



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

**ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE
HIELO MEDIANTE RADIO ECO SONDAJE
EN CHILE CENTRAL**

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS

S.I.T. N° 288

Santiago, Noviembre de 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministra de Obras Públicas
Abogada Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves
Dr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Armando Peña González

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS

Jefe de Proyecto
Dr. Andrés Rivera Ibáñez

Profesionales:

Ingeniero Civil Electrónico Sr. Rodrigo Zamora Maric
Ingeniero Electrónico Sr. José Uribe Parada
Ingeniero Civil Acústico Sr. Jonathan Oberreuter Álvarez
MSc. Thomas Loriaux
Dra. Guisella Gacitúa Lovera
MSc. Francisca Bown González

Tabla de contenidos

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	15
RESUMEN	18
1 INTRODUCCIÓN	19
1.1 Glaciares en la cuenca del Maipo	20
1.2 Glaciares en la cuenca del Rapel	20
1.3 Radio Eco Sondaje en hielos	21
1.4 Estudios previos de RES en glaciares temperados	22
2 OBJETIVOS	24
2.1 Objetivo general	24
2.2 Objetivos específicos	24
3 METODOLOGÍA	25
3.1 Áreas de estudio	25
3.1.1 Glaciares cuenca del río Maipo	26
3.1.2 Glaciares cuenca del río Rapel	26
3.2 Mediciones RES	26
3.2.1 Descripción del sistema de medición	26
3.2.2 Captura de datos	27
3.2.3 Procesamiento e interpretación	28
3.2.4 Post-proceso de datos	29
3.3 Campañas de medición	31
3.3.1 Campaña 1: Rancagua con radar aerotransportado de 50 [MHz]	31
3.3.2 Campaña 2: Santiago con radar aerotransportado de 50 [MHz]	31
3.3.3 Campaña 3: Rancagua con radar aerotransportado de 20 [MHz]	31
4 RESULTADOS	33
4.1 Glaciar Esmeralda	34
4.1.1 Perfiles	34
4.1.2 Volumen	41
4.2 Glaciar La Paloma	43
4.2.1 Perfiles	43
4.2.2 Volumen	50

4.3	Glaciar Del Rincón	52
4.3.1	Perfiles.....	52
4.3.2	Volumen.....	59
4.4	Glaciar Cerro El Plomo	61
4.4.1	Perfiles.....	61
4.4.2	Volumen.....	68
4.5	Glaciar Yeso.....	70
4.5.1	Perfiles.....	70
4.5.2	Volumen.....	77
4.6	Glaciar Bello	79
4.6.1	Perfiles.....	79
4.6.2	Volumen.....	86
4.7	Glaciar Yeso 2	88
4.7.1	Perfiles.....	88
4.7.2	Volumen.....	95
4.8	Glaciar Echaurren.....	97
4.8.1	Perfiles.....	97
4.8.2	Volumen.....	103
4.8.3	Comparación con mediciones 2009.....	104
4.9	Glaciar Mesón Alto	107
4.9.1	Perfiles.....	107
4.9.2	Volumen.....	115
4.10	Glaciar San Francisco	117
4.10.1	Perfiles.....	117
4.10.2	Volumen.....	124
4.10.3	Comparación con mediciones 2009.....	126
4.11	Glaciar Cipreses Norte.....	129
4.11.1	Perfiles.....	129
4.11.2	Volumen.....	137
4.12	Glaciar Universidad	139
4.12.1	Perfiles.....	139
4.12.2	Volumen.....	149
4.12.3	Comparación con mediciones 2009.....	150

4.13	Resumen de Resultados.....	156
5	DISCUSIÓN	158
5.1	Cambios de espesor de hielo en Chile central y su relación con la variabilidad climática.....	158
5.1.1	Glaciar Echaurren.....	160
5.1.2	Glaciar San Francisco	160
5.1.3	Glaciar Universidad.....	161
5.2	Tamaño de glaciar versus espesores	162
5.3	Estimación de error.....	165
6	CONCLUSIONES	169
7	AGRADECIMIENTOS	170
8	REFERENCIAS.....	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2.1 Variaciones del glaciar Universidad entre 1945 y 2010. Fuente: DGA, 2011b....	21
Figura 3.2.1 Sistema RES de 50 [MHz]. Antena sostenida por helicóptero (a) y un acercamiento(c). La misma antena sobre el suelo (b). Imágenes tomadas en Julio 2012. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 3.3.1 Preparación de vuelo en Embalse el Yeso (a), y en Farellones (b). Instalación de GPS base en Farellones (c). Imágenes de Julio 2012. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 4.1.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Esmeralda. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	35
Figura 4.1.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	36
Figura 4.1.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	37
Figura 4.1.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	38
Figura 4.1.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	39
Figura 4.1.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Esmeralda para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	41
Figura 4.2.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar La Paloma. Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.	44
Figura 4.2.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	45

Figura 4.2.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	46
Figura 4.2.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	47
Figura 4.2.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	48
Figura 4.2.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar La Paloma para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la división entre sector oeste y sector este (línea discontinua), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.....	50
Figura 4.3.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Del Rincón. Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.	53
Figura 4.3.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	54
Figura 4.3.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	55
Figura 4.3.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	56
Figura 4.3.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	57
Figura 4.3.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Del Rincón para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.....	59
Figura 4.4.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Cerro El Plomo. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	62

Figura 4.4.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	63
Figura 4.4.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	64
Figura 4.4.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	65
Figura 4.4.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	66
Figura 4.4.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Cerro El Plomo para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	68
Figura 4.5.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Yeso. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	71
Figura 4.5.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	72
Figura 4.5.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	73
Figura 4.5.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	74
Figura 4.5.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	75
Figura 4.5.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Yeso para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	77

Figura 4.6.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Bello. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	80
Figura 4.6.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	81
Figura 4.6.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	82
Figura 4.6.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	83
Figura 4.6.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	84
Figura 4.6.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Bello para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	86
Figura 4.7.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Yeso 2. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	89
Figura 4.7.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	90
Figura 4.7.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	91
Figura 4.7.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	92
Figura 4.7.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	93
Figura 4.7.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Yeso 2 para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en	

escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	95
Figura 4.8.1 Perfiles longitudinales (L_i-L_i') y transversales (T_i-T_i') medidos en el glaciar Echaurren. Perfil L1 posee datos de espesor de hielo (en escala de colores). Perfiles L2 (verde continua), T1 (verde discontinua) y T2 (verde punteada) tienen mediciones de RES, pero sin detección de fondo. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	98
Figura 4.8.2 Perfil longitudinal L_1-L_1' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	99
Figura 4.8.3 Perfil longitudinal L_2-L_2' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.	100
Figura 4.8.4 Perfil longitudinal T_1-T_1' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.	101
Figura 4.8.5 Perfil longitudinal T_2-T_2' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.	102
Figura 4.8.6 Topografía superficial y subglacial en perfiles A-A', C-C' y B-B' en glaciar Echaurren, año 2009 (DGA, 2009b), incluyendo cruces con datos de elevación del presente estudio (segmento rojo).	104
Figura 4.8.7 Perfiles con topografía superficial y subglacial en glaciar Echaurren en 2009 (línea roja; DGA, 2009b) y líneas de vuelo del presente estudio con información de elevación s.n.m. (línea negra) con intersecciones entre mediciones 2009 y 2012 (número romanos color negro). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	105
Figura 4.9.1 Perfiles longitudinal (L_i-L_i') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Mesón Alto. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	108
Figura 4.9.2 Perfil longitudinal L_1-L_1' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	109
Figura 4.9.3 Perfil longitudinal L_2-L_2' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	110

Figura 4.9.4 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	111
Figura 4.9.5 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	112
Figura 4.9.6 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	113
Figura 4.9.7 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Mesón Alto para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	115
Figura 4.10.1 Perfiles longitudinal ($L-L'$) y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar San Francisco. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.	118
Figura 4.10.2 Perfil longitudinal $L-L'$ en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	119
Figura 4.10.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	120
Figura 4.10.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	121
Figura 4.10.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	122
Figura 4.10.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar San Francisco para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.....	124
Figura 4.10.7 Topografía superficial y subglacial en perfiles AA', CC' y EE' en glaciar San Francisco, año 2009 (DGA, 2009b), incluyendo cruces con datos de espesor del presente estudio (segmento rojo).....	126

Figura 4.10.8 Perfiles con espesor de hielo en glaciar San Francisco en 2009 (línea roja; DGA, 2009b) y 2012 (línea negra) con intersecciones (número romanos).	127
Figura 4.11.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Cipreses Norte. Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.	130
Figura 4.11.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	131
Figura 4.11.3 Perfil transversal T ₁ -T ₁ ' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	132
Figura 4.11.4 Perfil transversal T ₂ -T ₂ ' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	133
Figura 4.11.5 Perfil transversal T ₃ -T ₃ ' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	134
Figura 4.11.6 Perfil transversal T ₄ -T ₄ ' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	135
Figura 4.11.7 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Cipreses Norte para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.	137
Figura 4.12.1 Perfiles longitudinal (L _i -L _i ') y transversales (T _i -T _i ') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Universidad. Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.	140
Figura 4.12.2 Perfil longitudinal L ₁ -L ₁ ' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	141
Figura 4.12.3 Perfil longitudinal L ₂ -L ₂ ' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).	142

Figura 4.12.4 Perfil longitudinal L_3-L_3' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	143
Figura 4.12.5 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	144
Figura 4.12.6 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	145
Figura 4.12.7 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	146
Figura 4.12.8 Perfil transversal T_4-T_4' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).....	147
Figura 4.12.9 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Universidad para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.	149
Figura 4.12.10 Cambios de elevación observados a lo largo del glaciar Universidad usando datos IGM-GPS-SRTM 1955-2000 (puntos color azul) y datos GPS-RSTM 2000-2009 (puntos color rojo). Fuente: CECs.....	151
Figura 4.12.11 Variación de elevación entre datos obtenidos para los vuelos realizados sobre el glaciar Universidad del presente estudio (escala de colores) y datos GPS-SRTM 2009 (escala de grises). Fuente: CECs.	152
Figura 4.12.12 Diferencia de elevación (eje Y) entre puntos coincidentes de superficie medidos durante el 2009 y datos 2012 (eje X). Las diferencias varían entre -59,7 y 64,1 [m]. Promedio de -4,9 [m] (DE 24,3 [m]).	153
Figura 4.12.13 Secciones de perfiles coincidentes en el glaciar Universidad en los años 2009 y 2012.	154
Figura 4.12.14 Set de puntos coincidentes de mediciones de espesor para 2009 y 2012. El eje Y representa un delta (en metros) que corresponde a la distancia entre puntos y la variación de espesores medidos en el 2009 y 2012. El radio máximo entre puntos comparados es de 30,0 [m].	155

Figura 4.13.1 Gráfico de dispersión de volumen de interpolación vs área de interpolación de los glaciares en estudio (rombos color azul) y curva de regresión (color negro) para la estimación del volumen total.....	157
Figura 5.1.1 Temperaturas medias mensuales (en grados celcius) entre enero 1980 y marzo de 2012 (azul) en la estación Embalse El Yeso y la tendencia lineal del período (rojo). Fuente: DGA.	158
Figura 5.2.1 Gráfico de volumen versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente estudio.	162
Figura 5.2.2 Gráfico de área total versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente estudio.	163
Figura 5.2.3 Gráfico de área versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente proyecto y en glaciares estudiados por otros autores.	164

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.1 Información general de los glaciares en estudio. Fuente: (DGA, 2012) y elaboración CECS.	25
Tabla 4.1.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Esmeralda. Espesor promedio: 66,3 [m] (DE=35,3[m])	40
Tabla 4.1.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Esmeralda.	42
Tabla 4.2.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar La Paloma. Espesor promedio: 30,1 [m] (DE = 16,3 [m]).	49
Tabla 4.2.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar La Paloma.	51
Tabla 4.3.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Del Rincón. Espesor promedio: 31,2 [m] (DE = 16,4 [m]).	58
Tabla 4.3.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Del Rincón.	60
Tabla 4.4.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Cerro El Plomo. Espesor promedio: 44,5 [m] (DE = 23,6 [m]).	67
Tabla 4.4.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Cerro El Plomo.	69
Tabla 4.5.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Yeso. Espesor promedio: 84,7 [m] (DE = 26,9 [m]).	76
Tabla 4.5.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Yeso.	78
Tabla 4.6.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Bello. Espesor promedio: 61,4 [m] (DE = 28,4 [m]).	85

Tabla 4.6.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Bello.	87
Tabla 4.7.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Yeso 2. Espesor promedio: 62,8 [m] (DE = 19,2 [m]).	94
Tabla 4.7.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Yeso 2.	96
Tabla 4.8.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. Máx), y pendiente estimada en el glaciar Echaurren. “s/d”: Perfiles medidos sin detección de fondo. Espesor promedio: 19,1 [m] (DE = 3,1 [m]).	103
Tabla 4.8.2 Comparación de elevaciones en puntos de intersección I al IV entre 2009 (DGA, 2009b) y 2012 (presente estudio).	106
Tabla 4.9.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx) y promedios (E. prom), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Mesón Alto. Espesor promedio: 72,2 [m] (DE = 25,7 [m]).	114
Tabla 4.9.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Mesón Alto.	116
Tabla 4.10.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar San Francisco. Espesor promedio: 42,9 [m] (DE = 22,9 [m]).	123
Tabla 4.10.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar San Francisco.	125
Tabla 4.10.3 Comparación espesor de hielo puntual en glaciar San Francisco entre 2009 (DGA, 2009b) y 2012 (presente estudio).	128
Tabla 4.11.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Cipreses Norte. Espesor promedio: 87,9 [m] (DE = 33,1 [m]).	136
Tabla 4.11.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Cipreses Norte.	138
Tabla 4.12.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Universidad. Espesor promedio: 162,2 [m] (DE = 73,8 [m]).	148
Tabla 4.12.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Universidad.	150

Tabla 4.13.1 Resumen de resultados de espesor máximo (E. máx), promedio (E. prom), desviación estándar (E. std), área y volumen de interpolación, área y volumen total, y volumen equivalente en agua total para cada glaciar en estudio.....	156
Tabla 5.3.1 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Esmeralda.....	165
Tabla 5.3.2 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar La Paloma.....	165
Tabla 5.3.3 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Del Rincón.....	166
Tabla 5.3.4 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Cerro El Plomo.....	166
Tabla 5.3.5 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Yeso.....	166
Tabla 5.3.6 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y los perfiles transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Bello.....	167
Tabla 5.3.7 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversal (T_3) en coordenadas UTM en glaciar Yeso 2.	167
Tabla 5.3.8 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre los perfiles longitudinales (L_i) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Mesón Alto.	167
Tabla 5.3.9 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversal (T_2) en coordenadas UTM en glaciar San Francisco.	168
Tabla 5.3.10 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y los perfiles transversal (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Cipreses Norte.	168
Tabla 5.3.11 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre los perfiles longitudinales (L_i) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Universidad.	168

RESUMEN

Los glaciares en la zona central de Chile son importantes reservas hídricas con aportes significativos de agua dulce, particularmente a fines del verano y en épocas de sequía. Hay poca información respecto al volumen equivalente de agua de los glaciares de la zona central y de sus posibles cambios en relación a la variabilidad atmosférica. Se han realizado algunas mediciones de espesor de hielo en esta región, todas ellas utilizando sistemas de radar terrestre, lo cual presenta la desventaja de no poder realizar mediciones en zonas escarpadas o con grietas, características principales de la mayoría de los glaciares de la zona de estudio.

El objetivo de este trabajo es aumentar el número de glaciares con este tipo de estudios, para lo cual se ha determinado el volumen de hielo en doce glaciares ubicados en las cuencas de los ríos Maipo (subcuencas de Mapocho Alto y Maipo Alto) y Rapel (subcuencas de Cachapoal y Tinguiririca). Las mediciones se realizaron utilizando un sistema de radio eco sondaje (RES) aerotransportado. El sistema se compone de un radar de impulso montado en una antena colgante que cuelga unos 20 [m] bajo el helicóptero. Las mediciones se realizan a una altura de vuelo de 30-50 [m] sobre la superficie del glaciar. Además, la antena lleva un receptor GPS para el posicionamiento de las mediciones de radar y un altímetro láser que indica la altura de la antena sobre la superficie del glaciar.

En total se cubrieron 69.348 [m] lineales en los cuales se obtuvieron un total de 51.141 mediciones puntuales de espesor de hielo en perfiles transversales y longitudinales a la dirección de flujo del glaciar. En glaciares de la cuenca de Maipo los datos obtenidos tienen una separación de 1 [m], mientras que en la cuenca de Rapel tienen una separación de 3 [m].

El espesor máximo medido en el sector norte (cuenca del río Maipo) es de 151 [m] en el glaciar Esmeralda. En el sector sur (cuenca del río Rapel) el espesor máximo es de 342 [m] en el glaciar Universidad. El análisis de cruces, vale decir, la comparación de datos espacialmente coincidentes, permite determinar una precisión del orden de 8,3%.

1 INTRODUCCIÓN

Los glaciares representan una importante reserva de agua dulce, elemento vital para el desarrollo de la vida humana, almacenando más del 90% del agua dulce a nivel mundial. No obstante, esta reserva se ha visto amenazada constantemente por el efecto invernadero y consiguiente cambio climático, el cual ha generado un retroceso generalizado de los glaciares en el planeta (IPCC, 2001).

En Chile existe una importante superficie de glaciares de aproximadamente 20.000 [km²], lo que abarca el 71% de todo el hielo glaciar de Sudamérica (Casassa et al., 1998; Rivera et al., 2002). Con estas cifras, la Dirección General de Aguas (DGA) ha establecido como una tarea prioritaria el inventario detallado de todos los glaciares de Chile y su caracterización (DGA, 2009a). Entre estas características se encuentra el espesor de hielo y, en consecuencia, el volumen de agua acumulado.

Una forma de medir el espesor de hielo es mediante la técnica de Radio Eco Sondaje (RES), la cual se basa en la propagación y reflexión de ondas electromagnéticas a través del hielo y el fondo del glaciar, y en la estimación del tiempo de retardo entre la señal emitida y la reflejada (Bogorodsky et al., 1985). Este método ha sido uno de los más utilizados en las últimas décadas debido a su precisión, facilidad logística y bajo costo.

La Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la DGA ha utilizado esta herramienta para medir el espesor de los glaciares Jotabeche y Juncal Norte en el 2008, Echaurren y San Francisco en el 2009, Monos de Agua, Juncal Sur, Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma, Palomo, Cortaderal y Cipreses en el 2011. Mediciones realizadas en glaciares de las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo con un sistema RES aerotransportado con frecuencia central de 20 [MHz] han arrojado buenos resultados. Sin embargo, los resultados pueden tornarse difíciles de interpretar a estas frecuencias cuando se consideran hielos especialmente temperados. Por otro lado, las mediciones con radares terrestres han permitido validar los resultados obtenidos con radar aerotransportado, ya que se elimina el camino de propagación aéreo, alcanzando un error RMS de 7 [m] en el espesor de hielo (DGA, 2011a).

Con el propósito de ir implementando la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA, 2009a), que recomienda la realización progresiva de estudios de detalle en glaciares representativos de las distintas regiones naturales de Chile, este proyecto tiene como objetivo estimar el volumen de agua almacenado para doce glaciares ubicados entre la cuenca del río Maipo y la cuenca del río Rapel: Esmeralda, La Paloma, Del Rincón, Cerro El Plomo, Yeso, Bello, Yeso 2, Echaurren, Mesón Alto, San Francisco, Cipreses Norte y Universidad.

La importancia de este estudio radica en la necesidad de tener información sobre las reservas de agua dulce existentes en los glaciares del país, tanto para el consumo humano como para otros sectores productivos, considerando que uno de los efectos del cambio climático es el retroceso y pérdida volumétrica de hielo en la Cordillera Andina. Esta información, por ende, permite tomar mejores decisiones respecto al uso que se le da a este vital elemento.

El presente documento entrega los resultados del proyecto “Estimación de volúmenes de hielo mediante radio eco sondaje en Chile Central”, desarrollado durante el período comprendido entre el 11 de julio de 2012 y el 8 de octubre de 2012.

1.1 Glaciares en la cuenca del Maipo

En esta zona se encuentran los siguientes glaciares en estudio: Esmeralda, La Paloma, Del Rincón, Cerro El Plomo, Yeso, Bello, Yeso 2, Echaurren, Mesón Alto y San Francisco.

Respecto a las variaciones areales y frontales, en la subcuenca del Mapocho Alto, se ha estimado que el glaciar La Paloma presenta una variación de $-0,3 \text{ [km}^2\text{]}$ entre 1989 y 2007, lo cual representa una tasa de variación areal promedio de $-0,02 \text{ [km}^2 \text{ a}^{-1}\text{]}$. En tanto, el glaciar Del Rincón ha aumentado su área en $0,1 \text{ [km}^2\text{]}$ entre 1989 y 2007, resultando en una tasa de variación areal de $0,005 \text{ [km}^2 \text{ a}^{-1}\text{]}$ (DGA, 2011b).

Por otro lado, en el glaciar Echaurren, subcuenca de Maipo Alto, las estimaciones señalan que existen -450 [m] de variación frontal de entre 1986 y 2011, implicando una tasa de variación frontal de $-18 \text{ [m a}^{-1}\text{]}$ (DGA, 2011b).

1.2 Glaciares en la cuenca del Rapel

En esta zona se encuentran los glaciares Cipreses Norte y Universidad.

Según DGA (2011b), el glaciar Universidad presenta una variación frontal de -1.430 [m] entre 1945 y 2010 (ver Figura 1.2.1), lo cual implica una tasa variación frontal de $-22 \text{ [m a}^{-1}\text{]}$ (DGA, 2011b).

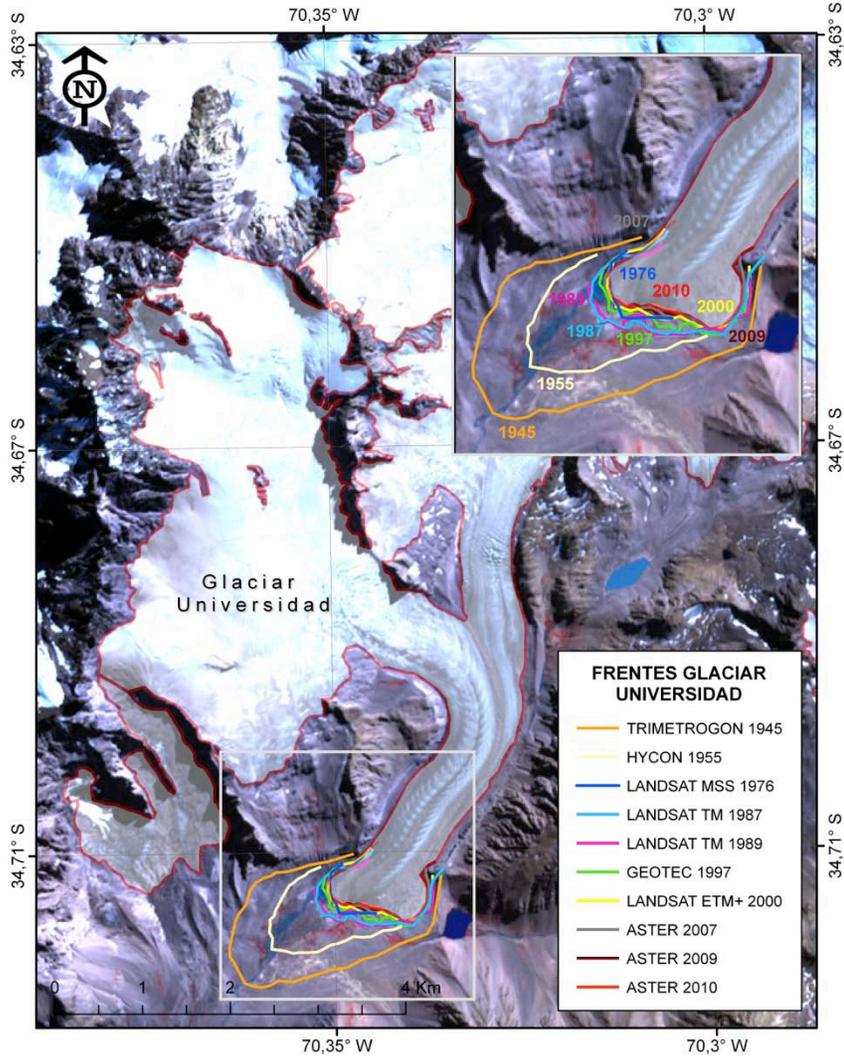


Figura 1.2.1 Variaciones del glaciar Universidad entre 1945 y 2010. Fuente: DGA, 2011b.

1.3 Radio Eco Sondaje en hielos

El radio eco sondaje (RES) es una técnica que utiliza un pulso electromagnético corto pero de gran amplitud, emitido por una antena transmisora. Este pulso viaja hacia el interior del glaciar, es reflejado en el lecho rocoso, como también en los distintos obstáculos y capas que se encuentran en su interior, y finalmente el eco resultante es recogido por la antena receptora, la señal es captada por algún medio digital y posteriormente almacenada en un computador portátil.

Cuando la temperatura cae bajo cero, la conductividad y permitividad dieléctrica disminuyen mientras que la velocidad de propagación de una señal electromagnética aumenta, favoreciendo el uso de sistemas RES. Las pérdidas de señal son especialmente insignificantes

para frecuencias menores a 100 [MHz] (Arcone y Delaney, 1984). Sin embargo, cuando la cantidad de discontinuidades en el hielo aumenta, las pérdidas por dispersión también aumentan y el contraste entre propiedades dieléctricas entre capas se reduce, limitando la capacidad de detección.

En los glaciares temperados, el hielo en toda su masa se encuentra al punto de fusión, temperatura que varía en función de la presión litostática existente sobre las distintas capas del glaciar. En la superficie del glaciar, la temperatura de fusión es de 0 °C, lo que implica agua en contacto con hielo a nivel supra, intra y subglacial. El principal obstáculo a la propagación de las ondas electromagnéticas en hielo temperado es la presencia de bolsas de agua. Estos cuerpos de agua producen fuerte dispersión y atenuación de las ondas electromagnéticas. Teóricamente las ondas electromagnéticas tienen la posibilidad de penetrar hielo temperado a frecuencias menores a 35 [MHz] (Watts y England, 1976).

Para determinar el espesor de hielo, se analizan los retardos del pulso, las características de la fase y la amplitud del eco. Un radar para hielo puede ser instalado en aviones, trineos, o simplemente caminando sobre el glaciar llevando los equipos en mochilas. Se pueden realizar fácilmente mediciones en grandes extensiones sobre la superficie del glaciar, logrando mediciones topográficas de alta calidad y exactitud. El tamaño de la antena a utilizar es inversamente proporcional a la frecuencia central de transmisión y a la profundidad que se busca detectar. Para mayores profundidades de sondeo es necesario usar una menor frecuencia y por ende antenas de mayor envergadura. Por el contrario, si la medición es a menor profundidad es preferible usar una frecuencia más alta lo que implica antenas más pequeñas con las que se obtiene mayor resolución. Las condiciones intrínsecas del hielo frío favorecen el uso de este método ya que disminuyen las pérdidas de señal permitiendo alcanzar grandes profundidades. En contraste, la condición de heterogeneidad del hielo temperado resulta en mayor atenuación de la onda electromagnética por lo que es necesario usar menores frecuencias que pueden eventualmente proporcionar resolución insuficiente para detectar el fondo rocoso.

1.4 Estudios previos de RES en glaciares temperados

Alrededor del mundo se han realizado exitosas mediciones en glaciares temperados siguiendo el básico principio de Watts y England (1976), utilizando sistemas de radar de mediana y alta frecuencia (1 a 35 [MHz]). En Alaska se midió un espesor máximo de 600 [m] en el glaciar Taku (Nolan et al., 1995), y 630 [m] en el glaciar Black Rapids (Gades, 1998). Por su parte en Patagonia, Raymond (2005) reportó un máximo espesor de 740 [m] en el glaciar Tyndall. Rivera y Casassa (2002), midieron 750 [m] en el paso Cuatro Glaciares. Todas las mediciones anteriores fueron realizadas utilizando un radar terrestre.

Unas pocas mediciones aéreas se han llevado a cabo. Los primeros fueron Watts y Wright (1981), en el glaciar Columbia, Alaska, donde midieron 550 [m] usando un radar de impulso a una frecuencia de 1,2 [MHz]. Kennett (1993), utilizando un radar de impulso sobre helicóptero

a una frecuencia de 8 [MHz], midió 350 [m] en el Svartisen Ice Cap, Noruega. Rignot y Conway (comunicación personal), midieron aproximadamente 1.250 [m], en el glaciar Bering, Alaska, utilizando un radar de impulso a una frecuencia de 2 [MHz]. Zamora et al. (2009), midió 670 [m] en el glaciar Tyndall utilizando un radar de impulso en un avión Casa 212 de la Armada de Chile. En julio de 2011 el CECs en colaboración con la BGR de Alemania midió ocho glaciares temperados en las cuencas del Aconcagua, Maipo y Rapel. Se utilizó el radar BGR-P30 a una frecuencia de 20[MHz], el cual logró penetrar un máximo de espesor de hielo de 370 [m] en el glaciar Cortaderal.

La experiencia previa en los glaciares temperados de la Patagonia y los glaciares politermales de los Alpes suizos y la Península Antártica indica que este tipo de radar (de baja frecuencia) es adecuado para detectar espesor de hielo en glaciares temperados, siempre teniendo en consideración que los máximos espesores obtenidos son del orden de 700 [m].

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estimar el volumen de agua almacenado para doce glaciares ubicados entre la cuenca del río Aconcagua y la cuenca del río Rapel.

2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el espesor y la topografía subglacial de los glaciares en estudio mediante técnicas de radio eco sondajes.
- b) Realizar un levantamiento RES en un perfil longitudinal y al menos tres transversales para los glaciares en estudio.
- c) Efectuar un análisis del adelgazamiento observado para los glaciares Echaurren y San Francisco, considerando los espesores medidos el 2009.

3 METODOLOGÍA

3.1 Áreas de estudio

Las áreas de estudio corresponden a doce glaciares ubicados en la cuenca del río Maipo ($32^{\circ}55'/34^{\circ}17'$ latitud sur y $68^{\circ}12'/70^{\circ}43'$ longitud oeste) y en la cuenca del río Rapel ($33^{\circ}53'/34^{\circ}58'$ latitud sur y $70^{\circ}00'/71^{\circ}50'$ longitud oeste), los cuales se especifican en la Tabla 3.1.1. La superficie especificada en esta tabla ha sido estimada por el Centro de Estudios Científicos utilizando imágenes satelitales ASTER generadas entre el 2007 y el 2010. El resto de la información ha sido obtenida desde el documento que especifica las bases de este proyecto (DGA, 2012).

No	Glaciar	Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	Elev. máx (m.s.n.m)	Elev. media (m.s.n.m.)	UTM ESTE	UTM NORTE
1	Esmeralda	Maipo	Mapocho Alto	5,88	5.340	4.890	387557	6323398
2	La Paloma	Maipo	Mapocho Alto	1,43	4.886	4.300	381905	6327134
3	Del Rincón	Maipo	Mapocho Alto	0,74	4.453	4.280	380530	6327487
4	Cerro El Plomo	Maipo	Mapocho Alto	1,25	5.309	4.445	386029	6320787
5	Yeso	Maipo	Maipo Alto	1,70	5.159	4.318	414293	6289365
6	Bello	Maipo	Maipo Alto	3,79	4.924	4.310	412096	6290018
7	Yeso 2	Maipo	Maipo Alto	1,31	5.231	5.006	419768	6290320
8	Echaurren	Maipo	Maipo Alto	0,60	3.860	3.780	394977	6284150
9	Mesón Alto	Maipo	Maipo Alto	1,39	4.349	3.670	403283	6271870
10	San Francisco	Maipo	Maipo Alto	1,00	4.015	3.045	400280	6264998
11	Cipreses Norte	Rapel	Cachapoal	14,95	3.833	3.558	375838	6177485
12	Universidad	Rapel	Tinguiririca	29,03	4.460	3.376	376886	6163221

Tabla 3.1.1 Información general de los glaciares en estudio. Fuente: (DGA, 2012) y elaboración CECS.

3.1.1 Glaciares cuenca del río Maipo

La cuenca del río Maipo se encuentra en $32^{\circ}55'/34^{\circ}17'$ latitud sur y $68^{\circ}12'/70^{\circ}43'$ longitud oeste. Los glaciares a estudiar son Esmeralda, La Paloma, Del Rincón, Cerro El Plomo, ubicadas en la subcuenca de Mapocho Alto y Yeso, Bello, Yeso 2, Echaurren, Mesón Alto y San Francisco, ubicados en la subcuenca de Maipo Alto.

3.1.2 Glaciares cuenca del río Rapel

La cuenca del río Rapel se encuentra en $33^{\circ}53'/34^{\circ}58'$ latitud sur y $70^{\circ}00'/71^{\circ}50'$ longitud oeste. Los glaciares a estudiar son Cipreses Norte y Universidad, ubicados en las subcuencas de Cachapoal y Tinguiririca, respectivamente.

3.2 Mediciones RES

3.2.1 Descripción del sistema de medición

El radar utilizado es del tipo impulso con frecuencias de transmisión definidas por la antena colgante. Las antenas utilizadas son dipolos tipo bow-tie de frecuencia central de 50 [MHz] y 20 [MHz]. La primera con un ancho de banda de 50 [MHz] tiene un rango máximo de penetración de 300 [m]. Mide aproximadamente 2 [m] de ancho por 3[m] de largo y pesa aproximadamente 150 [kg]. La segunda antena con un ancho de banda de 20 [MHz] tiene un rango de penetración de 800 [m]. El tamaño de esta antena es de 4 [m] de ancho por 6 [m] de largo y pesa aproximadamente 400 [kg]. Durante la medición la antena utilizada cuelga a 20 [m] bajo el helicóptero (Figura 3.2.1). Para este estudio se instaló en la antena el transmisor y receptor del pulso electromagnético, un receptor GPS y un altímetro láser puntual que indica en tiempo real la altura de la antena sobre la superficie. A bordo se utilizaron dos computadores portátiles, uno para el sistema de navegación, y uno para la adquisición de datos del radar y altímetro láser. La velocidad del helicóptero durante la medición fue de 40 [nudos] aproximadamente, mientras que la altura de vuelo de la antena sobre la superficie del glaciar se mantuvo en el rango de 35-50 [m] para mayor eficiencia del radar.

Para disminuir el error en la medición de la posición instantánea de la antena colgante, se utilizó un GPS base, el cual se ubicó en las cercanías del punto de operaciones (desde el cual despegaba y aterrizaba el helicóptero de mediciones), a una altura aproximada de 1,2 [m] sobre el nivel del suelo y libre de obstáculos laterales. Esta información de GPS, permite posteriormente obtener un valor de posición instantáneo corregido en la antena, aumentando la precisión.



Figura 3.2.1 Sistema RES de 50 [MHz]. Antena sostenida por helicóptero (a) y un acercamiento(c). La misma antena sobre el suelo (b). Imágenes tomadas en Julio 2012. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Captura de datos

La información de la reproducción digital de la señal recibida (traza) es el resultado de una serie de trazas promediadas (en este caso 256) que contiene los diferentes cambios sufridos por la señal original debido a las discontinuidades dieléctricas que haya encontrado a su paso. Cada traza es digitalmente reconstruida por puntos (verticales) con el valor de amplitud de la señal y que es finalmente representada en escala de colores para su visualización. Un radargrama consiste en una serie de trazas almacenadas.

Durante la medición, el radar se configuró para transmitir 3.000 pulsos por segundo (PRF - *Pulse Repetition Frequency*). La captura de datos es de dos canales a una frecuencia de muestreo de 400 [MHz], a 14 bits de resolución. Los canales son de alta y baja ganancia, y en estas mediciones sólo se ha utilizado el canal de baja ganancia para todos los datos. La tasa de captura fue de aproximadamente 0,1 trazas por segundo.

3.2.3 Procesamiento e interpretación

Los datos adquiridos en terreno fueron almacenados para posteriormente ser procesados antes de la interpretación de espesores. Por una parte, se realizó el procesamiento de los datos GPS. Se recogieron los datos de la unidad base (estática) y de la unidad cinemática (ubicada en la antena). Luego, utilizando el software Grafnav se realizó un procesamiento diferencial de la posición instantánea en base a estas unidades, de lo cual se obtuvo un archivo *.csv con la información de número de la traza y su correspondiente ubicación (posición en UTM y elevación en m.s.n.m.).

Por otra parte, los datos de radar fueron procesados con el software REFLEX V5.6 (Sandmeier, K. 2004), realizando una integración entre éstos y los datos de GPS ya procesados diferencialmente. De esta manera se logró referenciar la medición espacialmente, es decir, definir la posición de cada traza.

Los datos obtenidos por un sistema de radar aerotransportado contienen información de dos tipos de medio principales: interfaz aire-hielo e interfaz hielo-roca. Con esta simplificación se asume la existencia de dos medios homogéneos, para cada uno de los cuales la velocidad de propagación es constante y las pérdidas despreciables. Ambas interfases se representan normalmente con facilidad en un radargrama debido al alto contraste dieléctrico entre los medios.

El procesamiento para los datos aquí presentados incluye filtros que limitan la banda de frecuencia de la señal para eliminar ruido y que fueron ajustados para cada caso, corrección de la posición del reflector de fondo cuando puede haber sido distorsionada por la morfología de la topografía subglacial (migración). Además de ajustes de ganancia y edición.

Los datos entregan la medición del tiempo (ns) que tarda la onda electromagnética en viajar desde la antena transmisora hasta ser capturada por la antena receptora. Para la determinación de espesor del hielo, la sección aire-hielo es determinada con exactitud y eliminada del radargrama. El límite superior de la información restante es entonces la superficie del tramo medido sobre el glaciar.

Para frecuencias superiores a 1 [MHz] la permitividad dieléctrica relativa del hielo sólido (ϵ_h) ha sido estimada en 3,2 (Evans, 1965). La velocidad de propagación de la onda (v) en hielo es de 0,168 [m/ns], la cual es obtenida usando la expresión $v = c / \sqrt{\epsilon_h}$, donde c es la velocidad de propagación en el aire = 3×10^8 [m/s]. Cuando la velocidad es conocida y constante, es posible estimar la profundidad (d) del reflector, en este caso, la interfaz hielo-roca, usando la expresión $d = v * t / 2$ siendo t el tiempo de ida y retorno de la señal reflejada.

El formato de cada archivo es de 32 bits punto flotante, con una cabecera de archivo de 1.024bytes y cabecera de traza de 16 bytes. Cada traza está formada de 4.096 muestras y la cabecera de cada traza almacena la hora de disparo.

El procesamiento de los datos de radar en el software REFLEX se llevó a cabo de forma casi sistemática en todos los glaciares, y consistió en los siguientes pasos:

- a) Importación de los datos desde su formato nativo a formato REFLEX.
- b) Georreferenciación de cada traza de radar con la posición obtenida mediante el GPS.
- c) Unión de los archivos correspondientes a cada perfil, ya sean transversales o longitudinales.
- d) Cálculo de la distancia total del perfil y realización de una interpolación equidistante cada 1 metro por traza, en el caso de los datos generados por la antena de 50 [MHz] y cada 3 metros por traza, en el caso de las mediciones producto de la antena de 20 [MHz].
- e) Filtrado de los datos para una mejor visualización, utilizando filtros pasa banda (el rango depende de la frecuencia central y ancho de banda de la antena utilizada) Butterworth de orden 2, control de ganancia y ajuste del tiempo cero (superficie).
- f) Migración de los datos utilizando un modelo de velocidad 2D, lo que permite la eliminación de hipérbolas en los radargramas producto de reflexiones de onda laterales indeseadas en el aire o en el hielo.
- g) Identificación del fondo rocoso para su posterior vectorización y obtención de datos cuantificables (espesor de hielo).
- h) Conversión de archivos REFLEX a formato ASCII.
- i) Representación de los datos de espesor de hielo georreferenciados en un SIG.

3.2.4 Post-proceso de datos

Una vez que la información de distancia de perfil, espesor de hielo y elevación (s.n.m.) de la superficie de hielo se exportó en un formato ASCII, se calcularon los siguientes valores por glaciar:

- Longitud, elevación mínima, máxima y pendiente de cada perfil longitudinal y transversal definido (L_i , T_i).
- Espesor máximo, mínimo, promedio y su desviación estándar (DE) en cada perfil longitudinal y transversal definido (L_i , T_i). La desviación estándar entrega información sobre el rango de variación que tienen los espesores respecto del promedio.
- Espesor promedio y la DE del conjunto de datos en los perfiles transversales y longitudinales definidos (L_i , T_i).
- Espesor máximo del conjunto de datos de espesor obtenidos (máximo espesor medido en el glaciar).

Por otro lado, utilizando todos los perfiles con datos de espesor de hielo por glaciar, se realizó una estimación del volumen de hielo. Para esto se utilizó el software ARCGIS v9.2. A partir de las imágenes satelitales que se obtuvieron (ASTER), se calculó el área total del glaciar. Asimismo se define el área de interpolación como el área mínima generada a partir de los perfiles donde se detectó espesor de hielo en cada glaciar. Esta área es siempre menor o igual

que el área total del glaciar. Utilizando todos los perfiles con valores de espesor de hielo se realizó una interpolación según una red de triángulos irregulares (Triangulated Irregular Network, TIN) para obtener el espesor en cada punto del glaciar. Para efectos de la interpolación mediante TIN se asumió que el espesor de hielo en el borde del área de interpolación es cero. Posteriormente se eliminaron las zonas donde no se conoce el espesor de hielo o donde el método TIN generó un valor inválido. Esto se realizó mediante un análisis visual de las figuras generadas. Una vez realizado este procedimiento, se obtuvo el espesor de hielo para cada pixel del área medida del glaciar mediante radar, a partir de la cual se obtiene el volumen de hielo contenido.

Una vez que se estimaron los volúmenes de hielo en una determinada área de interpolación, se realizó una curva de ajuste que relaciona el área total del glaciar con el volumen total de hielo (ver sección 4.13). El valor de volumen calculado corresponde a un valor estimado debido a que hay zonas del glaciar sin medición o sin detección de fondo. Posteriormente se realizó la conversión de volumen de hielo a volumen de agua asumiendo una densidad promedio del hielo de $0,86 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ (Rignot et al., 2003).

3.3 Campañas de medición

3.3.1 Campaña 1: Rancagua con radar aerotransportado de 50 [MHz]

Esta campaña de mediciones se realizó los días 13 y 14 de Julio de 2012, utilizando un radar aerotransportado de 50 [MHz].

El día 13 de Julio se armó la antena de 50 [MHz] en la base de la empresa Helicopters ubicada en Machalí. Durante esa jornada se realizaron algunas mediciones de prueba en los glaciares Cipreses Norte y Universidad.

El día 14 de Julio se realizaron mediciones nuevamente sobre los glaciares Cipreses Norte y Universidad desde la base de Helicopters en Machalí.

3.3.2 Campaña 2: Santiago con radar aerotransportado de 50 [MHz]

La segunda campaña de mediciones se realizó los días 16 y 17 de Julio de 2012, utilizando un radar aerotransportado de 50 [MHz].

El día 16 de Julio se realizaron vuelos desde el embalse El Yeso, midiendo con el sistema RES sobre los glaciares Yeso, Yeso 2, Echaurren, Bello, San Francisco y Mesón Alto.

El día 17 de Julio el centro de operaciones del CECS se trasladó hasta Farellones, punto desde el cual se realizaron los vuelos hacia los glaciares Cerro El Plomo, Esmeralda, La Paloma y Del Rincón.

En la Figura 3.3.1 se observan algunas imágenes tomadas durante esta campaña de mediciones.

3.3.3 Campaña 3: Rancagua con radar aerotransportado de 20 [MHz]

La tercera campaña de mediciones se realizó en la base de la empresa Helicopters de Machalí, utilizando esta vez un sistema RES de 20 [MHz]. Esta campaña tuvo lugar el día 26 de Julio de 2012, donde se realizaron mediciones sobre el glaciar Cipreses Norte.

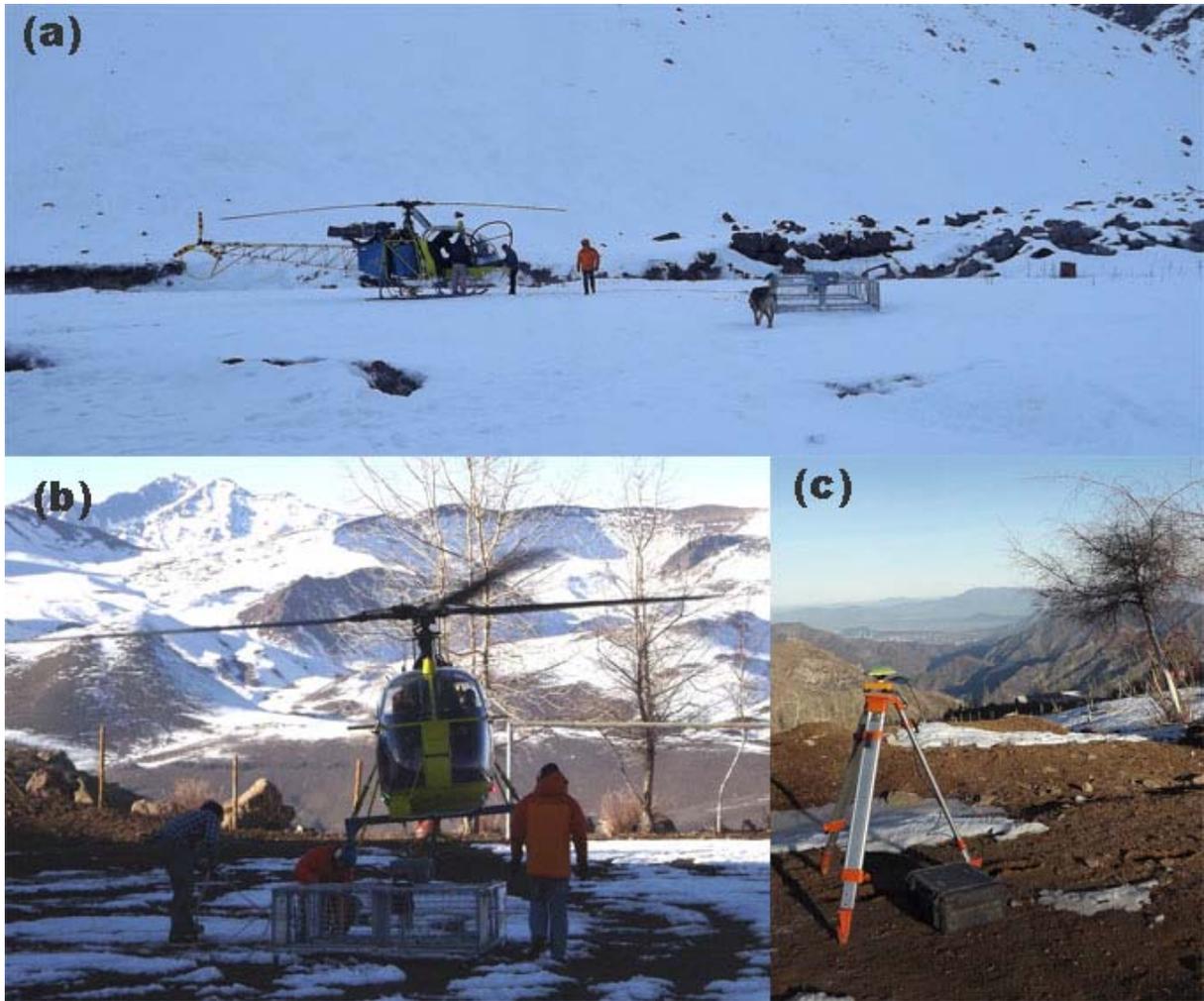


Figura 3.3.1 Preparación de vuelo en Embalse el Yeso (a), y en Farellones (b). Instalación de GPS base en Farellones (c). Imágenes de Julio 2012. Fuente: Elaboración propia.

4 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de los perfiles medidos usando un sistema RES aerotransportado en los doce glaciares detallados en la sección 3.1, y para los cuales se ha obtenido espesor de hielo, topografía subglacial, estimación de volumen de hielo y su equivalente en agua.

Una vez terminadas las etapas del procesamiento, se seleccionaron para cada glaciar cuatro perfiles representativos: tres transversales (T_1 , T_2 , T_3) y un perfil longitudinal (L). Los radargramas mostrados representan la sección medida con y sin interpretación del fondo rocoso en la dirección que el perfil fue recorrido (ej. T_1 - T_1'). La topografía superficial y subglacial es representada en un gráfico donde el eje X corresponde a la distancia recorrida (metros) y el eje Y a la elevación con respecto al nivel del mar (metros).

A partir de los datos de espesor de hielo y su interpolación, se realizó la estimación del volumen de hielo para cada uno de los doce glaciares investigados. Este valor se obtuvo a partir de las mediciones de RES, las que no cubrieron la totalidad de la superficie de los glaciares debido a fuertes pendientes y cerros laterales cercanos, o debido a que en algunos de los perfiles no fue posible interpretar la topografía subglacial.

Los gráficos de interpolación de espesor de hielo que se encuentran en esta sección (como en la Figura 4.1.6) contienen dos sectores, el primero es el área de interpolación (definida en la sección 3.2.4) representada en escala de colores, y el segundo es la zona gris, que corresponde a una zona donde no se detectó un valor de espesor de hielo o bien no hay perfil de medición y por ende, no se pudo realizar la interpolación.

Con el fin de determinar el volumen equivalente en agua total para cada glaciar, se empleó una curva de regresión con todos los datos medidos de áreas interpoladas versus volumen de hielo. Usando esta función de regresión (ver sección 4.13) se logró determinar el volumen de hielo y volumen equivalente en agua para el área total del glaciar. Estos resultados se detallan a continuación para cada glaciar en la correspondiente sub-sección *Volumen*.

4.1 Glaciar Esmeralda

En la Figura 4.1.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Esmeralda, los cuales son representados mediante una escala de colores, donde el color verde indica menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.1.1 muestra además la trayectoria y sentido del perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i' , donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida es de 8.506 [m].

