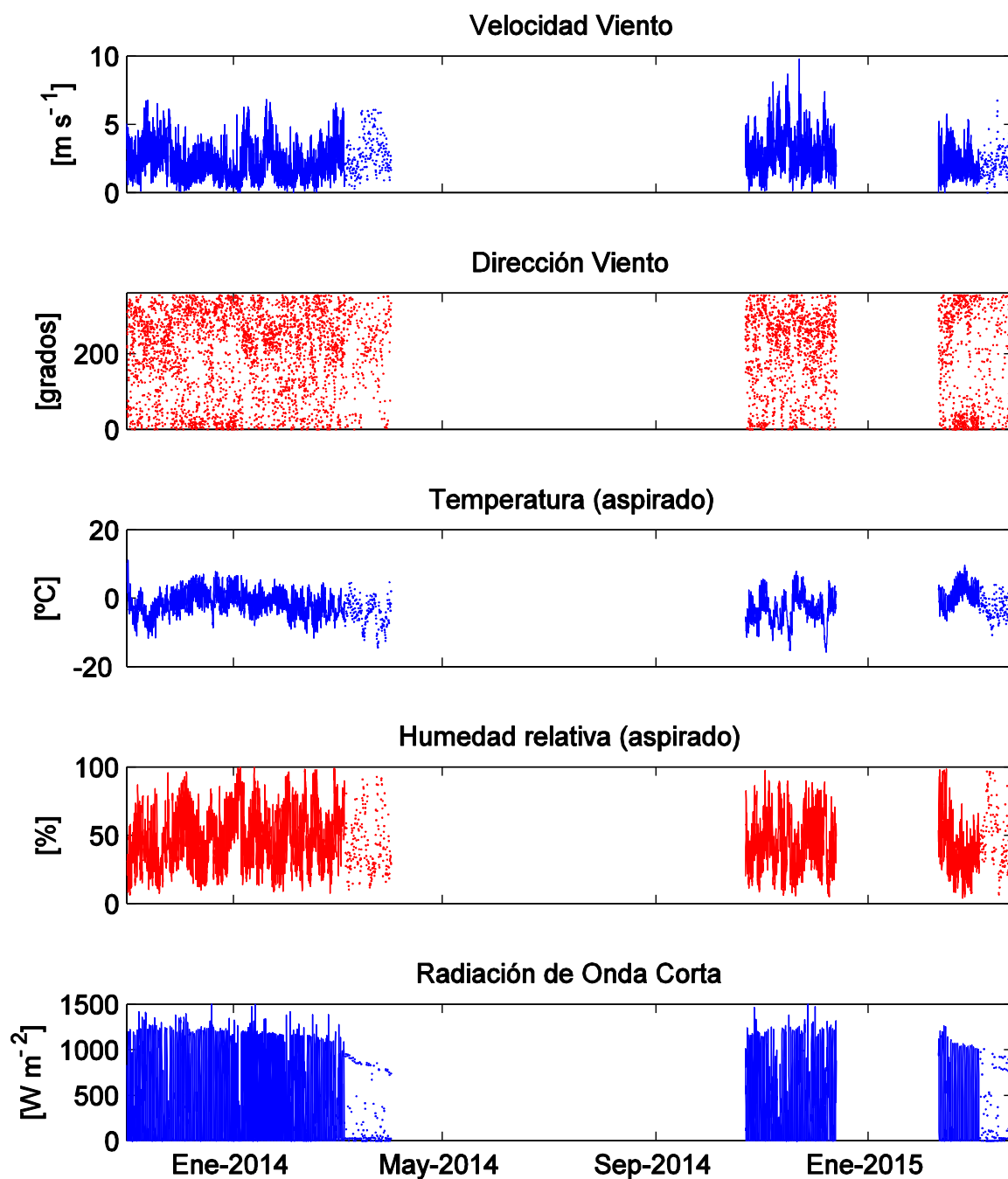


Figura 60. Datos estación meteorológica en glaciar Yeso en los años hidrológicos 2013 y 2014.

5.2.6 Glaciar Yeso (Vaisala)

Esta estación se ubica afuera del glaciar Yeso, específicamente al oeste de la zona de ablación de dicho glaciar (Figura 59). Fue instalada por personal de la DGA el día 15 de noviembre de 2013 y posee registros hasta el 15 de abril de 2014. Posee en su mayoría,

registros continuos de datos, con la excepción del sensor de viento que tiene vacío entre el 16 de enero de 2014 a las 17:00 y el día 21 de enero de 2014 a las 5:00.

A diferencia del sensor anterior ubicado en el glaciar Yeso, esta estación tiene un datalogger marca Vaisala, la cual posee un sistema de registros distinta al resto de las estaciones meteorológicas del proyecto. Las características de los sensores instalados, así como la metadata de la estación, se puede observar en la Tabla 52. Todos los datos brutos de la estación se encuentran en el anexo digital.

Tabla 52. Sensores instalados en las cercanías del glaciar Yeso en el marco de este proyecto.

Sensor	Tipo	Altura inicial (m)
Anemómetro (dirección y velocidad del viento)	Vaisala	s/d*
Radiómetro neto	Vaisala	s/d
Termómetro	Vaisala	s/d
Termómetro ventilado	Vaisala	s/d
Metadata		
Coordenadas estación (UTM)	414304 Este 6288762 Norte	
Altura (m)	4300	
Fecha de instalación	15-11-2013	
Fecha de ajuste de los instrumentos	15-11-2013	
Condiciones de la superficie	Rocas	

*s/d: sin datos

Respecto de los datos de la estación meteorológica, la relación entre la temperatura y la humedad es inversa, pero en el caso de la velocidad del viento, tiene una relación directa con un desfase de 2 horas aproximadamente. En otras palabras, cuando la temperatura alcanza el máximo, en 2 horas más se genera el máximo de velocidad de viento.

La temperatura del aire comparativamente con la estación Bello, es muy similar a esta estación, pero mayor a la temperatura registrada en el glaciar Yeso. El promedio de temperatura registrado en esta estación es de 0,52°C y la velocidad del viento promedio es de 3,69 m s⁻¹.

Para el caso de la radiación de onda corta, si se compara con la estación Bello, es menor, al igual que si se compara con la estación ubicada en el glaciar Yeso. Esto se debe

principalmente a la ubicación de esta estación, en una ladera de exposición este. Los datos de velocidad de viento, temperatura, humedad relativa y radiación de onda corta registrados en la estación, se puede observar en la Figura 61.

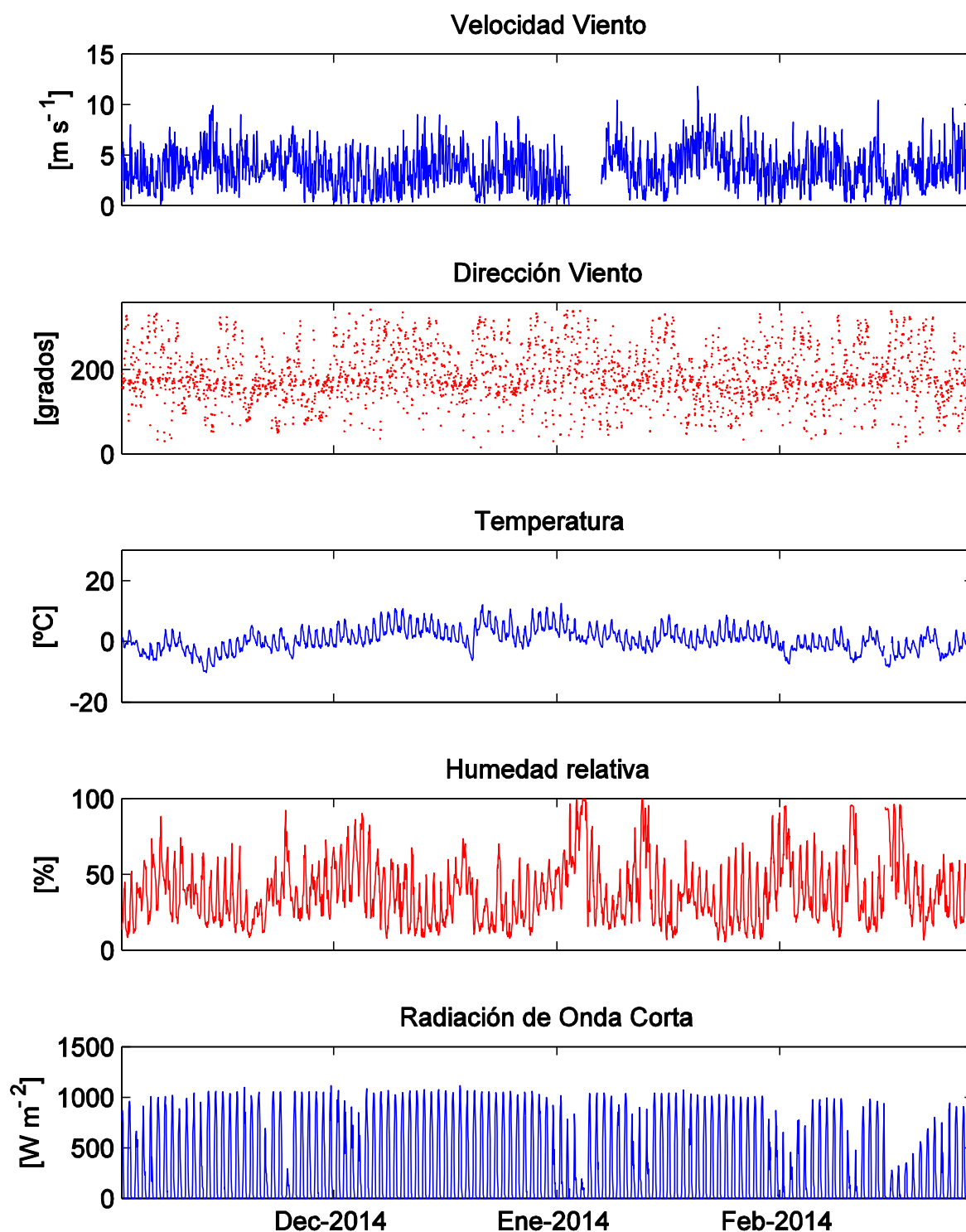


Figura 61. Datos meteorológicos de la estación Yeso (Vaisala) ubicada a un costado del glaciar.

5.2.7 Comparación datos meteorológicos Chile Central

En la Figura 62 se muestra un gráfico comparativo entre las estaciones meteorológicas ubicadas en los glaciares Pirámide, San Francisco, Bello y Yeso (GEUS y Vaisala) para la temporada 2013-2014, mediante las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar incidente, todas con promedio diario.

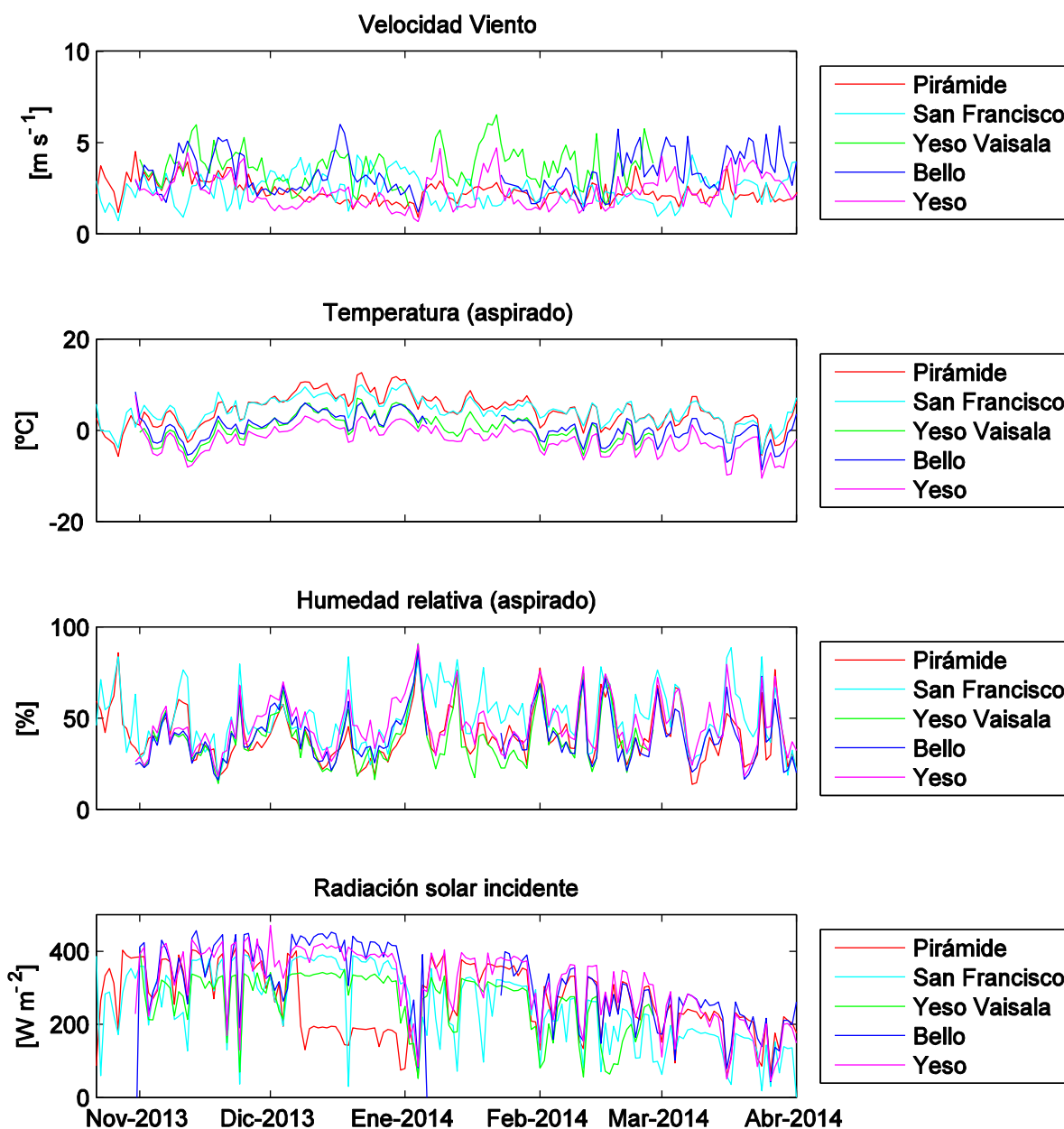


Figura 62. Comparación de datos meteorológicos de temperatura, humedad y velocidad del viento para las estaciones ubicadas en los glaciares Pirámide, San Francisco, Bello y Yeso (GEUS y Vaisala) para la temporada 2013-2014.

En ella, se puede observar las diferencias de velocidad del viento, temperatura del aire (aspirado) y humedad relativa (aspirado) según la posición ubicada en el glaciar. La diferencia más destacable es en temperatura, siendo más alta en Pirámide (4,2°C promedio del período) y la más baja en el glaciar Yeso (-1,6°C promedio del período).

Debido a la inclinación de la estación, los datos entre el 21 de diciembre de 2013 al 16 de enero de 2014 del glaciar Pirámide se observan alterados en la radiación incidente.

En la Figura 63 se muestra un gráfico comparativo entre las estaciones ubicadas en los glaciares Pirámide (GEUS y Vaisala), San Francisco, Bello y Yeso durante la temporada 2014-2015.

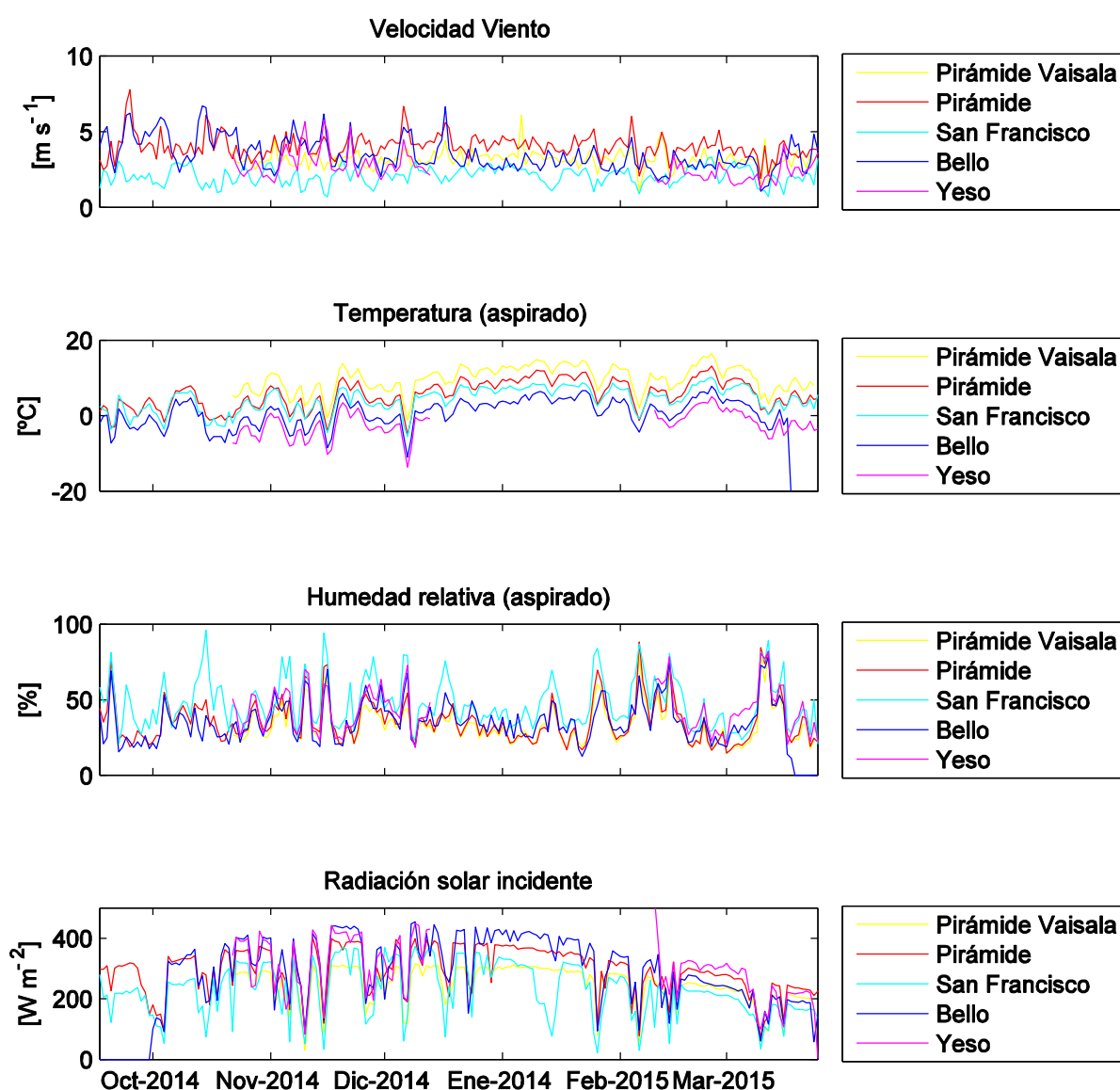


Figura 63. Comparación de datos meteorológicos de temperatura, humedad y velocidad del viento para las estaciones ubicadas en los glaciares Pirámide (GEUS y Vaisala), San Francisco, Bello y Yeso para la temporada 2014-2015.

En ella se ven las diferencias existentes en los glaciares analizados, al igual que la temporada anterior. Lo más destacable en este período es la temperatura del aire, siendo mayor en la estación Pirámide Vaisala ($9,6^{\circ}\text{C}$ en promedio del período) y menor en la estación ubicada en el glaciar Yeso ($-2,2^{\circ}\text{C}$ en promedio del período).

Respecto a las gradientes de temperatura y precipitación, se hicieron bajo distintos métodos, ya que no existen pluviómetros en las estaciones ubicadas sobre los glaciares, no así para el caso de la temperatura. Para esta variable, se analizaron los períodos en común entre las estaciones Bello, Pirámide, San Francisco y Yeso. Para la temporada 2013-2014, la gradiente era de $-0,65^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m. Para la temporada 2014-2015, era de $-0,68^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m. Esto significa que en promedio, para ambas temporadas es de $-0,67^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de elevación.

En el caso de la precipitación, se usaron 2 estaciones ubicadas en la cuenca, con toda la serie disponible para los años hidrológicos analizados (El Yeso Embalse y San Gabriel), lo cual da, para esa cuenca, una gradiente de 0,84 mm por cada 100 m de elevación. Para más detalles ver anexo 13.1 "Cálculo de las gradientes de temperatura y precipitación en el Norte Chico y Chile Central".

6. MODELACIÓN DE ABLACIÓN

6.1 RESULTADOS DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA

En esta sección se presentan los resultados del modelamiento del balance de energía a escala puntual durante la temporada estival 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016. Este modelamiento se realizó mediante la aplicación de un modelo de balance de energía usando los datos glaciológicos y meteorológicos medidos durante las campañas de terreno (Tabla 53 a Tabla 58). En algunos casos, la extensión de datos usada para los modelos de balance de energía es más corta que el periodo total de datos capturados. En efecto, algunos periodos no fueron considerados para el modelo de balance de energía, pues se cree que la incertidumbre en los resultados sería muy grande. Esto se debe a inclinaciones excesivas de los instrumentos, a la pérdida de estacas de ablación o a la imposibilidad de validar los resultados del balance de masa, debido a fallas en el sensor de variación de la superficie. Adicionalmente, en el caso de existir vacíos en los parámetros de la superficie glaciaria, se utilizaron datos medidos en glaciares cercanos. Por ejemplo, los datos faltantes de densidad de nieve en los glaciares de Yeso y San Francisco fueron reemplazados por los valores medidos en los glaciares Bello y Pirámide, respectivamente.

En los sitios de estudio de Tapado alto, Bello, Yeso y San Francisco el balance de energía es calculado primero sobre la cobertura nival y, una vez que esta es derretida por completo, sobre el hielo glaciario. Los sitios del glaciar Tapado bajo y Pirámide corresponden al balance de energía sobre glaciares cubiertos por detritos, una vez que la cobertura nival se ha derretido por completo. Durante el verano, la cobertura nival depositada sobre los detritos por nevadas ocasionales no es incorporada directamente al modelo en forma de nuevas capas, pero sí se considera el cambio en el albedo de la superficie.

En el caso de los glaciares cubiertos, se despreciaron los montos de evaporación y condensación sobre la superficie, por lo que se obtuvo un flujo de calor latente constante y nulo. Considerando las condiciones de baja humedad ambiental en los glaciares de la zona norte y central de Chile, es probable que el flujo de vapor sea nulo, o cercano a cero, durante la mayor parte del día sobre la cubierta de detritos. Sin embargo, dicho supuesto debe ser explorado más en profundidad en estudios más detallados del balance de energía. El flujo de calor conducido por los detritos es uno de los resultados del modelo y corresponde al calor que recibe la superficie de hielo de parte de la capa de detritos.

Los datos de radiación de onda corta fueron corregidos de acuerdo al inclinómetro instalado en cada estación. Sin embargo, se descartaron aquellos datos en que la inclinación superó los 20°.

Tabla 53: Datos disponibles directamente en cada glaciar para el modelo de balance de energía. Temporada 2013-2014.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Datos disponibles									
			ISWR	OSWR	ILWR	OLWR	Ta	RH	WS	AS	SD	SS
Norte	Tapado	Zona alta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Zona baja (cubierta de detritos)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Central	San Francisco		X	X	X	X	X	X	X			X
	Pirámide	Cubierta de detritos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Bello		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Yeso		X	X	X	X	X	X	X			X

ISWR: Radiación de onda corta incidente (*Incoming shortwave radiation*)

OSWR: Radiación de onda corta reflejada (*Outgoing shortwave radiation*)

ILWR: Radiación de onda larga incidente (*Incoming longwave radiation*)

OLWR: Radiación de onda larga emitida (*Outgoing longwave radiation*)

Ta: Temperatura del aire (*Air temperature*)

RH: Humedad relativa del aire (*Relative humidity*)

WS: Velocidad del viento (*Wind speed*)

AS: Estacas de ablación (*Ablation stakes*)

SD: Densidad de nieve (*Snow density*)

SS: Superficie de nieve (*Snow surface*)

Tabla 54: Datos disponibles directamente en cada glaciar para el modelo de balance de energía. Temporada 2014-2015.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Datos disponibles									
			ISWR	OSWR	ILWR	OLWR	Ta	RH	WS	AS	SD	SS
Norte	Tapado	Zona alta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Zona baja (cubierta de detritos)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Central	San Francisco		X	X	X	X	X	X	X			X
	Pirámide	Cubierta de detritos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Bello		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Yeso		X	X	X	X	X	X	X			X

ISWR: Radiación de onda corta incidente (*Incoming shortwave radiation*)

OSWR: Radiación de onda corta reflejada (*Outgoing shortwave radiation*)

ILWR: Radiación de onda larga incidente (*Incoming longwave radiation*)

OLWR: Radiación de onda larga emitida (*Outgoing longwave radiation*)

Ta: Temperatura del aire (*Air temperature*)

RH: Humedad relativa del aire (*Relative humidity*)

WS: Velocidad del viento (*Wind speed*)

AS: Estacas de ablación (*Ablation stakes*)

SD: Densidad de nieve (*Snow density*)

SS: Distancia a la superficie de nieve (*Snow surface*)

Tabla 55: Datos disponibles directamente en cada glaciar para el modelo de balance de energía. Temporada 2015-2016.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Datos disponibles									
			ISWR	OSWR	ILWR	OLWR	Ta	RH	WS	AS	SD	SS
Central	San Francisco		X	X	X	X	X	X	X			X
	Pirámide	Cubierta de detritos	X	X	X	X	X	X	X		X	X
	Yeso		X	X	X	X	X	X	X			X

ISWR: Radiación de onda corta incidente (*Incoming shortwave radiation*)

OSWR: Radiación de onda corta reflejada (*Outgoing shortwave radiation*)

ILWR: Radiación de onda larga incidente (*Incoming longwave radiation*)

OLWR: Radiación de onda larga emitida (*Outgoing longwave radiation*)

Ta: Temperatura del aire (*Air temperature*)

RH: Humedad relativa del aire (*Relative humidity*)

WS: Velocidad del viento (*Wind speed*)

AS: Estacas de ablación (*Ablation stakes*)

SD: Densidad de nieve (*Snow density*)

SS: Distancia a la superficie de nieve (*Snow surface*)

Tabla 56: Características de los datos usados para el modelo de balance de energía durante la temporada 2013-2014.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Coordenadas (E,N)		Elevación [msnm]	Fechas de inicio	Fechas de término
Norte	Tapado	Zona alta	410919	6664151	4.775	23-11-2013	10-01-2014
		Zona baja (cubierta de detritos)	411176	6663510	4.570	21-11-2013	22-04-2014
Central	Pirámide	Cubierta de detritos	417222	6285012	3.675	16-01-2014	15-04-2014
	San Francisco		400612	6265003	3.466	05-11-2013	29-03-2014
	Bello		412744	6289113	4.134	15-11-2013	20-01-2014
	Yeso		414554	6289714	4.428	15-11-2013	14-01-2014

Tabla 57. Características de los datos usados para el modelo de balance de energía durante la temporada 2014-2015.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Coordenadas (E,N)		Elevación [msnm]	Fechas de inicio	Fechas de término
Norte	Tapado	Zona alta	410919	6664151	4.775	16-01-2014	08-02-2015
		Zona baja (cubierta de detritos)	411176	6663510	4.570	22-10-2014	23-03-2015
Central	Pirámide	Cubierta de detritos	417222	6285012	3.675	01-11-2014	31-03-2015
	San Francisco		400612	6265003	3.466	05-11-2014	08-04-2015
	Bello		412744	6289113	4.134	22-10-2014	20-02-2015
	Yeso		414554	6289714	4.428	05-11-2014	27-12-2014

Tabla 58. Características de los datos usados para el modelo de balance de energía durante la temporada 2015-2016.

Zona geográfica	Glaciar	Ubicación	Coordenadas (E,N)		Elevación [msnm]	Fechas de inicio	Fechas de término
Central	Pirámide	Cubierta de detritos	417222	6285012	3.675	10-12-2015	15-02-2016
	San Francisco		400612	6265003	3.466	02-12-2015	15-02-2016
	Yeso		414554	6289714	4.428	23-10-2015	15-02-2016

A continuación, se presenta la validación del modelo de balance de energía usando datos de ablación y de temperatura superficial en la temporada 2013-2014 y 2014-2015 (Figura 64 y Figura 65, Tabla 59 y Tabla 60). Los datos de ablación son derivados del sensor de descenso de la superficie y la temperatura superficial es calculada de los datos de radiación de onda larga emitida, mediante la ley de Stefan-Boltzmann.

La validación de balance de masa en el glaciar San Francisco para la temporada 2013-2014 y para todos los glaciares en la temporada 2014-2015 no pudo ser realizada de forma óptima por problemas en las observaciones de variación de superficie, relacionadas con el sensor mismo y/o la excesiva inclinación de la estación ($>20^\circ$). En varios de los sitios estudiados el sensor de superficie muestra un comportamiento errático, el cual no fue posible corregir en todos los casos. En particular, las mediciones en el glaciar Tapado para la temporada 2014-2015 fueron seriamente afectadas por la formación de penitentes, los cuáles provocaron una severa inclinación de los instrumentos.

Los resultados de las validaciones indican que, a excepción de algunos detalles que deben ser estudiados con mayor detenimiento, los modelos utilizados representan de manera correcta los flujos de energía y masa de los sitios en estudio. Sin embargo, se observa que el modelo de balance de energía presenta un peor desempeño sobre la cubierta de detritos que sobre la cobertura nival. Es posible que esto se deba a que los flujos de calor latente y la presencia de humedad entre los detritos no están siendo considerados en el balance de energía. Futuros estudios del balance de energía sobre glaciares cubiertos de la zona deberán definir la importancia de estos procesos mediante la incorporación de nuevos sensores y modelos teóricos.

Tabla 59. Validación del modelo de balance de energía usando índices de eficiencia. Temporada 2013-2014.

AWS	Índices de eficiencia. Ablación			Índices de eficiencia. Temperatura superficial		
	RMSE [mm]	NS []	MBD [mm]	RMSE [°C]	NS []	MBD [°C]
Tapado	0,99	-0,37	1,56	0,95	0,91	-0,63
Bello	1,00	-0,10	-5,35	0,93	0,92	-0,24
Yeso	0,98	0,10	-35,63	0,87	0,81	-0,88
San Francisco	-	-	-	0,74	0,42	-0,66
Tapado cubierto	-	-	-	4,51	0,87	3,50
Pirámide cubierto	-	-	-	5,65	0,73	3,29

Tabla 60. Validación del modelo de balance de energía usando índices de eficiencia. Temporada 2014-2015.

AWS	Índices de eficiencia. Ablación			Índices de eficiencia. Temperatura superficial		
	RMSE [mm]	NS []	MBD [mm]	RMSE [°C]	NS []	MBD [°C]
Tapado	-	-	-	-	-	-
Bello	0.96	-1.53	293.83	0,90	0,85	-0,67
Yeso	0.93	-14.68	-8.60	0,92	0,92	-0,14
San Francisco (hasta 06.01.2015)	0.99	0.10	-143.62	0,61	0,15	-0,82
Tapado cubierto	-	-	-	7,22	0,69	5,99
Pirámide cubierto	-	-	-	5,34	0,79	1,17

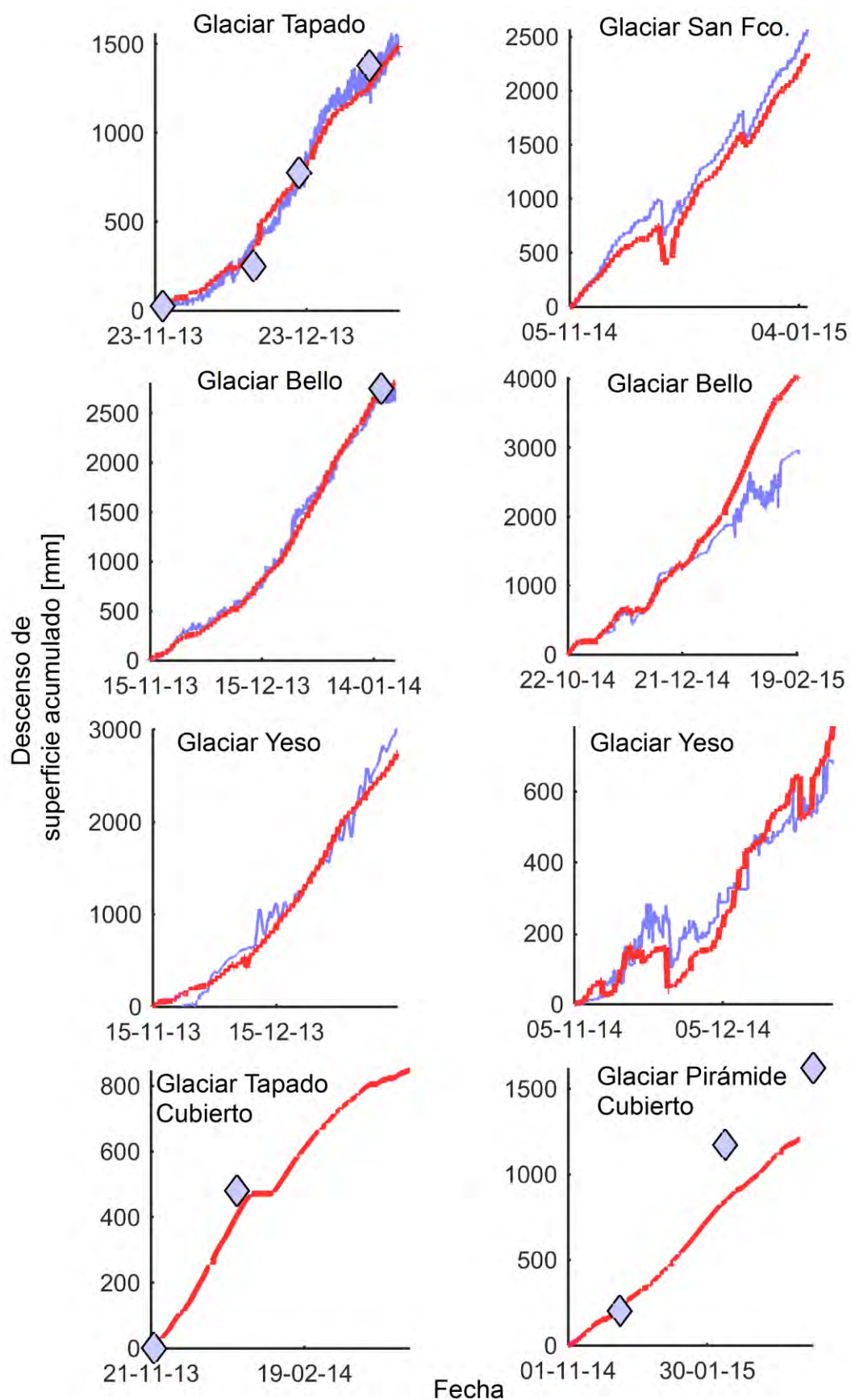


Figura 64. Validación del modelo de balance de energía usando ablación total.

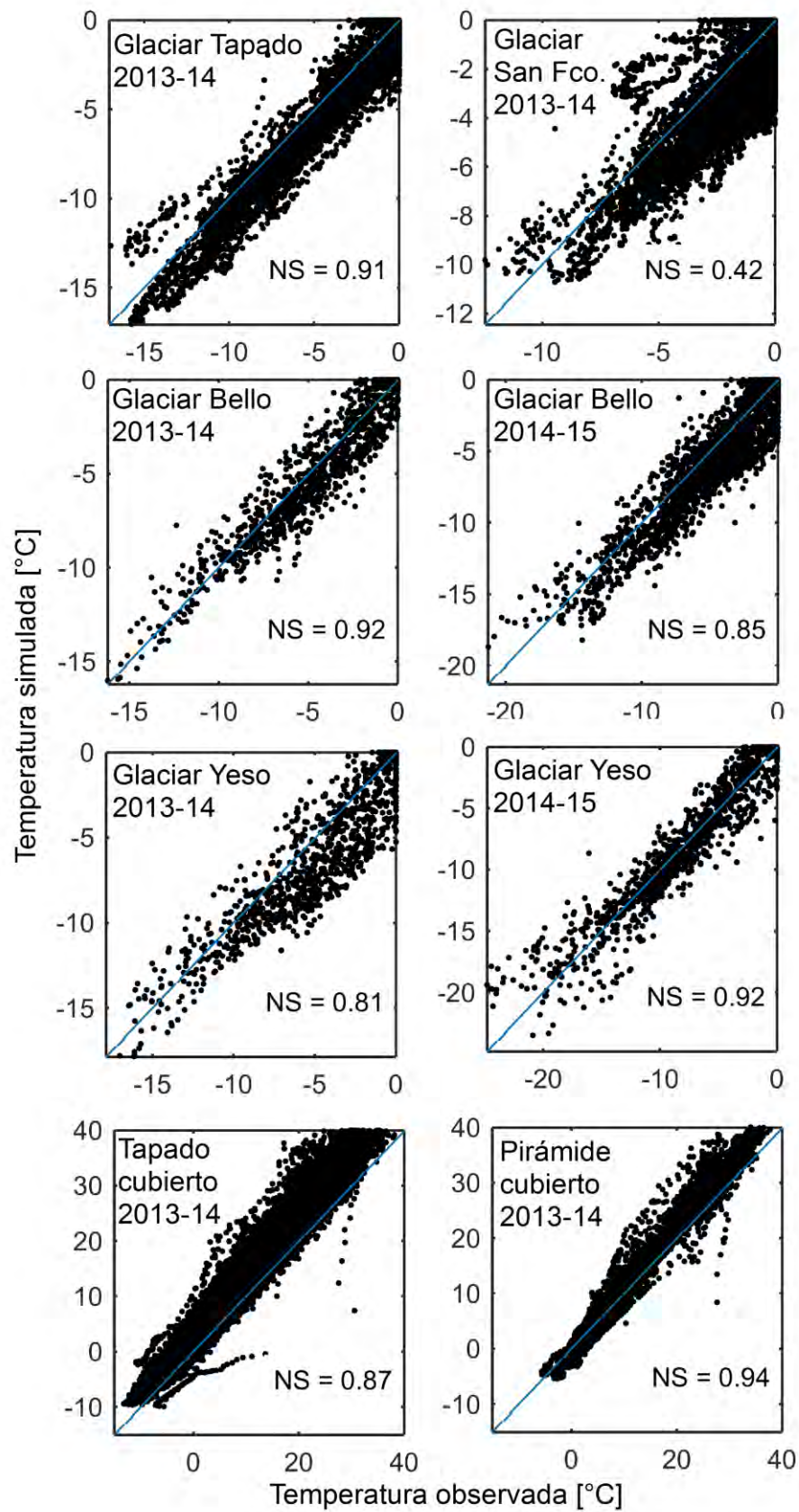


Figura 65: Validación del modelo de balance de energía usando temperatura superficial.

Los resultados de los flujos de energía se presentan como promedios de temporada (Tabla 61 a Tabla 66) y como ciclos medios diarios (Figura 66 a Figura 80). Los resultados del balance de energía en el glaciar Tapado muestran las diferencias entre un glaciar expuesto y otro cubierto por detritos. Ambos sitios se encuentran a una elevación similar (4775 y 4570 m snm), pero su balance de energía es considerablemente diferente. El glaciar Tapado está expuesto a una importante radiación de onda corta incidente. En el sitio alto esta radiación es reflejada en gran parte por la superficie de nieve o hielo. Por el contrario, en el sitio bajo es en gran parte absorbida y conducida por los detritos hacia el hielo. Las diferencias de calor conducido por los detritos entre el glaciar Tapado y Pirámide pueden ser explicados en parte por la diferencia de los espesores de la capa de detritos. En efecto, los datos de terreno muestran que, en los sitios donde las estaciones fueron instaladas, el espesor de detritos del glaciar Tapado (~30 cm) dobla al registrado en el glaciar Pirámide (~15 cm).

En comparación con el glaciar Tapado, en los glaciares de la zona central, se observa una menor magnitud en la radiación de onda corta neta, lo cual puede ser explicado por las diferencias en latitud y en cobertura de nubes. De hecho, la disminución de onda corta neta está asociada a disminuciones del flujo de calor latente (negativo), lo que implica una mayor presencia de humedad en la atmósfera.

Los flujos de calor latente negativos, asociados a pérdida de masa por sublimación, están presentes en todos los sitios en estudio, siendo máximos en el glaciar Tapado durante la temporada 2013-2014. Durante la temporada 2014-2015 la estación en el glaciar Tapado descubierto se inclinó severamente debido al desarrollo de penitentes. Esto influyó negativamente en la medición de la mayoría de las variables meteorológicas y en el cálculo de los flujos de energía y en el balance de masa, por lo que estos valores pueden estar sujetos a grandes errores o incertezas. Los máximos diarios de calor latente negativo se producen aproximadamente después del mediodía en todos los sitios de estudio, con excepción del glaciar San Francisco donde están presentes durante todo el día y noche, pero sus magnitudes son considerablemente menores.

Los resultados muestran que el porcentaje que representa la sublimación de la ablación total varía desde un 1,3% en San Francisco hasta a un 30,1% en Tapado. En general, los sitios más elevados y de menor latitud Sur presentan mayores montos de sublimación.

Tabla 61. Resultados del balance de energía. Temporada 2013-2014 [W/m²].

Glaciar	Ubicación	Q I	L	Q H	Q L	Q M	Q D
Tapado	Alto	230,2	-88,7	39,2	-89,0	-66,1	-
	Cubierto	279,5	-122,0	-136,2	0,0	-20,9	22,9
Pirámide	Detritos	214,9	-86,8	-97,4	0,0	-30,3	36,9
San Francisco		204,7	-52,8	26,7	-14,9	-152,0	-
Bello		206,9	-69,8	27,6	-42,8	-105,1	-
Yeso		227,6	-84,9	23,7	-46,9	-107,1	-

Q I: Radiación de onda corta neta

L: Radiación de onda larga neta

Q H: Flujo de calor sensible

Q L: Flujo de calor latente

Q M: Calor de derretimiento

Q D: Calor conducido por los detritos

Tabla 62: Resultados del balance de energía. Temporada 2014-2015 [W/m²].

Glaciar	Ubicación	Q I	L	Q H	Q L	Q M	Q D
Tapado	Alto	315,4	-95,2	18,5	-20,0	-172,1	-
	Cubierto	323,1	-126,2	-167,4	0,0	-29,3	31,3
Pirámide	Detritos	266,3	-101,4	-133,8	0,0	-30,9	32,9
San Francisco		150,7	-45,8	23,0	-11,6	-75,3	-
Bello		213,4	-71,9	29,1	-44,8	-89,5	-
Yeso		125,9	-63,8	13,8	-37,3	-27,3	-

Tabla 63: Resultados del balance de energía. Temporada 2015-2016 [W/m²].

Glaciar	Ubicación	Q I	L	Q H	Q L	Q M	Q D
Pirámide	Detritos	281,5	-98,7	-146,9	0,0	-34,3	37,9
San Francisco		146,9	-41,6	14,6	-4,5	-76,8	-
Yeso		108,5	-52,7	21,4	-36,3	-27,1	-

Tabla 64: Resultados del balance de masa. Temporada 2013-2014.

Glaciar	Ubicación	Derr. [mm]	Subl. superficial [mm]	Subl. en saltación y suspensión [mm]	Porcentaje de pérdida en la atmósfera (Subl. – Dep.)/Abl. [%]
Tapado	Alto	829,2	140,4	123,7	30,1
	Cubierto	755,8	0,0	0,0	0,0
Pirámide	Detritos	695,9	0,0	0,0	0,0
San Francisco		5662,0	68,7	0,0	1,3
Bello		1787,8	91,7	0,0	5,7
Yeso		1650,3	90,7	30,9	8,2

Tabla 65: Resultados del balance de masa. Temporada 2014-2015.

Glaciar	Ubicación	Derr. [mm]	Subl. superficial [mm]	Subl. en saltación y suspensión [mm]	Porcentaje de pérdida en la atmósfera (Subl. – Dep.)/Abl. [%]
Tapado	Alto	1018,2	15,4	0,0	1,6
	Cubierto	1151,1	0,0	0,0	0,0
Pirámide	Detritos	1205,3	0,0	0,0	0,0
San Francisco		3000,4	57,0	0,1	2,1
Bello		2801,3	174,5	1,2	6,7
Yeso		369,2	61,9	0,8	30,7

Tabla 66: Resultados del balance de masa. Temporada 2015-2016.

Glaciar	Ubicación	Derr. [mm]	Subl. superficial [mm]	Subl. en saltación y suspensión [mm]	Porcentaje de pérdida en la atmósfera (Subl. – Dep.)/Abl. [%]
Pirámide	Detritos	492,1	0,0	0,0	0,0
San Francisco		1363,8	9,9	0,0	0,8
Yeso		701,5	114,2	0,3	19,5

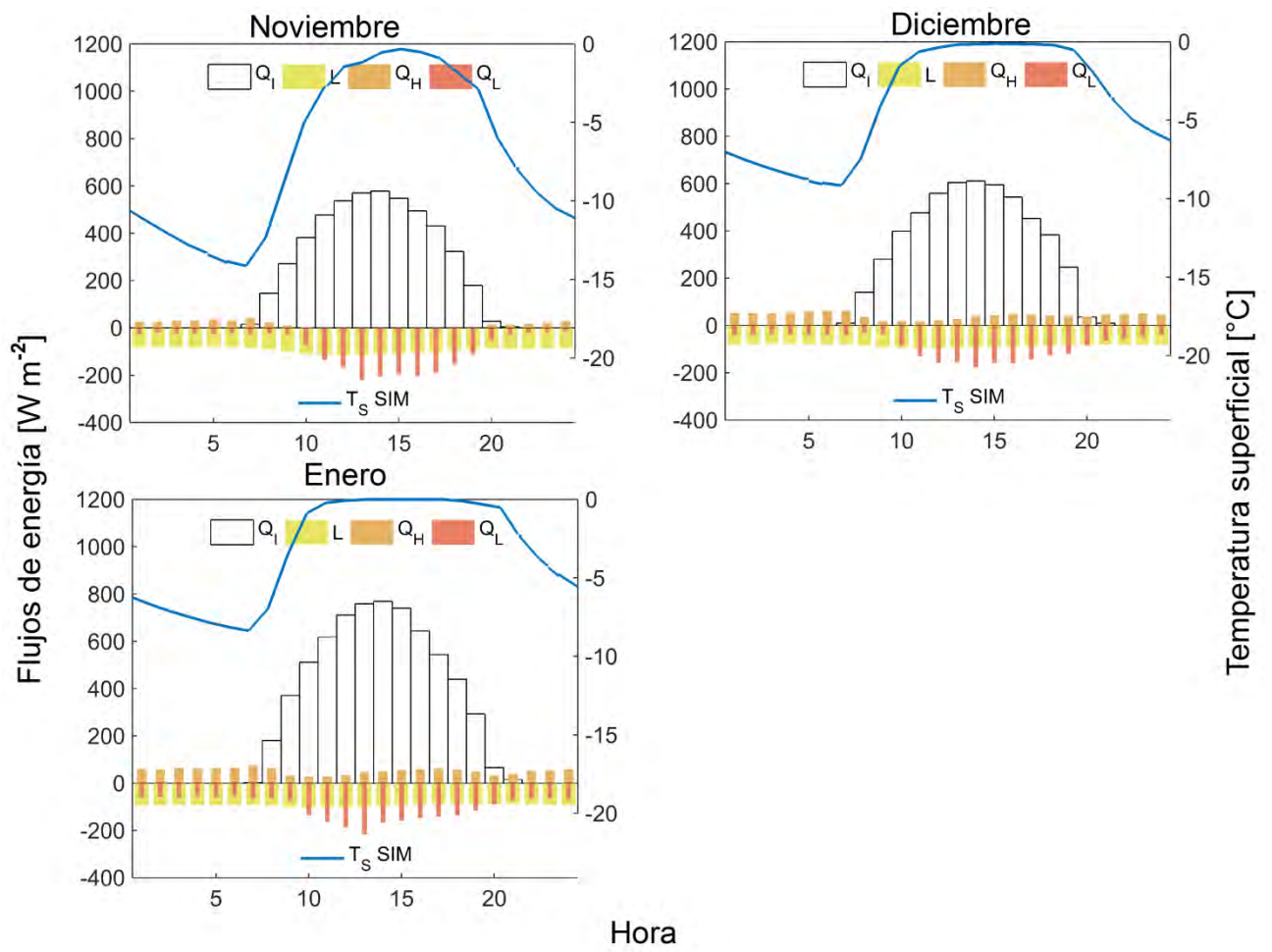


Figura 66. Tapado alto. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2013-2014.