4.1.1 Perfiles

En la Figura 4.1.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L'. En la imagen superior se aprecia la interpretación de fondo de hielo (línea roja) y las intersecciones de este perfil con las transversales T_1 , T_2 y T_3 (en amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior se ubica la topografía subglacial. Se debe notar que existen dos intervalos sin vectorización de fondo, los cuales fueron interpolados usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

En la Figura 4.1.3, Figura 4.1.4 y Figura 4.1.5 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T_1 - T_1' , T_2 - T_2' y T_3 - T_3' , respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

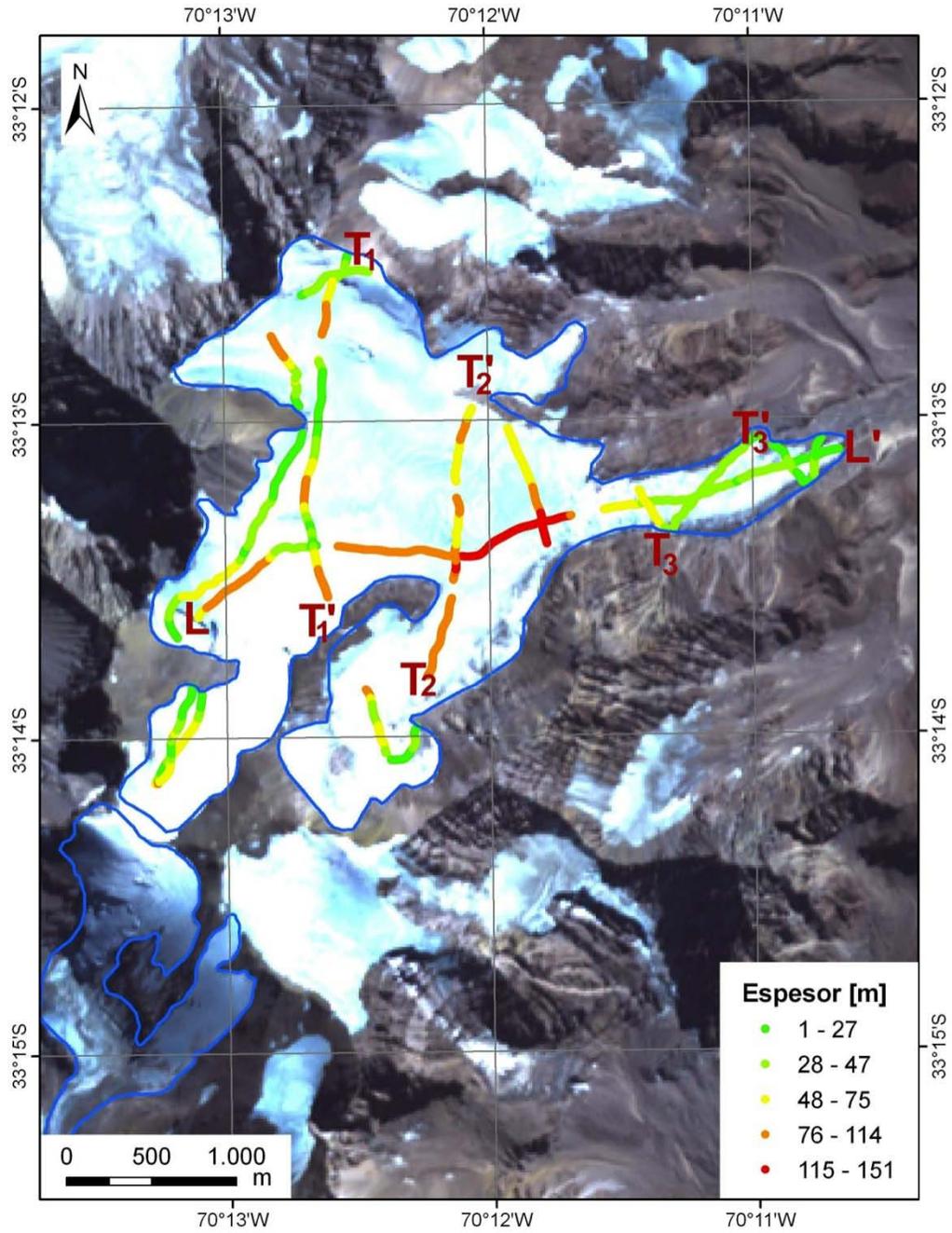


Figura 4.1.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Esmeralda. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

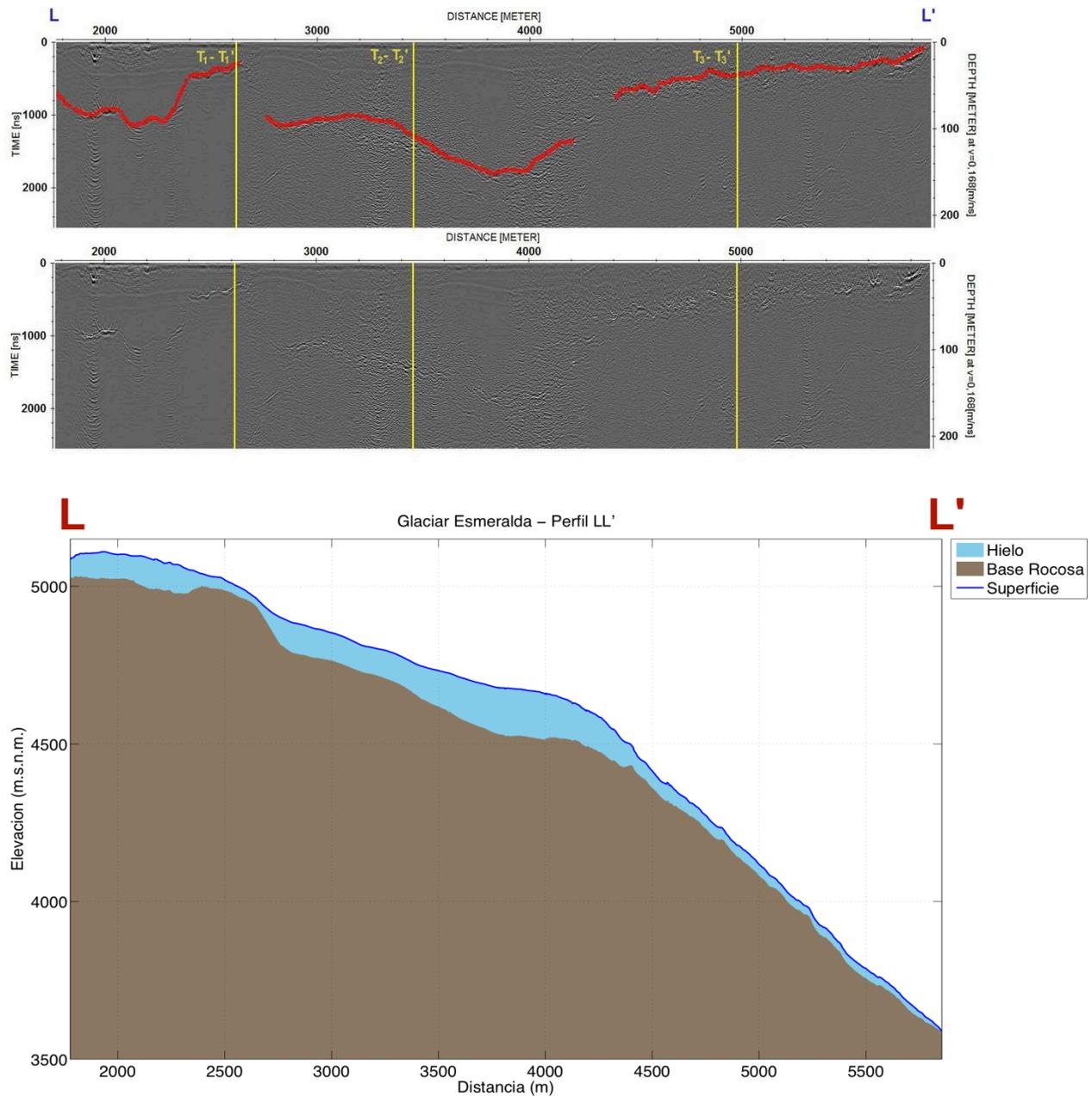


Figura 4.1.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

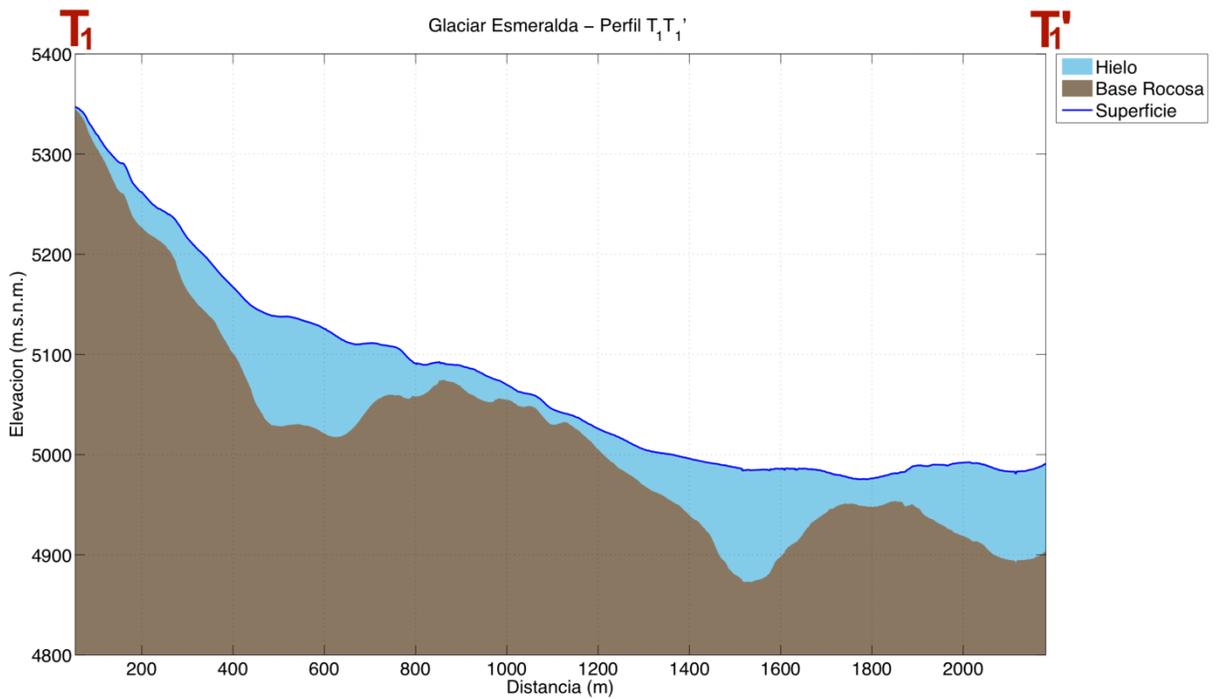
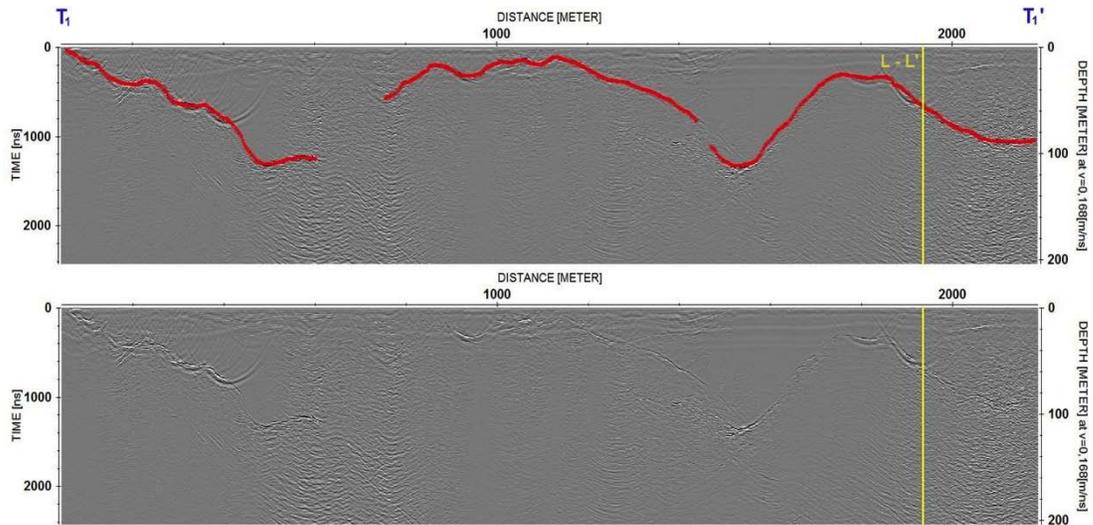


Figura 4.1.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

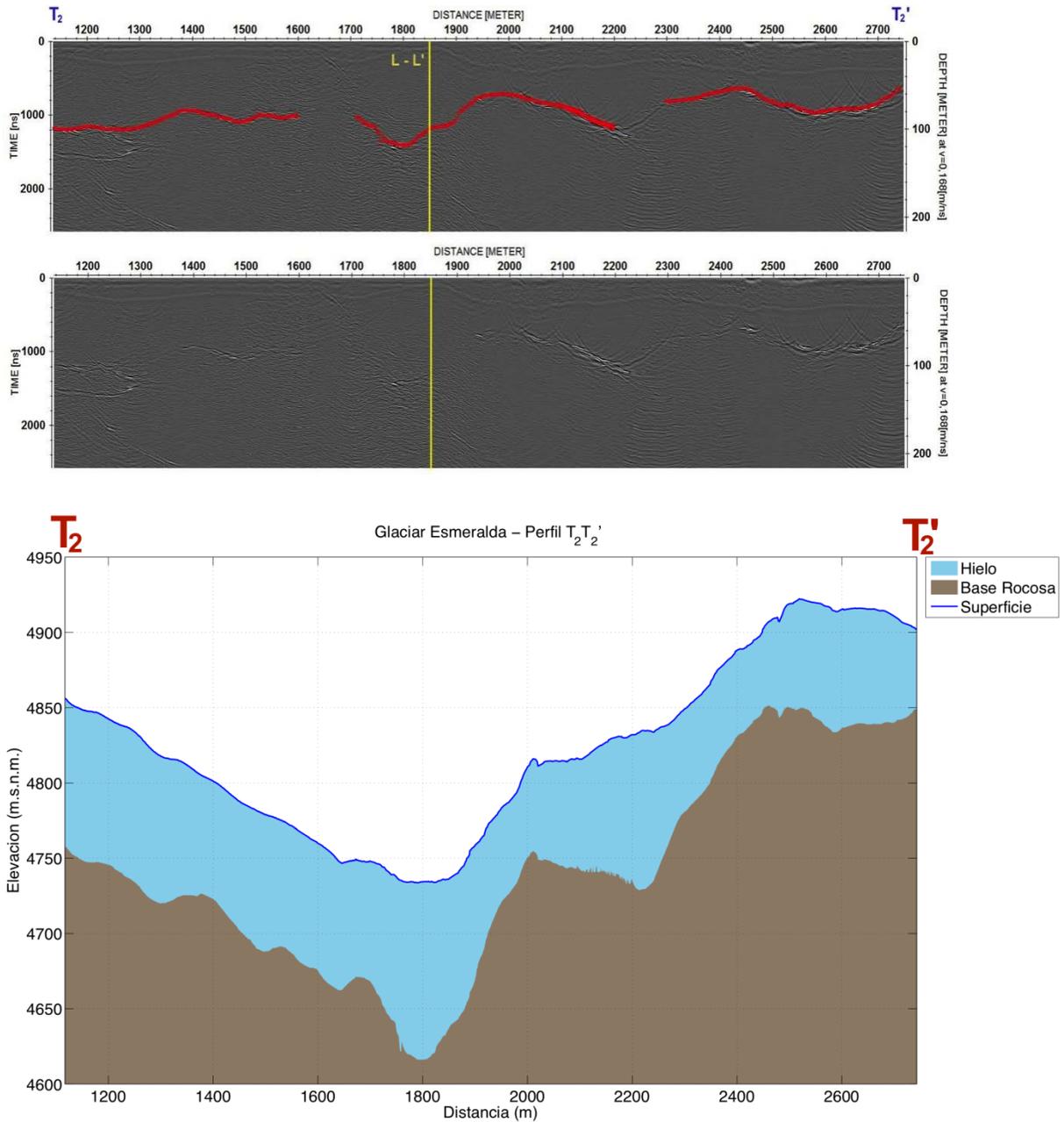


Figura 4.1.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior), y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

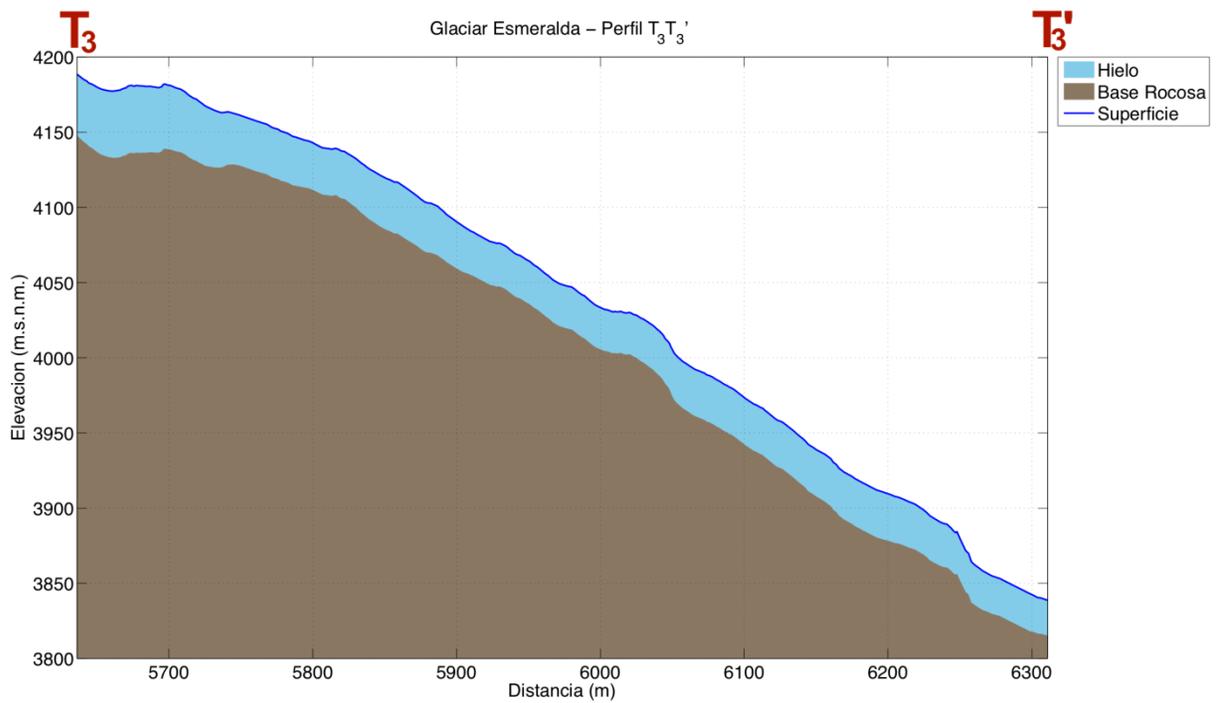
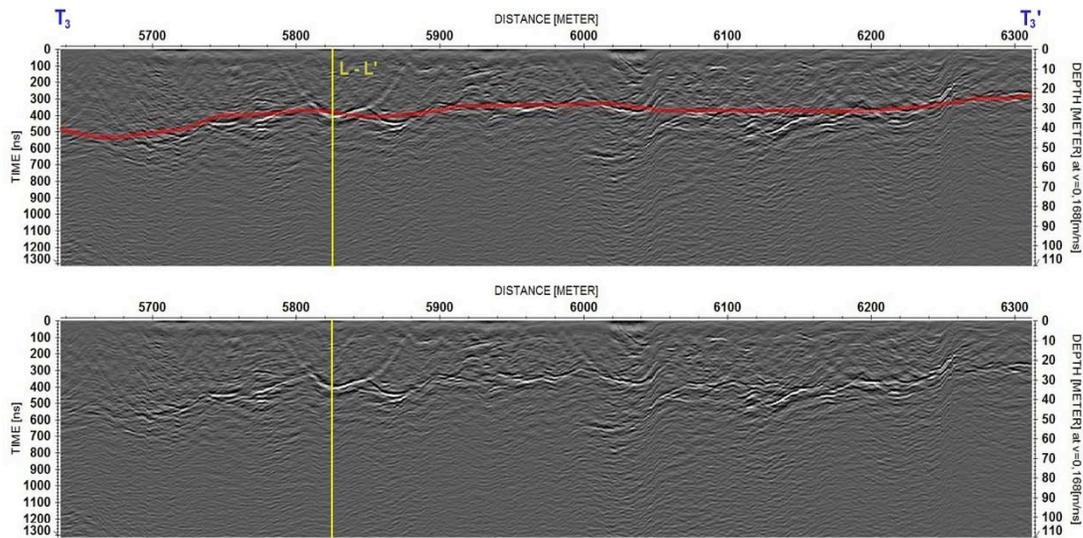


Figura 4.1.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Esmeralda: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.1.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Esmeralda. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 151,4 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo es la longitudinal, mientras que la mayor pendiente del glaciar se registra en la transversal T₃. El espesor promedio del glaciar Esmeralda medido en estos perfiles es de 66,3 [m] con una desviación estándar (DE) de 35,3 [m].

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	4.078	4,5	151,4	72,5	39,5	3.588	5.110	-21,2
T ₁ - T ₁ '	2.127	2,6	111,6	53,0	31,3	4.975	5.348	-12,2
T ₂ - T ₂ '	1626	52,7	118,2	82,2	15,4	4.734	4.922	14,5
T ₃ - T ₃ '	675	23,4	44,9	32,1	5,0	3.839	4.189	-27,4

Tabla 4.1.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Esmeralda. Espesor promedio: 66,3 [m] (DE=35,3[m])

4.1.2 Volumen

La Figura 4.1.6 muestra la interpolación del espesor de hielo para el glaciar Esmeralda utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.1.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Esmeralda es de 0,218 [km³].

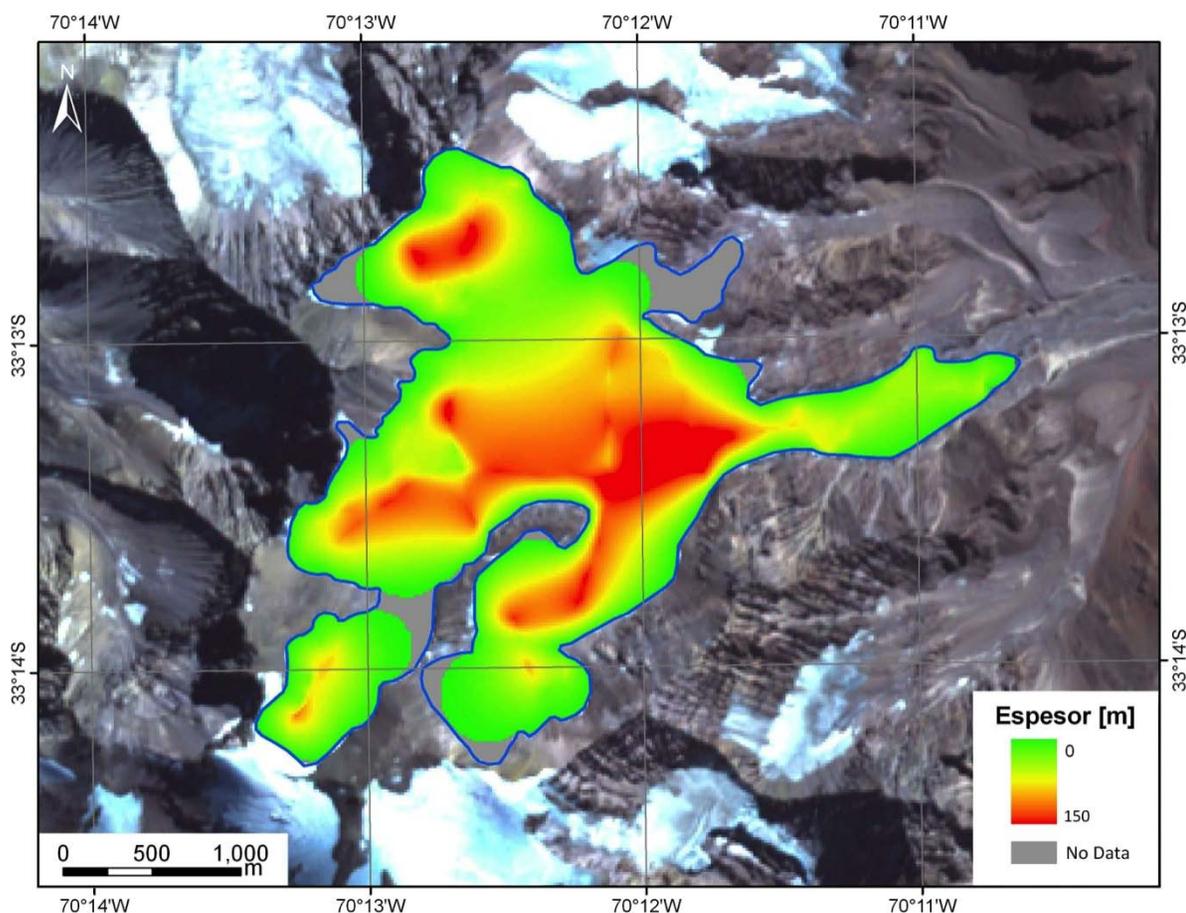


Figura 4.1.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Esmeralda para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Esmeralda	5,476	0,208	5,875	0,253	0,218

Tabla 4.1.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Esmeralda.

4.2 Glaciar La Paloma

En la Figura 4.2.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar La Paloma, los cuales son representados mediante una escala de colores, donde el color verde indica menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.2.1 además muestra la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i', donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 5.217 [m].

4.2.1 Perfiles

En la Figura 4.2.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' con las intersecciones con las transversales T₁, T₂ y T₃ (amarillo). En la Figura 4.2.3, Figura 4.2.4 y Figura 4.2.5 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T₁-T₁', T₂-T₂' y T₃-T₃', respectivamente, con la intersección con el perfil L (amarillo). Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial. Se debe notar que la vectorización de fondo rocoso en T₁-T₁' y T₂-T₂' ha sido interpolada usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

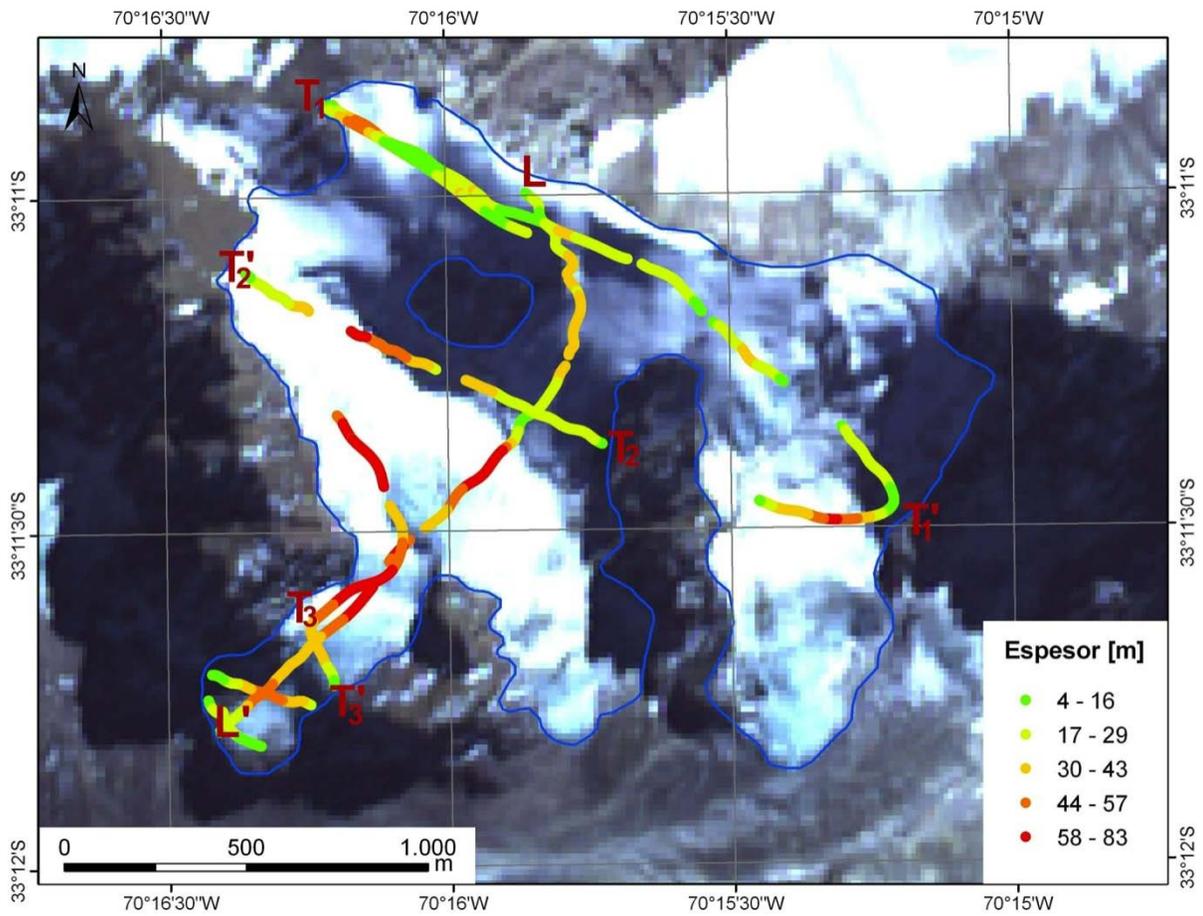


Figura 4.2.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T'_i) con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar La Paloma. Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.

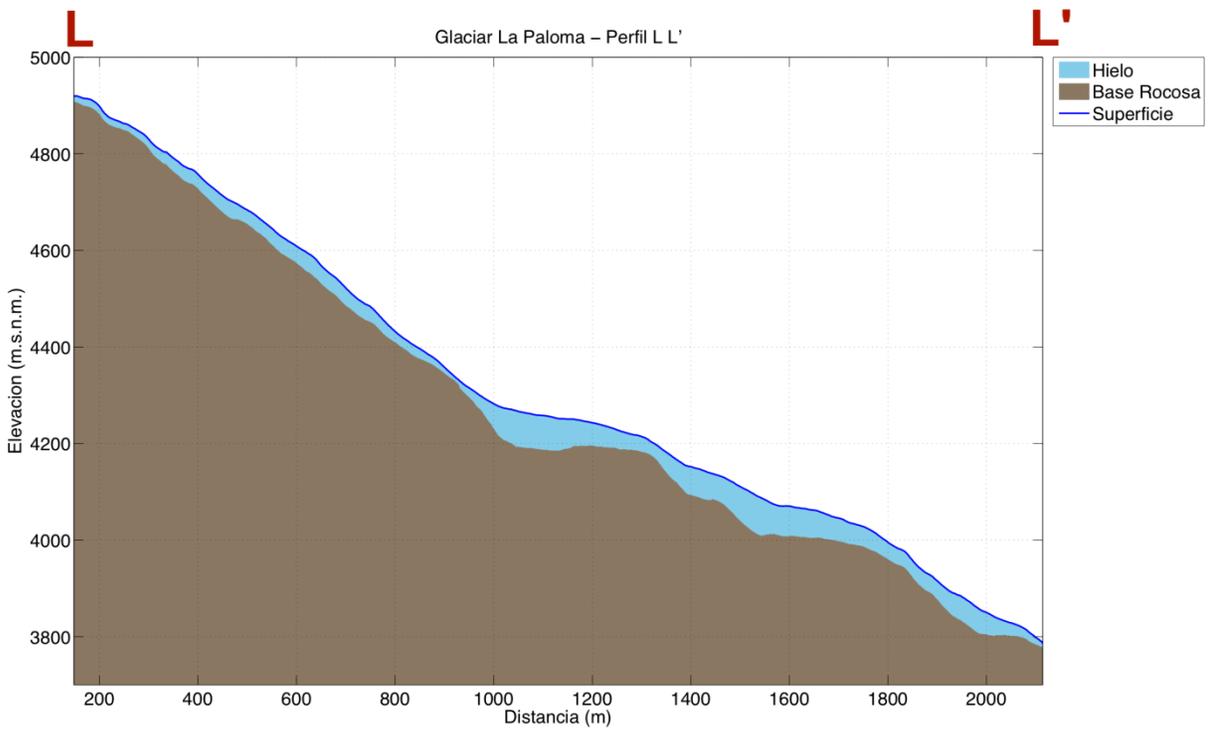
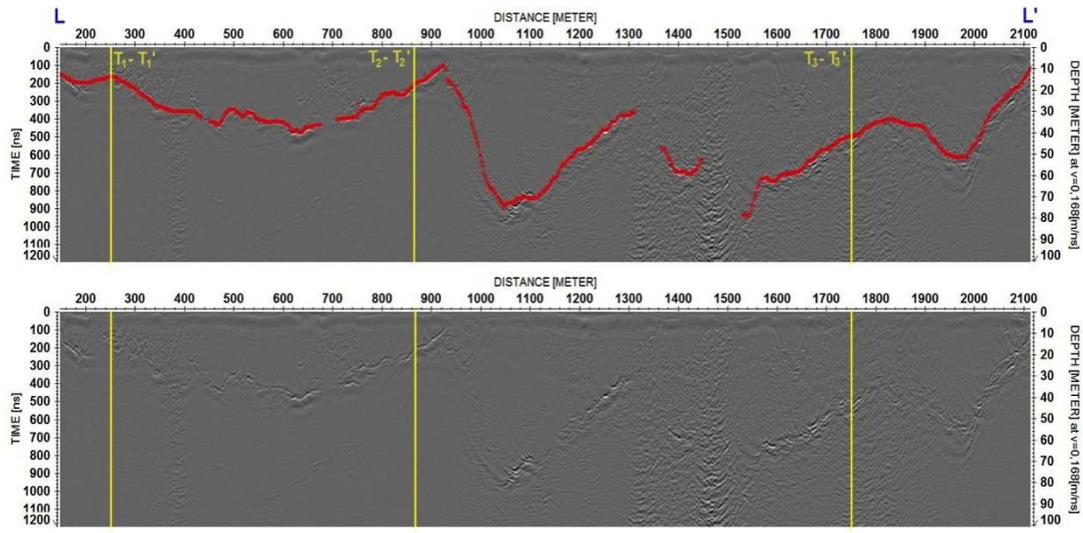


Figura 4.2.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

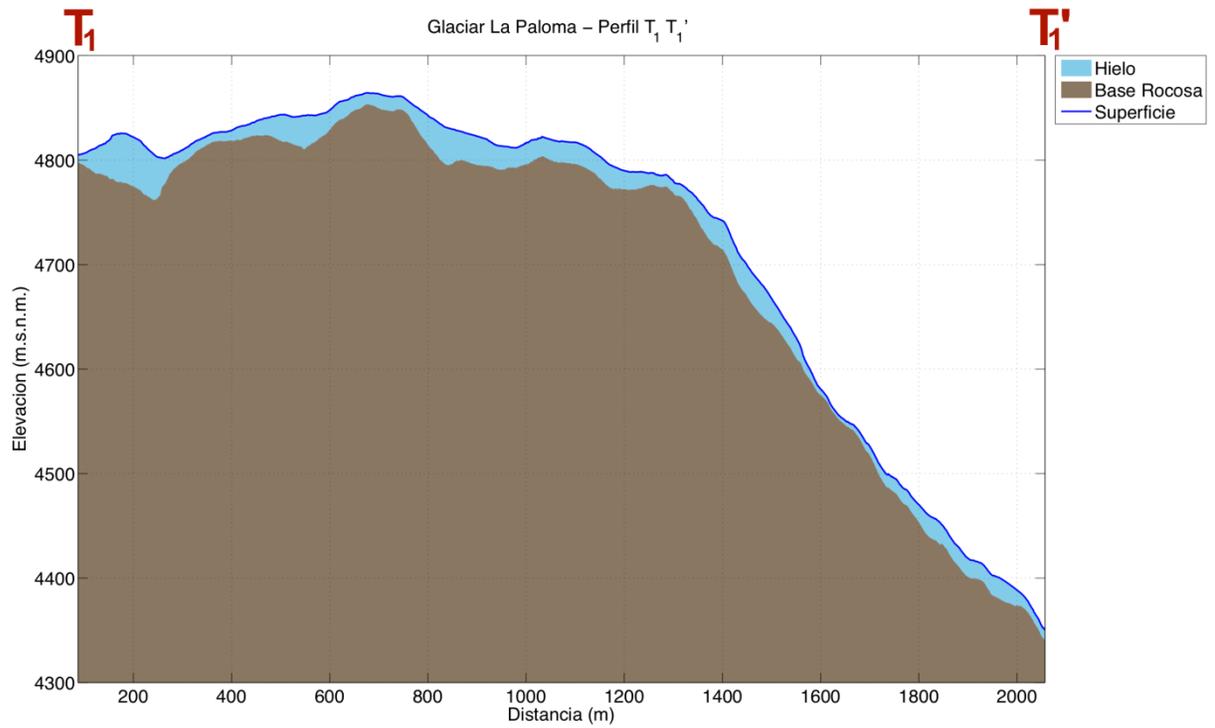
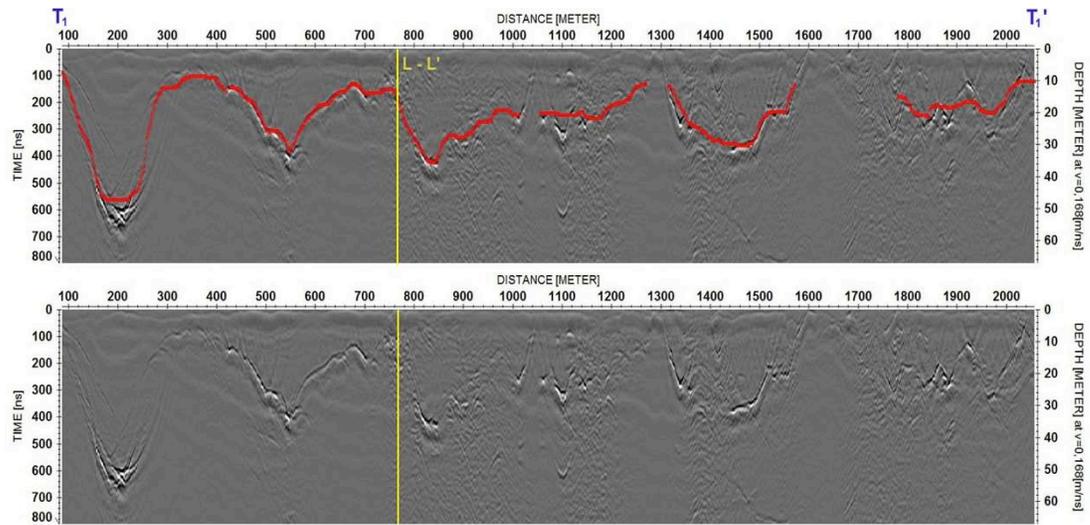


Figura 4.2.3 Perfil transversal T_1 - T_1' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

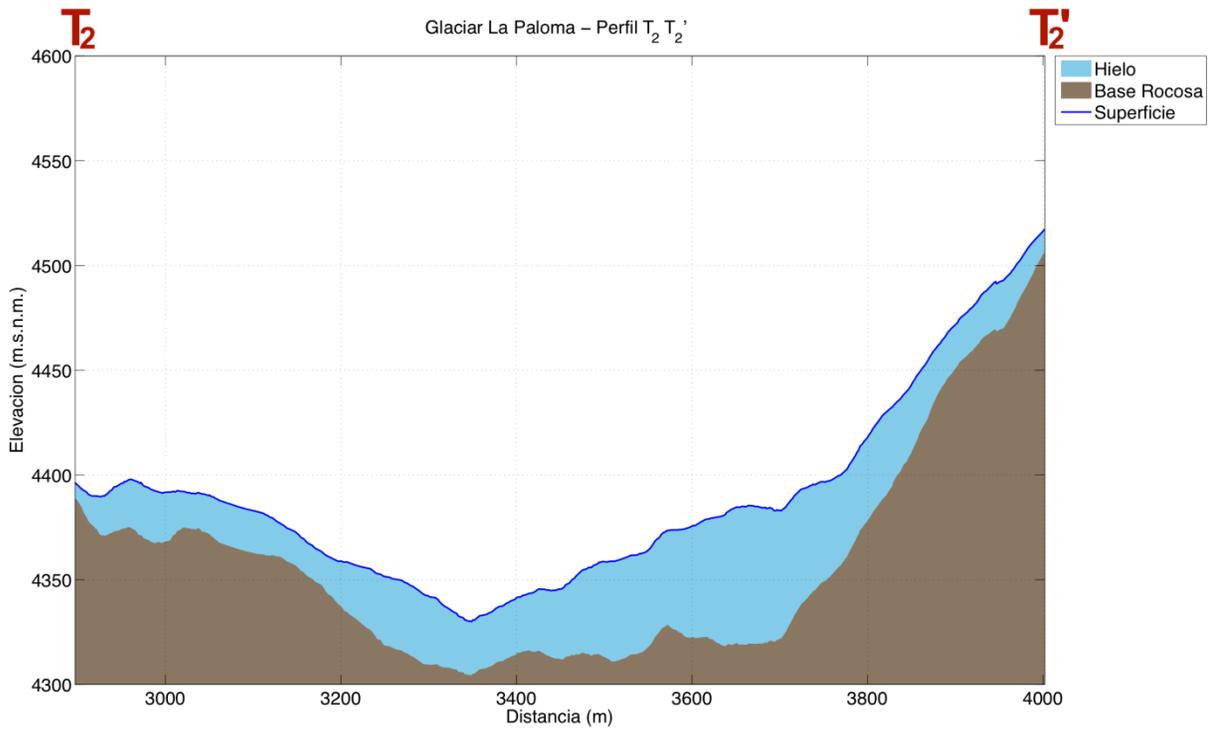
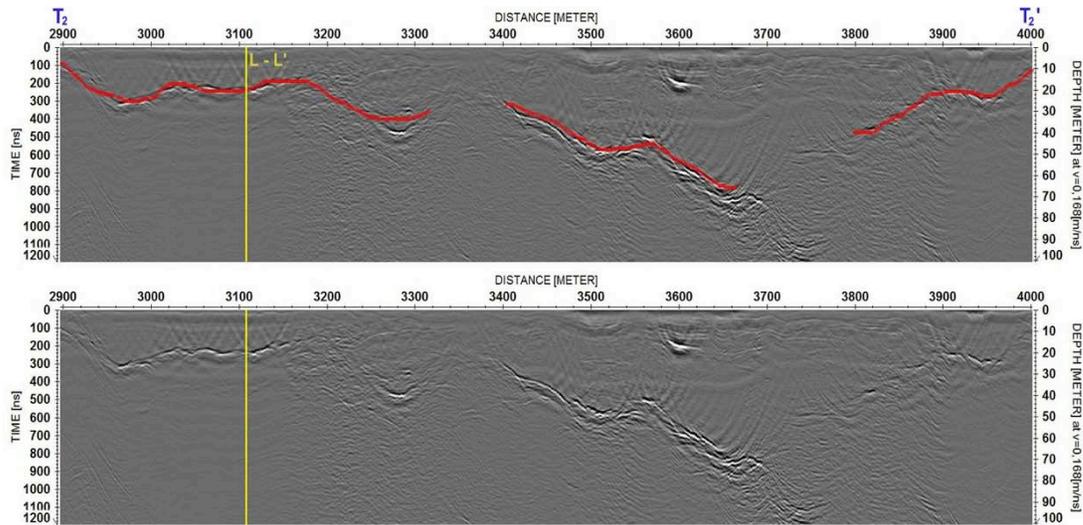


Figura 4.2.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

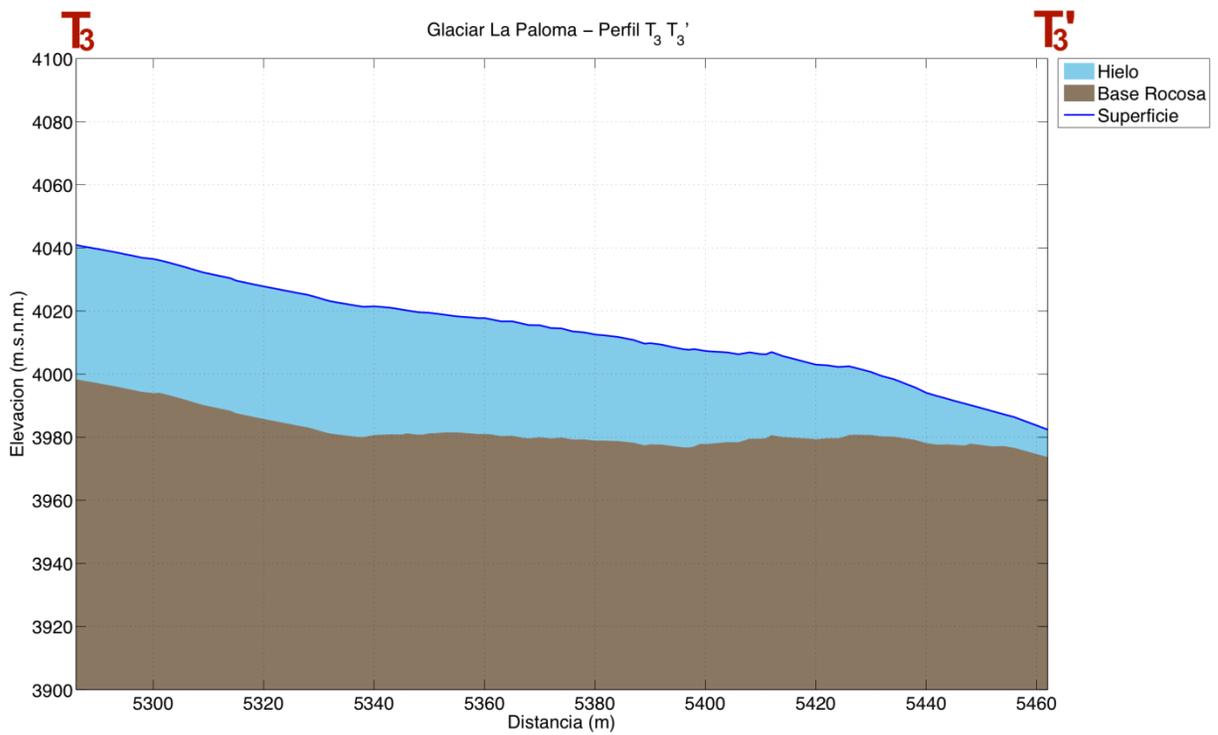
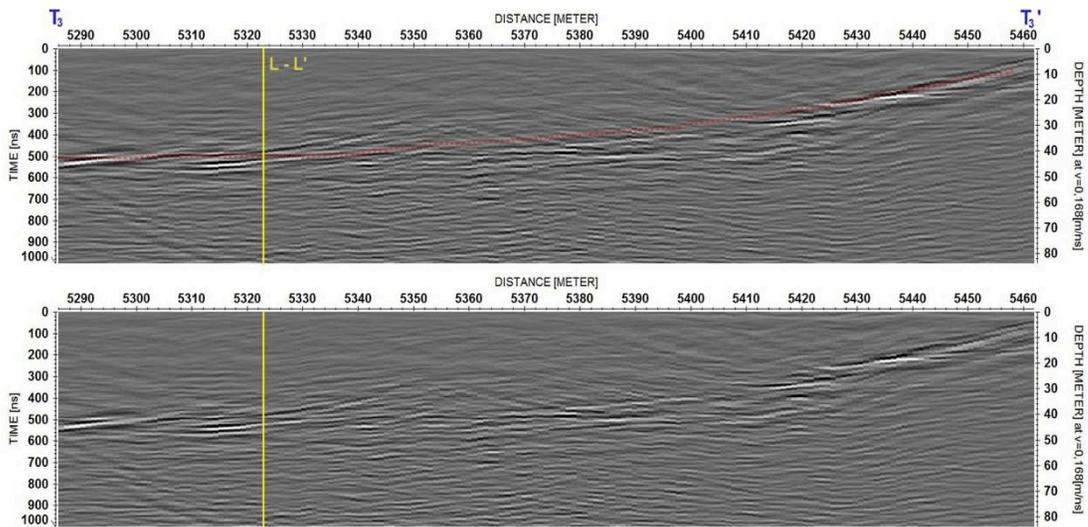


Figura 4.2.5 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar La Paloma: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.2.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio, y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar La Paloma. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinal y transversales es de 78,8 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo es el de la transversal T₁, mientras que la mayor pendiente se registra en el perfil longitudinal. El espesor promedio del glaciar La Paloma medido en estos perfiles es de 30,1 [m] (DE = 16,3 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	1.966	8,2	78,8	39,3	17,1	3.786	4.921	-30,0
T ₁ - T ₁ '	1.970	4	47,3	19,5	9,2	4.350	4.864	-20,4
T ₂ - T ₂ '	1.105	7,4	65,9	32,4	14,5	4.330	4.517	16,0
T ₃ - T ₃ '	176	8,7	42,5	31,6	10,6	3.982	4.041	-18,4

Tabla 4.2.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar La Paloma. Espesor promedio: 30,1 [m] (DE = 16,3 [m]).

4.2.2 Volumen

La Figura 4.2.6 muestra la interpolación del espesor de hielo para el glaciar La Paloma utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación. Debido a que también se detectó el fondo rocoso en la zona oriental del glaciar La Paloma, se dividió el glaciar en dos sectores, oeste y este (separados por la línea discontinua de la Figura 4.2.6). El lado oeste corresponde a la delimitación oficial del glaciar La Paloma según DGA (2012), y es el que se ha ocupado para el cálculo de una curva de ajuste de la sección 4.13 que relaciona el área y el volumen del glaciar. En la Tabla 4.2.2 se encuentran los resultados de estimación de volúmenes de hielo y equivalente en agua para el glaciar La Paloma. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar La Paloma (oeste) es de $0,036 \text{ [km}^3\text{]}$.

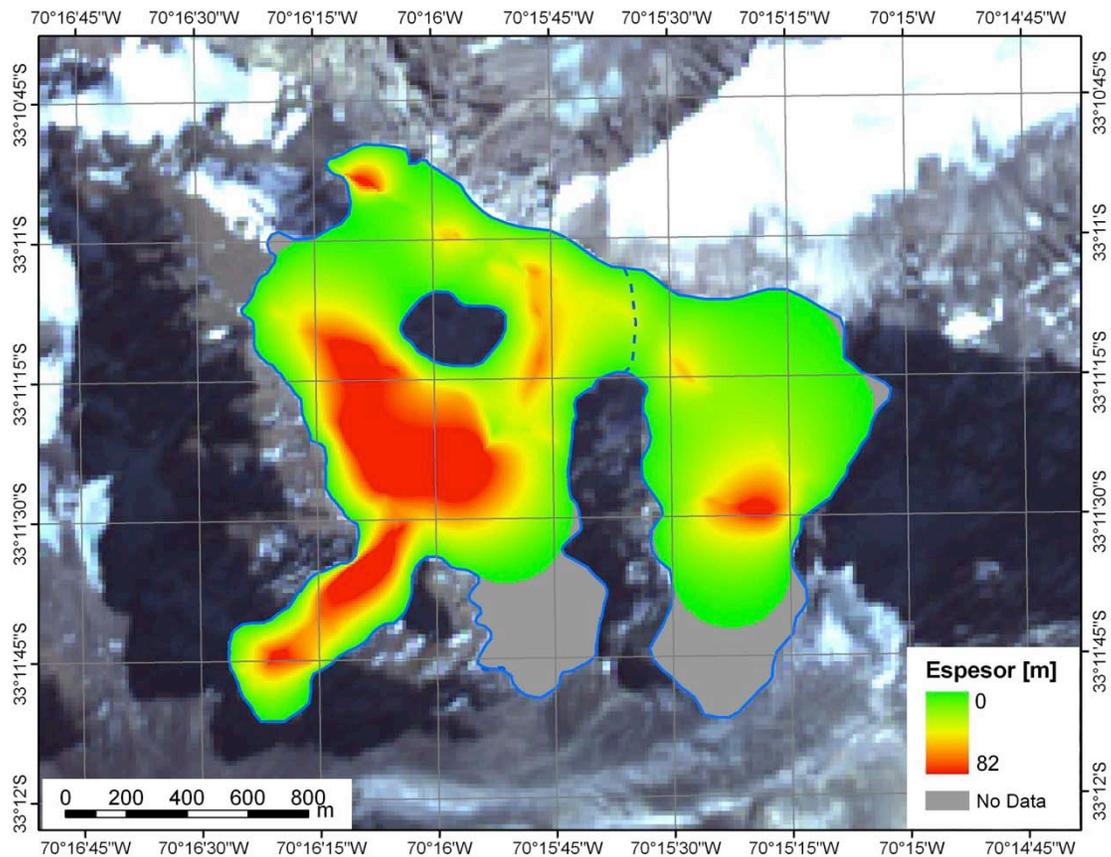


Figura 4.2.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar La Paloma para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la división entre sector oeste y sector este (línea discontinua), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
La Paloma (sector oeste)	1,280	0,025	1,430	0,042	0,036
La Paloma (sector este)	0,652	0,006	0,778	0,019	0,017

Tabla 4.2.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar La Paloma.

4.3 Glaciar Del Rincón

En la Figura 4.3.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar La Paloma, los cuales son representados mediante una escala de colores, donde el color verde indica menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.3.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i' , donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 2.233 [m].

4.3.1 Perfiles

En la Figura 4.3.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L'. Se incluye la intersección con las transversales T_1 , T_2 y T_3 (amarillo). Dos discontinuidades en L han sido interpoladas usando *spline* cúbico.

En la Figura 4.3.3, Figura 4.3.4 y Figura 4.3.5 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T_1-T_1' , T_2-T_2' y T_3-T_3' , respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

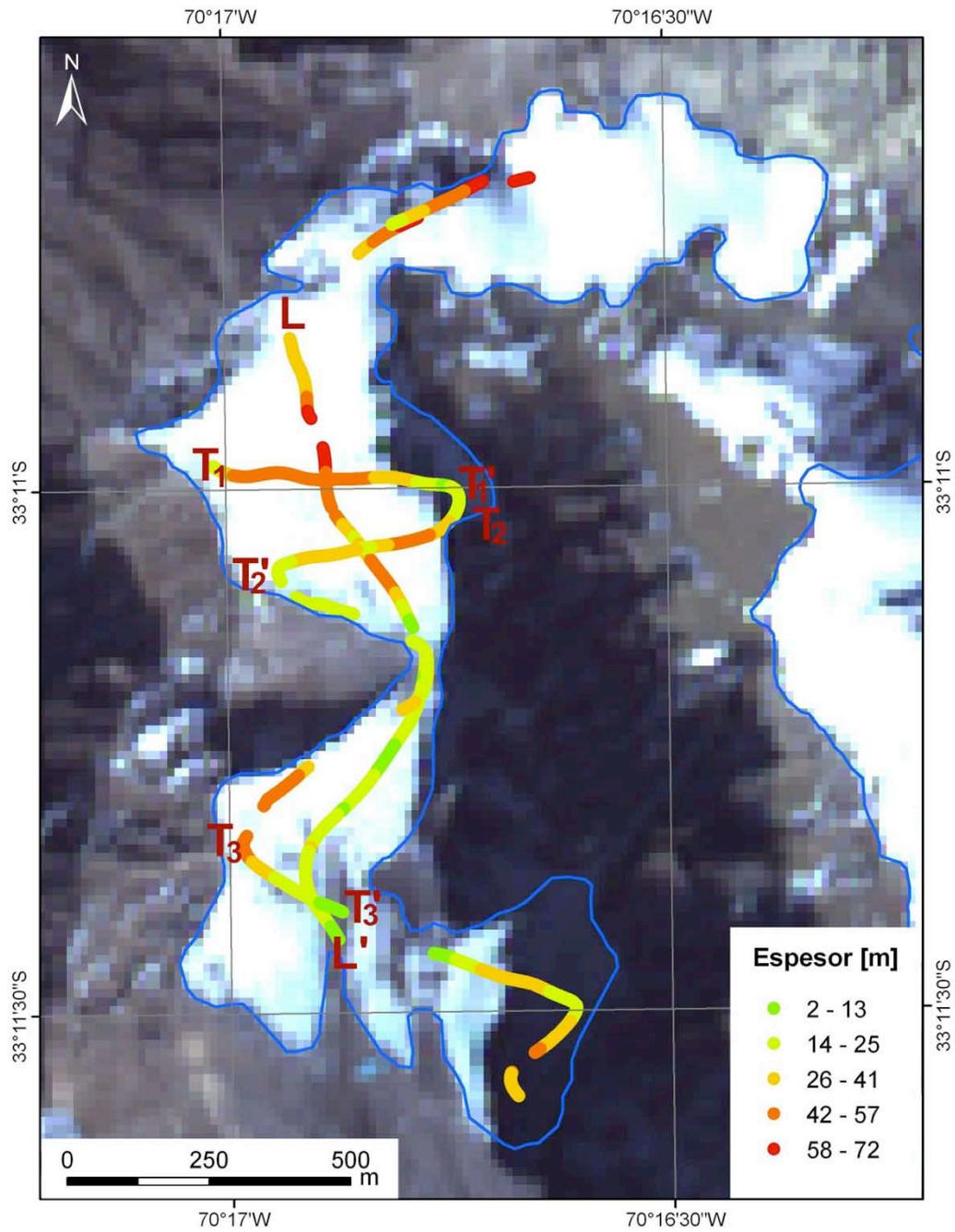


Figura 4.3.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Del Rincón. Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.

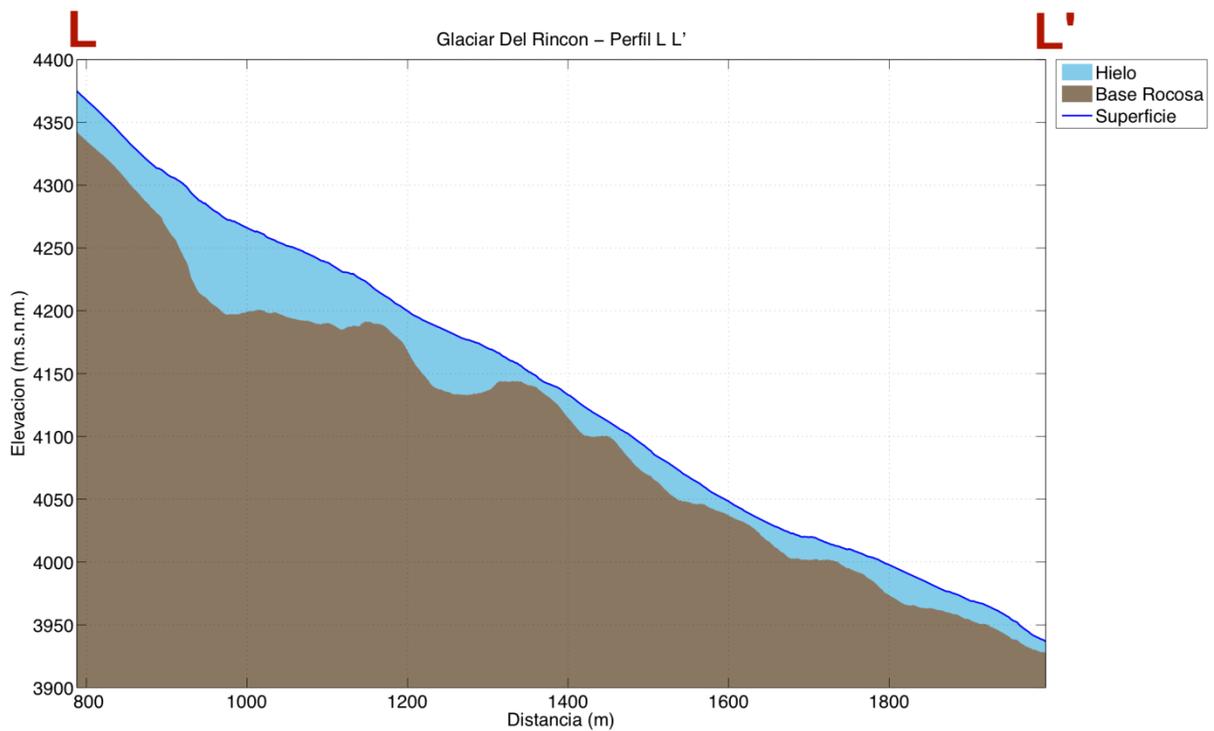
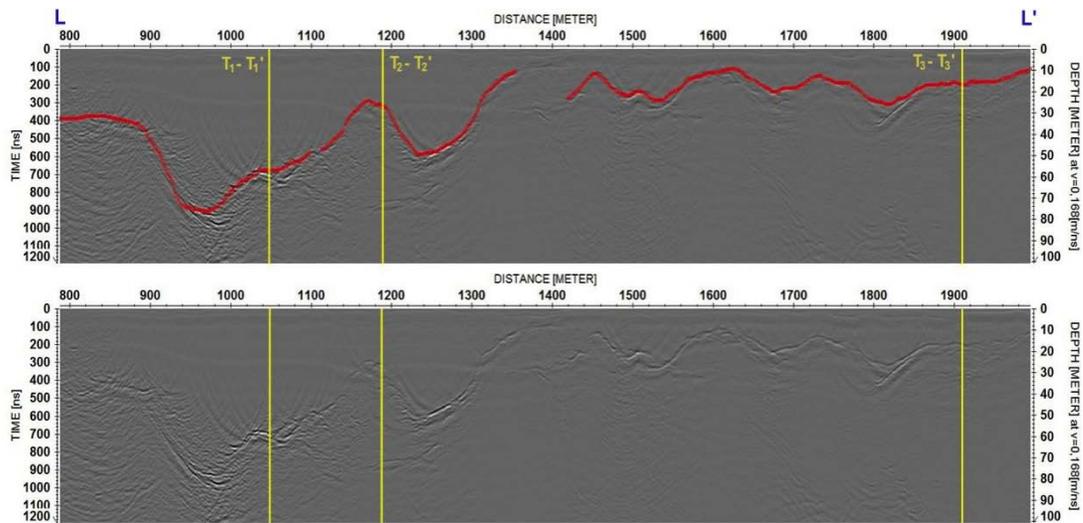


Figura 4.3.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

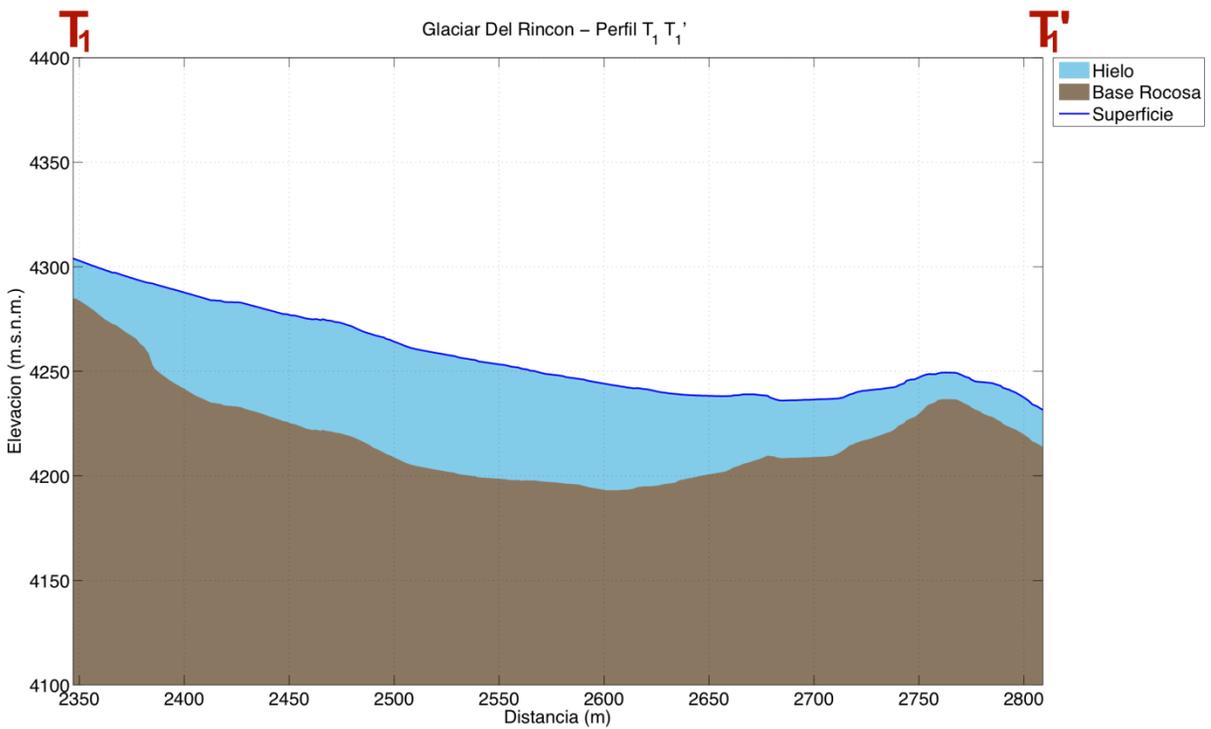
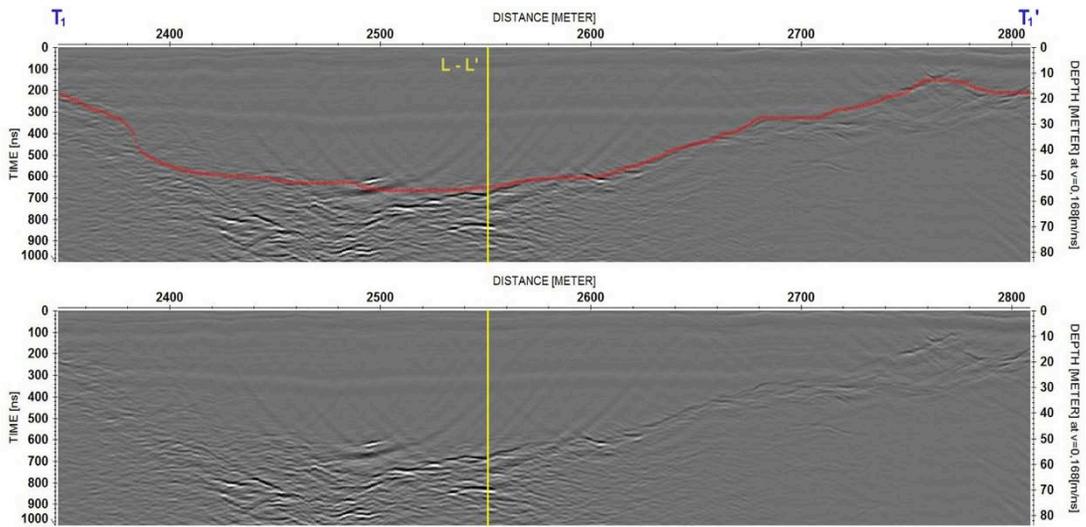


Figura 4.3.3 Perfil transversal T_1 - T_1' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

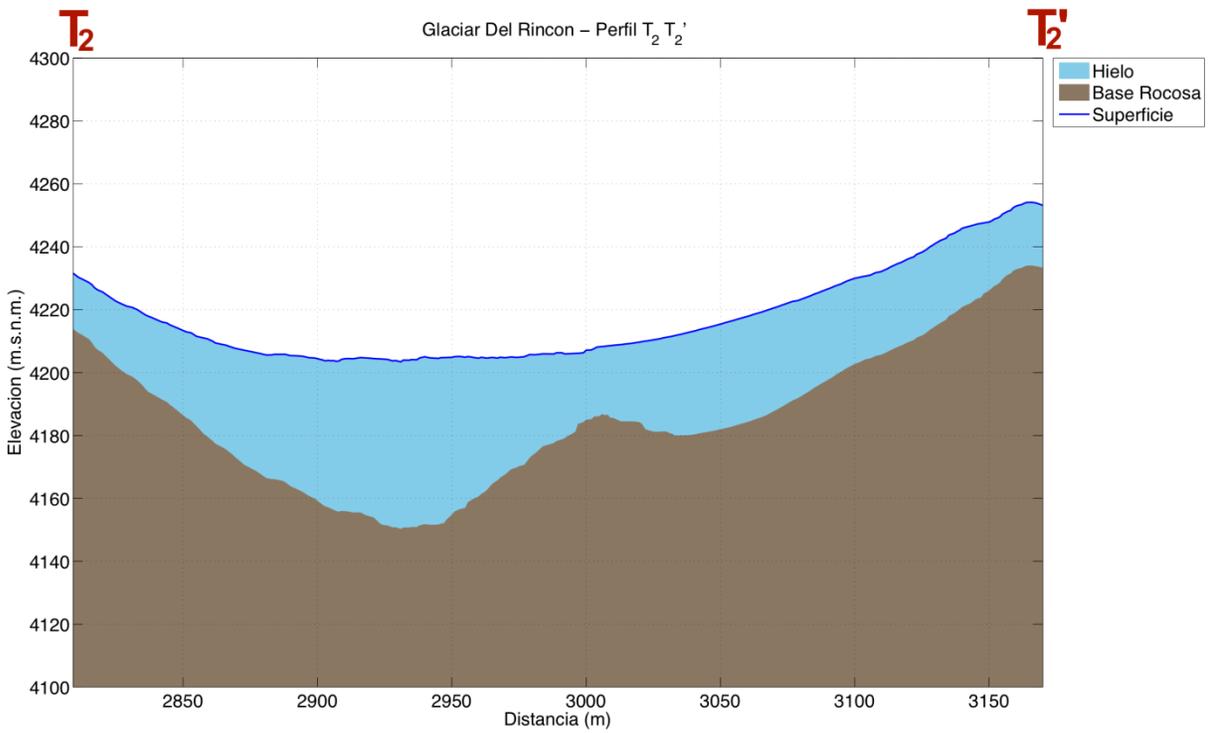
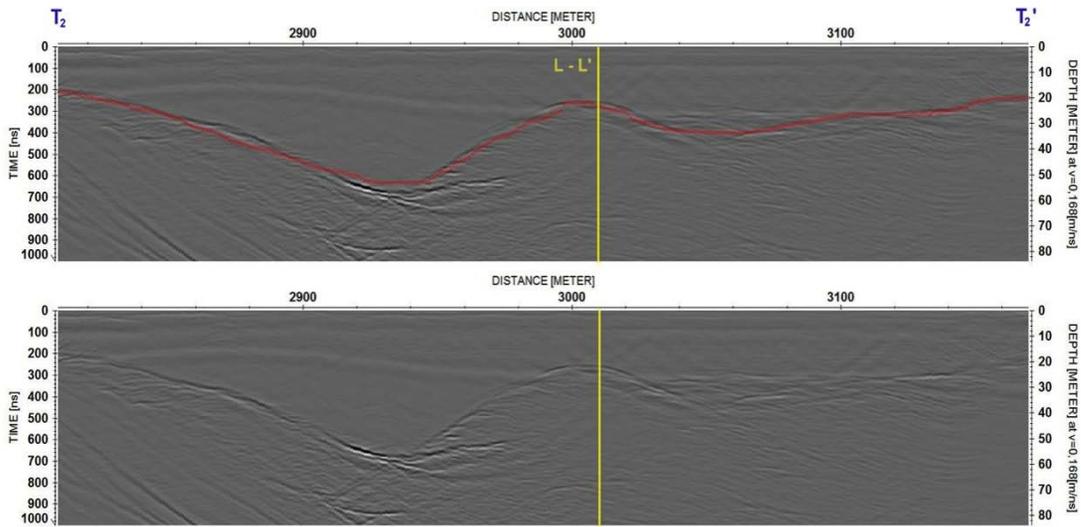


Figura 4.3.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

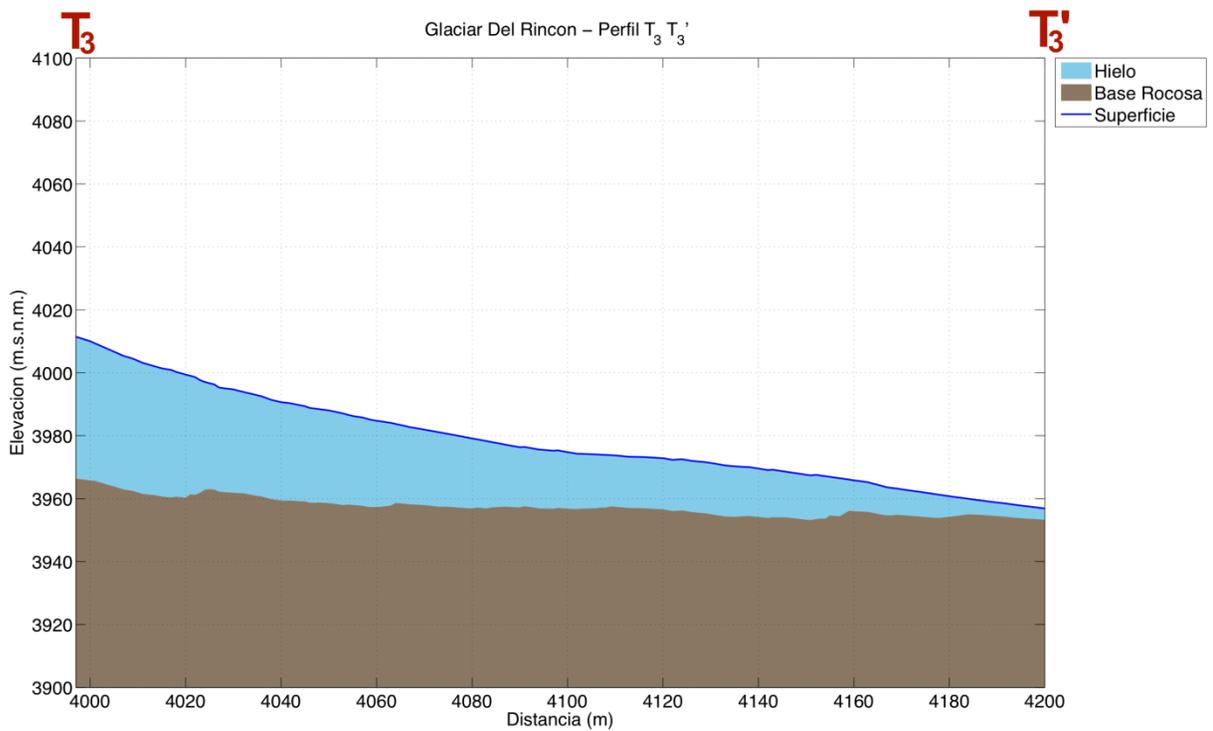
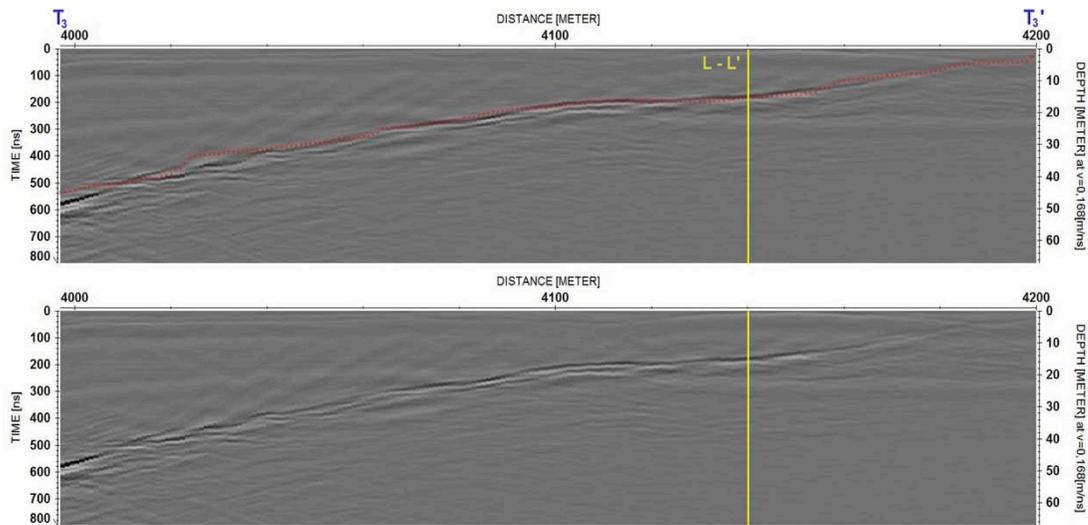


Figura 4.3.5 Perfil transversal T_3 - T_3' en el glaciar Del Rincón: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.3.1 contiene un resumen de la medición, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y la pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Del Rincón. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 76,2 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo y la mayor pendiente topográfica se encuentra también en la longitudinal. El espesor promedio del glaciar Del Rincón, considerando los espesores de estos perfiles, es de 31,2 [m] (DE = 16,4 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	1.207	8,6	76,2	29,5	18,0	3.937	4.375	-20,0
T ₁ - T ₁ '	462	12,7	55,8	38,8	14,7	4.232	4.304	-8,9
T ₂ - T ₂ '	361	17,7	53,2	32,3	9,9	4.203	4.254	12,2
T ₃ - T ₃ '	203	3,6	45,1	21,1	11,4	3.957	4.011	-15,0

Tabla 4.3.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Del Rincón. Espesor promedio: 31,2 [m] (DE = 16,4 [m]).

4.3.2 Volumen

La Figura 4.3.6 muestra la interpolación del espesor de hielo para el glaciar Del Rincón utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.3.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Del Rincón es de 0,016 [km³].

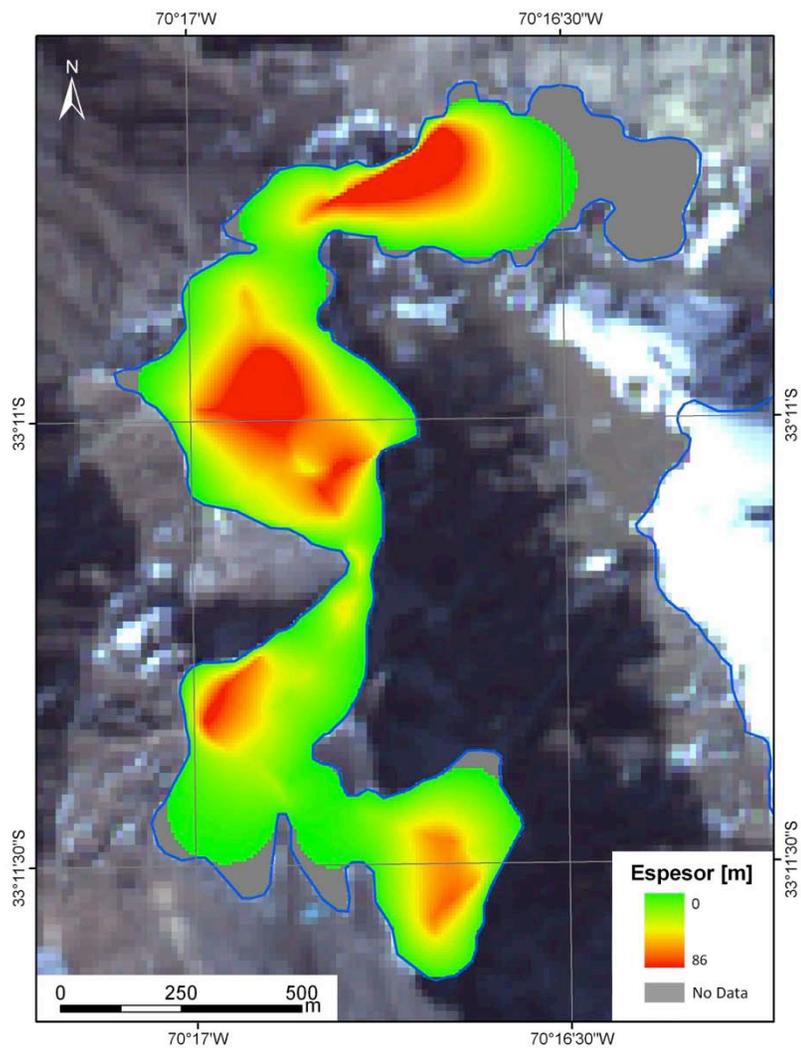


Figura 4.3.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Del Rincón para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 30 de marzo de 2008.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Del Rincón	0,642	0,011	0,743	0,018	0,016

Tabla 4.3.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Del Rincón.

4.4 Glaciar Cerro El Plomo

En la Figura 4.4.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Cerro El Plomo, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.4.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T₁ a T₁', donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 3.864 [m].

4.4.1 Perfiles

En la Figura 4.4.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' que intersecta a T₁, T₂ y T₃. La Figura 4.4.3, Figura 4.4.4 y Figura 4.4.5 muestran los radargramas y topografía subglacial de T₁-T₁', T₂-T₂' y T₃-T₃', respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (en amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial. Se debe notar que en L-L' y T₁-T₁' hay discontinuidades que fueron interpoladas usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

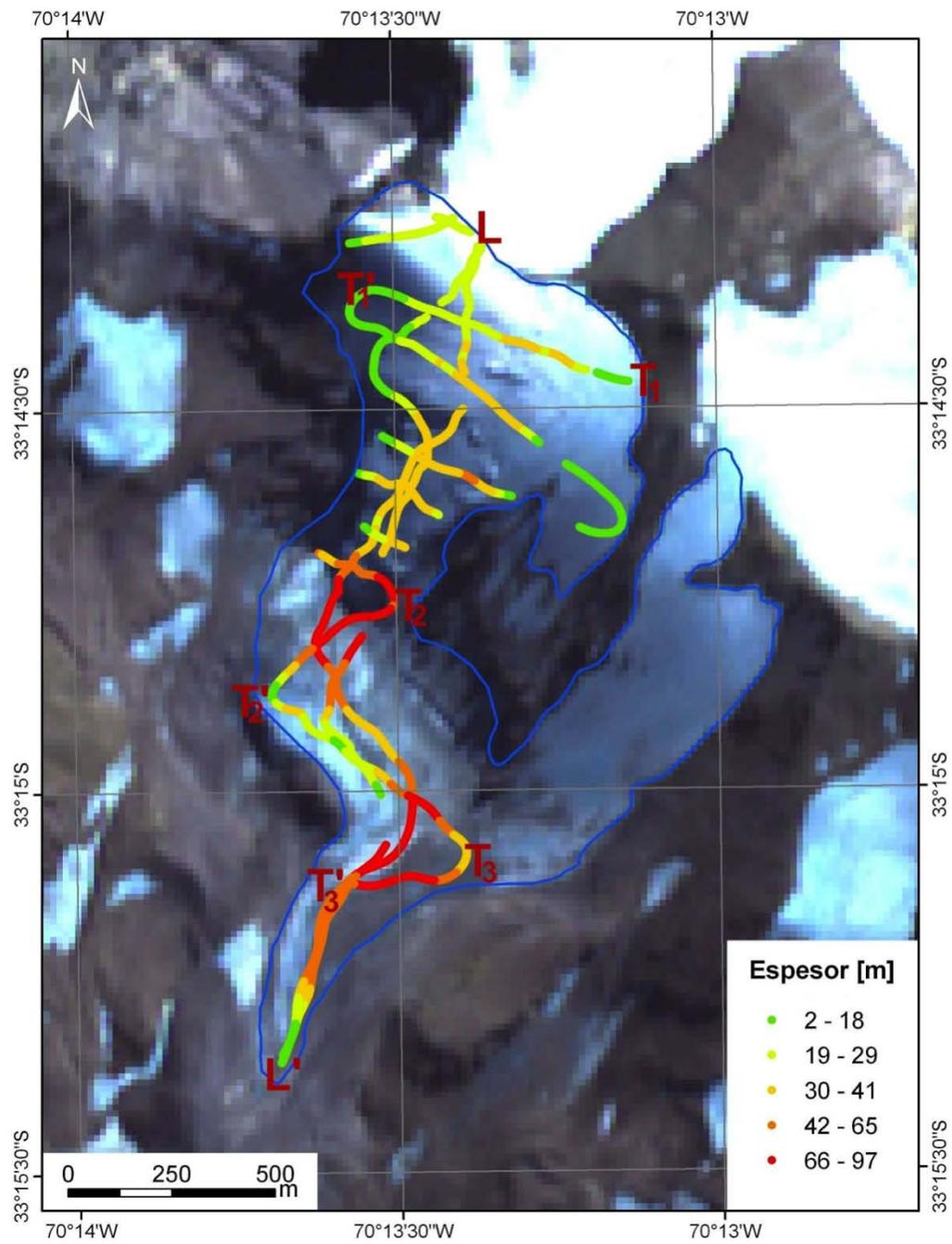


Figura 4.4.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T₁-T₁') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Cerro El Plomo. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

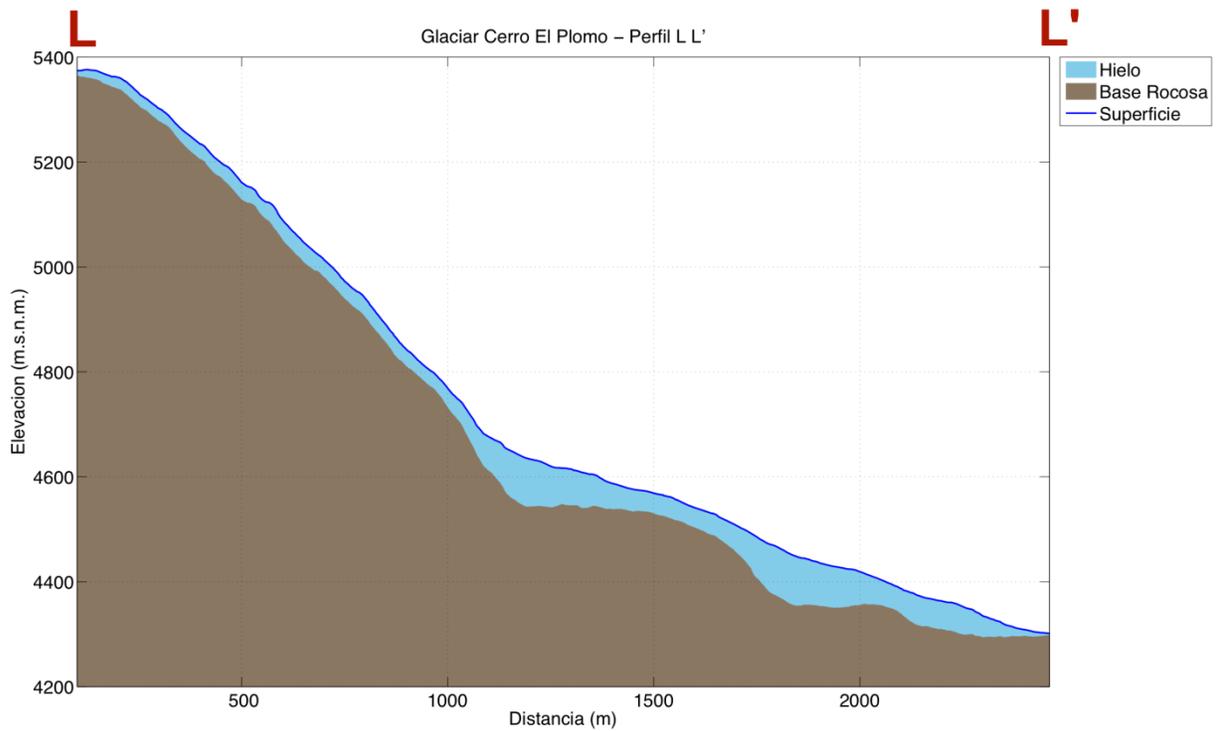
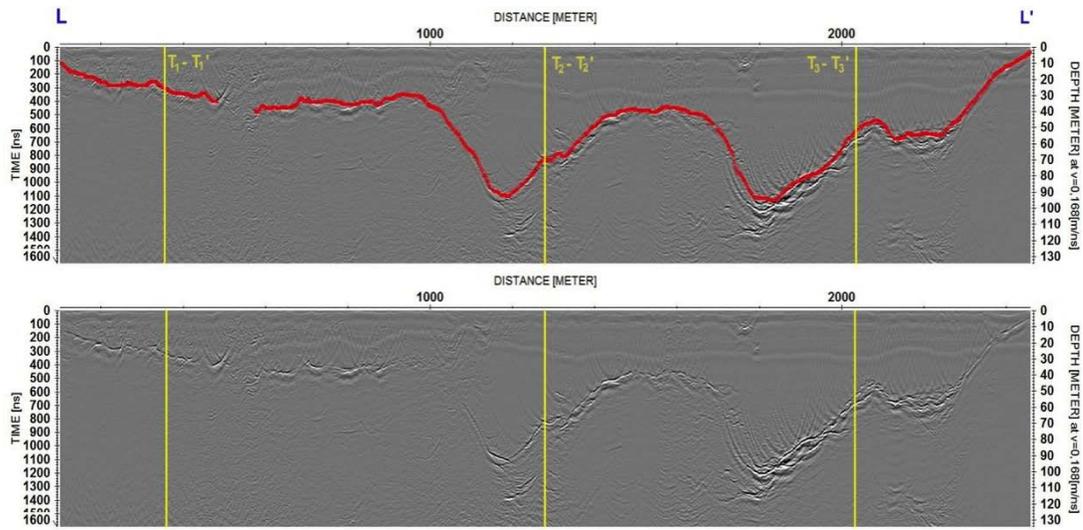


Figura 4.4.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

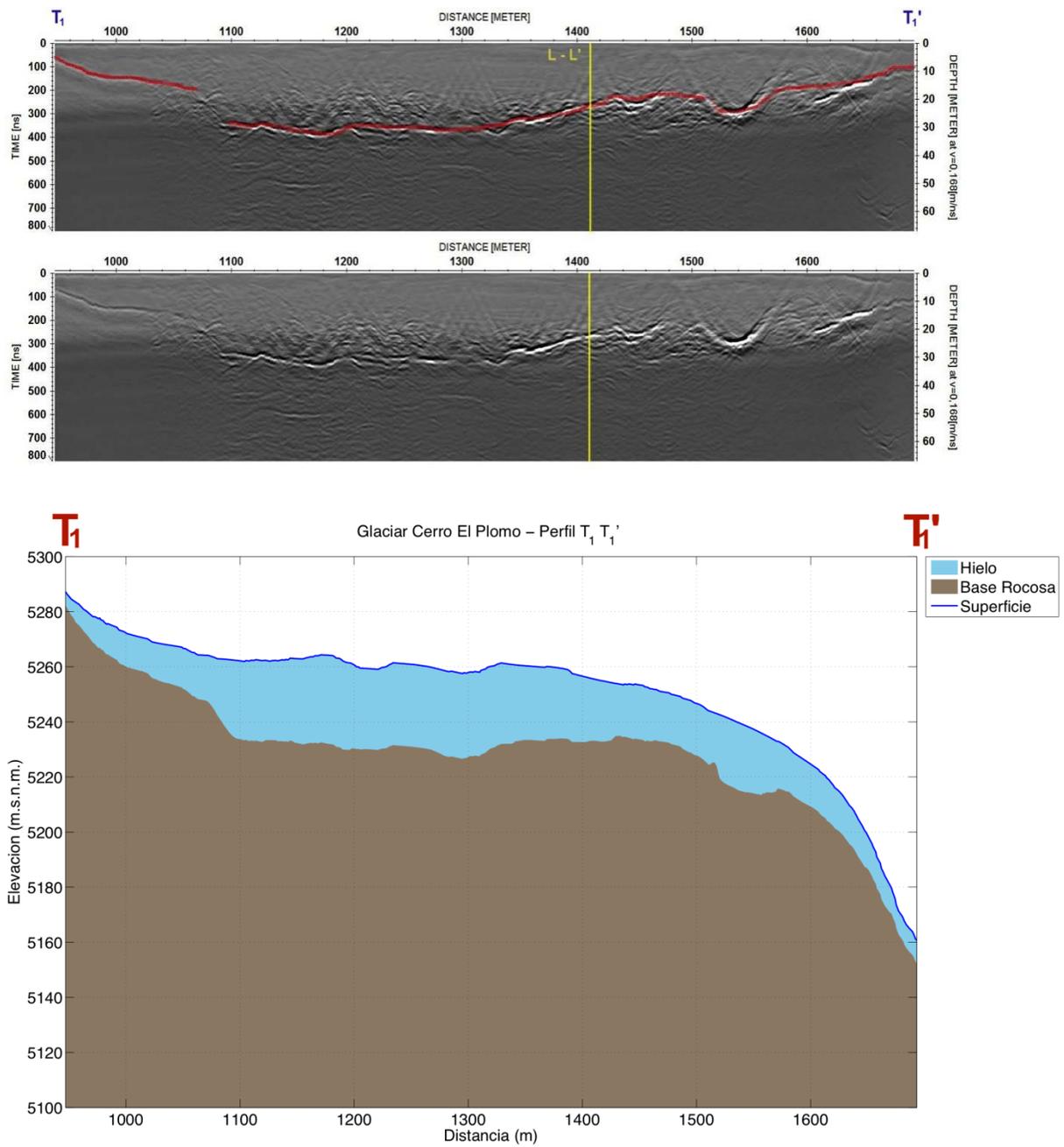


Figura 4.4.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

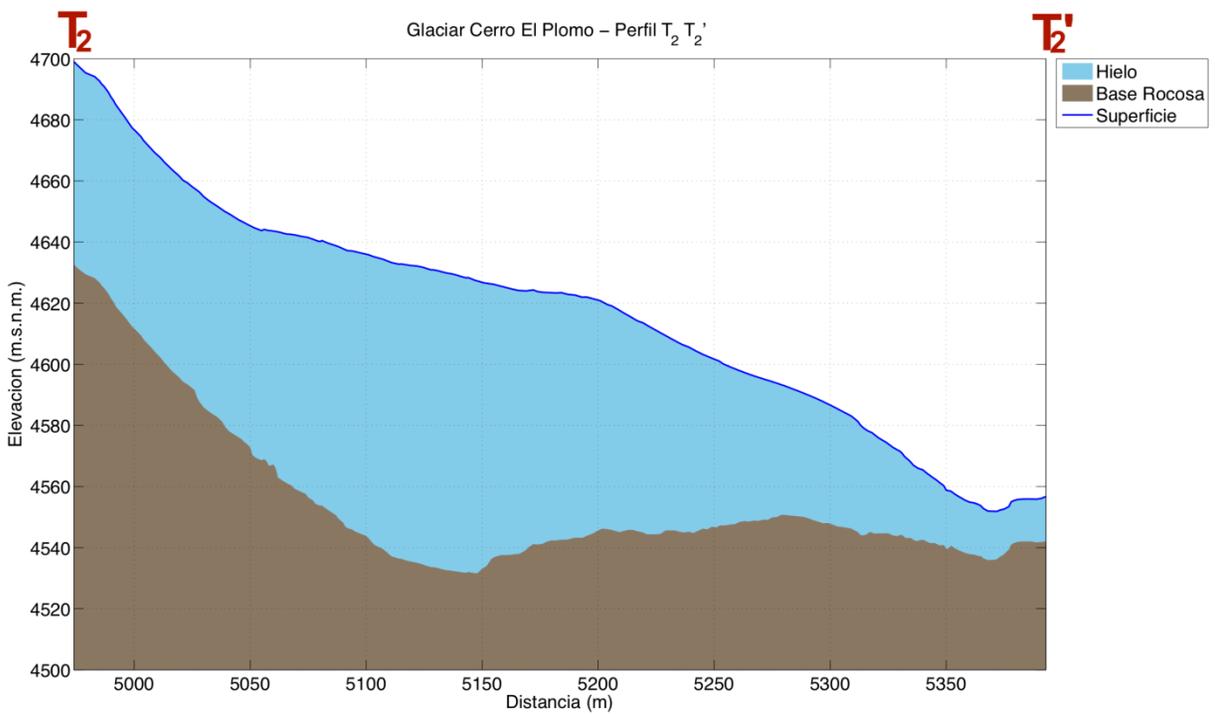
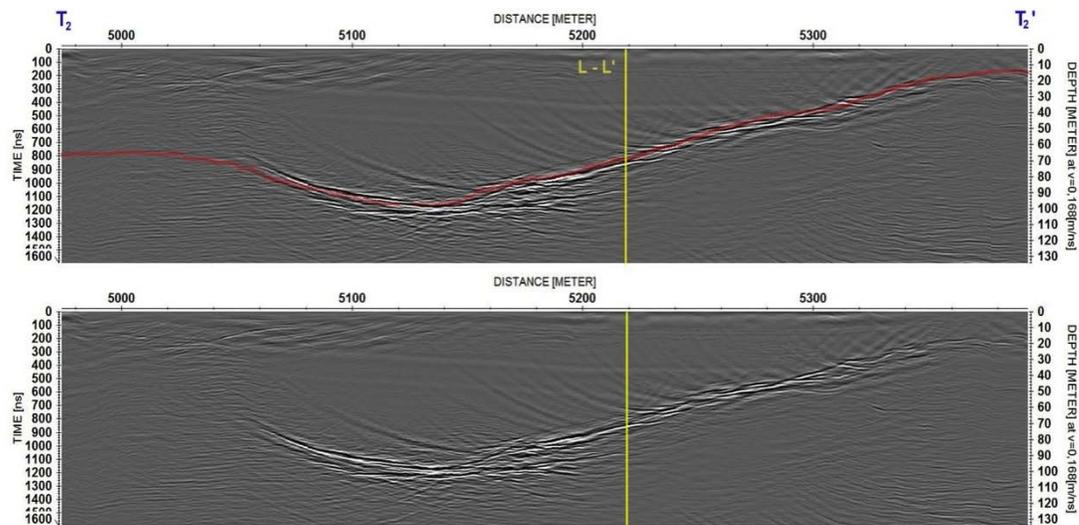


Figura 4.4.4 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

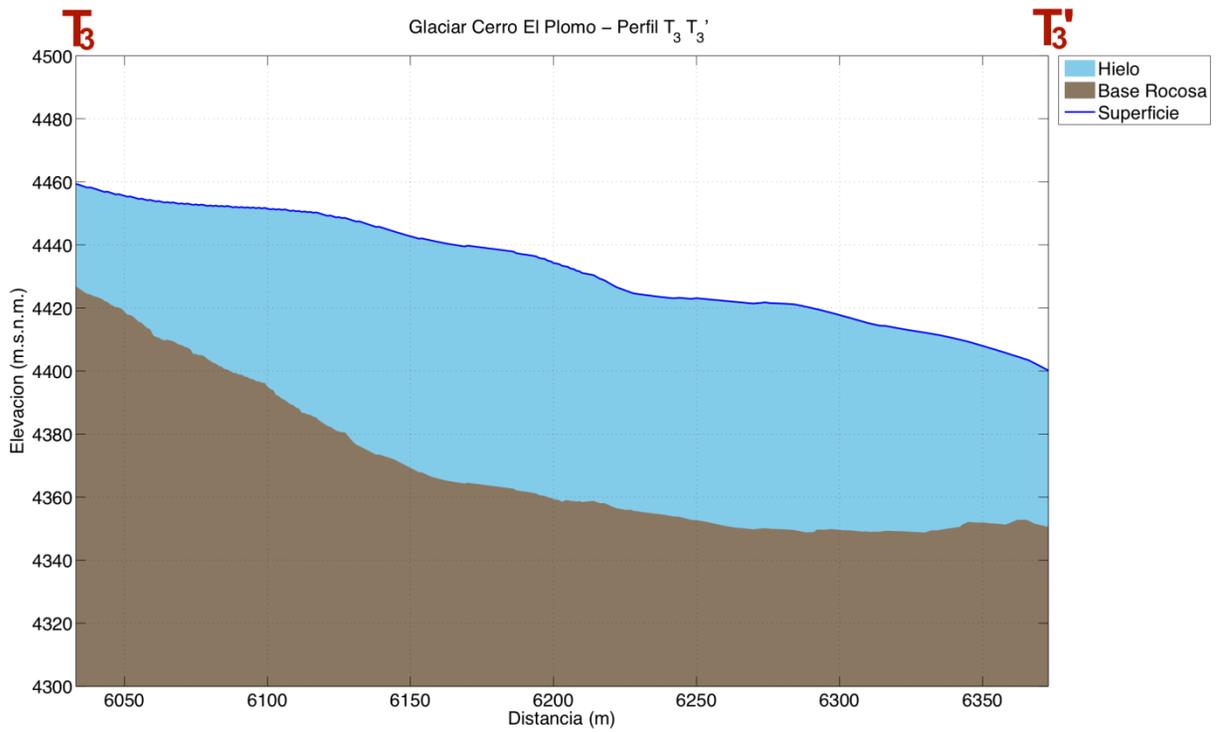
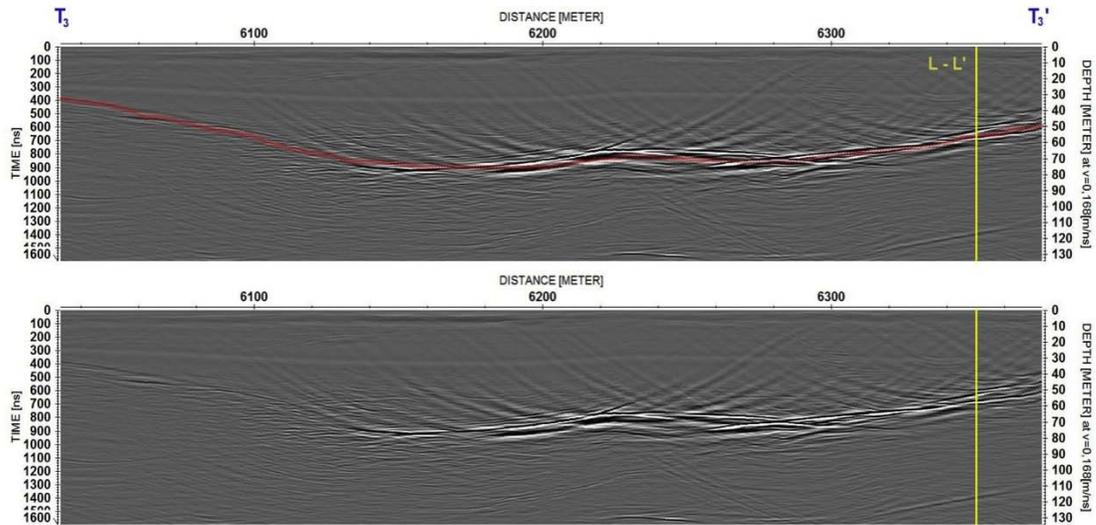


Figura 4.4.5 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar Cerro El Plomo: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.4.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, la elevación mínima y máxima, y la pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Cerro El Plomo. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 97,2 [m] y se encuentra en la transversal T₂. El perfil medido más largo y la mayor pendiente topográfica se encuentra en la longitudinal L. El espesor promedio del glaciar Cerro El Plomo medido en estos perfiles, es de 44,5 [m] (DE = 23,6 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	2.359	2,9	95,0	45,9	21,9	4.301	5.376	-24,7
T ₁ - T ₁ '	746	4,9	32,2	21,6	7,6	5.161	5.287	-9,6
T ₂ - T ₂ '	419	13,9	97,2	61,9	25,7	4.552	4.699	-20,3
T ₃ - T ₃ '	340	32,5	75,2	63,2	11,8	4.400	4.459	-9,9

Tabla 4.4.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Cerro El Plomo. Espesor promedio: 44,5 [m] (DE = 23,6 [m]).

4.4.2 Volumen

La Figura 4.4.6 muestra la interpolación del espesor para el glaciar Cerro El Plomo utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.4.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Cerro El Plomo es de 0,030 [km³].

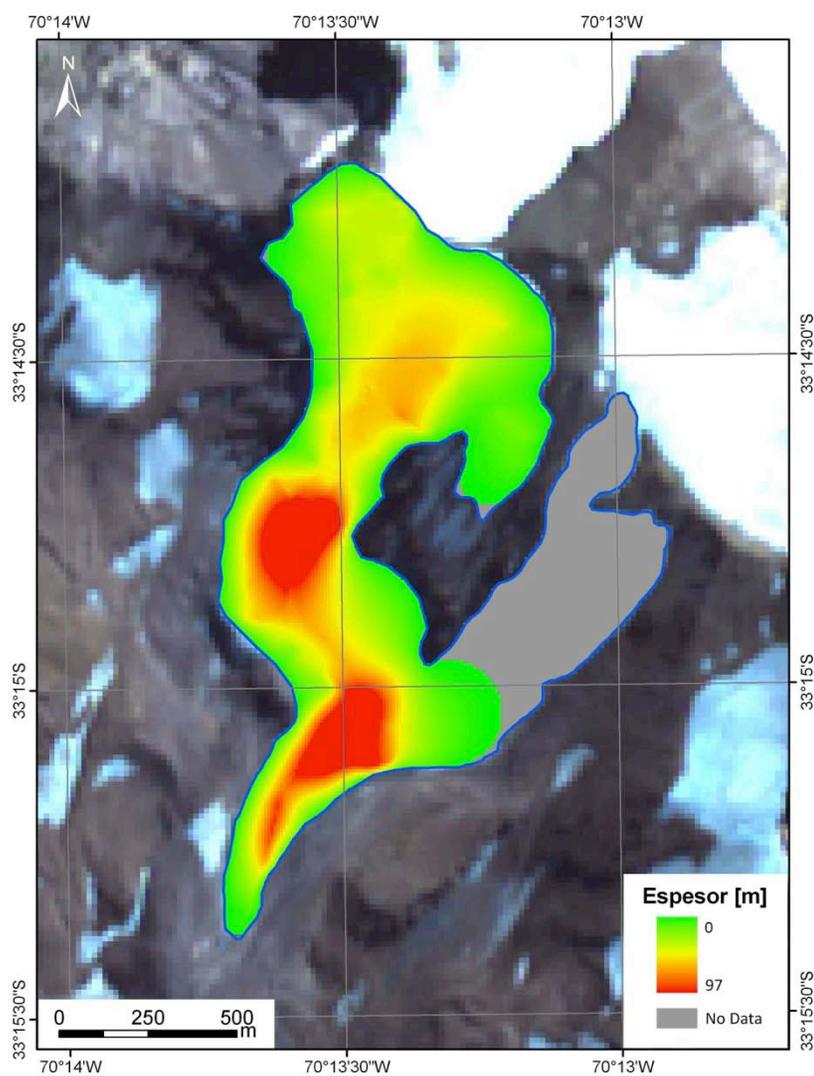


Figura 4.4.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Cerro El Plomo para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Cerro El Plomo	1,002	0,019	1,250	0,035	0,030

Tabla 4.4.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Cerro El Plomo.

4.5 Glaciar Yeso

En la Figura 4.5.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Yeso, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.5.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i' , donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 5.171 [m].