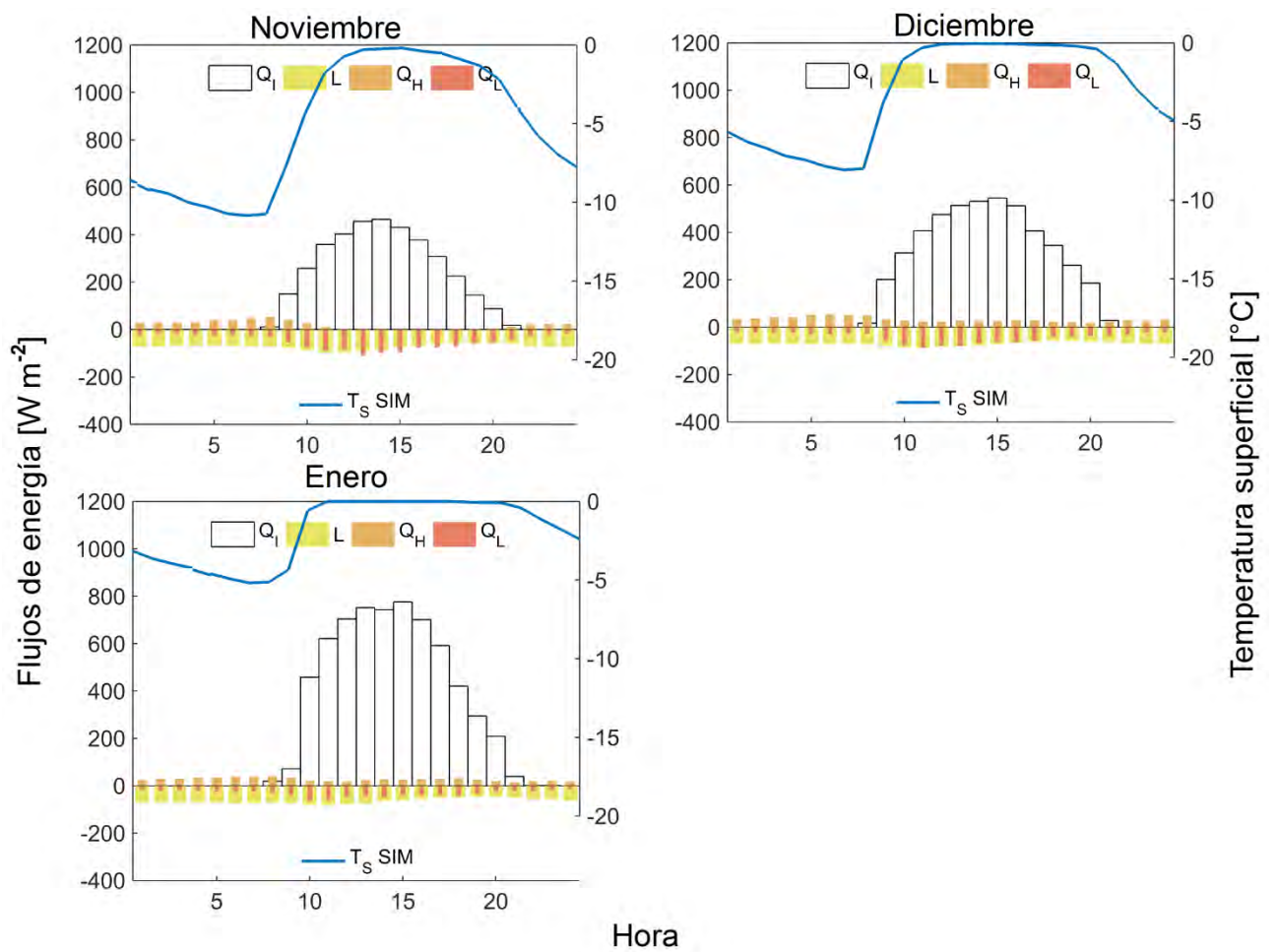


Figura 67: Bello. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2013-2014.

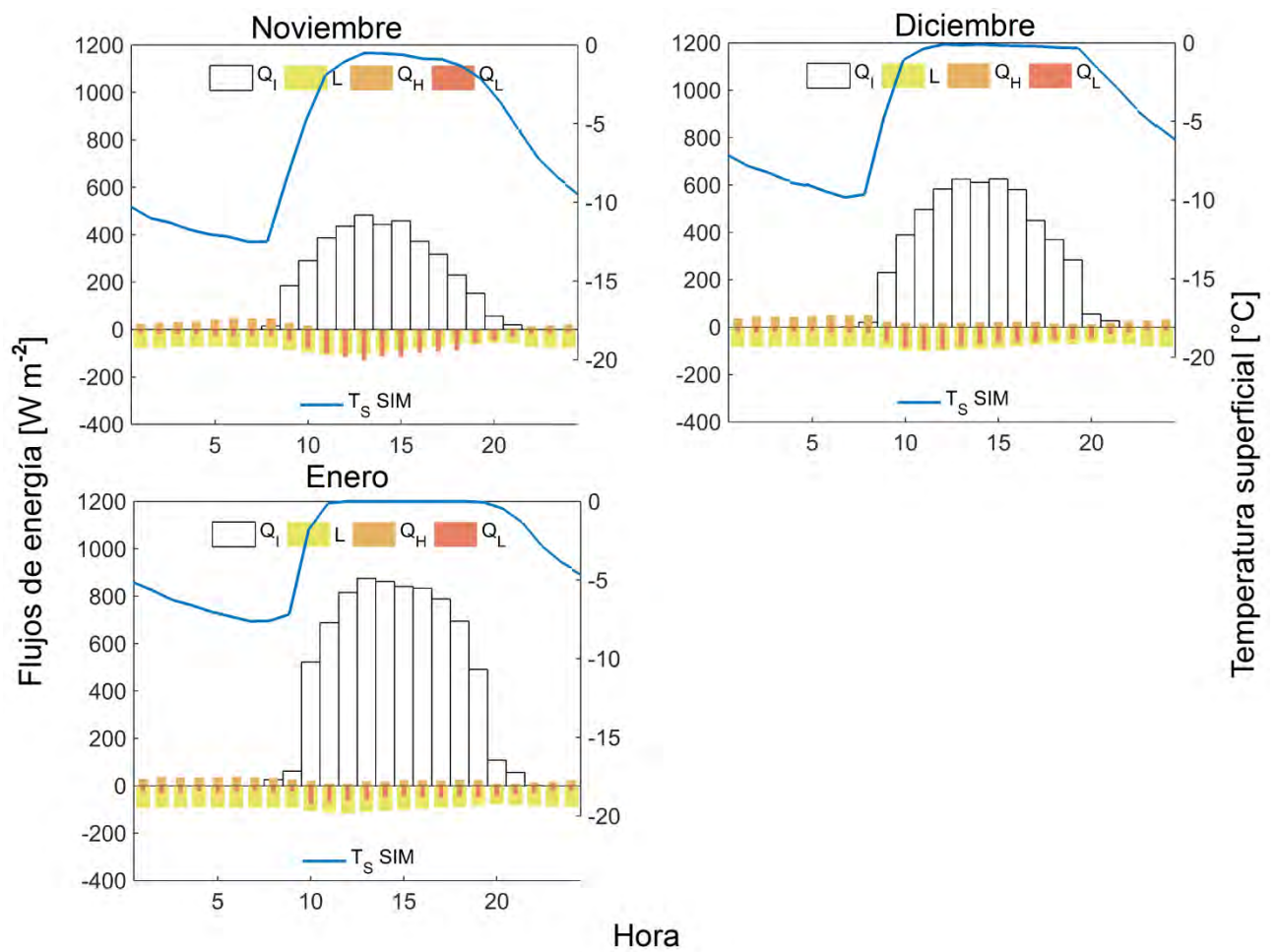


Figura 68: Yeso alto. Flujos medios horarios. Temporada 2013-2014.

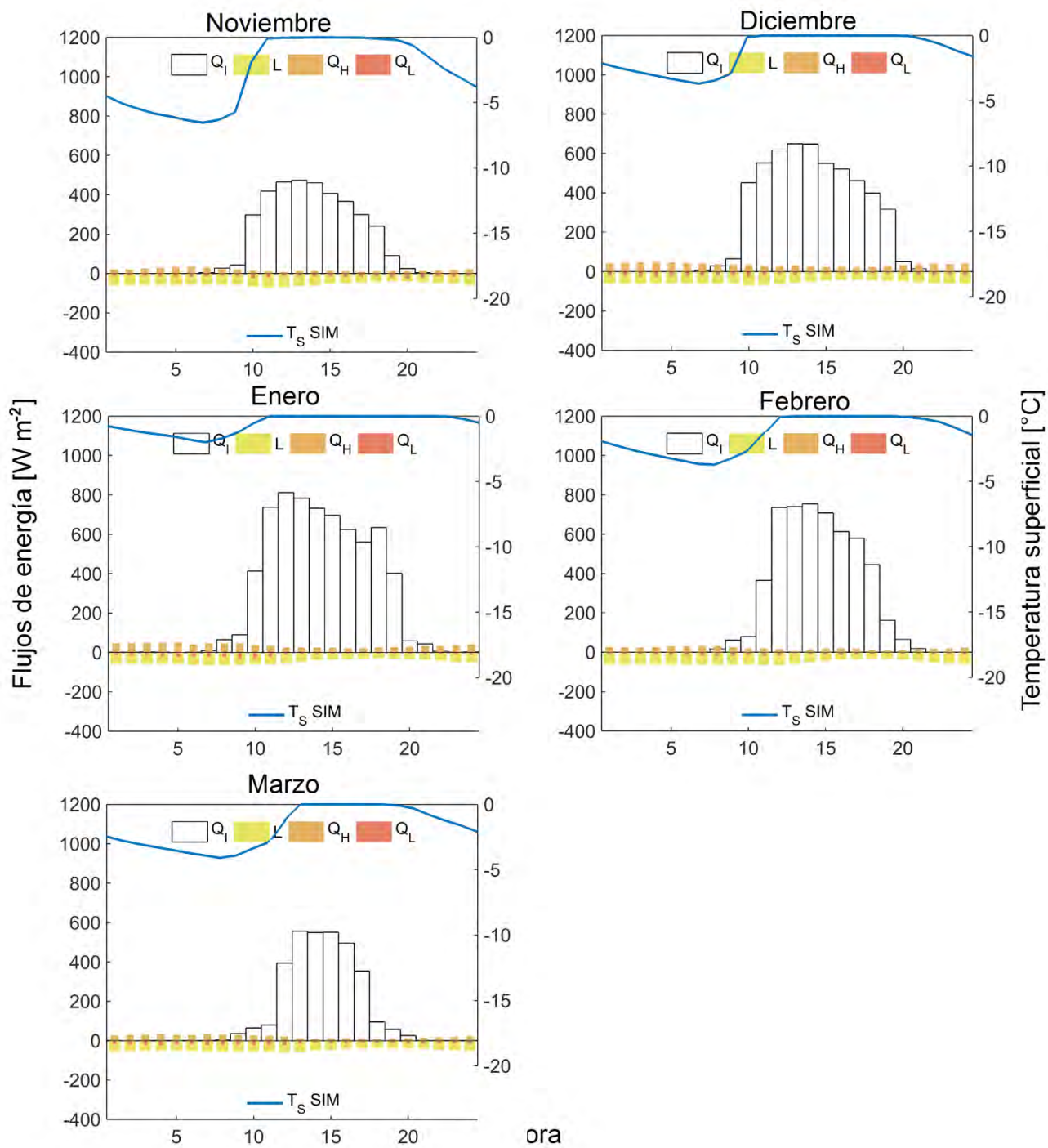


Figura 69: San Francisco. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2013-2014.

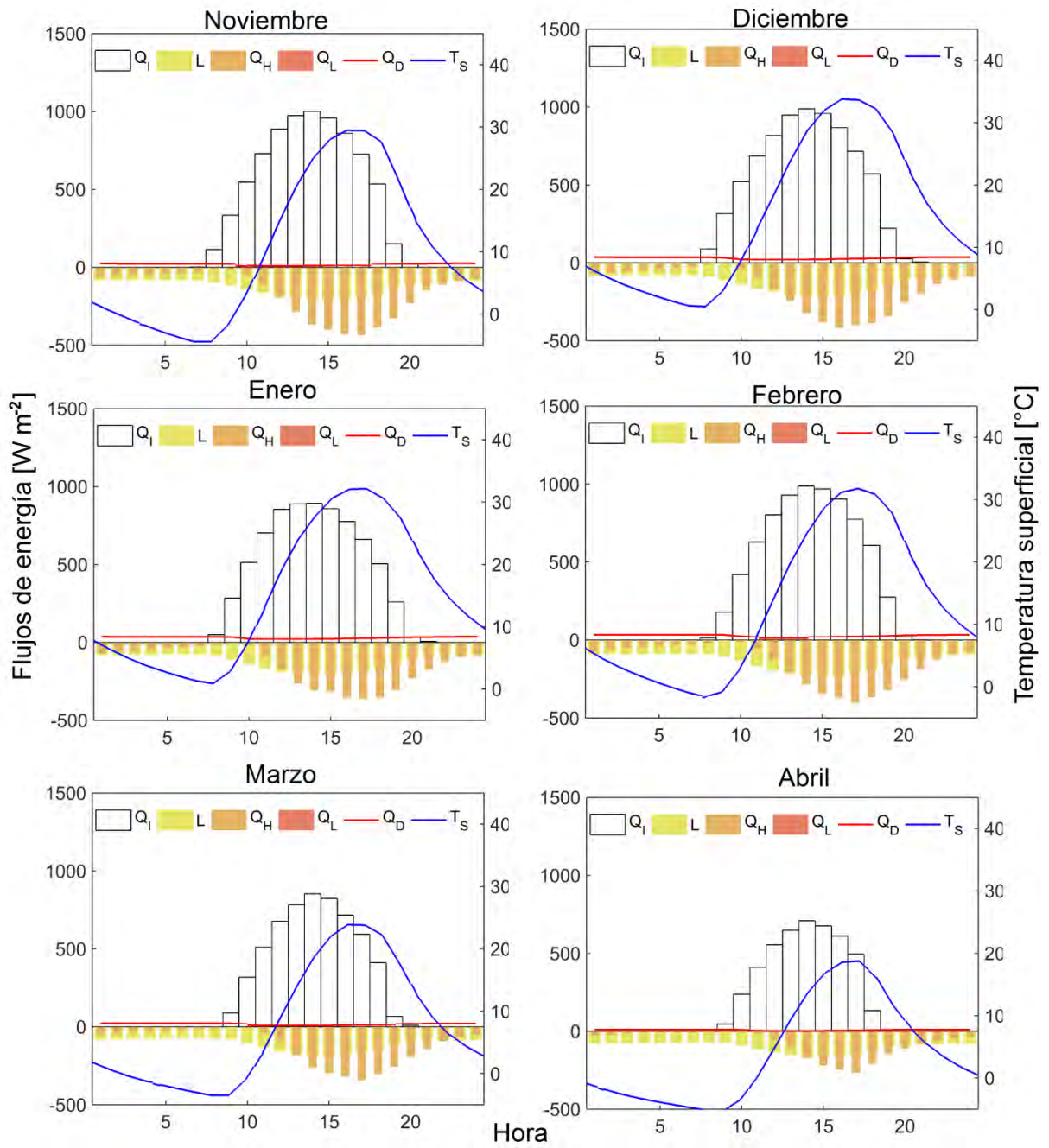


Figura 70: Glaciar Tapado cubierto. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2013-2014.

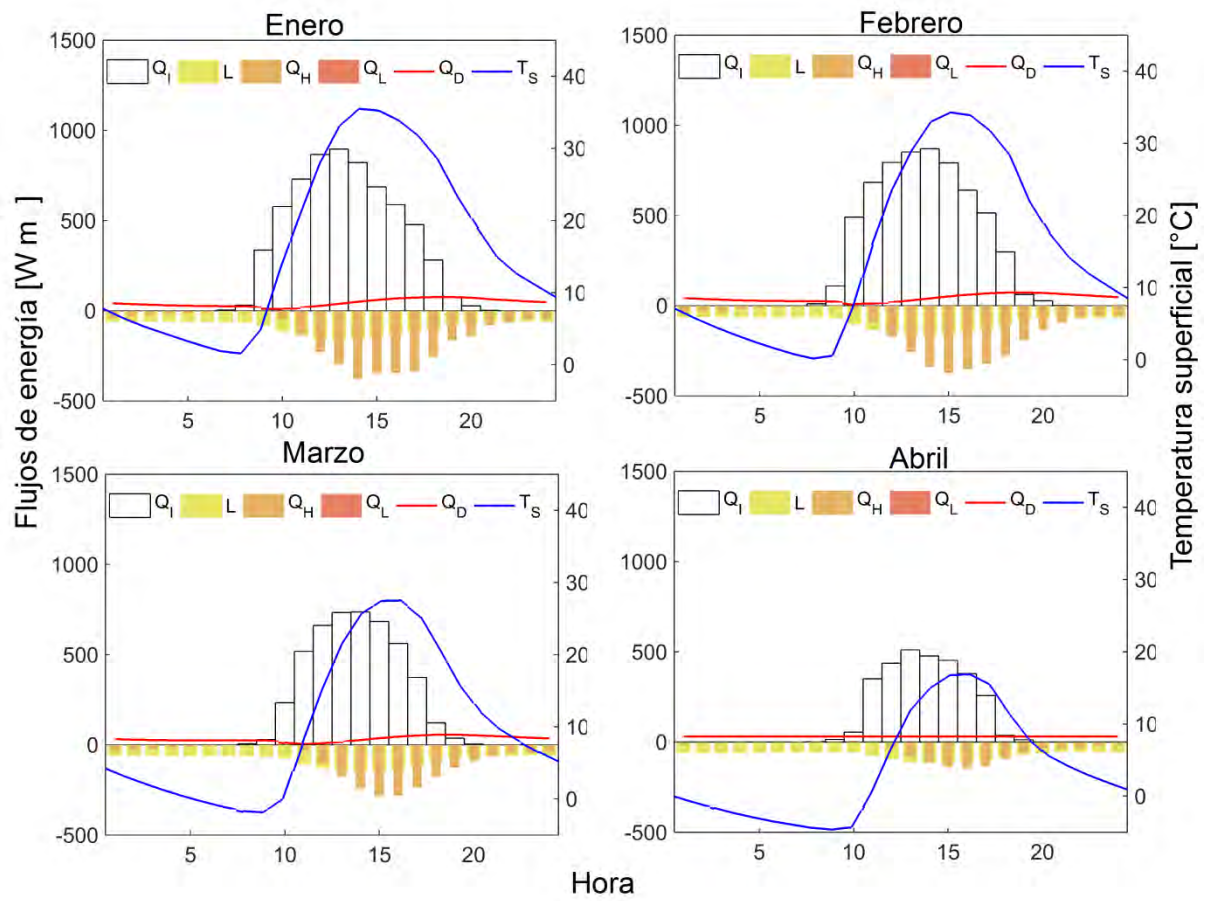


Figura 71: Glaciar Pirámide. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2013-2014.

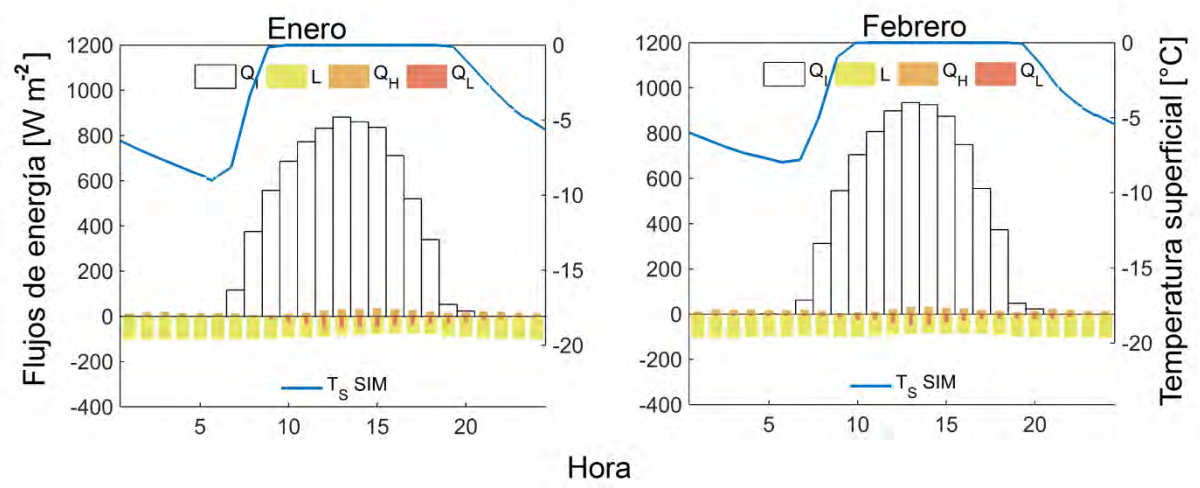


Figura 72: Tapado alto. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2014-2015.

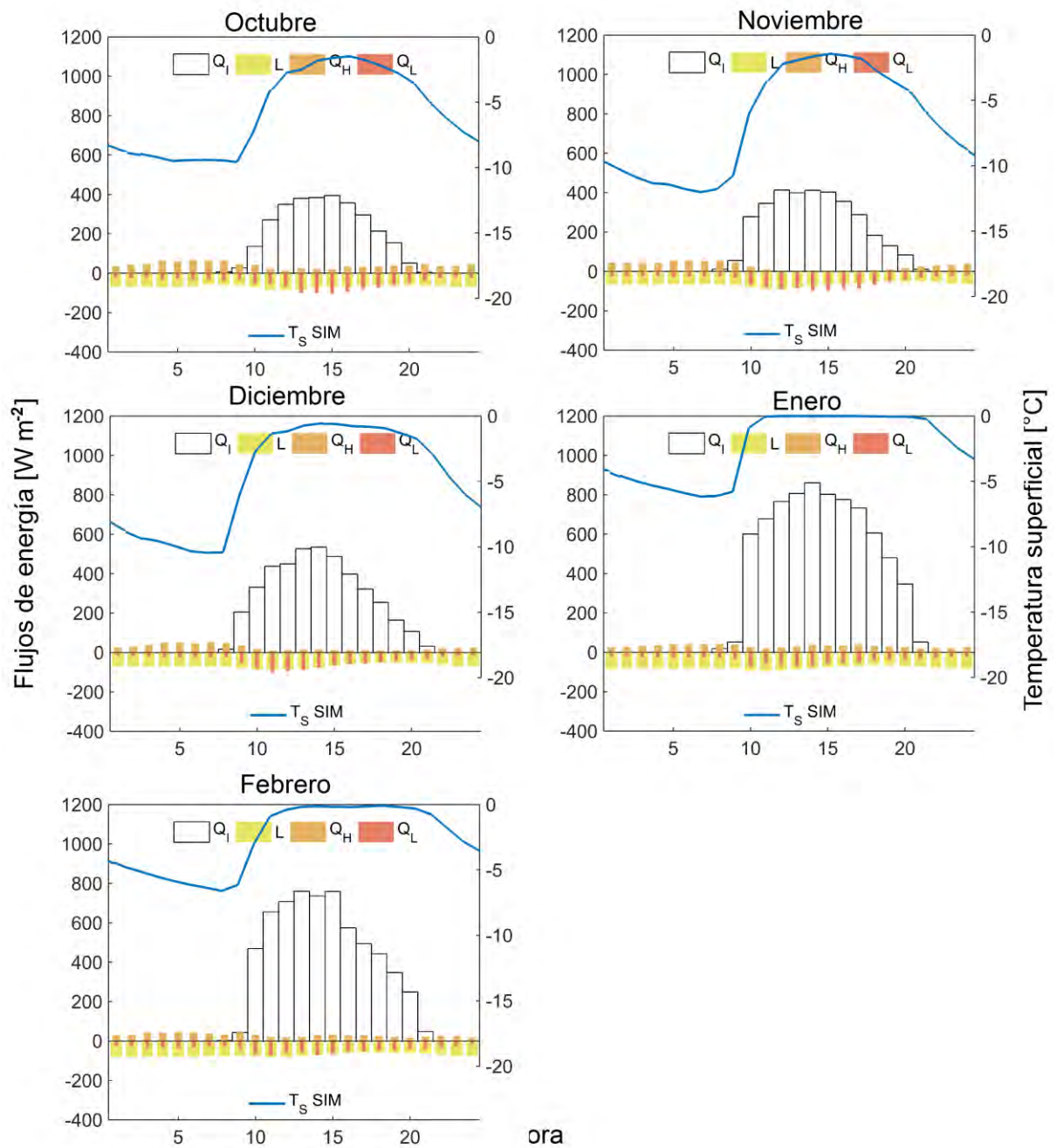


Figura 73: Bello. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2014-2015.

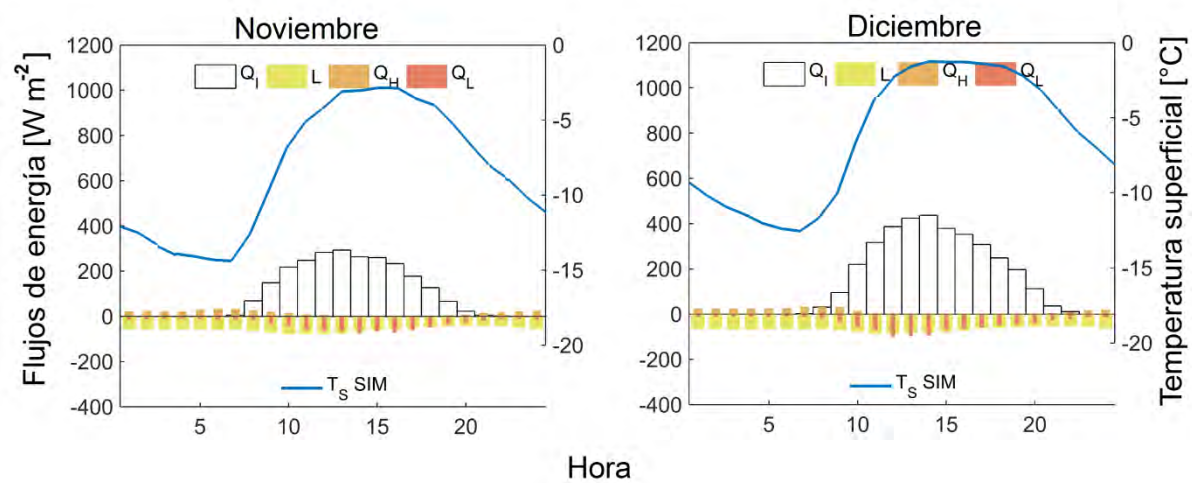


Figura 74: Yeso alto. Flujos medios horarios. Temporada 2014-2015.

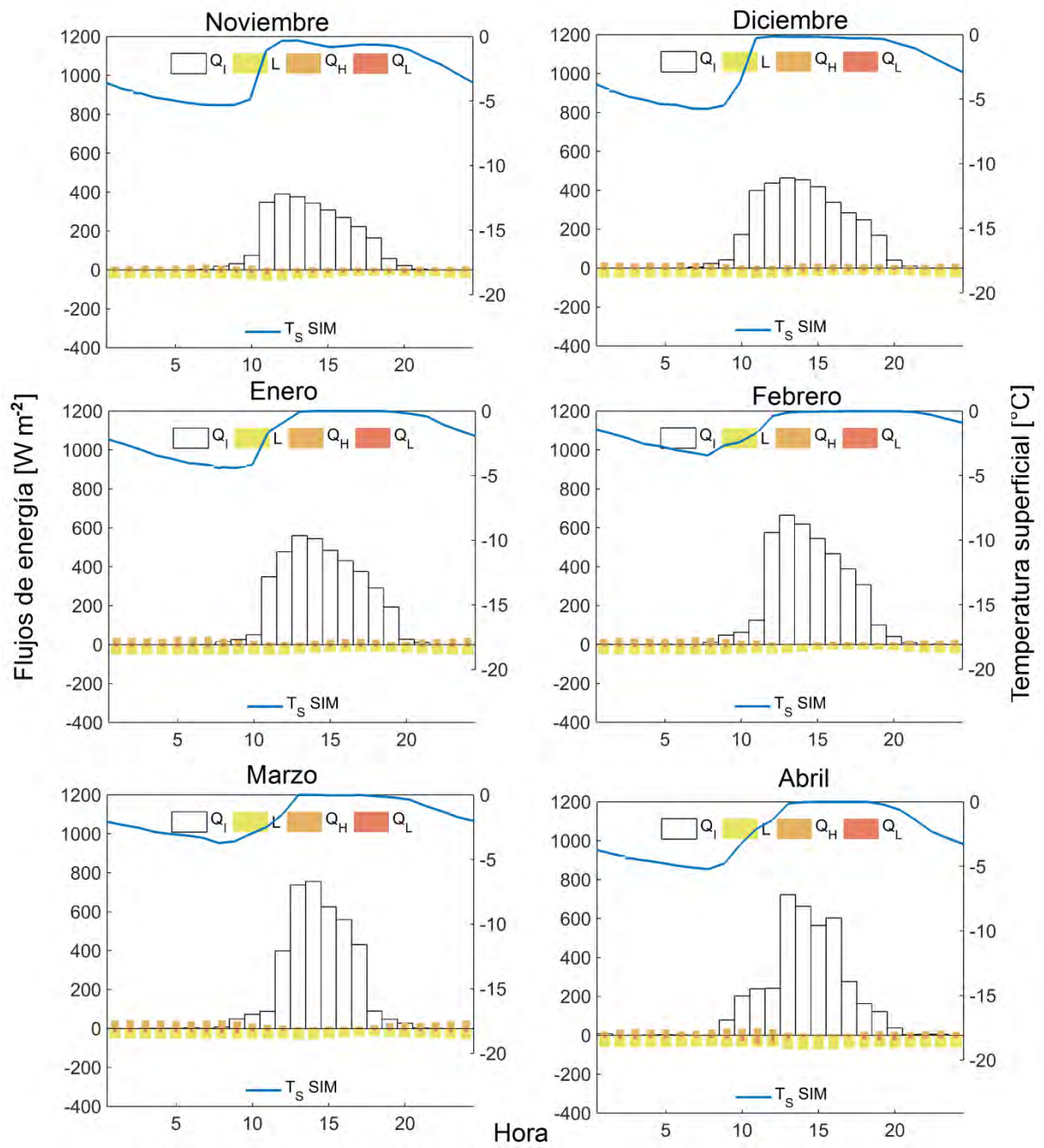


Figura 75: San Francisco. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2014-2015.

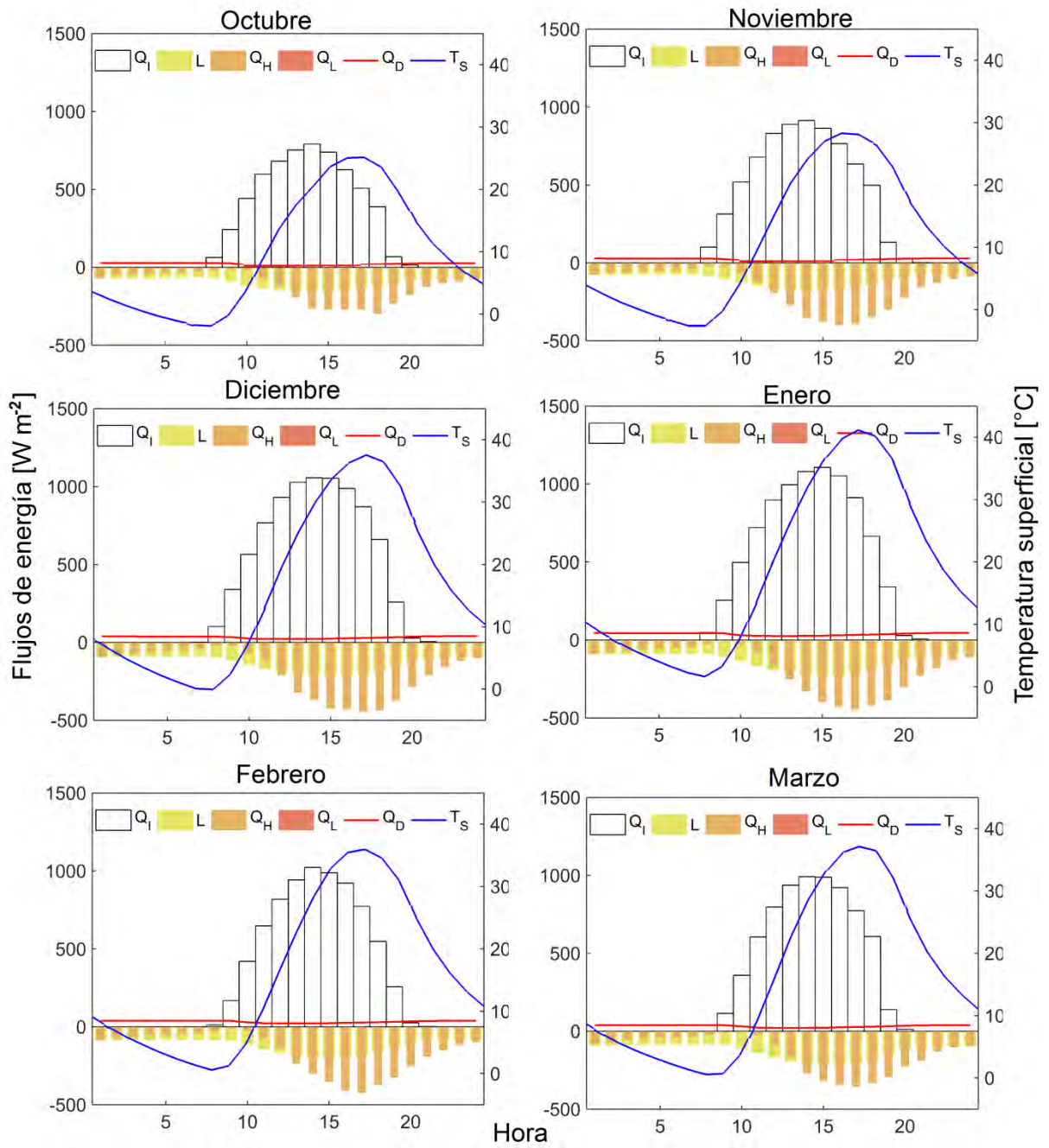


Figura 76: Glaciar Tapado cubierto. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2014-2015.

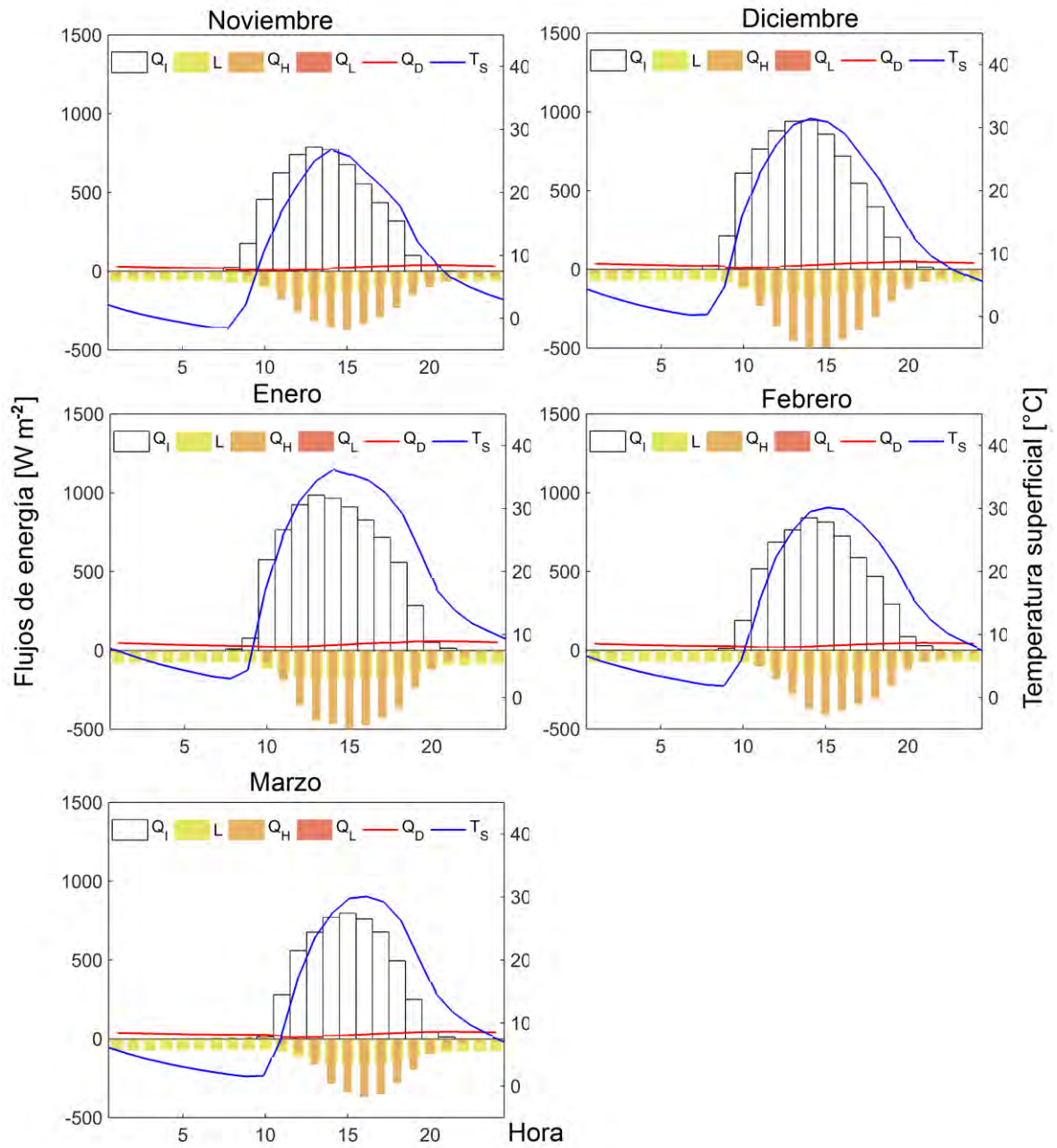


Figura 77: Glaciar Pirámide. Flujos de energía medios horarios. Temporada 2014-2015.

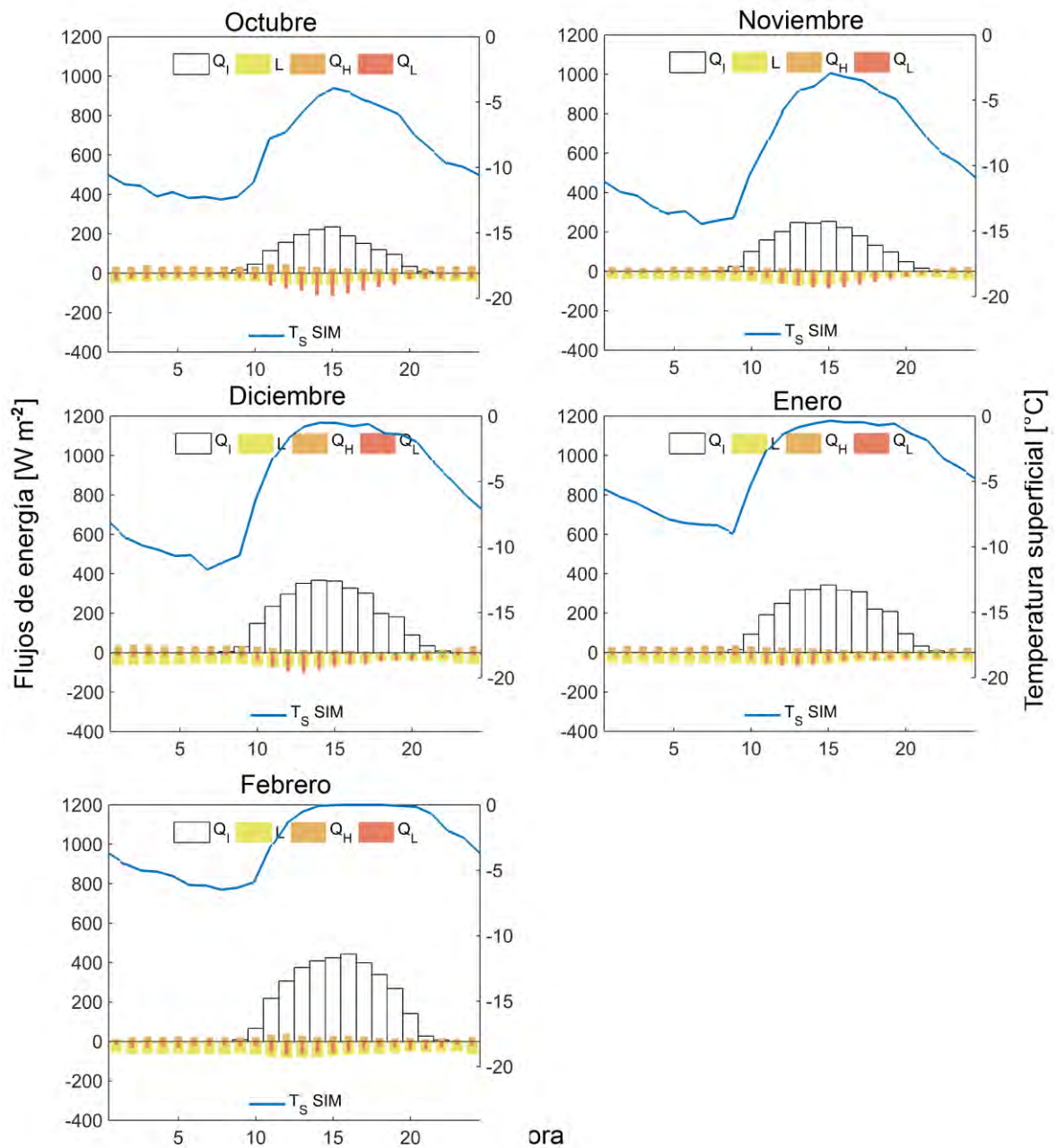


Figura 78: Yeso alto. Flujos medios horarios. Temporada 2014-2015.

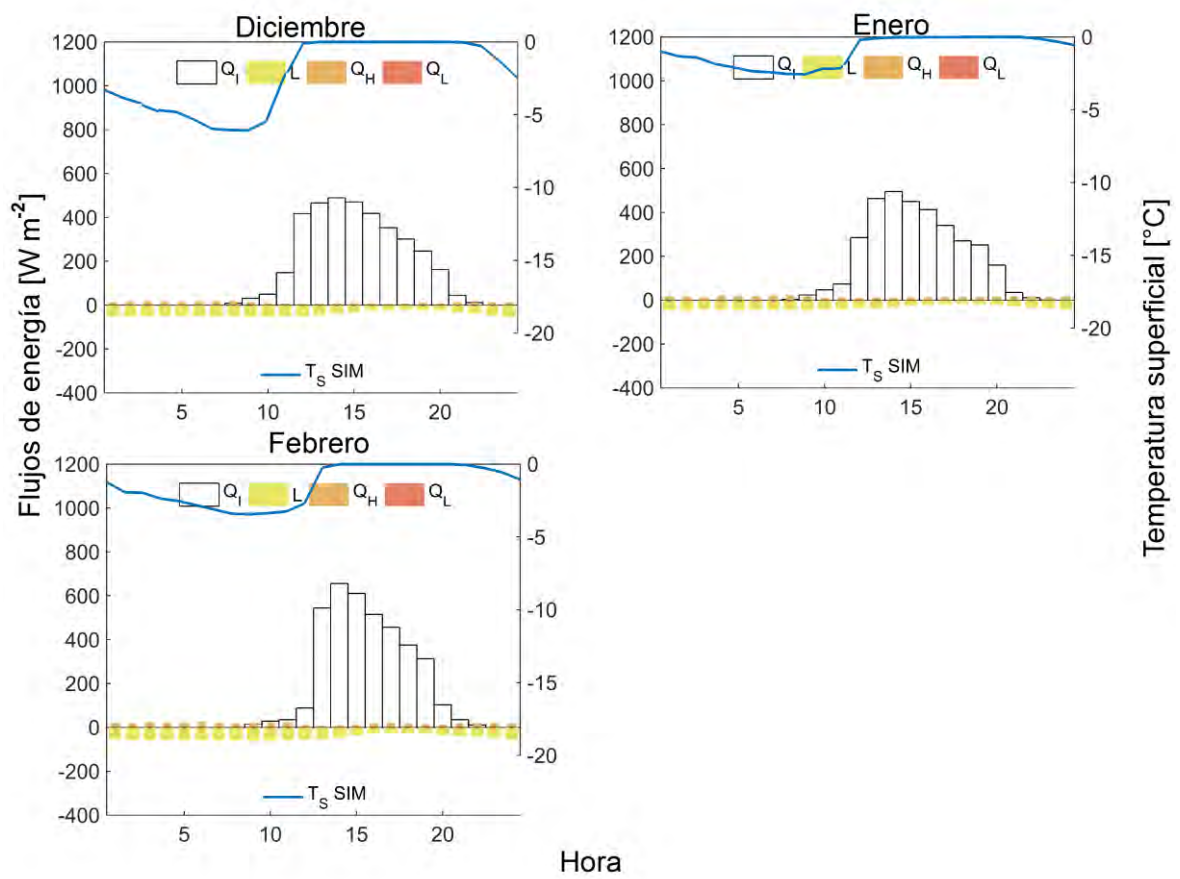


Figura 79: San Francisco. Flujos medios horarios. Temporada 2015-2016.

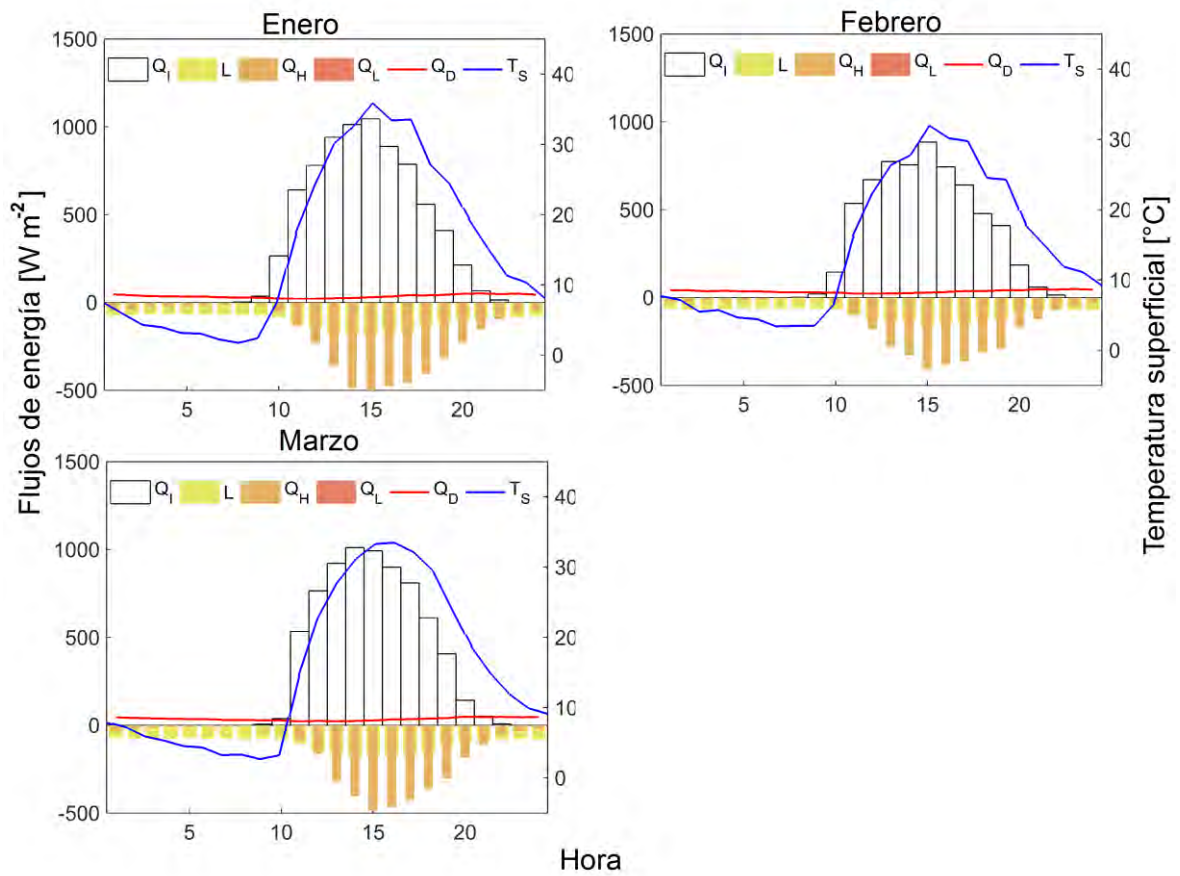


Figura 80: Yeso alto. Flujos medios horarios. Temporada 2014-2015.

6.1.1 Modelación del factor grado día (PDD) y el índice de temperatura mejorada (ETI)

Una vez obtenidos los valores del derretimiento calculados mediante el modelo de balance de energía, se calibraron dos modelos empíricos o “conceptuales” de derretimiento: el índice de temperatura (“*Temperature Index model*”, TI) y el índice de temperatura mejorado (“*Enhanced Temperature Index model*”, ETI). Ambos modelos han sido testeados en numerosas oportunidades en distintos ambientes nivales o glaciares (Hock, 2003; Ohmura, 2001; Pellicciotti et al., 2005), incluyendo los Andes de Chile central (Pellicciotti et al., 2008, 2014; Ragetti y Pellicciotti, 2012).

Estos modelos empíricos de derretimiento están basados en la alta correlación que existe entre algunas de las variables de entrada al modelo de balance de energía y el derretimiento resultante. Mientras el modelo TI está basado sólo en la temperatura (Ecuación 11), el modelo ETI incluye también una componente que depende del balance de radiación de onda corta (Ecuación 12).

$$M = \begin{cases} TF \cdot (T - T_T) & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$M = \begin{cases} SRF \cdot ISR \cdot (1 - \alpha) + TF \cdot (T - T_T) & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Dónde:

M : Derretimiento [mm];

TF : Factor de temperatura [$\text{mm h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$];

T : Temperatura del air [$^\circ\text{C}$];

T_T : Umbral de temperatura de derretimiento [$^\circ\text{C}$];

SRF : Factor de radiación de onda corta incidente [$\text{m}^2 \text{ mm W}^{-1} \text{ h}^{-1}$];

ISR : Radiación de onda corta incidente [W m^{-2}];

α : Albedo.

Los modelos empíricos fueron calibrados para los sitios con superficie nival o glaciar usando como función objetivo el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (Tabla 67 a Tabla 72, Figura 81 a Figura 84). Para evaluar el desempeño de los modelos se usa también el error cuadrático medio (RMSE, del inglés *Root Mean Squared Error*) y el sesgo promedio (MBD, del inglés *Mean Bias Difference*), cuyas expresiones se muestran en las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum (O_i - E_i)^2 \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$NS = 1 - \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{(O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$MBD = \frac{1}{n} \sum (E_i - O_i) \quad \text{Ecuación (15)}$$

Los resultados muestran que, al usar temperaturas medidas sobre la superficie del glaciar, el modelo ETI posee un desempeño considerablemente superior al modelo TI en todos los sitios de estudio. Esto se debe a que, pese a que existe una correlación considerable entre temperatura del aire y derretimiento, la temperatura del aire no logra capturar por sí sola la variabilidad horaria de derretimiento, cosa que sí logra el modelo ETI al incluir la radiación de onda corta neta. Es posible que el modelo TI logre mejorar su simulación del derretimiento a una escala temporal diaria, pues así se desprecian las variaciones horarias debido a cambios en la radiación de onda corta. Otra mejora podría producirse al usar temperaturas del aire medidas fuera del glaciar, pues así se desprecia la baja de temperatura inducida por la superficie del glaciar y sólo se consideran los efectos forzantes de la atmósfera.

Con excepción del glaciar Yeso en la temporada 2014-2015, todos los sitios permitieron calibrar el modelo ETI con un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) superior a 0,78. Los mejores valores de los índices de eficiencia para el ajuste del modelo ETI fueron encontrados en el glaciar San Francisco lo que podría estar relacionado con una menor presencia de sublimación, ya que los flujos de calor latente negativos perjudican el desempeño de los modelos empíricos. Esto se debe a que los flujos de calor latente disminuyen la energía disponible para el derretimiento haciendo decrecer la correlación entre la radiación de onda corta incidente y el derretimiento. Por otro lado, debido a que la temperatura de la superficie desciende varios grados bajo cero durante la noche, el uso de una temperatura umbral para calcular derretimiento no logra capturar el inicio del derretimiento durante la mañana.

Los coeficientes SRF y TF del modelo ETI variaron su magnitud de forma considerable en cada sitio y temporada (Figura 81). En general, los sitios con temperatura más altas presentaron temperaturas umbrales menores y un coeficiente TF/SRF menor. Esto sugiere que la sensibilidad del derretimiento a los cambios de temperatura fue mayor en los sitios más altos.

Es importante notar que los coeficientes del modelo ETI calibrados en este procedimiento a escala puntual están incluidos en la modelación hidrológica distribuida mediante el modelo TOPKAPI, por lo que las diferencias interanuales en los coeficientes son importantes en la simulación de los caudales de la temporada de ablación y el balance de masa glaciar.

Tabla 67: Resultados del modelo ETI. Temporada 2013-2014.

		Glaciar			
		Tapado	Yeso	Bello	San Fco.
Parámetros ETI	SRF	0,0034	0,0052	0,0061	0,0084
	TF	0,1438	0,1666	0,0537	0,0000
	TT	0,5	-2,0	-1,0	-1,0
Índices de eficiencia	NS	0,80	0,91	0,88	0,97
	RMSE	0,56	0,60	0,66	0,43
	MBD	0,05	0,10	0,14	0,08

Tabla 68: Resultados del modelo TI. Temporada 2013-2014.

		Glaciar			
		Tapado	Yeso	Bello	San Fco.
Parámetros TI	TF	0,5236	0,6902	0,5434	0,5222
	TT	-10,0	-10,0	-10,0	5,5
Índices de eficiencia	NS	0,63	0,60	0,52	0,50
	RMSE	0,77	1,25	1,34	1,85
	MBD	0,00	-0,20	0,02	-0,19

Tabla 69: Resultados del modelo ETI. Temporada 2014-2015.

		Glaciar			
		Tapado	Yeso	Bello	San Fco.
Parámetros ETI	SRF	0,0064	0,0032	0,0058	0,0059
	TF	0,0000	0,1597	0,0149	0,0000
	TT	2	-3,5	0,5	2
Índices de eficiencia	NS	0,95	0,78	0,90	0,96
	RMSE	0,59	0,37	0,57	0,30
	MBD	0,04	0,05	0,04	0,06

Tabla 70: Resultados del modelo TI. Temporada 2014-2015.

		Glaciar			
		Tapado	Yeso	Bello	San Fco.
Parámetros TI	TF	0.8171	0,4042	0,5446	0,2417
	TT	3.5	-10	-10	7,5
Índices de eficiencia	NS	0.79	0,39	0,51	0,32
	RMSE	1.13	0,61	1,29	1,23
	MBD	-0.08	-0,12	0,06	-0,22

Tabla 71. Resultados del modelo ETI. Temporada 2015-2016.

		Yeso	San Fco.
Parámetros ETI	SRF	0,0035	0,0060
	TF	0,0911	0,0000
	TT	0,5	0,0
Índices de eficiencia	NS	0,82	0,96
	RMSE	0,32	0,29
	MBD	0,03	0,05

Tabla 72. Resultados del modelo TI. Temporada 2015-2016.

		Yeso	San Fco.
Parámetros TI	TF	0,3027	0,1762
	TT	-10,0	6,0
Índices de eficiencia	NS	0,71	0,33
	RMSE	0,41	1,17
	MBD	0,01	-0,06

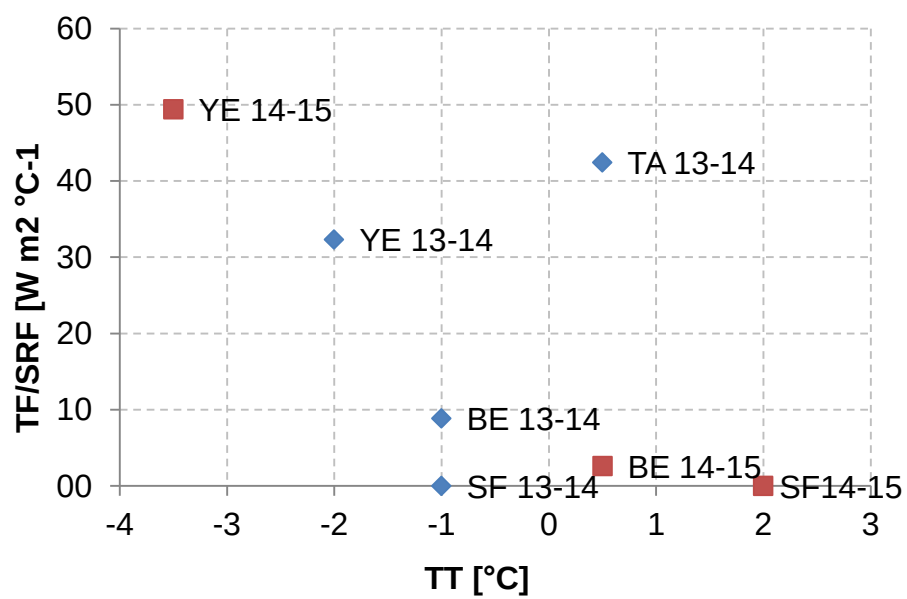


Figura 81: Relación entre los parámetros calibrados del modelo ETI.

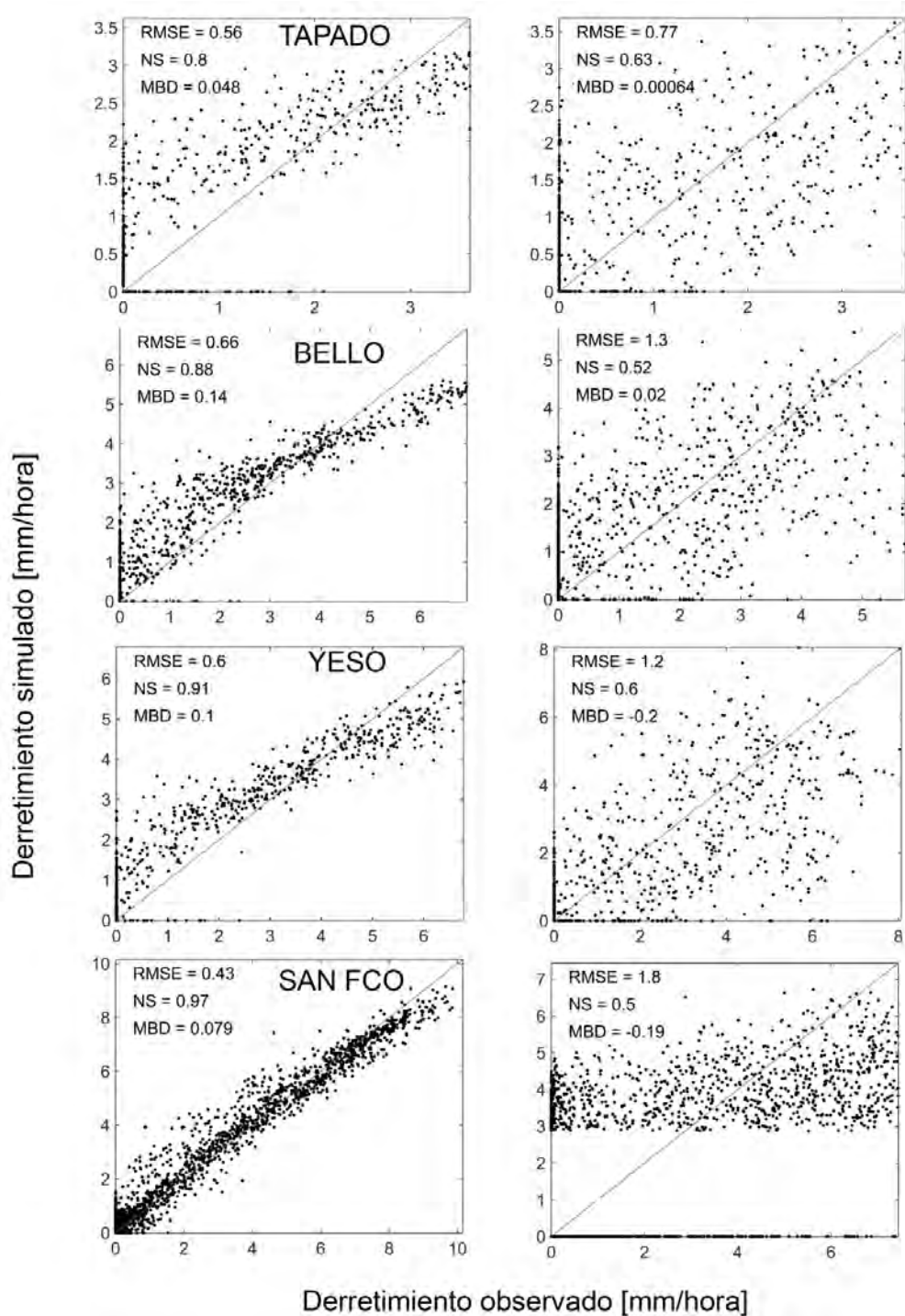


Figura 82: Correlación de los resultados del modelo ETI y TI (simulado) con el derretimiento calculado por el modelo de balance de energía (observado). Temporada 2013-2014.

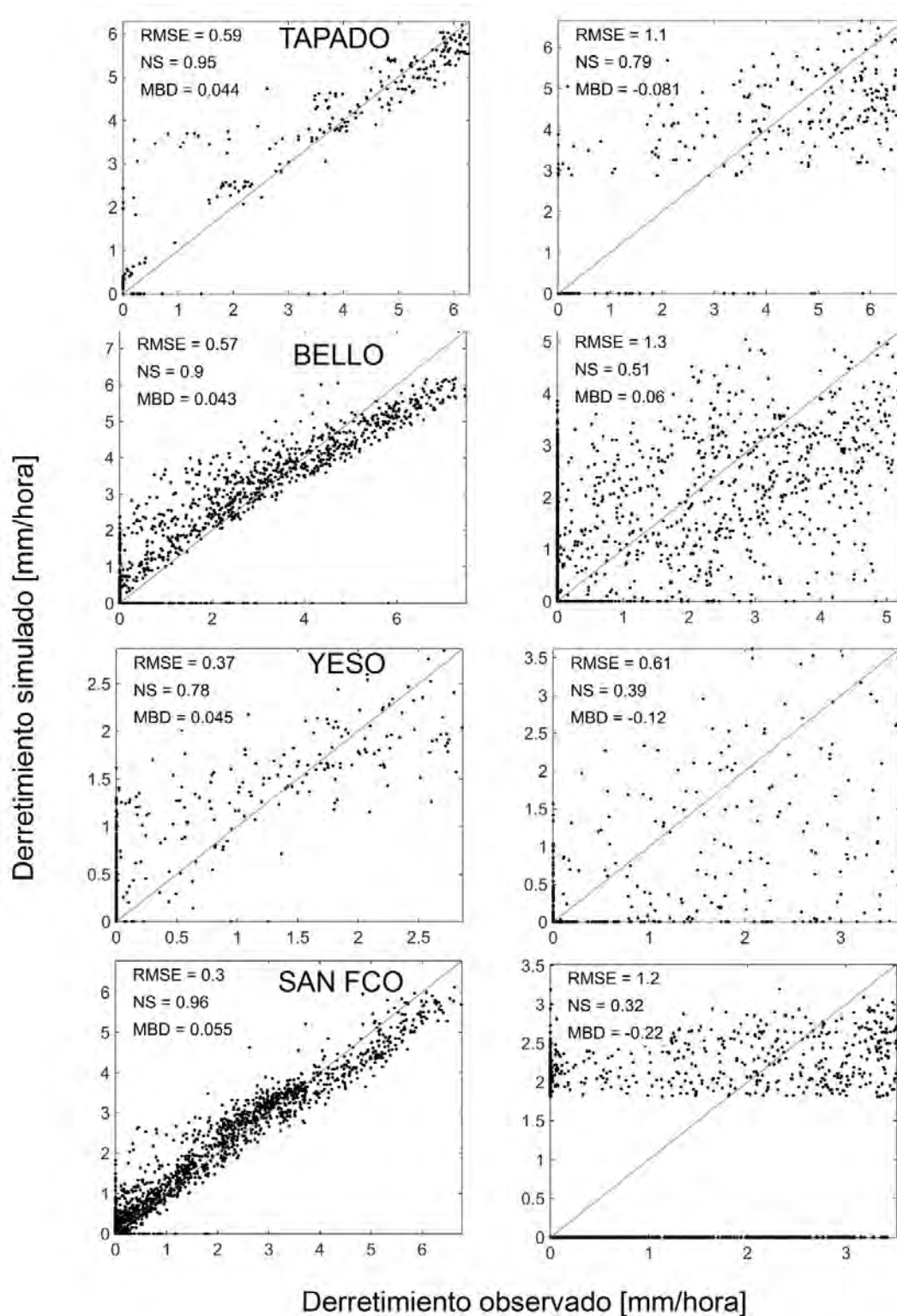


Figura 83: Correlación de los resultados del modelo ETI y TI (simulado) con el derretimiento calculado por el modelo de balance de energía (observado). Temporada 2014-2015.

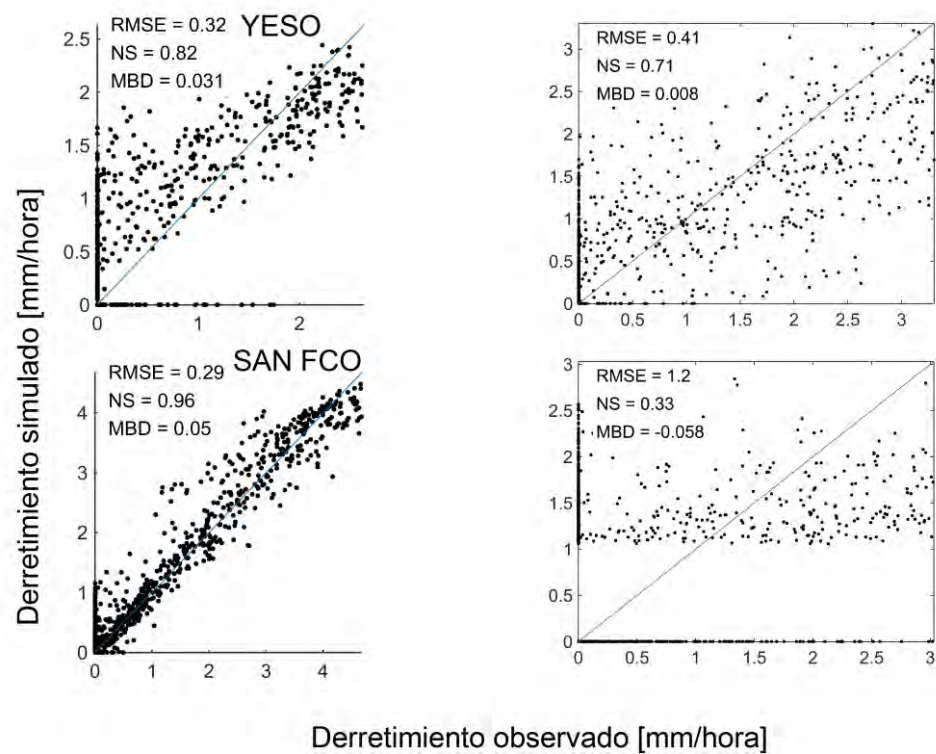


Figura 84.Correlación de los resultados del modelo ETI y TI (simulado) con el derretimiento calculado por el modelo de balance de energía (observado). Temporada 2015-2016.

7. MEDICIONES DE CAUDALES

7.1 ANÁLISIS DEL CAUDAL EN LA CERCANÍA GLACIAR TAPADO Y DE LOS GLACIARES ROCOSOS.

Las variaciones de caudales en la cuenca Tapado fueron registradas por medio de tres estaciones fluviométricas, ubicadas a la salida del glaciar rocoso de Tapado (RGO), en el frente del glaciar rocoso Las Tolas (RGO') y en un punto aguas abajo de ambas estaciones (DS). La ubicación de las estaciones fluviométricas puede ser observada en la Figura 85 y en la Tabla 73. Los caudales fueron registrados durante las estaciones de primavera verano de los años 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, presentando un periodo sin datos entre diciembre y enero del periodo 2014-2015.

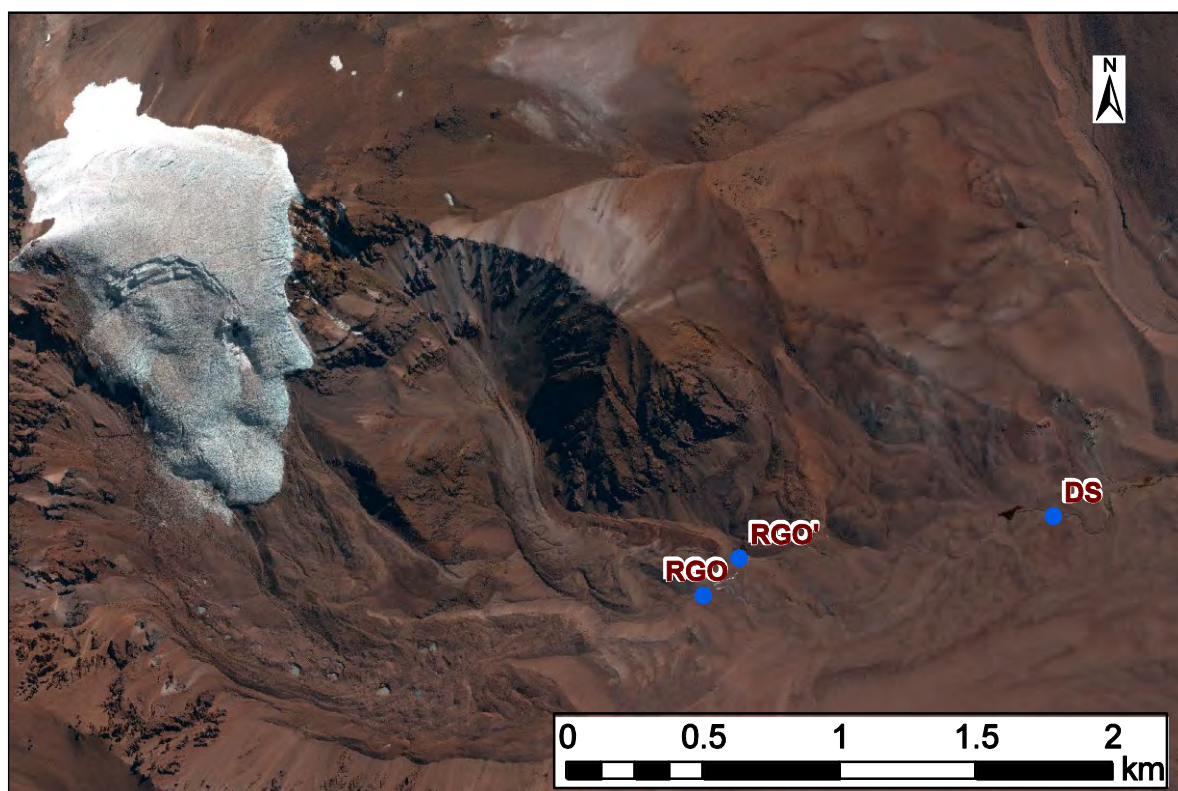


Figura 85. Ubicación de estaciones fluviométricas en las cercanías del glaciar Tapado. Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

Tabla 73. Ubicación de estaciones fluviométricas en Zona Norte.

Estación fluviométrica	Descripción	Coordenadas (UTM)		Altitud (m snm)
		Este (m)	Norte (m)	
DS	Double Source	413896	6663942	4151
RGO	Salida Tapado cubierto	412613	6663653	4264
RGO'	Salida Las Tolas	412746	6663788	4246

Los aforos de caudal realizados para los periodos 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 en las estaciones fluviométricas se presenta en la Tabla 74.

Tabla 74. Aforos en estaciones fluviométricas en Zona Norte.

Estación fluviométrica	Fecha	Hora	Conductividad [μS/cm]	Altura de agua promedio [cm]	Caudal [l/s]
DS	20-01-16	15:15	152,4	12,1	352
	20-01-16	11:10	152,1	12,4	340
	19-01-16	18:50	152,9	11	325
	15-05-15	16:00	*	8,7	*
	15-05-15	15:45	*	8,8	*
	15-05-15	11:15	201,4	8	31
	14-05-15	20:15	202	9,1	34
	03-02-15	11:53	199,5	13,5	243
	03-02-15	16:55	198,9	15,3	236
	12-12-14	14:15	175	17	61
	21-10-14	16:50	163,3	10	14
	22-04-14	18:00	188	10	28
	22-04-14	18:20	190	10	29
	18-03-14	16:45	192,6	10	67
	09-01-14	15:45	161,5	27	482
	09-01-14	15:55	161,5	27	552
	09-01-14	15:30	161,5	27	558
	25-11-13	11:50	173,6	21	82
	25-11-13	18:00	173,2	20	98
RGO	20-01-16	16:40	126,8	9,7	84
	19-01-16	19:40	128,5	8,1	69
	19-01-16	17:40	128,8	8,6	75
	15-05-15	15:20	186,6	5	12
	15-05-15	12:00	185,8	5,2	13
	14-05-15	19:30	185	5,1	13
	03-02-15	10:27	170,9	7,6	90
	03-02-15	12:35	168,7	8,7	94
	11-12-14	18:40	172	8	73
	11-12-14	19:40	172	7,8	68
	12-12-14	14:50	171	7,7	66
	21-10-14	17:25	185,5	3	4
	21-04-14	19:40	181,9	4	9
	21-04-14	20:00	181,9	4	9
	18-03-14	14:00	181,9	5	14
	18-03-14	14:33	182	5	16
	09-01-14	11:00	145,5	15	146
	24-11-13	12:50	180	10	30
	25-11-13	8:45	184	10	35

Tabla 74 (continuación). Aforos en estaciones fluviométricas en Zona Norte.

Estación fluviométrica	Fecha	Hora	Conductividad [μS/cm]	Altura de agua promedio [cm]	Caudal [l/s]
RGO'	20-01-16	16:00	140,6	3,4	11
	19-01-16	18:10	137,3	3,2	8
	19-01-16	20:00	138,4	3,1	7
	03-02-15	11:00	346,5	2,7	8
	03-02-15	17:55	352	3	8
	09-01-14	13:30	241,7	5,5	9
	25-11-13	9:45	181	5	4
	24-11-13	14:10	185,7	5	6

* Sin información.

Las mediciones de caudales presentadas en la Tabla 74 permitieron determinar las curvas de descargas (CD) para cada estación fluviométrica. Se contempló sólo una CD para cada estación en los periodos 2013-2014 y 2014-2015, debido a que las secciones de medición no mostraron cambios geométricos relevantes producto del transporte de sedimentos, nieve o escorrentía en cada periodo. Sin embargo, se debe tener presente que en ríos de montaña los factores antes mencionados hacen necesario establecer más de una CD ya que la sección del río muestra una alta dinámica, comportamiento no observado durante los trabajos de medición en las temporadas antes mencionadas. Las curvas de descarga (CD) utilizadas para calibrar los caudales registrados por las estaciones fluviométricas son presentadas en la Figura 86.

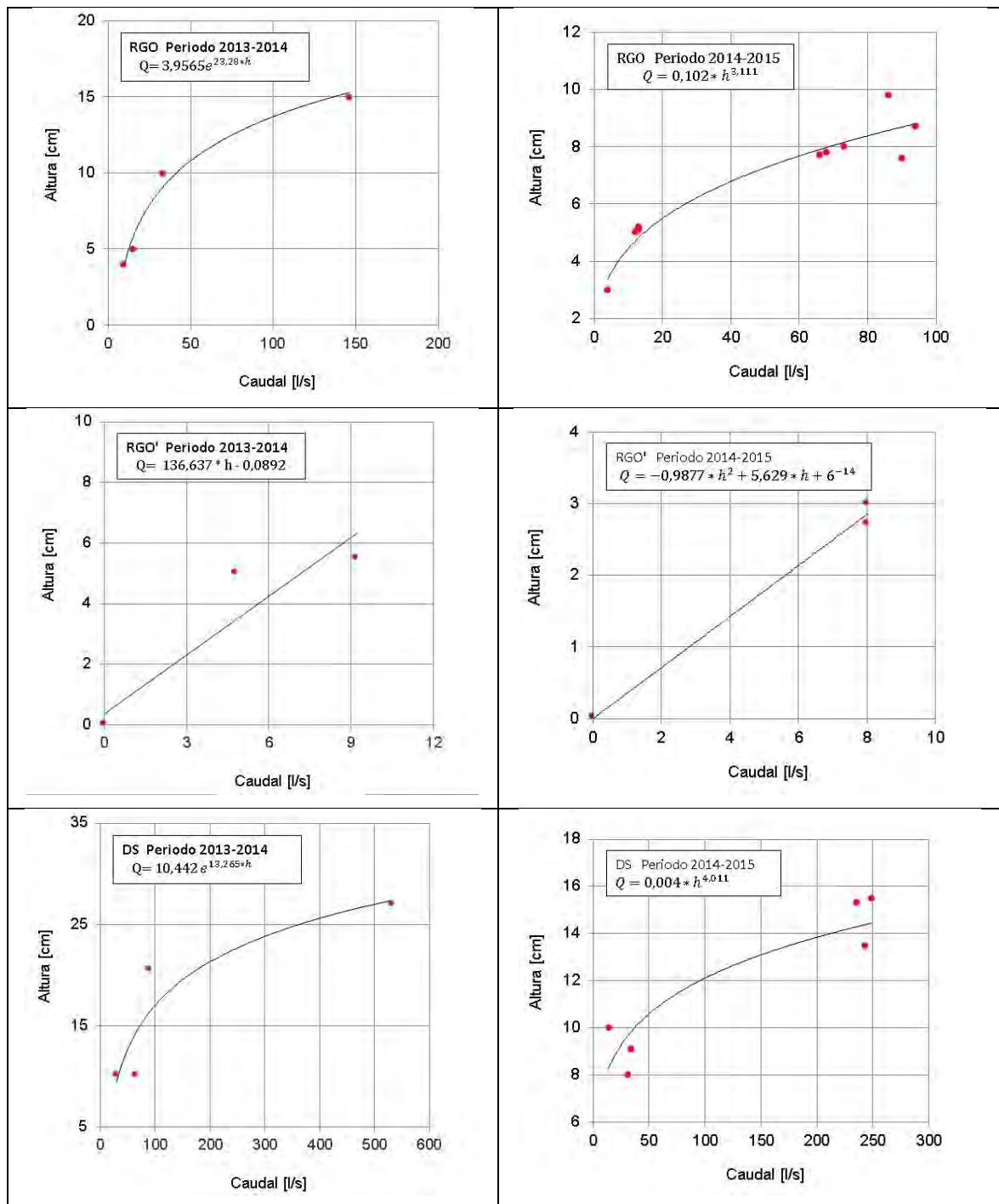


Figura 86. Curvas de descarga determinadas para las estaciones fluviométricas DS, RGO y RGO' en cuenta Tapado para los periodos 2013-2014 y 2014-2015.

Los registros de las estaciones fluviométricas y las curvas de descarga permitieron estimar los caudales en la cuenca Tapado, presentados en la Figura 87.

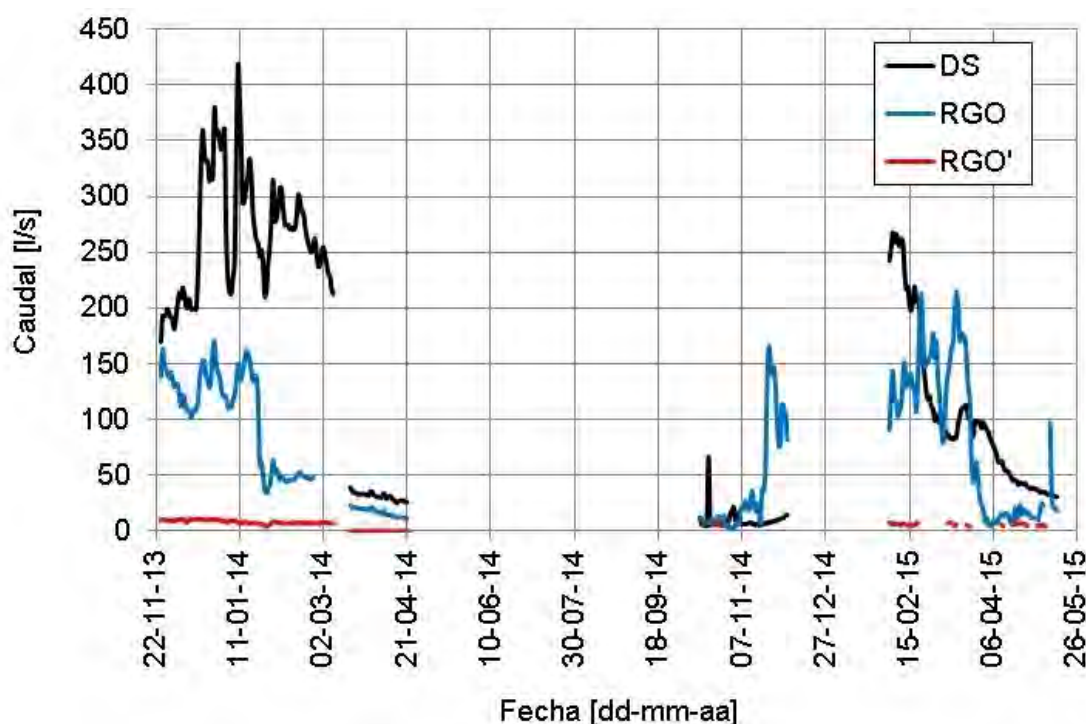


Figura 87. Mediciones registradas en las estaciones fluviométricas en cuenca Tapado. Se muestran los flujos de caudal promedio diario estimados a partir de las estaciones fluviométricas DS, RGO y RGO' para el periodo 2013-2015.

Las estaciones fluviométricas han registrado caudales desde octubre del 2013 en la cuenca Tapado, sin embargo para el periodo 2014-2015 los mayores registros de caudales fueron identificados durante los meses de febrero (DS) y marzo (RGO), como se muestra en la Figura 87. Las tres estaciones fluviométricas no registraron datos entre mediados de diciembre 2014 y enero 2015 debido al estropeo del lector utilizado para configurar los transductores de presión HOB0, impidiendo la reconfiguración y descarga de datos hasta fines de enero, periodo en que la memoria del transductor estaba completa, registrando sólo hasta mediados de diciembre. La estación fluviométrica RGO mostró un caudal promedio durante el periodo de medición de 81 l/s, presentando los mayores volúmenes promedio en los meses de febrero (132 l/s) y marzo (127 l/s), y los menores caudales promedio en los meses de noviembre (59 l/s) y abril (12 l/s). El comportamiento diario (promedio horario) de los caudales muestra que los mayores volúmenes ocurrieron a las 6 am con mínimas entre las 8 y 9 pm. El comportamiento diario del caudal varió mensualmente, ya que en noviembre y abril el caudal no mostró un ciclo, el cual sí estuvo presente durante febrero y marzo. Durante febrero el máximo caudal (~180 l/s) ocurrió cerca de las 4 pm, mientras que el mínimo (~80) se registró a las 7 am. En marzo el máximo caudal (~158 l/s) ocurre entre las 1-3 pm, y los caudales mínimos entre las 10 pm y 10 am.

La estación DS presentó un caudal promedio inferior al registrado en RGO, de 71 l/s, con los mayores montos promedio también en febrero (206 l/s) y marzo (97 l/s), y los menores caudales promedio en los meses de abril (57 l/s) y noviembre (9 l/s). El comportamiento diario (promedio horario) de los caudales en la estación DS no posee un ciclo definido como se observa en RGO, ya que los montos varían entre ~76 y ~68 l/s, siendo posible identificar un máximo leve a las 5 am y a las 10 pm. El comportamiento diario del caudal por mes no presentó diferencias considerables, excepto durante noviembre, donde se observó un máximo entre las 7-8 am (~16 l/s) respecto al caudal constante de ~7 l/s.

La estación RGO' presentó el menor caudal medido en la cuenca Tapado, mostrando un caudal promedio durante el periodo de medición de ~1 l/s, con los mayores montos promedio durante el mes de febrero (~2 l/s) y los menores caudales promedio en los meses de marzo (~0.5 l/s) y abril (~1 l/s). Durante el mes de noviembre no fue medida la escorrentía debido a la presencia de nieve, al igual que en el mes de mayo.

Los registros de las estaciones DS y RGO entre los meses de febrero a mayo, mostraron un caudal mayor en la estación RGO entre el 21 de febrero y el 23 de marzo, siendo inferior entre el 24 de marzo y el 6 de mayo. Este comportamiento podría estar asociado a la influencia del acuífero encontrado entre ambas estaciones (compuesto por depósitos fluvioglaciales). Durante el periodo de mayor caudal en la estación RGO (aguas arriba) el acuífero es rellenado, sin embargo este podría estar siendo vaciado en el periodo en que los caudales son mayores en la estación DS. La diferencia de volumen de agua entre ambos periodos, mostraron un aporte de la estación RGO del 80% respecto al volumen medido en DS, correspondiendo posiblemente el 20% restante a flujos subterráneos almacenados con anterioridad.

Entre el embalse La Laguna y la confluencia del estero proveniente de la cuenca Tapado con el río Colorado, fueron realizados aforos de caudal en ocho puntos del río Colorado. La ubicación de cada aforo es mostrada en la Figura 88 y detallada en la Tabla 75.

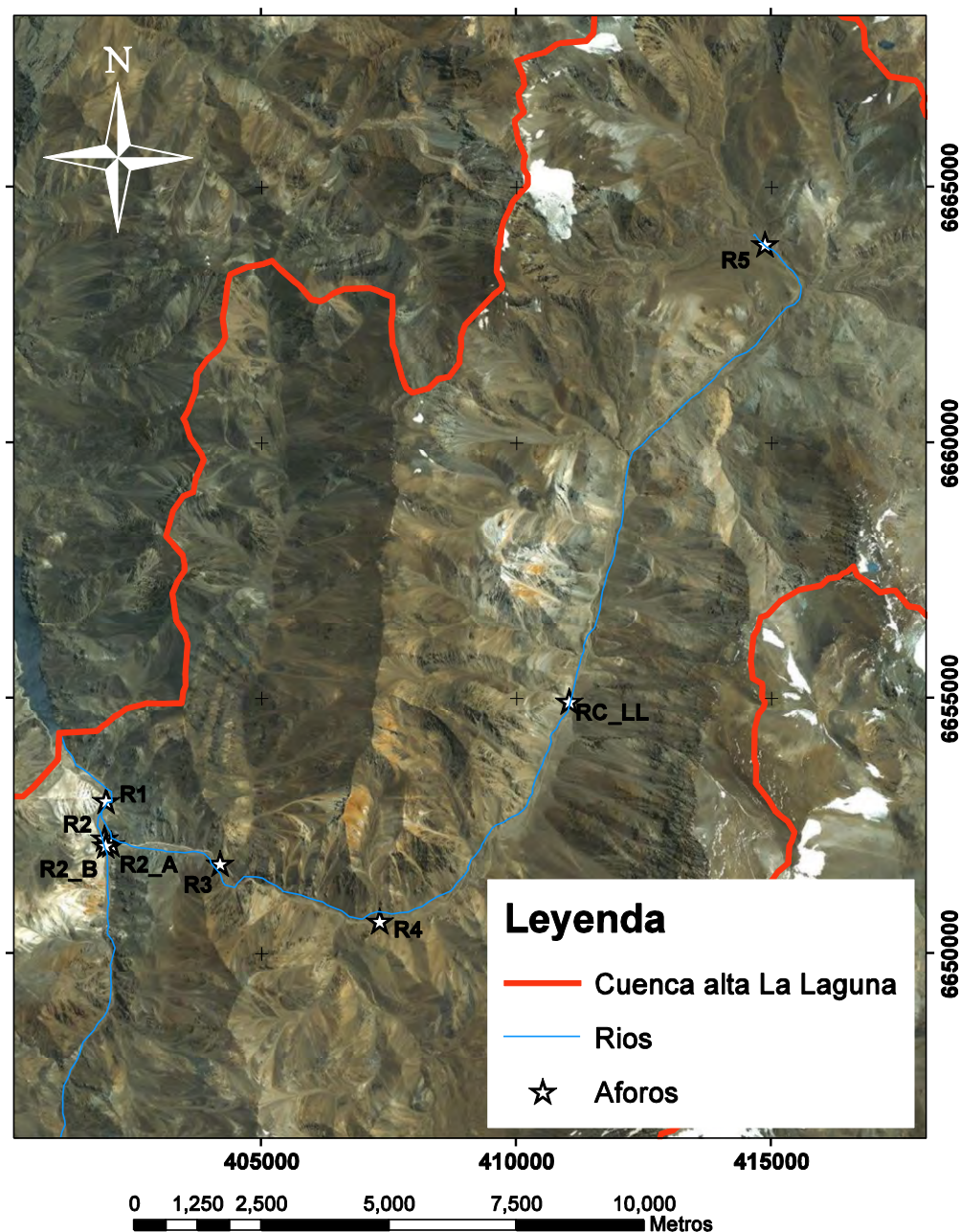


Figura 88. Ubicación de puntos de aforo en río Colorado, Norte Chico. Imagen: Google Earth CNES/Astrium 28-04-2013.

Tabla 75. Lugares de aforo puntuales.

Nombre Aforo	Descripción	Coordenadas (UTM)		Altitud [m snm]
		Este (m)	Norte (m)	
R1	Río La Laguna antes del embalse	401949	6652999	3169
R2	Río La Laguna después de confluencia con río Colorado	401916	6652264	3171
R2A	Río Colorado antes de confluencia con río La Laguna	402048	6652146	3183
R2B	Río La Laguna antes de confluencia con río Colorado	401941	6652123	3181
R3	Río Colorado antes de afluente norte	404183	6651768	3209
R4	Río Colorado en curva	407318	6650639	3334
RCLL	Río Colorado en Llano de las Liebres	411032	6654940	3631
R5	Río Colorado en Corrales	414873	6663897	4060

Los aforos de caudal, permitieron observar otros parámetros como la temperatura y conductividad del agua, observándose una correlación negativa entre conductividad y caudal, principalmente entre los puntos RCLL y R3. El resultado de las mediciones puntuales de caudales se muestra en la Tabla 76.

Tabla 76. Mediciones de caudales puntuales en río Colorado.

Nombre Aforo	Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Conductividad [uS/cm]	Altura de agua promedio [cm]	Q [l/s]
R1	20-01-16	12:30	*	330	23,1	1.210
	14-05-15	16:15	*	551	25	280
	04-02-15	15:00	*	344,8	19,7	663
	12-12-14	10:00	7	467,7	25	214
	21-10-14	12:15	11,2	440,6	*	514
	24-04-14	11:00	*	Molinete	30	1.129
	21-03-14	10:00	*	Molinete	35	1.407
	20-03-14	18:29	*	483	37	*
	20-03-14	18:02	*	482,4	37	*
	20-03-14	18:20	*	482,5	37	*
	10-01-14	11:05	*	2045	43	2.045
R2	10-01-14	11:25	*	328,4	43	2.915
	26-11-13	19:00	*	338	*	2.595
	20-01-16	13:20	*	373,1	25	689
	14-05-15	17:40	*	442	35	1.066
	04-02-15	14:30	*	209,9	17,1	490
	12-12-14	10:55	8,3	544	24	249
	21-10-14	12:35	13,5	522	*	862
	21-10-14	13:45	15,3	525	*	1.500
	23-04-14	16:00	*	Molinete	30	1.176
R2A	20-03-14	14:35	*	Molinete	30	1.129
	26-11-13	18:00	*	444,2	*	2.017
	20-01-16	13:00	*	374	20	625
	14-05-15	16:50	*	462	30	325
	04-02-15	13:27	*	449	21,2	301
	12-12-14	10:35	8,7	552,5	26	340
	12-12-14	11:10	8,7	551,3	26	257
	21-10-14	13:00	*	559,8	*	243
	23-04-14	15:31	*	478,3	25	471
	23-04-14	15:37	*	479	25	520
	23-04-14	15:25	*	482	25	587
	20-03-14	16:02	*	471	25	510
	20-03-14	16:17	*	472	25	425
	10-01-14	13:10	*	369,9	46	1.840
	10-01-14	13:20	*	396,9	46	2.440

Tabla 76. (Continuación) Mediciones de caudales puntuales en río Colorado.

Nombre Aforo	Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Conductividad [uS/cm]	Altura de agua promedio [cm]	Q [l/s]
R2B	20-01-16	13:10	*	253,5	15	618
	14-05-15	17:10	*	334	25	447
	04-02-15	13:51	*	207,8	16,3	460
	12-12-14	11:30	8,9	321,5	17	125
	21-10-14	13:15	14,9	312,6	*	145
	23-04-14	16:45	*	Molinete	21	505
	20-03-14	15:15	*	Molinete	23	496
	10-01-14	14:15	*	240,6	32	1.240
R3	20-01-16	13:45	*	377,3	20	307
	15-05-15	13:50	*	667,7	25	348
	04-02-15	12:16	*	450,6	18,8	521
	12-12-14	12:00	10	568	18	305
	12-12-14	12:05	10	568	18	320
	21-10-14	14:15	15,1	574	*	288
	23-04-14	14,26	*	488,3	30	578,46
	23-04-14	14,34	*	486,3	30	556,54
	23-04-14	14,42	*	487,3	30	413,05
	20-03-14	13:07	*	461,8	50	702,1
	20-03-14	13:15	*	463	50	548,5
	20-03-14	13:30	*	462,8	50	855,36
	10-01-14	16:00	*	400	42	2.138,2
	10-01-14	16:10	*	400	35	2.157,4
	26-11-13	16:45	*	448	*	417,22
R4	20-01-16	14:00	*	274,2	24	934
	15-05-15	14:10	*	624,3	35	790
	03-02-15	15:50	*	442,5	23,6	498
	12-12-14	12:30	9	590	30	305
	21-10-14	14:45	13	621,6	*	275
	23-04-14	13:20	*	513,3	30	415
	23-04-14	13:31	*	512,2	30	404
	23-04-14	13:37	*	512,8	30	413
	20-03-14	11:52	*	487	40	482
	20-03-14	12:10	*	491,8	40	505
	10-01-14	17:05	*	428	39	1.338
	25-11-13	15:30	*	466,8	*	360
RCLL	20-01-16	14:30	*	285,8	20	516
	15-05-15	13:15	*	333,5	30	376
	03-02-15	14:28	16,3	258,1	15,3	256
	12-12-14	13:00	11,5	323	14	145
	21-10-14	15:15	15,2	320,2	*	180
	23-04-14	12:10	*	375,9	10	190
	23-04-14	12:20	*	376	10	204
	23-04-14	12:34	*	372	10	264
	20-03-14	10:36	*	367	30	436
	20-03-14	10:47	*	367	30	356
	10-01-14	18:15	*	309	22	1.633
	10-01-14	18:30	*	309	22	1.604
	25-11-13	13:30	*	330,7	*	265
	20-03-14	11:06	*	367,3	30	335

Tabla 76. (continuación) Mediciones de caudales puntuales en río Colorado.