4.5.1 Perfiles

En la Figura 4.5.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' y las intersecciones de este perfil con las transversales T_1 , T_2 y T_3 (amarillo). En la Figura 4.5.3, Figura 4.5.4 y Figura 4.5.5 se observa el radargrama y la topografía subglacial de los perfiles T_1-T_1' , T_2-T_2' y T_3-T_3' , respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (en amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

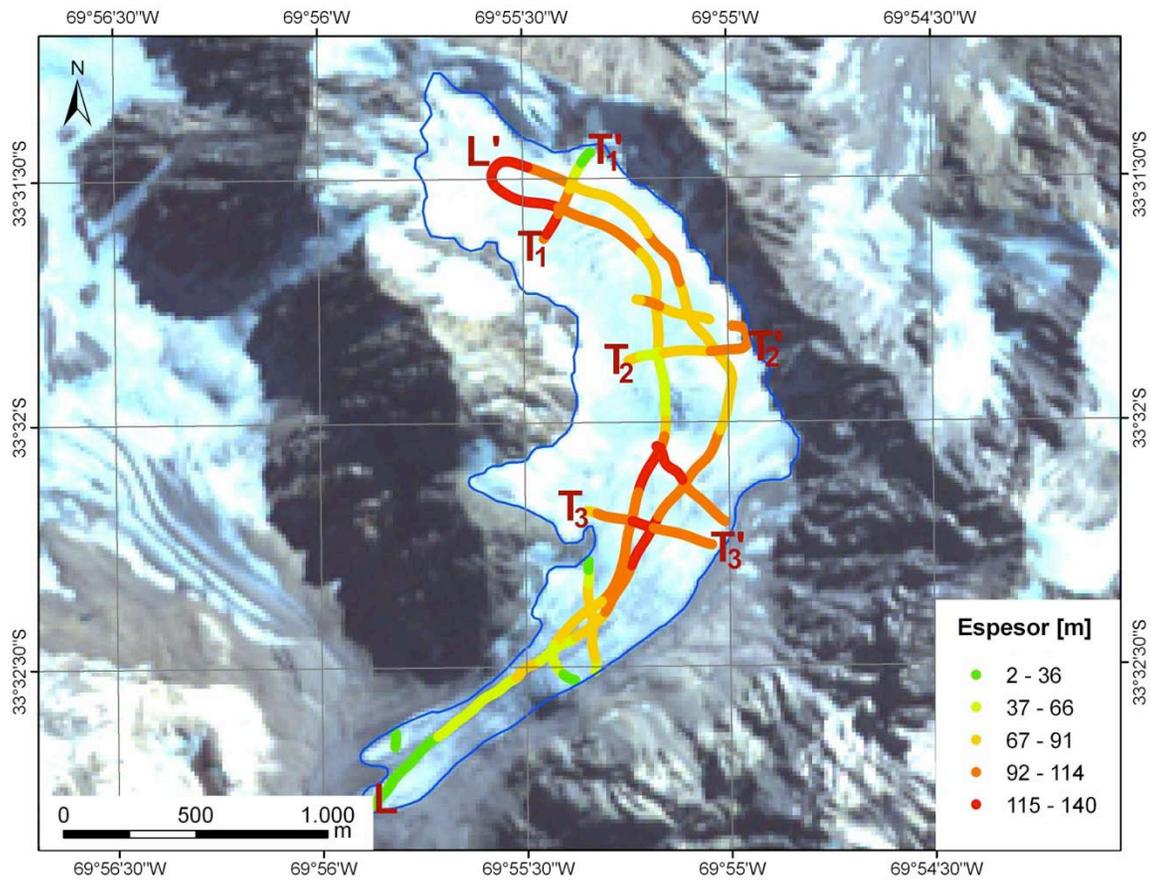


Figura 4.5.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T₁-T₁') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Yesso. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

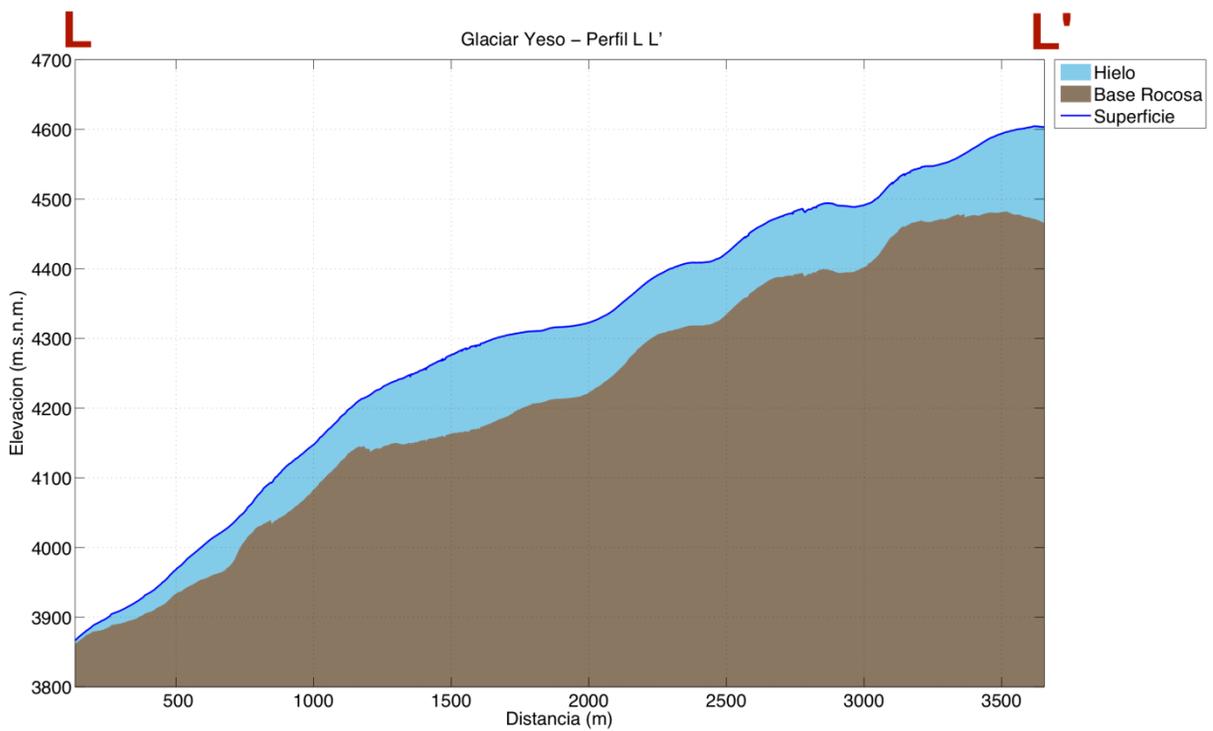
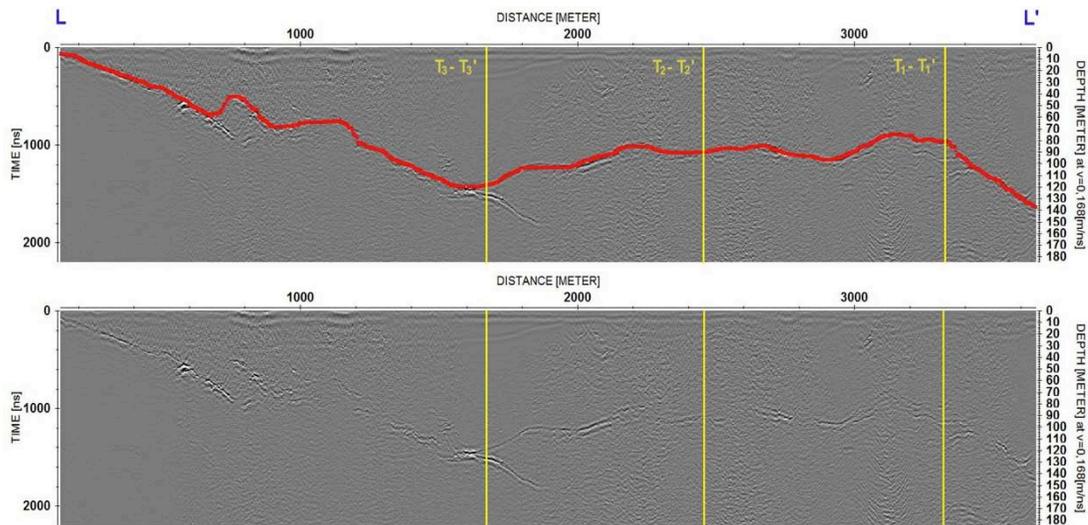


Figura 4.5.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

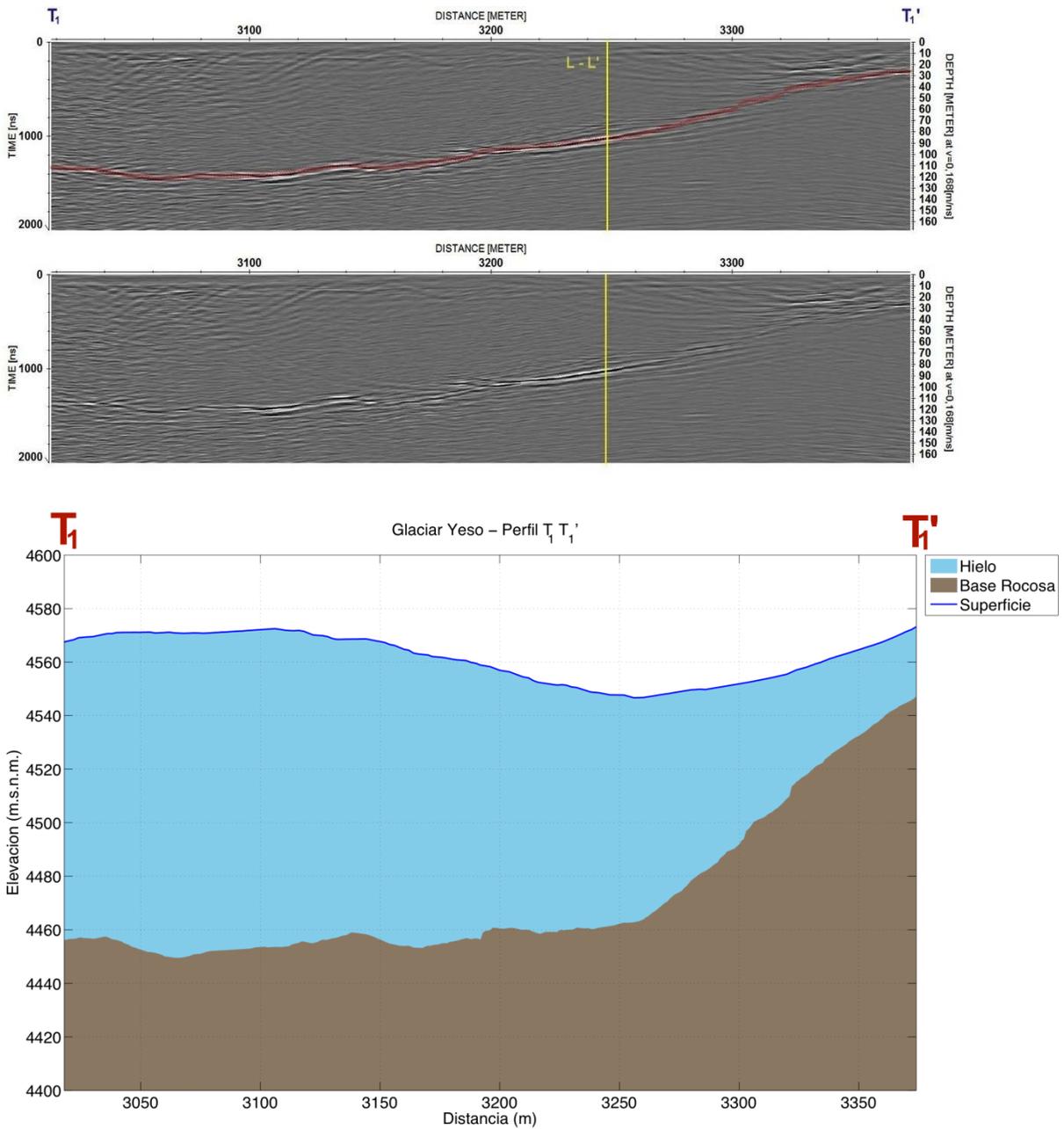


Figura 4.5.3 Perfil transversal T₁-T₁' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

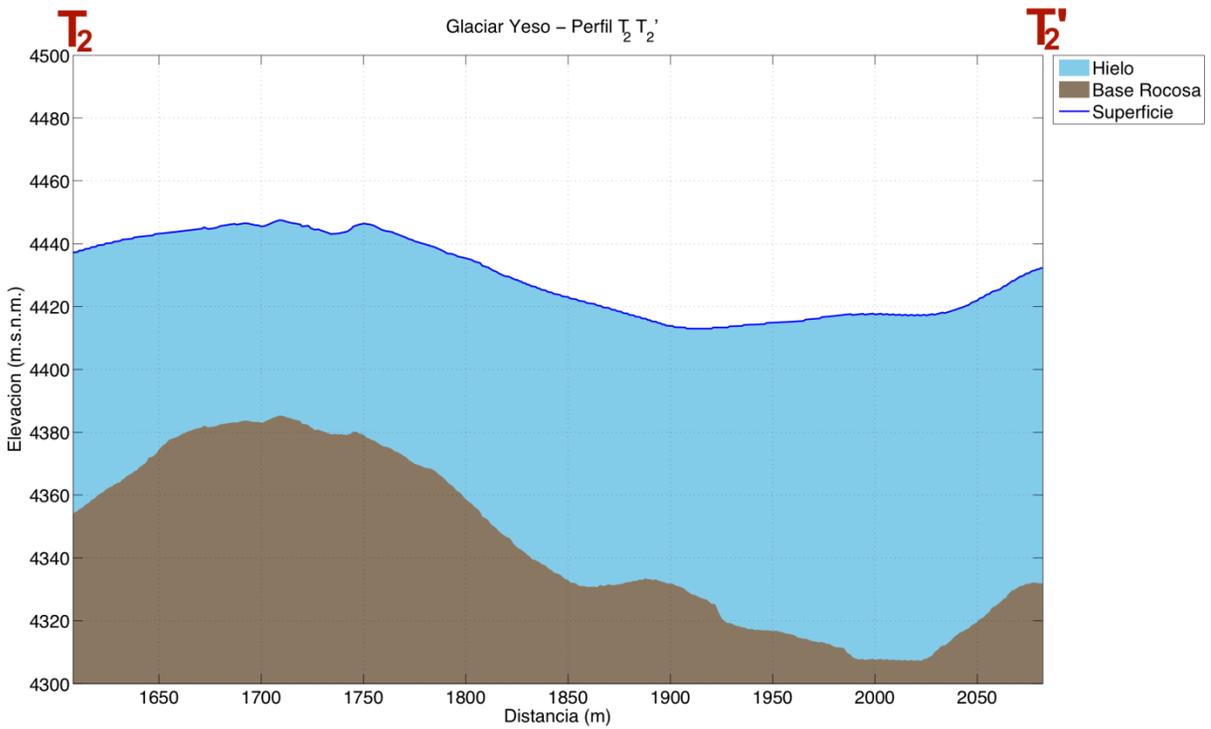
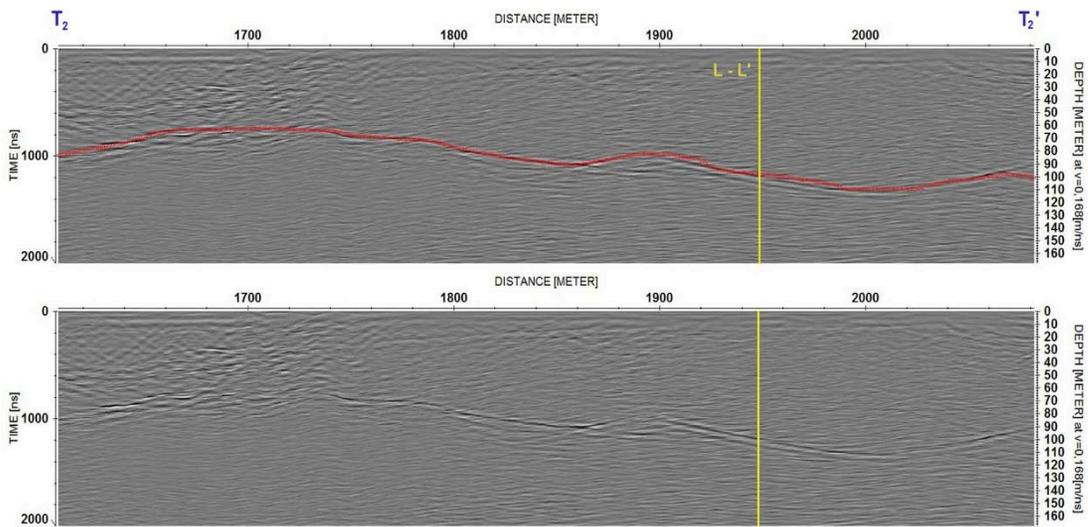


Figura 4.5.4 Perfil transversal T_2 - T_2' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

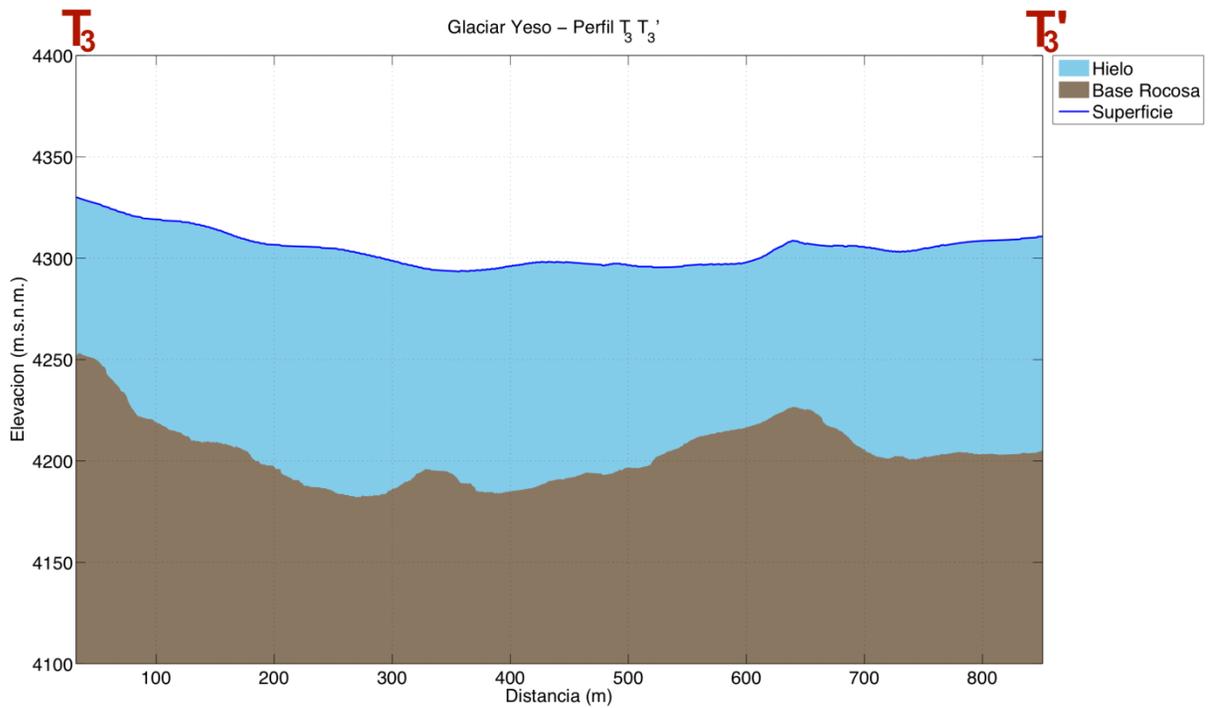
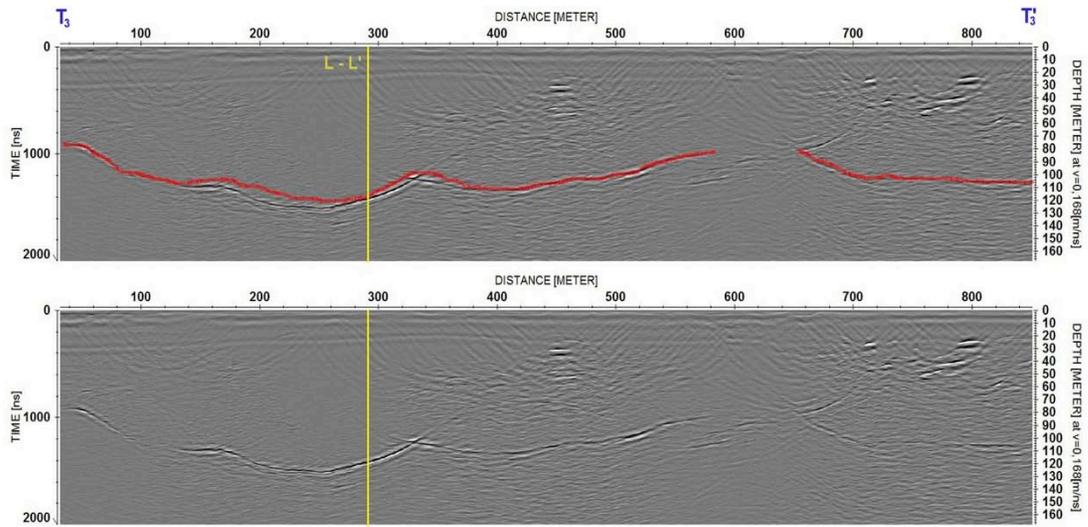


Figura 4.5.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Yeso: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.5.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Yeso. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 137,5 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo es la longitudinal, mientras que la mayor pendiente se registra en la transversal T₁. El espesor promedio del glaciar Yeso medido en estos perfiles es de 84,7 [m] (DE = 26,9 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	3.522	5,3	137,5	80,6	28,8	3.867	4.605	11,9
T ₁ - T ₁ '	356	26,0	121,3	89,2	30,4	4.547	4.573	12,7
T ₂ - T ₂ '	474	62,2	109,9	84,3	15,6	4.413	4.448	-9,6
T ₃ - T ₃ '	819	76,5	120,6	100,7	11,3	4.294	4.330	-6,4

Tabla 4.5.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Yeso. Espesor promedio: 84,7 [m] (DE = 26,9 [m]).

4.5.2 Volumen

La Figura 4.5.6 muestra la interpolación del espesor de hielo para el glaciar Yeso utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.5.2 Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Yeso es de 0,045 [km³].

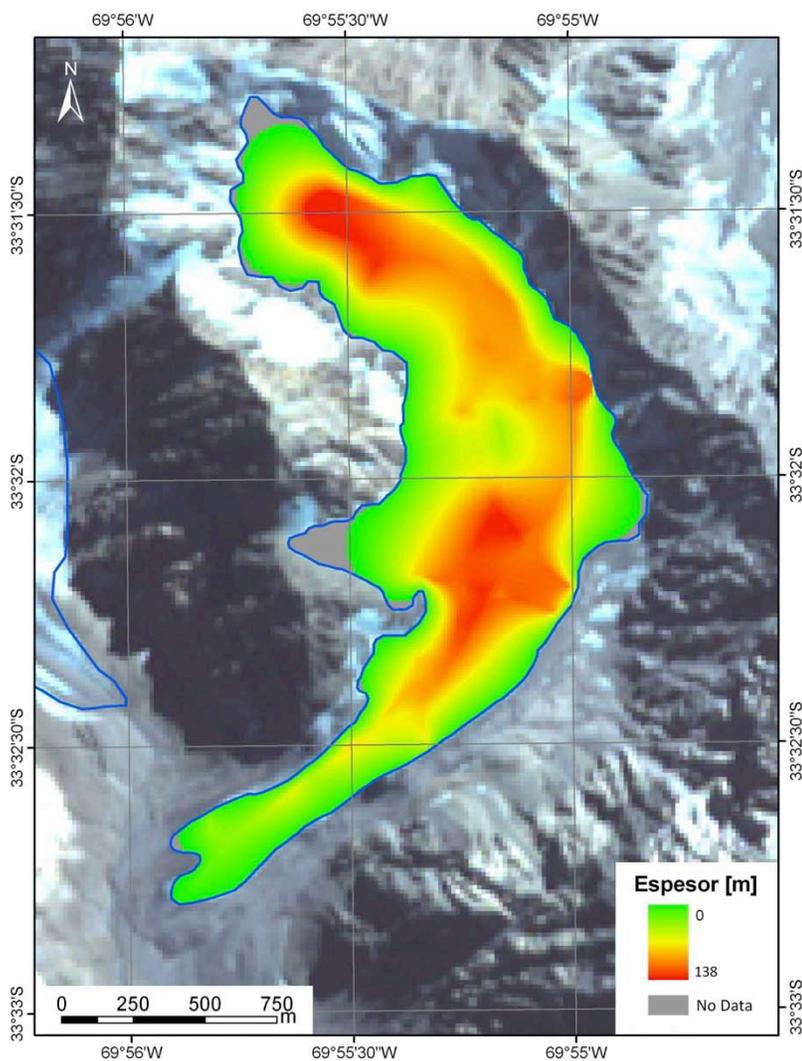


Figura 4.5.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Yeso para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Yeso	1,634	0,088	1,695	0,052	0,045

Tabla 4.5.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Yeso.

4.6 Glaciar Bello

En la Figura 4.6.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Bello, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.6.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i', donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 7.840 [m].

4.6.1 Perfiles

En la Figura 4.6.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' y las intersecciones de este perfil con las transversales T₁, T₂ y T₃ (amarillo). En la Figura 4.6.3, Figura 4.6.4 y Figura 4.6.5 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T₁-T₁', T₂-T₂' y T₃-T₃', respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja) y la intersección de este perfil con la longitudinal L (amarillo). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial. Discontinuidades en L y T₂ han sido interpoladas con *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

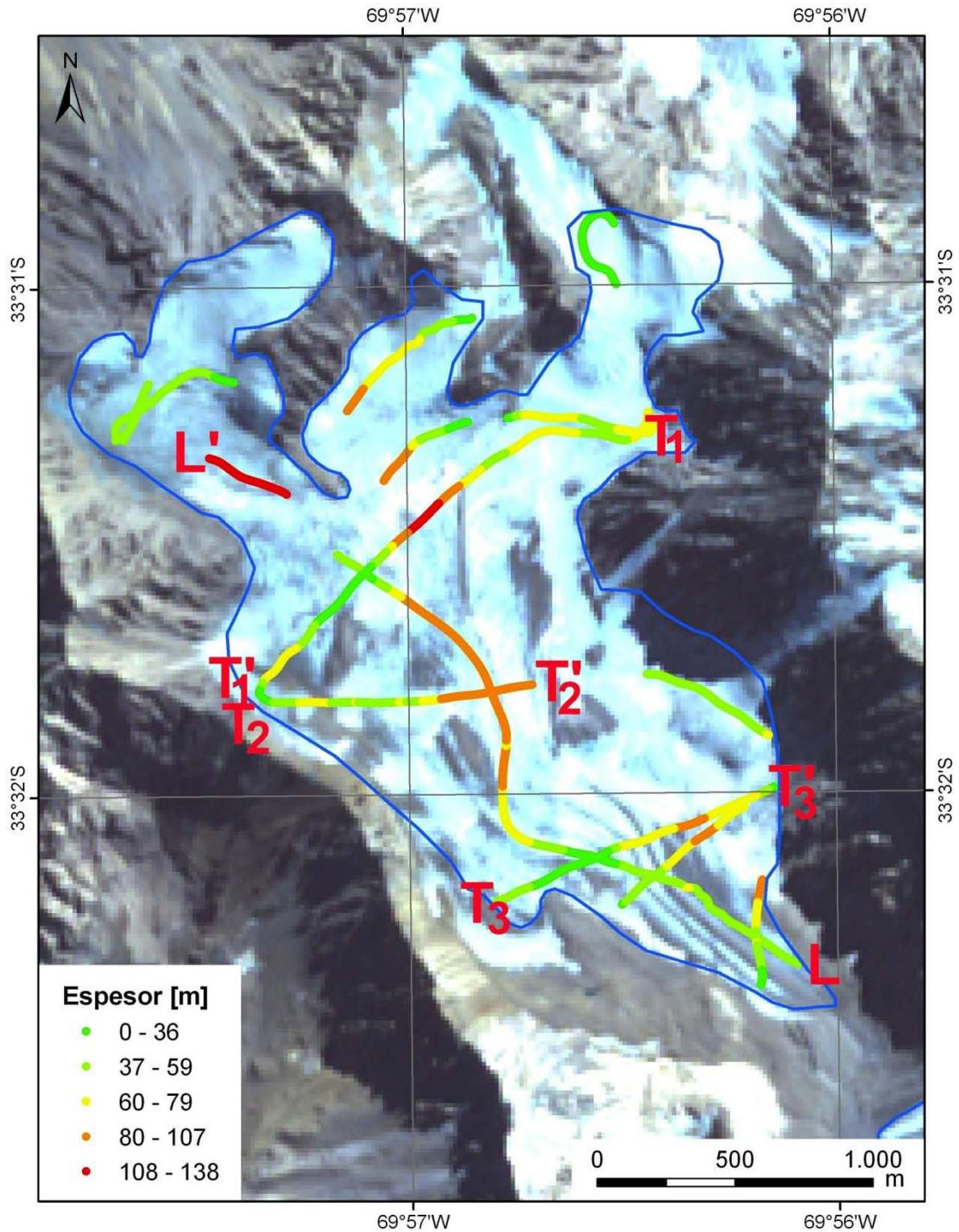


Figura 4.6.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_{i'}) con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Bello. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

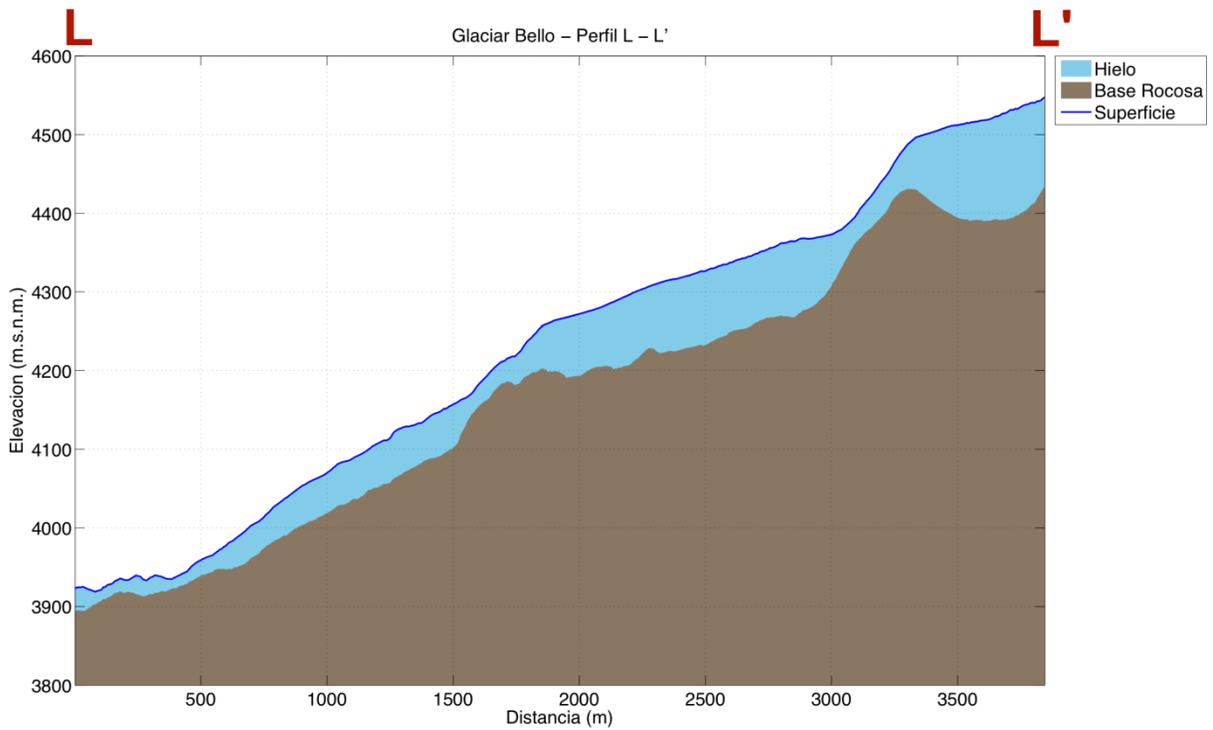
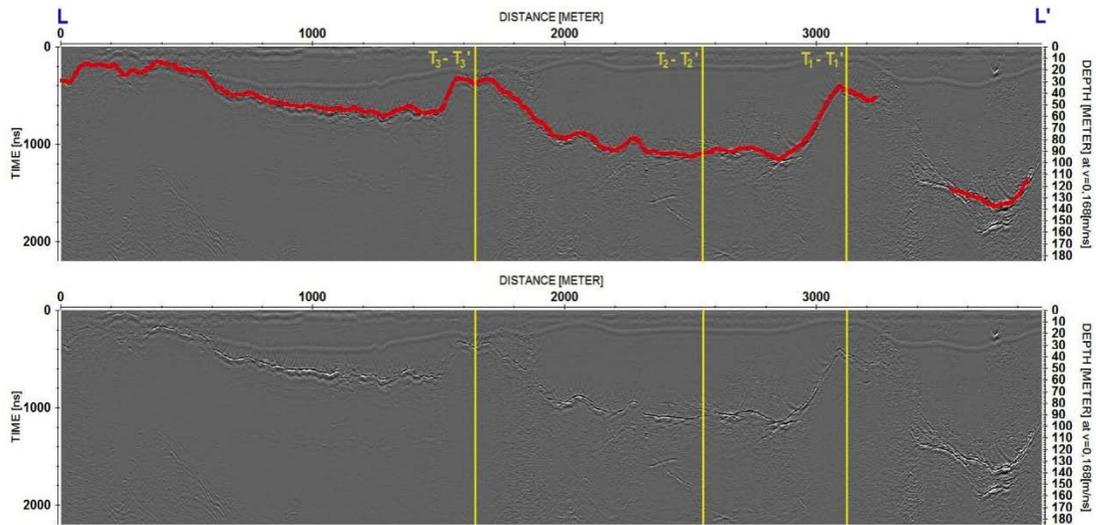


Figura 4.6.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

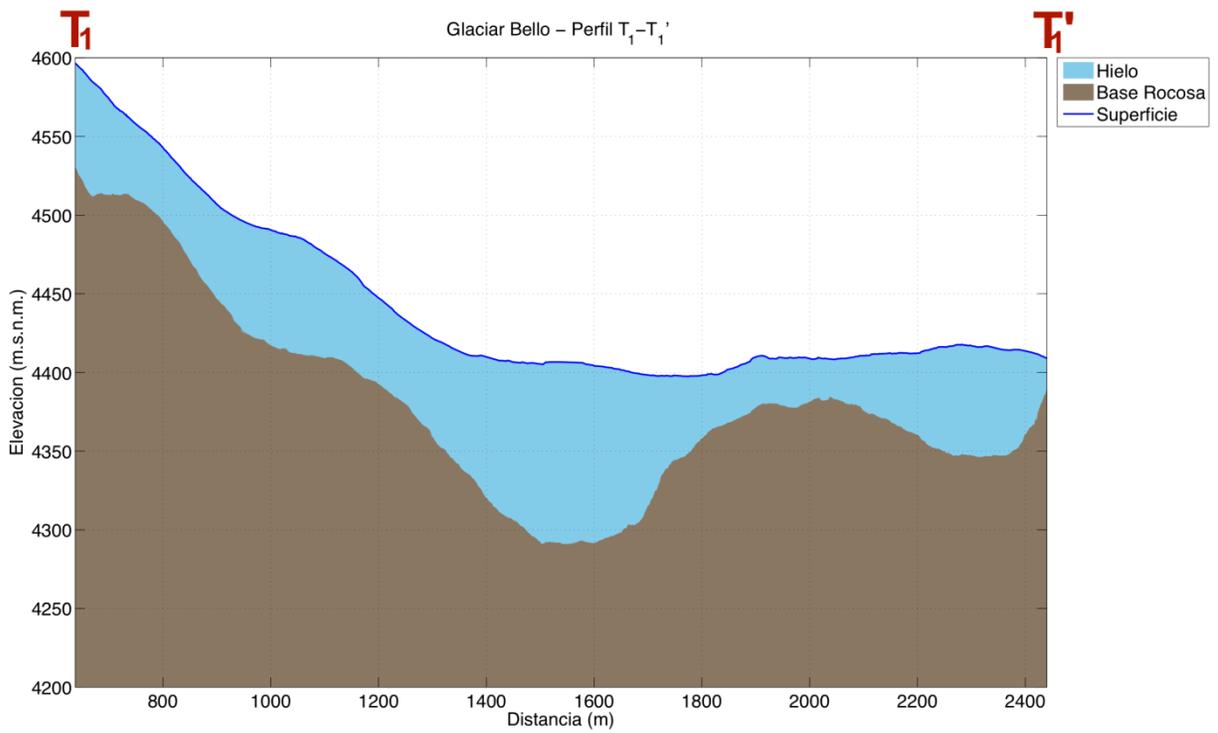
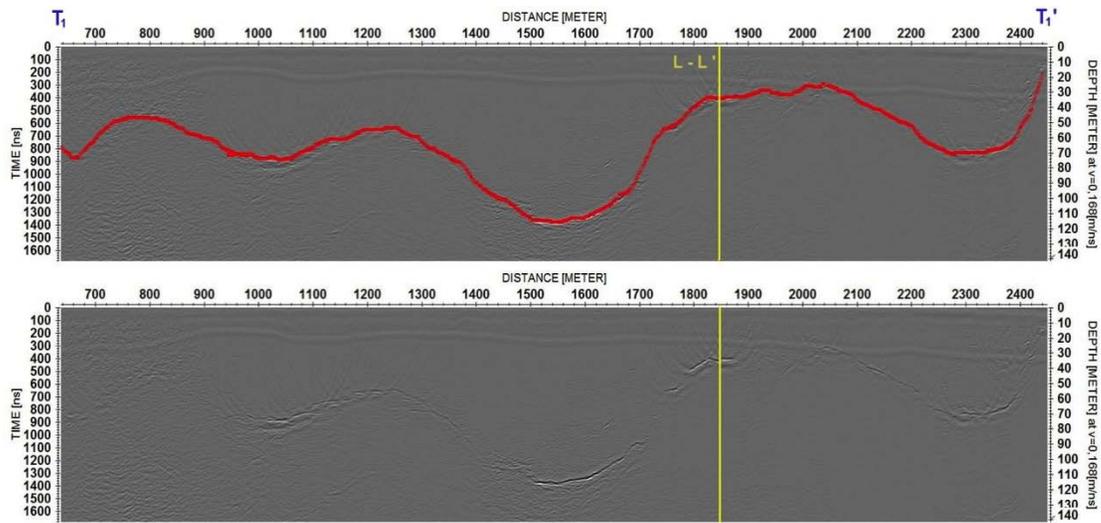


Figura 4.6.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

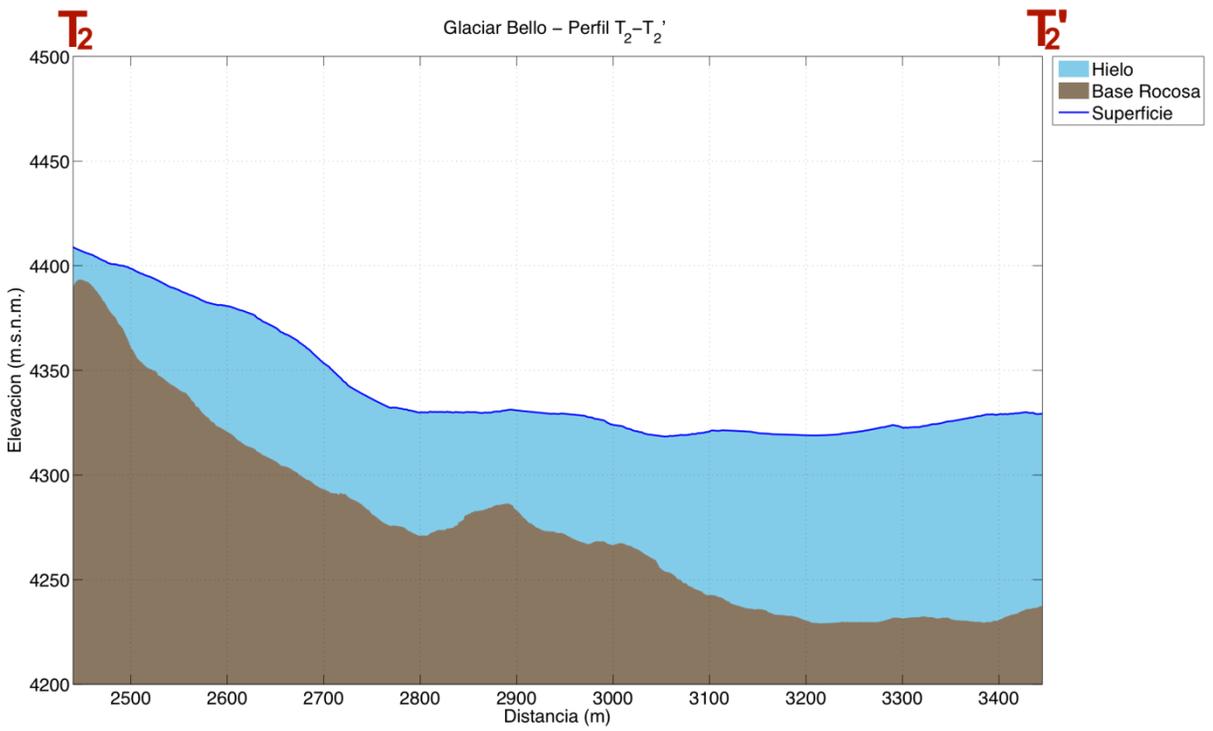
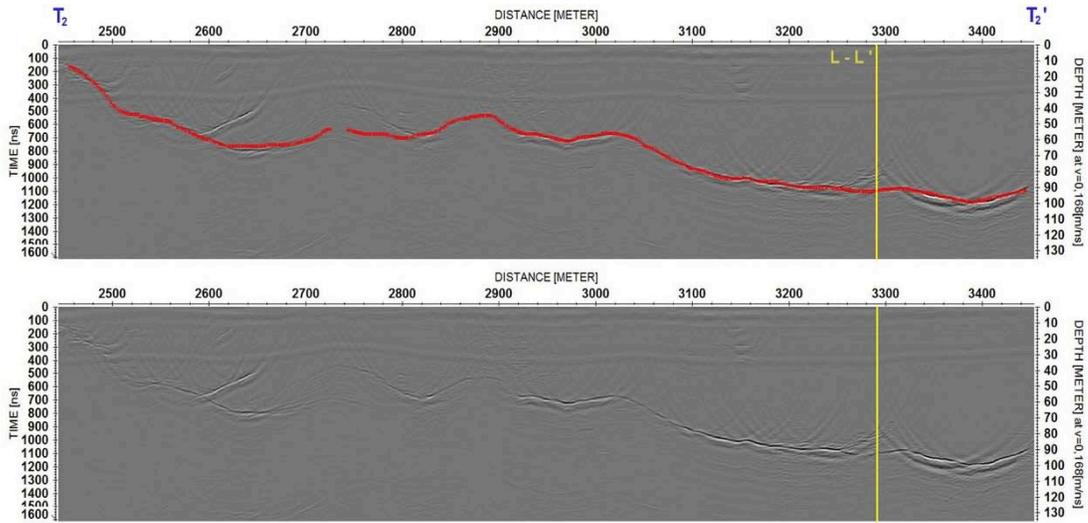


Figura 4.6.4 Perfil transversal T₂-T₂' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

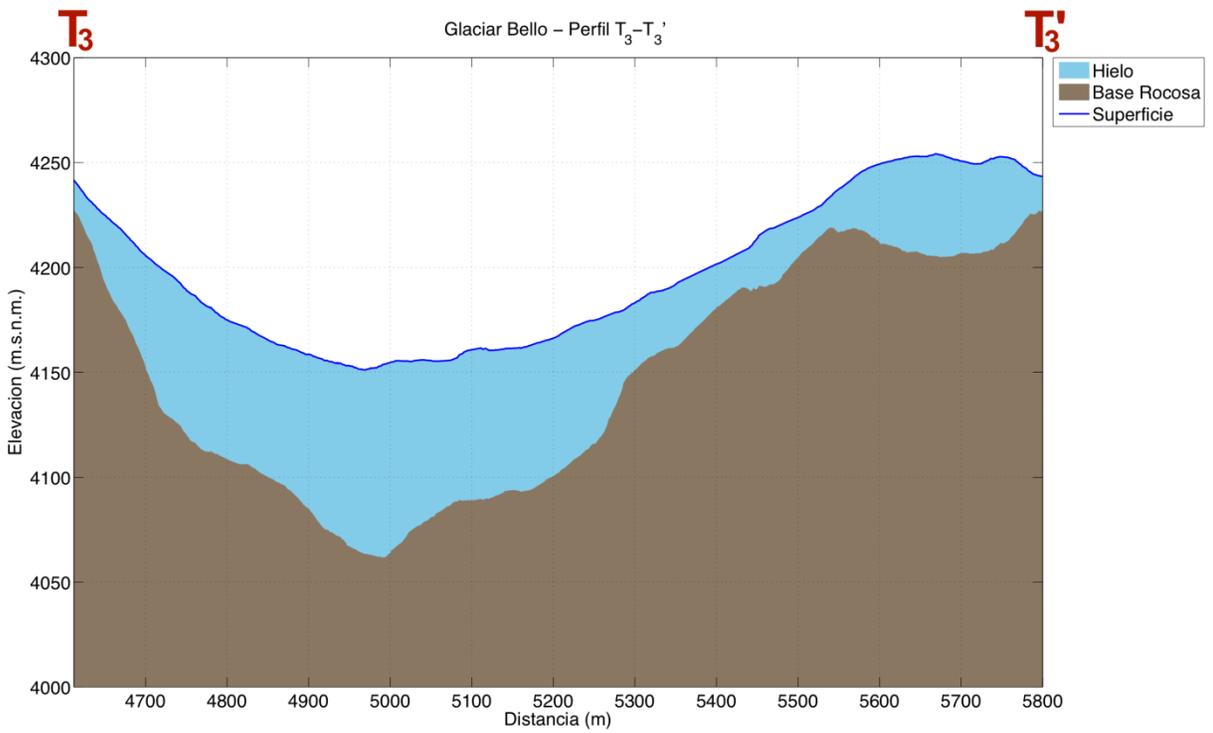
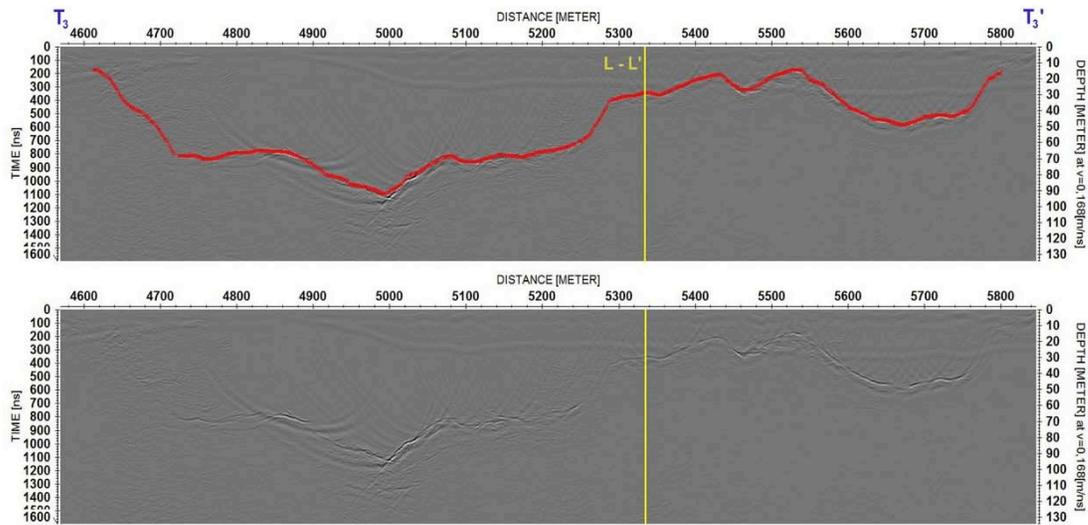


Figura 4.6.5 Perfil transversal T_3-T_3' en el glaciar Bello: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.6.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Bello. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 137,6 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo es la longitudinal, mientras que la mayor pendiente se registra en la transversal T₁. El espesor promedio del glaciar Bello medido en estos perfiles es de 61,4 [m] (DE = 28,4 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	3.844	12,4	137,6	63,0	32,5	3.919	4.548	9,5
T ₁ - T ₁ '	1.803	19,2	115,6	62,8	24,1	4.398	4.597	-9,9
T ₂ - T ₂ '	1.005	13,6	99,2	66,1	20,6	4.318	4.409	-8,4
T ₃ - T ₃ '	1.188	14,2	92,1	50,4	22,4	4.151	4.254	8,3

Tabla 4.6.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Bello. Espesor promedio: 61,4 [m] (DE = 28,4 [m]).

4.6.2 Volumen

La Figura 4.6.6 muestra la interpolación del espesor para el glaciar Bello utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.6.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Bello es de 0,124 [km³].

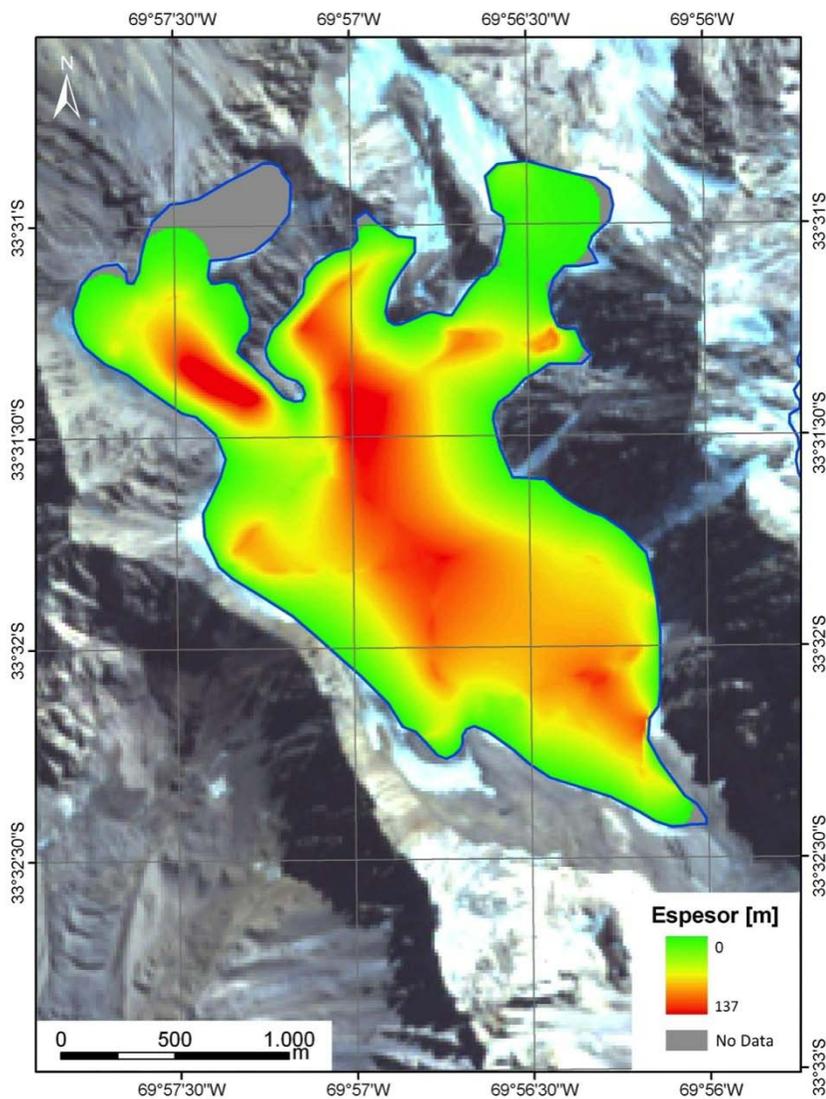


Figura 4.6.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Bello para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Bello	3,603	0,153	3,786	0,145	0,124

Tabla 4.6.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Bello.

4.7 Glaciar Yeso 2

En la Figura 4.7.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Yeso 2, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.7.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i', donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida es de 1.978 [m].