Nombre Aforo	Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Conductividad [uS/cm]	Altura de agua promedio [cm]	Q [l/s]
R5	20-01-16	15:00	*	165,3	20	436
	15-05-15	12:30	*	216,2	19	110
	03-02-15	13:37	7,9	197,7	15,6	335
	12-12-14	13:30	10,7	192	17	94
	21-10-14	16:05	9,2	194,1	*	97
	24-04-14	11:40	*	211,6	20	104
	24-04-14	11:50	*	212,9	20	112
	18-03-14	18:22	*	196	10	223
	18-03-14	18:30	*	196	10	154
	09-01-14	17:10	*	178,7	20	681
	25-11-13	17:15	*	174,5	*	127

* Sin información.

Los volúmenes de agua de derretimiento glacial o nival no pudieron ser individualizados únicamente a partir de los registros de las estaciones fluviométricas instaladas en este proyecto. Sin embargo, fue posible identificar períodos en los cuales el derretimiento de nieve o hielo podría haber contribuido volúmenes mayoritarios a los caudales medidos.

La identificación de periodos de influencia de nieve/hielo en los caudales fue realizada por medio de la comparación con registros de cobertura de nieve obtenidos desde imágenes satelitales y registros meteorológicos dentro del área de estudio.

La variación espacial y temporal de la cobertura nival entre octubre 2014 y abril 2015 en la cuenca Tapado fue estimada a partir de imágenes satelitales capturadas por el sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo del satélite AQUA. Fue utilizado el producto de nivel 3 llamado *Eight day snow cover composite* (MYD10A2), el cual permitió identificar la superficie cubierta por nieve con una resolución espacial de 500 m, dentro de un período de ocho días (Hall et al., 2003). Este producto presenta dos resultados: *Maximum snow extent over the eight-day period* y *Eight day snow cover* (promedio en ocho días). El producto utilizado fue *Maximum snow extent over the eight-day period*, cuyos píxeles identificaron la cobertura nival con valores de 200 y la superficie carente de ésta en 25, entre otros valores para otras superficies y error.

Considerando un promedio de ocho días para la cobertura de nieve (*Eight day snow cover*) y los registros de caudal, en la estación fluviométrica DS se observó una correlación positiva de la cobertura de nieve con los caudales entre 16 de octubre al 24 de noviembre (r^2 , 0,79) y entre 18 de febrero y 21 de marzo (r^2 , 0,96), donde a medida que disminuye la cobertura de nieve lo hizo también el caudal, observándose una alta

influencia del agua derretida proveniente desde la cobertura nival. Por otro lado, esta correlación fue negativa entre el 2-18 de febrero (r^2 , 0,83) lo que implica que la nieve tuvo baja incidencia en el caudal. En la estación RGO se observó una correlación negativa hasta el 2 de diciembre (r^2 , 0,6) y desde el 18 de febrero hasta mediados de marzo la correlación fue positiva (r^2 , >0,3). La estación RGO' no posee suficientes registros para ver su correlación con la cobertura de nieve.

El análisis de los registros meteorológicos (TAWS1) y cobertura de nieve en la cuenca obtenidos del sensor MODIS, en comparación a los registros de caudales de las estación DS, permitió presumir que hasta el 1 de noviembre, la nieve (28% de cobertura de nieve en la cuenca) disminuyó hasta desaparecer, según lo observado en TAWS1 (con un albedo de 0,1, asociado a detrito supraglacial), mostrando un aumento en los caudales. A mediados de marzo, el caudal se encontró en disminución desde el 9 de febrero, con una cobertura de nieve baja (<16%), con una progresiva disminución de la superficie de hielo. Esto permitió estimar que el caudal registrado entre el 2 de febrero hasta mediados de marzo posee un alto aporte de agua de derretimiento glacial (entre diciembre a mediados de marzo la cobertura de nieve promedio es del 7%) (Figura 89). A partir de mediados de marzo, se observaron dos eventos de precipitación mayores a los ocurridos en primavera-verano (<40%) asociado a un aumento del caudal, de albedo (promedio >0,5), de cobertura de nieve en la cuenca (100%) y de la altura de nieve (34 cm).

Respecto a la asociación con registros de temperatura (TAWS1) y caudales diarios máximos, la estación RGO mostró una alta correspondencia con un tiempo de retraso del caudal respecto a la temperatura de 13 días en el mes de noviembre, de 3 días en febrero y de 2 días en marzo. En la estación DS el tiempo de reacción del caudal respecto a la temperatura es de 8 días en octubre, dificultando la observación de la tendencia hacia el resto del periodo, debido al comportamiento del caudal. En RGO' los registros de caudal no permitieron observar tendencias respecto a la temperatura. La variación del tiempo entre temperaturas y caudales máximos puede estar dado por la dinámica de tránsito del agua de derretimiento sobre, entre y debajo del glaciar (Benn y Evans, 2010) y debido a las características de la zona de depositación fluvioglacial y glacial, conocida como *glacier foreland* (Pourrier et al., 2014).

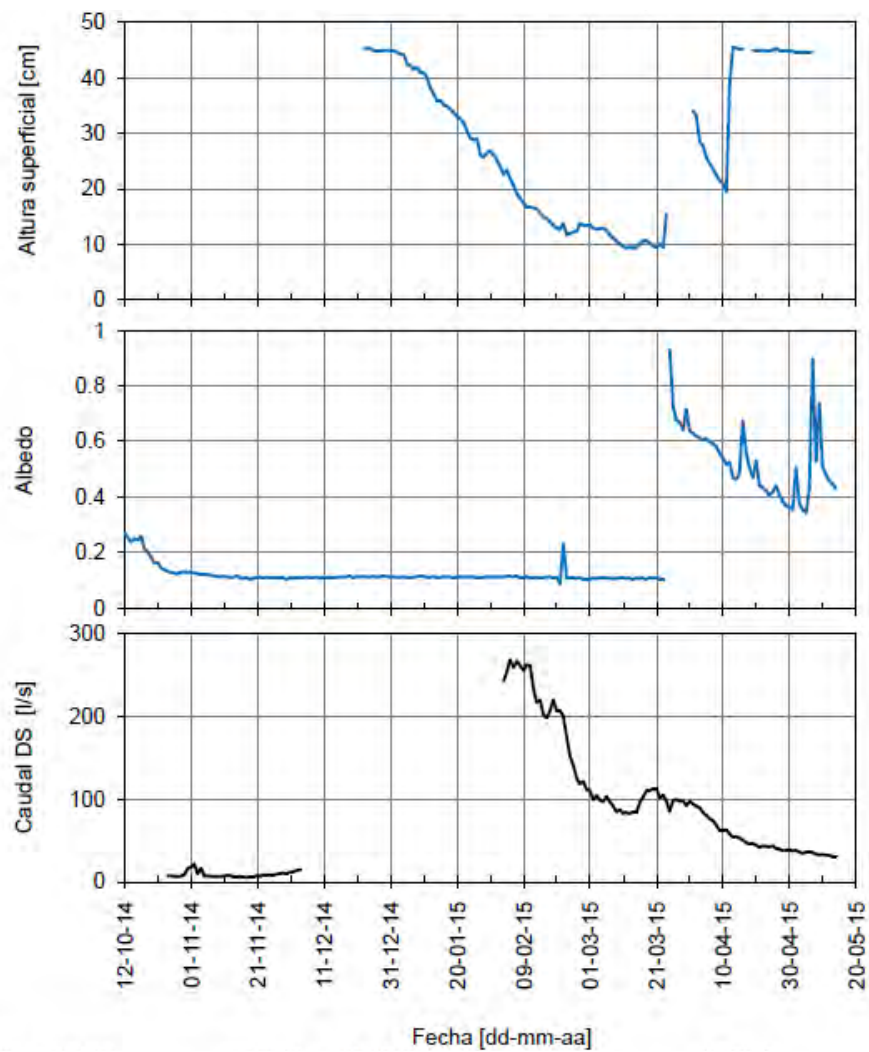


Figura 89. Registros meteorológicos versus caudales en estación DS.

7.2 ANÁLISIS DEL CAUDAL EN LAS CERCANÍAS DE LOS GLACIARES SAN FRANCISCO, PIRÁMIDE, BELLO Y YESO

7.2.1 Glaciar San Francisco

El comportamiento del caudal asociado al glaciar San Francisco fue registrado por medio de dos estaciones fluviométricas: cerca del frente glacial (EM_A) y a la salida de la cuenca, en el puente de acceso al Monumento Nacional Baños Morales administrado por la CONAF, conocido como Pte. CONAF (EM_B). La ubicación de ambas estaciones se muestra en la Figura 90 y Tabla 77. Los caudales fueron registrados la mayor parte del tiempo durante las estaciones de primavera y verano de los años hidrológicos 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016.

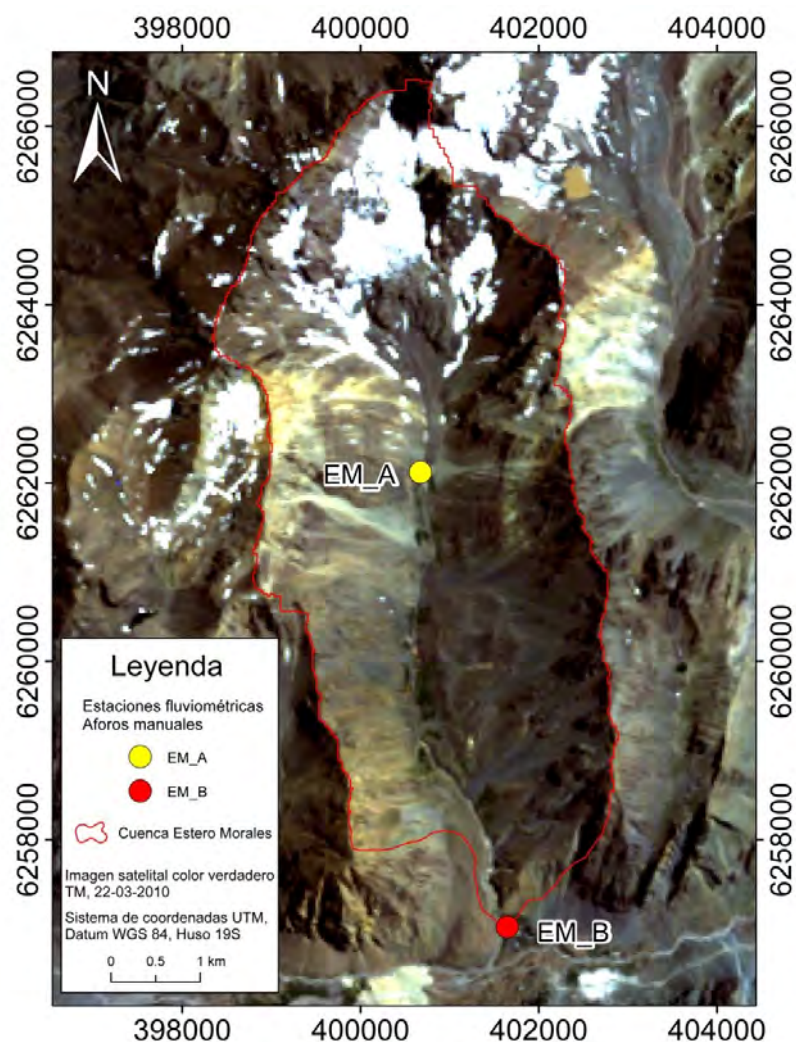


Figura 90. Ubicación de estaciones fluviométricas en estero Morales.

Tabla 77. Ubicación de estaciones fluviométricas cerca del glaciar San Francisco.

Estación fluviométrica	Descripción	Coordenadas (UTM)		Altitud (m snm)
		Este (m)	Norte (m)	
EM_A	Estero Morales cerca del frente glaciar San Francisco	400672	6262126	2434
EM_B	Estero Morales en Puente CONAF	401646	6257023	1860

Los aforos de caudal llevados a cabo en las estaciones fluviométricas se muestran en la Tabla 78.

Tabla 78. Aforos realizados en el Estero Morales.

Estación fluviométrica	Fecha	Hora (HH:MM)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Altura de agua promedio (cm)	Caudal (l/s)
EM_A	22-04-15	12:35	519	13	70
	22-04-15	13:45	512	10,6	82
	22-04-15	14:40	502	12	79
	22-04-15	15:15	498	10,9	82
	25-02-15	16:44	115,3	25	1.789
	25-02-15	17:02	115,9	*	1.820
	25-02-15	17:25	116	22,6	1.680
	28-01-15	19:07	127,6	20	1.626
	28-01-15	20:00	134,5	19,5	1.468
	29-01-15	09:38	201,5	15,4	708
	29-01-15	10:32	190,1	15,7	878
	29-01-15	11:50	161,1	19,1	1.328
	29-01-15	12:50	144,6	20,1	1.719
	29-01-15	13:50	123,6	21,5	2.501
	14-01-15	12:25	156,6	31,2	840
	14-01-15	13:25	146,2	32,1	1.384
	18-12-14	13:50	160,7	35	1.667
	11-10-14	13:35	380	26,6	257
	13-03-14	15:30	177	20	622
	27-01-13	13:06	*	*	1.426
	27-01-13	12:56	*	*	1.450
EM_B	28-01-16	12:20	440,1	25	1.129
	28-01-16	12:50	440,8	25	1.141
	28-01-16	13:20	441,3	25	1.115
	17-12-15	20:30	347,7	46	1.986
	18-12-15	07:15	377	44	1.380
	22-04-15	17:35	806,9	23	250
	22-04-15	09:20	830	17	*
	21-04-15	19:57	805	15	275
	25-02-15	19:50	279,8	29	1.620
	25-02-15	20:25	297	28,5	1.411
	25-02-15	20:50	*	28	1.360

Tabla 78. (Continuación) Aforos realizados en el Estero Morales.

Estación fluviométrica	Fecha	Hora (HH:MM)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Altura de agua promedio (cm)	Caudal (l/s)
EM_B	28-01-15	13:55	317,9	38	1.660
	28-01-15	15:14	255,5	39	2.200
	29-01-15	16:00	230	41	3.285
	29-01-15	17:00	221,8	47	*
	14-01-15	9:40	390,7	32	1.240
	14-01-15	15:55	258	33,3	2.200
	18-12-14	9:30	358	38	1.515
	18-12-14	17:10	300,7	40	3.070
	11-10-14	9:30	638	35	884
	11-10-14	9:40	638	35	917
	13-03-14	19:00	416	25	764
	16-11-13	9:30	*	*	1.502
	16-11-13	12:30	*	*	1.231
	16-11-13	13:00	*	*	1342
	05-11-13	14:12	*	*	607
	05-11-13	14:18	*	*	785
	05-11-13	14:27	*	*	678
	04-11-13	20:01	*	*	1.533
	04-11-13	20:10	*	*	1.397
	04-11-13	20:15	*	*	1.263
	15-10-13	13:00	*	Molinete	1.005
	15-10-13	13:00	*	*	911
	25-09-13	12:56	*	37	371
	25-09-13	13:06	*	37	343
	25-09-13	13:15	*	37	357
	25-09-13	13:50	*	Molinete	385
	13-08-13	12:47	*	43	221
	13-08-13	12:57	*	43	236
	13-08-13	13:12	*	43	232
	13-08-13	14:15	*	Molinete	266

*No se toma registro en terreno de dicho dato.

Las mediciones de caudales mostrados en la Tabla 78 permitieron determinar las curvas de descargas (CD) para ambas estaciones fluviométricas para los periodos de medición 2013-2014 y 2014-2015. Durante el periodo 2013-2014, en las estaciones EM_B y EM_A, se contempló una curva de descarga (CD) para cada sección, mientras que para el periodo 2014-2015 en la estación EM_B se estimó una CD, y para la estación EM_A fue necesario establecer tres CD, debido a que la sección de medición en EM_A mostró una alta variabilidad geométrica durante el periodo de estudio. Esta variación en la sección EM_A fue producto del transporte de sedimentos y del volumen de escorrentía, los que además movieron la estación, modificando los registros medidos en el lugar. Las

CD utilizadas para calibrar los caudales registrados por las estaciones son presentadas en la Figura 91.

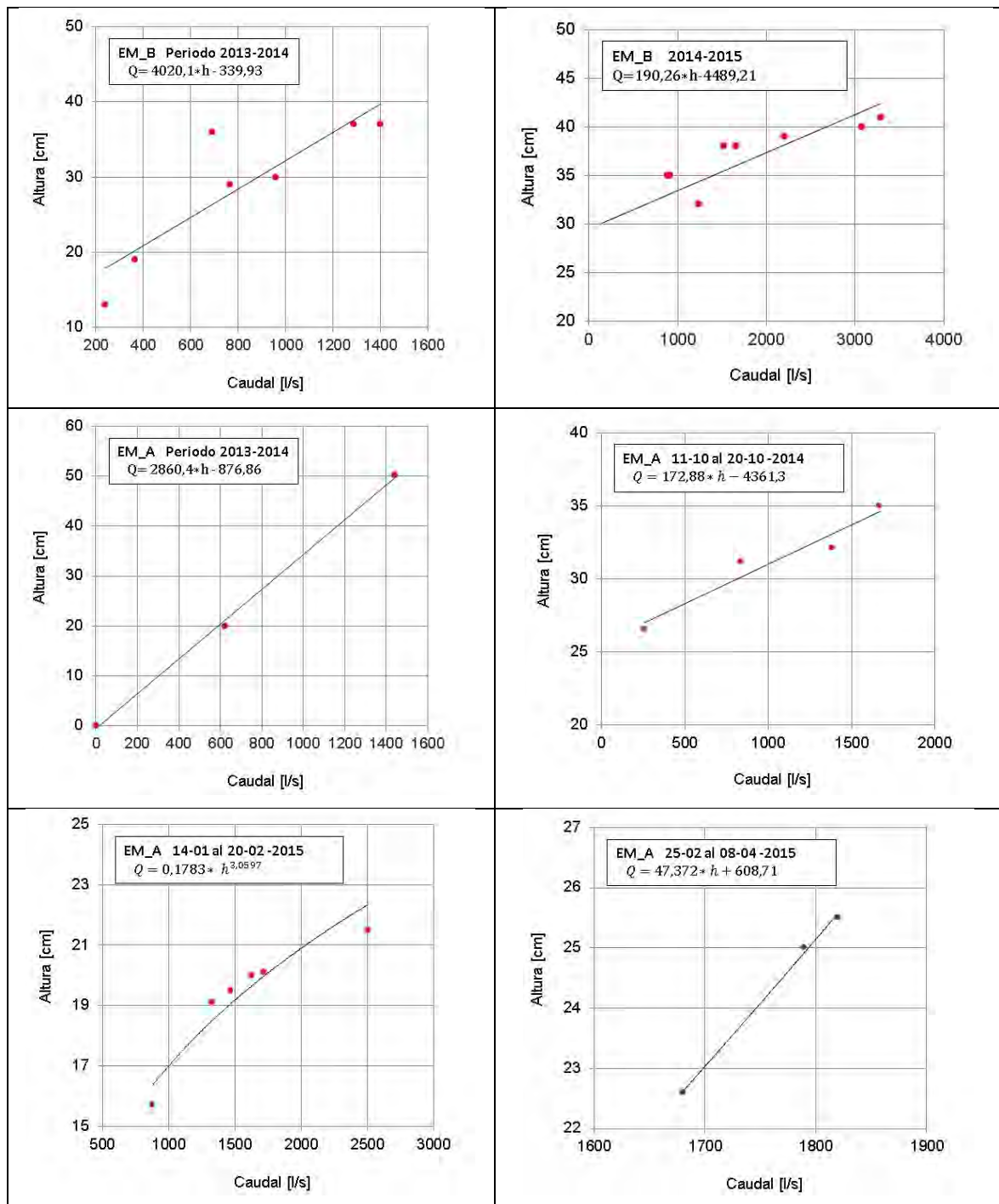


Figura 91. Curvas de descarga determinadas para las estaciones fluviométricas EM_A y EM_B en estero Morales para el periodo de medición 2013-2015.

Los registros de las estaciones fluviométricas y las curvas de descarga permitieron estimar los caudales en el estero Morales, presentados en la Figura 92.

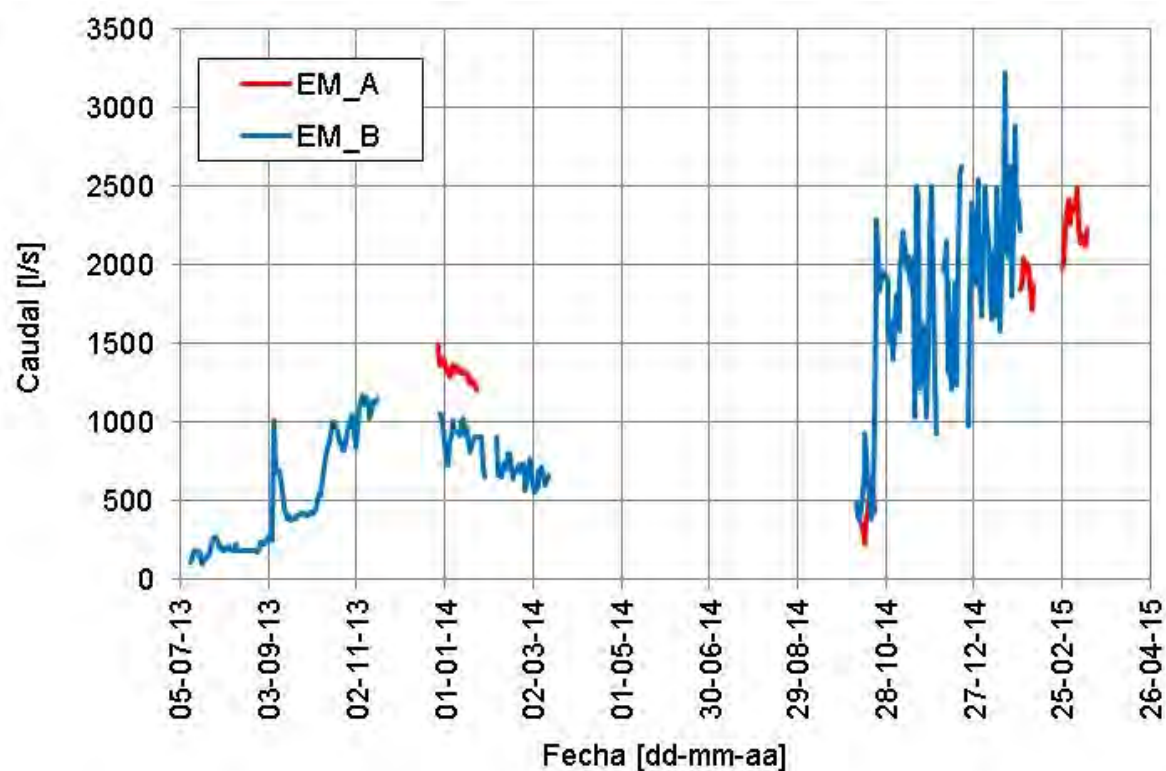


Figura 92. Mediciones registradas por las estaciones fluviométricas en estero Morales. Se muestran los flujos de caudal promedio diario estimados a partir de las estaciones fluviométricas EM_A y EM_B para el periodo 2013-2015.

Los registros en estación fluviométrica EM_A presentaron errores durante gran parte del periodo 2013-2015. Los errores son producto de la alta capacidad de transporte de sedimentos en el estero, lo que provoca el relleno con arena al interior del tubo que protege el sensor. En la Figura 93, se observa el área en que se encuentra la estación fluviométrica EM_A. La estación encontrada aguas abajo, EM_B, registró caudales hasta el 27 de enero 2015.



Figura 93. Fotografías en EM_A hacia el norte, el día 11-10-14 (izquierda) y el día 18-12-14 (derecha).

Durante el periodo 2014-2015 ambas estaciones registraron un aumento de los caudales hacia la estación de verano, el cual decae durante marzo-abril (mediciones manuales de caudal). Los mayores montos de caudal registrados y observados se identificaron en la estación EM_B. La estación EM_B mostró caudales promedios mayores en el mes de enero (2.197 l/s), seguido de diciembre (1.837 l/s), noviembre (1.777 l/s) y octubre (1.146 l/s), con un caudal promedio para el periodo comprendido entre octubre 2014 y enero 2015 de 1.764 l/s. En este contexto, la falta de registros en EM_A, no permitieron realizar comparaciones a menores escalas temporales.

Para el periodo 2014-2015, a partir de observaciones en terreno y los registros en la estación meteorológica sobre el glaciar San Francisco, se presentó un espesor de nieve en el glaciar (cercano a la AWS) de aproximadamente 7 m durante el 14 de agosto. Hasta el 4 de diciembre el albedo medido por la estación corresponde a nieve ($>0,7$), el cual disminuyó a 0,35 durante los últimos días de enero, y alcanzando valores asociados a hielo descubierto (0,2) el 9 de febrero. Por lo que se considera que los caudales registrados desde el mes de febrero podrían estar mayormente influidos por agua de derretimiento glacial, sin embargo los antecedentes disponibles impiden conocer el tiempo de tránsito del agua proveniente del derretimiento de la nieve en la cuenca.

7.2.2 Glaciares Yeso, Bello y Pirámide

Los caudales en el estero Yeso fueron registrados por medio de cuatro estaciones fluviométricas: estero Yeso después de morrena (EY_E), estero Yeso antes de estero Pirámide (EY_F), estero Yeso en Termas el Plomo (EY_G) y en estero Yeso antes de

embalse Yeso (Pte. Yeso). La ubicación de las estaciones fluviométricas y mediciones de aforos manuales son mostradas en la Figura 94 y en la Tabla 79. Los caudales fueron registrados mayormente durante las estaciones de primavera verano de los años 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016.

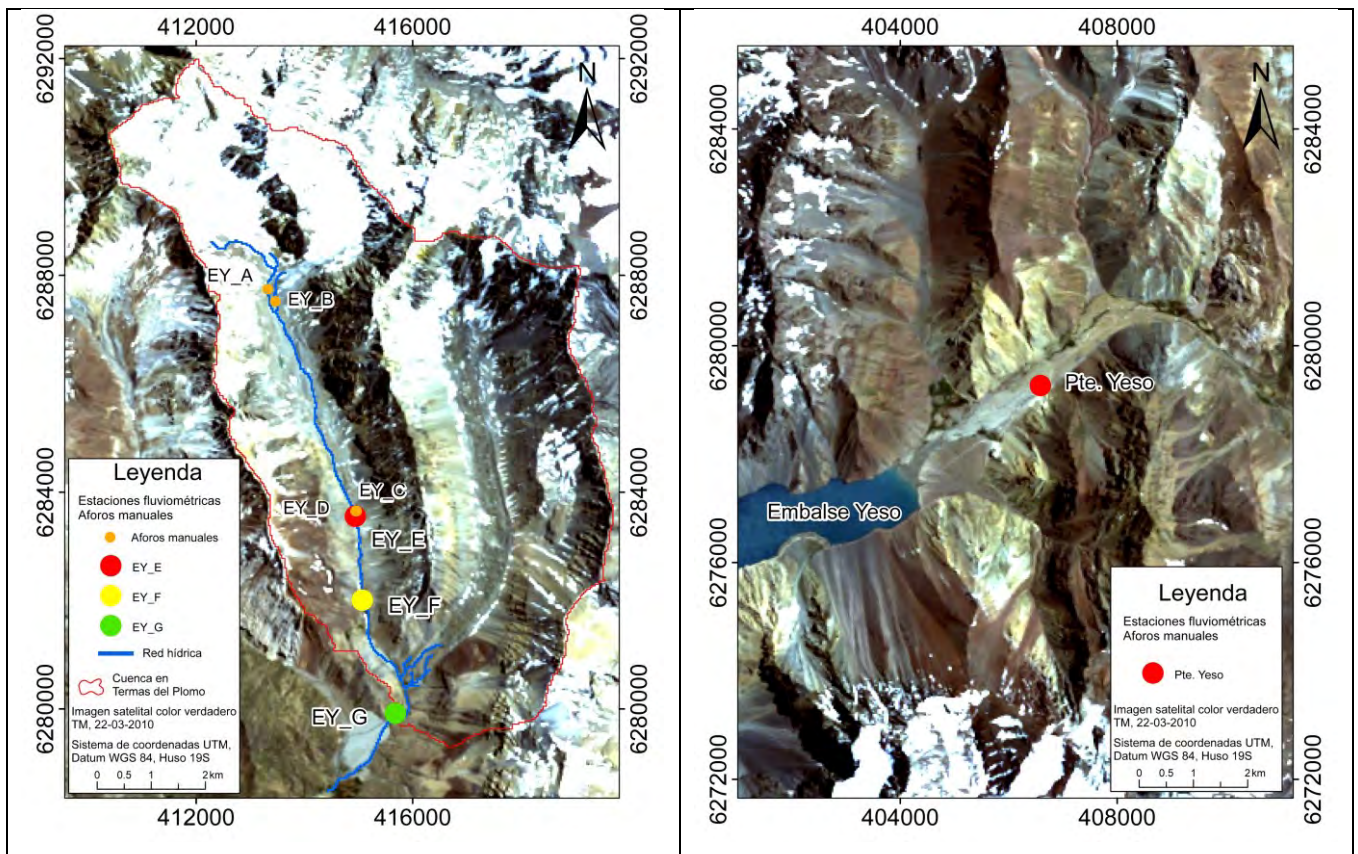


Figura 94. Ubicación de estaciones fluviométricas y aforos manuales en estero Yeso.

Tabla 79. Ubicación de estaciones fluviométricas en estero Yeso.

Estación fluviométrica	Descripción	Coordenadas (UTM)		Altitud (m snm)
		Este (m)	Norte (m)	
EY_E	Esterio Yeso después de morrena	414944	6283557	3332
EY_F	Esterio Yeso en Estación baja (estratos verticales)	415071	6282008	3183
EY_G	Esterio Yeso en Termas del Plomo	415683	6279919	2964
Pte. Yeso	Esterio Yeso Antes de embalse Yeso	406780	6279295	2615

Junto a los registros de las estaciones fluviométricas, fueron realizados aforos puntuales de caudal a lo largo del estero Yeso, cuya ubicación es indicada en la Tabla 80. Los aforos de caudal llevados a cabo en las estaciones fluviométricas y en los aforos puntuales se muestran en la Tabla 81.

Tabla 80. Sitios de aforo a lo largo del estero Yeso.

Nombre Aforo	Descripción	Coordenadas (UTM)		Altitud (m snm)
		Este (m)	Norte (m)	
EY_A	Esterio Yeso en salida glaciar Bello	413317	6287747	3852
EY_B	Esterio Yeso en salida glaciar Yeso	413459	6287518	3819
EY_C	Esterio Yeso antes junta morrena Yeso	414943	6283650	3334
EY_D	Esterio naciente de morrena Yeso	414962	6283650	3353

Tabla 81. Aforos realizados en estero Yeso.

Nombre Aforo	Fecha	Hora (HH:MM)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Altura de agua promedio (cm)	Caudal (l/s)
EY_A	08-04-15	16:15	483	20	184
	04-12-14	20:10	266,8	30	435
	15-04-14	13:30	958	14	49
	15-04-14	13:45	958	14	50
	14-03-14	11:37	573,9	25	83
	16-01-14	13:30	121	*	1.875
	17-12-13	17:36	*	*	500
EY_B	17-12-13	17:42	*	*	488
	08-04-15	16:30	509	20	160
	11-02-15	09:05	199,7	20	150
	04-12-14	20:30	652,3	25	250
EY_C	14-03-14	13:25	302,9	25	129
	26-01-16	15:50	525,7	16	724
	08-04-15	18:30	886,1	22	158
	11-02-15	11:50	470	40	217
	05-12-14	11:50	602,8	30	306
	17-12-13	20:16	*	*	1.134

Tabla 81. (continuación) Aforos realizados en estero Yeso.

Nombre Aforo	Fecha	Hora (HH:MM)	Conductividad (μ S/cm)	Altura de agua promedio (cm)	Caudal (l/s)
EY_D	26-01-16	15:30	1115,7	24	369
	08-04-15	18:20	1389,7	25	391
	11-02-15	11:30	1378	30	378
	05-12-14	11:20	1314,8	28	255
	16-01-24	15:40	1.300	*	305
EY_E	26-01-16	17:00	737,3	33,7	1.211
	26-01-16	18:00	732,9	34,0	1.248
	26-01-16	14:40	736,1	32,4	1.150
	09-04-15	09:15	1375	20,5	425
	09-04-15	11:40	1371	21	434
	11-02-15	15:25	601,9	*	2.401
	11-02-15	14:40	733	44	1.926
	11-02-15	13:47	963,6	33,5	1.217
	05-12-14	12:15	923	60	525
	17-12-13	20:44	*	*	1.346
	17-12-13	20:50	*	*	1.383
EY_F	27-01-16	10:45	774,4	63	659
	27-01-16	11:00	773,9	63	626
	27-01-16	16:20	800,1	62,5	645
	18-12-15	13:30	758,4	44	453
	18-12-15	14:30	728,4	44,5	472
	09-04-15	12:40	1342,4	37	356
	09-04-15	13:40	1343	37	351
	09-04-15	14:40	1344,5	37	349
	26-02-15	10:41	961,2	40,5	520
	26-02-15	11:15	*	42	532
	26-02-15	11:45	969,2	44	568
	12-02-15	15:13	556	74	1.458
	12-02-15	15:45	470	80	2.172
	12-02-15	16:05	*	81	1.924
	13-01-15	11:55	576,5	55,3	1.757
	13-01-15	12:05	573,2	55,3	1.602
	13-01-15	13:00	551,7	57	2.412
	16-04-14	11:45	1.339,2	24	370
	16-04-14	11:55	1.339,2	24	373
	15-03-14	11:15	1.302	15	368
	17-01-14	11:45	705,6	*	1.861
	18-12-13	13:14	*	44.8	1.193
	18-12-13	13:23	*	44.8	1.347
EY_G	27-01-16	06:40	*	70	*
	26-01-16	10:03	*	76	*
	27-01-16	09:10	910,3	70	1.522
	27-01-16	18:15	926,7	70	1.248
	28-01-16	08:40	953,5	68	1.200
	28-01-16	08:50	953,5	68	1.346
	09-04-15	16:05	1267,7	62+	1328
	09-04-15	17:00	1256	62+	1429
	08-04-15	10:00	1268	60+	943
	08-04-15	11:15	1263	60+	911
	26-02-15	13:12	1.196	50+	1.355
	26-02-15	14:12	1.019	55+	1.805
	26-02-15	14:50	868,2	60+	3.129

Tabla 81. (continuación) Aforos realizados en estero Yeso.

Nombre Aforo	Fecha	Hora (HH:MM)	Conductividad (μ S/cm)	Altura de agua promedio (cm)	Caudal (l/s)
EY_G	12-02-15	09:45	1.120	50+	1.175
	11-02-15	19:00	850,9	64+	1.304
	11-02-15	19:30	854,7	64+	1405
	11-02-15	20:07	848	65+	*
	05-12-14	16:00	964	35+	1.244
	13-01-15	10:10	794	70+	1.740
	13-01-15	10:20	794	70+	1.160
	13-01-15	19:15	616	85+	2.274
	16-04-14	14:00	1.259	50+	743
	16-04-14	14:25	1.259	50+	764
	14-03-14	19:30	1.230	30+	927
	16-01-14	21:30	780	*	3.647
	18-12-13	10:54	*	*	1.620
	18-12-13	11:00	*	*	2.206
	18-12-13	11:09	*	*	2.417
Pte. Yeso	27-01-16	13:30	1197,6	96-	2.453
	27-01-16	19:25	1140	100-	2.826
	28-01-16	10:30	1227	100-	2.291
	18-12-15	18:40	1085,2	44-	2.562
	18-12-15	17:00	1136	40-	2.290
	18-12-15	17:50	1111,6	41-	2.501
	09-04-15	17:40	1441	65-	2.688
	09-04-15	18:30	1442	65-	2.727
	26-02-15	16:00	1.244	30	3.701
	26-02-15	16:25	1.229	36	*
	26-02-15	16:50	1.221	38	4.316
	16-04-14	14:25	1.259	50	764

-Sensor de presión en estación fluviométrica DGA se encuentra sobre el nivel del agua.

*Sin Información.

+La referencia de altura se extrae desde limnómetro DGA

Las mediciones de caudales mostradas en la Tabla 81 permitieron determinar las curvas de descargas (CD) para las estaciones fluviométricas EY_E y EY_F. Para ambas estaciones se contempló sólo una CD. Se observaron altas variaciones en la sección del estero producto del transporte de sedimentos y del volumen de escorrentía, lo que provocó además el movimiento del cauce. Las CD utilizadas para calibrar los caudales registrados por las estaciones son presentadas en la Figura 95.

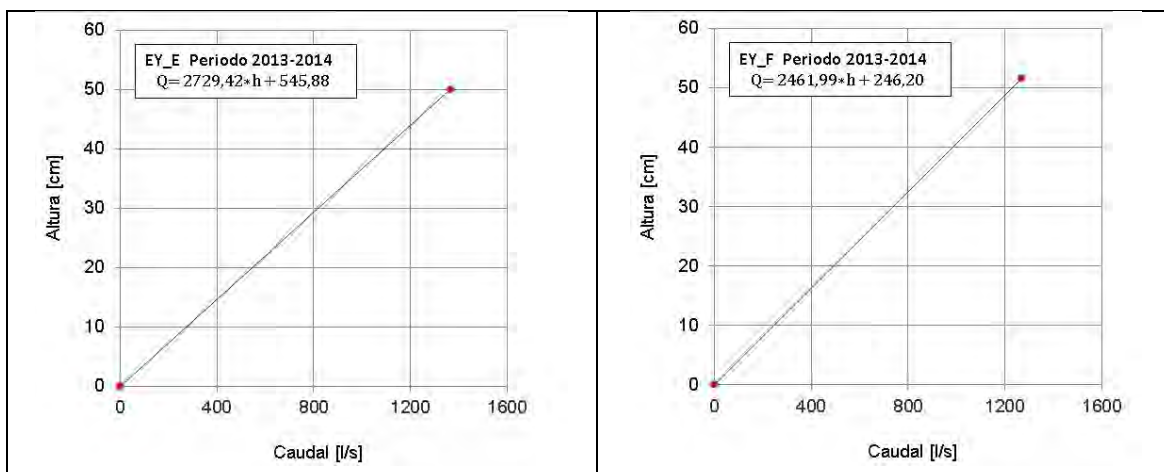


Figura 95. Curvas de descarga determinadas para las estaciones fluviométricas EY_E y EY_F en estero Yeso para el periodo de medición 2013-2014.

Durante el periodo 2014-2015, las estaciones fluviométricas encontradas en el tramo estación EY_E y EY_G presentaron problemas debido al movimiento de los cauces hacia los costados, los montos de caudal y la capacidad de transporte de sedimentos, provocando registros alterados, el recubrimiento y mal funcionamiento de los transductores de presión. La Figura 96 muestra las estaciones (a) EY_G, (b) EY_F y (c) EY_E.



Figura 96. Estaciones fluviométrica en estero Yeso. Se observa (a) la estación EY_G el 11-02-15, (b) estación EY_F el 13-01-15, y (c1 y c2) estación EY_E el 11-02-2015 mostrando cambios en el contenido de sedimentos durante el día.

Durante las mediciones en terreno de abril 2015, no se encontró el transductor de presión de la estación EY_E, debido a que el caudal (alta capacidad de transporte) cortó la piola de acero que sostiene al sensor. Esto impidió el registro de caudal continuo en la estación EY_E.

Para el periodo 2014-2015, la estación fluviométrica EY_F fue visitada el 13 de enero, encontrando registros de presión en agua hasta el 28 de noviembre 2014. Durante enero fue reconfigurado el transductor de presión para ser visitado el 26 de febrero, fecha en que la estación se encontró bajo una capa de 50 cm de gravas. Dicho sensor fue enviado a técnicos especializados (Unisource Ingeniería Ltda.), logrando rescatar los registros de presión entre el 13 y 27 de enero, sin embargo, las horas recuperadas durante el día 13 de enero, no son las mismas en las que se realizan las mediciones de caudal, necesarias para correlacionar caudal y presión de agua, por lo que no es posible estimar los caudales entre el 13 y 27 de enero. No fue posible instalar otros sensores en estaciones EY_E y EY_F, debido al tiempo de demora en la adquisición. La posición original de la estación EY_F fue desplazada 10 m aguas abajo. En este lugar la sección

de caudal es angosta lo cual disminuye las probabilidades de sedimentación en la estación.

En la Figura 97 se presentan los registros de caudales en estero Yeso para el periodo 2013-2014 durante los meses de diciembre y enero.

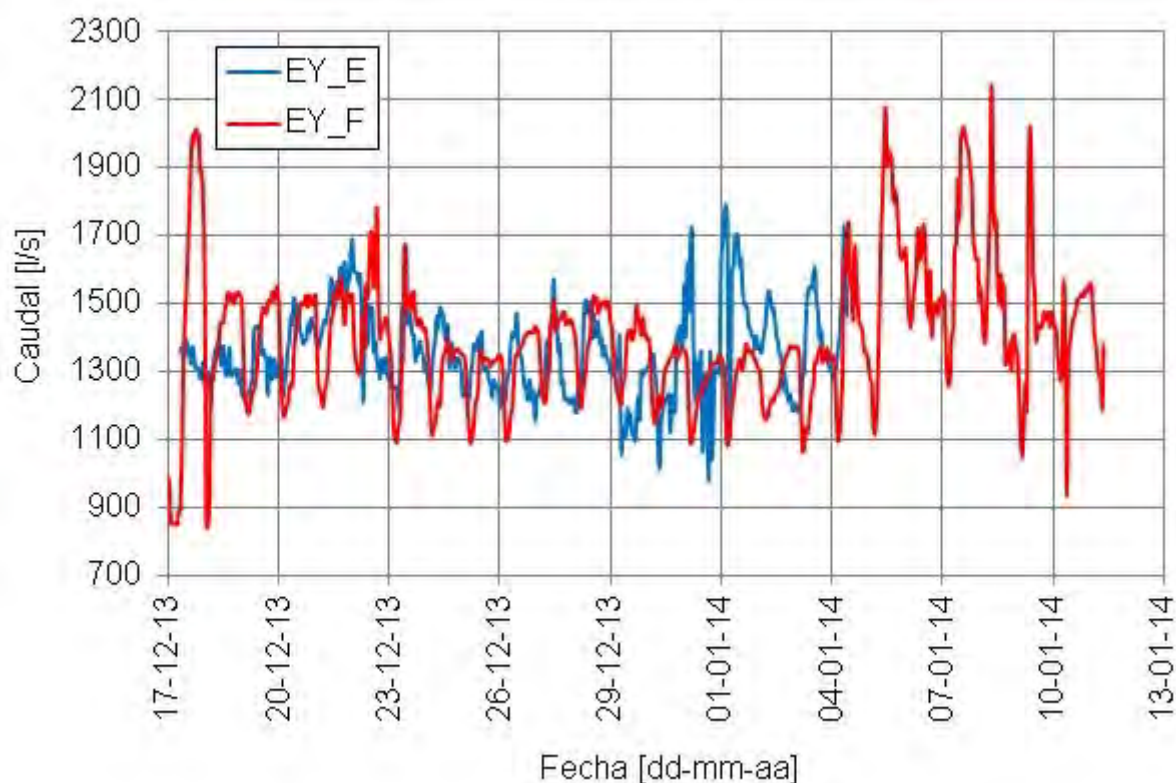


Figura 97. Caudales registrados en la estaciones fluviométricas EY_E y EY_F en estero Yeso durante el periodo 2013-2014.

En el periodo 2014-2015, los registros en la estación EY_F no permitieron cuantificar el caudal y su comportamiento durante el periodo. Sin embargo fue posible identificar el ciclo diario durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y parte de enero, mediante la observación de variaciones registradas de presión del agua. Durante septiembre y octubre no existió un ciclo definido, caracterizado por máximos y mínimos diarios, posiblemente asociado a la influencia de la cobertura de nieve cercana. En noviembre los registros de presión presentaron un ciclo diario con máximos valores (asociado a mayor caudal) a las 2:00 pm y mínimos entre las 8-9 am, comportamiento que cambió durante los últimos días de enero, en que el estero mostró los máximos montos promedio cerca de las 1:00 pm y mínimos a las 9:00 am. Este adelantamiento del máximo caudal, ha sido observado en ríos con alta influencia glacial, debido al

aumento de las temperaturas del aire y una mayor eficiencia del drenaje al interior de la masa glacial (Cuffey y Paterson, 2010).

Al momento de elaborar este informe, no ha sido posible conseguir la información registrada por las estaciones EY_G y Pte. Yeso, administradas por la DGA, lo que impide la cuantificación del caudal durante el periodo 2013-2015, debido a problemas de acceso a dicha información. La estación Pte. Yeso comenzó a retomar sus mediciones a fines del año 2015.

Para la estación primavera verano 2014-2015, la influencia de la cobertura de nieve en los caudales registrados puede ser observada por medio de imágenes satelitales MODIS y registros meteorológicos. Para ello fueron utilizadas imágenes satelitales MODIS captadas por el satélite AQUA. Estas imágenes permitieron identificar la máxima superficie cubierta por nieve con una resolución espacial de 500 m (*Maximum snow extent over the eight-day period*). La extensión de nieve en la cuenca de estudio mostró una máxima del 100% los días 30 septiembre-7 octubre, disminuyendo a un 36% entre los días 11-18 de diciembre (36%). La menor cobertura de nieve durante verano se observó en los días 2-9 de febrero (36%), aumentando durante los últimos días de marzo a un 60% debido a un evento inusual de precipitaciones. Los registros de albedo de nieve/detritos rocosos en la AWS Pirámide presentaron un cambio de albedo, asociado a un paso de nieve a detrito durante los últimos días de octubre, por lo que se consideró que a partir de esta fecha la contribución de nieve a los caudales disminuye, sin embargo, la ubicación de dicha AWS no permitió conocer los cambios de albedo de nieve a mayor elevación.

8. MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO

8.1 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO

En la siguiente sección se presentan los resultados del modelamiento hidrológico para los glaciares en estudio. En la Tabla 82 se detalla el resultado de la calibración de cada modelo hidrológico. Posteriormente se detallan los resultados de balance de masa en función de la elevación, caudal a la salida de cada glaciar y el aporte a la escorrentía de cada fuente (pluvial, nival o glaciar).

Tabla 82: Parámetros calibrados en las cuencas estudio

Módulo	Parámetro	Nombre	Valores calibrados		
			Glaciar Tapado	Río del Yeso	Estero Morales
Modelo ETI	SRF	Factor de onda corta	0.0034	0.0061	0.0084
	TF	Factor de temp.	0.1438	0.0537	0.0000
	TT	Temp. umbral	0.5	-1	-1
Modelo D-ETI	TF_FAC	Factor de temp.	0.0005	0.0170	0.0170
	TF_EXP	Exponente de temp.	1.6821	0.4043	0.4043
	SRF_FAC	Factor de onda corta	0.0018	0.0114	0.0114
	SRF_EXP	Exponente de onda corta	5.2	44.2	44.2
	Lag1	Factor 1 de retraso del derretimiento	30	36	36
	Lag2	Factor 2 de retraso del derretimiento	1	1	1
Decaimiento del albedo	AlbParam1	Albedo máximo	0.760	0.828	0.847
	AlbParam2	Coeficiente de decaimiento	0.190	0.102	0.141
Otros nieve	MeltOnsetTimesteps	Demora del derretimiento a principio de temporada	24	168	168
	MeltOnsetTemp	Temp. umbral para demora del derretimiento a principio de temporada	0	0	0
Otros glaciar	Tmod	Disminución de temp. en celda glaciar descubierta	3	1	1
	Tmod_debris	Aumento de temp. en celda glaciar cubierta	0	0.3	0.3
Distribución gravitacional de nieve	SlopeMax	Pendiente máxima	0.9	0.9	0.9
	SGR_a	Coeficiente 1 de distribución gravitacional	0.17245	0.17245	0.17245
	SGR_C	Coeficiente 2 de distribución gravitacional	250	250	250

Almacenamiento de agua líquida en el glaciar	kIce	Coef. de almacenamiento glaciar	70	5	5
	kSnow	Coef. de almacenamiento nival	200	45	45
Parámetros de suelo	Depth	Profundidad capa 1 suelo	1	1	1
	ExpH	Coeficiente de la ecuación de permeabilidad (capa 1)	3.5	3.5	3.5
	ExpV	Coeficiente de la ecuación de permeabilidad (capa 1)	11.0	11	11
	Ksh	Conductividad horizontal capa 1 de suelo	0.01	0.0001	0.0001
	Ksv	Conductividad vertical capa 1 de suelo	0.01	0.001	0.001
	Theta_r	Contenido de agua residual (capa 1)	0.02	0.02	0.02
	Theta_s	Contenido de agua en saturación (capa 1)	0.3	0.7	0.7
	Sigma	Coeficiente de drenaje	1	1	1
	MinETA	Humedad mínima para tener evapotranspiración	0.01	0.01	0.01
	MinETP	Humedad mínima para que la evapotranspiración real sea igual a la potencial	0.3	0.3	0.3
	Depthlow	Profundidad capa 2 suelo	3	10	10
	ExpHlow	Coeficiente de la ecuación de permeabilidad (capa 2)	2.5	2.5	2.5
	ExpVlow	Coeficiente de la ecuación de permeabilidad (capa 2)	20	20	20
	Kshlow	Conductividad horizontal capa 2 de suelo	0.01	0.00001	0.00001
	Ksvlow	Conductividad vertical capa 2 de suelo	0.01	0.0001	0.0001
	Theta_rlow	Contenido de agua residual (capa 2)	0.1	0.2	0.2
	Theta_slow	Contenido de agua en saturación (capa 2)	0.45	0.7	0.7

Evapotranspiración	MAKKINK_c1	Coeficiente de Makkink 1	1.25	1.25	1.25
	MAKKINK_c2	Coeficiente de Makkink 2	0	0	0

8.1.1 *Glaciar Tapado*

Los resultados para la cuenca del glaciar Tapado mostraron que el balance de masa en la parte inferior es relativamente neutro, debido a la cobertura de detritos presente en esa zona (Figura 98). A elevaciones medias (4700-5200 m snm) el balance de masa fue negativo para el año 2014-2015 y positivo para el año 2013-2014, debido a la mayor acumulación nival registrada ese año. En ambas temporadas el balance de masa fue positivo en la parte superior (>5200 m snm). Sin embargo, dado que TOPKAPI-ETH no incluye la sublimación de nieve, es posible que el balance de masa este sobreestimado en aquellas áreas.

La comparación de caudales generados sobre el glaciar Tapado por la fuente nival y glaciar (Figura 99) muestra claramente la diferencia en la meteorología de ambas temporadas. En efecto, para 2013-14, los caudales generados de la nieve sobre el glaciar Tapado fueron bastante superiores a los generados por el hielo. Al haber más acumulación nival hay un mayor volumen disponible para el derretimiento y un espesor más grande que protege a la superficie de hielo. El efecto contrario sucede en 2014-15, la baja cobertura nival aportó poco volumen al caudal y, al desaparecer de forma temprana, dejó al descubierto la superficie glaciar durante la mayor parte del verano.

Si analizamos los resultados a la escala de la cuenca completa (Figura 100), se observó que el aporte nival es el más importante (sobre el 75% del total anual) en ambas temporadas. Sin embargo, en la temporada 2014-15 el aporte del derretimiento glaciar superó el 20% del total anual y el 50% del total estival.

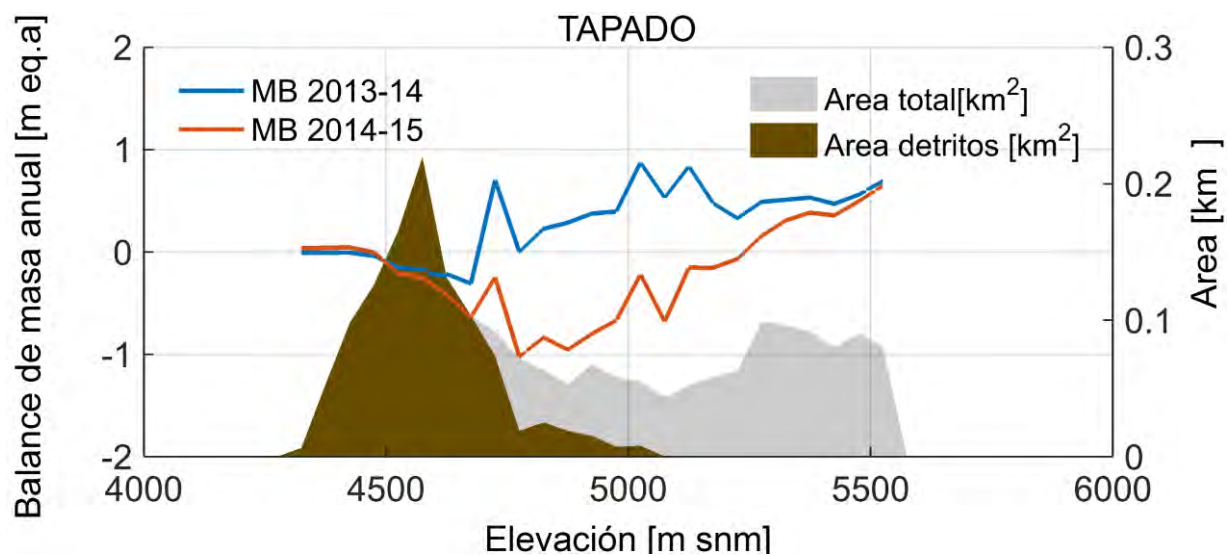


Figura 98: Balance de masa en función de la elevación y área para las temporadas 2013-14 y 2014-15 para el glaciar Tapado.

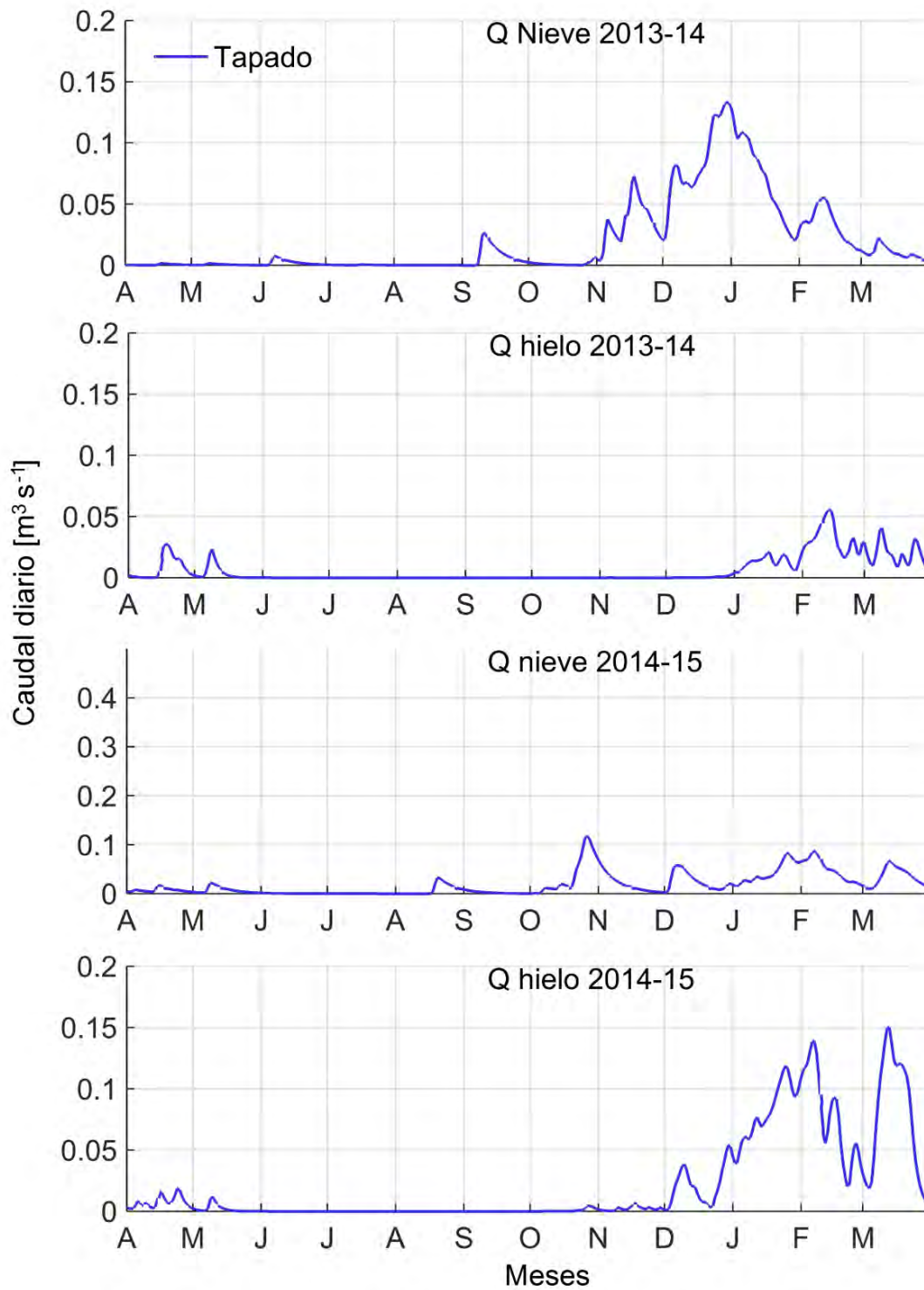


Figura 99: Comparación de caudales observados y simulados en la cuenca del glaciar Tapado

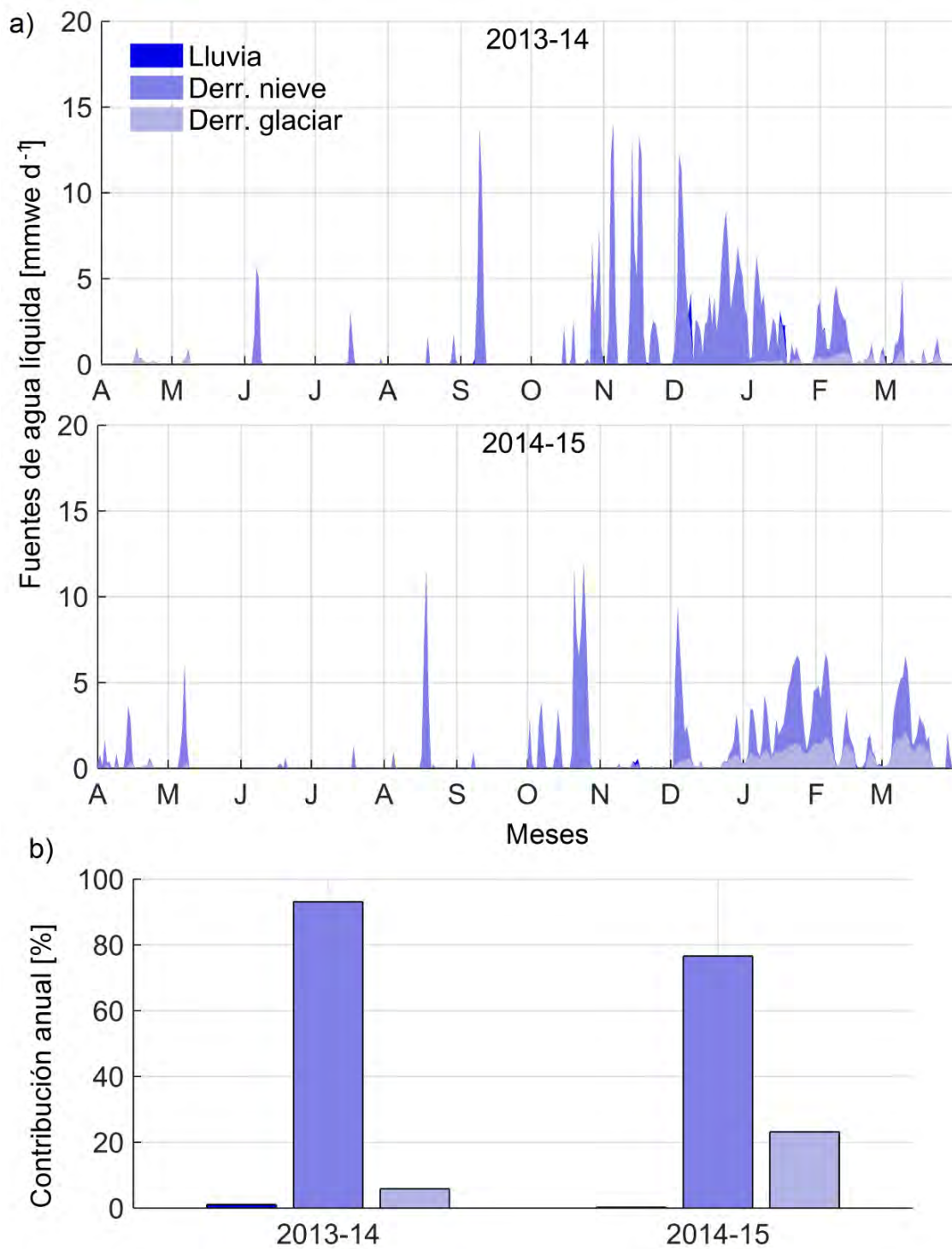


Figura 100: Resumen del aporte pluvial, nival y glaciar en la cuenca del glaciar Tapado

8.1.2 *Glaciar Bello, Yeso y Pirámide*

En la siguiente sección se muestran en detalle los resultados de la validación y calibración del modelo TOPKAPI-ETH para los glaciares Bello, Yeso y Pirámide. Los parámetros obtenidos en esta cuenca fueron también usados en el glaciar San Francisco.

En la Figura 101 se presenta una comparación entre la altura de nieve medida al final de la temporada de acumulación 2013 y 2014 en los glaciares Bello y Pirámide y la simulación entregada por TOPKAPI-ETH para los mismos sitios y fechas. Los gradientes de precipitación fueron estimados tratando de encontrar el mejor ajuste entre estos datos y las simulaciones. Esta Figura corresponde al paso 2 de la Figura 6.

En la Figura 102 se presentan los resultados de la validación de las temperaturas observadas en las estaciones automáticas y las estacas de ablación. Esta Figura corresponde al paso 4 de la Figura 6. En general se aprecia una buena simulación de la temperatura del aire sobre la cuenca. El peor ajuste ocurre sobre el glaciar Yeso, probablemente debido a la influencia de vientos catabáticos o descendentes. La validación de la ablación de hielo es aceptable tanto en áreas glaciares cubiertas por detritos (PI) o descubiertas (BE L y BE H).

En la Figura 103 se presentan los resultados de la validación del albedo distribuido y el área cubierta de nieve en el área monitoreada fotográficamente en el glaciar Bello. A excepción de algunos eventos de precipitación que no son debidamente calculados (~14 Marzo de 2014 y en 29 Marzo de 2014) y de periodos de derretimiento que no son debidamente capturados (entre el 29 de Marzo y el 1 de Abril), la validación del albedo distribuido es considerada aceptable ya que sigue las variaciones principales durante ambas temporadas de ablación.

En la Figura 104 se muestra la calibración de los coeficientes de almacenamiento lineal en la cobertura nival y la superficie glaciar. Estos coeficientes son calibrados usando las mediciones efectuadas en ambas temporadas a la salida de los glaciares Bello y Yeso. Si bien estas mediciones son escasas, fue posible efectuar una calibración aceptable de ambos coeficientes.

En la Figura 105 a la Figura 107 se muestran los resultados de la modelación para la cuenca del Río del Yeso. Los resultados muestran que el balance de masa tiene una relación con la elevación para los glaciares descubiertos, pero no en el glaciar cubierto (Figura 105). Este resultado es consistente con otros resultados obtenidos en otras partes del mundo (Ragettli et al., 2014) y muestran que un glaciar cubierto es el espesor de los detritos el que controla la ablación. Por otro lado, en el glaciar Pirámide es posible observar un gran aporte de las avalanchas de nieve alrededor de los 4000 m snm durante la temporada 2013-2014.

Los aportes de caudal muestran resultados similares al glaciar Tapado en cuanto a las diferencias meteorológicas en ambas temporadas, teniendo el año 2013 más precipitación que el año 2014 (Figura 106). Esto se refleja también en los aportes a la esorrentía de la cuenca (Figura 107).

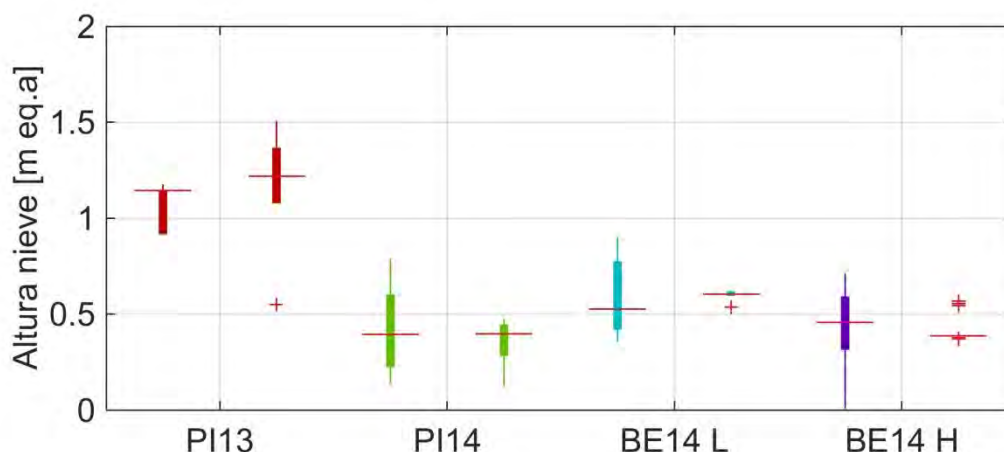


Figura 101: Calibración de gradientes de precipitación. Para cada sitios a la izquierda se presenta la altura de nieve observada y la derecha la simulada; PI= Pirámide, BE=Bello; 13 y 14 se refieren a las temporadas 2013 y 2014. En el caso de Bello, los datos medidos sobre los 4250 m snm se denominan L y los datos medidos por sobre ese límite se denominan H.

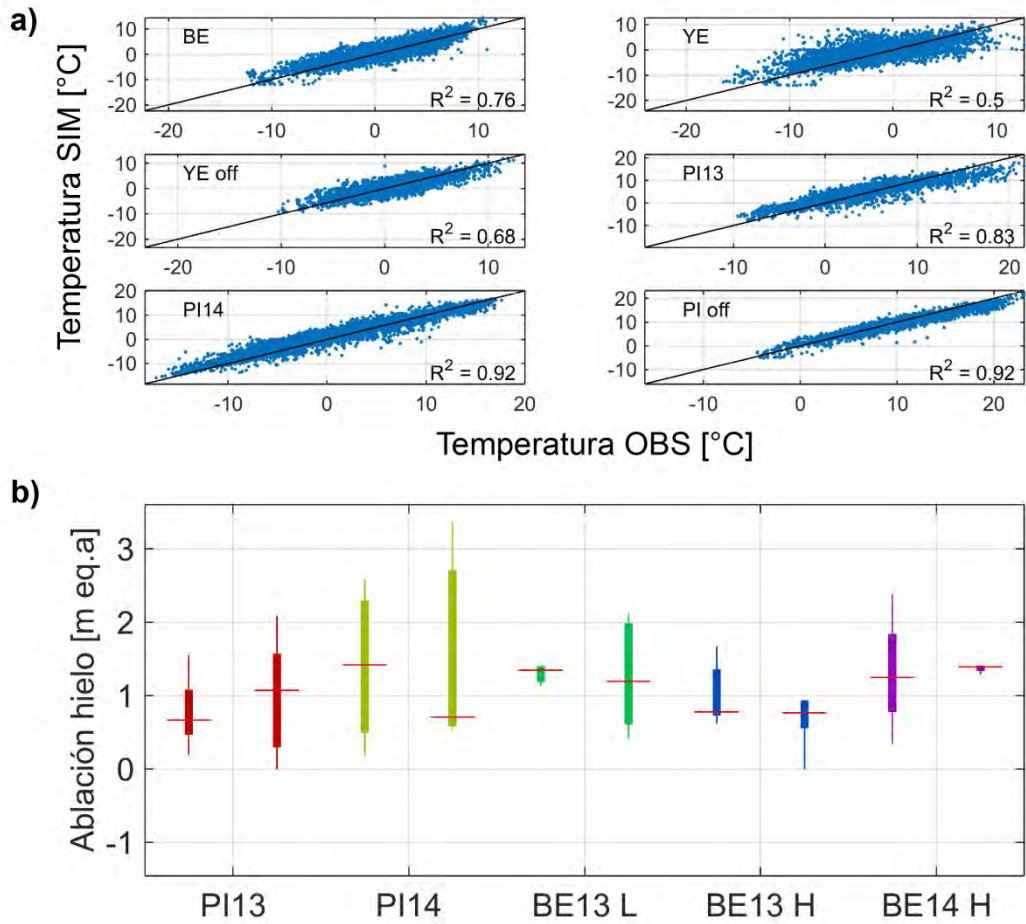


Figura 102: Validación de temperatura del aire (a) y estacas de ablación (b). Para cada sitios a la izquierda se presenta la altura de nieve observada y la derecha la simulada; PI= Pirámide, BE=Bello; 13 y 14 se refieren a las temporadas 2013 y 2014. En el caso de Bello, los datos medidos sobre los 4250 m snm se denominan L y los datos medidos por sobre ese límite se denominan H.

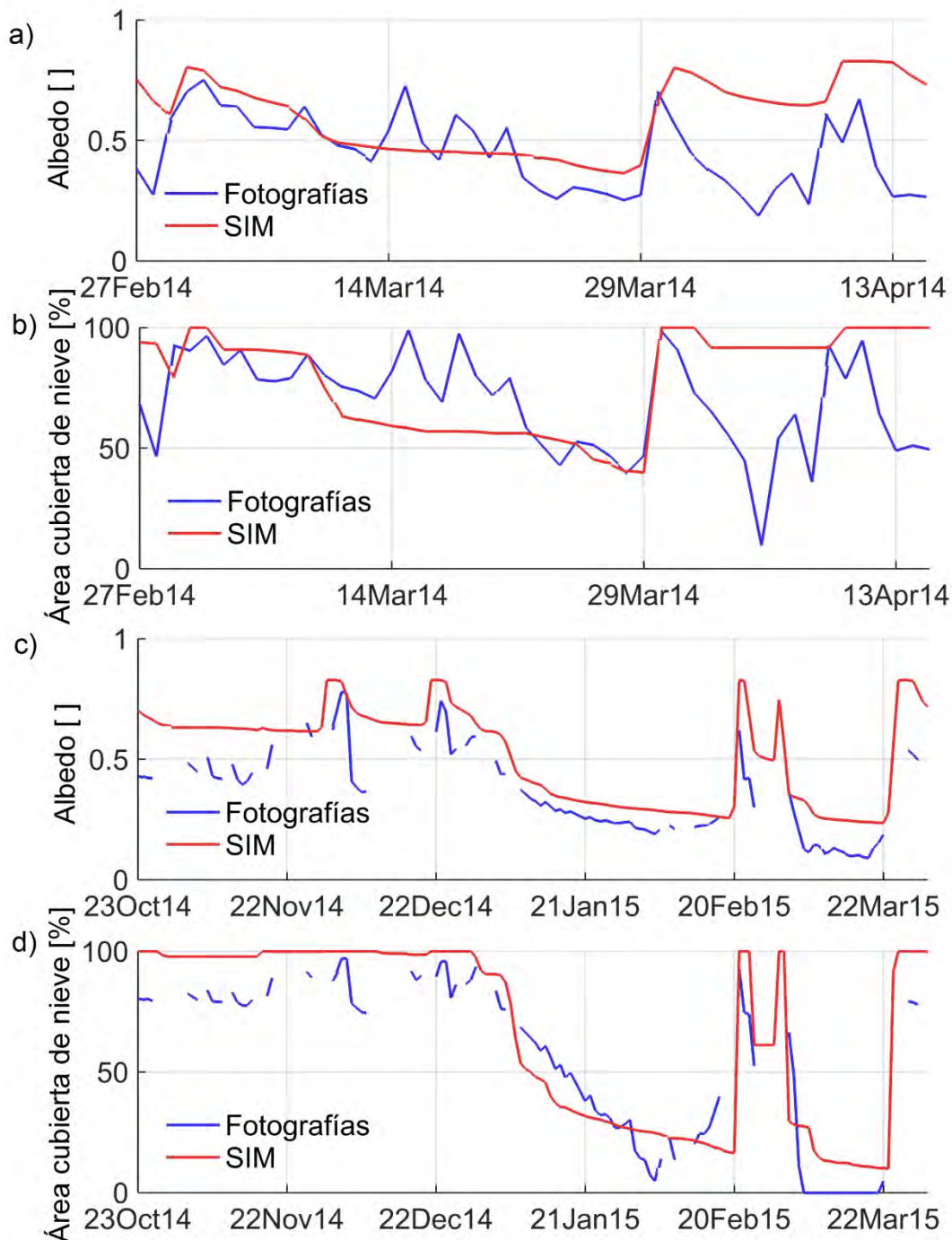


Figura 103: Validación de albedo distribuido y área cubierta de nieve en el glaciar Bello. Se comparan los datos de albedo distribuido derivados de las fotografías tomadas en el curso de este proyecto y la simulación de TOPKAPI-ETH para la misma área. El área cubierta de nieve es calculada usando un umbral en el albedo de 0,3.

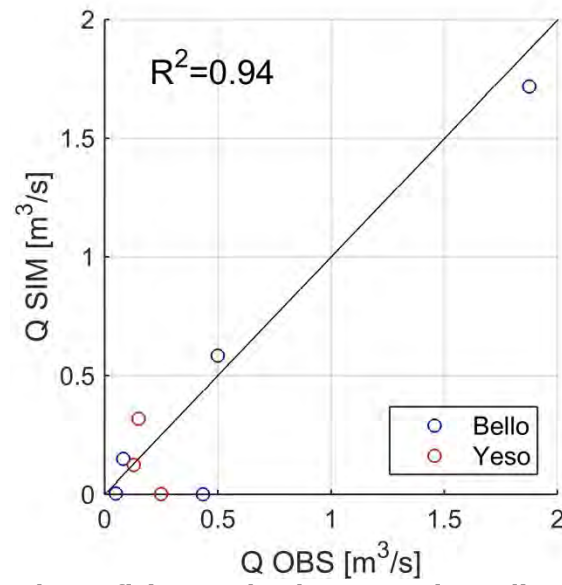


Figura 104: Calibración de coeficientes de almacenamiento lineales en el almacenamiento nival y glaciario en el glaciar Bello y Yeso.

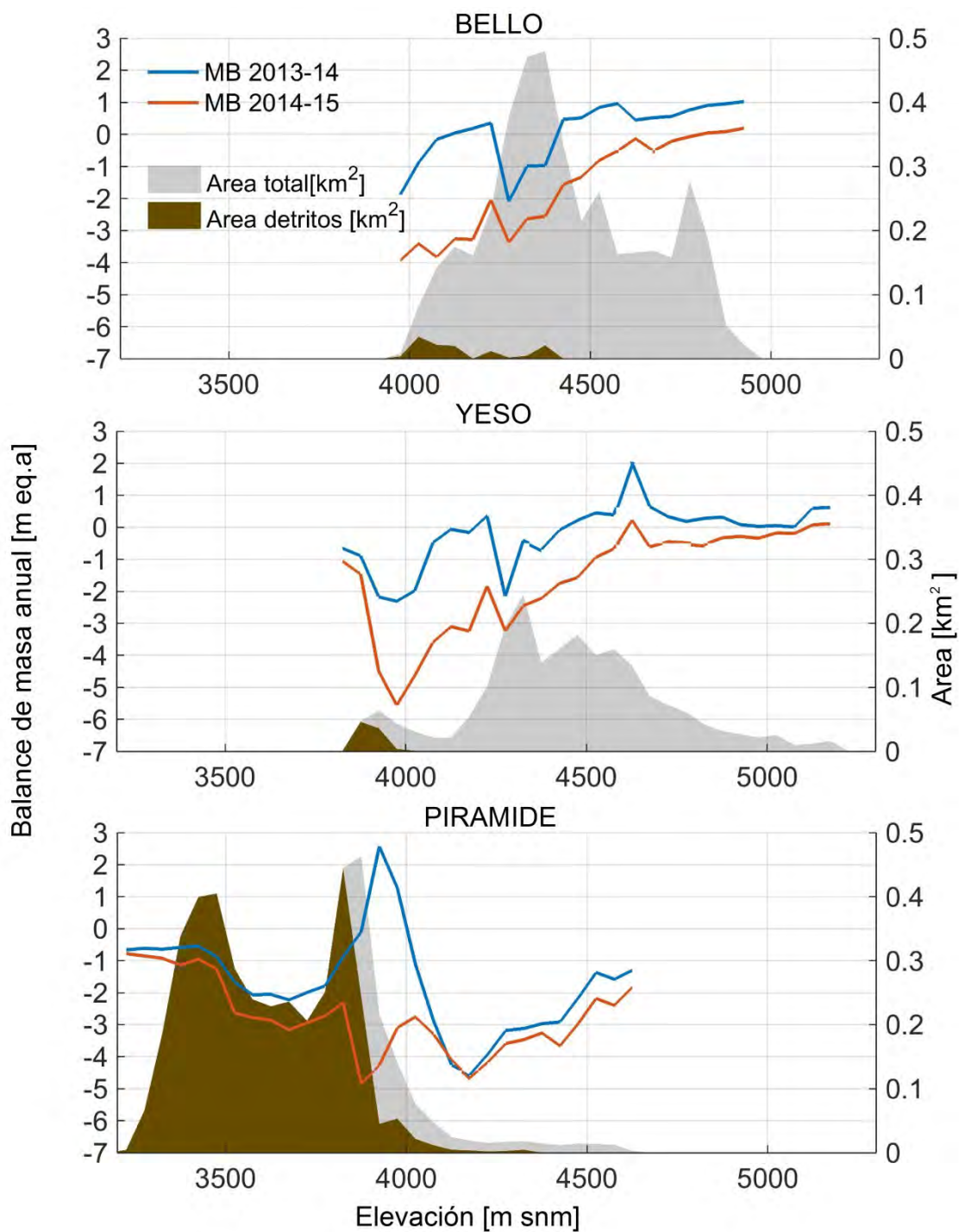


Figura 105: Balance de masa en función de la elevación y área para las temporadas 2013-14 y 2014-15 para los glaciares Bello, Yeso y Pirámide.

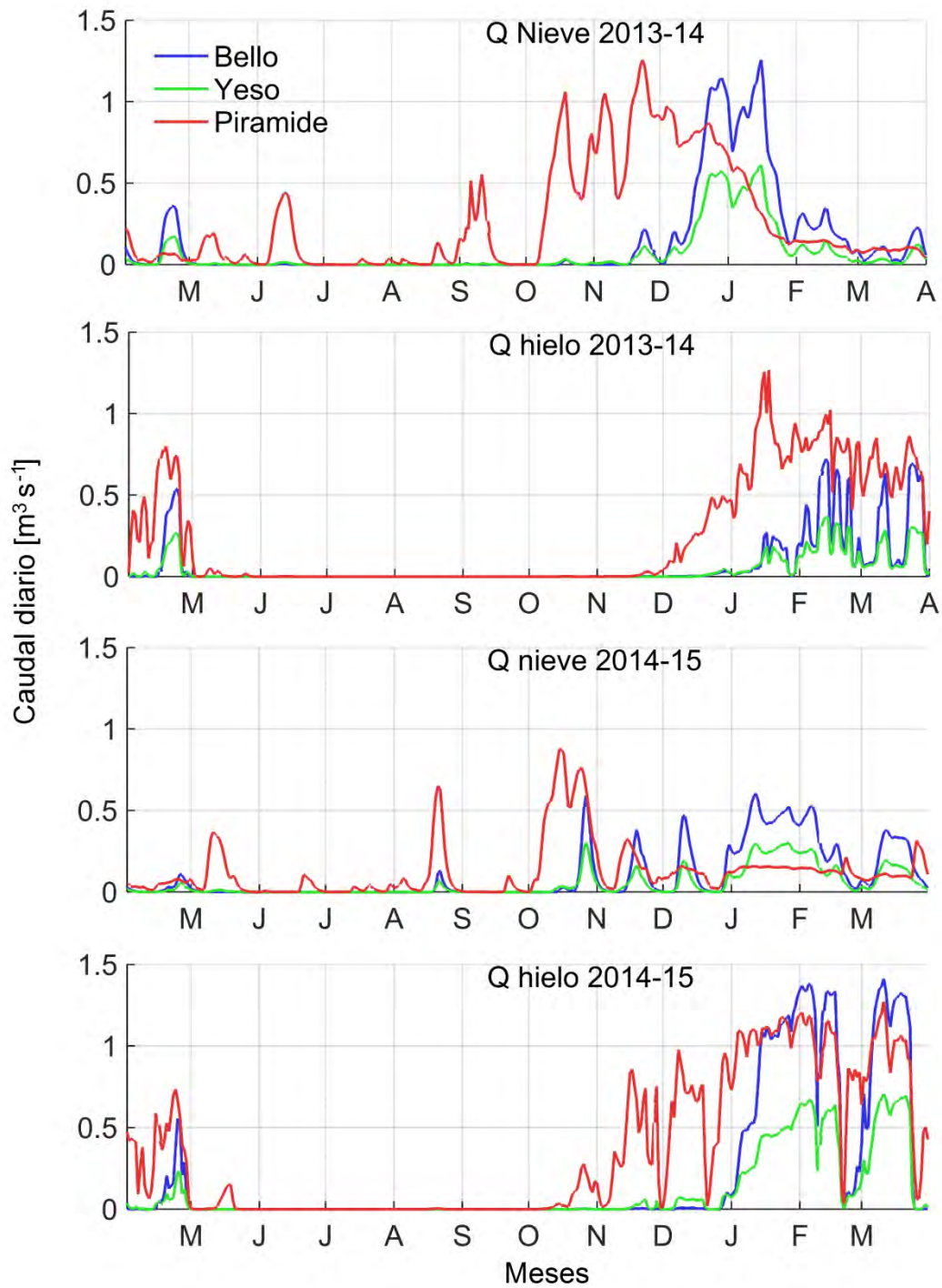


Figura 106: Caudales simulados en la salida de los glaciares Bello, Yeso y Pirámide

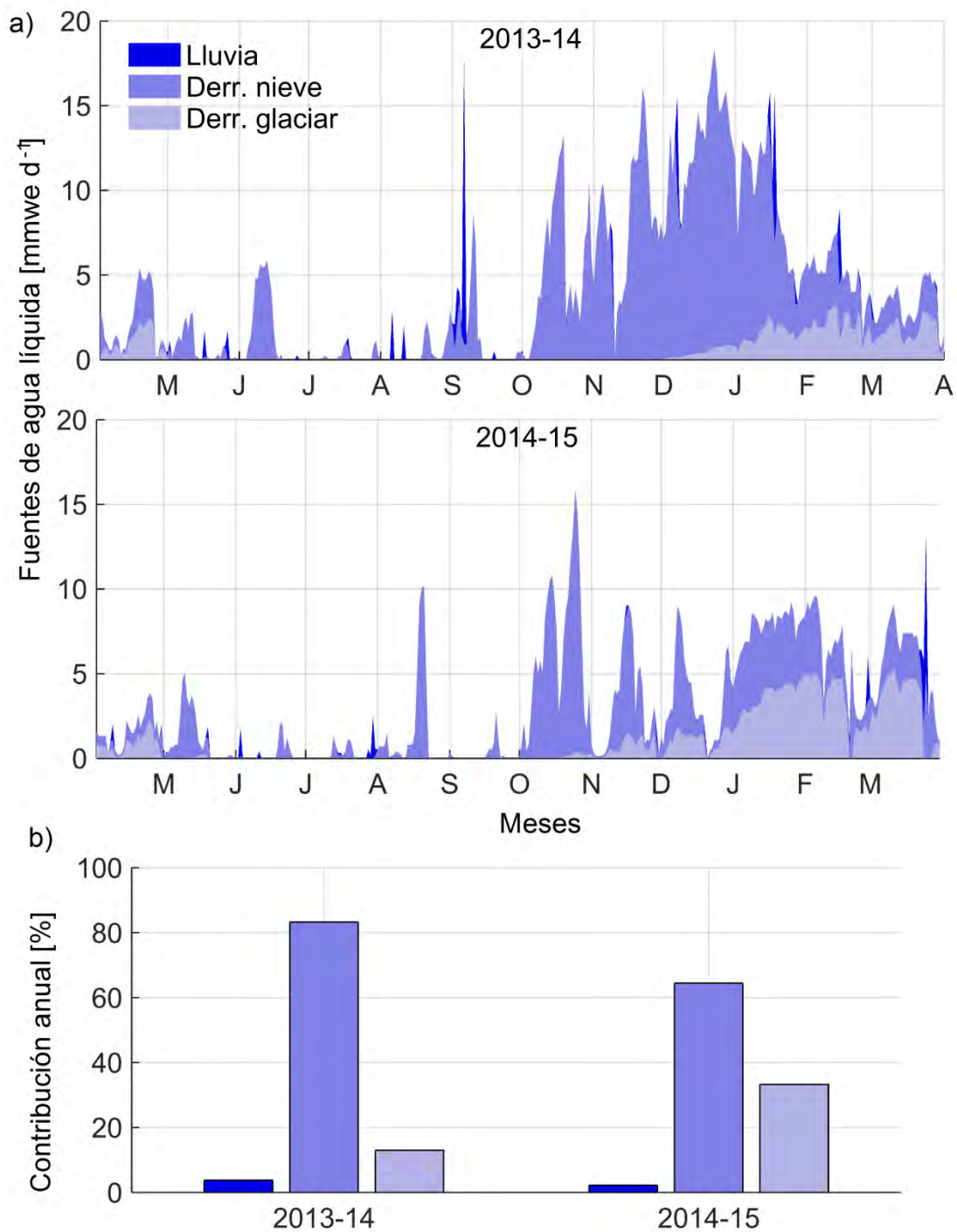


Figura 107: Resumen del aporte pluvial, nival y glaciar en la cuenca del estero Yeso en Termas del Plomo.

8.1.3 Glaciar San Francisco

Los resultados para la cuenca del glaciar San Francisco muestran que el balance de masa es negativo en todo el rango de elevaciones durante ambas temporadas (Figura 108). No se observó una relación importante con la elevación probablemente debido a la interacción entre la cubierta de detritos y por la distribución gravitacional. Esta última generó puntos donde se acumulan avalanchas provenientes de elevaciones superiores.

La comparación de los caudales generados sobre el glaciar San Francisco por la fuente nival y glaciar (Figura 109), indicaron un aporte del caudal glaciar mucho mayor en relación al nival y no muestra claramente las diferencias meteorológicas entre ambas temporadas, tal como en los glaciares de las cuencas de Tapado y Río del Yeso.

Los resultados a la escala de la cuenca completa (Figura 110) mostraron que en la temporada 2013-2014 el aporte nival y glaciar son comparables, mientras en 2014-2015 el aporte glaciar a la esorrentía fue superior al del aporte nival (casi un 60% del total anual y prácticamente el 100% del total estival). En esta cuenca, la precipitación líquida tiene una importancia relativamente mayor en comparación con las cuencas de Tapado y Río del Yeso. Todos estos resultados reflejan claramente el papel que desempeña la baja elevación a la que se encuentra el glaciar San Francisco.

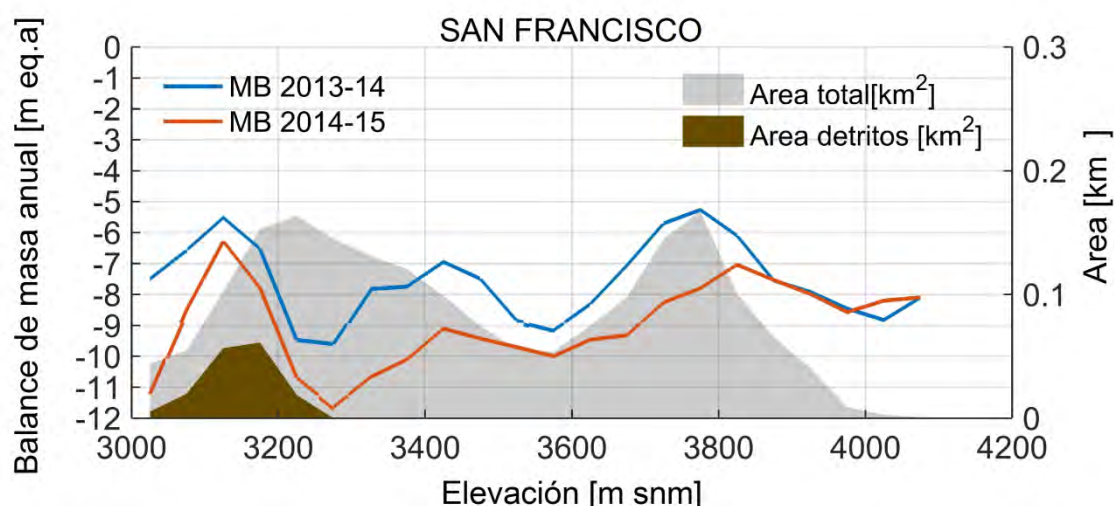


Figura 108: Balance de masa en función de la elevación y área para las temporadas 2013-2014 y 2014-2015 para el glaciar San Francisco.

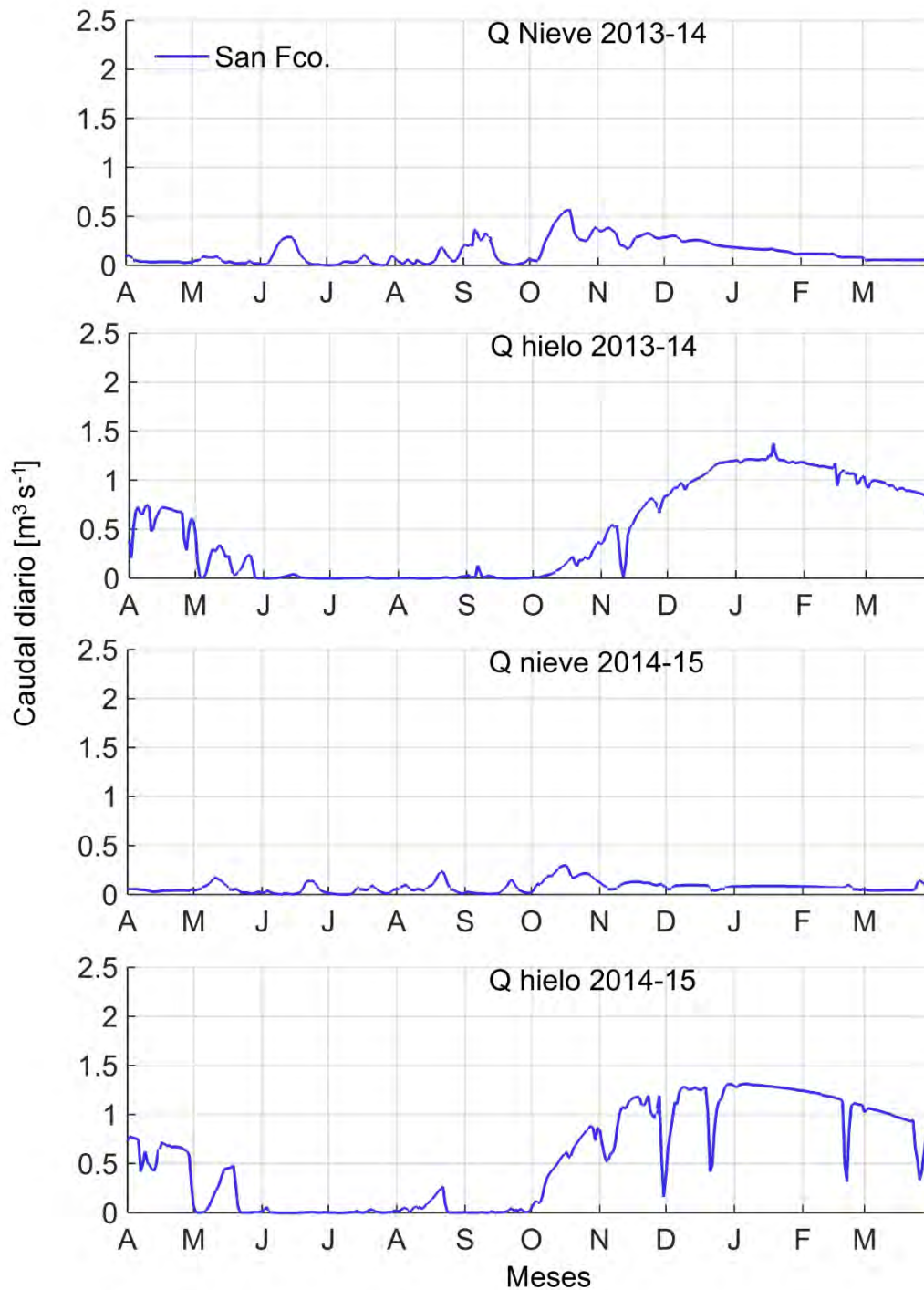


Figura 109: Caudales simulados en la salida del glaciar San Francisco.

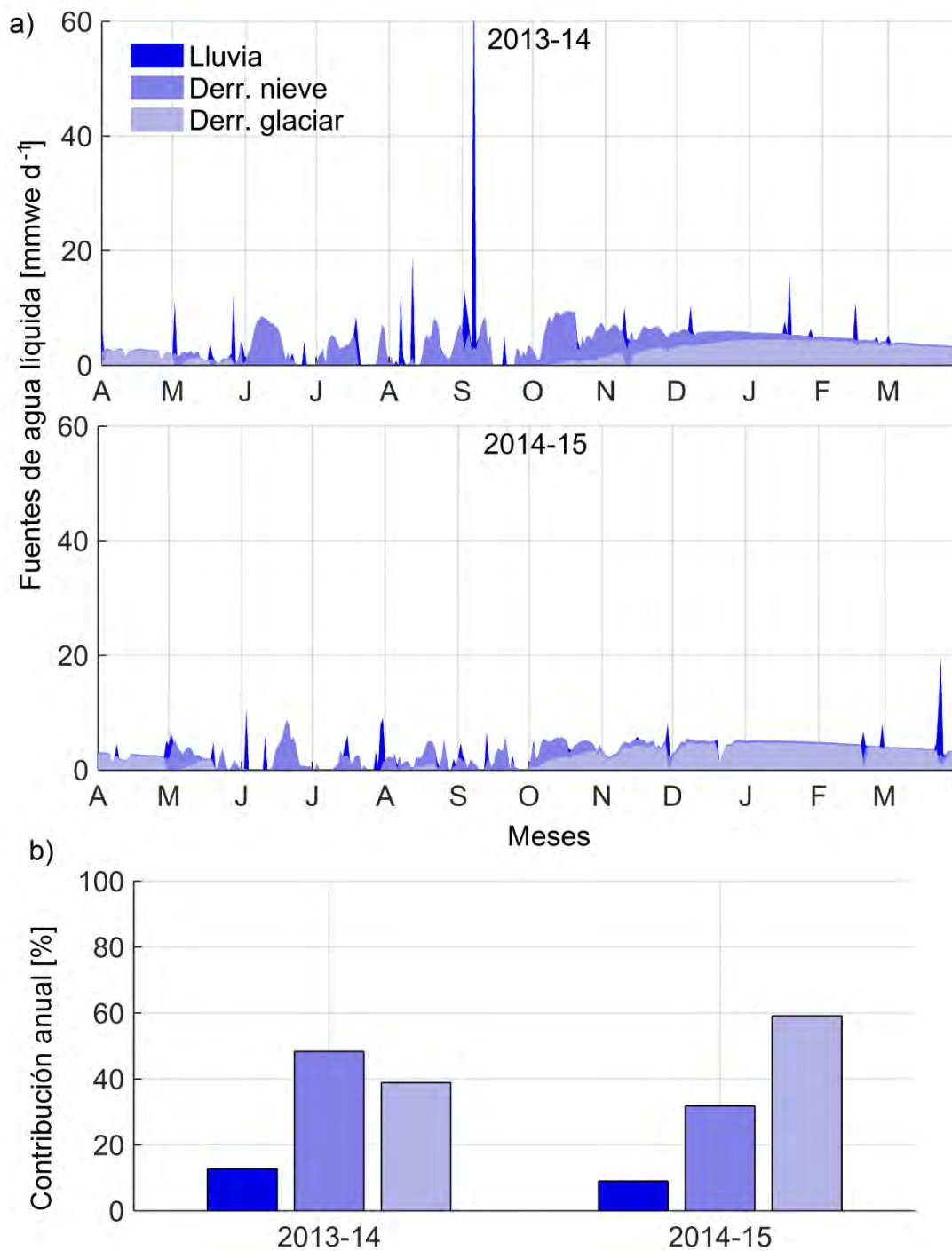


Figura 110: Resumen del aporte pluvial, nival y glaciar en la cuenca del estero Morales en puente CONAF.