4.7.1 Perfiles

En la Figura 4.7.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' con la intersección en T₃. En este caso T₁ y T₂ no intersectan otros perfiles. En la Figura 4.7.3, Figura 4.7.4 y Figura 4.7.5 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T₁-T₁', T₂-T₂' y T₃-T₃', respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja), en el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

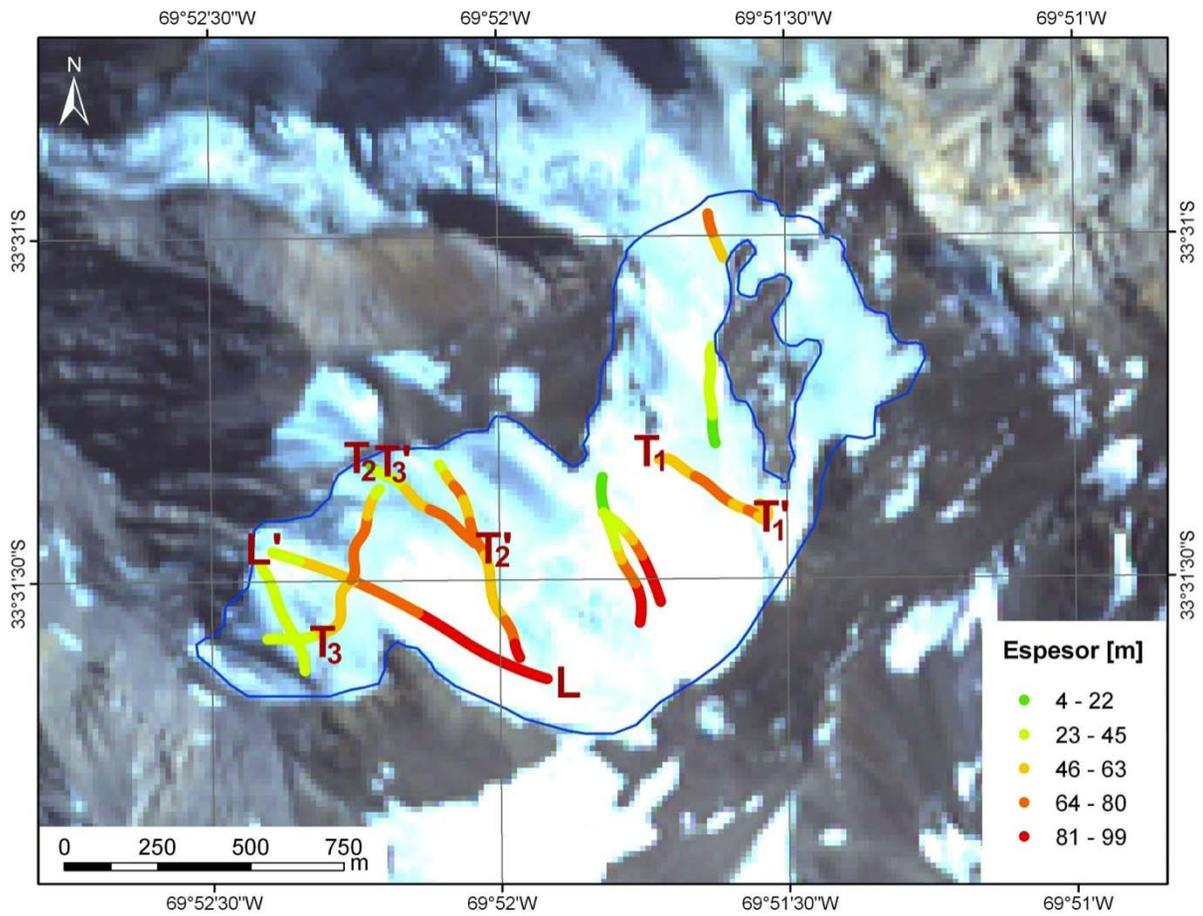


Figura 4.7.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Yeso 2. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

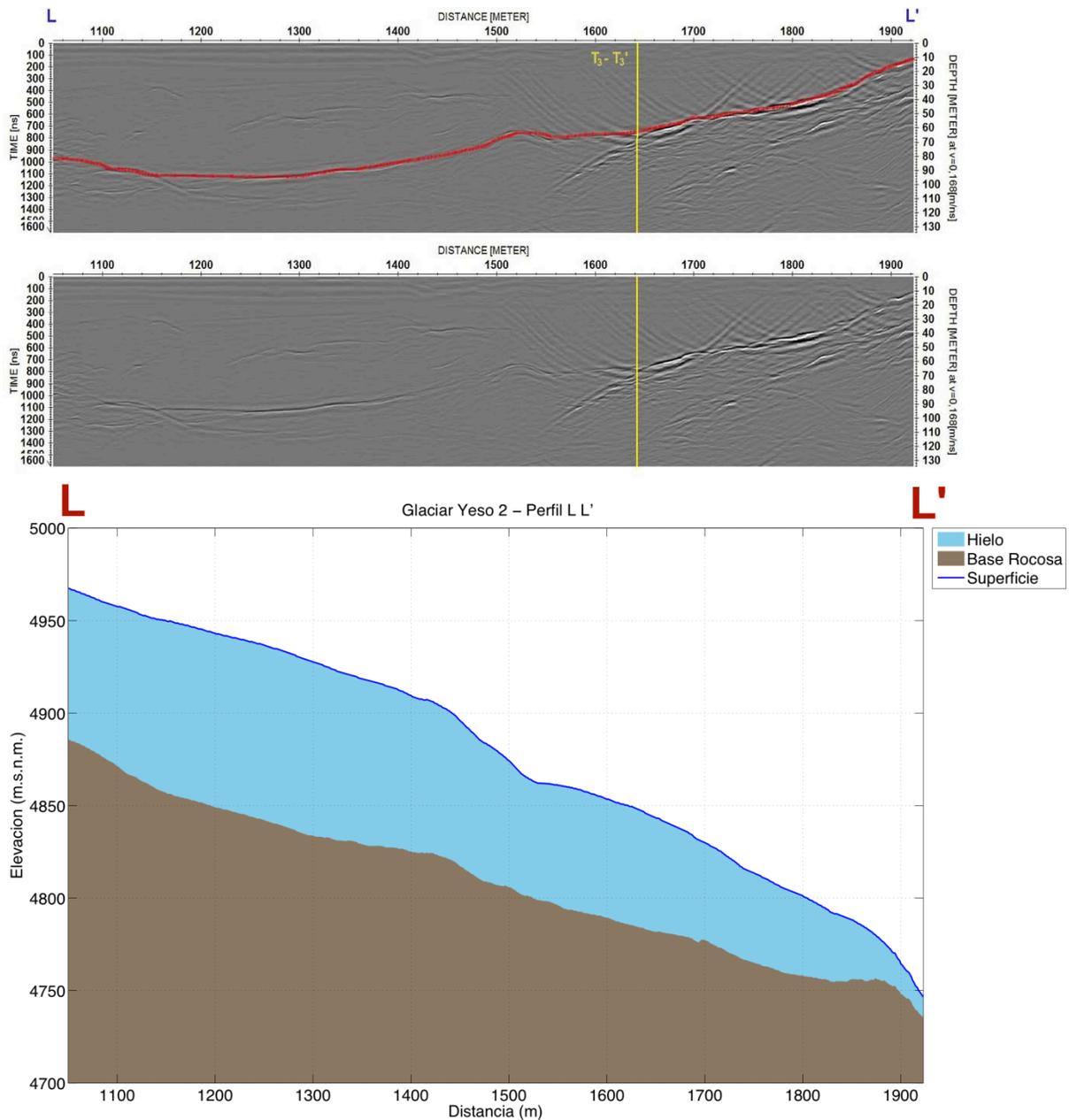


Figura 4.7.2 Perfil transversal L-L' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

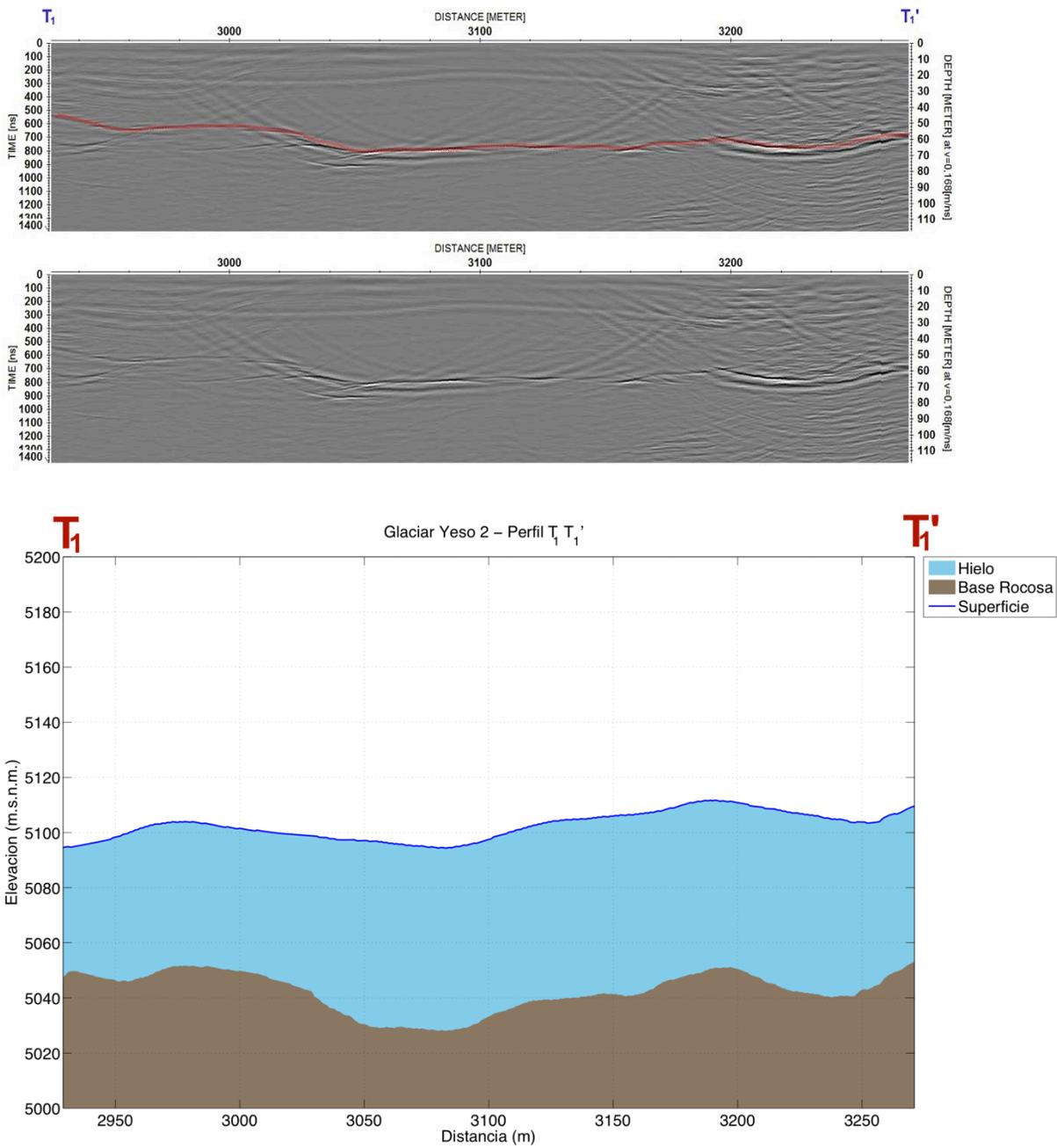


Figura 4.7.3 Perfil transversal T₁-T₁' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

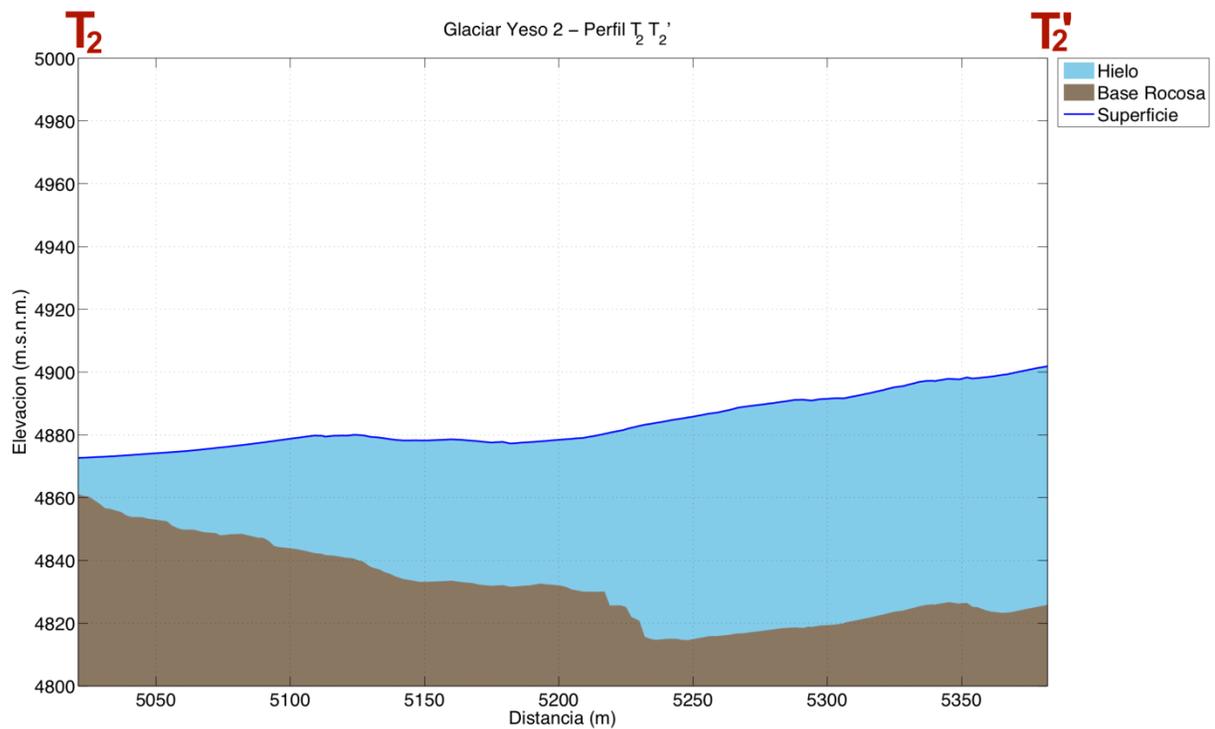
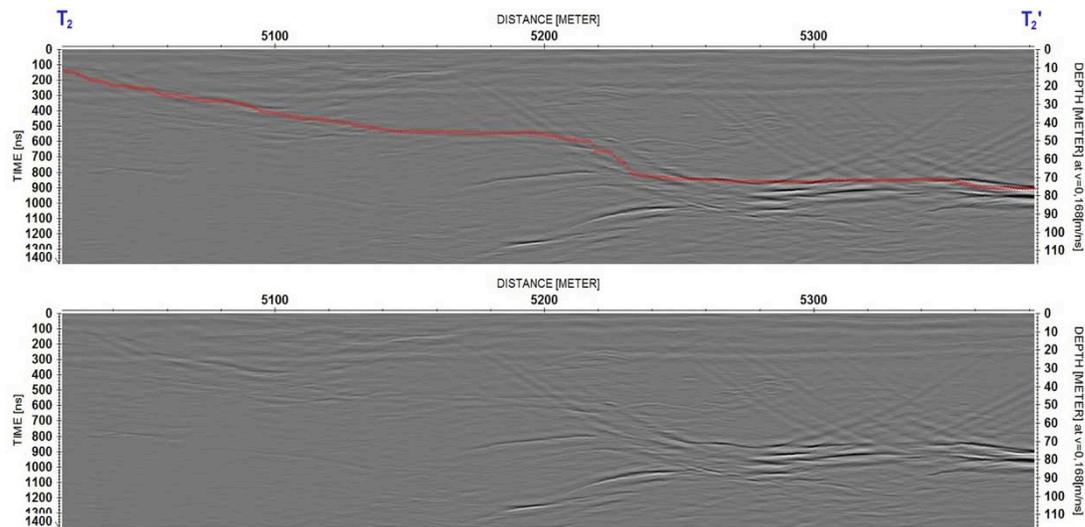


Figura 4.7.4 Perfil transversal T_2 - T_2' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

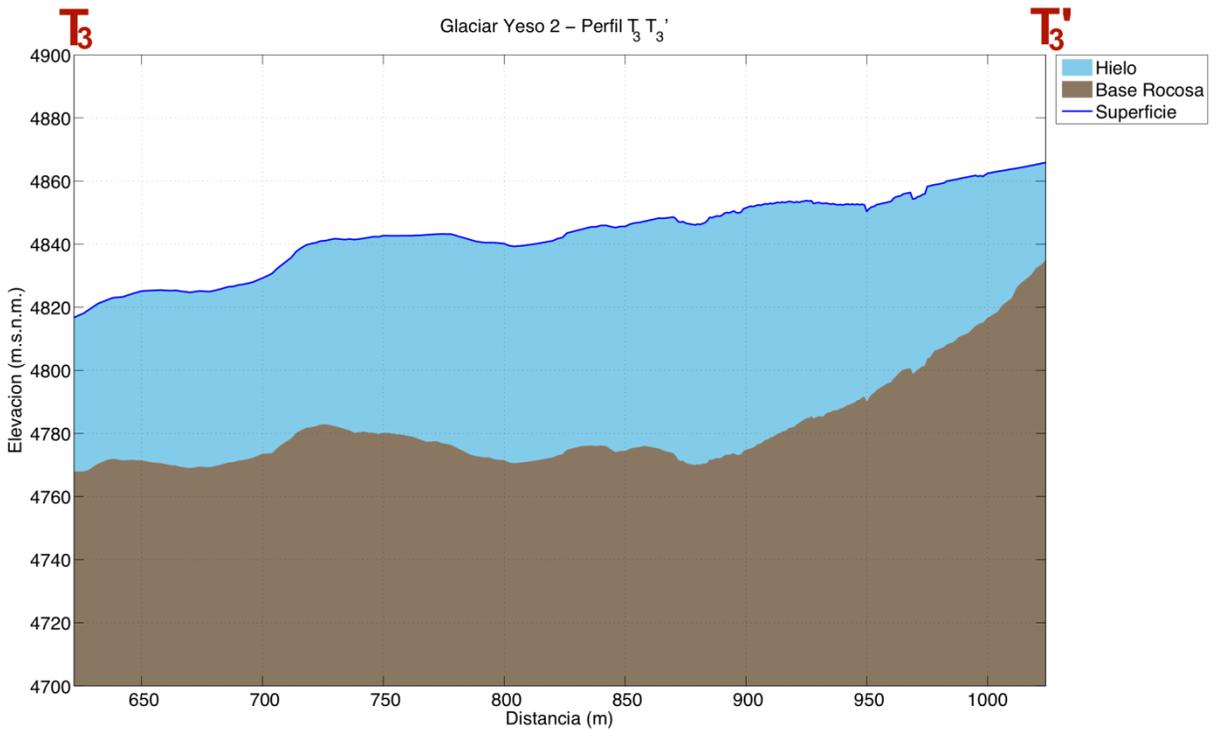
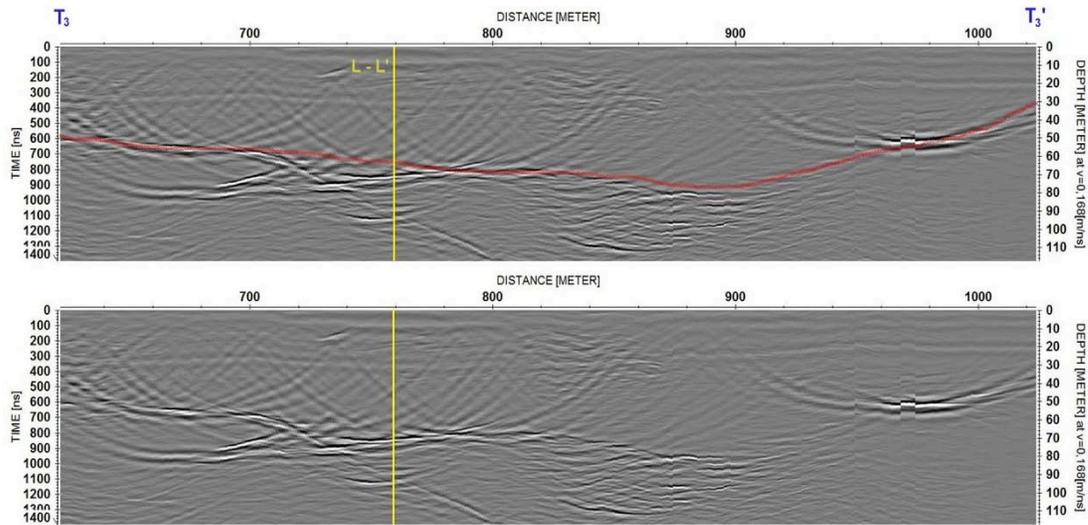


Figura 4.7.5 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar Yeso 2: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.7.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detalla: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Yeso 2. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinal y transversales es de 94,6 [m] y se encuentra en la longitudinal L. El perfil medido más largo y el que posee la mayor pendiente corresponde también a la longitudinal. El espesor promedio del glaciar Yeso 2, considerando los espesores medidos en estos perfiles, es de 62,8 [m] (DE = 19,2 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	873	11,2	94,6	69,1	22,8	4.747	4.967	-14,2
T ₁ - T ₁ '	342	45,0	67,5	60,1	5,9	5.094	5.112	9,2
T ₂ - T ₂ '	361	11,5	76,1	51,7	19,6	4.873	4.902	4,6
T ₃ - T ₃ '	402	30,9	76,7	61,4	10,0	4.817	4.866	7,0

Tabla 4.7.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Yeso 2. Espesor promedio: 62,8 [m] (DE = 19,2 [m]).

4.7.2 Volumen

La Figura 4.7.6 muestra la interpolación del espesor para el glaciar Yeso 2 utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.7.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Yeso 2 es 0,032 [km³].

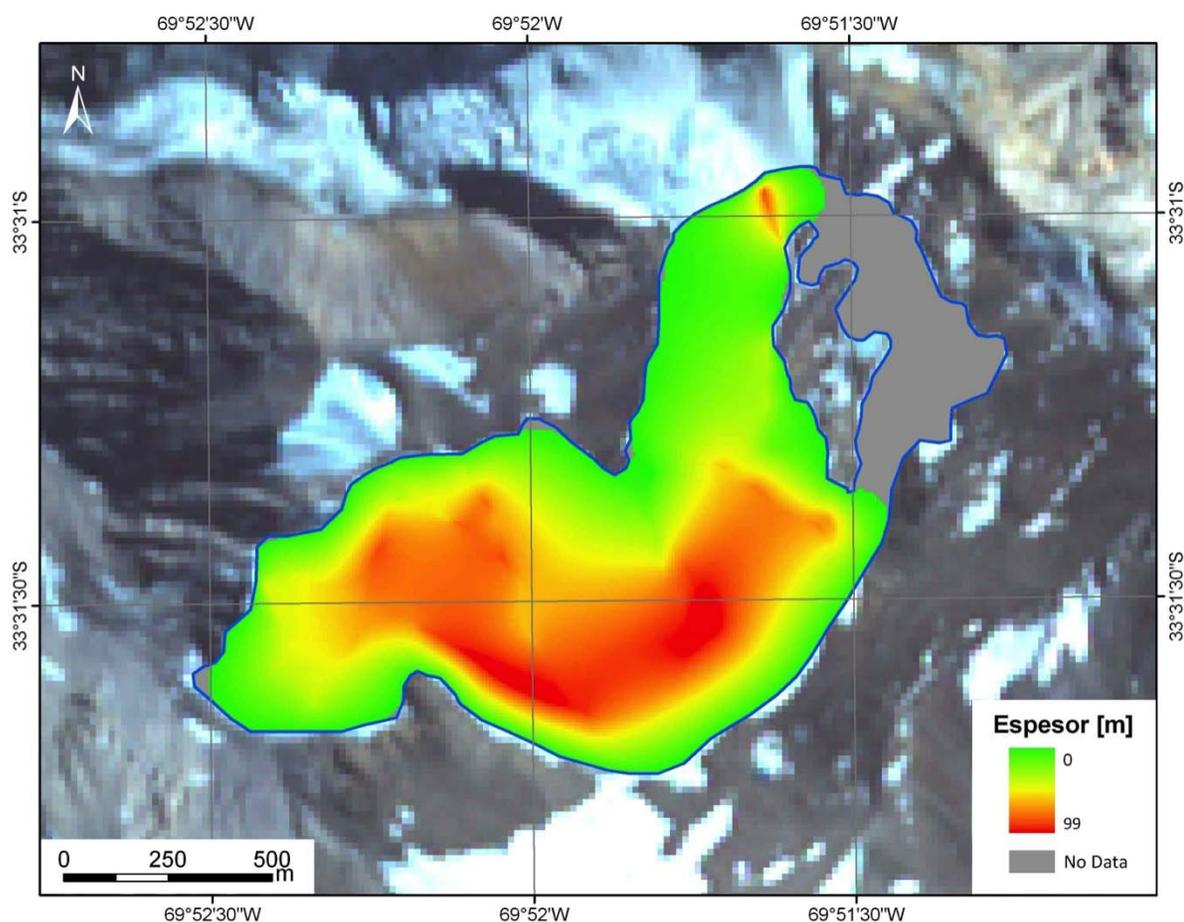


Figura 4.7.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Yeso 2 para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Yeso 2	1,136	0,038	1,312	0,037	0,032

Tabla 4.7.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Yeso 2.

4.8 Glaciar Echaurren

En la Figura 4.8.1 se observan todas las secciones de vuelo para las cuales se realizaron mediciones de radio eco sondaje en el glaciar Echaurren. Además se muestra la trayectoria y sentido de dos perfiles longitudinales (desde L_i a L_i' donde i va de 1 a 2) y dos perfiles transversales (desde T_i a T_i' donde i va de 1 a 2). Solamente se detectó espesor de hielo en el perfil L_1-L_1' , el cual está representado en la figura mediante una escala de colores, donde el color amarillo indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. Se detectó un mínimo de 11,8 [m] y un máximo de 22,2 [m] de espesor en este perfil. No fue posible detectar la interfaz hielo-roca en los perfiles L_2-L_2' (verde continua), T_1-T_1' (verde discontinua) y T_2-T_2' (verde punteada) debido a la presencia de agua a nivel supra e intraglacial, lo que aumentó la dispersión y atenuación de las ondas electromagnéticas emitidas por el radar e impidió la interpretación y detección de la interfaz hielo-roca. Este fenómeno se debe a que el glaciar Echaurren se encuentra a una menor altura (en promedio menor a los cuatro mil metros) con respecto al resto de los glaciares en estudio.

En consecuencia, debido a la poca representatividad espacial del perfil L_1-L_1' los resultados obtenidos son insuficientes para estimar el volumen de hielo. La distancia recorrida en los perfiles longitudinales y transversales es de 2.364 [m].

4.8.1 Perfiles

En la Figura 4.8.2 se observa el radargrama y la topografía superficial y subglacial del perfil L_1-L_1' . En la imagen superior se aprecia la interpretación de fondo de hielo (línea roja). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior se ubica la topografía superficial y subglacial.

En la Figura 4.8.3 se observa el radargrama y la topografía superficial del perfil L_2-L_2' con la intersección en T_1 y T_2 (línea amarilla). En la Figura 4.8.4 y Figura 4.8.5 se observan los radargramas (imagen superior) y la topografía superficial (imagen inferior) de los perfiles T_1-T_1' y T_2-T_2' , respectivamente, donde una línea amarilla representa el cruce del perfil con la longitudinal L_2-L_2' . En estas figuras no aparece la topografía subglacial debido a que no fue posible detectar el fondo rocoso en los perfiles L_2 , T_1 y T_2 .

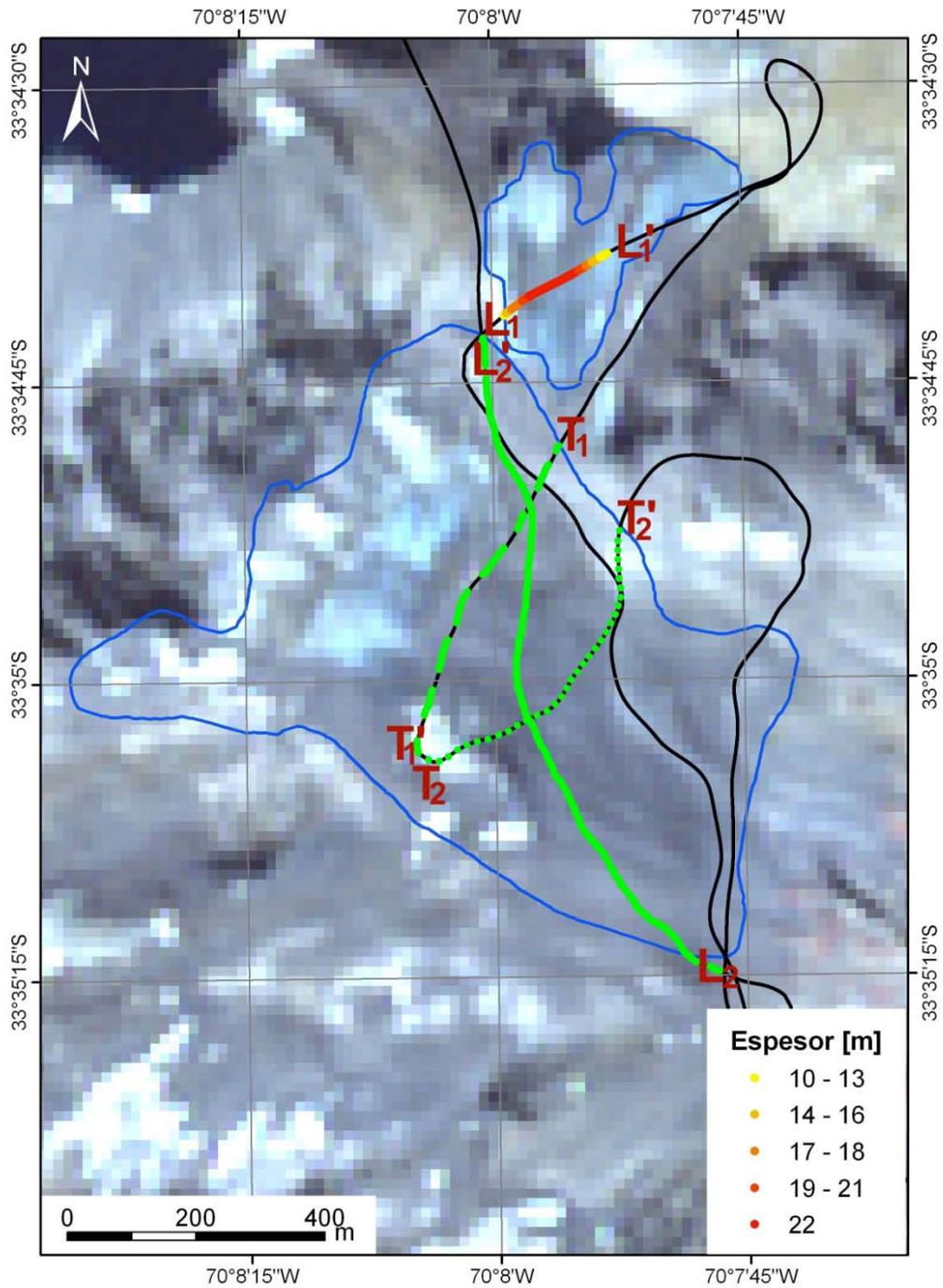


Figura 4.8.1 Perfiles longitudinales (L_i - L_i') y transversales (T_i - T_i') medidos en el glaciar Echaurren. Perfil L1 posee datos de espesor de hielo (en escala de colores). Perfiles L2 (verde continua), T1 (verde discontinua) y T2 (verde punteada) tienen mediciones de RES, pero sin detección de fondo. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

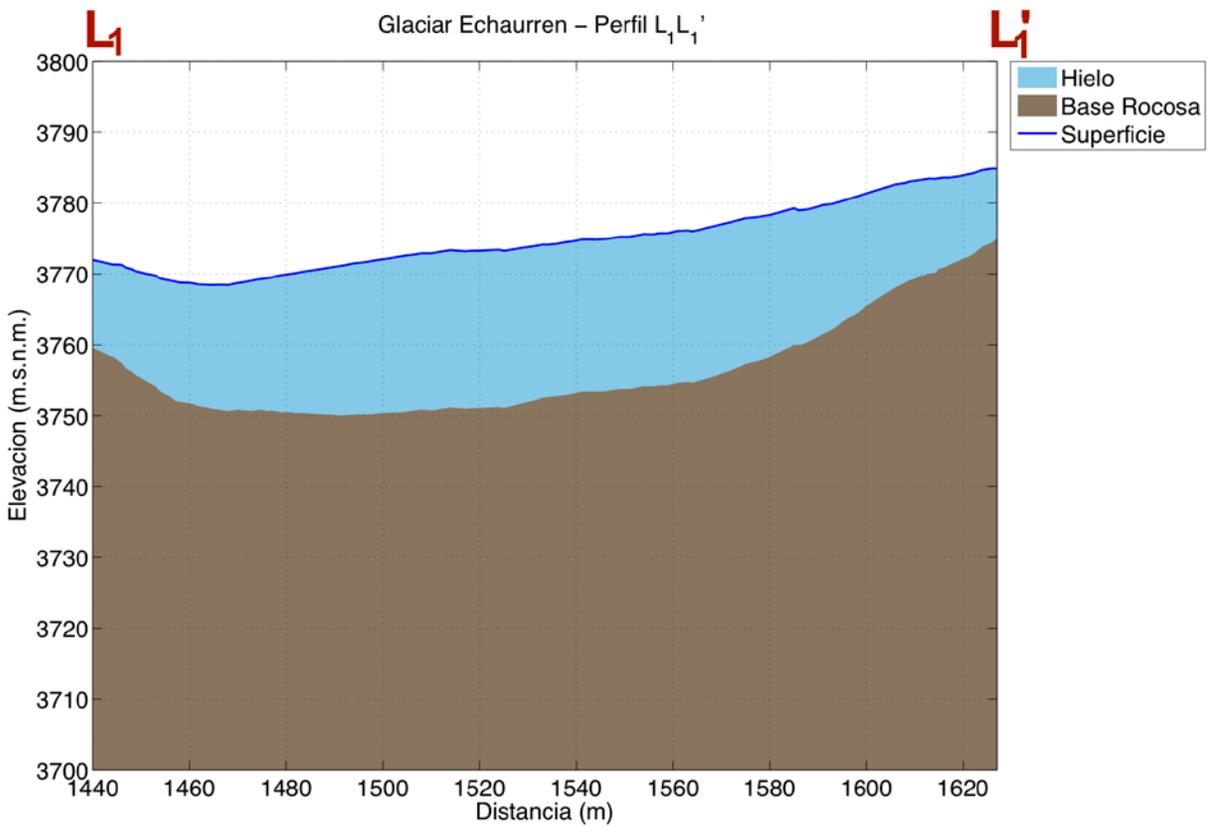
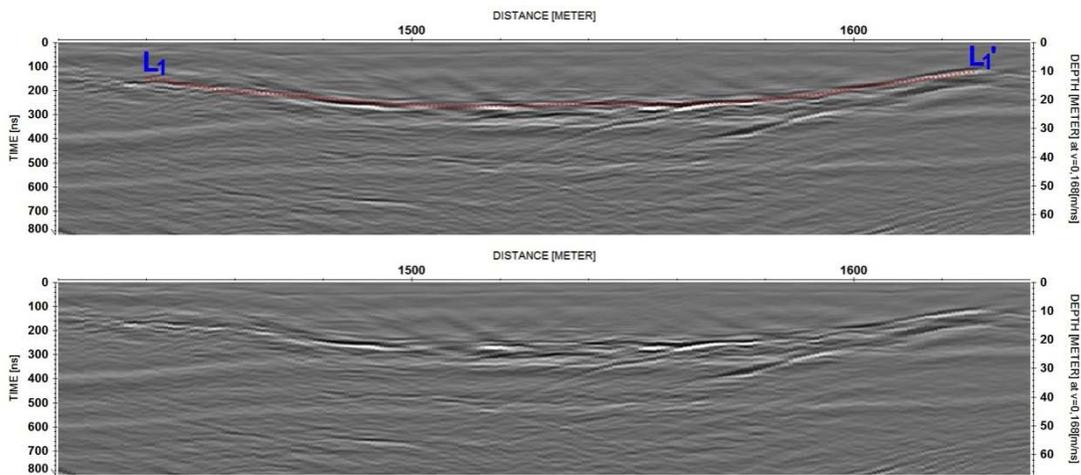


Figura 4.8.2 Perfil longitudinal L_1-L_1' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

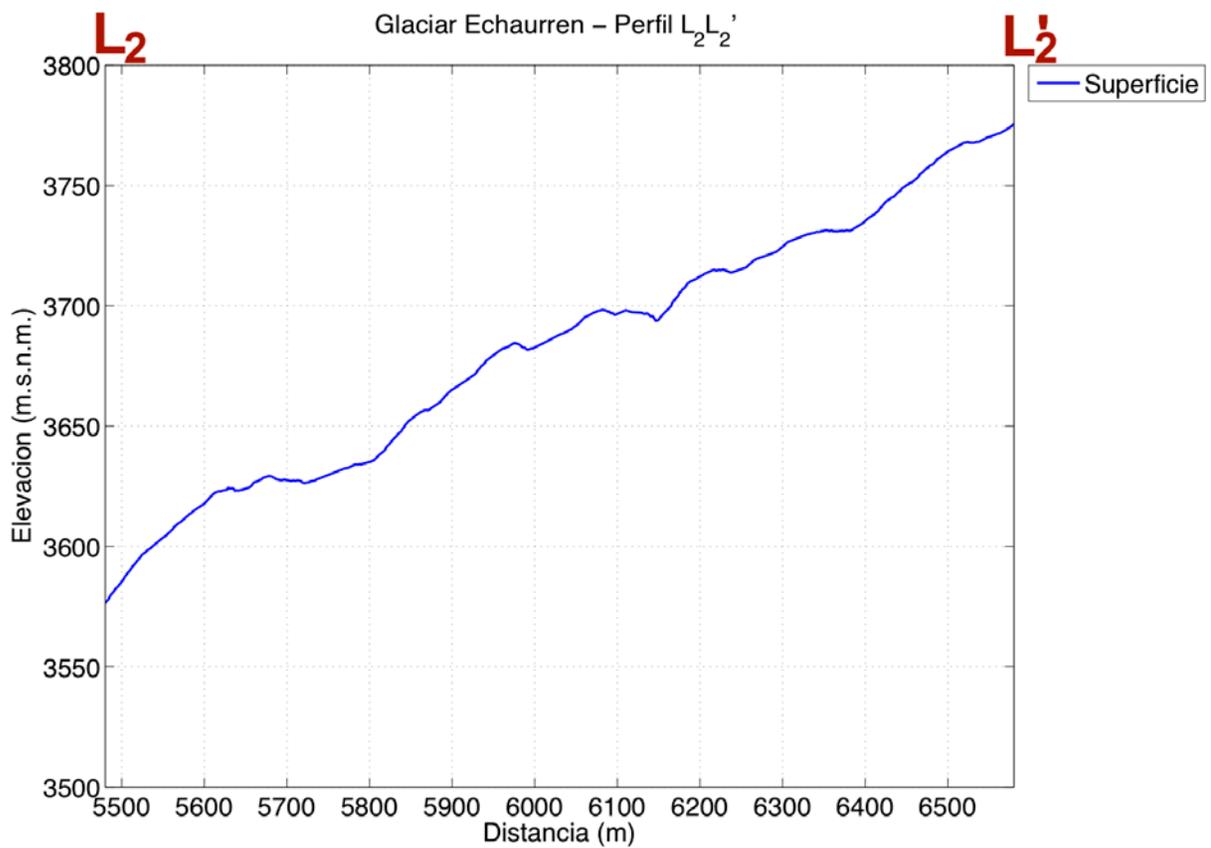
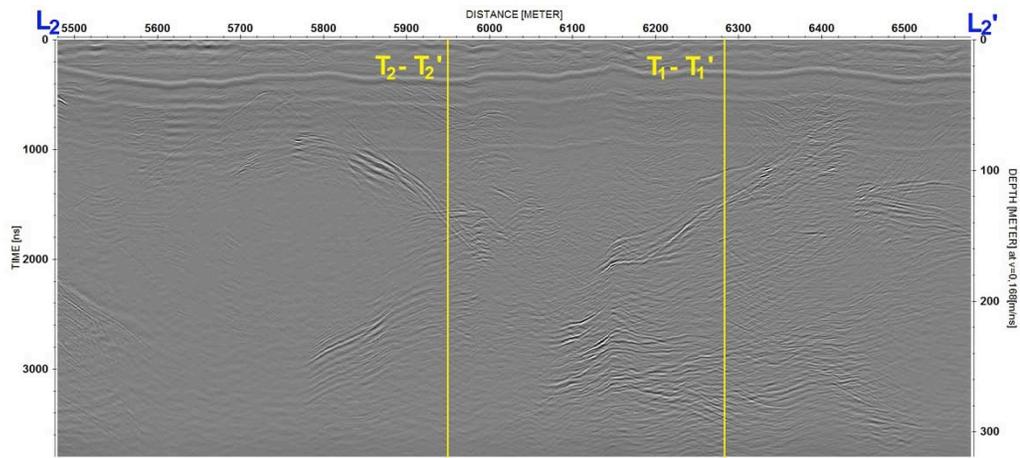


Figura 4.8.3 Perfil longitudinal L_2-L_2' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.

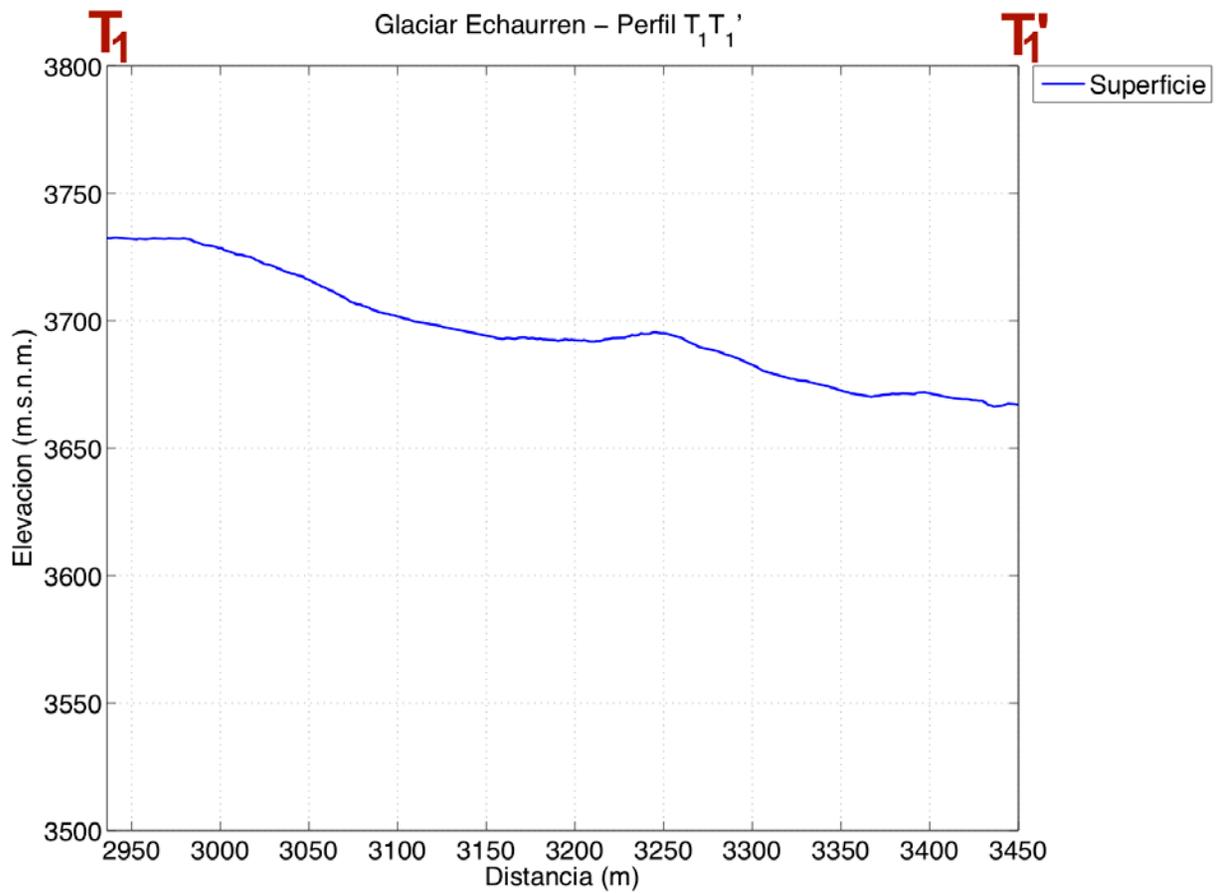
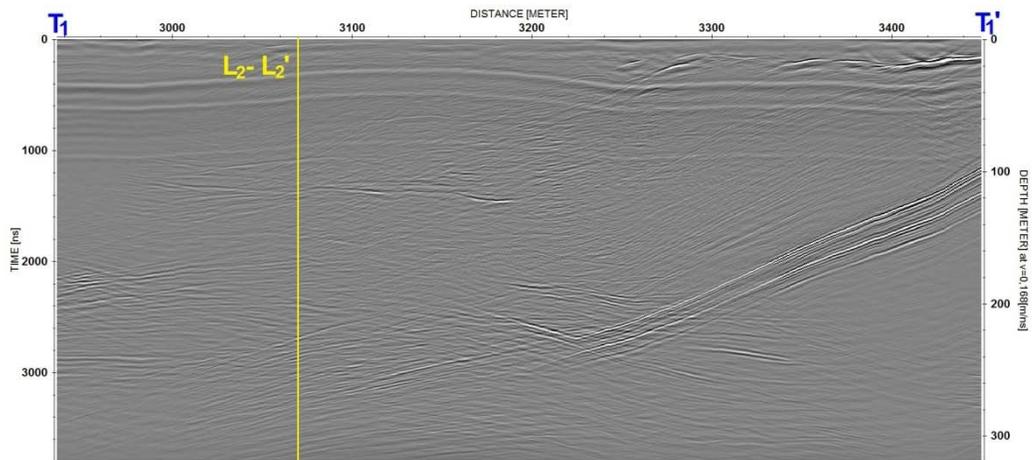


Figura 4.8.4 Perfil longitudinal T₁-T₁['] en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.

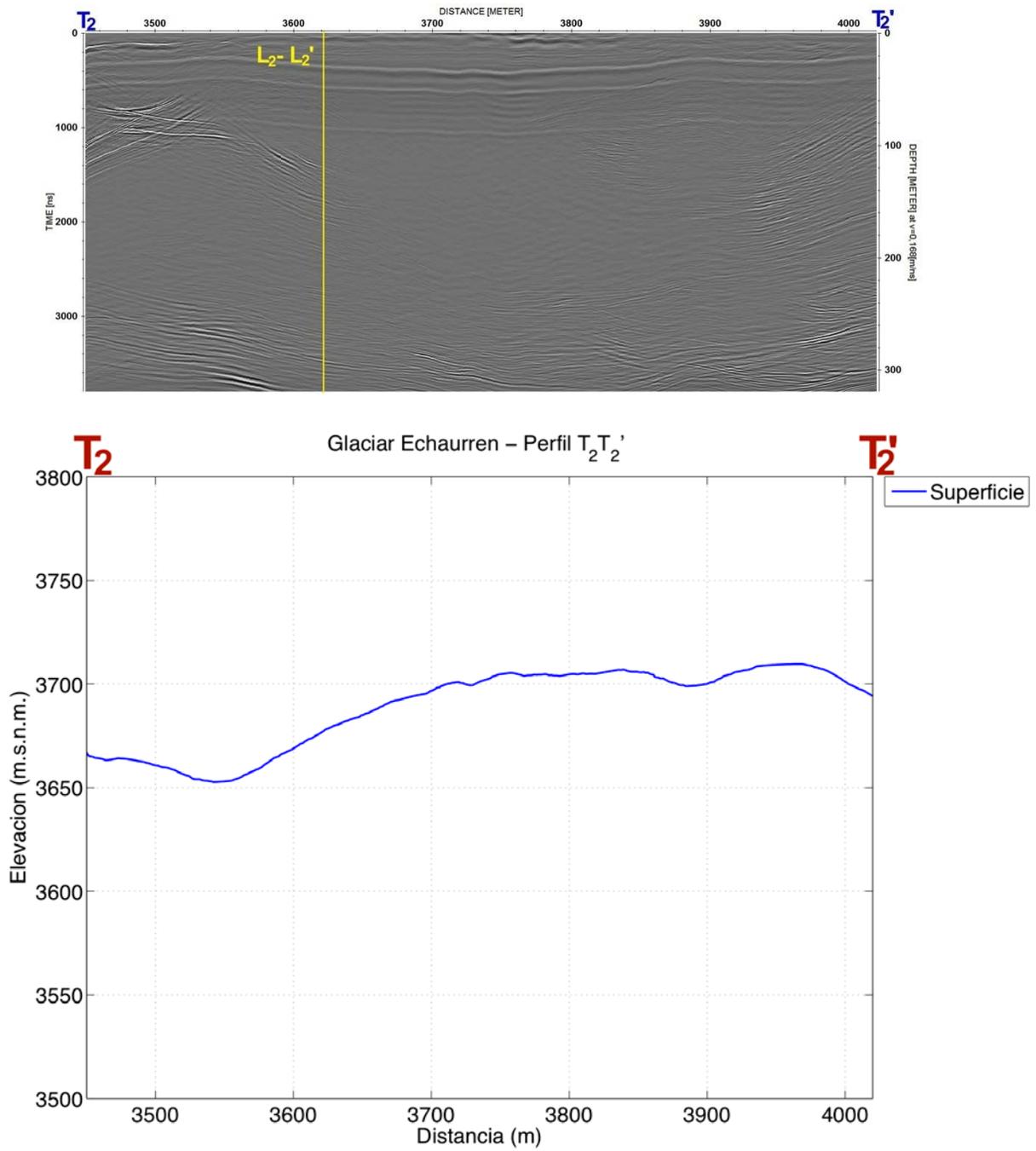


Figura 4.8.5 Perfil longitudinal T₂-T₂' en el glaciar Echaurren: radargrama migrado (imagen superior) y representación de la topografía superficial (gráfico inferior). No se dibujó la topografía subglacial porque no fue posible detectar espesor de hielo.

La Tabla 4.8.1 resume la medición con los siguientes datos: la longitud, el espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, la elevación mínima y máxima, y la pendiente topográfica de los perfiles longitudinales y transversales del glaciar Echaurren. Las celdas de la Tabla 4.8.1 con “s/d” indican que sí se hizo la medición pero no fue posible se obtener dato de espesor de hielo. El espesor máximo encontrado en el perfil L₁ es de 22,2 [m], mientras que el promedio es de 19,1 [m] (DE = 3,1 [m]). Sin embargo, se debe destacar que este valor no es representativo del glaciar.

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L ₁ -L ₁ '	180	11,8	22,2	19,1	3,1	3.768	3.784	5,7
L ₂ -L ₂ '	1.100	s/d	s/d	s/d	s/d	3.576	3.776	10,3
T ₁ -T ₁ '	514	s/d	s/d	s/d	s/d	3.666	3.733	-7,6
T ₂ -T ₂ '	570	s/d	s/d	s/d	s/d	3.653	3.710	7,6

Tabla 4.8.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. Máx), y pendiente estimada en el glaciar Echaurren. “s/d”: Perfiles medidos sin detección de fondo. Espesor promedio: 19,1 [m] (DE = 3,1 [m]).

4.8.2 Volumen

Debido a la falta de información de espesor de hielo en el glaciar Echaurren, no fue posible realizar una estimación del volumen de hielo para este glaciar.

4.8.3 Comparación con mediciones 2009

Datos de espesor y topografía superficial obtenidos anteriormente con radar terrestre fueron usados para comparar con los datos obtenidos en el presente estudio. La Figura 4.8.6 muestra la topografía superficial (línea negra continua) y subglacial (línea discontinua) estimada por la Dirección General de Aguas (DGA, 2009) con radar terrestre, en tres perfiles del glaciar Echaurren, definidos como AA', BB' y CC'. Los segmentos enumerados del I al IV (líneas verticales en color rojo) representan las intersecciones con líneas de vuelo realizadas en el presente estudio, las cuales se muestran en la Figura 4.8.7. El radar aerotransportado, ha permitido estimar la topografía superficial en las líneas de vuelo, y en particular, en los puntos de intersección I, II, III y IV.

La Tabla 4.8.2 resume los resultados para elevaciones obtenidas en los puntos I al IV en el año 2009 y 2012. El análisis arrojó variaciones en la elevación de la superficie entre 16 y 22 [m].

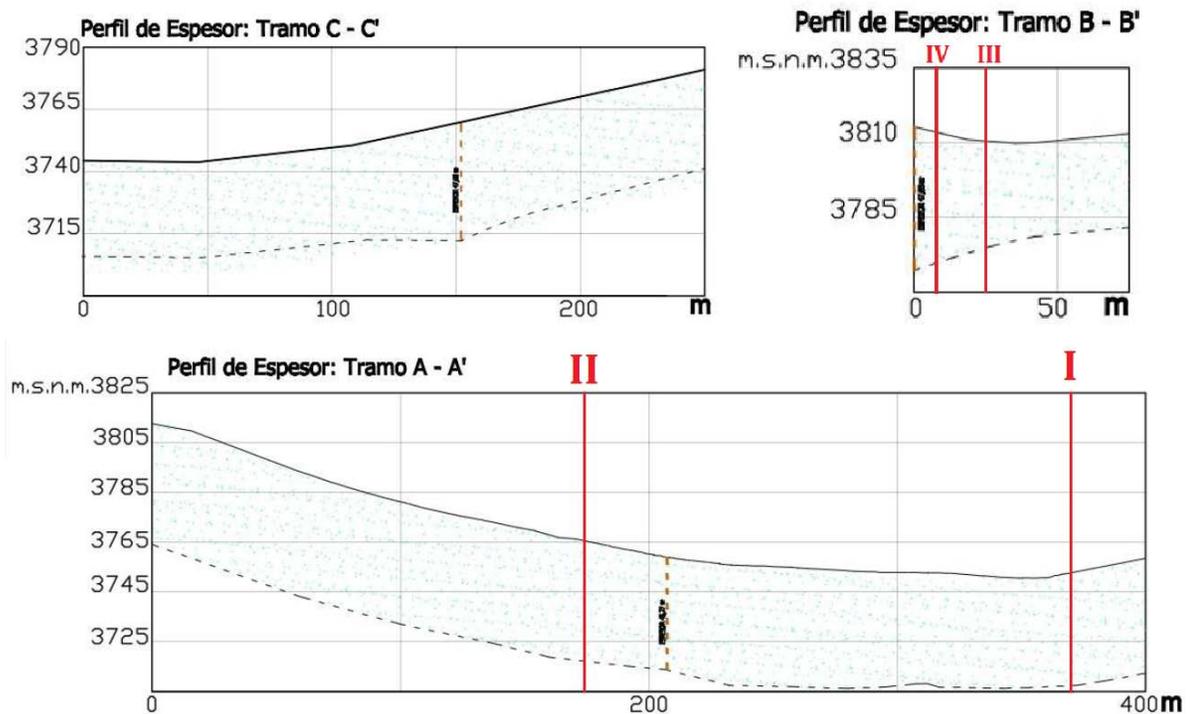


Figura 4.8.6 Topografía superficial y subglacial en perfiles A-A', C-C' y B-B' en glaciar Echaurren, año 2009 (DGA, 2009b), incluyendo cruces con datos de elevación del presente estudio (segmento rojo).

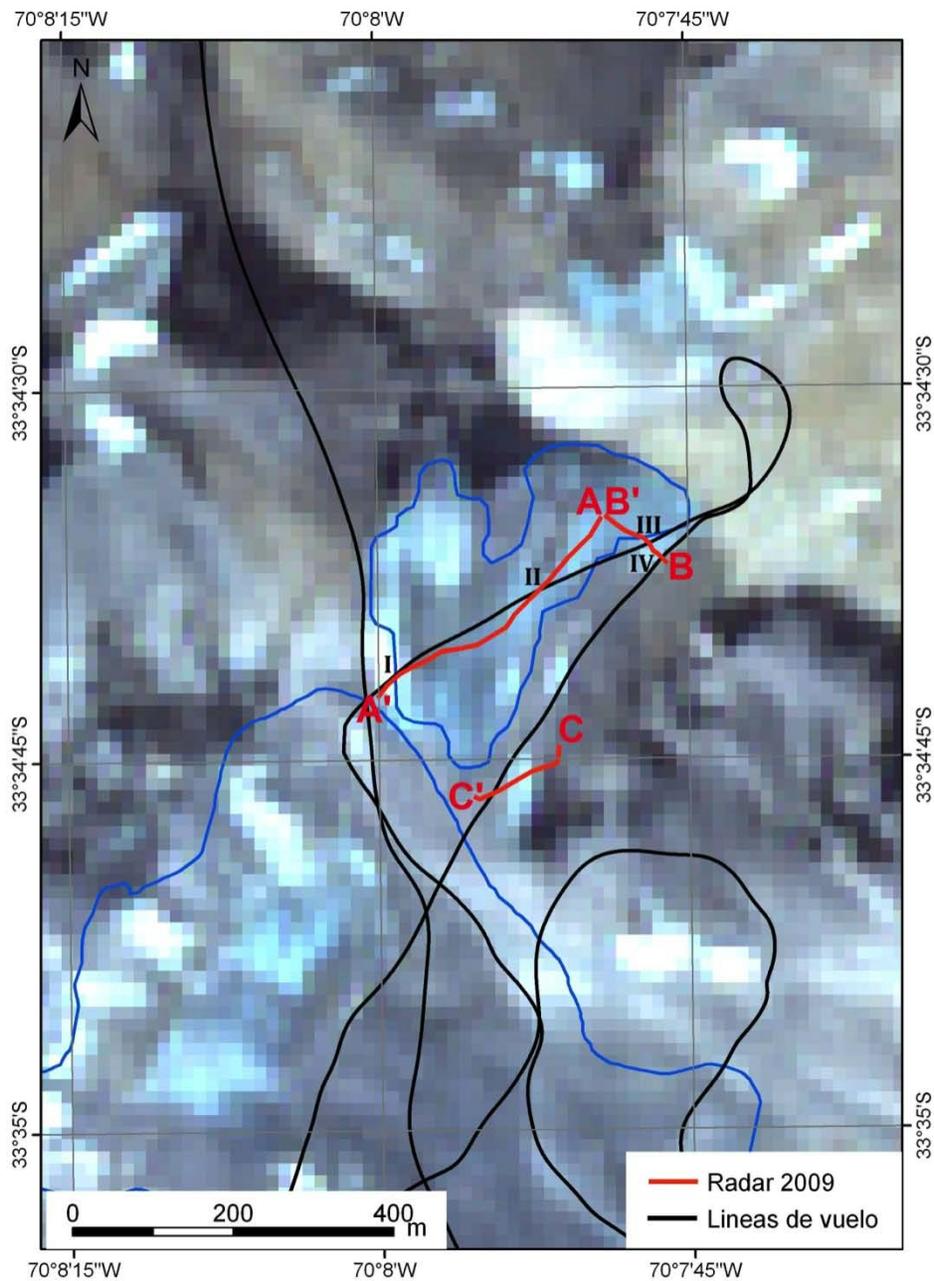


Figura 4.8.7 Perfiles con topografía superficial y subglacial en glaciar Echaurren en 2009 (línea roja; DGA, 2009b) y líneas de vuelo del presente estudio con información de elevación s.n.m. (línea negra) con intersecciones entre mediciones 2009 y 2012 (número romano color negro). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Intersección	Elevación 2009 (m.s.n.m)	Elevación 2012 (m.s.n.m)	Diferencia 2012-2009 [m]
I (en A-A' a 370 m)	3.753	3.769	16
II (en A-A' a 175 m)	3.765	3.785	20
III (en B-B' a 15 m)	3.811	3.830	19
IV (en B-B' a 8 m)	3.813	3.835	22

Tabla 4.8.2 Comparación de elevaciones en puntos de intersección I al IV entre 2009 (DGA, 2009b) y 2012 (presente estudio).

4.9 Glaciar Mesón Alto

En la Figura 4.9.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Mesón Alto, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinales y transversales. La Figura 4.9.1 muestra además la trayectoria y sentido de dos perfiles longitudinales (desde L_i a L_i' , donde i varía de 1 a 2) y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i' , donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida es de 3.679 [m].

4.9.1 Perfiles

En la Figura 4.9.2 y Figura 4.9.3 se observan los radargramas y las topografías subglaciales de los perfiles L_1-L_1' y L_2-L_2' , respectivamente, con las correspondientes intersecciones en las transversales (amarillo). En la Figura 4.9.4, Figura 4.9.5 y Figura 4.9.6 se presentan los radargramas y topografías subglaciales de los perfiles T_1-T_1' , T_2-T_2' y T_3-T_3' , respectivamente, con las correspondientes intersecciones en las longitudinales (amarillo). Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja), en el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

De los perfiles longitudinales y transversales seleccionados como representativos, la longitudinal L_1-L_1' interseca con T_2-T_2' , mientras que L_2-L_2' interseca con T_1-T_1' y T_2-T_2' y T_3-T_3' no interseca con otro perfil.