9. RÉGIMEN TÉRMICO DE LA CAPA ACTIVA DE LOS GLACIARES ROCOSOS

9.1.1 Análisis de temperaturas superficiales

Desde noviembre de 2013 hasta diciembre de 2015 se han realizado un total de cuatro campañas de terreno para la descarga de datos de temperatura desde los MTDs. Durante el invierno de 2013 todos los MTDs se encontraban fuera de servicio por agotamiento de baterías. Para octubre de 2014 solo 2 de los 19 MTDs del glaciar rocoso Llano de Las Liebres no se encontraban operativos (X6 y X12), siendo estos 2 MTDs reiniciados para comenzar con sus mediciones nuevamente. En mayo de 2015 4 MTDs no pudieron ser descargados por estar cubiertos de nieve (X8, X9, X10, X13). A igual que en Llano de las liebres, en el glaciar rocoso Tapado todos los MTDs se encontraban fuera de servicio durante el invierno de 2013 por falta de mantención y baterías. Durante el verano 2013-2014, personal de CEAZA puso en servicio la red de MTDs. En octubre de 2014 solo 4 MTDs se encontraban no operativos (X6, X4 y X2), por la temporada de invierno anterior. Personal de CEAZA descargó y realizó mantención de los MTDs en octubre de 2014 y mayo de 2015. Actualmente, solo un MTD (X3) no se encuentra operativo. La mayor parte de los problemas se ha presentado en el glaciar rocoso Tapado por la pérdida de algunos datos y medición errónea, especialmente durante el invierno de 2013. Esto se debe a las condiciones climáticas extremadamente adversas de este lugar. Desde la Tabla 83 hasta Tabla 88, se presentan el estado de los MTDs en los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado.

Tabla 83. Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Tapado al 20-11-2014.

ID Terreno	ID MTD	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m snm)	Estado de los MTD 10-12-2013	Días continuos de registro desde abril 2012
X1	2447-528	412093,3	6663535,0	4370	Batería sin carga	452
X2	1005-4218	412073,2	6663525,6	4371	Fuera de servicio	s/d*
X3	2447-532	411780,4	6663463,7	4472	Batería sin carga	282
X4	2447-504	411780,4	6663463,7	4472	Fuera de servicio	s/d
X01	2447-499	412128,6	6663195,7	4392	Fuera de servicio	s/d
X02	2447-502	412058,0	6663212,3	4412	Bajo penitentes	s/d
X03	9671-481	411697,6	6663245,3	4483	No encontrado	s/d
X04	1005-4220	411721,6	6663264,1	4477	Fuera de servicio	s/d
X05	2447-520	411609,7	6663331,2	4509	Bajo penitentes	s/d
X06	2447-533	411587,0	6663360,7	4514	No encontrado	s/d
X010	2447-534	411526,8	6663077,7	4504	Fuera de servicio	s/d
X011	9671-478	411608,2	6663010,8	4510	No encontrado	s/d
X012	998-6080	411792,1	6663015,6	4464	No encontrado	s/d
X013	9671-482	412136,6	6663057,1	4398	Batería sin carga	452
X014	2447-531	412533,3	6663311,9	4297	Batería sin carga	452
X015	2447-509	412744,4	6663833,6	4232	Batería sin carga	452
X5A	2447-517	411474,4	6663545,4	4518	Fuera de servicio	s/d
X6A	2447-516	411486,5	6663882,9	4552	Fuera de servicio	s/d
X7A	2447-510	411547,2	6663738,3	4510	Fuera de servicio	s/d

*Sin datos

Tabla 84: Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Tapado al 18-05-2015.

ID Terreno	ID MTD	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m snm)	Estado de los MTD al 18-05-2015	Días continuos de registro desde 22-10-2014
X1	2447-528	412093,3	6663535,0	4370	Cubierto de nieve	s/d*
X2	1005-4218 (10208163)	412073,2	6663525,6	4371	Operativo	208
X3	2447-532	411780,4	6663463,7	4472	No operativo	0
X4	2447-504	411780,4	6663463,7	4472	Cubierto de nieve	s/d
X01	2447-499	412128,6	6663195,7	4392	Operativo (con fallas desde 8-4-2015)	208
X02	2447-502	412058,0	6663212,3	4412	Cubierto de nieve	s/d
X03	9671-481 (10054219)	411697,6	6663245,3	4483	Cubierto de nieve	s/d
X04	1005-4220 (1043-8143)	411721,6	6663264,1	4477	Cubierto de nieve	s/d
X05	2447-520	411609,7	6663331,2	4509	Cubierto de nieve	s/d
X06	1043-8141 (10505944)	411587,0	6663360,7	4514	Cubierto de nieve	s/d
X010	2447-534	411526,8	6663077,7	4504	Cubierto de nieve	s/d
X011	9671-478	411608,2	6663010,8	4510	Cubierto de nieve	s/d
X012	998-6080	411792,1	6663015,6	4464	Cubierto de nieve	s/d
X013	9671-482	412136,6	6663057,1	4398	Operativo	208
X014	2447-531	412533,3	6663311,9	4297	Operativo	204
X015	2447-509	412744,4	6663833,6	4232	Cubierto de nieve	s/d
X5A	2447-517 (10505942)	411474,4	6663545,4	4518	Operativo	208
X6A	2447-516	411486,5	6663882,9	4552	Cubierto de nieve	s/d
X7A	2447-510 (1043-8142)	411547,2	6663738,3	4510	Cubierto de nieve	s/d

*Sin datos

Tabla 85. Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Tapado al 02-12-2015.

<i>ID Terreno</i>	<i>ID MTD</i>	<i>Este (m)</i>	<i>Norte (m)</i>	<i>Altitud (m snm)</i>	<i>Estado de los MTD al 02-12- 2015</i>	<i>Días continuos de registro desde 18/05/2015</i>
X1	2447-528	412 093,3	6 663 535,0	4 370	No operativo	0
X2	1005-4218 (10208163)	412 073,2	6 663 525,6	4 371	Operativo	198
X3	2447-532	411 780,4	6 663 463,7	4 472	Operativo	198
X4	2447-504	411 780,4	6 663 463,7	4 472	No operativo	0
X01	2447-499	412 128,6	6 663 195,7	4 392	No operativo	0
X02	2447-502	412 058,0	6 663 212,3	4 412	Cubierto de nieve	s/d*
X03	9671-481 (10054219)	411 697,6	6 663 245,3	4 483	Cubierto de nieve	s/d
X04	1005-4220 (1043-8143)	411 721,6	6 663 264,1	4 477	No operativo (datos hasta el 28-07-2015)	71
X05	2447-520	411 609,7	6 663 331,2	4 509	Cubierto de nieve	s/d
X06	1043-8141 (10505944)	411 587,0	6 663 360,7	4 514	No operativo (falla temp int y ext)	0
X010	2447-534	411 526,8	6 663 077,7	4 504	Cubierto de nieve	s/d
X011	9671-478	411 608,2	6 663 010,8	4 510	Cubierto de nieve	s/d
X012	998-6080	411 792,1	6 663 015,6	4 464	Cubierto de nieve	s/d
X013	9671-482	412 136,6	6 663 057,1	4 398	Cubierto de nieve	s/d
X014	2447-531	412 533,3	6 663 311,9	4 297	Retirado**	s/d
X015	2447-509	412 744,4	6 663 833,6	4 232	Cubierto de nieve	s/d
X5A	2447-517 (10505942)	411 474,4	6 663 545,4	4 518	Cubierto de nieve	s/d
X6A	2447-516	411 486,5	6 663 882,9	4 552	Cubierto de nieve	s/d
X7A	2447-510 (1043-8142)	411 547,2	6 663 738,3	4 510	Cubierto de nieve	s/d

* Sin Datos

** Retirado por solicitud de Diego Gonzalez (DGA).

Tabla 86. Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Llano de las Liebres al 13-12-2013.

ID Terreno	ID MTD	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m snm)	Estado de los MTD al 13-12-2013	Días continuos de registro desde abril 2012
X1	2447-519	409123,5	6652717,7	3798	Fuera de servicio	s/d*
X2	2447-525	409123,5	6652717,7	3798	Batería sin carga	452
X3	2447-523	408906,7	6653050,0	3941	Batería sin carga	452
X4	2447-503	408898,6	6653063,1	3941	Batería sin carga	452
X5	2447-512	408872,0	6653029,7	3924	Fuera de servicio	s/d
X6	1005-4221	408839,9	6653062,0	3928	Batería sin carga	452
X7	998-6081	408672,4	6653305,4	3997	Batería sin carga	452
X8	2447-500	408699,3	6653325,1	4009	Batería sin carga	452
X9	2447-508	408767,7	6653377,9	4054	Batería sin carga	452
X10	2447-524	408663,1	6653596,1	4107	Bajo penitentes	s/d
X12	2447-527	408546,7	6653632,4	4078	Batería sin carga	452
X13	998-6084	408535,3	6653610,7	4071	Bajo penitentes	s/d
X14	2447-518	408458,8	6653382,3	4044	Batería sin carga	452
X15	2447-522	408777,6	6652938,2	3905	Fuera de servicio	s/d
X16	2447-501	408899,7	6652612,5	3807	Batería sin carga	452
X17	998-6083	408993,6	6652464,5	3743	Batería sin carga	452
X18	2447-514	408957,8	6652484,5	3757	Fuera de servicio	s/d
X19	9671-480	409040,9	6652443,6	3717	Batería sin carga	452
X20	2447-496	409026,5	6652442,3	3717	Batería sin carga	452

*Sin datos

Tabla 87: Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Llano de las Liebres al 15-05-2015.

ID Terreno	ID MTD	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m snm)	Estado de los MTD al 15-05-2015	Días continuos de registro desde 23-10-2014
X1	2447-519 (10505943)	409123,5	6652717,7	3798	Operativo	204
X2	2447-525	409123,5	6652717,7	3798	Operativo	204
X3	2447-523	408906,7	6653050,0	3941	Operativo	204
X4	2447-503	408898,6	6653063,1	3941	Operativo	204
X5	2447-512	408872,0	6653029,7	3924	Operativo	204
X6	1005-4221	408839,9	6653062,0	3928	No operativo-reiniciado	s/d*
X7	998-6081	408672,4	6653305,4	3997	Operativo	204
X8	2447-500	408699,3	6653325,1	4009	Cubierto de nieve	s/d
X9	2447-508	408767,7	6653377,9	4054	Cubierto de nieve	s/d
X10	2447-524	408663,1	6653596,1	4107	Cubierto de nieve	s/d
X12	2447-527	408546,7	6653632,4	4078	No operativo-reiniciado	s/d
X13	998-6084	408535,3	6653610,7	4071	Cubierto de nieve	s/d
X14	2447-518	408458,8	6653382,3	4044	Operativo	204
X15	2447-522	408777,6	6652938,2	3905	Operativo	204
X16	2447-501	408899,7	6652612,5	3807	Operativo	204
X17	998-6083	408993,6	6652464,5	3743	Operativo	204
X18	2447-514	408957,8	6652484,5	3757	Operativo	204
X19	9671-480	409040,9	6652443,6	3717	Operativo	204
X20	2447-496	409026,5	6652442,3	3717	Operativo	204

*Sin datos

Tabla 88. Estado de los MTDs instalados en el glaciar rocoso Llano de las Liebres al 11-12-2015.

<i>ID Terreno</i>	<i>ID MTD</i>	<i>Este (m)</i>	<i>Norte (m)</i>	<i>Altitud (m snm)</i>	<i>Estado de los MTD al 11-12-2015</i>	<i>Días continuos de registro desde 15/05/2015</i>
X1	2447-519 (10505943)	409.123,5	6.652.717,7	3.798	Operativo	210
X2	2447-525	409.123,5	6.652.717,7	3.798	Operativo	210
X3	2447-523	408.906,7	6.653.050,0	3.941	Operativo	210
X4	2447-503	408.898,6	6.653.063,1	3.941	Operativo	210
X5	2447-512	408.872,0	6.653.029,7	3.924	No operativo/Reiniciado	0
X6	1005-4221	408.839,9	6.653.062,0	3.928	No operativo/Reiniciado (temp int y ext falla)	0
X7	998-6081	408.672,4	6.653.305,4	3.997	Operativo	210
X8	2447-500	408.699,3	6.653.325,1	4.009	Cubierto de nieve	s/d*
X9	2447-508	408.767,7	6.653.377,9	4.054	Operativo	210
X10	2447-524	408.663,1	6.653.596,1	4.107	Cubierto de nieve	s/d
X12	2447-527	408.546,7	6.653.632,4	4.078	No operativo/Reiniciado	0
X13	998-6084	408.535,3	6.653.610,7	4.071	Cubierto de nieve	s/d
X14	2447-518	408.458,8	6.653.382,3	4.044	Cubierto de nieve	s/d
X15	2447-522	408.777,6	6.652.938,2	3.905	Operativo	210
X16	2447-501	408.899,7	6.652.612,5	3.807	Cubierto de nieve	s/d
X17	998-6083	408.993,6	6.652.464,5	3.743	Operativo	210
X18	2447-514	408.957,8	6.652.484,5	3.757	Operativo	210
X19	9671-480	409.040,9	6.652.443,6	3.717	Cubierto de nieve	s/d
X20	2447-496	409.026,5	6.652.442,3	3.717	Operativo	210

* Sin datos

Propósito

La temperatura superficial en áreas de montañas es afectada principalmente por la temperatura del aire, la radiación solar, las condiciones de la cubierta de nieve y las características del suelo. La mayoría de los estudios sobre régimen termal superficial, en áreas de montañas, han sido realizados en los Alpes Europeos y Japón (*Ishikawa*, 2003; *Lewkowicz*, 2008). Sin embargo, esta variable ha sido escasamente estudiada en la Cordillera de los Andes (*Apaloo et al.*, 2012).

La instalación y mantención de una red de MTDs en los glaciares rocosos Tapado y Llano de las liebres se ha realizado con el fin de monitorear la temperatura superficial (*Ground Surface Temperature*, GST) de estos glaciares rocosos, variable esencial para el estudio de la distribución del Permafrost (*Brenning et al.*, 2005). Con la obtención de estos datos es posible explorar las relaciones que hay entre GST y las condiciones de sitio, detectar presencia o ausencia de cobertura de nieve y sus características espaciales, determinar el régimen térmico de cada sitio (*Ishikawa*, 2003) y determinar un gradiente de temperatura para la elevación, entre otras.

Datos

Como se ha mencionado anteriormente los dataloggers fueron instalados usando criterios topográficos y de nivel altitudinal (DGA, 2010). Localmente los MTDs fueron agrupados en pares donde un equipo refleja el mínimo y otro el máximo de la cubierta de nieve (*longer-lasting snow*, LLS). Además fueron sub divididos en grupos (pares), de acuerdo su localización espacial. En total 38 MTDs fueron instalados y localizados con GPS durante el mes de diciembre 2009, con un intervalo de medición de 30 minutos. Un canal o sensor fue enterrado a 5 cm bajo el suelo y el otro sensor fue expuesto a 50 cm sobre el suelo, por medio de un poste.

Fueron excluidos del análisis datos de temperatura a 50 cm del suelo, debido a la ausencia de cubierta de nieve a esta altura en la mayoría de los puntos. Por otro lado también fueron excluidos los MTDs que presentan menos de un 80% de datos válidos cada año hidrológico, esto para poder calcular una temperatura promedio anual (*Mean Ground Surface Temperature*, MGST) de la mejor calidad posible.

Durante el año hidrológico 2012-2013 10 MTDs presentaron fallas y pérdida de datos, presentando datos válidos inferiores al 80% del registro, por lo que fueron sacados del análisis. Durante el año 2013-2014 se registró una pérdida masiva de datos durante el mes de julio. Toda la red de MTDs en los glaciares rocosos Llano de las liebres y Tapado quedó sin baterías por falta de mantenimiento y por las condiciones extremas del lugar. Personal de CEAZA puso en funcionamiento la red nuevamente en noviembre de 2013. Esta pérdida de datos de 4 meses significó que ningún MTDs tuviera un 80% de datos válidos para este año, por esta razón no se consideró este año hidrológico en el análisis. Durante el año 2014-2015 15 MTDs tuvieron más de un 80% de datos válidos, el resto registró datos pero por las razones explicadas anteriormente presentaron fallos o lagunas de datos importantes.

Cálculo de las variables explicativas

Siguiendo la metodología planteada por Apaloo et al. (2012), se realizó un análisis exploratorio univariado, para entender la evolución de las temperaturas superficiales y relación con la cubierta de nieve. Las siguientes variables fueron obtenidas de las series de datos de temperatura del suelo:

- Promedio anual de la temperatura del suelo (MGST)
- Número total de días con cubierta de nieve (*Snow-Covered Days*, SCD; criterio: amplitud diaria de temperatura superficial del suelo $< 5^{\circ}\text{C}$ y promedio $< 2^{\circ}\text{C}$)
- Primera fecha de inicio de la nieve (*First Snow Onset Date*, SOD)
- Período más largo de días continuos con cubierta de nieve (*Longest period of continuously Snow-Covered Days*, LSCD)

Todas las fechas se expresan como fechas ordinales comenzando el 1 de abril como día uno. La estimación de LSCD tiene una precisión de unos pocos días (Lewkowicz, 2008; Apaloo et al., 2012).

Regímenes térmicos superficiales (Near Surface Ground Thermal Regimes)

El régimen térmico superficial para cada sitio fue determinado, siguiendo la clasificación desarrollada por Ishikawa (2003), con el objetivo de identificar diferentes regímenes térmicos y sus implicaciones para el desarrollo del permafrost. En el régimen tipo 1 las temperaturas a nivel superficial se mantienen constantes o cercanas a 0°C , pero nunca se desarrollan temperaturas del suelo bajo 0°C . De acuerdo a Ishikawa (2003) estos sitios se

caracterizan por un alto contenido de humedad del suelo y no favorecen al desarrollo del permafrost.

En el régimen tipo 2 las temperaturas del suelo están estrechamente relacionadas con las temperaturas atmosféricas. La presencia de una delgada cubierta de nieve o la ausencia de esta permiten la penetración de aire frío directamente al suelo.

En el tipo 3, el suelo está significativamente congelado durante los primeros meses del otoño, debido a la influencia de temperaturas atmosféricas bajo 0°C. Posteriormente, la temperatura del suelo se mantiene 0°C y con un gradual incremento en las temperaturas hasta fines del invierno. El efecto aislante de una gruesa cubierta de nieve disminuye la influencia de las temperaturas atmosféricas sobre el suelo. Finalmente, en el tipo 4 las temperaturas del suelo decrecen en forma continua a temperaturas bajo 0°C, hasta fines del periodo de invierno.

Análisis espacial

Las relaciones entre las características de los sitios y MGST fueron estudiadas usando dos modelos lineales múltiples de efectos mixtos (*linear mixed-effects models*; *Apaloo et al.*, 2012). Este modelo es una extensión de las regresiones lineales tradicionales, donde se incluye como variable adicional una variable categórica que representa la agrupación de las observaciones en grupos. El uso de este tipo de modelo es necesario en este contexto, debido al diseño de muestreo con pares de dataloggers cercanos, los cuales están correlacionados.

El primer modelo de MGST (MG1) intenta determinar si las temperaturas promedios superficiales están relacionadas a las condiciones de sitio tales como elevación, radiación solar potencial (PISR), la presencia o ausencia de sitios ricos en permafrost y condición de LLS. El segundo modelo (MG2) reemplaza los valores de LLS por los valores de cLSCD e intenta dar una explicación alternativa, representando en forma distinta las diferencias espaciales en la cubierta de nieve (Tabla 89).

En resumen, las siguientes variables fueron consideradas en cada modelo:

- Elevación (ELEV) en m snm.

- PISR relativa ($rPISR = PISR / PISR \text{ promedio del glaciar} - 1$) en $kWh \text{ m}^{-2}$ calculada a partir de un modelo digital de elevación creado por un par estéreo de imágenes Geoeye, con fecha 16-04-2010, con una resolución aproximada de 4m.
- RDG: Sitios de permafrost ricos en hielo i.e., glaciares cubiertos y rocosos, representado en valores binarios. (1=rico en permafrost, 0=no rico en permafrost). Los sitios no ricos en permafrost son, por ejemplo afloramientos rocosos (roca madre) y laderas adyacentes al glaciar rocoso
- LLS: (long-lasting snow) variable indicadora de sitios con cubierta de nieve de larga duración representada en valores binarios (1 = larga duración, 0 = sin larga duración). Los sitios con cubierta de nieve de larga duración corresponden a áreas con depresiones o surcos que favorecen la acumulación de nieve. Por el contrario, los sitios sin larga duración corresponden a sitios abiertos y más expuestos al viento.
- LSCD: Número de días con la cubierta de nieve más larga
- cLSCD centrada ($cLSCD = LSCD - LSCD \text{ promedio}$)

Se obtuvieron las siguientes ecuaciones de regresión, donde α representa el intercepto y β_i son los pesos de las variables explicativas o coeficientes de la regresión.

MG1 para los años hidrológicos 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016:

$$MG1 = \alpha + \beta_1ELEV + \beta_2rPISR + \beta_3RDG + \beta_4LLS \quad \text{Ecuación (16)}$$

MG2 para los años hidrológicos 2012-2013, 2013/2014, 2014-2015 y 2015-2016:

$$MG2 = \alpha + \beta_1ELEV + \beta_2rPISR + \beta_3RDG + \beta_4cLSCD \quad \text{Ecuación (17)}$$

Análisis estadístico

Con el fin de medir el grado de relación entre las variables se realizó un coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente (ρ) mide el grado de relación entre dos variables cuantitativas. Tiene valores entre -1 y 1.

$\rho=1$. Correlación positiva perfecta, cuando una de la variables aumenta la otra lo hace en proporción constante.

$0 < \rho < 1$. Correlación positiva

$\rho = 0$. No hay correlación lineal

$-1 < \rho < 0$. Correlación negativa, una variable aumenta y la otra disminuye pero no de forma constante.

$\rho = -1$. Correlación negativa perfecta una variable aumenta la otra disminuye en proporción constante.

Adicionalmente se estableció un coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado, R^2_{adj} . El R^2 es un coeficiente que se utiliza para determinar la calidad del modelo para replicar resultados. El R^2 es el cuadrado de los coeficientes de correlación de Pearson, entre los valores modelados y medidos de MGST. Por otro lado, el R^2_{adj} penaliza, según el número de variables, multiplicando el R^2 por la razón entre los grados de libertad de los efectos fijos y los grados de libertad de la varianza estimada (comparar *Apaloo et al.*, 2012). En el resto de este informe se hace referencia a estos coeficientes como R^2 y R^2_{adj} .

Adicionalmente con la aplicación del modelo de regresión múltiple se examinaron las relaciones entre la temperatura del suelo (MGST) y cada variable explicativa potencial (Tabla 90).

Promedio anual de la temperatura del suelo (MGST)

Durante el primer año hidrológico (2012-2013) las temperaturas MGST fluctuaron entre $-2,6^\circ\text{C}$ (X6A, Tapado, 4.552 m snm.) a $7,2^\circ\text{C}$ (X1, Llano de las Liebres, 3.798 m snm) Estos datos tienen una relación moderada con la elevación y con la presencia de nieve (Coeficiente de correlación de Pearson $\rho = -0,54$ y $-0,65$ respectivamente). El segundo año hidrológico (2013-2014) fue excluido de este análisis, ya que se consideró que los datos disponibles no eran suficientes para hacer una MGST plausible. Durante el año hidrológico (2014-2015) el rango de temperaturas fue de $-0,33^\circ\text{C}$ (X5A, Tapado, 4.518 m snm) a $7,5^\circ\text{C}$ (X1, Llano de las Liebres, 3.798 m snm). Para este año MGST y la elevación tuvieron una relación inversa moderada ($\rho = -0,75$), mientras que la asociación entre MGST y rPSIR aumentó ($\rho = -0,52$). Este aumento se explica por la poca nieve registrada este año hidrológico en el lugar, esto conjugó una baja en el coeficiente Pearson ($\rho = -0,07$), lo que elevó a relación entre MGST y rPSIR. Relacionando la MGST con LLS se puede decir que los sitios con cubierta de nieve de larga duración registran un promedio de $1,15^\circ\text{C}$, mientras que los sitios con cubierta de nieve sin larga duración registran $2,71^\circ\text{C}$. (Tabla 90).

Primera fecha de inicio de la nieve (SOD)

Durante el año 2012-2013 la primera fecha de precipitación de nieve ocurrió, en la mayoría de los sitios, a partir de la última semana de abril (día 26). Durante el periodo 2013-2014, la presencia de nieve fue detectada a partir del 17 de mayo en todos los sitios (día 47). Para el año 2014-2015 la primera caída de nieve se registró el día 4 de junio (día 65), en la mayoría de los sitios. Por último el año hidrológico 2015-2016 la nieve se detectó desde el día 1, ya que hubo un evento importante de nieve el día 24 de marzo de 2015, este evento corresponde al año hidrológico anterior.

Número total de días continuos con cubierta de nieve (LSCD)

Durante el año hidrológico 2012-2013 se registraron en promedio de todos los sitios 151,9 días con cubierta de nieve, mientras que durante el año 2014-2015 se registraron 50 días. Hay una diferencia de más de 100 días de presencia de nieve en los glaciares rocosos, esto, en gran parte explica la diferencia en MGST entre los años hidrológicos 2012-2013 y 2014-2015 (1,87°C y 3,39°C, respectivamente).

Régimen térmico del suelo año hidrológico 2012/13, 2013/14, 2014/15 y 2015/16

Con respecto a las evoluciones estacionales de las GST en el área de estudio, la mayoría de los sitios mostraron un descenso de las temperaturas en otoño, durante los meses de abril-mayo y un aumento de las temperaturas en primavera, durante los años hidrológicos 2012-2013 y 2014-2015. Siguiendo la clasificación de Ishikawa (2003), durante el año hidrológico 2012-2013 hubo un predominio del régimen térmico 3 en ambos glaciares rocosos, este régimen se caracteriza por la presencia de una importante capa de nieve en invierno, que no permite la penetración de las temperaturas atmosféricas en la capa activa de los glaciares rocosos. En estos sitios la temperatura se mantiene estable algunos grados por debajo de los 0°C, hasta que la capa de nieve se derrite. En las partes bajas de los glaciares rocosos se identificaron 6 sitios con régimen térmico tipo 2, en los que las temperaturas atmosféricas penetran en la capa activa por la ausencia o escasez de nieve. Por el contrario durante el año hidrológico 2014-2013 no se registraron regímenes térmicos tipo 3, la totalidad de los sitios presentó un régimen térmico tipo 2, por las bajas precipitaciones nivales registradas ese año, que dejaron la superficie descubierta de nieve durante gran parte del año y posibilitaron la interacción directa entre la atmósfera y los glaciares rocosos (Figura 111). Esta baja acumulación de nieve se refleja en la MGST, que aumenta con respecto al año 2012-2013, de 1,87°C a 3,39°C.

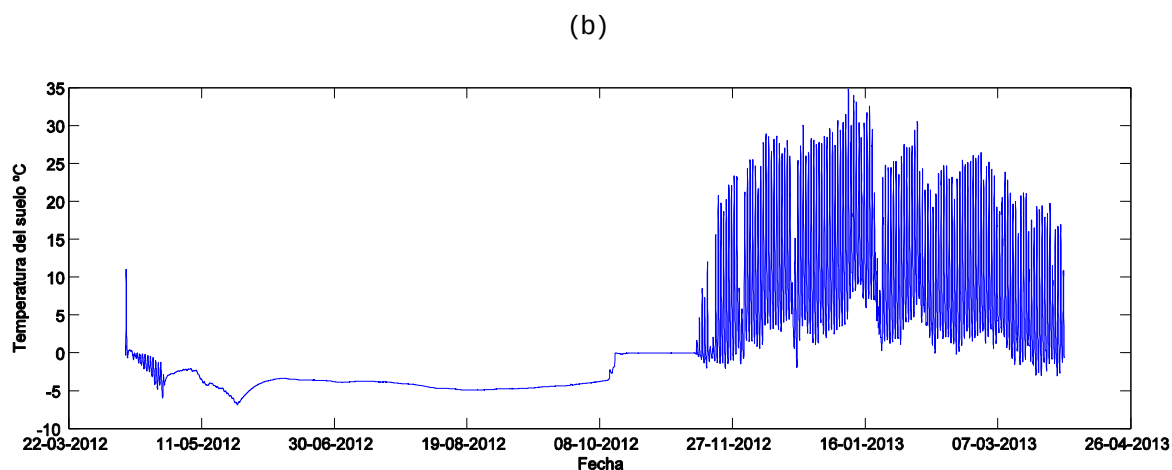
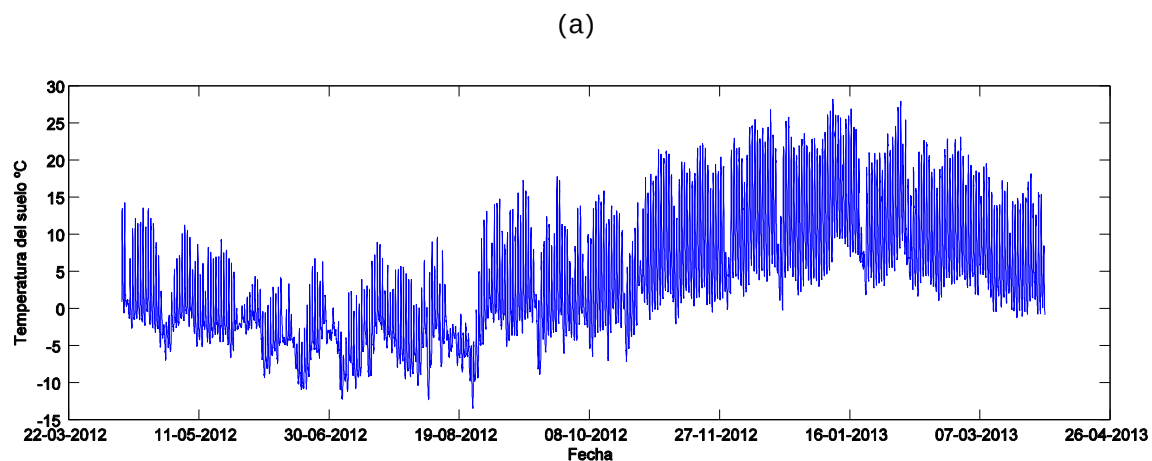


Figura 111: Ejemplo típico de sitios con regímenes térmicos tipo 2 y 3 en el área de estudio. (a) Régimen tipo 2 en sitio X2, área del glaciar rocoso Llano de las Liebres; (b) Régimen tipo 3 sitio X015, área del glaciar rocoso Tapado.

Tabla 89. Asociación entre las variables según los años hidrológicos analizados (coeficientes de correlación Pearson, ρ).

<i>2012/13</i>				
	<i>MGST</i>	<i>ELEV</i>	<i>rPISR</i>	<i>cLSCD</i>
MGST	-	-0,5409	0,1038	-0,6504
ELEV	-0,5409	-	0,5524	0,5631
rPISR	0,1038	0,5524	-	0,1098
cLSCD	-0,6504	0,5631	0,1098	-
<i>2013/14</i>				
	<i>MGST</i>	<i>ELEV</i>	<i>rPISR</i>	<i>cLSCD</i>
MGST	-	-0,0857	0,3278	-0,5264
ELEV	-0,0857	-	0,5524	-0,1498
rPISR	0,3278	0,5524	-	-0,2992
cLSCD	-0,5264	-0,1498	-0,2992	-
<i>2014/15</i>				
	<i>MGST</i>	<i>ELEV</i>	<i>rPISR</i>	<i>cLSCD</i>
MGST	-	-0,7545	-0,5194	-0,066
ELEV	-0,7545	-	0,5524	-0,2716
rPISR	-0,5194	0,5524	-	0,1051
cLSCD	-0,066	-0,2716	0,1051	-
<i>2015/16</i>				
	<i>MGST</i>	<i>ELEV</i>	<i>rPISR</i>	<i>cLSCD</i>
MGST	-	-0,7718	-0,4297	-0,6025
ELEV	-0,7718	-	0,5524	0,6514
rPISR	-0,4297	0,5524	-	0,2129
cLSCD	-0,6065	0,6514	0,2129	-

Tabla 90. Condiciones de sitio según los años hidrológicos estudiados (resúmenes de la distribución de temperaturas para las variables categóricas).

<i>2012/13</i>						
<i>Clase</i>	<i>Mínima</i>	<i>1er Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cuartil</i>	<i>Máxima</i>
<i>Sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS)</i>						
1	-2,6124	-0,0517	0,7201	1,1502	2,5342	3,9176
0	0,1354	1,5314	2,7378	2,7107	3,2340	7,1841
<i>Sitios de permafrost ricos en hielo (1= glaciares cubiertos y rocosos; RDG)</i>						
1	-2,6126	0,4292	1,4498	1,7815	3,0367	4,7401
0	0,1354	0,9207	1,6730	1,9990	3,2106	7,1841
<i>Régimen térmico del suelo (Clasificación de Ishikawa)</i>						
2	1,3253	2,0684	2,8899	3,3193	3,5583	7,1841
3	-2,6126	0,3678	1,3454	1,4807	2,8628	4,7401
<i>2013/14</i>						
<i>Clase</i>	<i>Mínima</i>	<i>1er Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cuartil</i>	<i>Máxima</i>
<i>Sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS)</i>						
1	-2,1238	1,9855	2,8311	3,3020	5,6662	7,0463
0	1,1920	3,3088	4,5333	4,6847	5,8390	11,7597
<i>Sitios de permafrost ricos en hielo (1= glaciares cubiertos y rocosos; RDG)</i>						
1	0,3594	2,0798	4,3733	4,3408	5,9877	11,7597
0	-2,1238	2,6265	4,2235	3,5114	4,8461	5,8858
<i>Régimen térmico del suelo (Clasificación de Ishikawa)</i>						
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
<i>2014/15</i>						
<i>Clase</i>	<i>Mínima</i>	<i>1er Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cuartil</i>	<i>Máxima</i>
<i>Sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS)</i>						
1	-0,3329	1,7396	4,0880	2,6908	4,2309	4,6594
0	1,5080	2,4819	2,6593	3,7404	4,4138	7,5182
<i>Sitios de permafrost ricos en hielo (1= glaciares cubiertos y rocosos; RDG)</i>						
1	-0,3329	2,2384	4,0880	3,2490	4,4184	4,7612
0	1,9353	2,4305	2,6593	3,6027	4,4138	7,5182
<i>Régimen térmico del suelo (Clasificación de Ishikawa)</i>						
2	-0,3329	2,4433	3,4002	3,3905	4,3948	7,5182
3	-	-	-	-	-	-
<i>2015/16</i>						
<i>Clase</i>	<i>Mínima</i>	<i>1er Cuartil</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cuartil</i>	<i>Máxima</i>
<i>Sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS)</i>						
1	-3,0443	-1,7105	-0,7297	0,3911	3,3378	3,8173
0	-5,1114	-1,2262	1,2459	1,1660	3,7375	6,5491

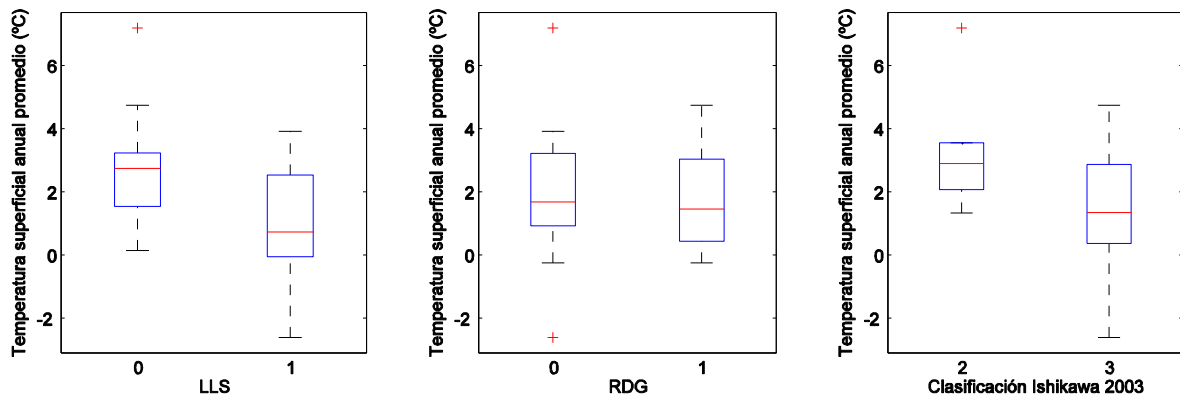
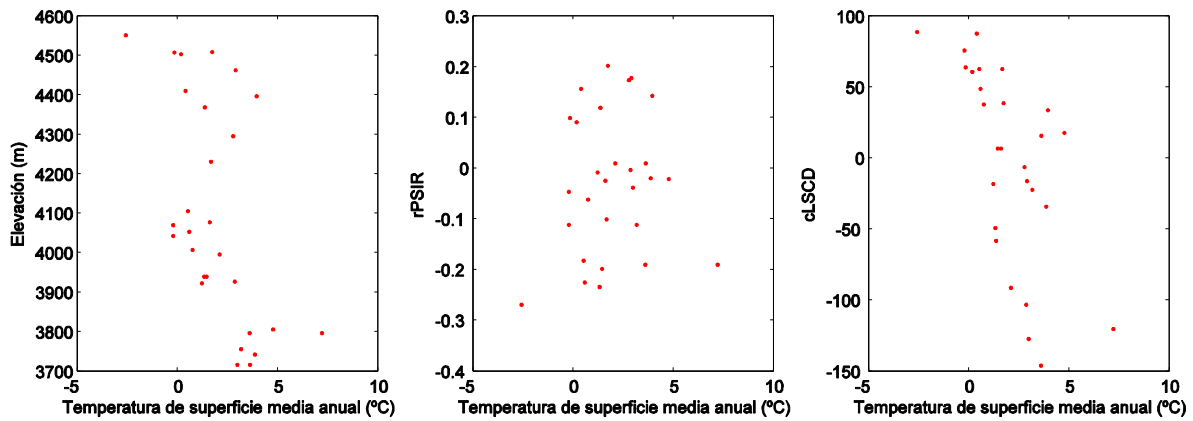
Sitios de permafrost ricos en hielo (1= glaciares cubiertos y rocosos; RDG)

1	-5,1114	-1,9806	2,0474	0,8292	3,7552	3,9282
0	-1,2660	-1,1295	-0,1426	1,1375	2,9565	6,5491

Régimen térmico del suelo (Clasificación de Ishikawa)

2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-

(a)



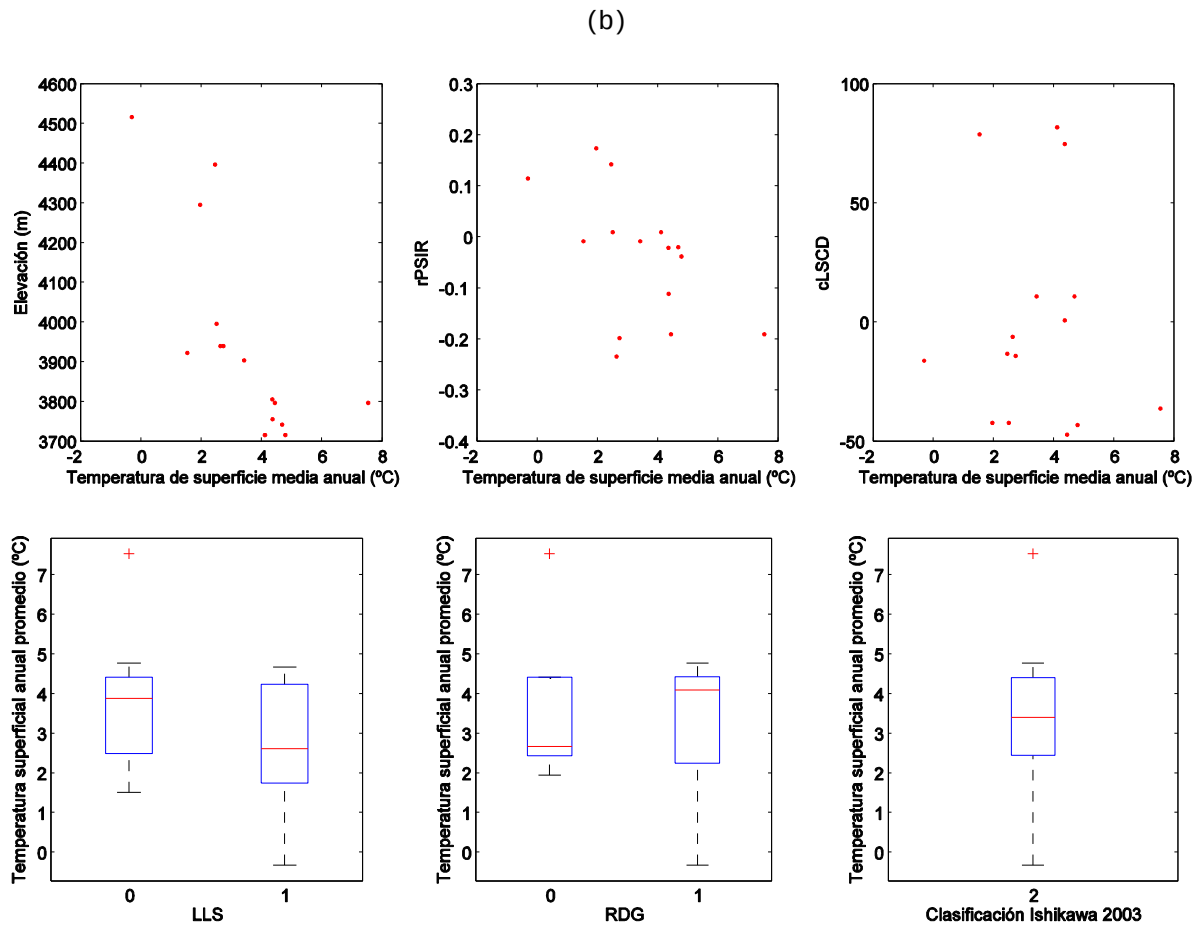


Figura 112. Gráficos de dispersión y diagrama de caja para las variables del modelo según año hidrológico:(a) Año hidrológico 2012-2013; (b) Año hidrológico 2014-2015.

Análisis espacial de la temperatura del suelo (GST)

Los modelos mixtos M1 y M2 explican relativamente bien la variación espacial de la MGST con las variables consideradas (M1,2012-2013: $R^2=0,65$; $R^2_{adj}=0,6$ M1,2014-2014: $R^2=0,70$; $R^2_{adj}=0,58$), R^2 y R^2_{adj} mejoran levemente en M2, ya que se incluye una variable asociada a temporalidad la cobertura de nieve (cLSCD), en desmedro de una variable con valores binarios (LLS) (M2,2012-2013: $R^2=0,69$; $R^2_{adj}=0,64$ M2,2014,2015: $R^2=0,73$ $R^2_{adj}=0,62$). Para ambos modelos la variable que tiene mayor influencia sobre MGST es por mucho la elevación (ELEV), seguida de la radiación (rPISR) y en menor medida por el sitio rico en permafrost (RDG), LLS y cLSCD (Tabla 91 y Tabla 92).

Utilizando el modelo M1 para ambos años hidrológicos (2012-2013 y 2014-2015) la temperatura disminuye a razón de $0,71^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de cambio altitudinal, Por otro lado, utilizando el modelo M2, la temperatura decrece a razón de $0,66^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m, durante ambos años hidrológicos.

Tabla 91. Coeficientes e indicadores para el modelo M1 de MGST para diferentes temporadas de análisis.

	<i>M1,2012,2013</i>	<i>M1,2013,2014*</i>	<i>M1,2014,2015</i>	<i>M1,2015,2016*</i>
	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>
Intercepto	29,9133	20,0134	34,8983	54,6508
ELEV	-0,0065	-0,0037	-0,0077	-0,0130
rPISR	9,0136	10,4296	4,4562	12,4987
RDG	-1,6193	-0,2683	-1,6884	-2,0959
LLS	-0,5063	-0,7299	-0,0217	-0,1609
R^2	0,6514	0,2570	0,6973	0,6922
R^2 adj	0,5908	0,1641	0,5762	0,5896

* Este año hidrológico posee menos del 80% de los datos registrados en los MTDs.

Tabla 92. Coeficientes e indicadores para el modelo M2 de MGST para diferentes temporadas de análisis.

	<i>M2,2012,2013</i>	<i>M2,2013,2014*</i>	<i>M2,2014,2015</i>	<i>M2,2015,2016*</i>
	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Coeficiente</i>
Intercepto	24,6037	23,4791	36,6419	101,3401
ELEV	-0,0053	-0,0046	-0,0082	-0,0242
rPISR	8,4153	9,3265	5,0472	29,2149
RDG	-1,4813	-0,8402	-1,4084	-4,6446
cLSCD	-0,0083	-0,0571	-0,0088	0,3357
R^2	0,6893	0,4586	0,7317	0,7342
R^2 adj	0,6353	0,3864	0,6243	0,5823

* Este año hidrológico posee menos del 80% de los datos registrados en los MTDs.

Discusión

Se puede decir que la elevación es la principal variable que determina MGST, ya que de ella depende la temperatura atmosférica del lugar. La segunda variable más importante es la radiación potencial, un sitio cercano a una ladera empinada con exposición sur recibirá menos radiación directa durante el día, por lo que tiende a ser más frío. Teóricamente un sitio rico en permafrost, como un glaciar rocoso, también será más frío que una superficie sin hielo soterrado, a la misma elevación y misma radiación potencial. Lo mismo pasa con los sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS), serán más fríos que los sitios con cubierta de nieve sin larga duración a la misma altura, y misma radiación. Por último los sitios que tengan más días con cubierta de nieve serán más fríos que los sitios con menos días cubiertos de nieve a igual elevación y radiación.

En los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado, el año hidrológico 2012-2013 fue más frío que el año hidrológico 2014-2015 (MGST: 1,87°C y 3,39°C, respectivamente), debido a que el año 2012-2013 tuvo mucha más cantidad de precipitación de nieve, la que impidió que las temperaturas atmosféricas penetraran en la capa activa del glaciar gran parte del año, manteniéndose la superficie fría y sin oscilaciones térmicas importantes hasta mediados de primavera, cuando se derrite la nieve. Estas temperaturas de MGST son un tanto elevadas para un área de glaciar rocoso, lo que puede indicar que estos cuerpos de hielo no se encuentran en balance con el clima actual de esta zona y que experimentan un proceso de degradación de su núcleo.

La mantención de la red de MTD es muy importante para el monitoreo constante de las temperaturas superficiales de estos glaciares rocosos, para explorar y comprender su evolución térmica y como la temperatura varía en función a las condiciones específicas de cada sitio. Creemos que vale la pena mantener esta red funcionando, para lo cual hay que hacer mantención periódica a los MTD, ya que muchos de estos fallan, sobre todo durante el invierno. La descarga de datos debe hacerse solamente cuando los MTD estén expuestos y nunca cuando estén bajo un manto nival, ya que al desenterrarlos de la nieve se alterarán los datos y los resultados de la modelación.