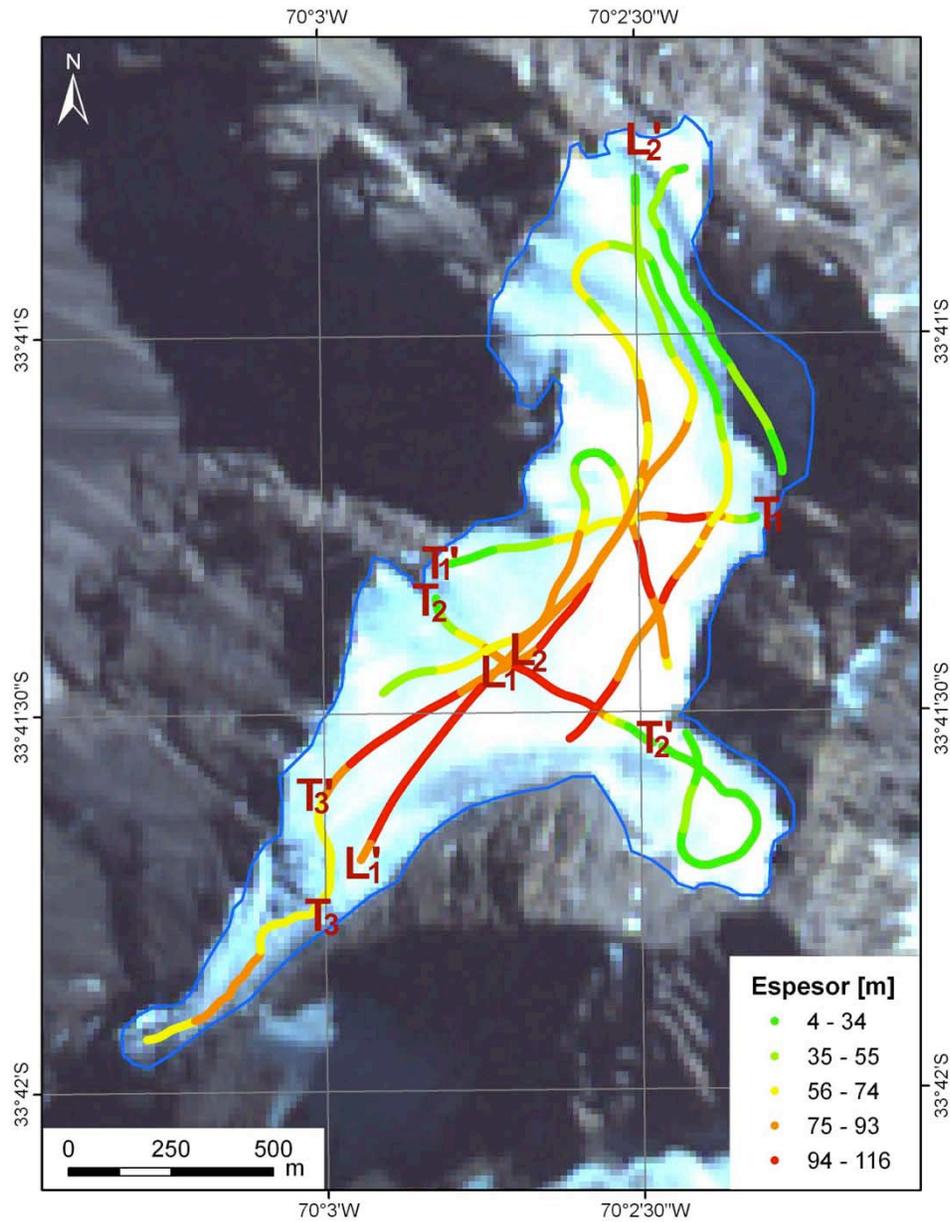


Figura 4.9.1 Perfiles longitudinal (L_1 - L_1') y transversales (T_1 - T_1') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Mesón Alto. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

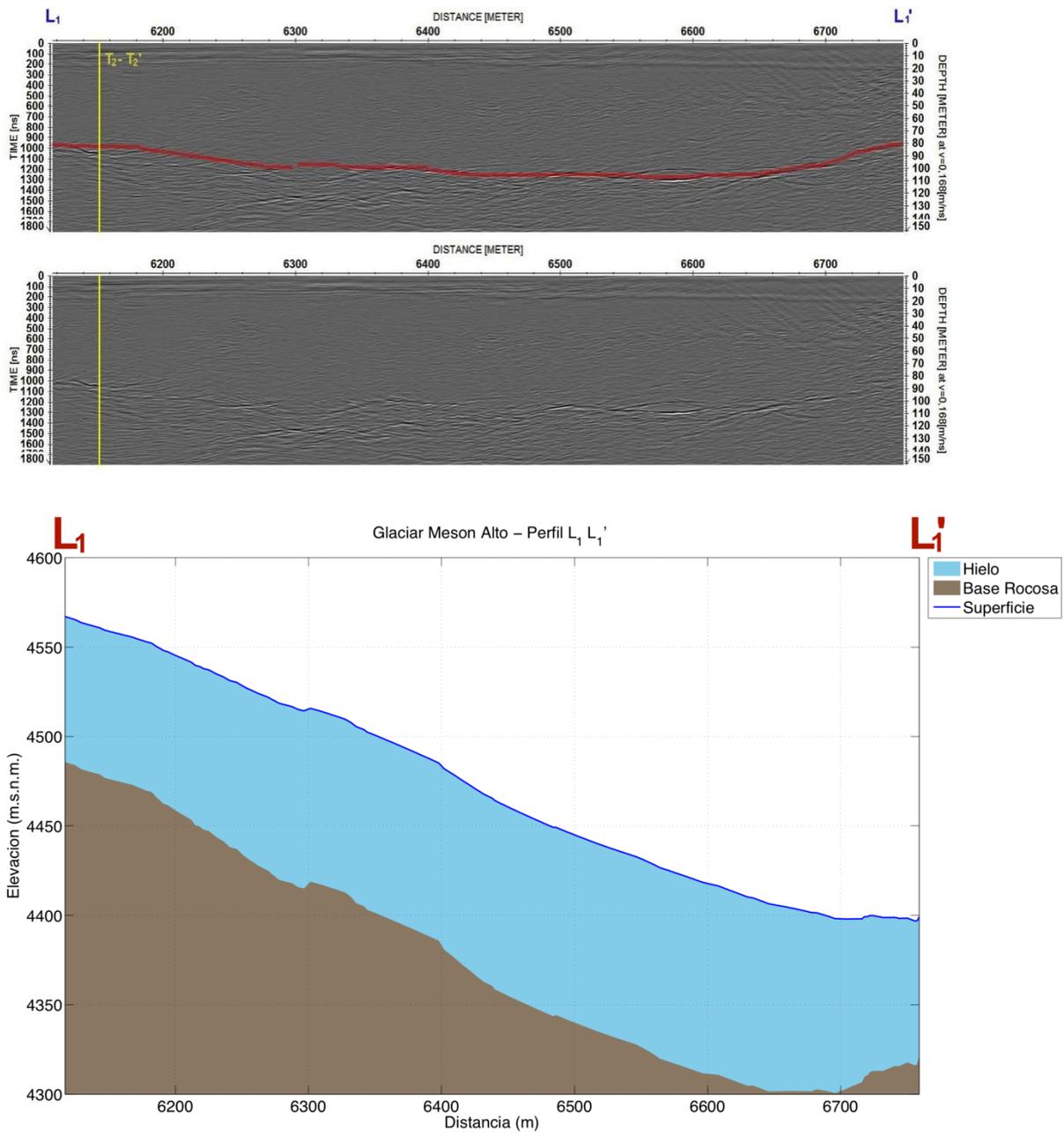


Figura 4.9.2 Perfil longitudinal L₁-L₁' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

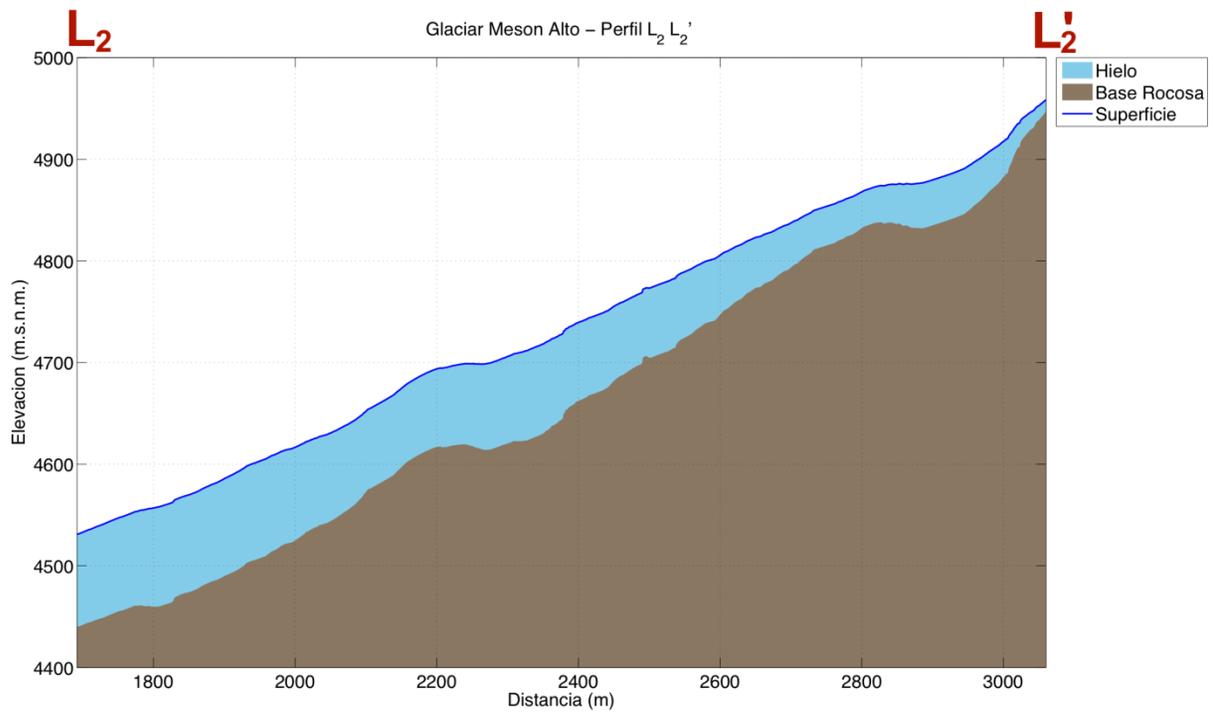
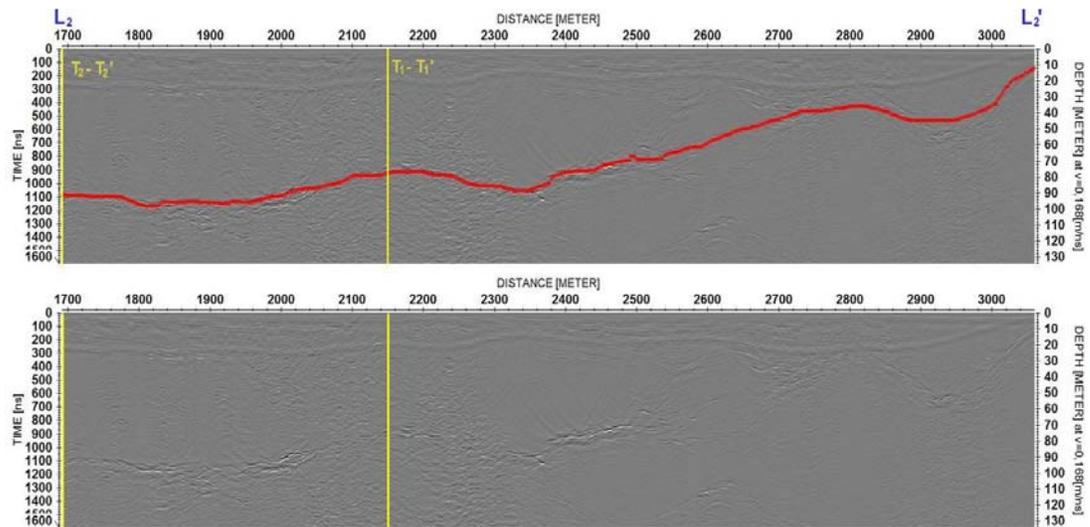


Figura 4.9.3 Perfil longitudinal L_2-L_2' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

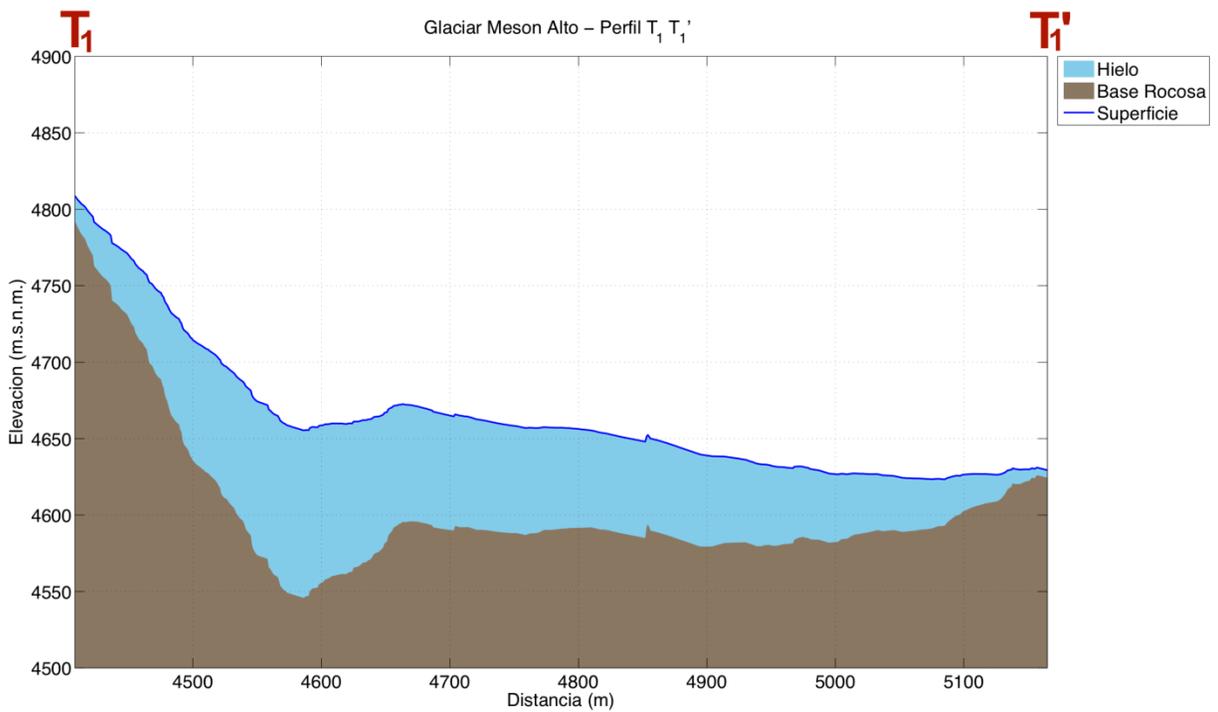
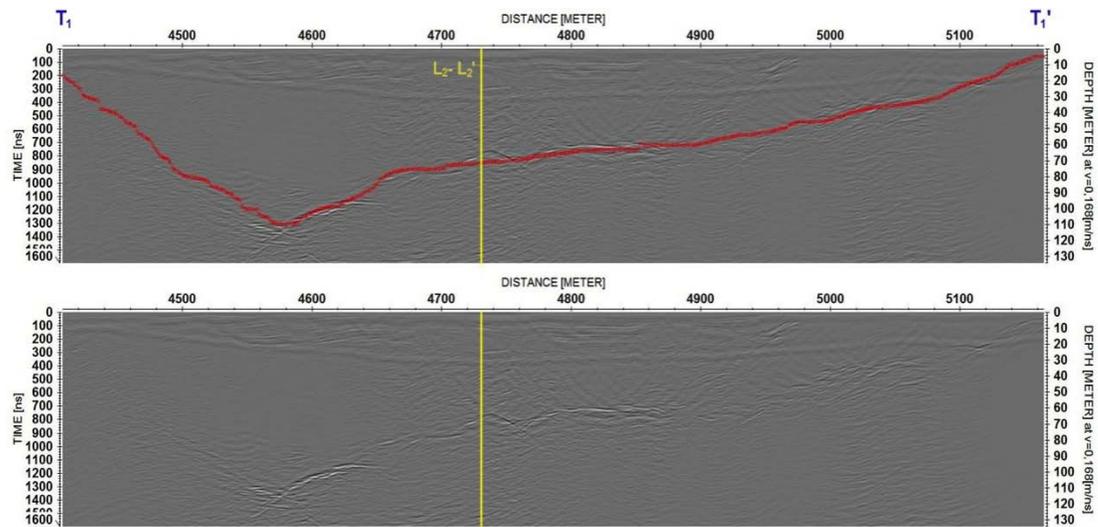


Figura 4.9.4 Perfil transversal T₁-T₁' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

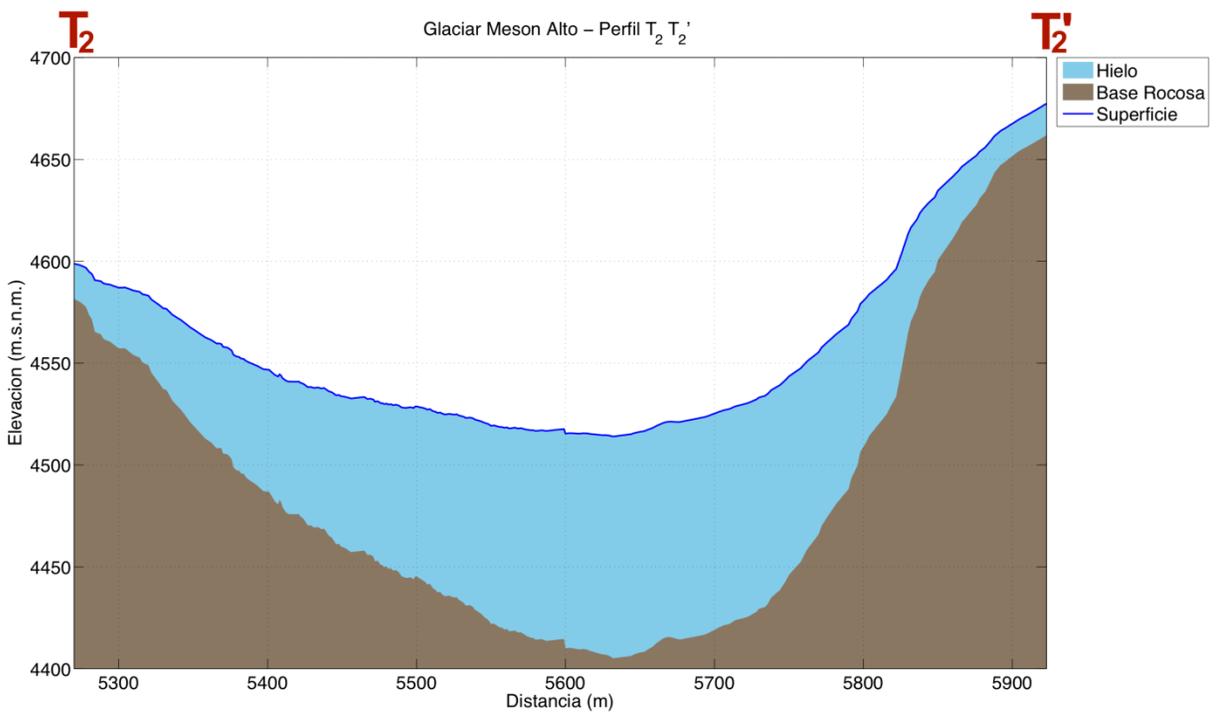
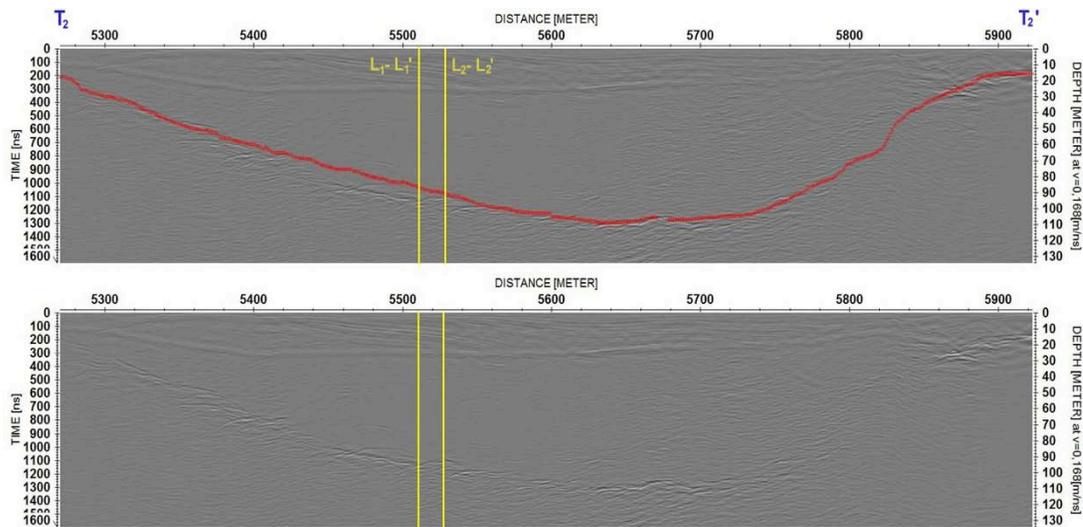


Figura 4.9.5 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

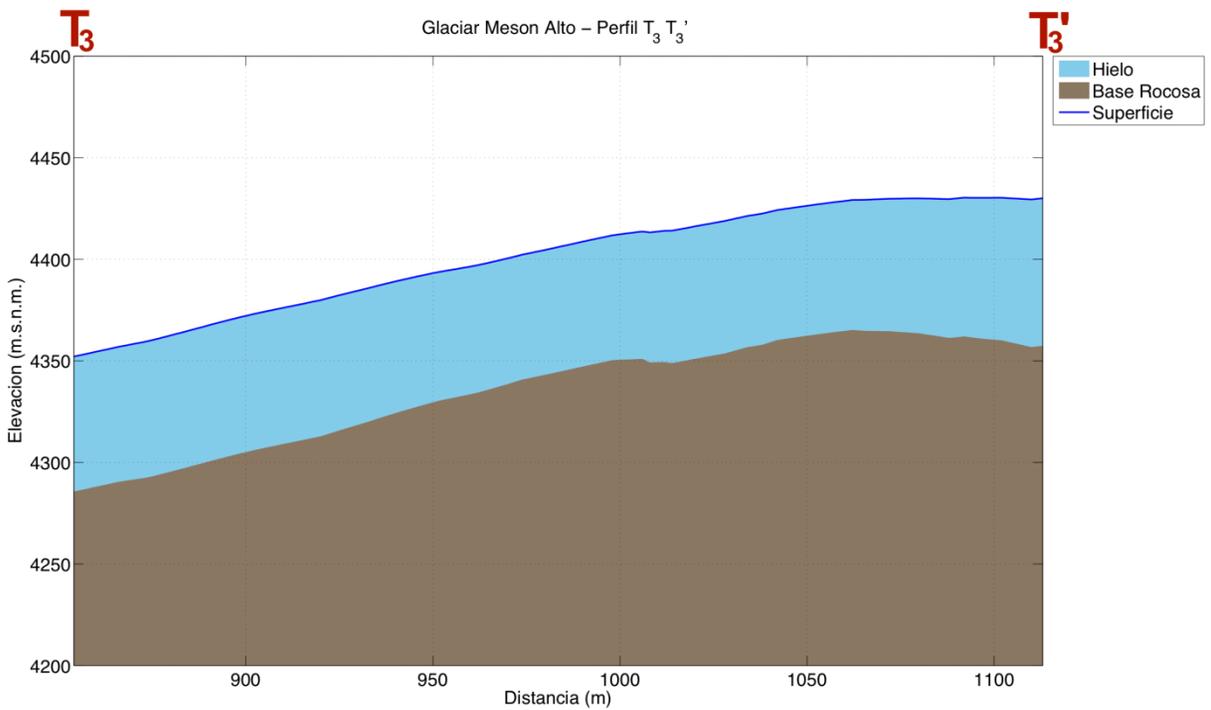
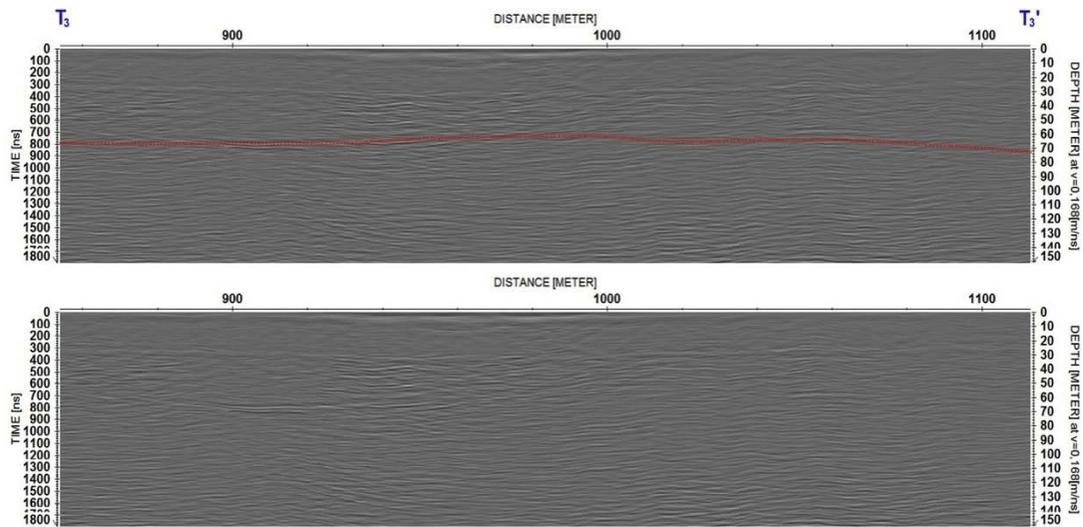


Figura 4.9.6 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar Mesón Alto: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.9.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L₁, L₂, T₁, T₂ y T₃ del glaciar Mesón Alto. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 109,6 [m] y se encuentra en la transversal T₁. El perfil medido más largo corresponde a la longitudinal L₂, mientras que la mayor pendiente se presenta en la transversal T₂. El espesor promedio del glaciar Mesón Alto medido en estos perfiles, es de 72,2 [m] (DE = 25,7 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L ₁ -L ₁ '	642	77,3	106,8	97,5	8,4	4.397	4.567	-14,9
L ₂ -L ₂ '	1.368	11,5	98,0	69,0	22,9	4.531	4.959	17,4
T ₁ - T ₁ '	757	5,0	109,6	59,61	25,7	4.623	4.809	-15,3
T ₂ - T ₂ '	653	15,5	108,9	71,35	30,7	4.514	4.677	29,3
T ₃ - T ₃ '	259	61,5	72,7	65,4	2,5	4.352	4.430	18,2

Tabla 4.9.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx) y promedios (E. prom), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Mesón Alto. Espesor promedio: 72,2 [m] (DE = 25,7 [m]).

4.9.2 Volumen

La Figura 4.9.7 muestra la interpolación del espesor de hielo para el glaciar Mesón Alto utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.9.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Mesón Alto es 0,035 [km³].

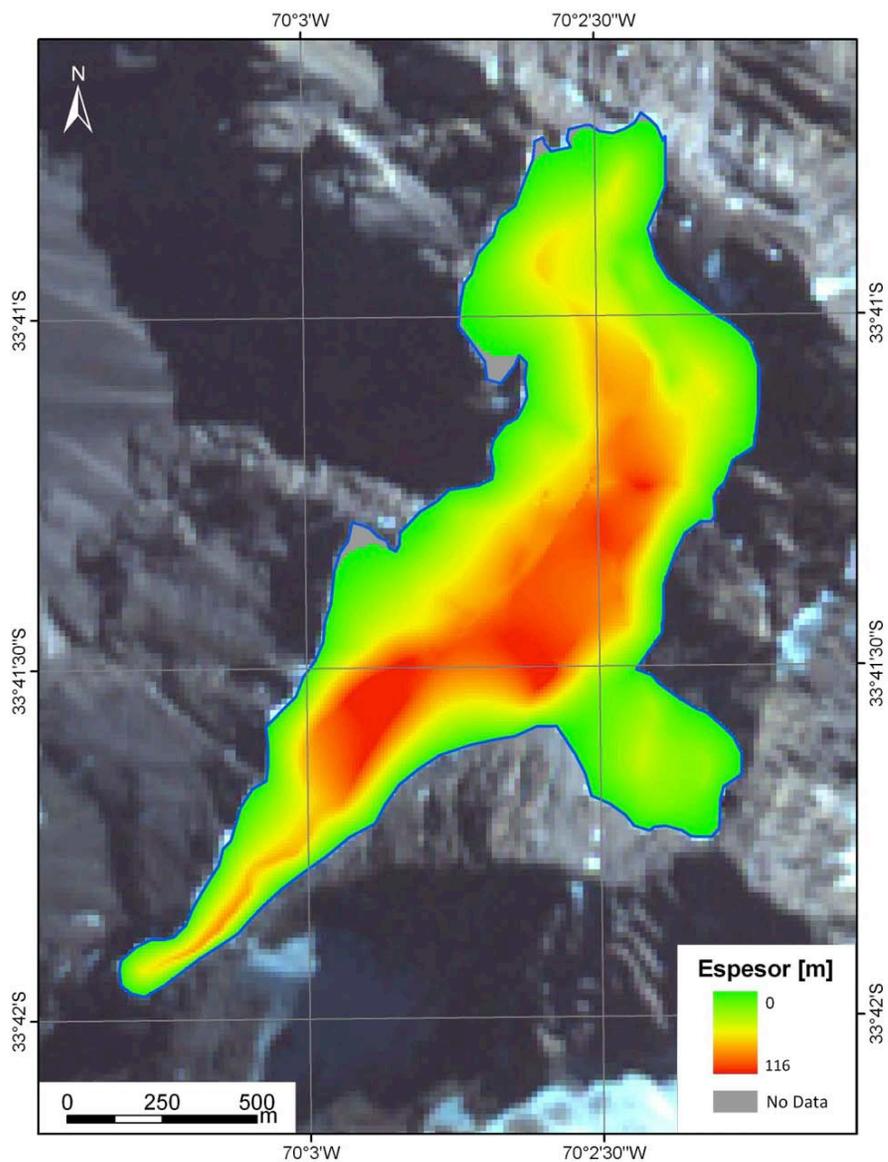


Figura 4.9.7 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Mesón Alto para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Mesón Alto	1,369	0,062	1,385	0,040	0,035

Tabla 4.9.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Mesón Alto.

4.10 Glaciar San Francisco

En la Figura 4.10.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar San Francisco, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.10.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y tres perfiles transversales (desde T_i a T_i', donde i varía de 1 a 3). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 3.369 [m].

4.10.1 Perfiles

En la Figura 4.10.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' con la única intersección en la transversal T₂ (amarillo). La Figura 4.10.3, Figura 4.10.4 y Figura 4.10.5 muestran los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T₁-T₁', T₂-T₂' y T₃-T₃', respectivamente. Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja). En el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial. Se debe notar que la discontinuidad en la vectorización de fondo rocoso en L-L' ha sido interpolada usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

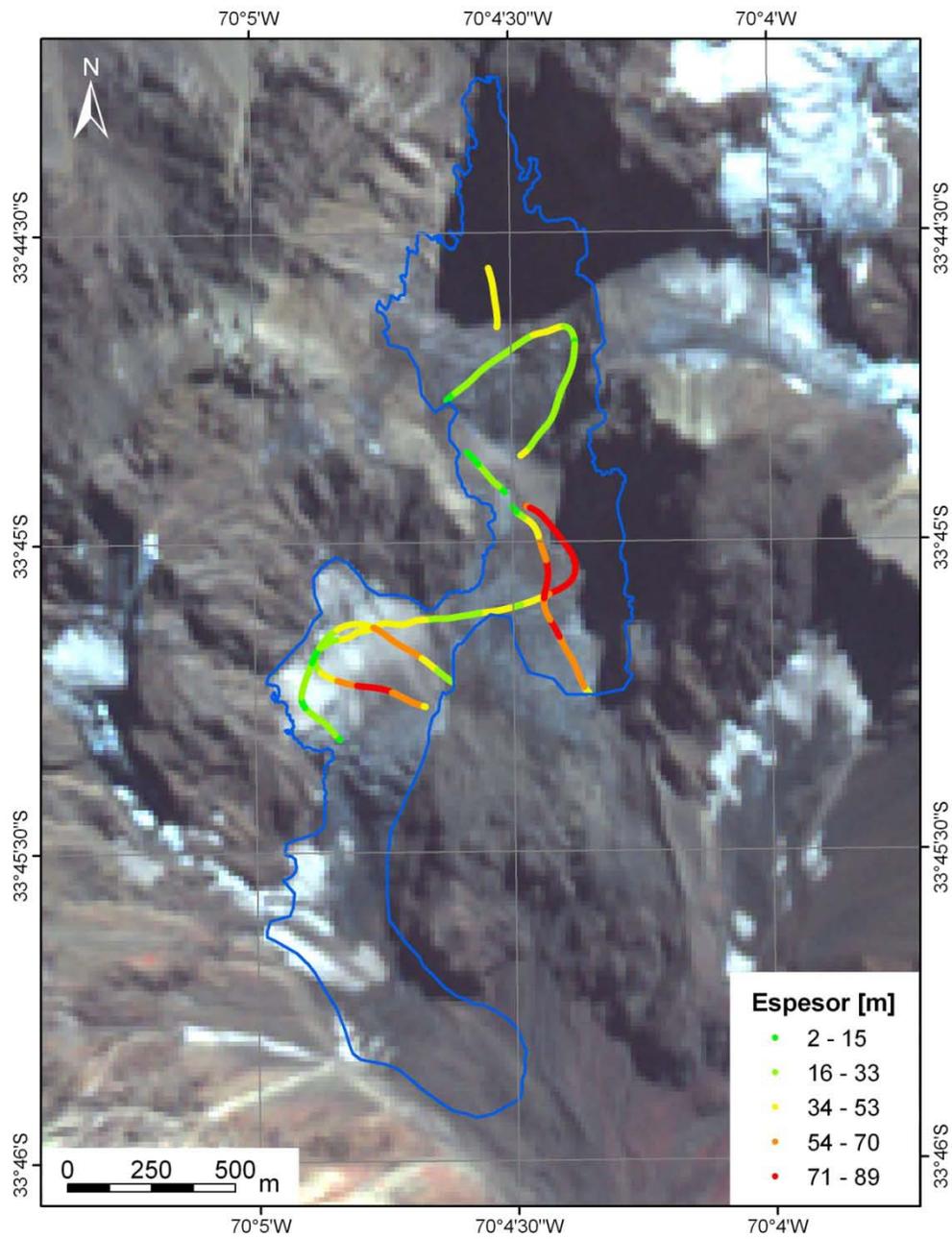


Figura 4.10.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar San Francisco. Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

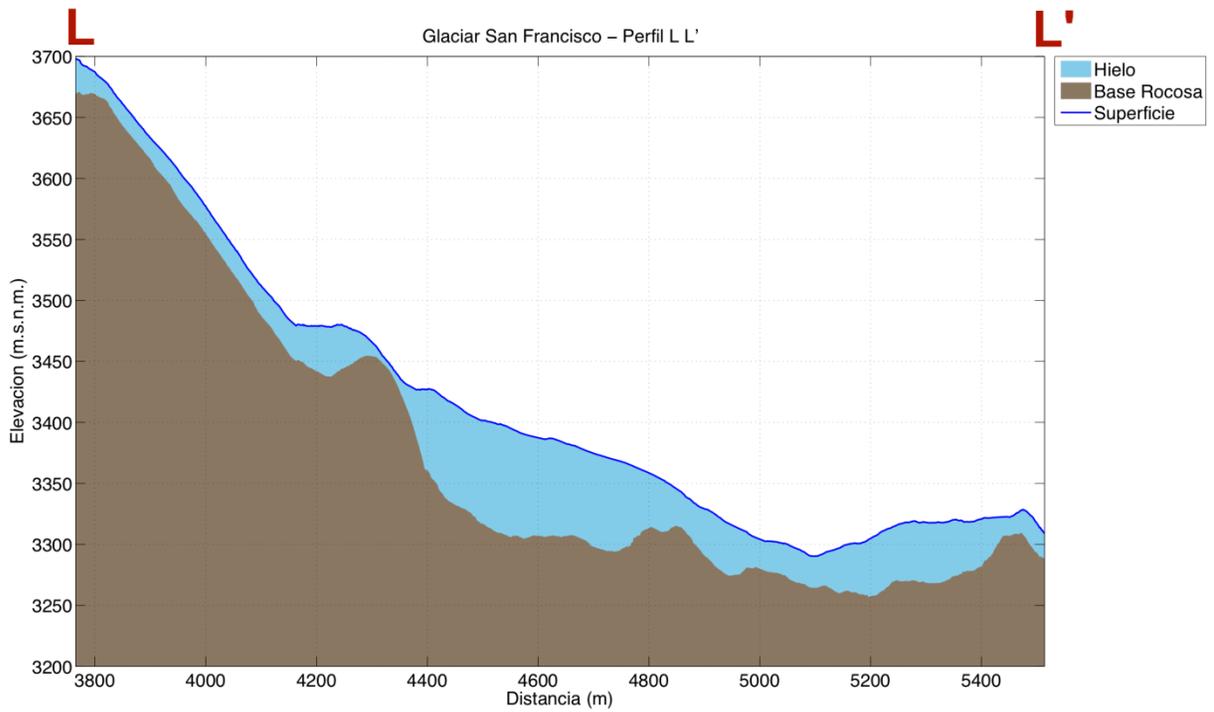
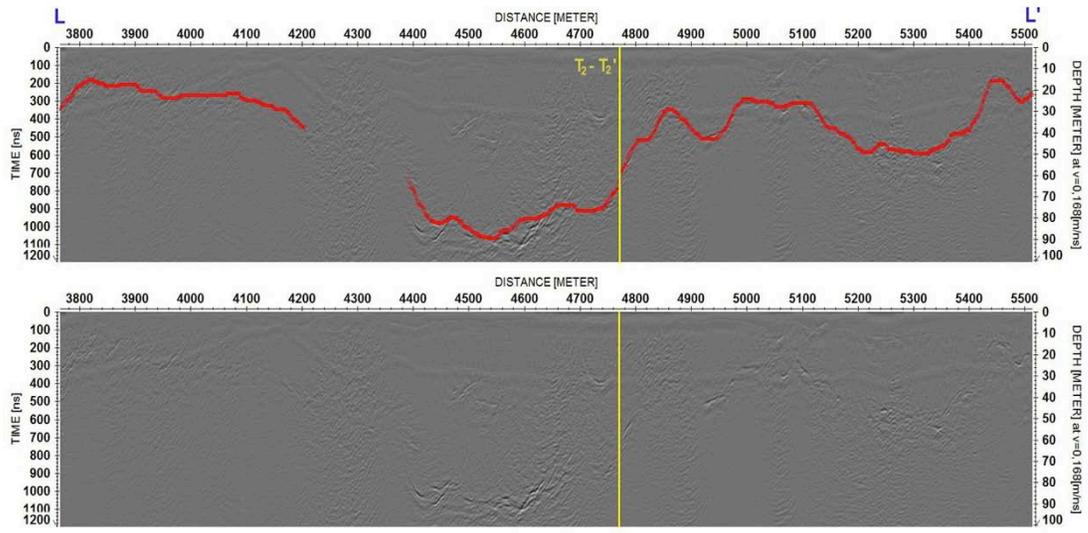


Figura 4.10.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

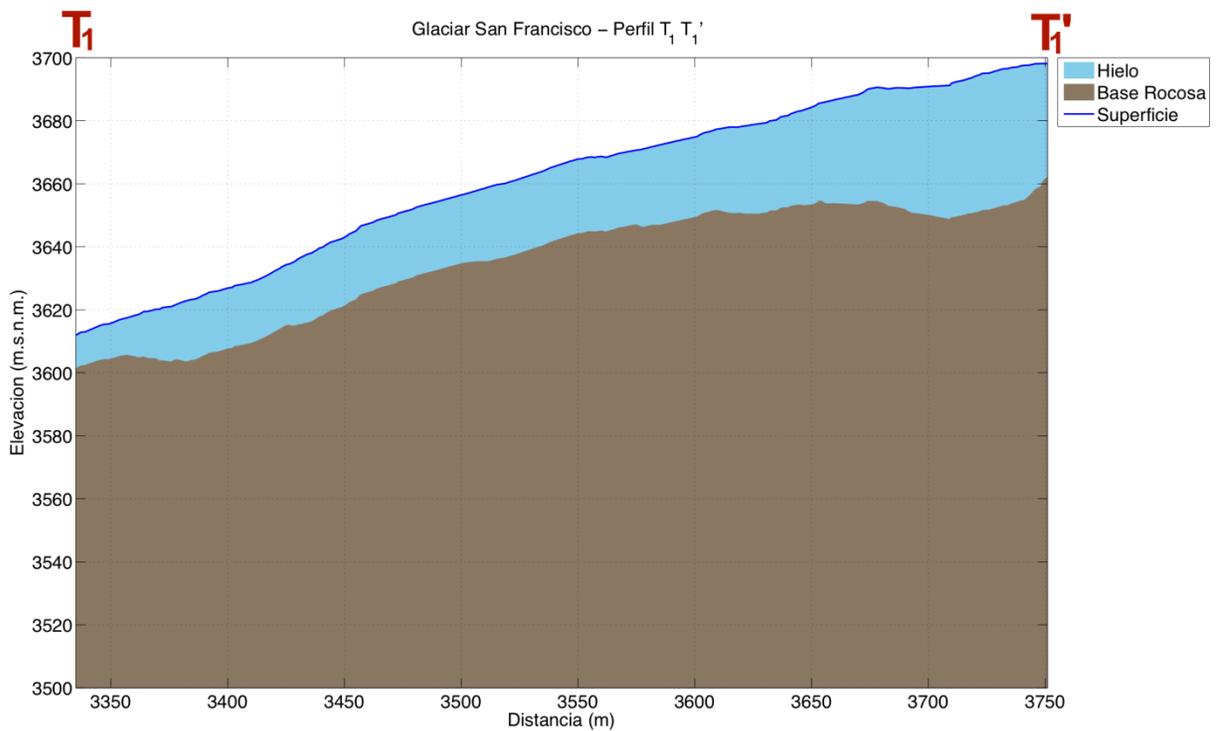
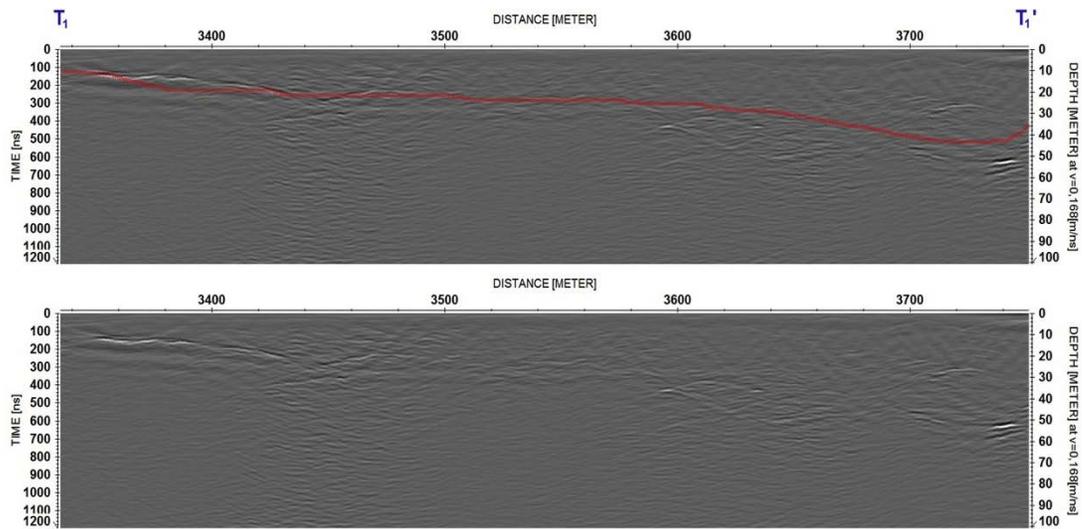


Figura 4.10.3 Perfil transversal T_1 - T_1' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

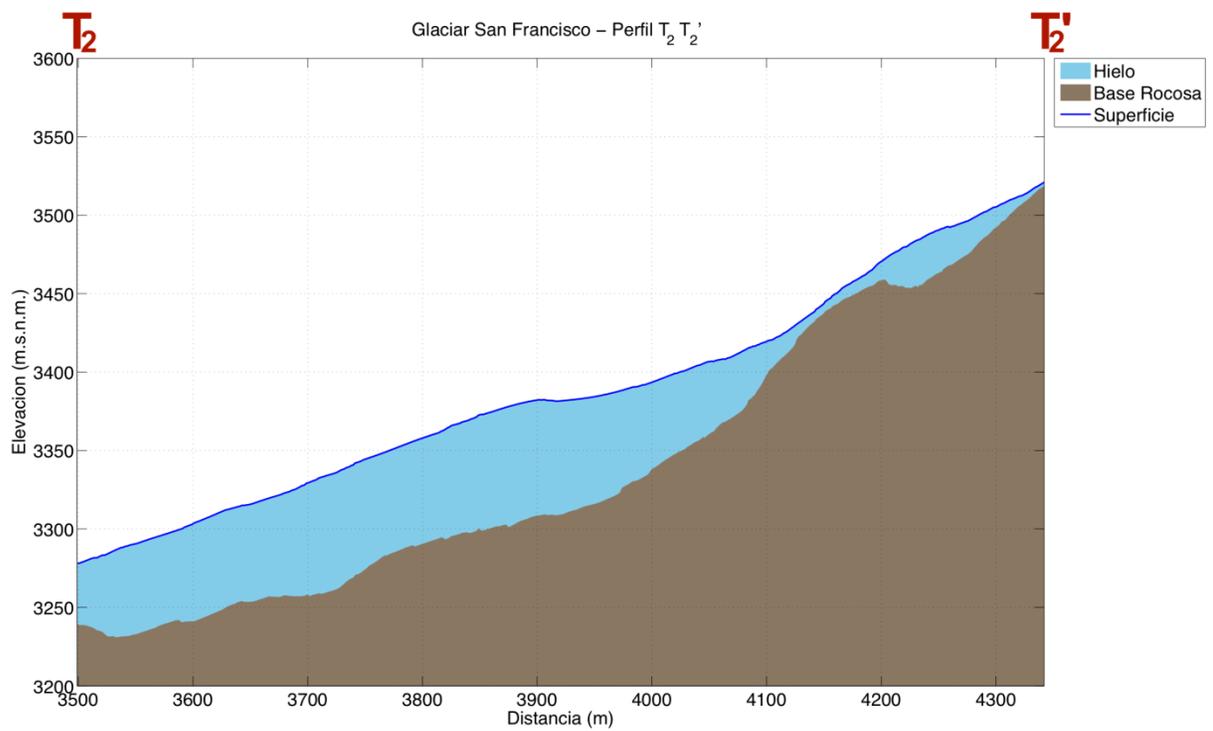
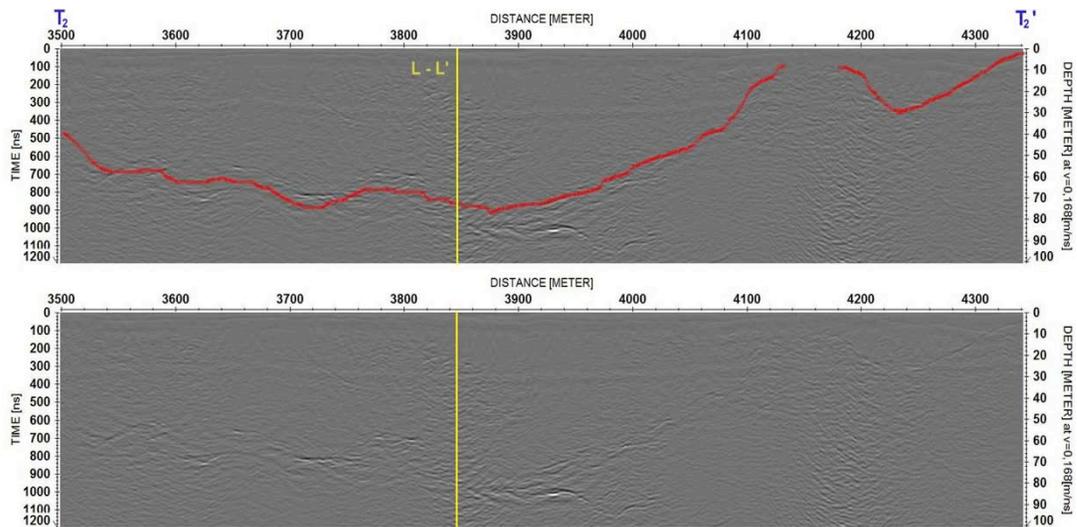


Figura 4.10.4 Perfil transversal T₂-T₂' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

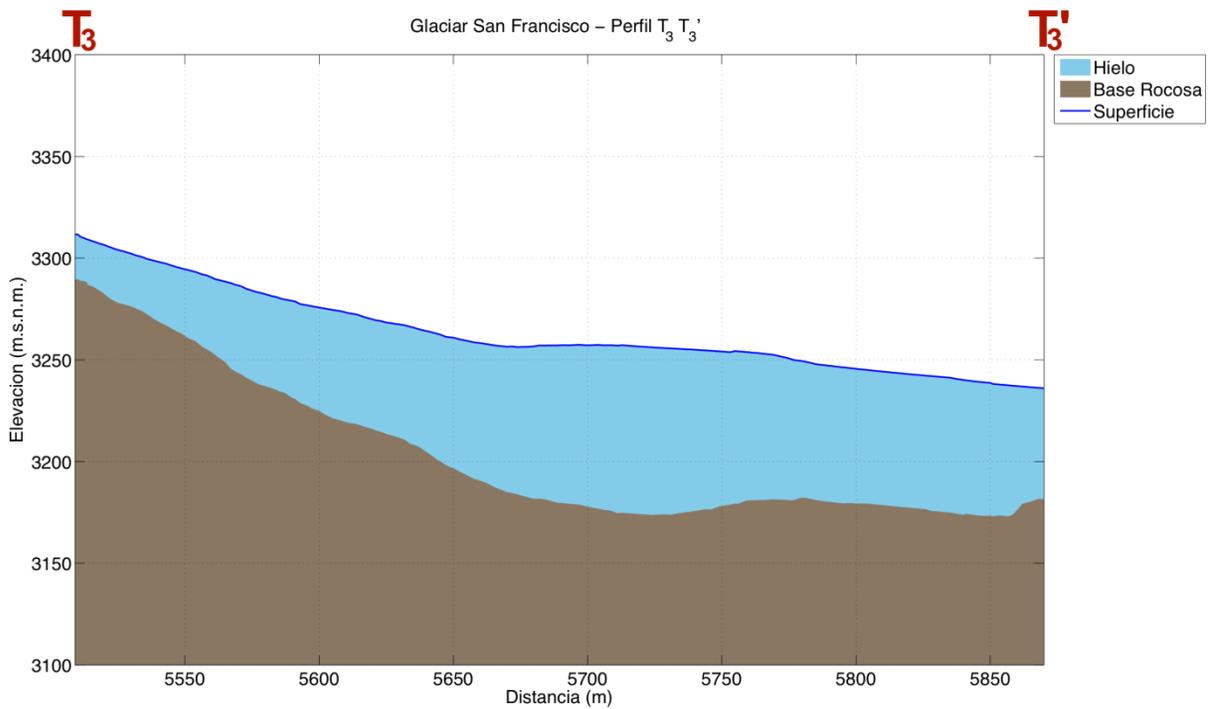
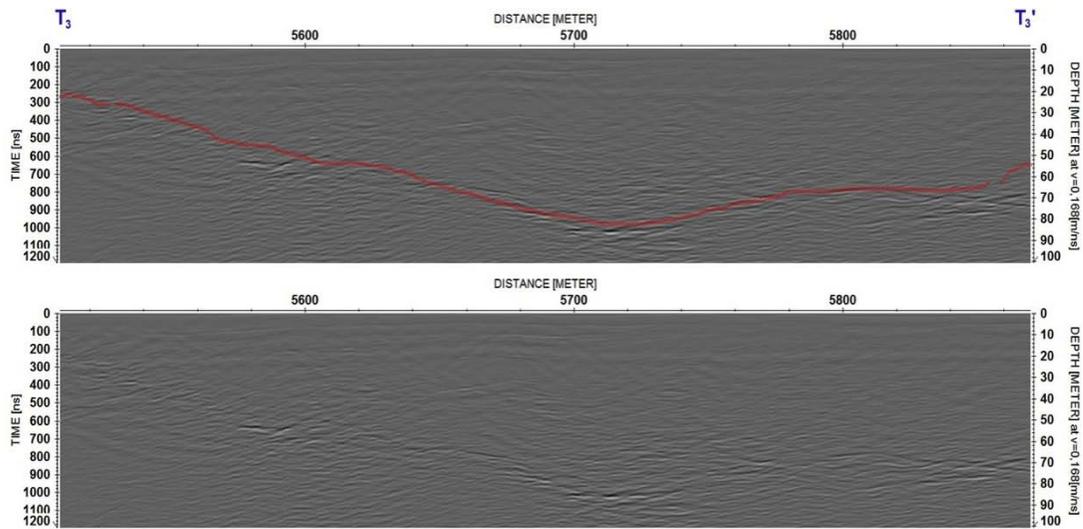


Figura 4.10.5 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar San Francisco: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.10.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂ y T₃ del glaciar San Francisco. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 89,5 [m] y se encuentra en la longitudinal L, siendo éste además el perfil medido de mayor longitud y que presenta la mayor pendiente. El espesor promedio del glaciar San Francisco medido en estos perfiles es de 42,9 [m] (DE = 22,9 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	1.749	5,6	89,5	40,8	22,8	3.290	3.698	-17,0
T ₁ - T ₁ '	416	10,5	43,4	25,9	8,6	3.612	3.698	11,7
T ₂ - T ₂ '	843	2,2	76,9	48,2	23,8	3.278	3.521	16,1
T ₃ - T ₃ '	361	21,1	82,4	60,1	16,9	3.236	3.312	-11,9

Tabla 4.10.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar San Francisco. Espesor promedio: 42,9 [m] (DE = 22,9 [m]).

4.10.2 Volumen

En la Figura 4.10.6 se muestra la interpolación del espesor para el glaciar San Francisco utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.10.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar San Francisco es 0,023 [km³].

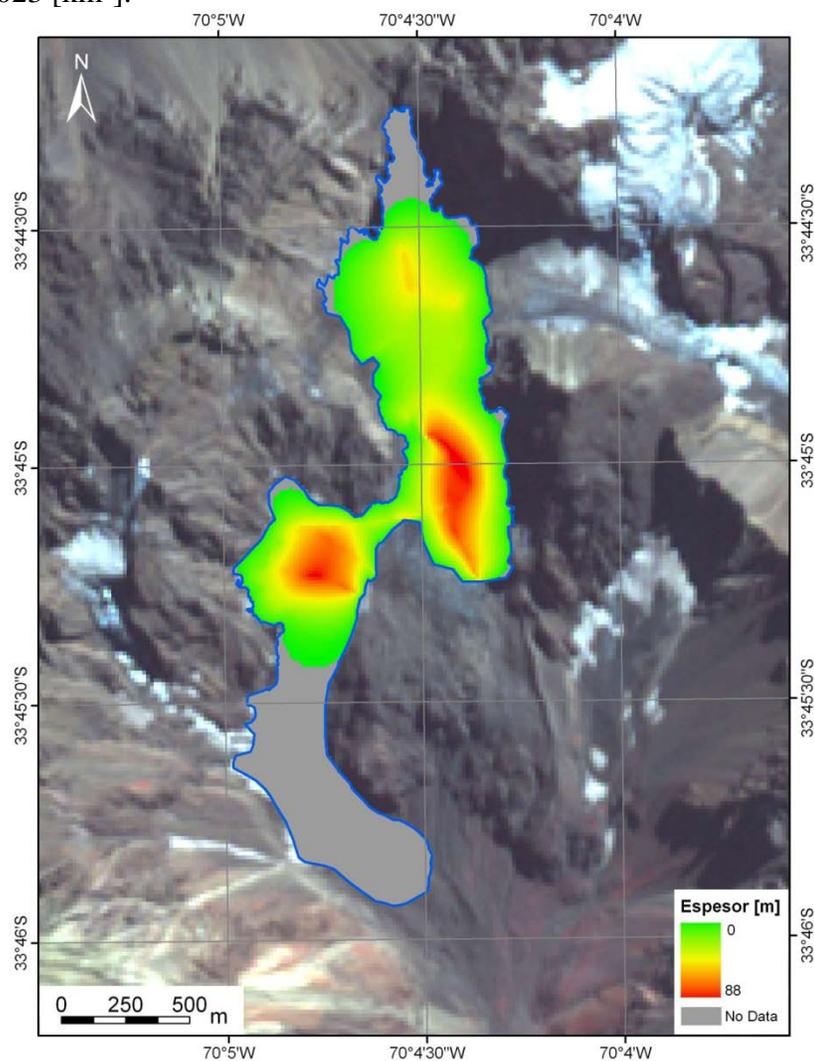


Figura 4.10.6 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar San Francisco para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 27 de marzo de 2010.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
San Francisco	0,931	0,024	0,995	0,026	0,023

Tabla 4.10.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar San Francisco.

4.10.3 Comparación con mediciones 2009

En la Figura 4.10.7 se muestran los resultados de mediciones de topografía superficial y subglacial realizadas con radar terrestre el año 2009 por la DGA (DGA, 2009b), en tres perfiles del glaciar San Francisco (AA', CC' y EE'). En la misma figura, se pueden ver las intersecciones con perfiles realizados para el presente estudio (líneas verticales en color rojo). La ubicación de las mediciones con radar terrestre (2009) y radar aerotransportado (2012) se muestran en la Figura 4.10.8.

La Tabla 4.10.3 resume los espesores de hielo para las intersecciones I, II, III y IV. La comparación muestra una diferencia puntual mínima de -5 [m] y una máxima de -39 [m] entre 2009 y 2012, lo cual implica un adelgazamiento en los puntos medidos. Sin embargo, estos valores no son representativos espacialmente de todo el glaciar.

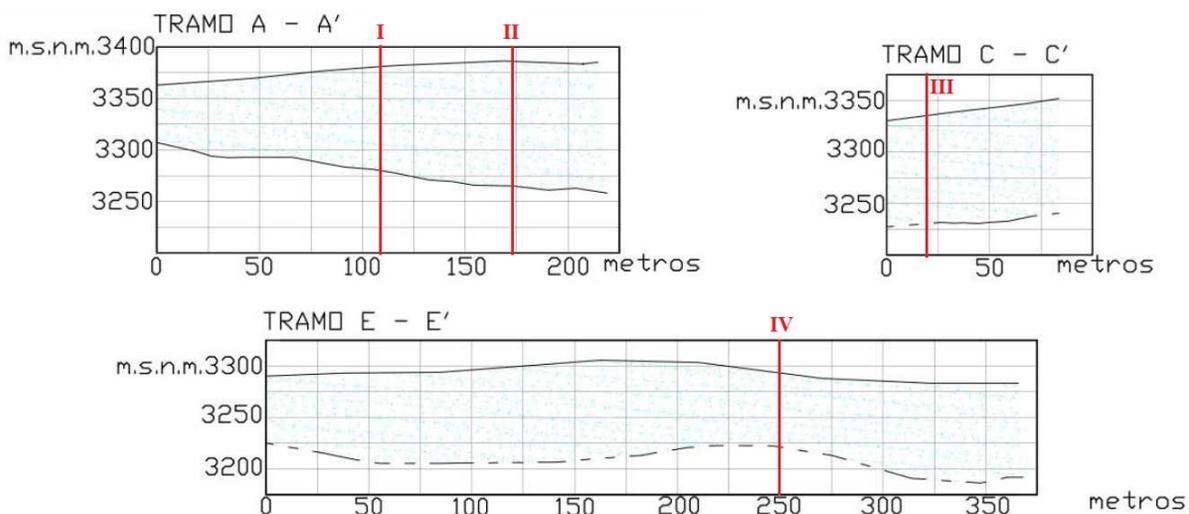


Figura 4.10.7 Topografía superficial y subglacial en perfiles AA', CC' y EE' en glaciar San Francisco, año 2009 (DGA, 2009b), incluyendo cruces con datos de espesor del presente estudio (segmento rojo).

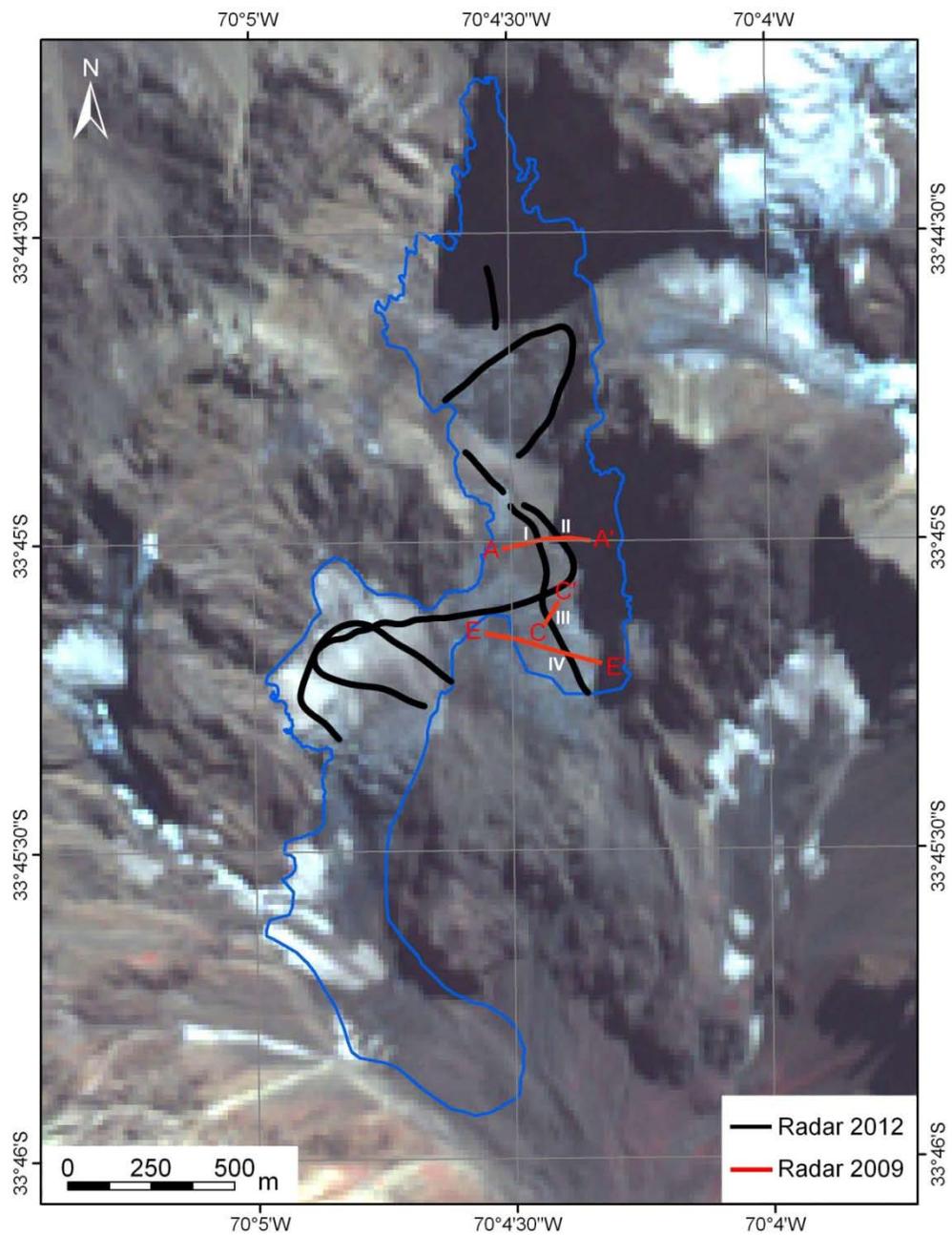


Figura 4.10.8 Perfiles con espesor de hielo en glaciar San Francisco en 2009 (línea roja; DGA, 2009b) y 2012 (línea negra) con intersecciones (número romanos).

Intersección	Espesor estimado 2009 [m]	Espesor estimado 2012 [m]	Diferencia [m]
I (en AA' a 111m)	88	56	-32
II (en AA' a 173 m)	106	89	-17
III (en CC' a 20 m)	105	66	-39
IV (en EE' a 250 m)	65	60	-5

Tabla 4.10.3 Comparación espesor de hielo puntual en glaciar San Francisco entre 2009 (DGA, 2009b) y 2012 (presente estudio).

4.11 Glaciar Cipreses Norte

En la Figura 4.11.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Cipreses Norte, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinal y transversales. La Figura 4.11.1 muestra además la trayectoria y sentido de un perfil longitudinal (desde L a L') y cuatro perfiles transversales (desde T_i a T_i', donde i varía de 1 a 4). La distancia total recorrida en estos perfiles es de 11.640 [m].

4.11.1 Perfiles

En la Figura 4.11.2 se observa el radargrama y la topografía subglacial del perfil L-L' y la intersección con las transversales T₂, T₃ y T₄ (en amarillo). La discontinuidad en L ha sido interpolada usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial. En la Figura 4.11.3, Figura 4.11.4, Figura 4.11.5 y Figura 4.11.6 se observan los radargramas y la topografía subglacial de los perfiles T₁-T₁', T₂-T₂', T₃-T₃' y T₄-T₄', respectivamente, con la correspondiente intersección en el perfil L (excepto T₁). Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja), en el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

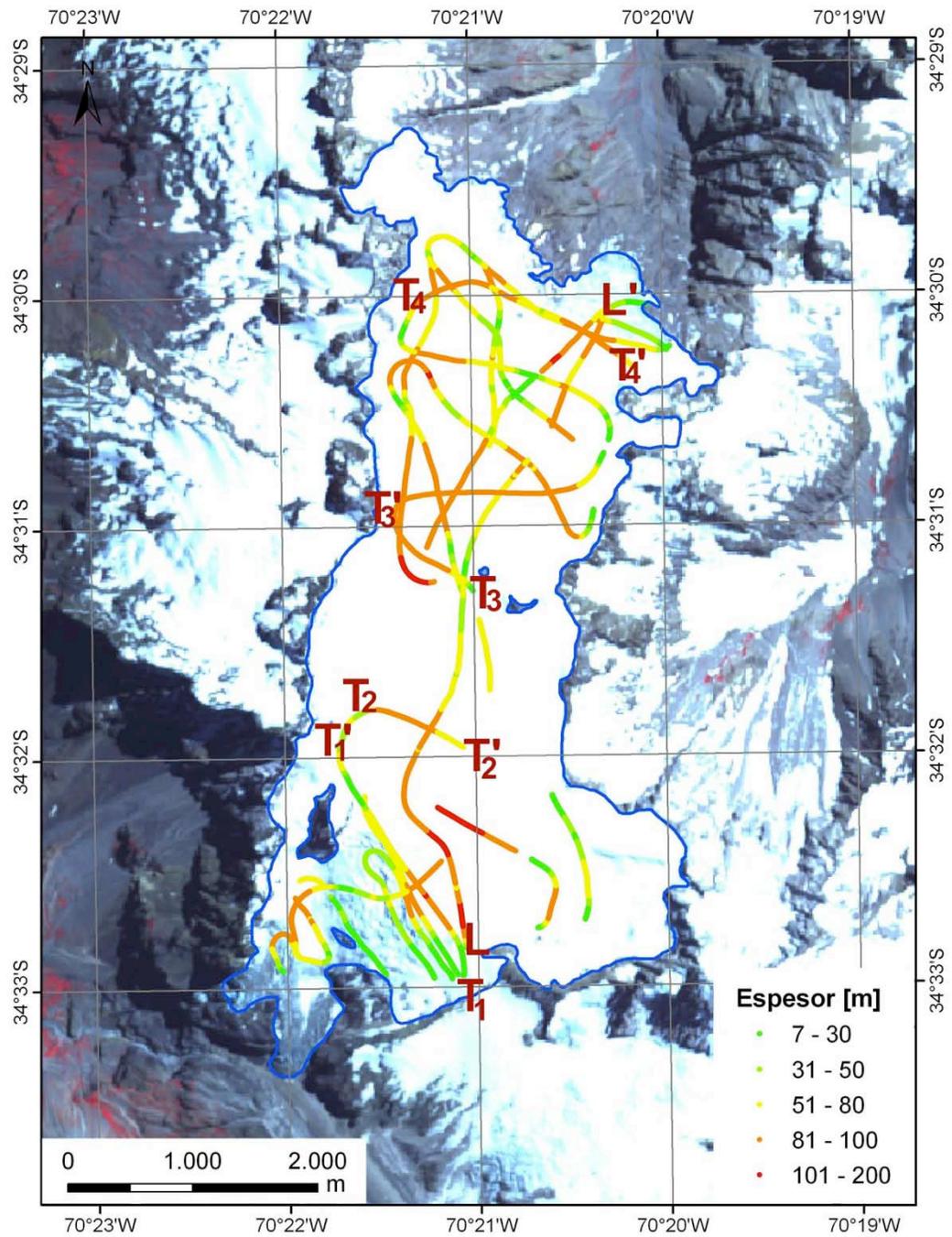


Figura 4.11.1 Perfiles longitudinal (L-L') y transversales (T_i-T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Cypreses Norte. Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.

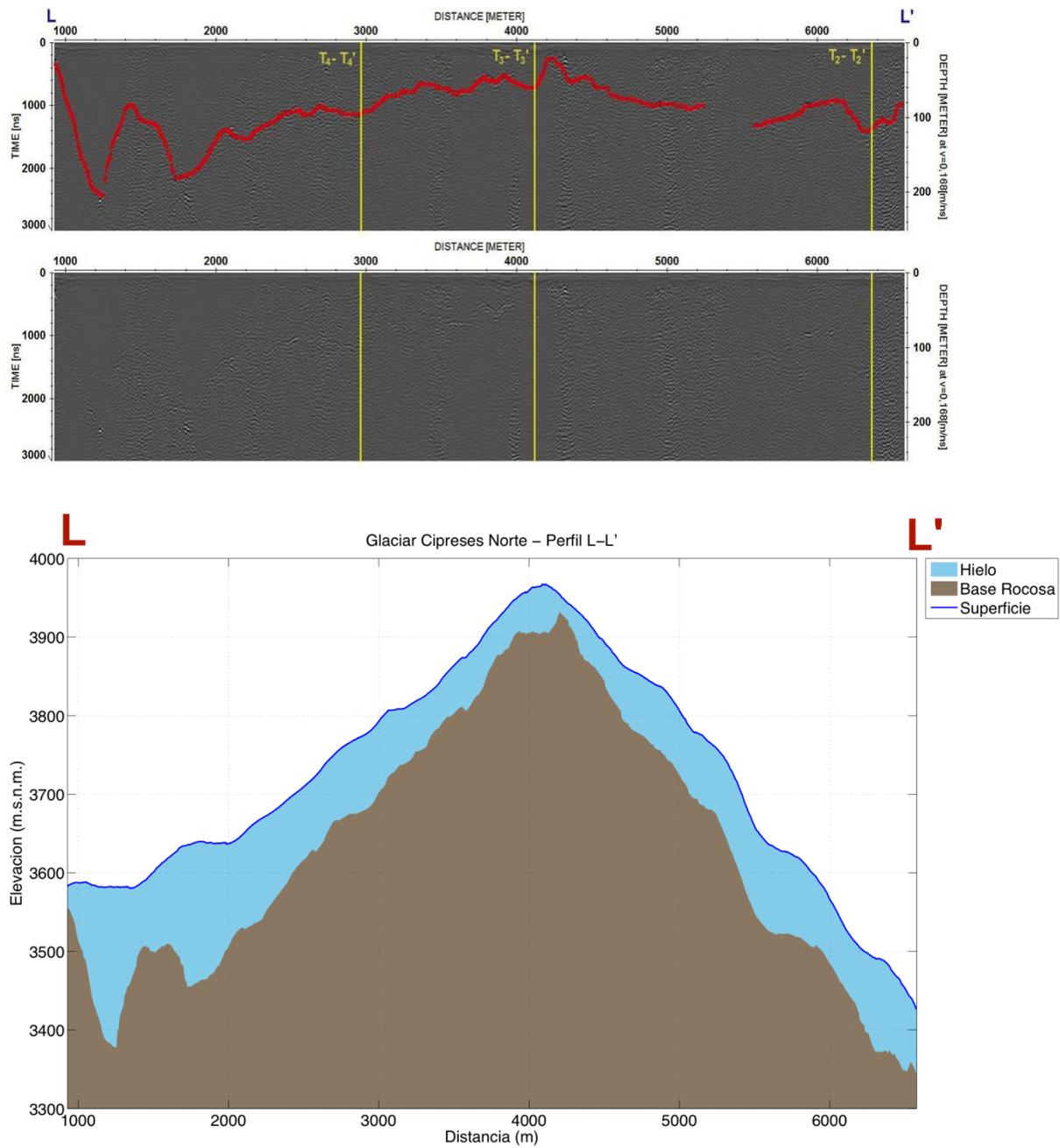


Figura 4.11.2 Perfil longitudinal L-L' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

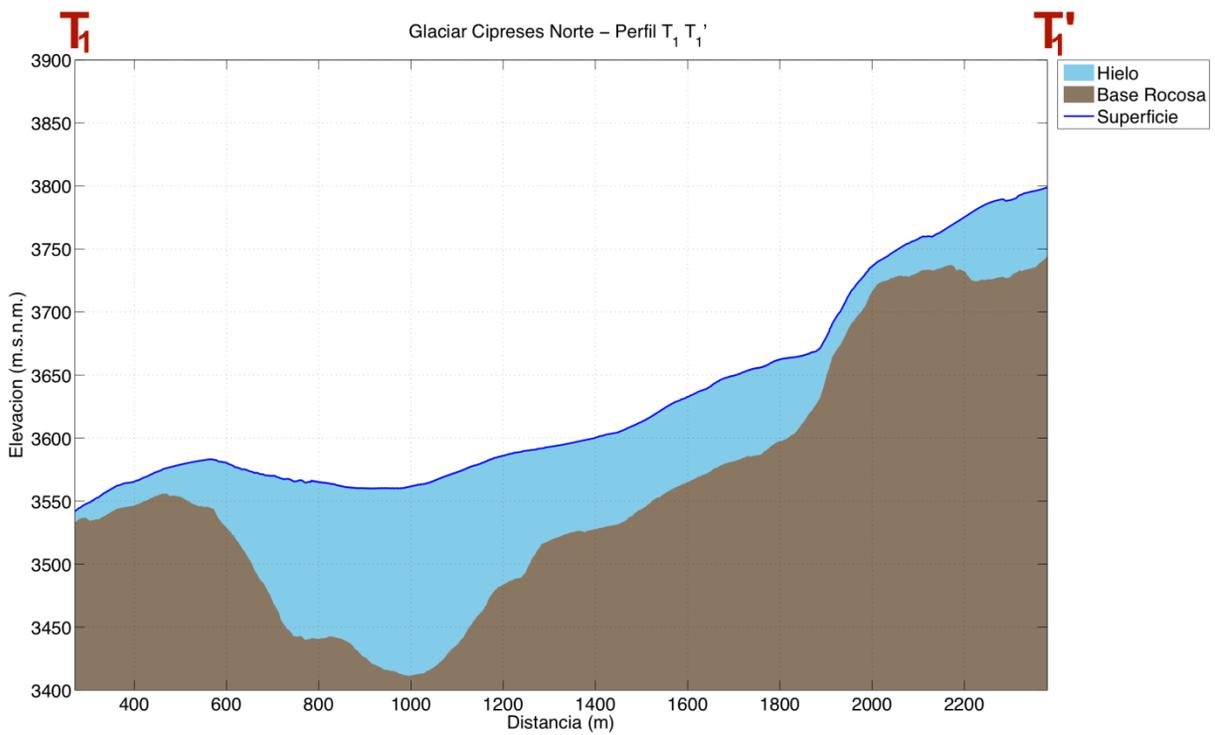
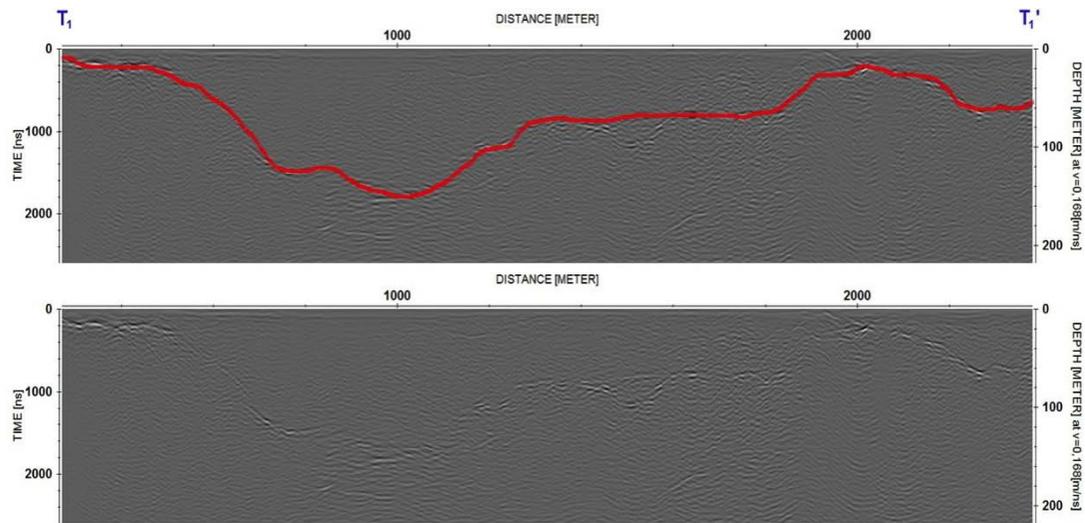


Figura 4.11.3 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

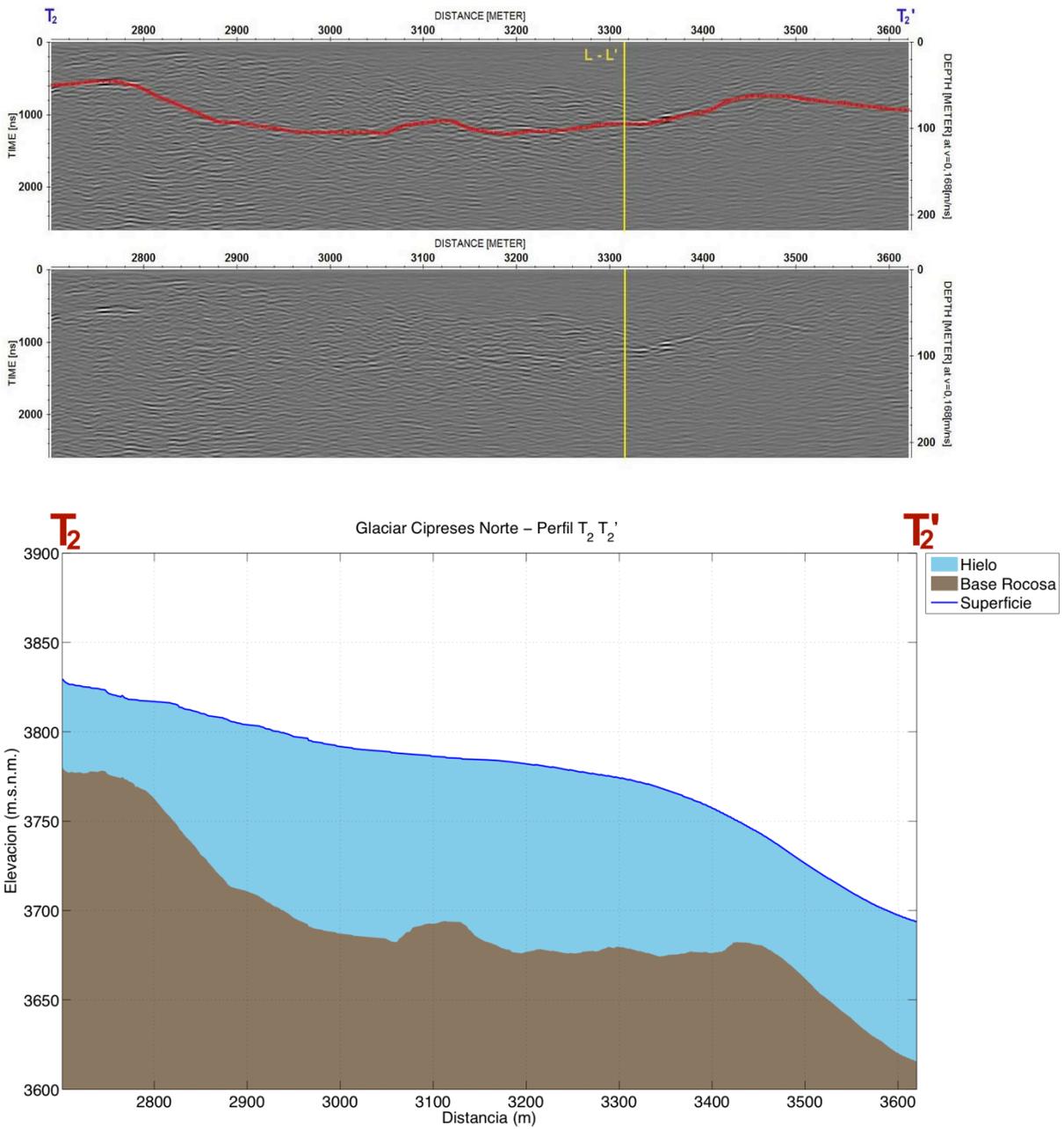


Figura 4.11.4 Perfil transversal T₂-T₂' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

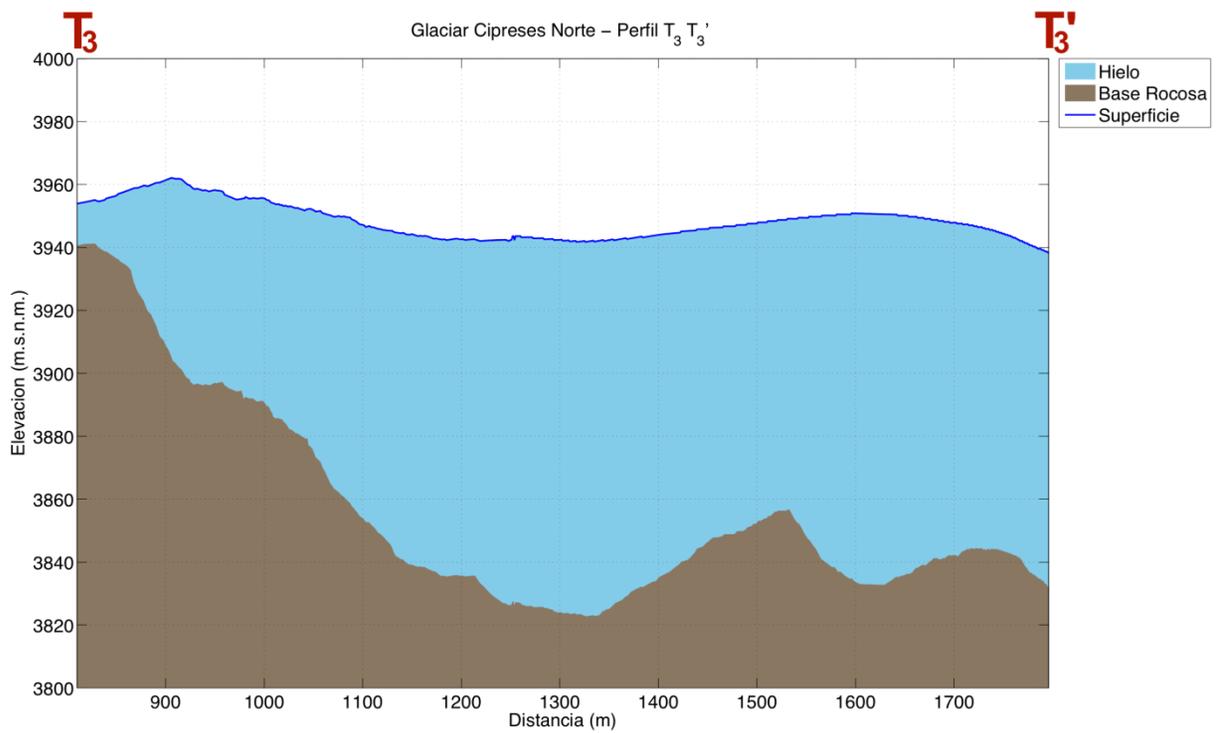
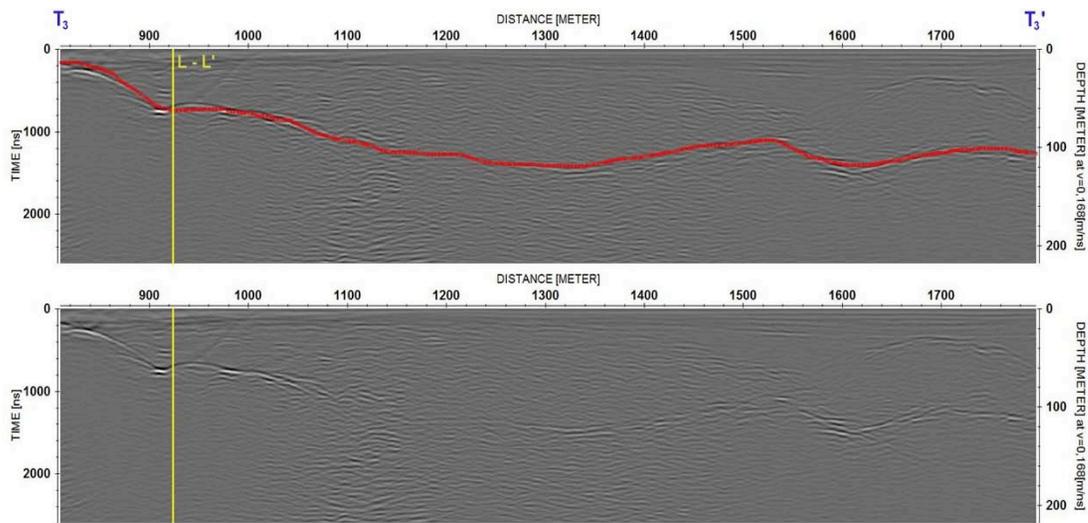


Figura 4.11.5 Perfil transversal T_3 - T_3' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

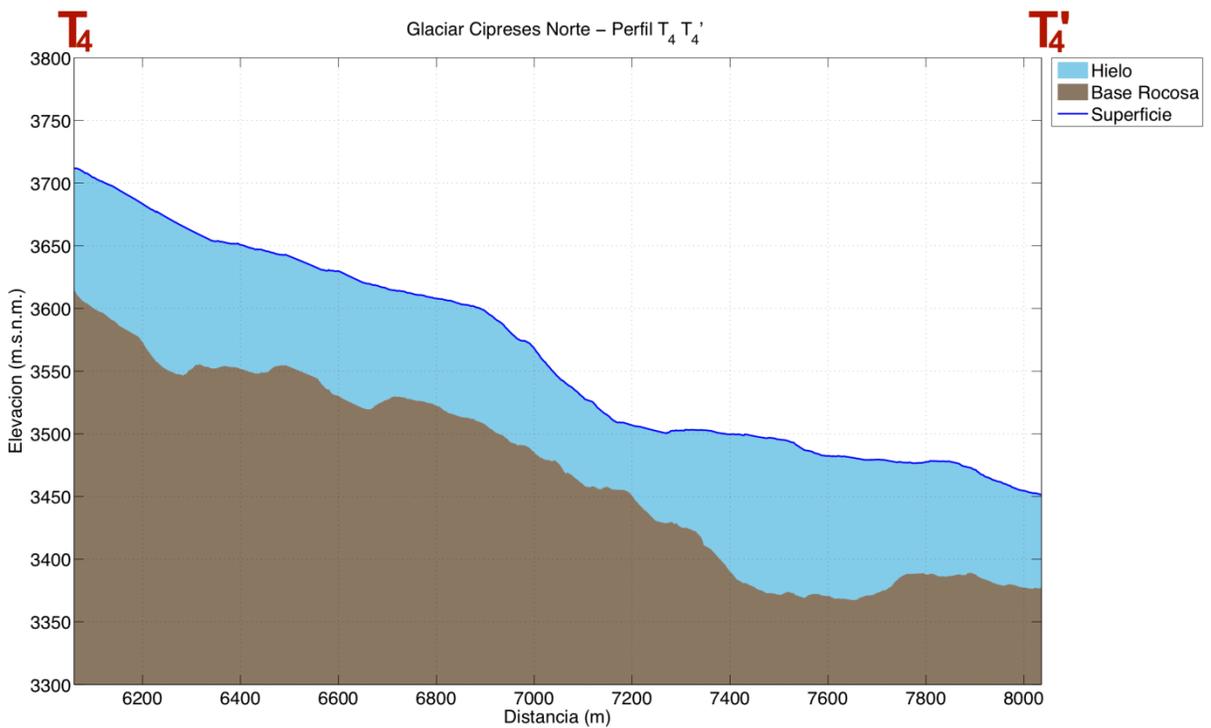
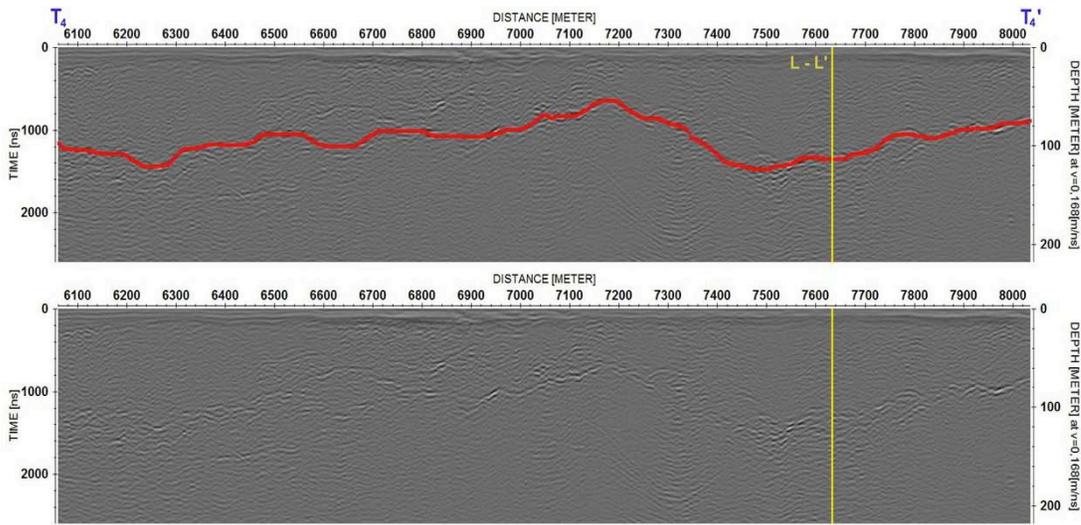


Figura 4.11.6 Perfil transversal T₄-T₄' en el glaciar Cipreses Norte: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.11.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L, T₁, T₂, T₃ y T₄ del glaciar Cipreses Norte. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 204,6 [m] y se encuentra en la longitudinal L, siendo éste además el perfil medido de mayor longitud y que presenta la mayor pendiente. El espesor promedio del glaciar Cipreses Norte, para estos perfiles, es de 87,9 [m] (DE = 33,1 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L-L'	5.650	21,8	204,6	92,5	34,9	3.426	3.967	-12,4
T ₁ - T ₁ '	2.109	8,9	150,1	70,0	40,1	3.542	3.799	6,9
T ₂ - T ₂ '	919	45,5	106,4	83,9	18,9	3.694	3.830	-8,4
T ₃ - T ₃ '	986	13,3	119,0	92,4	27,3	3.938	3.962	-1,5
T ₄ - T ₄ '	1.976	53,8	123,9	93,4	16,6	3.451	3.712	-7,5

Tabla 4.11.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Cipreses Norte. Espesor promedio: 87,9 [m] (DE = 33,1 [m]).

4.11.2 Volumen

La Figura 4.11.7 muestra la interpolación del espesor para el glaciar Cipreses Norte utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.11.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Cipreses Norte es 0,717 [km³].

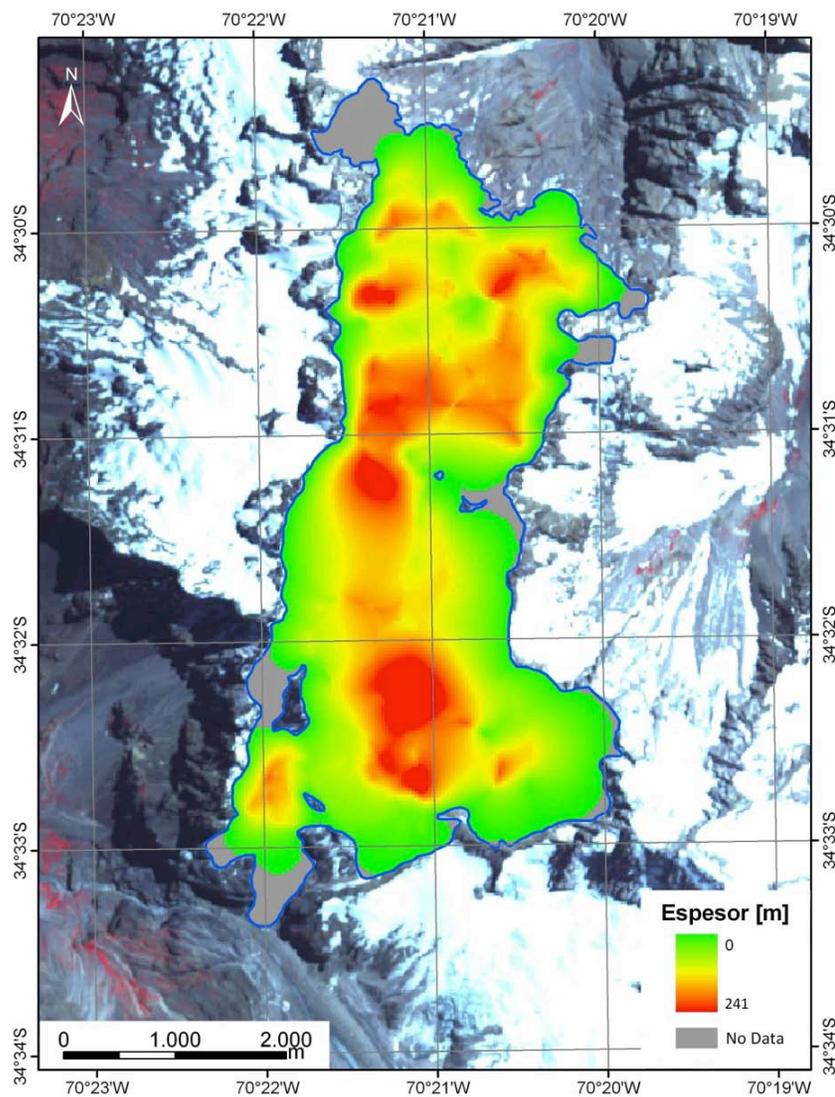


Figura 4.11.7 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Cipreses Norte para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km³]	Área total del glaciar [km²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km³]
Cipreses Norte	13,758	0,742	14,947	0,833	0,717

Tabla 4.11.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Cipreses Norte.

4.12 Glaciar Universidad

En la Figura 4.12.1 se observan todas las secciones de vuelo para las que se obtuvo datos de espesor de hielo en el glaciar Universidad, los cuales son representados en la figura mediante una escala de colores, donde el color verde indica un menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La estimación del volumen está basada en toda la información obtenida y que incluye los perfiles seleccionados como longitudinales y transversales. La Figura 4.12.1 muestra además la trayectoria y sentido de tres perfiles longitudinales (desde L_i a L_i' , donde i varía de 1 a 3) y cuatro perfiles transversales (desde T_i a T_i' , donde i varía de 1 a 4). Se escogieron tres longitudinales para poder considerar los dos ramales del glaciar. La distancia total recorrida en estos perfiles es de 15.671 [m].

4.12.1 Perfiles

En la Figura 4.12.2, Figura 4.12.3 y Figura 4.12.4 se observan los radargramas y topografía subglacial de los perfiles L_1-L_1' , L_2-L_2' y L_3-L_3' , respectivamente, con las correspondientes intersecciones en las transversales (amarillo). En la Figura 4.12.5, Figura 4.12.6, Figura 4.12.7 y Figura 4.12.8 se muestran los radargramas y topografía subglacial de los perfiles T_1-T_1' , T_2-T_2' , T_3-T_3' y T_4-T_4' , respectivamente, con las correspondientes intersecciones en las longitudinales (amarillo). Tal como se hizo para todos los casos anteriores, las eventuales discontinuidades fueron interpoladas usando *spline* cúbico para dar continuidad a la curva de topografía subglacial.

Cada figura contiene en la parte superior el radargrama con la interpretación de fondo rocoso (curva roja), en el centro se encuentra el radargrama sin vectorización y en la parte inferior la reconstrucción de la topografía subglacial.

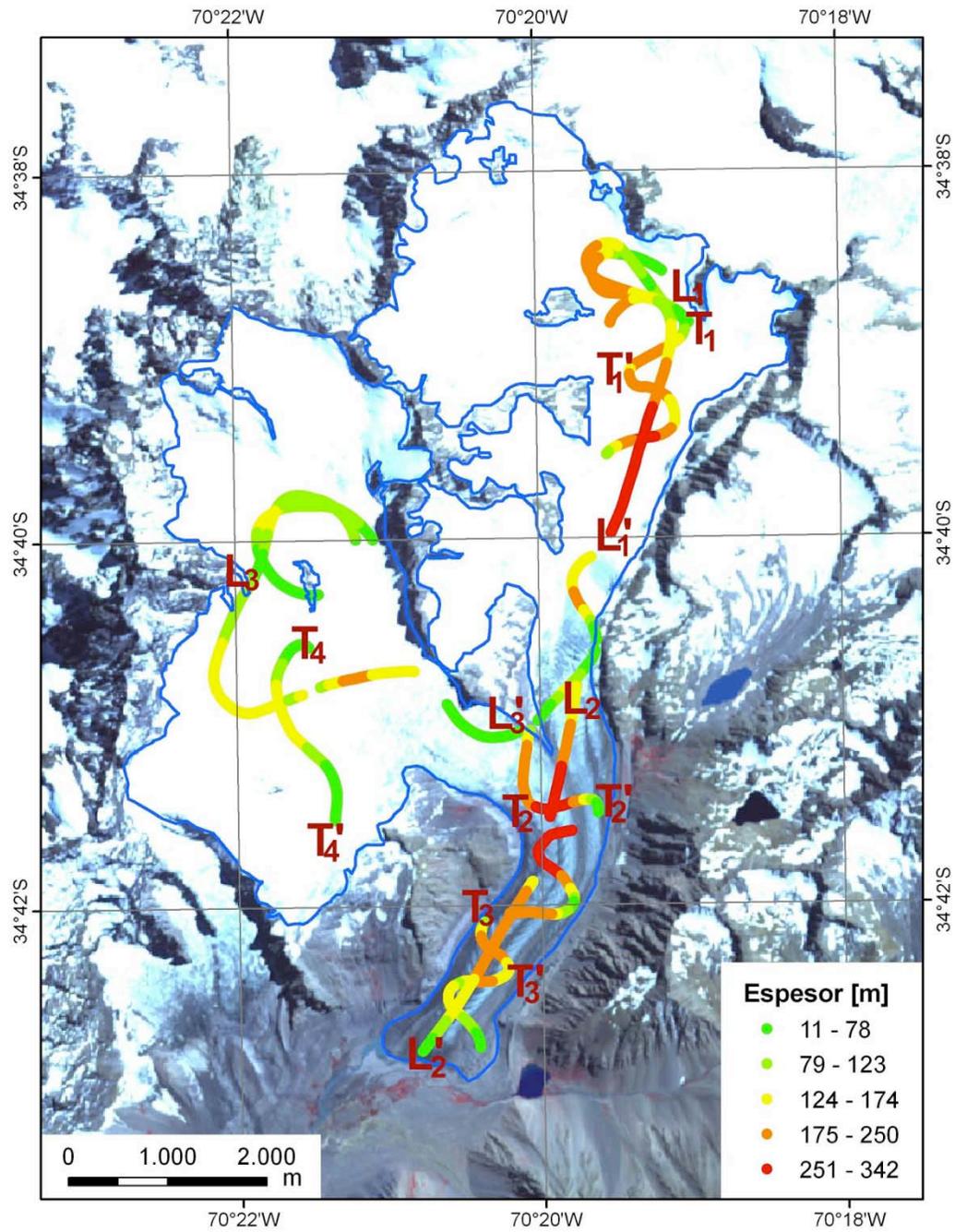


Figura 4.12.1 Perfiles longitudinal (L_i - L_i') y transversales (T_i - T_i') con espesor de hielo (en escala de colores) en glaciar Universidad. Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.