9.1.2 Análisis de Temperaturas subsuperficiales

Se obtuvieron datos de temperatura subsuperficiales en los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado. Cada glaciar rocoso cuenta con 2 estaciones de temperatura de permafrost en profundidad. En todas las estaciones se han utilizado dataloggers marca HOBO-U30 con cintas termistoras E348-S-TMB-M006 / E348-S-TMB-M017 (Tabla 93). Cada estación es alimentada por paneles solares y baterías. Estos datos se utilizan para el monitoreo de la capa activa del glaciar rocoso y el estudio de los cambios estacionales y el régimen térmico del glaciar rocoso. Las estaciones están localizadas en zonas planas, tanto en la parte baja como superior de ambos glaciares rocosos (Figura 11). La estación Liebres 1 presenta datos completos desde abril de 2012 hasta mayo de 2015, posee 5 termistores a -2,67 m; -2 m; -1 m; -0,5 m; -2 m. El sensor a 1 m de profundidad, presentó datos solo hasta junio de 2012, el resto de la serie está completa. La estación Liebres 2 posee 7 sensores de temperatura a -7,4 m; -5 m; -3 m; -2 m; -1 m; -0,5 m y -0,2 m. Esta serie de datos se encuentra completa desde abril de 2012 hasta mayo 2015. La estación Tapado1 posee 6 sensores a profundidades de -2 m; -1 m; -0,5 m y -0,2 m. Posee registro completo desde abril de 2012 hasta mayo 2015. La estación Tapado 2 tiene 5 sensores a profundidades de -2,4 m; -2 m; -1 m; -0,5 m; -0,2 m y también presenta la serie completa de datos desde abril 2012 hasta mayo 2015. En este informe se presentarán, datos desde enero de 2014 hasta mayo 2015. A continuación se analizarán la evolución de las temperaturas de los datos de los dos años hidrológicos (2013-2014 y 2014-2015). Los datos brutos están disponibles en el anexo digital.

Tabla 93. Resumen de las principales características de localización de las cintas termistores.

<i>Fecha de instalación</i>	<i>Nombre Estación</i>	<i>Elevación (m snm)</i>	<i>Norte* (m)</i>	<i>Este* (m)</i>	<i>Profundidad vertical** (m)</i>
2010-04-12	Liebres 1	4050	408613,0	6653475,6	-2,67
2010-04-12	Liebres 2	3786	408992,9	6652463,9	-7,64
2010-04-13	Tapado 1	4440	411988,7	6663517,9	-2,07
2010-04-13	Tapado 2	4405	412154,5	6663498,1	-2,4

* Coordenadas tomadas en el Datum WGS 84 – UTM 19 Sur

** Profundidad a la cual se alcanzó hielo o roca masiva.

Estación Liebres 1

El sensor ubicado a mayor profundidad (2,7 m) muestra temperaturas promedio anuales inferiores a 0° durante los años hidrológicos 2012/13, 2013/14, 2014/15 y 2015/16 (Figura 113) sin embargo, durante los meses de verano este sensor presenta datos ligeramente superiores a los 0° (Figura 114), esto indica que la profundidad de la capa activa en esta parte del glaciar rocoso es levemente más profunda que -2,7 m. A los -0,5 m los valores de promedio anual son positivos y comienzan tener una clara influencia de las temperaturas ambientales.

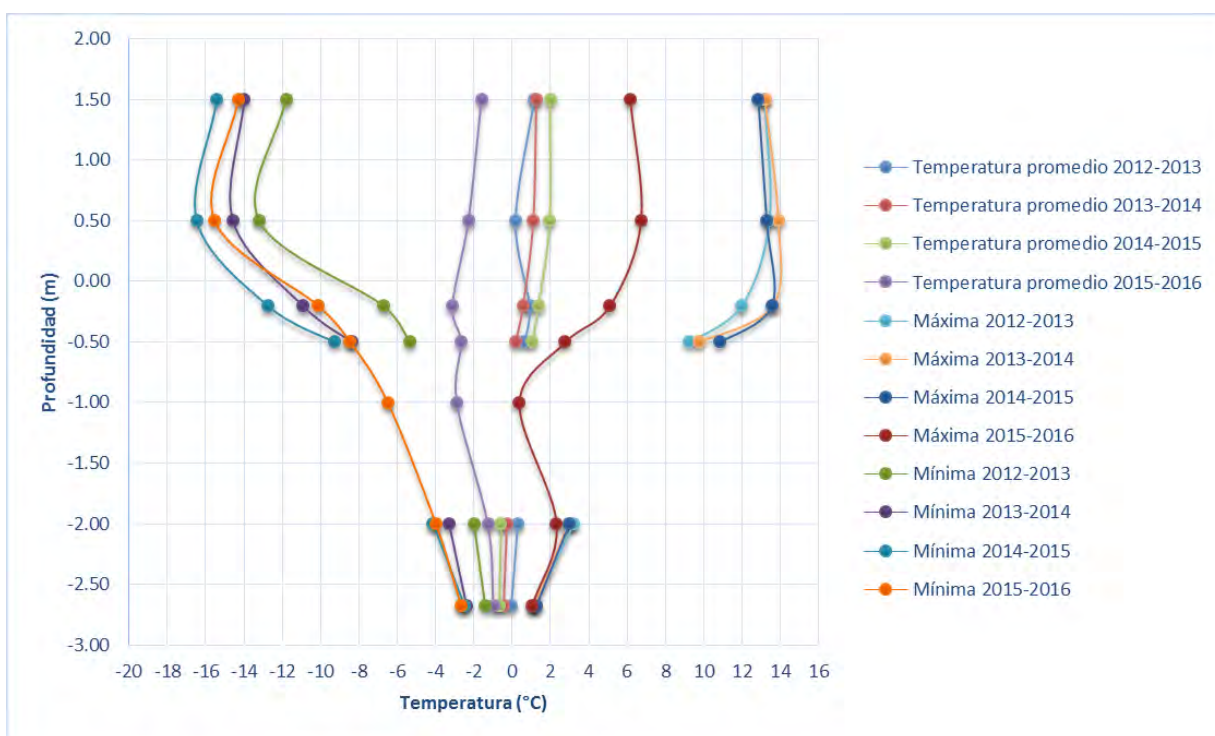


Figura 113: Temperaturas promedio, máximas y mínimas para cada año hidrológico en la estación Liebres 1.

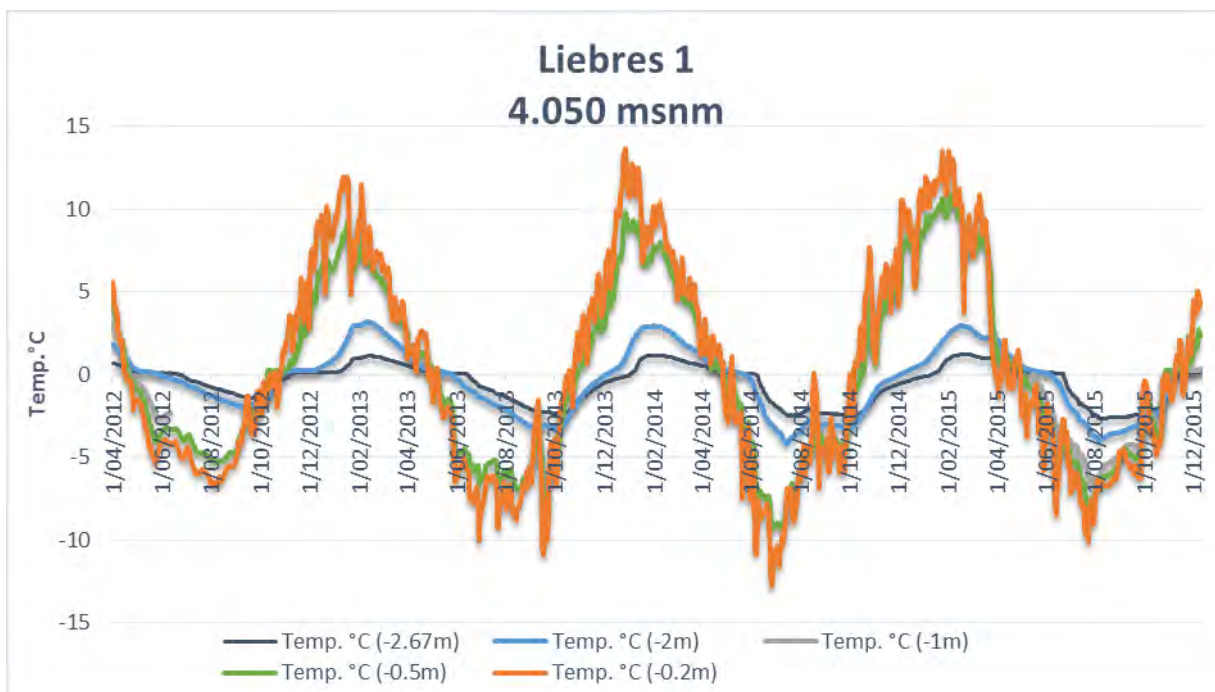


Figura 114: Promedios diarios de temperaturas (°C) subsuperficiales en la estación Liebres 1, glaciar rocoso Llano de las Liebres.

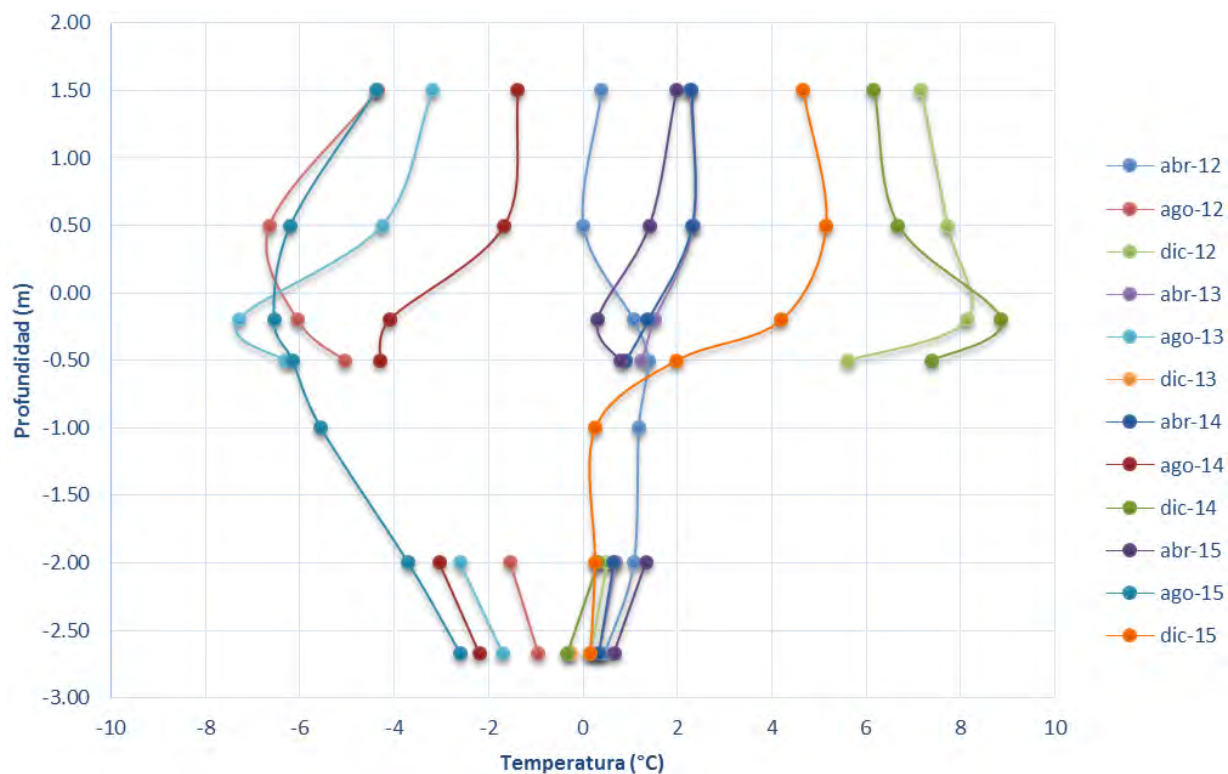


Figura 115: Temperaturas promedio mensual Estación Liebres 1, Glaciar rocoso Llano de las Liebres.

Estación Liebres 2

La estación Liebres 2 posee un sensor a -7,4 m de profundidad, el cual muestra datos muy cercanos a cero durante todo el año (promedio de 0,24°C), (Figura 116) indicando que la capa activa en esta zona es de aproximadamente 8 m de espesor. En este sensor la temperatura nunca baja de los 0° C. Los sensores entre -5 m y -2 m muestran variaciones de temperatura estacionales, no siendo afectadas por las oscilaciones diarias de temperatura. Durante los meses de invierno estos sensores muestran valores muy cercanos a 0°C, no bajando a menos de -2° C (Figura 117). Esto muestra que el manto de nieve que cubre al glaciar rocoso actúa como aislante, no permitiendo la transferencia de calor entre la atmosfera y la capa activa. Entre los -2 m de profundidad y la superficie se observa como penetran las variaciones diarias de temperatura hacia la capa activa del glaciar, incluso en el invierno, denotando un bajo espesor de la nieve acumulada en la superficie (Figura 118).

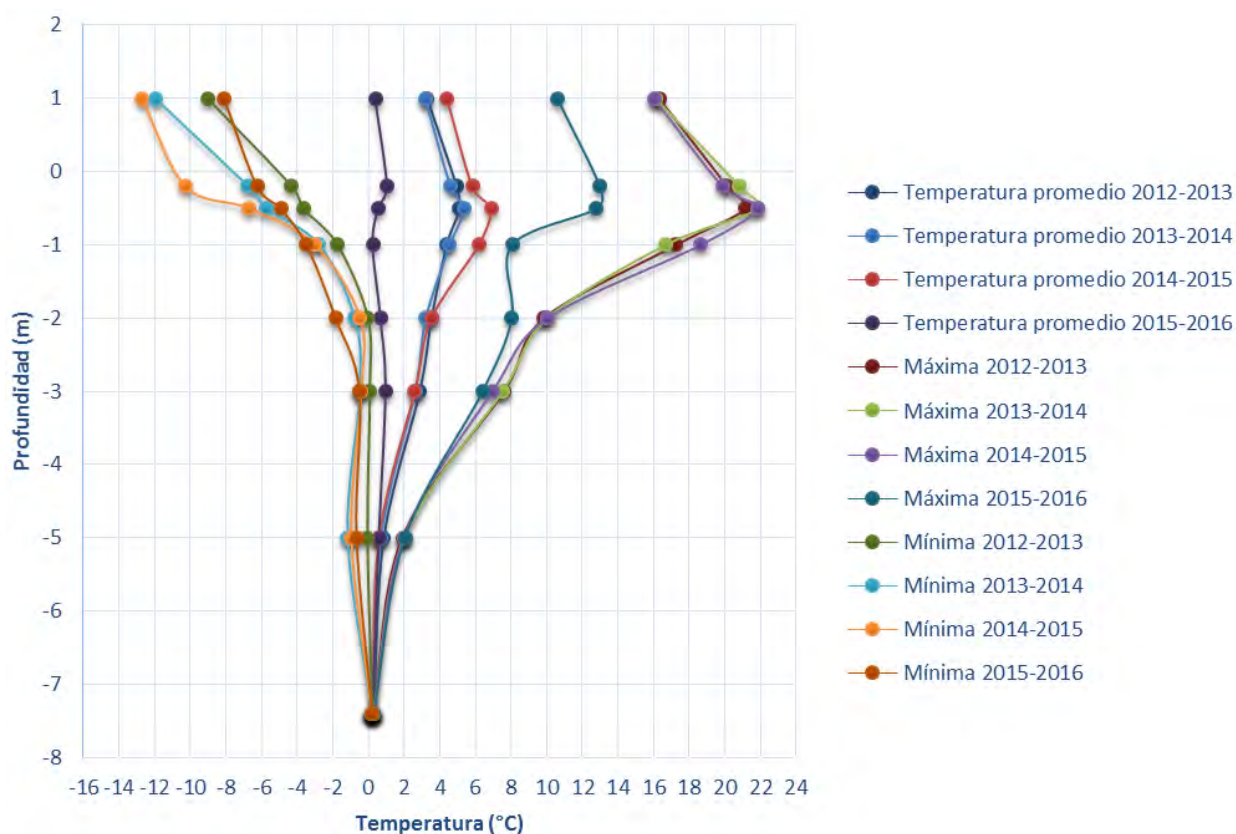


Figura 116: Temperaturas promedio, máximas y mínimas para cada año hidrológico en la estación Liebres 2.

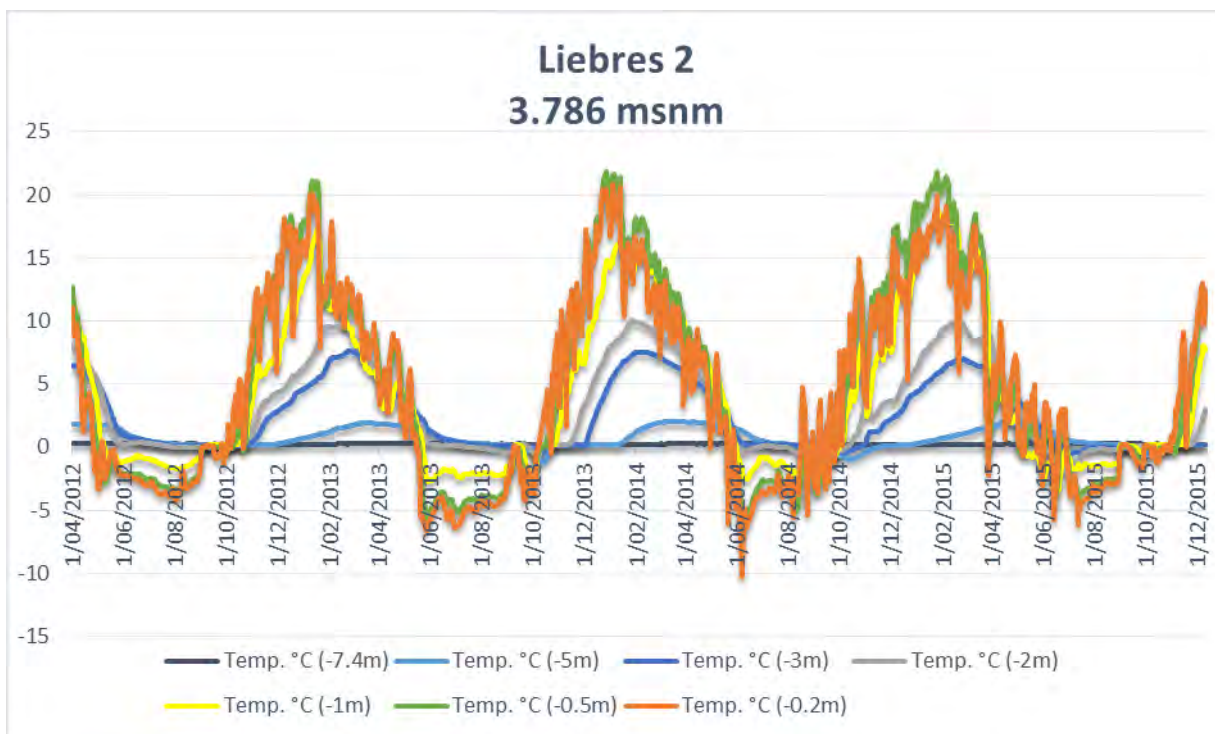


Figura 117: Promedios diarios de temperaturas (°C) subsuperficiales en la estación Liebres 2, glaciar rocoso Llano de las Liebres.

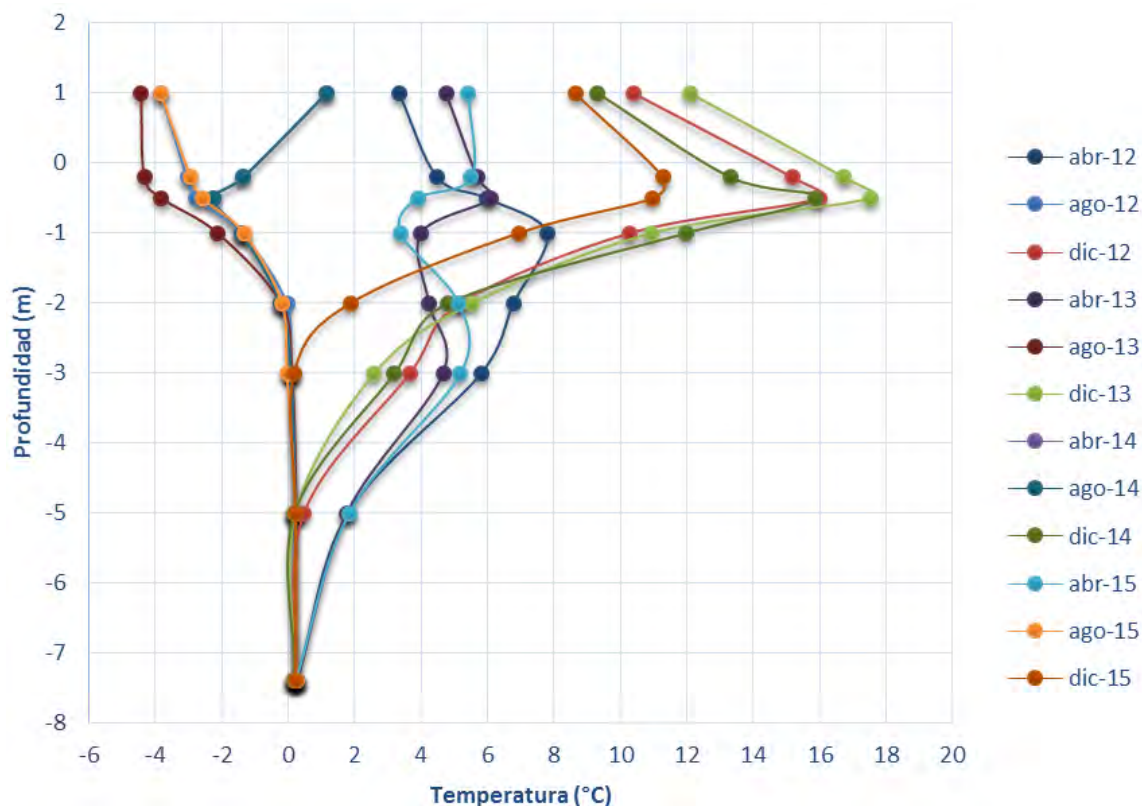


Figura 118: Temperaturas promedio mensual y su evolución con la profundidad en Estación Liebres 2, glaciar rocoso, Llano de las Liebres.

Estación Tapado 1

A principios de invierno, se aprecia claramente como los sensores se van enfriando en relación a su profundidad, primero los más superficiales y después los más profundos (Figura 119). El sensor más profundo, ubicado a -2,07 m bajo la superficie, muestra un enfriamiento máximo menor a los $-1,5^{\circ}\text{C}$ en octubre, visible claramente los años 2013 y 2014, el cual se extiende hasta los primeros días de noviembre. Este retraso en el enfriamiento se debe a las características de conductividad térmica del detrito y del hielo que compone la capa activa. Se puede observar que el sensor más profundo (-2 m) está muy cercano al límite del permafrost, ya que el promedio de temperatura durante los 3 años hidrológicos es de $-0,3^{\circ}\text{C}$, con máximas de más de 2°C (Figura 120), es decir la capa activa tiene un espesor de 2,5 m aproximadamente. A una profundidad de 1 m es posible observar variaciones diarias de temperatura.

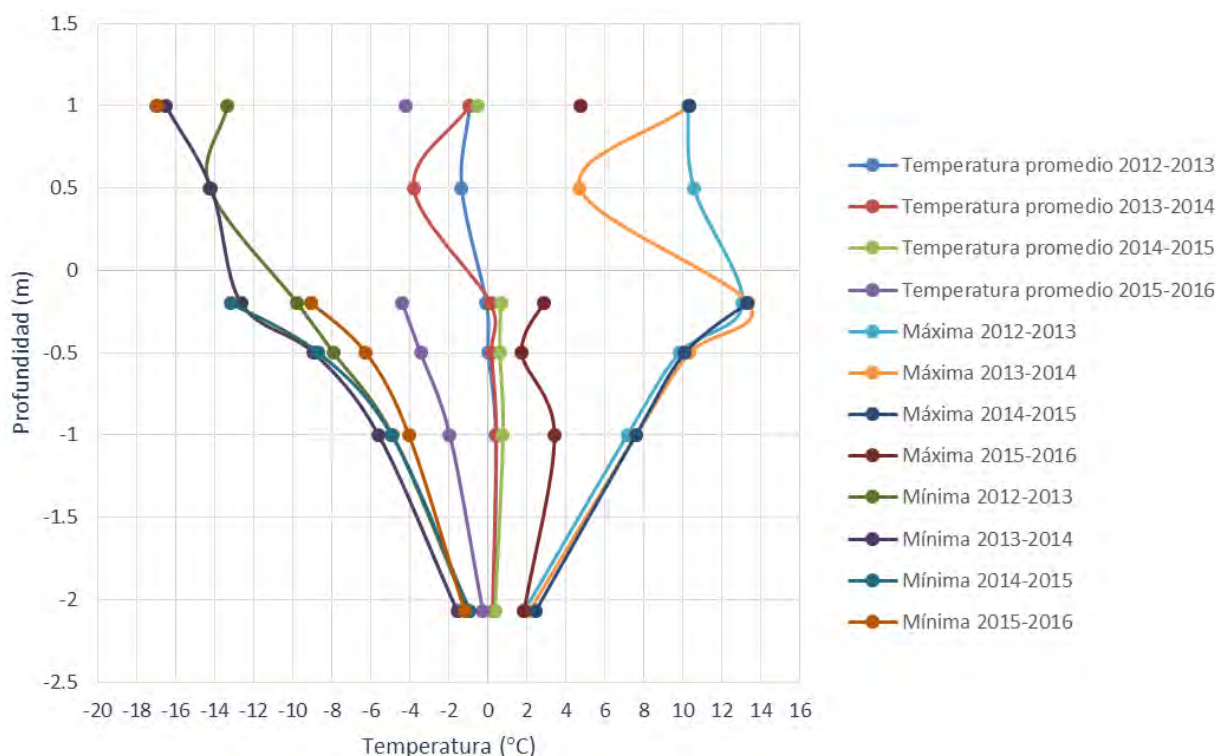


Figura 119: Temperaturas promedio, máximas y mínimas para cada año hidrológico en la estación Tapado 1, Glaciar rocoso Tapado.

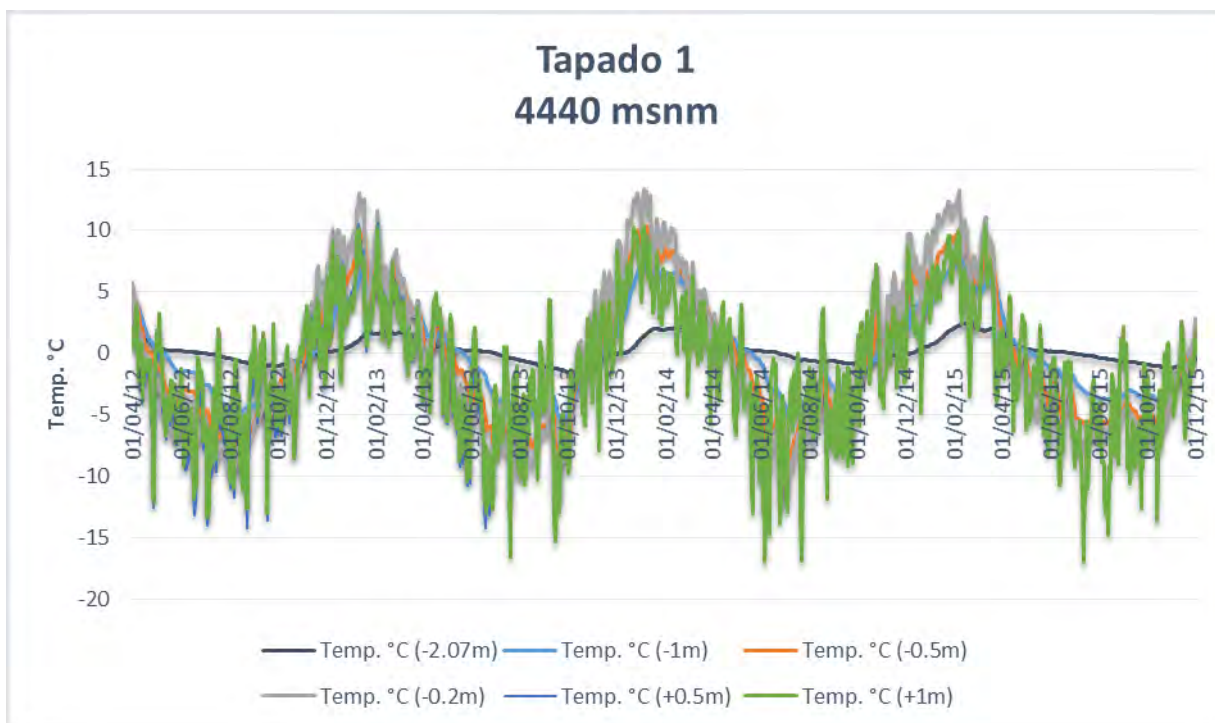


Figura 120: Promedios diarios de temperaturas (°C) subsuperficiales en la estación Tapado 1, glaciar rocoso Tapado.

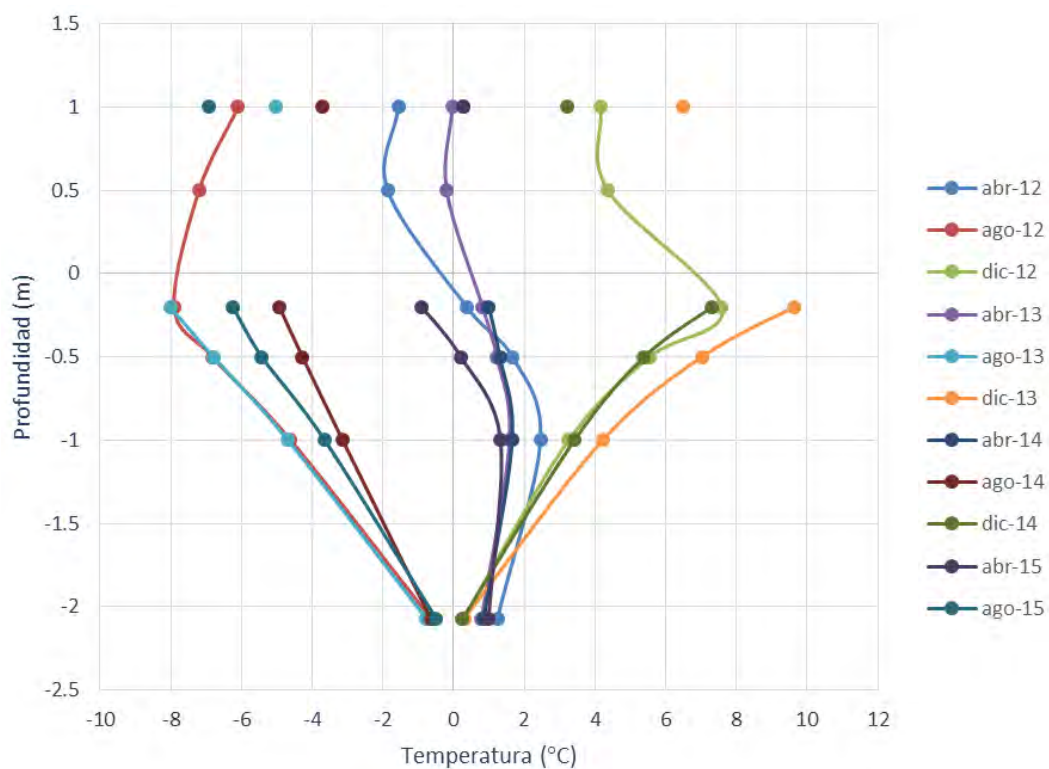


Figura 121: Temperaturas promedio mensual y su evolución con la profundidad en Estación Tapado 1, glaciar rocoso Tapado.

Estación Tapado 2

A principios de invierno, se aprecia claramente como los sensores se van enfriando en relación a su profundidad (Figura 122), primero los más superficiales y después los más profundos. El sensor más profundo, ubicado a -2,4 m bajo la superficie, muestra un enfriamiento máximo menor a los $-1,5^{\circ}\text{C}$ en octubre, visible claramente los años 2013 y 2014 (Figura 123), el cual se extiende hasta los primeros días de noviembre. Este retraso en el enfriamiento se debe a las características de conductividad térmica del detrito que compone la capa activa. En la Figura 122, se puede observar que el sensor más profundo (-2,4 m) está muy cercano al límite del permafrost, ya que el promedio de temperatura durante los 3 años hidrológicos es de $-0,3^{\circ}\text{C}$, es decir la capa activa tiene un espesor de 2,5 m aproximadamente (Figura 124). A una profundidad de 1 m es posible observar variaciones diarias de temperatura.

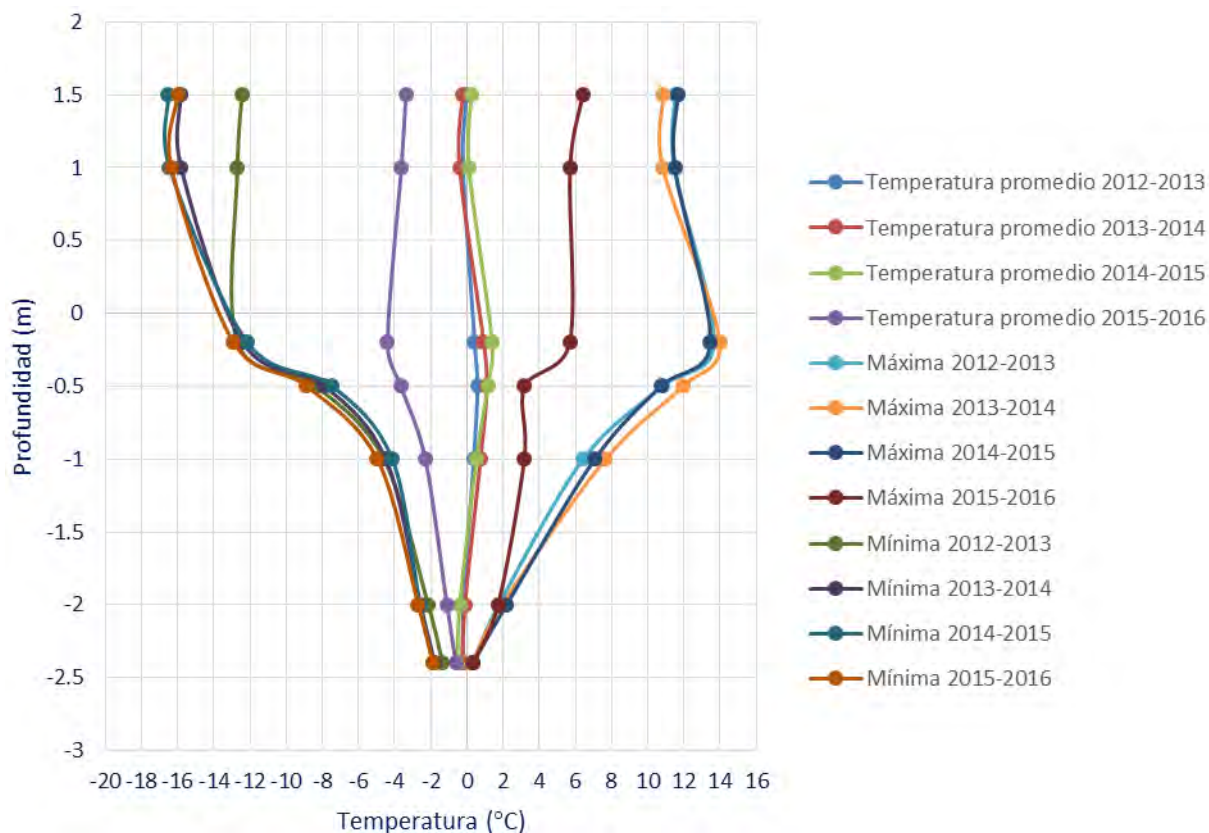


Figura 122: Temperaturas promedio, máximas y mínimas para cada año hidrológico en la estación Tapado 2, Glaciar rocoso Tapado.

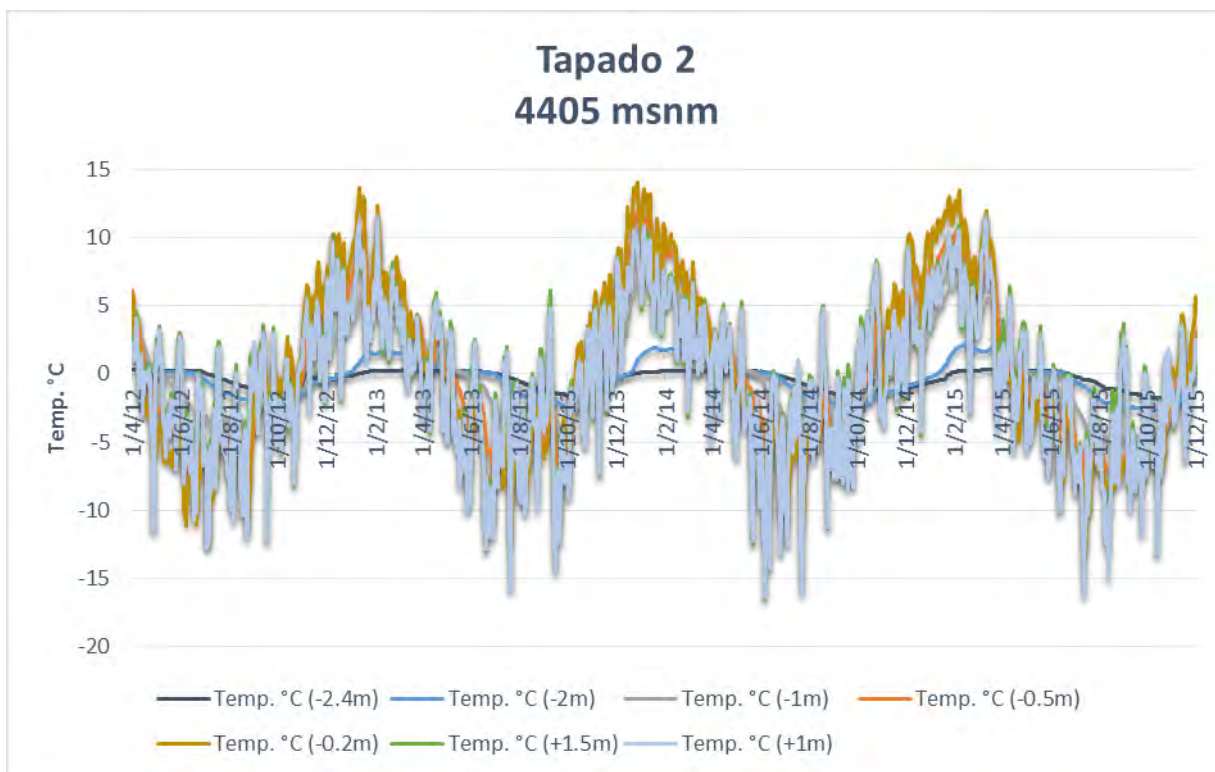


Figura 123: Promedios diarios de temperaturas (°C) subsuperficiales en la estación Tapado 2, glaciar rocoso Tapado.

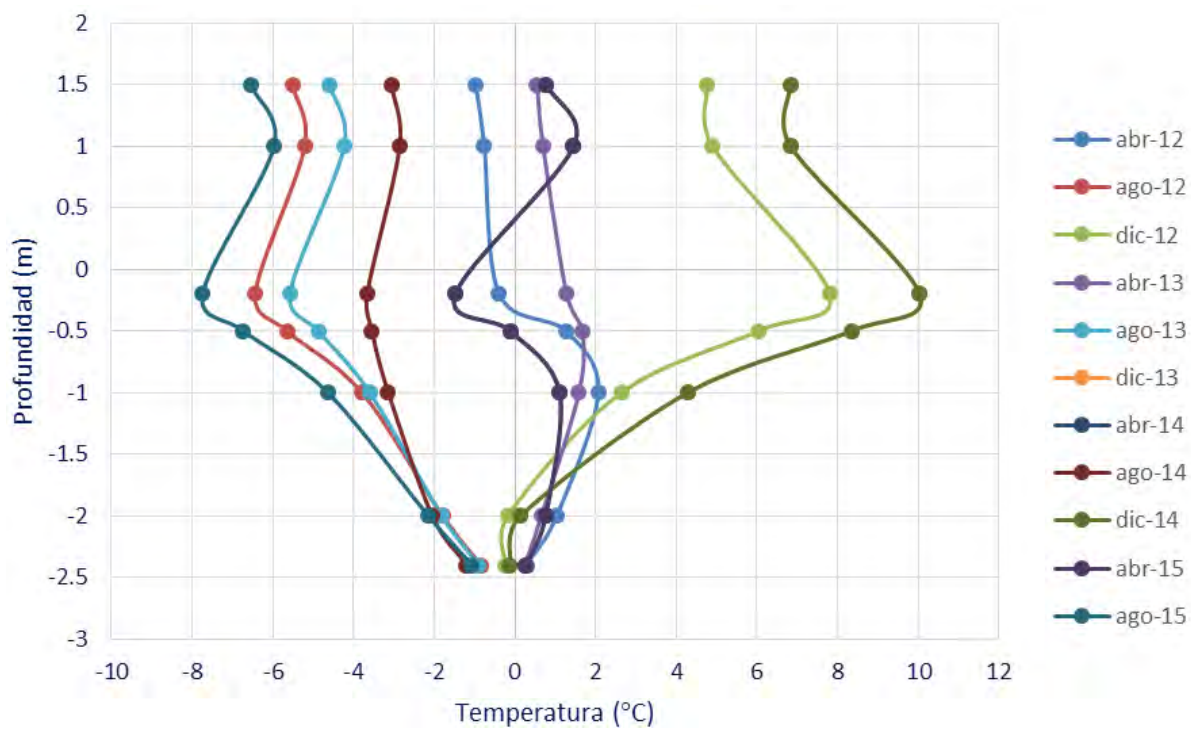


Figura 124: Temperaturas promedio mensual y su evolución con la profundidad en Estación Tapado 2, glaciar rocoso Tapado.

10.MEDICIONES DE VELOCIDAD

10.1 MEDICIONES DE VELOCIDAD EN EL GLACIAR TAPADO

Durante las campañas de terreno de noviembre de 2013 y octubre de 2014 se midieron 8 puntos de referencia (Tabla 94) con un sistema de GPS diferencial en la parte cubierta y descubierta del glaciar Tapado. Las mediciones realizadas durante el levantamiento se ejecutaron con un equipo Trimble 5700s bi-frecuencia, empleando antenas Zephyr. Los puntos medidos el 2013 fueron comparados con los medidos durante octubre de 2014 para calcular el movimiento y velocidad superficial del glaciar (Figura 125). Sin embargo, los puntos medidos en la parte descubierta no pueden ser utilizados con este fin, ya que los puntos de referencia entre los años no coinciden (i.e. los marcos de ablación no permanecieron en pie durante toda la temporada).

Tabla 94. Desplazamiento de los puntos de referencia para la zona cubierta del glaciar Tapado, entre las campañas de medición de noviembre de 2013 y octubre de 2014.

ID	26 noviembre 2013			21 octubre 2014			D_vert (m)	D_hor (m)	Vel (m ^{-a})
	X*	Y*	Z**	X*	Y*	Z**			
TC1	410885,7	6663906	4648,474	410886,8	6663904	4647,293	-1,18	2,16	2,40
TC2	410922,5	6663807	4627,767	410924,3	6663806	4626,715	-1,05	2,20	2,44
TC3	410952,5	6663654	4600,124	410953,8	6663654	4599,536	-0,59	1,36	1,51
TC4	411077,6	6663550	4572,195	411078,6	6663550	4571,727	-0,47	1,01	1,12
TC5	411243,9	6663441	4554,739	411244,0	6663441	4553,966	-0,77	0,30	0,33

ID: Identificador del punto en terreno.

D_vert: Componente vertical del desplazamiento.

D_hor: Componente horizontal del desplazamiento.

Vel: Velocidad horizontal en metros por año.

* Coordenadas en DATUM WGS84 – UTM 19S.

**Altitud en cotas ortométricas en base al modelo de geoide EGM96.

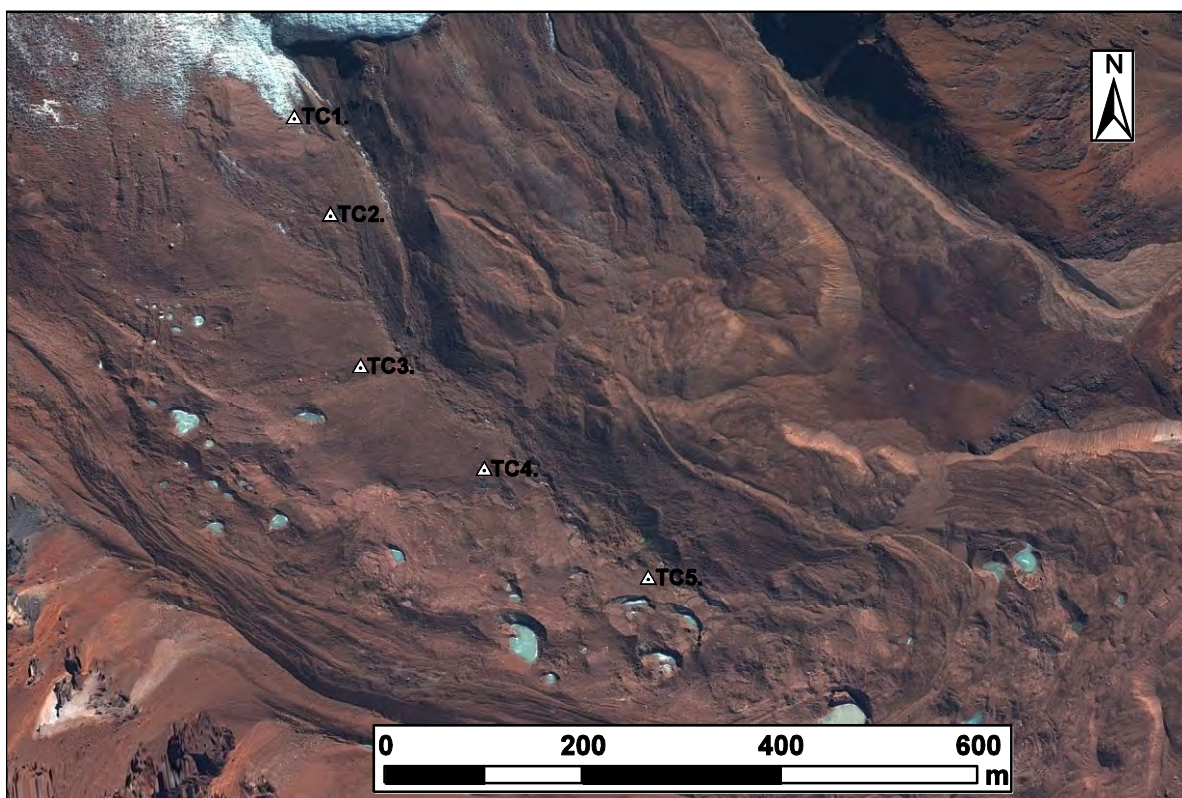


Figura 125. Ubicación de los puntos de referencia medidos en el glaciar tapado cubierto durante los años 2013 y 2014. Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

10.2 MEDICIONES DE VELOCIDAD EN EL GLACIAR BELLO

Entre febrero de 2014 y abril de 2015 se realizaron 3 levantamientos con sistemas de GPS diferencial en la superficie del glaciar Bello. Las mediciones fueron realizadas con un equipo Trimble 5700s bi-frecuencia, empleando antenas Zephyr. Se procedió a medir la red de baliza instalada durante cada temporada. Sin embargo, los puntos medidos en febrero de 2014 no pueden ser utilizados para medir el desplazamiento, ya que los puntos de referencia entre los años no coinciden (i.e. la red de balizas fue reemplazada a finales de 2014). Finalmente, se logró medir 3 balizas entre febrero y abril de 2015 (Tabla 95).

Tabla 95. Desplazamiento de los puntos de referencia para el glaciar Bello, entre las campañas de medición de febrero de 2015 y abril de 2015.

ID	10 febrero 2015			8 abril 2015			D_vert (m)	D_hor (m)	Vel (m ^a)
	X*	Y*	Z**	X*	Y*	Z**			
BP4	412071.3	6289830.6	4325.9	412073.1	6289833.4	4324.0	-1,88	3.23	20.4
BP5	412157.7	6289528.8	4298.0	412158.7	6289527.7	4295.0	-2.99	4.53	9.7
BP6	412241.9	6289264.2	4259.6	412238.7	6289273.3	4259.9	-0.284	9.60	60.8

ID: Identificador del punto en terreno.

D_vert: Componente vertical del desplazamiento.

D_hor: Componente horizontal del desplazamiento.

Vel: Velocidad horizontal en metros por año.

* Coordenadas en DATUM WGS84 – UTM 19S.

**Altitud en cotas ortométricas en base al modelo de geoide EGM96.

10.3 MEDICIONES DE VELOCIDAD EN LOS GLACIARES ROCOSOS

Entre diciembre de 2014 y mayo de 2015 se realizaron 2 levantamientos con sistemas de GPS diferencial en los glaciares rocosos Tapado y Llano de las Liebres. Las mediciones fueron realizadas con un equipo Trimble 5700s bi-frecuencia, empleando antenas Zephyr. Todos los levantamientos GPS han sido ejecutados ocupando las mismas bases fijas monumentadas en rocas estables, localizadas afuera de los glaciares y de fácil acceso (Tabla 96).

Tabla 96. Coordenadas de las bases fijas utilizadas para el levantamiento GPS.

Coordenadas de las bases fijas	Tapado	Llano de las liebres
X Este (m) ¹	412768,485	409118,900
Y Norte (m) ¹	6663706,175	6652717,990
Z Elevación (m) ²	4245,759	3842,434

¹Coordenadas en DATUM WGS84 – UTM 19S

²Geoide EGM96

10.3.1 Glaciar rocoso Tapado

Durante el levantamiento de GPS diferencial en el glaciar rocoso Tapado realizado entre los días 11 de diciembre de 2014, se encontraron 55 de los 60 puntos originalmente demarcados en roca (DGA, 2010). Esto es debido a que algunos de los puntos marcados sobre rocas han sido destruidos o se encuentran en muy malas condiciones (posiblemente debido a la meteorización mecánica de las rocas), haciendo imposible su ubicación precisa en terreno. Durante el post-proceso de los puntos GPS se descartaron 11 puntos debido a problemas asociados a la geometría de los satélites (generalmente altos valores en el PDOP), así como también soluciones de baja calidad con las basadas en pseudo-rangos.

Finalmente, 39 puntos de monitoreo fueron considerados para calcular el desplazamiento (Tabla 97 y Figura 126) y velocidad con respecto a las penúltimas mediciones realizadas en diciembre de 2013.

Los valores obtenidos indican que el glaciar rocoso Tapado se encontraba activo durante el periodo 2013–2014. La actividad se refleja en desplazamientos horizontales y verticales promedio de 0,47 m y 0,18 m, respectivamente. La dirección predominante del desplazamiento horizontal es Este, mientras que el desplazamiento vertical sugiere un rebajamiento en toda la superficie del glaciar. La superficie del glaciar presenta una velocidad promedio de desplazamiento de 0,47 m^a.

Tabla 97. Desplazamiento de los puntos de referencia en el glaciar rocoso Tapado, entre las campañas de medición de diciembre de 2013 y diciembre de 2014.

ID	12 diciembre 2013			11 diciembre 2014			D_vert (m)	D_hor (m)	Vel (m ^a)
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1.1	411577,7	6663545,5	4524,6	411577,9	6663545,6	4524,6	-0,08	0,19	0,19
1.2	411569,3	6663520,0	4528,7	411569,6	6663520,0	4528,5	-0,14	0,23	0,23
1.3	411576,4	6663493,6	4533,1	411576,7	6663493,8	4532,9	-0,22	0,34	0,34
1.4	411588,3	6663468,1	4529,0	411588,7	6663467,3	4527,9	-1,11	0,91	0,91
1.6	411579,0	6663422,0	4529,3	411579,4	6663422,1	4529,1	-0,13	0,41	0,41
1.7	411593,6	6663390,3	4530,2	411594,0	6663390,5	4530,1	-0,09	0,39	0,39
1.8	411589,5	6663359,5	4534,5	411589,8	6663359,7	4534,2	-0,27	0,42	0,42
1.13	411560,7	6663159,3	4524,6	411560,9	6663159,2	4524,6	-0,02	0,21	0,21
1.14	411568,6	6663119,7	4517,7	411568,9	6663119,7	4517,6	-0,06	0,28	0,28
1.15	411555,6	6663089,2	4516,7	411555,6	6663089,1	4516,6	-0,04	0,13	0,13
2.1	412097,4	6663535,2	4413,8	412098,4	6663535,3	4413,5	-0,31	1,01	1,01
2.5	411963,2	6663493,8	4444,2	411964,3	6663494,0	4444,0	-0,27	1,14	1,14
2.6	411903,4	6663487,6	4461,9	411904,6	6663488,0	4461,6	-0,27	1,24	1,24
2.8	411842,2	6663476,7	4481,6	411843,0	6663477,1	4481,2	-0,38	0,85	0,85
2.9	411812,1	6663465,3	4498,1	411813,1	6663465,5	4497,7	-0,40	1,03	1,03
2.1	411784,0	6663464,5	4503,5	411785,0	6663464,6	4503,3	-0,26	1,03	1,03
2.11	411756,0	6663464,2	4507,6	411756,6	6663464,3	4507,4	-0,18	0,66	0,66
2.12	411723,9	6663472,6	4517,9	411724,3	6663472,8	4517,6	-0,26	0,48	0,48
2.13	411691,2	6663469,9	4522,6	411691,8	6663470,0	4522,5	-0,19	0,63	0,63
2.14	411649,0	6663463,6	4523,2	411649,3	6663463,6	4522,9	-0,35	0,24	0,24
3.1	411966,9	6663451,6	4445,6	411967,3	6663451,6	4445,4	-0,13	0,45	0,45
3.3	411965,8	6663480,8	4445,6	411966,8	6663480,8	4445,4	-0,24	0,99	0,99
3.5	411944,3	6663522,8	4445,2	411945,4	6663523,0	4444,9	-0,30	1,13	1,13
3.7	411949,0	6663559,2	4446,5	411950,1	6663559,3	4446,2	-0,30	1,09	1,09
4.2	412204,2	6663163,3	4412,1	412204,5	6663163,1	4412,1	-0,05	0,34	0,34

4.4	412087,6	6663212,7	4431,6	412087,9	6663212,6	4431,6	0,00	0,27	0,27
4.5	412037,7	6663217,1	4439,9	412038,1	6663217,0	4439,8	-0,08	0,40	0,40
4.6	411991,3	6663225,9	4445,8	411991,5	6663225,9	4445,7	-0,04	0,19	0,19
4.8	411908,5	6663228,8	4468,1	411908,6	6663228,6	4468,0	-0,06	0,22	0,22
4.9	411872,6	6663267,6	4473,1	411872,7	6663267,5	4473,0	-0,05	0,16	0,16
4.1	411807,9	6663261,8	4489,2	411808,1	6663261,7	4489,2	-0,04	0,15	0,15
4.11	411726,9	6663261,3	4512,0	411727,0	6663261,2	4511,9	-0,13	0,12	0,12
4.12	411699,1	6663306,1	4519,2	411699,2	6663306,1	4519,1	-0,06	0,13	0,13
4.13	411686,5	6663328,3	4525,5	411686,7	6663328,3	4525,5	-0,09	0,22	0,22
4.14	411648,1	6663328,1	4528,1	411648,3	6663328,2	4528,0	-0,11	0,20	0,20
5.1	412009,7	6663352,2	4447,2	412009,8	6663352,2	4447,1	-0,04	0,07	0,07
5.2	412008,1	6663311,7	4447,4	412008,2	6663311,6	4447,4	0,00	0,17	0,17
5.4	412000,2	6663259,6	4445,8	412000,4	6663259,6	4445,8	-0,03	0,17	0,17
5.7	411974,5	6663160,7	4451,9	411974,5	6663160,8	4451,9	-0,03	0,10	0,10

ID: Identificador del punto en terreno.

D_vert: Componente vertical del desplazamiento.

D_hor: Componente horizontal del desplazamiento.

Vel: Velocidad horizontal en metros por año.

(1) Precisión promedio vertical 0,01 m; precisión promedio horizontal 0,01 m.

(2) Precisión promedio vertical 0,01 m; precisión promedio horizontal 0,01 m.

* Coordenadas en DATUM WGS84 – UTM 19S y Geoides EGM96.

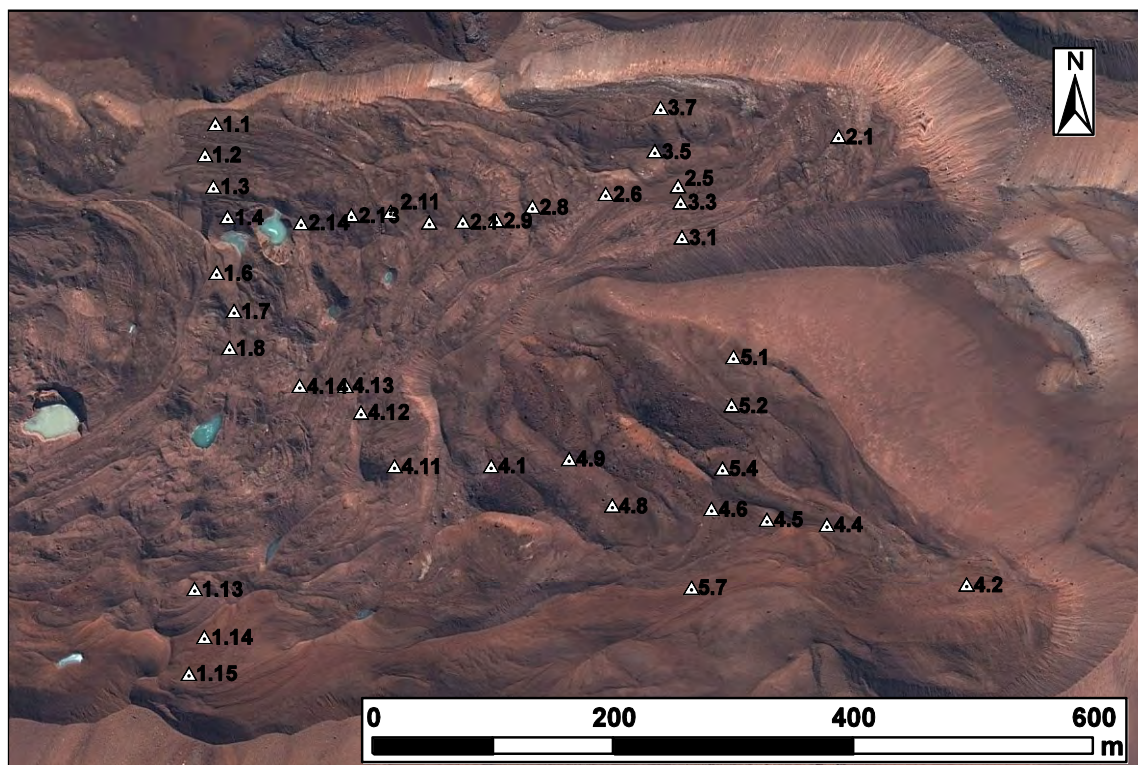


Figura 126. Distribución de los puntos de referencia medidos en el glaciar tapado durante diciembre de 2013 y octubre de 2014. Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

10.3.2 Glaciar rocoso Llano de las Liebres

Durante el levantamiento de GPS diferencial en el glaciar rocoso Llano de las Liebres realizado el día 15 de mayo de 2015, se encontraron 33 de los 55 puntos originalmente demarcados en roca (DGA, 2010). Durante el post-proceso se eliminó 1 punto GPS por problemas asociados a la geometría de los satélites (altos valores en el PDOP). Finalmente, los 32 puntos obtenidos fueron comparados con los valores medidos en la penúltima campaña de levantamiento de GPS diferencial realizada el 23 de abril de 2014 (Figura 127).

Los resultados obtenidos indican claramente que el glaciar rocoso se encontraba activo durante el periodo 2014–2015 (Tabla 98). La actividad se refleja en desplazamientos horizontales y verticales promedio de 0,79 m y 0,18 m, respectivamente. La dirección predominante del desplazamiento horizontal es Sur-Sureste, mientras que el desplazamiento vertical sugiere un rebajamiento en toda la superficie del glaciar. La superficie del glaciar presenta una velocidad promedio de desplazamiento de $0,74 \text{ m}^{-a}$, un valor ligeramente inferior que el calculado durante el periodo anterior (2012-2014).

Tabla 98. Desplazamiento de los puntos de referencia en el glaciar rocoso Llano de la Liebres, entre las campañas de medición de abril de 2014 y mayo de 2015.

ID	23 de abril 2014			15 de mayo 2015			D_vert (m)	D_hor (m)	Vel (m ^a)
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1.1	408547,9	6653629,9	4092,5	408548,3	6653629,0	4092,2	-0,30	1,01	0,95
1.2	408557,0	6653569,8	4076,9	408557,5	6653568,9	4076,7	-0,22	1,08	1,02
1.3	408592,8	6653540,0	4067,3	408593,2	6653539,1	4067,2	-0,10	0,91	0,85
1.4	408613,3	6653467,5	4052,2	408613,8	6653466,5	4052,0	-0,16	1,07	1,01
1.5	408641,9	6653409,2	4042,4	408642,5	6653408,1	4042,0	-0,40	1,29	1,22
1.6	408668,5	6653369,8	4032,9	408669,2	6653368,7	4032,4	-0,43	1,31	1,23
1.11	408770,6	6653173,7	3981,4	408771,0	6653172,3	3981,0	-0,44	1,48	1,39
1.13	408832,9	6653050,1	3947,9	408833,4	6653049,0	3947,7	-0,25	1,23	1,16
1.14	408864,3	6652994,4	3939,3	408864,7	6652993,3	3939,1	-0,19	1,12	1,05
1.16	408893,2	6652888,7	3924,6	408893,4	6652887,7	3924,5	-0,17	1,00	0,94
1.2	408956,3	6652746,1	3893,4	408956,9	6652745,1	3893,2	-0,26	1,15	1,08
1.21	408961,3	6652712,2	3885,4	408961,9	6652711,1	3885,1	-0,35	1,22	1,15
1.22	408978,1	6652677,4	3871,2	408978,5	6652676,2	3870,7	-0,45	1,24	1,17
1.23	408980,9	6652611,5	3841,1	408980,7	6652610,3	3840,6	-0,50	1,23	1,16
1.24	408980,0	6652556,7	3818,5	408980,1	6652555,7	3818,1	-0,40	1,05	0,99
1.25	408986,5	6652506,3	3796,5	408986,4	6652505,9	3796,3	-0,20	0,46	0,44
1.26	408987,7	6652484,2	3796,4	408987,6	6652483,7	3796,3	-0,06	0,49	0,46
1.28-5.3	408979,6	6652453,2	3788,5	408979,4	6652452,8	3788,5	-0,07	0,52	0,49
3.1	408914,2	6652976,3	3931,8	408914,3	6652976,3	3931,8	-0,03	0,01	0,01
3.2	408904,2	6652965,3	3933,0	408904,4	6652964,3	3933,0	-0,05	1,01	0,95
3.5	408844,2	6652932,5	3930,7	408844,5	6652931,6	3930,6	-0,07	0,98	0,92
4.2	408943,1	6652818,7	3908,0	408943,4	6652818,3	3907,9	-0,13	0,48	0,45
4.3-1.18	408924,1	6652793,4	3908,0	408924,4	6652792,5	3907,9	-0,13	0,98	0,92
4.4	408909,1	6652783,1	3905,1	408909,5	6652782,3	3905,0	-0,12	0,95	0,89
4.5	408893,7	6652767,5	3898,2	408893,8	6652766,8	3898,0	-0,21	0,72	0,68
5.1	408958,3	6652462,1	3787,3	408958,2	6652461,7	3787,3	-0,07	0,40	0,38
5.4	408989,4	6652461,2	3788,4	408989,3	6652460,7	3788,4	-0,04	0,49	0,46
5.5	409002,0	6652463,6	3789,7	409002,0	6652463,2	3789,6	-0,10	0,40	0,38
6.1	409038,2	6652428,9	3767,7	409038,2	6652428,9	3767,7	0,00	0,02	0,02
6.2	409048,7	6652439,1	3768,7	409048,7	6652439,1	3768,7	-0,01	0,01	0,01
6.3	409050,5	6652445,1	3769,3	409050,5	6652445,1	3769,3	0,00	0,01	0,01
6.4	409058,2	6652452,8	3771,5	409058,2	6652452,8	3771,5	0,00	0,00	0,00

ID: Identificador del punto en terreno.

D_vert: Componente vertical del desplazamiento.

D_hor: Componente horizontal del desplazamiento.

Vel: Velocidad horizontal en metros por año.

(1) Precisión promedio vertical 0,01 m; precisión promedio horizontal 0,01 m.

(2) Precisión promedio vertical 0,01 m; precisión promedio horizontal 0,01 m.

* Coordenadas en DATUM WGS84 – UTM 19S y Geoide EGM96.

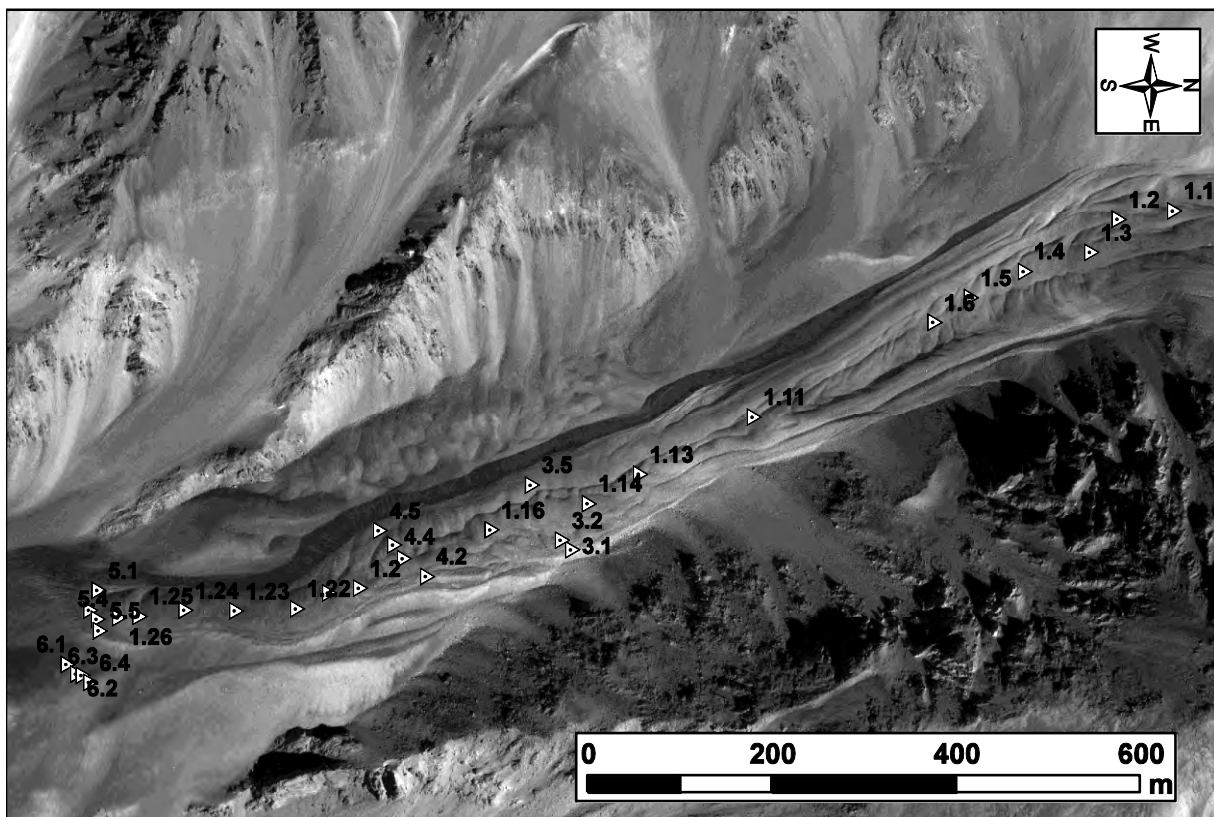


Figura 127. Distribución de los puntos de referencia medidos en el glaciar Llano de las Liebres durante abril de 2014 y mayo de 2015. Imagen: GeoEye, 12-04-2010.

11.CONCLUSIONES

El estudio realizado, en conjunto con los resultados y productos obtenidos, permiten esbozar las siguientes conclusiones y recomendaciones generales:

- El método empleado para el balance de masa en los glaciares analizados es adecuado para las mediciones de la acumulación y ablación puntual, pero requiere ciertas consideraciones especiales. Cuando se quiere analizar glaciares descubiertos y cubiertos de detritos, estos requieren metodologías de trabajo distintas. En general para todos los glaciares, es necesario tener una red de balizas suficientemente distribuida para determinar las zonas donde existe una mayor acumulación y menor ablación (y viceversa) para realizar adecuadamente un balance de masa distribuido.
- La instalación de balizas de ablación en los glaciares cubiertos debería ser programada al final del periodo estival cuando no hay nieve. De esta manera, se permite que en el siguiente período de mediciones, las balizas continúen instaladas en el hielo, sin la necesidad de remover la nieve acumulada durante el periodo invernal. Estas mediciones pueden ser complementadas con mediciones del espesor del manto nival cuando las balizas se encuentran cubiertas con nieve.
- Con respecto a los resultados del balance de masa glaciológico en el glaciar Tapado descubierto, las cifras muestran que el año hidrológico 2013 hubo mayor ablación que el año 2014, (período entre octubre y enero) $-0,55$ m a.e. y $-0,44$ m a.e., respectivamente. Mientras que en Chile Central, pasa lo opuesto, es decir, los glaciares Bello y Pirámide sufrieron mayor ablación el año hidrológico 2014 que el año 2013.
- El monitoreo fotográfico permite de una manera sencilla y practica estimar el albedo distribuido en una superficie glaciar. Sin embargo, el desarrollo de una superficie irregular (penitentes) implica que los valores de albedo puntual obtenidos desde el juego de radiómetros no sean muy representativos de una superficie idealmente plana. En términos generales, los valores de albedo estimado pueden ser de utilidad para tener una idea general del comportamiento de la superficie glaciar, pero su utilización en modelos de balance de energía tiene que ser tomado con cautela. En el caso de glaciares cubiertos completamente por detritos, el monitoreo fotográfico para estimar el albedo pierde utilidad, ya que la superficie del glaciar durante el

periodo estival tiene un albedo prácticamente constante determinado por el detrito superficial.

- Las fotografías georeferenciadas obtenidas desde las cámaras fotográficas automáticas pueden ser de utilidad para monitorear los cambios morfométricos en el glaciar, como la aparición de lagunas de termokarst y otras formas asociadas. Adicionalmente, los juegos de fotografías georeferenciadas pueden servir para monitorear el desplazamiento del glaciar, mediante técnicas basadas en el rastreo óptico de formas en la superficie del glaciar.
- Los trípodes de montaje para las estaciones meteorológicas funcionan adecuadamente en glaciares con superficies estables, como son por ejemplo los glaciares cubiertos Pirámide y Tapado. En este tipo de superficies, las estaciones se pueden mantener durante todo el año, potenciando la obtención de datos continuos. Sin embargo, los trípodes son inestables en superficies de hielo que cambian rápidamente. Por ejemplo, los trípodes son propensos al colapso en superficies con penitentes debido a la inestabilidad de la estructura (como en el caso del glaciar Tapado descubierto). Adicionalmente, los trípodes no deberían ser localizados en campos de grietas debido al peligro tanto de perder la estación como para el personal que realiza la instalación y mantención del equipo (como en el caso de la estación meteorológica en el glaciar Yeso).
- En los glaciares cubiertos, la instalación y ubicación de estaciones meteorológicas con marcos de ablación tiene que ser escogida con cautela. Lo anterior es debido a que el espesor de la cubierta detrítica puede ser bastante grande (superiores a 1 m), dificultando la instalación de los marcos de ablación en el hielo.
- Utilizando los datos meteorológicos se pudo realizar la estimación del gradiente de temperatura y precipitación en la zona de Norte de Chico y Chile central. Para la zona de Norte Chico se calculó un gradiente de temperaturas de $-0,18^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de elevación, y un gradiente de precipitación de $-19,36$ mm por cada 100 m de elevación. En Chile central los gradientes de temperatura y humedad entregaron valores de $0,67^{\circ}\text{C}$ y $0,84$ mm por cada 100 m de elevación, respectivamente. El elevado gradiente de precipitación en la zona de Tapado se explica porque las condiciones climáticas de la cordillera sobre los 4000 m snm son mucho más húmedas que la zonas aguas abajo en donde hay sectores de híper aridez.
- El método de regresión múltiple para el balance de masa distribuido es adecuado solamente en lugares donde la distribución de las balizas no es homogénea, ya que permite dar una primera aproximación a la distribución de la acumulación y ablación

del glaciar. Por otro lado, el método de polígonos de Thiessen es uno de los más representativos para el balance de masa distribuido y es útil para lugares con distribución de balizas relativamente homogéneas o en lugares donde se hacen mediciones en distintos puntos entre un año y otro o en distintas campañas de terreno. Al igual que el anterior, corresponde una primera aproximación a la realidad del glaciar, no obstante, puede ser mejorado u optimizado con métodos más eficaces para poder distribuir mejor el balance de masa del glaciar.

- Los modelos empíricos o “conceptuales” de derretimiento no son muy adecuados para glaciares donde hay elevadas tasas de sublimación como en el glaciar Tapado y en algunos glaciares de Chile Central. Es recomendable enfocarse en el cálculo del balance de energía para determinar adecuadamente las tasas de derretimiento y sublimación.
- Los resultados obtenidos muestran que un esfuerzo como el realizado en este proyecto permite la construcción de un modelo hidro-glaciológico detallado que permite evaluar el balance de masa y el aporte hídrico de los glaciares. Al analizar los resultados de forma conjunta es posible concluir que:
 - La elevación controla el balance de masa de glaciares descubiertos.
 - El espesor de la cubierta de detritos controla el balance de masa de los glaciares cubiertos.
 - El aporte de las avalanchas es importante y modula el balance de masa de glaciares cubiertos y descubiertos.
 - En general, la cobertura nival provee los mayores aportes hídricos a las cuencas, con notables excepciones en temporadas secas donde el aporte glaciar puede dominar por completo la generación de escorrentía.
- El modelo utilizado en este estudio aún cuenta con varios módulos que deben ser mejorados o adaptados mejor forma a la hidrología de los Andes centrales. En particular, es necesario incorporar una estimación de la sublimación en el balance de masa y una parametrización especial para el derretimiento proveniente de los glaciares de roca. Si bien estos dos procesos poseen una influencia menor en la modelación de sólo dos temporadas, pueden llegar ser muy relevantes en la modelación a largo plazo de la evolución de estos glaciares.
- Las principales fuentes de incertidumbre en los resultados son el espesor de la cobertura de detritos, la distribución espacial de la precipitación, la influencia de la sublimación, el aporte hídrico de los glaciares de roca y la interacción con los acuíferos y flujos sub-superficiales. Cualquier avance en la estimación de estas

cantidades o procesos contribuirá disminuir la incertidumbre en los resultados obtenidos en este estudio.

- La instalación de estaciones fluviométricas en las secciones superiores de los cursos de aguas provenientes de glaciares tiene que ser evaluada cuidadosamente. Esto es debido a que los cursos de agua cambian constantemente, generando potenciales pérdidas de equipos y discontinuidad en las mediciones.
- Con respecto a la modelación del régimen térmico de los glaciares rocosos Tapado y Llano de las liebres se puede decir que la elevación es la principal variable que determina la temperatura media anual del suelo (MGST), ya que de ella depende la temperatura atmosférica del lugar. La segunda variable más importante es la radiación potencial, un sitio cercano a una ladera empinada con exposición sur recibirá menos radiación directa durante el día, por lo que tiende a ser más frío. Teóricamente un sitio rico en permafrost, como un glaciar rocoso, también será más frío que una superficie sin hielo soterrado, a la misma elevación y misma radiación potencial. Lo mismo pasa con los sitios con cubierta de nieve de larga duración (LLS), serán más fríos que los sitios con cubierta de nieve sin larga duración a la misma altura, y misma radiación. Por último los sitios que tengan más días con cubierta de nieve serán más fríos que los sitios con menos días cubiertos de nieve a igual elevación y radiación.

En los glaciares rocosos Llano de las Liebres y Tapado, el año hidrológico 2012-2013 fue más frío que el año hidrológico 2014-2015 (MGST: 1,87°C y 3,39°C, respectivamente), debido a que el año 2012-2013 tuvo mucha más cantidad de precipitación de nieve, la que impidió que las temperaturas atmosféricas penetraran en la capa activa del glaciar gran parte del año, manteniéndose la superficie fría y sin oscilaciones térmicas importantes hasta mediados de primavera, cuando se derrite la nieve. Estas temperaturas de MGST son un tanto elevadas para un área de glaciar rocoso, lo que puede indicar que estos cuerpos de hielo no se encuentran en balance con el clima actual de esta zona y que experimentan un proceso de degradación de su núcleo.

- En relación a los sensores de temperatura superficial de los glaciares rocosos Tapado y Llano de las Liebres (MTDs), no se recomienda la descarga de datos ni mantención durante el mes de octubre, ya que por lo general estos sensores se encuentran cubiertos de una capa de nieve. La excavación de nieve para obtener los datos almacenados en los MTDs significa destruir el manto nival del sector e interrumpir la obtención de datos de presencia de cobertura nival, que es el objetivo de estos

sensores. Estos datos son de suma importancia para realizar la modelación y determinación del régimen térmico del glaciar rocoso. Se recomienda la descarga y mantención de estos sensores cuando la nieve haya desaparecido completamente, es decir a finales del periodo estival.

- Las mediciones puntuales de velocidad en los glaciares deberían ser complementadas con técnicas de percepción remota, como son la comparación de imágenes satelitales de distintos años, a modo de establecer el desplazamiento en toda la superficie del glaciar.
- Con respecto al balance de masa geodésico, los resultados muestran que, para el caso del glaciar Tapado, el balance de masa es positivo (0,35 m a.e.). Esto se debe a que el período de análisis de las imágenes no considera la temporada estival. Para los glaciares de Chile Central en cambio, el balance de masa geodésico es en el glaciar Bello -1,89 m a.e., glaciar Pirámide -2,32 m a.e. y glaciar Yeso -1,70 m a.e. El período de análisis para Chile Central va desde el 27 de febrero de 2014 hasta el 5 de enero de 2015, es decir, considera casi un año completo. Los datos obtenidos en el balance de masa geodésico no pueden ser comparados directamente con el balance de masa glaciológico, ya que consideran períodos diferentes.

12.BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, N.S., Rees, W.G., Hodson, A.J., Kohler, J., 2006. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 111, 1–15.
- Barrett, B.S., Garreaud, R.D., Falvey, M., 2009. Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Mon. Weather Rev.* 137, 3092–3109.
- Barsch, D., 1996. *Rockglaciers*. Springer- Verlag, Berlin.
- Benn, D., Evans, D., 2010. *Glaciers and glaciation*, 2nd Edition. ed. Hodder Education.
- Berthier, E., Arnaud, Y., Baratoux, D., Vincent, C., Rémy, F., 2004. Recent rapid thinning of the “Mer de Glace” glacier derived from satellite optical images. *Geophys. Res. Lett.* 31, 17401–17500.
- Beven, K., 2001. Calibration, validation and equifinality in hydrological modelling, in *Model validation: Perspectives in hydrological science*, pp. 44–55.
- Bintanja, R., van den Broeke, M.R., 1995. The surface energy balance of antartic snow and blue ice.pdf. *J. Appl. Meteorol.*
- Bozhinskiy, A., Krass, M., Popovnin, V., 1986. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers. *J. Glaciol.* 32, 255–266.
- de Bruin, H. A. R. y Lablans, W. N., 1998. Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation, *Hydrol. Process.*, 12(7), 1053–1062.
- Carenzo, M., 2012. *Distributed modelling of changes in glacier mass balance and runoff*. ETH, Zürich, Switzerland.
- Carenzo, M., Pellicciotti, F., Mabillard, J., Reid, T.D., Brock, B.W., 2015. An enhanced debris temperature index model accounting for thickness effect. *En Prep.*
- Cartes, M.A., 2009. *Pronóstico de Volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIA*. Universidad de Chile.
- Chinn, T.J.H., 1995. Glacier fluctuations in the Southern Alps of New Zealand determined from snowline elevations. *Arct. Alp. Res.* 27, 187–198.
- Ciarapica, L., Todini, E., 2002. TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrol. Process.* 16, 207–229.
- Cogley, J.G., 2009. Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. *Ann. Glaciol.* 50, 96–100.
- Corripio, J.G., 2004. Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *Int. J. Remote Sens.* 25, 5705–5729.
- Cuffey, K.M., Paterson, W.S.B., 2010. *The Physics of Glaciers*, 4th ed. Elsevier, Burlington,USA.

- Dadic, R., Mott, R., Lehning, M., Carenzo, M., Anderson, B., Mackintosh, A., 2012. Sensitivity of turbulent fluxes to wind speed over snow surfaces in different climatic settings. *Adv. Water Resour.* 55, 178–189.
- DGA, 2004. Diagnostico y clasificación de los curso y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Copiapó. CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería, Santiago.
- DGA, 2010. Dinámica de glaciares rocosos en el Chile semiárido. S.I.T. 234, Santiago.
- DGA, 2012a. Caracterización y monitoreo de glaciares rocosos en la cuenca del río Elqui, y balance de masa del glaciar Tapado. S.I.T. 285, Santiago.
- DGA, 2012b. Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central. S.I.T. 307, Santiago.
- Essery, R., Morin, S., Lejeune, Y., B Ménard, C., 2013. A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. *Adv. Water Resour.* 55, 131–148.
- Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P. y Bordoy, R., 2014. Does internal climate variability overwhelm climate change signals in streamflow? The upper Po and Rhone basin case studies., *Sci. Total Environ.*
- Fiebig-Wittmaack, M., Astudillo, O., Wheaton, E., Wittrock, V., Perez, C., Ibacache, A., 2012. Climatic trends and impact of climate change on agriculture in an arid Andean valley. *Clim. Change* 111, 819–833.
- Fischer, A., 2011. Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *Cryosph.* 5, 107–124.
- Francou, B., Pouyand, B., 2004. Métodos de observación de los glaciares en los Andes Tropicales: Mediciones de terreno y procesamiento de datos.
- Garreaud, R.D., 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 7, 3–11.
- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V. V., 2003. MODIS/Aqua Snow Cover 8-Day L3 Global 0.05Deg CMG V004, January to March 2003. Boulder, USA.
- Hock, R., 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *J. Hydrol.* 282, 104–115.
- Hock, R. , 2005. Glacier melt: a review of processes and their modelling, *Prog. Phys. Geogr.*, 29(3), 362–391.
- Hock, R., Holmgren, B., 2005. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciaren, Sweden. *J. Glaciol.* 51, 25–36.
- Hooke, R.L.B., 2005. *Principles of Glacier Mechanics*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, C., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R., Kohler, M., 2002. Mesoscale wind regimes in Chile at 30°S. *J. Appl. Meteorol.* 41, 953–970.

- Kaser, G., Fountain, A., Jansson, P., 2003. A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. IHP, Technical Documents in Hydrology, Paris, France.
- Kirchner, J. W., 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, *Water Resour. Res.*, 42(3), 1–5.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35, 169–184.
- Liston, G., Sturm, M., 1998. A snow-transport model for complex terrain. *J. Glaciol.*
- Liu, Z. y Todini, E. 2002. Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6(5), 859–881.
- Mayo, L., Meier, M.F., Tangborn, W. V., 1972. A system to combine stratigraphic and annual mass-balance systems: a contribution to the International Hydrological Decade. *J. Glaciol.* 11, 3–14.
- Miller, A., 1976. The climate of Chile. *World Surv. Climatol.*
- Mölg, T., Cullen, N.J., Hardy, D.R., Kaser, G., Klok, L., 2008. Mass balance of a slope glacier on Kilimanjaro and its sensitivity to climate. *Int. J. Climatol.* 892, 881–892.
- Mölg, T., Hardy, D.R., 2004. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *J. Geophys. Res.* 109, D16104.
- Monin, A., Obukhov, A., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR* 24, 163–187.
- Ohlanders, N., Rodriguez, M., McPhee, J., 2013. Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1035–1050.
- Ohmura, A., 2001. Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. *J. Appl. Meteorol.*
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. Taylor & Francis.
- Ostrem, G., Brugman, M., 1991. *Glacier Mass-Balance Measurements. A manual for field and office work.* NHRI Science Report 4, Environment Canada. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Canada.
- Paschalis, A., Fatichi, S., Molnar, P., Rimkus, S., Burlando, P., 2014. On the effects of small scale space-time variability of rainfall on basin flood response. *J. Hydrol.* 514, 313–327.
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., Corripio, J., 2005. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland. *J. Glaciol.* 51,

573–587.

- Pellicciotti, F., Carenzo, M., Helbing, J., Rimkus, S., Burlando, P., 2009. On the role of subsurface heat conduction in glacier energy-balance modelling. *Ann. Glaciol.* 50, 16–24.
- Ragettli, S., Cortés, G., McPhee, J. y Pellicciotti, F., 2013. An evaluation of approaches for modelling hydrological processes in high-elevation, glacierized Andean watersheds, *Hydrol. Process.*
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J.-E., Carenzo, M., 2008. A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity. *Hydrol. Process.* 22, 3980–3997.
- Pellicciotti, F., Ragettli, S., Carenzo, M., McPhee, J., 2014. Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Sci. Total Environ.* 493, 1197–210.
- Pomeroy, J., Gray, D., Landine, P., 1993. The prairie blowing snow model: characteristics, validation, operation. *J. Hydrol.* 144, 165–192.
- Pourrier, J., Jourde, H., Kinnard, C., Gascoin, S., Monnier, S., 2014. Glacier meltwater flow paths and storage in a geomorphologically complex glacial foreland: The case of the Tapado glacier, dry Andes of Chile (30°S). *J. Hydrol.* 519, 1068–1083.
- Ragettli, S., 2014. Modeling the response of high-elevation, glacierized watersheds to climate change: a new methodological framework applied to the Andes and the Himalaya. ETH-Zurich, Zurich, Switzerland.
- Ragettli, S., Pellicciotti, F., 2012. Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glaciometeorological processes to constrain model parameters. *Water Resour. Res.* 48, W03509.
- Ragettli, S., Pellicciotti, F., Immerzeel, W. W., Miles, E., Petersen, L., Heynen, M., Shea, J. M., Stumm, D., Joshi, S. y Shrestha, a. B., 2014. Unraveling the hydrology of a Himalayan watershed through integration of high resolution in- situ data and remote sensing with an advanced simulation model, *Adv. Water Resour.*, 78, 94–111.
- Reid, T.D., Brock, B.W., 2010. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer. *J. Glaciol.* 56, 903–916.
- Reid, T.D., Carenzo, M., Pellicciotti, F., Brock, B.W., 2012. Including debris cover effects in a distributed model of glacier ablation. *J. Geophys. Res.* 117, D18105.
- Rivera, A., Corripio, J.G., Brock, B., Clavero, J., Wendt, J., 2008. Monitoring ice-capped active Volcán Villarrica, southern Chile, using terrestrial photography combined with automatic weather stations and global positioning systems. *J. Glaciol.* 54, 920–930.
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.-E., Wagnon, P.,

- Arnaud, Y., Favier, V., Lejeune, Y., 2009. Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Ann. Glaciol.* 50, 1–8.
- Sugiyama, S., 2003. Influence of surface debris on summer ablation in Unteraar-and Lauteraargletscher, Switzerland. *Bull. Glaciol. Res.* 20, 41–47.
- Trombotto, D., Borzotta, E., 2009. Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Cold Reg. Sci. Technol.* 55, 321–330.
- van den Broeke, M.R., Reijmer, C., Van As, D., Van de Wal, R., Oerlemans, J., 2005. Seasonal cycles of Antarctic surface energy balance from automatic weather stations. *Ann. Glaciol.* 41, 131–139.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Kaser, G., Berton, P., 1999. Energy balance and runoff seasonality of a Bolivian glacier 49–58.
- Wolaver, B.D., 1999. Comparison of snow distribution methods in the Echaurren Basin, Chilean Andes. The University of Arizona.

13.ANEXOS:

13.1 CÁLCULO DE LAS GRADIENTES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN EL NORTE CHICO Y CHILE CENTRAL

Norte Chico

Para la obtención de la gradiente de temperatura en el Norte Chico, se compararon los promedios de la temperatura de las estaciones Tapado descubierto (4775 m snm) y cubierto (4570 m snm), con los períodos de datos coincidentes (-0,75°C en Tapado descubierto y -0,31°C en cubierto), lo cual muestra que la gradiente es de -0,18° C por cada 100 m de altura. Ambas estaciones corresponden al proyecto y están descritas en el informe.

Los períodos coincidentes se tomaron para ambas temporadas y su realización es mediante un compilado de datos de ambas estaciones para todas las temporadas. El período sin datos de Tapado descubierto implica que se suprimen los datos de Tapado cubierto y viceversa. Lo anterior permite comparar bajo un período en común. Posteriormente, se calcula un promedio de temperatura de los períodos en común, para luego realizar una regresión simple, la cual normalmente se realiza en una hoja de cálculo, con el dato de la altitud y realizando un gráfico entre temperatura promedio y altitud. Posteriormente se extrae la función de regresión lineal ($Y = ax + b$) donde "x" es la temperatura y "Y" es la altitud. Se reemplaza "Y" por un valor conocido (4000 m snm) para luego calcular la temperatura promedio a esa altitud, posteriormente se coloca en "Y" el valor 100 m mayor (4100 m snm) para luego calcular dicha temperatura. Luego se restan ambos valores de temperatura y se obtiene el gradiente de temperatura por cada 100 m de altura.

Para el caso de la precipitación, durante todas las temporadas, se compararon estaciones meteorológicas con pluviómetros ubicadas en la cuenca, pero que no corresponden al proyecto. Estas estaciones son La Laguna Embalse y Tapado Morrena. La estación La Laguna Embalse está ubicada en los 30° 12' 8,36" S; 70° 2' 29,16" W a 3160 m snm. Es administrada por la Dirección General de Aguas (DGA) y está ubicada a un costado del refugio de la Junta de Vigilancia Río Elqui y sus Afluentes (JVRE), unos pocos metros al norte del embalse La Laguna. Posee datos desde 1964 y tiene mediciones de precipitación diaria y nieve acumulada. La estación Tapado Morrena (oficialmente El Tapado) está ubicada en los 30° 9' 24,12" S; 69° 54' 51,16" W a 4318 m snm. Es administrada y mantenida por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) y está

funcionando desde noviembre de 2009 con mediciones de altura de nieve, pero desde mayo de 2013 se instalaron 2 pluviómetros GEONOR asociados al proyecto SPICE de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Uno de ellos posee escudos Alter que permiten protegerlo del viento y el otro pluviómetro no lo posee.

Para calcular la gradiente de precipitación, se realiza la misma metodología anterior, esto es comparar los períodos en común (en este caso la variable precipitación diaria), sacar el promedio para las temporadas analizadas, realizar una regresión simple y evaluar por cada 100 m de altura. El valor obtenido es de 19,36 mm por cada 100 m de altura.

Chile Central

Para el cálculo de la gradiente de temperatura en Chile Central, se compararon los promedios para toda la temporada en las estaciones meteorológicas Bello, Pirámide, San Francisco y Yeso. Para este caso, se descartan las estaciones Yeso Vaisala y Pirámide Vaisala, ya que, para hacer esta gradiente, deben tener los mismos sensores (en este caso, temperatura del aire aspirado), elemento que no poseen dichas estaciones.

La metodología usada es similar a la ocupada en el Norte Chico, salvo algunas diferencias. En estaciones aledañas (por ejemplo Bello y Yeso), se realizan regresiones y estimaciones de temperatura cuando una de estas estaciones no tiene datos. Este procedimiento se hace, para no perder datos de un período importante de tiempo, que puede alterar el promedio de la temporada y, por ende, el gradiente de temperatura. Otra diferencia es que la regresión simple se realiza con 4 estaciones, siendo la más adecuada la regresión lineal, pero esta decisión se debe tomar observando los datos (ya que podría ser polinómica o logarítmica). Adicionalmente, se realizaron gradientes por cada temporada (elemento que no se podría realizar en Norte Chico por escasez de datos) para las 4 estaciones. Para la temporada 2013-2014, la gradiente era de $-0,65^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de altura. Para la temporada 2014-2015 la gradiente era de $-0,67^{\circ}\text{C}$ y para ambas temporadas, la gradiente era de $-0,67^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de altura.

Para el caso de la precipitación se usaron 2 estaciones ubicadas en la cuenca pero que no pertenecen al proyecto. Estas estaciones son El Yeso Embalse y San Gabriel. La estación El Yeso Embalse está ubicada en los $33^{\circ} 40' 48'' \text{ S}$; $70^{\circ} 5' 27'' \text{ W}$ a 2475 m snm. Es administrada por la DGA y se encuentra al suroeste del embalse El Yeso. Posee datos desde 1962 a la fecha y posee mediciones de precipitación diaria.

La estación San Gabriel se encuentra en los $33^{\circ} 47' 9''$ S y $70^{\circ} 14' 30''$ W 1266 m snm. También es administrada por la DGA y se encuentra a un costado de la localidad del mismo nombre. Posee datos desde 1977 y también posee mediciones de precipitación diaria. Los datos de ambas estaciones se obtuvieron mediante el Sistema Nacional de Información del Agua (SNIA), plataforma en línea disponible en la página web de la DGA.

Dado que las estaciones meteorológicas asociadas al proyecto no poseen pluviómetros, se requiere usar datos de estaciones aledañas dentro de la cuenca, que permita dar una aproximación de la gradiente de precipitación en el área de estudio. Tampoco es posible estimar la precipitación mediante el sensor de altura de nieve, debido a que la mayoría de los sensores (exceptuando al de Pirámide) se instalaron durante la temporada estival, lo cual no permite detectar las mediciones específicas de precipitación en invierno. Además existe potencial riesgo de daño del sensor de altura de nieve (como sucedió en Tapado Morrena en 2015) o el sepultado de la estación por la nieve (como sucedió en Bello y Tapado Cubierto en 2015). Por ello, se analizan estaciones ubicadas en sectores inferiores que aseguren la medición diaria durante la temporada analizada.

La metodología usada es similar a la usada en el Norte Chico, esto es, analizar períodos de datos en común de la precipitación diaria, sacar el promedio para las temporadas analizadas. Posteriormente, se realiza una regresión simple y se evalúa la función por cada 100 m de altura. El valor que se obtuvo para toda la temporada en Chile Central es de 0,84 mm por cada 100 m de altura.

13.2 ARCHIVOS DIGITALES

Se incluyen los siguientes archivos digitales:

1. Albedo: mapas de albedo de los glaciares Tapado, Bello y Pirámide.
2. Bitacoras: archivo PDF con un compilado de todas las bitácoras de terreno del proyecto.
3. Camaras_Fotografias: fotografías adquiridas por las cámaras fotográficas automáticas en los glaciares Tapado, Bello y Pirámide.
4. Caudales: datos tabulares de los caudales en Zona Norte y Chile Central.
5. Cintas_Termistoras: serie de datos crudos y tabulares de las cintas termistoras de los glaciares rocosos Tapado y Llano de las Liebres.
6. Datos_balance: datos crudos de las redes de balizas instaladas y las calicatas realizadas en los glaciares Tapado, Bello y Pirámide.
7. DGPS: Datos crudos y tabulares DGPS de los glaciares Tapado y Bello.
8. Estaciones_Meteorologicas: datos crudos y tabulares obtenidos desde las estaciones meteorológicas automáticas en los glaciares Bello, Yeso, San Francisco, Tapado, Tapado (cubierto), Pirámide y Pirámide (Vaisala).
9. Fichas_GEUS: fichas de instalación y mantención para las estaciones GEUS.
10. Fotografias_Aforos: set de fotografías con los aforos realizados en Zona Norte y Chile Central.
11. Fotografias_GEUS: set de fotografías de todas las estaciones meteorológicas del proyecto.
12. MTD: serie de datos de los MTDs de los glaciares rocosos Tapado y Llano de las Liebres.
13. SHAPES: archivos en formato SHP de los puntos, balizas, polígonos y mapas del proyecto
14. Taller: archivo PDF con el resumen de los dos talleres realizados a los funcionarios de la DGA.
15. Video: videos de las líneas de nieve de los glaciares Bello, Pirámide y Tapado.