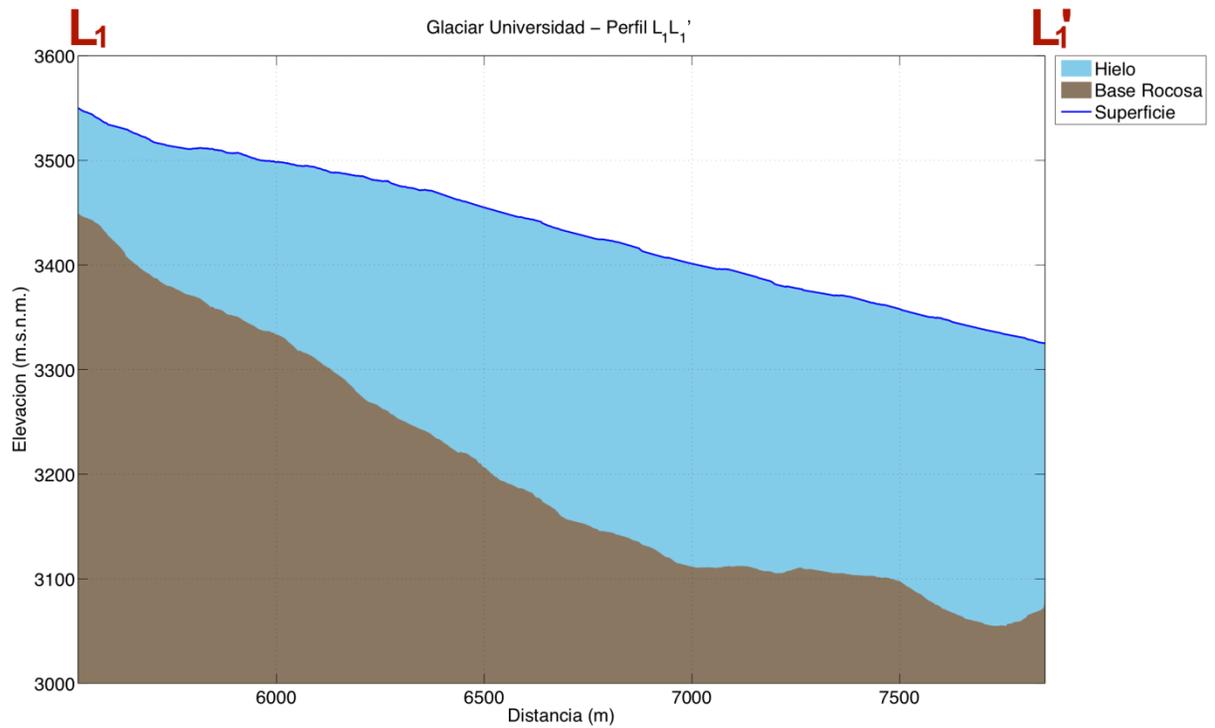
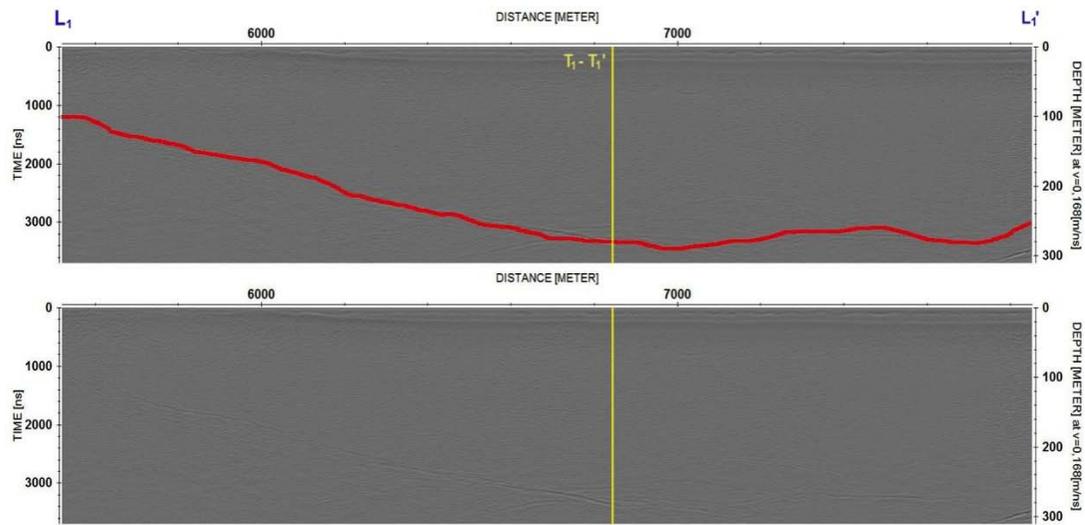


Figura 4.12.2 Perfil longitudinal L_1-L_1' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

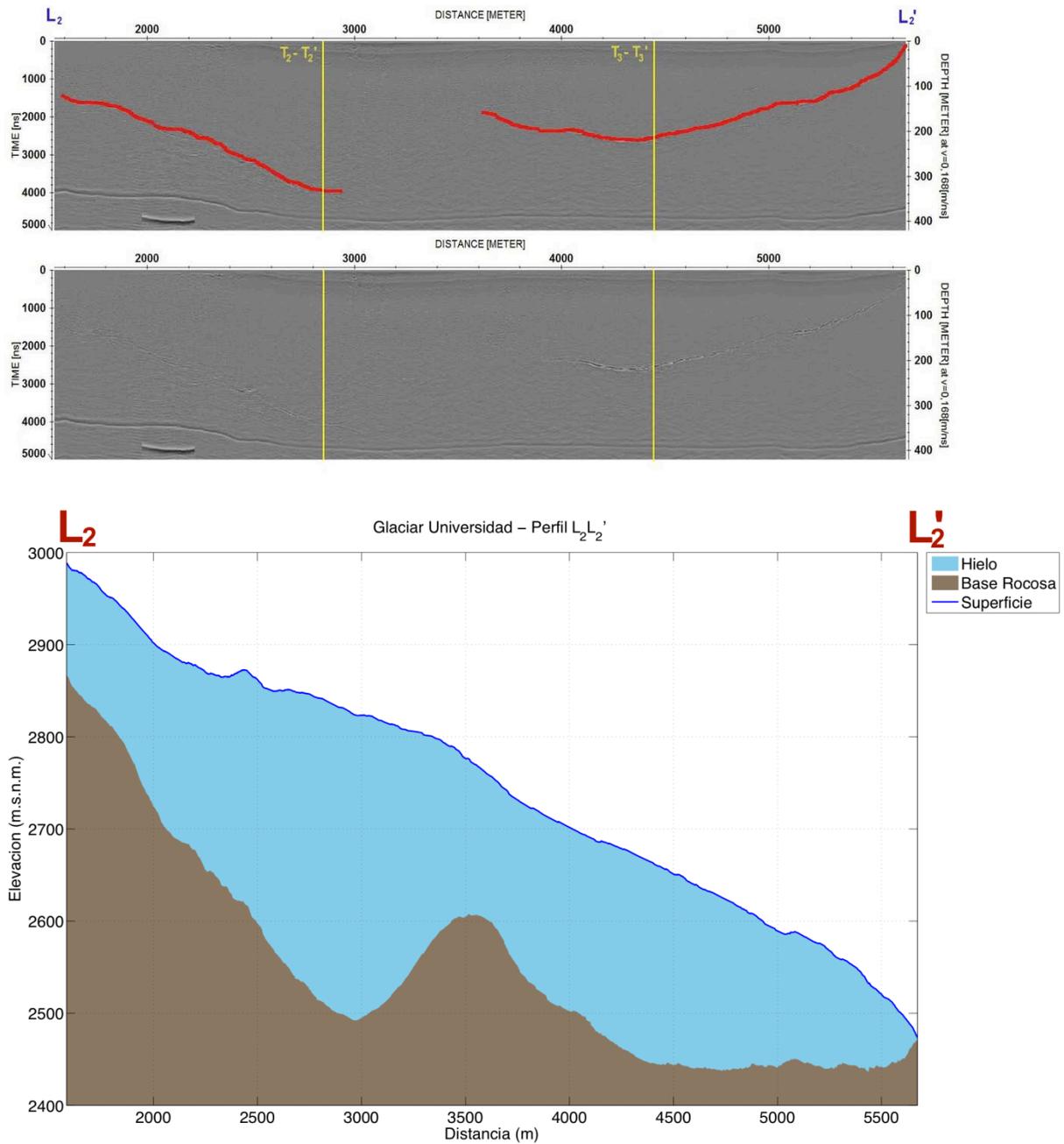


Figura 4.12.3 Perfil longitudinal L_2-L_2' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

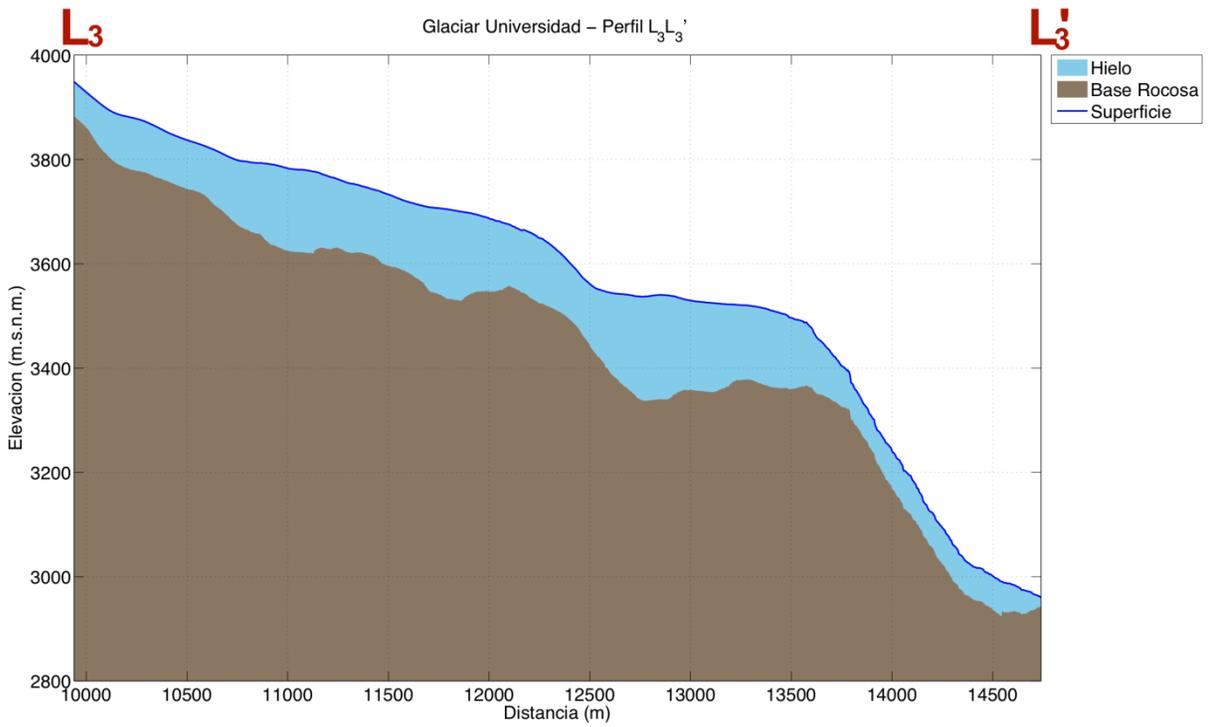
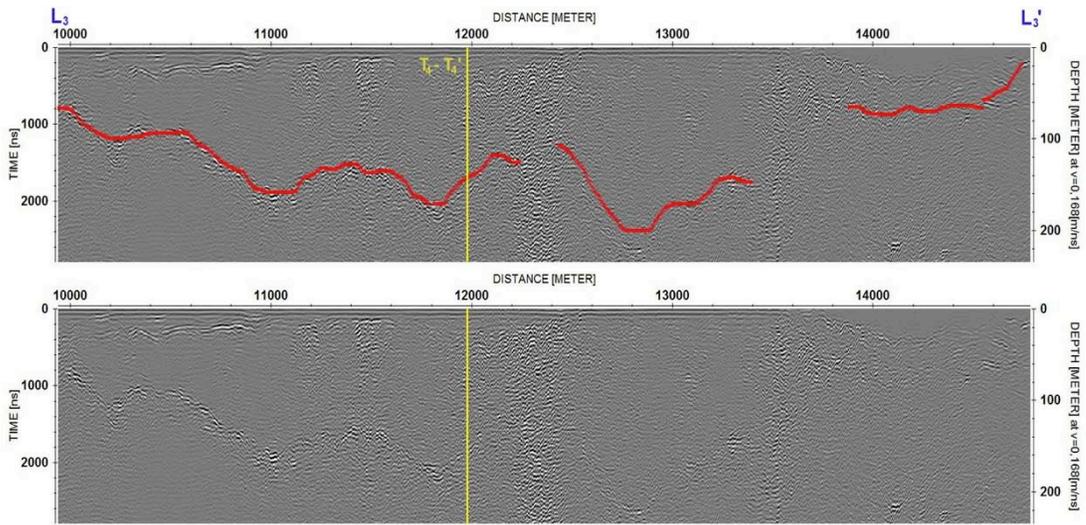


Figura 4.12.4 Perfil longitudinal L_3 - L_3' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

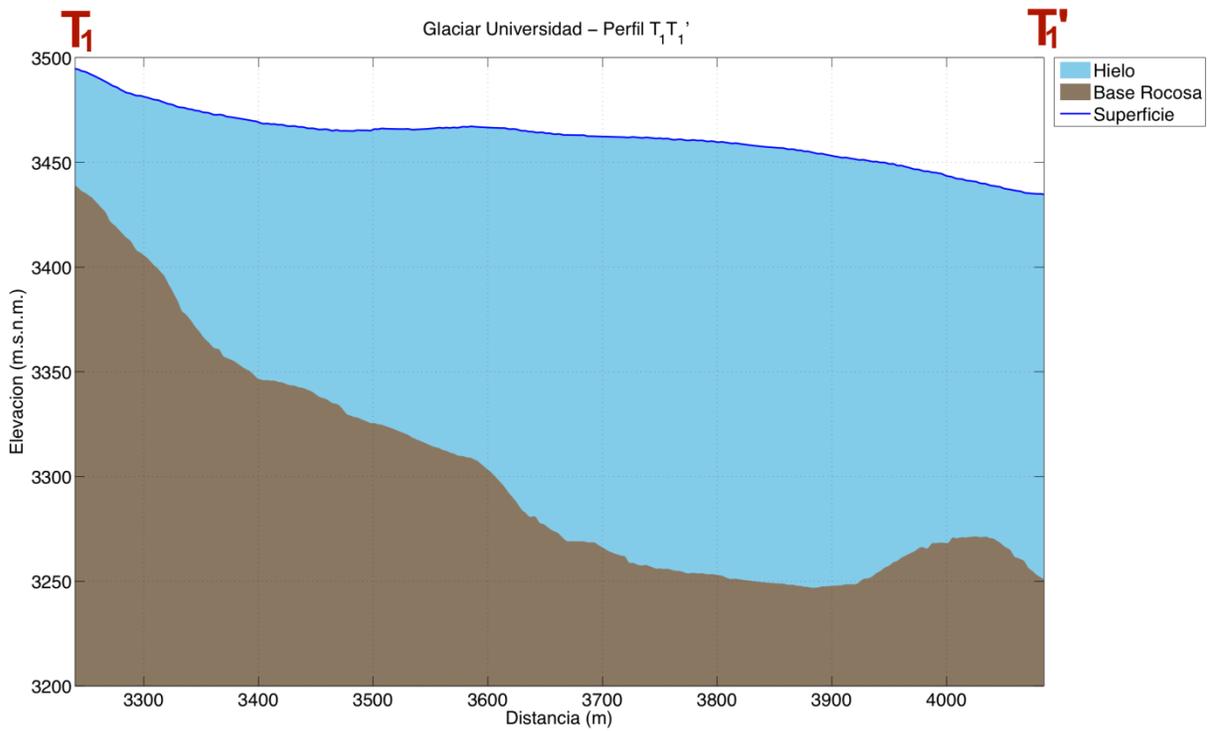
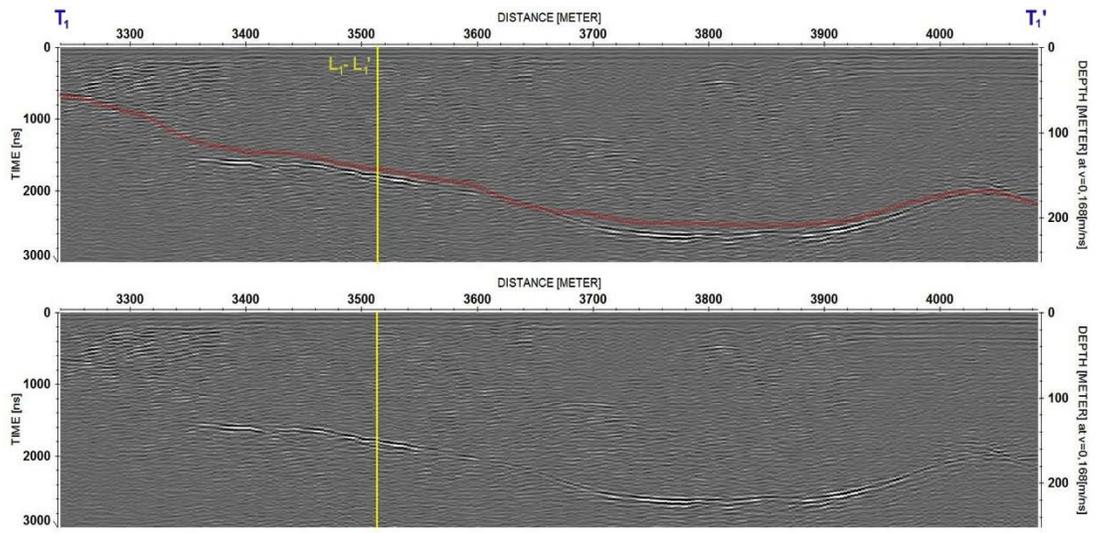


Figura 4.12.5 Perfil transversal T_1-T_1' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

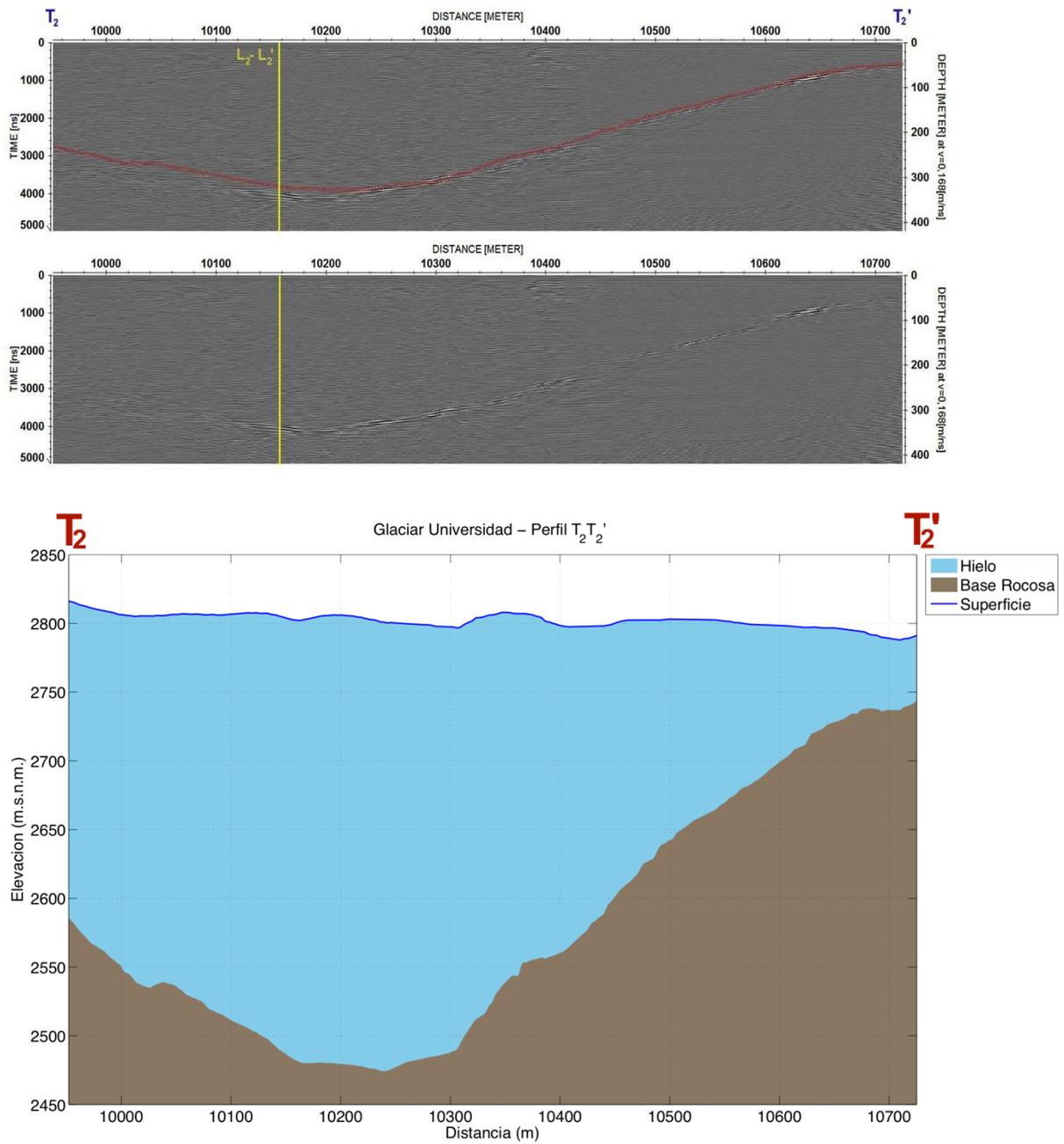


Figura 4.12.6 Perfil transversal T_2-T_2' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

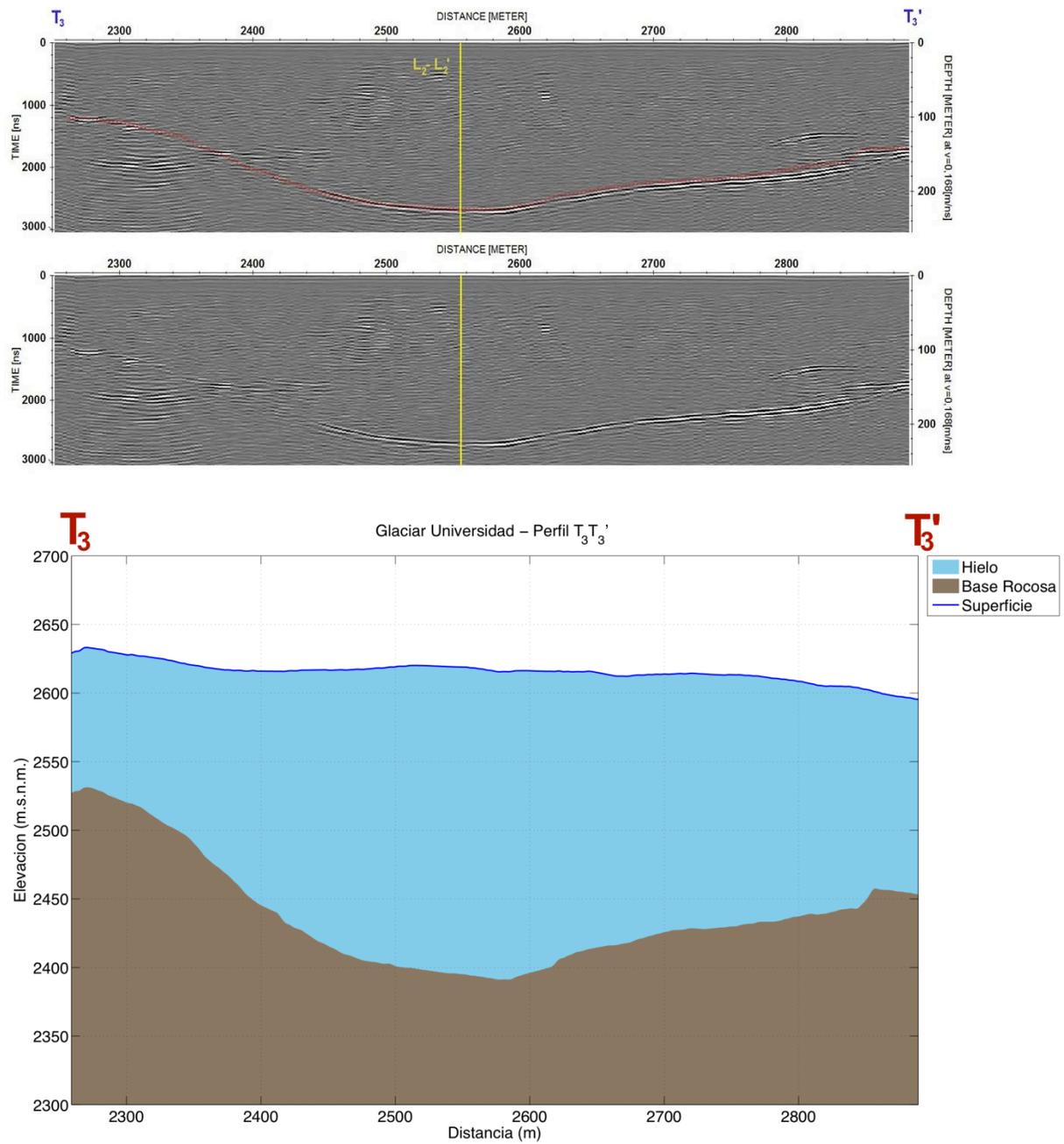


Figura 4.12.7 Perfil transversal T₃-T₃' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

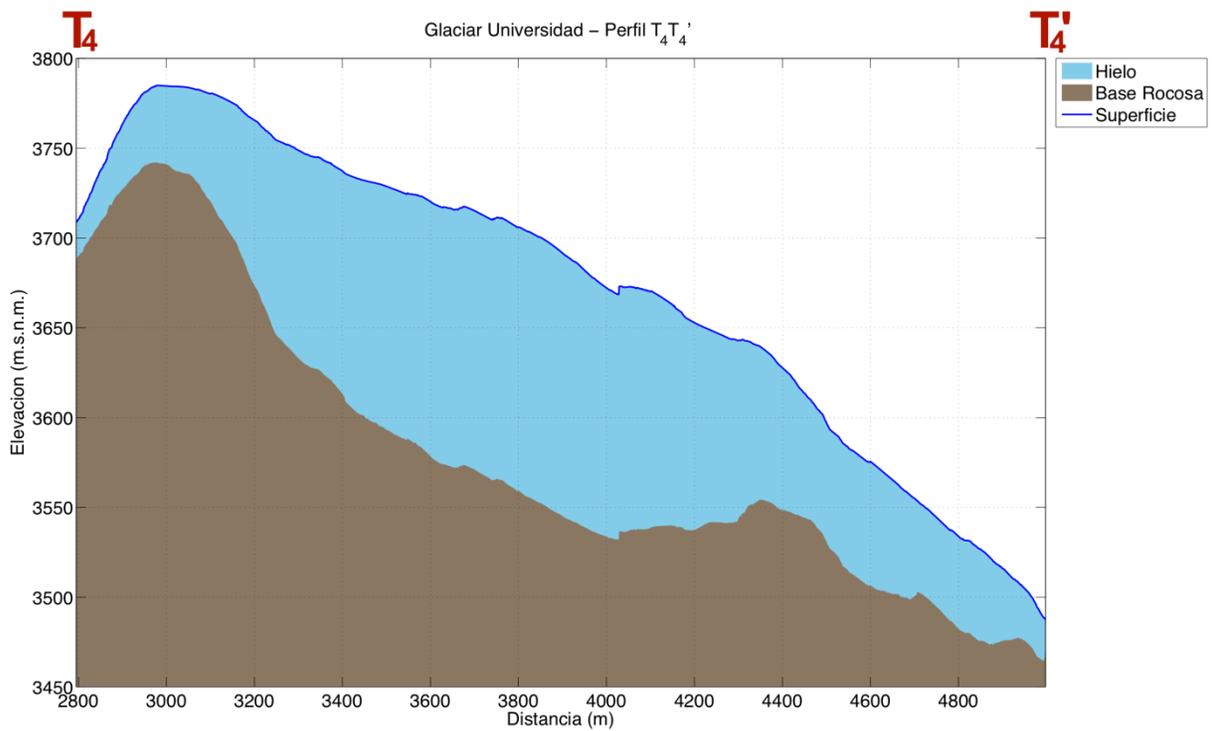
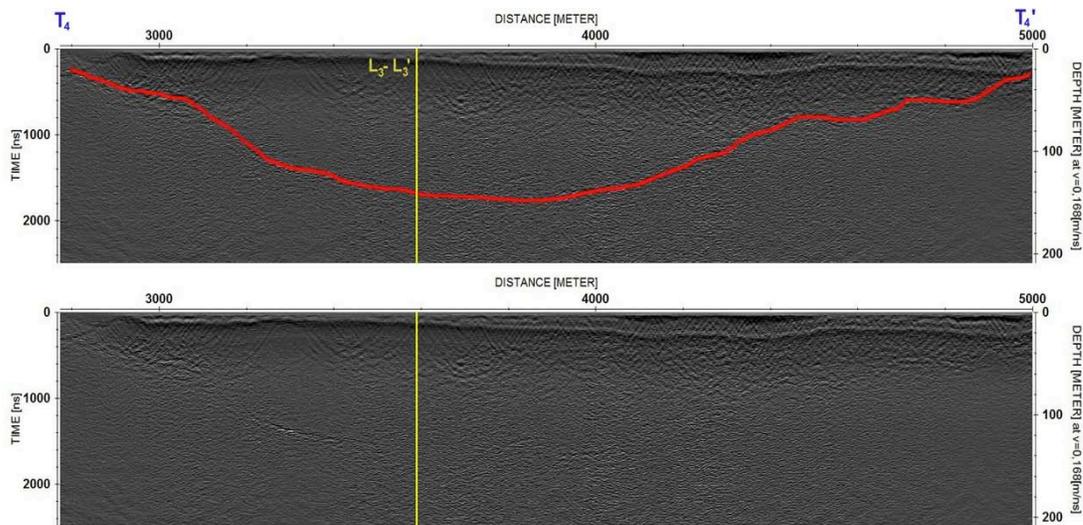


Figura 4.12.8 Perfil transversal T_4 - T_4' en el glaciar Universidad: radargrama migrado con representación vectorial (en línea roja) y datos originales (imagen superior) y representación de la topografía superficial y subglacial (gráfico inferior).

La Tabla 4.12.1 contiene un resumen de la medición de cada perfil, en la cual se detallan: longitud, espesor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, elevación mínima y máxima, y pendiente topográfica de los perfiles L₁, L₂, L₃, T₁, T₂, T₃ y T₄ del glaciar Universidad. Se puede observar que el espesor máximo entre los perfiles longitudinales y transversales es de 332,5 [m] y se encuentra en la longitudinal L₂. El perfil medido más largo se presenta en la longitudinal L₃, donde además se observa la mayor pendiente. El espesor promedio del glaciar Universidad, considerando los espesores de hielo en estos perfiles, es de 162,2 [m] (DE = 73,8 [m]).

Perfil	Longitud (m)	E. min (m)	E. máx (m)	E. prom (m)	E. std (m)	Elev. min (m.s.n.m.)	Elev. máx (m.s.n.m.)	Pendiente topográfica (grados)
L ₁ -L ₁ '	2.328	101,0	289,6	231,4	57,0	3.325	3.550	-5,5
L ₂ -L ₂ '	4.091	4,5	332,5	197,1	68,3	2.474	2.989	-7,2
L ₃ -L ₃ '	4.801	18,3	200,1	119,2	40,0	2.960	3.949	-11,6
T ₁ - T ₁ '	845	55,7	208,0	160,4	44,0	3.435	3.495	-4,1
T ₂ - T ₂ '	773	47,2	326,6	221,5	91,7	2.788	2.816	-2,1
T ₃ - T ₃ '	630	101,9	224,5	177,7	36,7	2.595	2.633	-3,5
T ₄ - T ₄ '	2.203	17,3	147,9	93,2	41,2	3.487	3.785	-8,4

Tabla 4.12.1 Resumen de resultados de espesores mínimos (E. min), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (E. std), elevaciones mínimas (Elev. min) y máximas (Elev. máx) y pendiente estimada en el glaciar Universidad. Espesor promedio: 162,2 [m] (DE = 73,8 [m]).

4.12.2 Volumen

La Figura 4.12.9 muestra la interpolación del espesor para el glaciar Universidad utilizando el método TIN. Los resultados de la estimación de volumen de hielo y el equivalente en agua se basan en esta interpolación y se encuentran detallados en la Tabla 4.12.2. Aquí se puede ver que el volumen equivalente en agua total para el glaciar Universidad es 1,671 [km³].

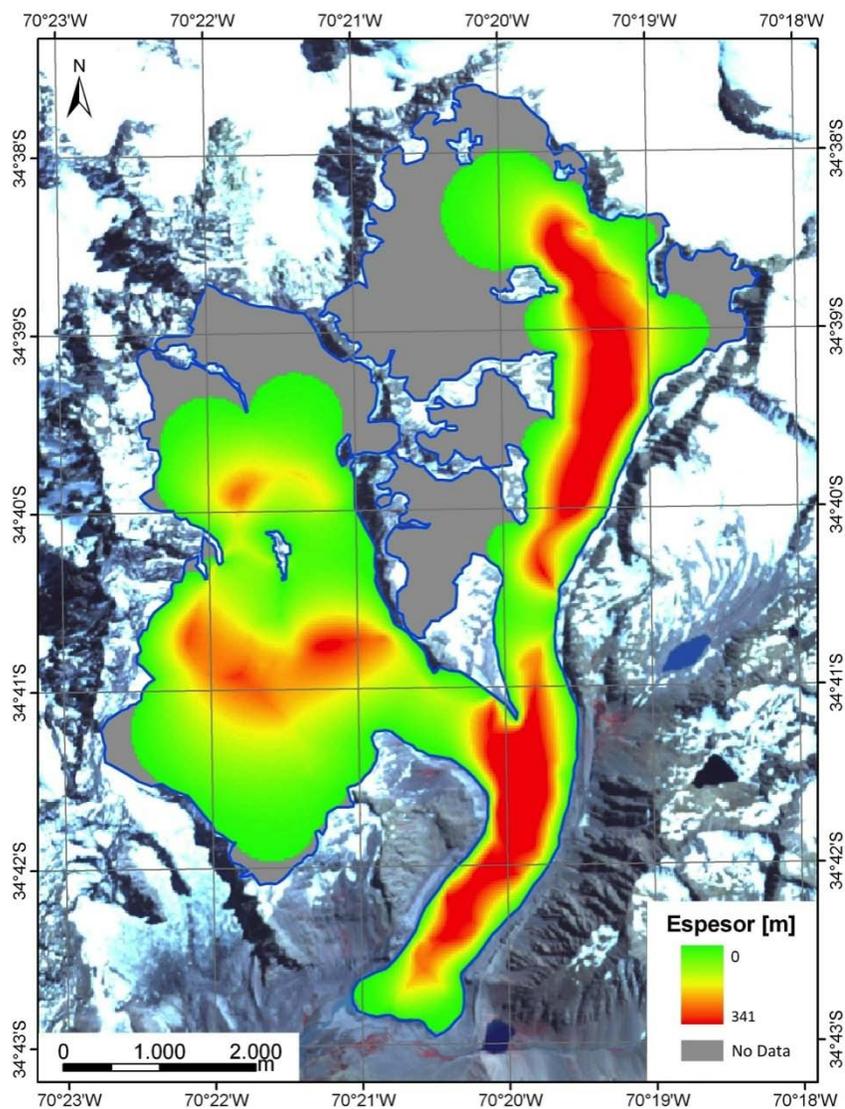


Figura 4.12.9 Interpolación de espesor de hielo en el glaciar Universidad para estimación de volumen de hielo. Se describe el perímetro del glaciar (línea azul), la zona interpolada (en escala de colores) y la zona sin interpolación (color gris). Fuente imagen satelital: ASTER 24 de febrero de 2007.

Glaciar	Área con espesores interpolados mediante TIN [km ²]	Volumen de hielo de área TIN interpolada [km ³]	Área total del glaciar [km ²]	Volumen de hielo en área total del glaciar [km ³]	Volumen equivalente en agua en área total del glaciar [km ³]
Universidad	20,255	1,062	29,034	1,943	1,671

Tabla 4.12.2 Volúmenes de hielo y agua en el glaciar Universidad.

4.12.3 Comparación con mediciones 2009

Datos existentes obtenidos con radar terrestre y otras metodologías previamente en el glaciar Universidad fueron usados para analizar variaciones de altura superficial y espesor del hielo acumulado.

La Figura 4.12.10 muestra la tasa anual de variación en elevación observada desde 1955 al 2000 (azul) y desde el 2000 al 2009 (rojo). El promedio observado para los últimos años es de -2,5 [m].

Los datos GPS 2009 fueron comparados con los datos de topografía superficial medidos para el presente estudio. La comparación considera las secciones de vuelo longitudinales y transversales presentadas anteriormente para los cuales existen datos del 2009 (Figura 4.12.11). La diferencia de altura promedio obtenida para el período 2009-2012 es de -4,9 [m]. El set de datos resultantes para la diferencia de elevación varía entre -59,7 y 64,1 [m] (Figura 4.12.12) donde las más altas variaciones se registran en la parte baja del glaciar. Es altamente posible que el amplio rango de variación sea producto de los errores que involucran la medición por sí misma y la posterior comparación punto a punto, y no necesariamente representan valores reales.

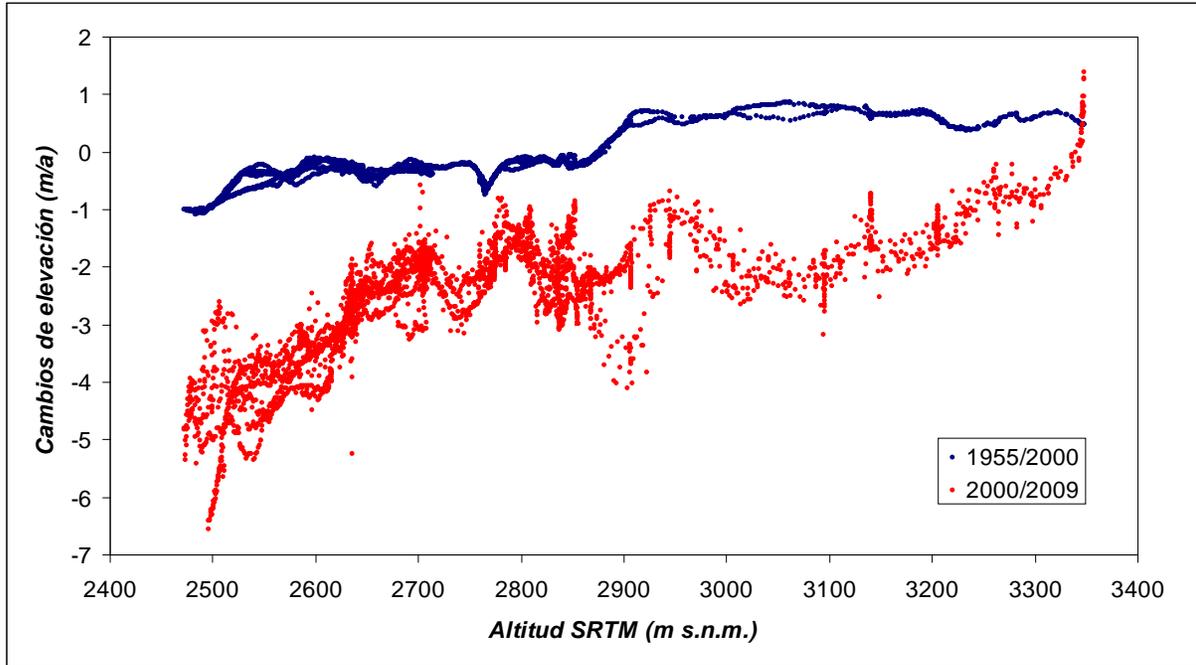


Figura 4.12.10 Cambios de elevación observados a lo largo del glaciar Universidad usando datos IGM-GPS-SRTM 1955-2000 (puntos color azul) y datos GPS-RSTM 2000-2009 (puntos color rojo). Fuente: CECs.

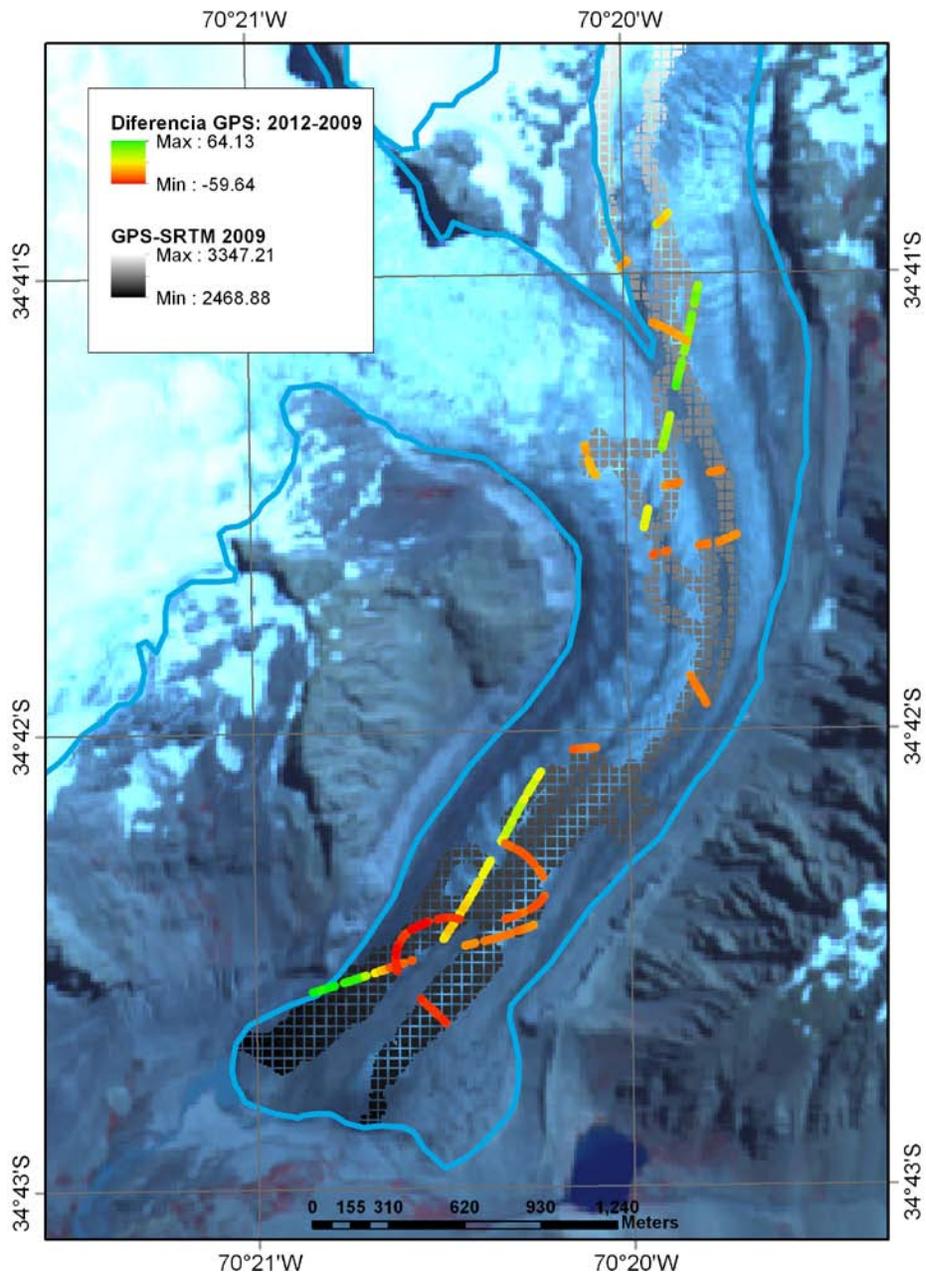


Figura 4.12.11 Variación de elevación entre datos obtenidos para los vuelos realizados sobre el glaciar Universidad del presente estudio (escala de colores) y datos GPS-SRTM 2009 (escala de grises). Fuente: CECs.

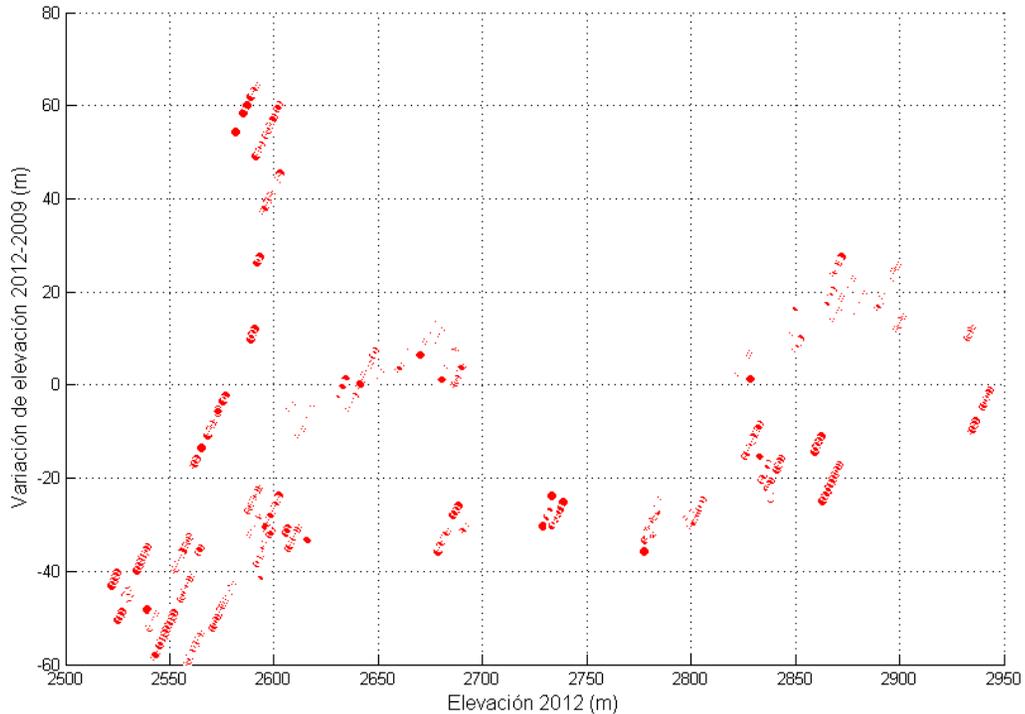


Figura 4.12.12 Diferencia de elevación (eje Y) entre puntos coincidentes de superficie medidos durante el 2009 y datos 2012 (eje X). Las diferencias varían entre -59,7 y 64,1 [m]. Promedio de -4,9 [m] (DE 24,3 [m]).

De los resultados obtenidos utilizando radar terrestre en el 2009 (DGA, 2009b) fueron seleccionados los perfiles coincidentes con los presentados en la sección 4.12.1. Los perfiles L_2-L_2' y T_3-T_3' fueron entonces comparados con las mediciones del 2009, las cuales se muestran en la Figura 4.12.13 (amarillo).

El análisis de la comparación incluye el factor de distancia (superficial) de los espesores de hielo medidos. La Figura 4.12.14 muestra el set de puntos para los que las mediciones en ambos años (2009 y 2012) no superan los 30 metros de distancia y la diferencia de espesores obtenidos (Eje Y) con respecto al espesor medido con el radar aerotransportado en el presente estudio (Eje X). La diferencia promedio de espesores medidos es de -24,1[m] con una DE de 7,6 [m]. En el gráfico se puede notar que la distancia entre puntos medidos no parece ser determinante en la variación de espesor observado.

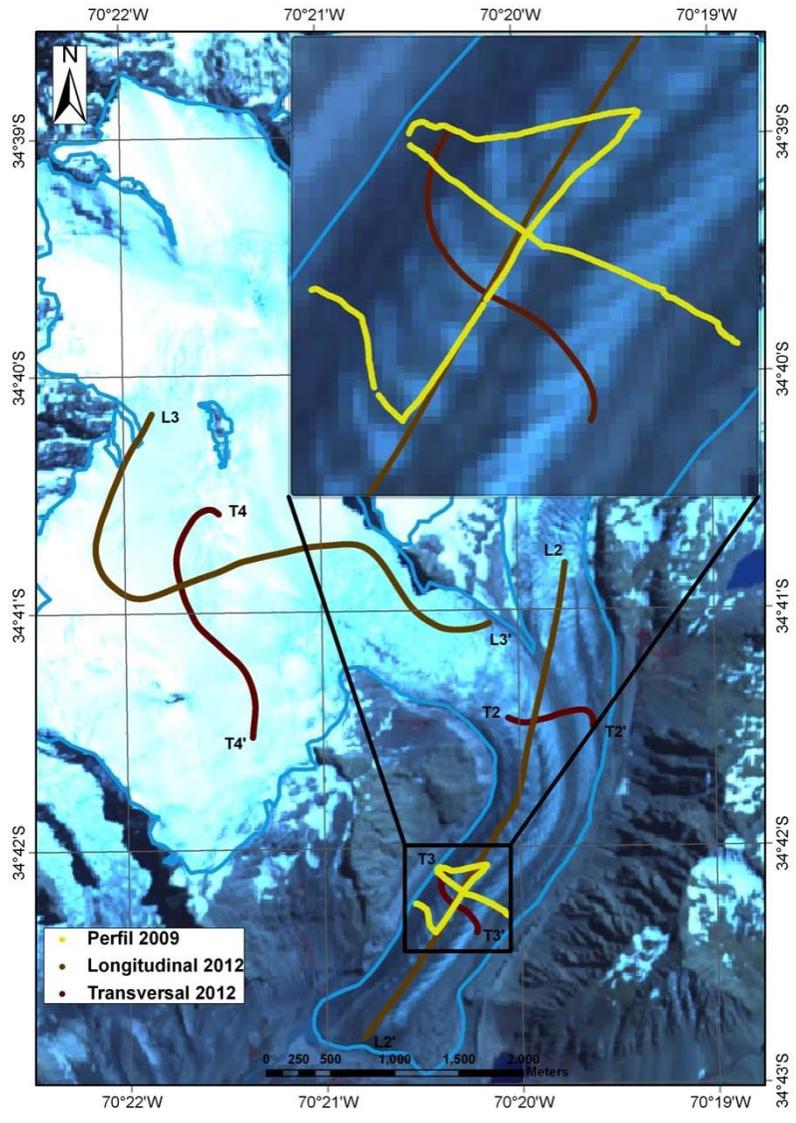


Figura 4.12.13 Secciones de perfiles coincidentes en el glaciar Universidad en los años 2009 y 2012.

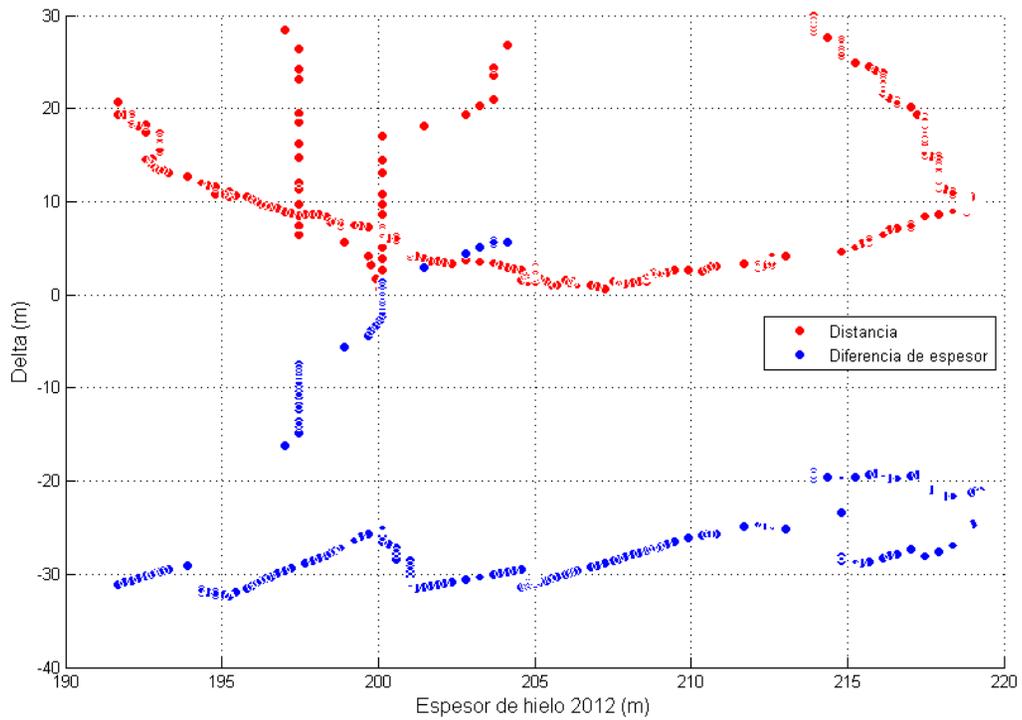


Figura 4.12.14 Set de puntos coincidentes de mediciones de espesor para 2009 y 2012. El eje Y representa un delta (en metros) que corresponde a la distancia entre puntos y la variación de espesores medidos en el 2009 y 2012. El radio máximo entre puntos comparados es de 30,0 [m].

4.13 Resumen de Resultados

Se han presentado los principales resultados de cada glaciar en las secciones 4.1 a 4.12. La Tabla 4.13.1 presenta un resumen de resultados de los glaciares estudiados, en la cual se detallan: espesor máximo, espesor promedio (considerando todos los datos de transversales y longitudinales), área y volumen de interpolación, y área y volumen (hielo y equivalente en agua) total estimado. El espesor máximo entre los glaciares estudiados de la cuenca del río Maipo se registró en el glaciar Esmeralda con 151,4 [m], mientras que el espesor máximo medido en los glaciares de la cuenca del río Rapel se observó en el glaciar Universidad con 342,4 [m]. Consecuentemente los mayores volúmenes de agua de las cuencas mencionadas se registraron también en los glaciares Esmeralda y Universidad, siendo éstos 0,22 [km³] y 1,67 [km³], respectivamente.

Glaciar	E. máx (m)	E. prom L _i T _i (m)	E. std (m)	Área de interpolación (km ²)	Volumen de interpolación (km ³)	Área total (km ²)	Volumen total (km ³)	Volumen agua (km ³)
Esmeralda	151,4	66,3	35,3	5,48	0,21	5,88	0,25	0,22
La Paloma	82,9	30,1	16,3	1,28	0,03	1,43	0,04	0,04
Del Rincón	88,4	31,2	16,4	0,64	0,01	0,74	0,02	0,02
Cerro El Plomo	97,3	44,5	23,6	1,00	0,02	1,25	0,04	0,03
Yeso	127,5	84,7	26,9	1,63	0,09	1,70	0,05	0,05
Bello	137,6	61,4	28,4	3,60	0,15	3,79	0,15	0,12
Yeso 2	94,6	62,8	19,2	1,14	0,04	1,31	0,04	0,03
Echaurren	22,2	18,8	3,4	-	-	-	-	-
Mesón Alto	116,1	72,2	25,7	1,37	0,06	1,39	0,04	0,04
San Francisco	89,5	42,9	22,9	0,93	0,02	1,00	0,03	0,02
Cipreses Norte	204,6	87,9	33,1	13,76	0,74	14,95	0,83	0,72
Universidad	342,4	162,2	73,8	20,26	1,06	29,03	1,94	1,67

Tabla 4.13.1 Resumen de resultados de espesor máximo (E. máx), promedio (E. prom), desviación estándar (E. std), área y volumen de interpolación, área y volumen total, y volumen equivalente en agua total para cada glaciar en estudio.

La Figura 4.13.1 muestra los puntos (azul) de volumen de interpolación (usando el método TIN) versus área de interpolación para los glaciares en estudio (exceptuando el glaciar Echaurren). Los ejes X e Y han sido representados de forma logarítmica para una mejor visualización.

Al conjunto de puntos de volumen de interpolación versus área de interpolación, se ajustó una curva de la forma $y(x) = a \cdot x^b$, donde x es la superficie total e y es el volumen total proyectado. La curva de ajuste (negra) arrojó los valores $a = 0,0265$ y $b = 1,2750$, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,96, lo cual implica una correlación positiva fuerte. Utilizando esta función se obtuvieron los volúmenes estimados de la última columna de la Tabla 4.13.1.

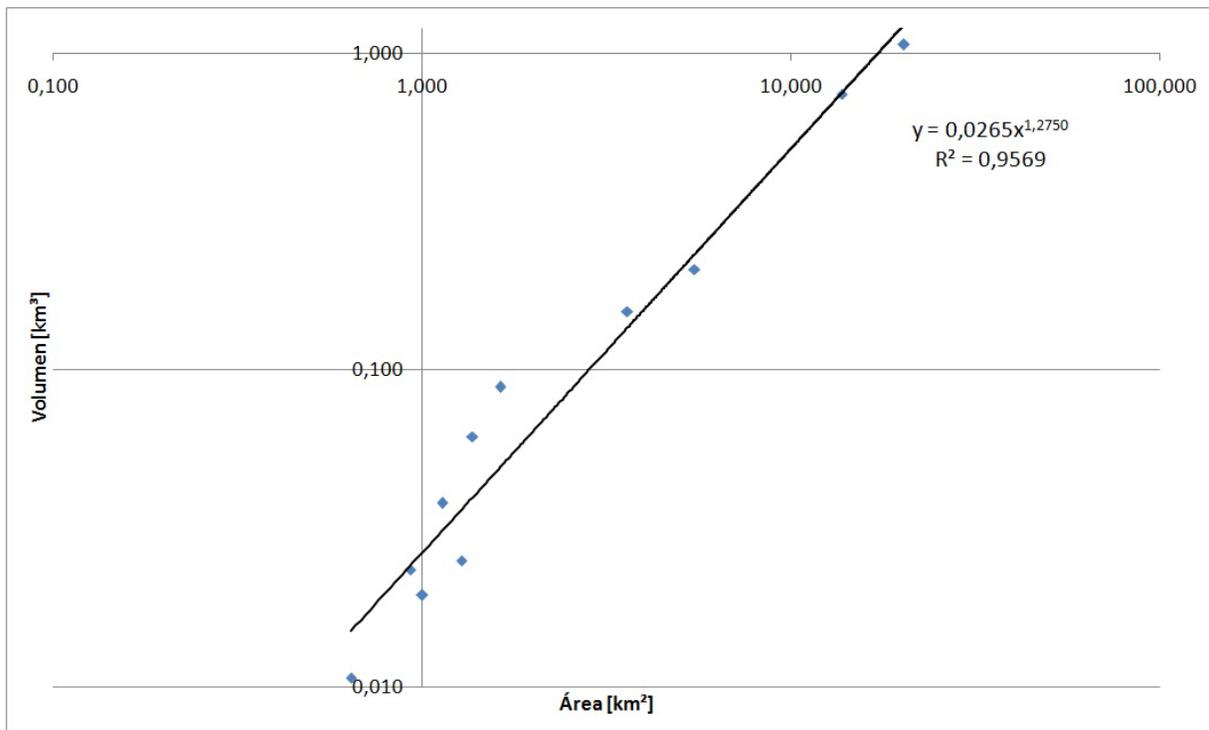


Figura 4.13.1 Gráfico de dispersión de volumen de interpolación vs área de interpolación de los glaciares en estudio (rombos color azul) y curva de regresión (color negro) para la estimación del volumen total.

5 DISCUSIÓN

5.1 Cambios de espesor de hielo en Chile central y su relación con la variabilidad climática

En Chile central se advierten cambios muy contrastantes en las temperaturas de la baja y la alta tropósfera. Este patrón climático analizado por Falvey y Garreaud (2009) entre 1976 y 2006 se caracteriza por un enfriamiento del aire en superficie registrado en estaciones costeras debido a un Anticiclón reforzado, mientras que se detectó un calentamiento de $+0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en las estaciones de alta cordillera. Una revisión de las temperaturas en la estación Embalse el Yeso (DGA) en el período 1980-2012 muestra un calentamiento de $0.15^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Figura 5.1.1), indicando que esta tendencia se mantiene consistente al finalizar la primera década del siglo XXI. Dicho calentamiento troposférico se detecta en varias estaciones de radiosonda del país y ha sido relacionado con el aumento en la elevación de la isoterma de 0°C (Carrasco et al., 2008). Este aspecto puede traducirse no sólo en una mayor energía disponible para el derretimiento de la superficie de los glaciares de esta región, sino en un cambio de la precipitación, desde sólida a líquida, lo que en conjunto genera un efecto negativo en el balance de masa glaciar.

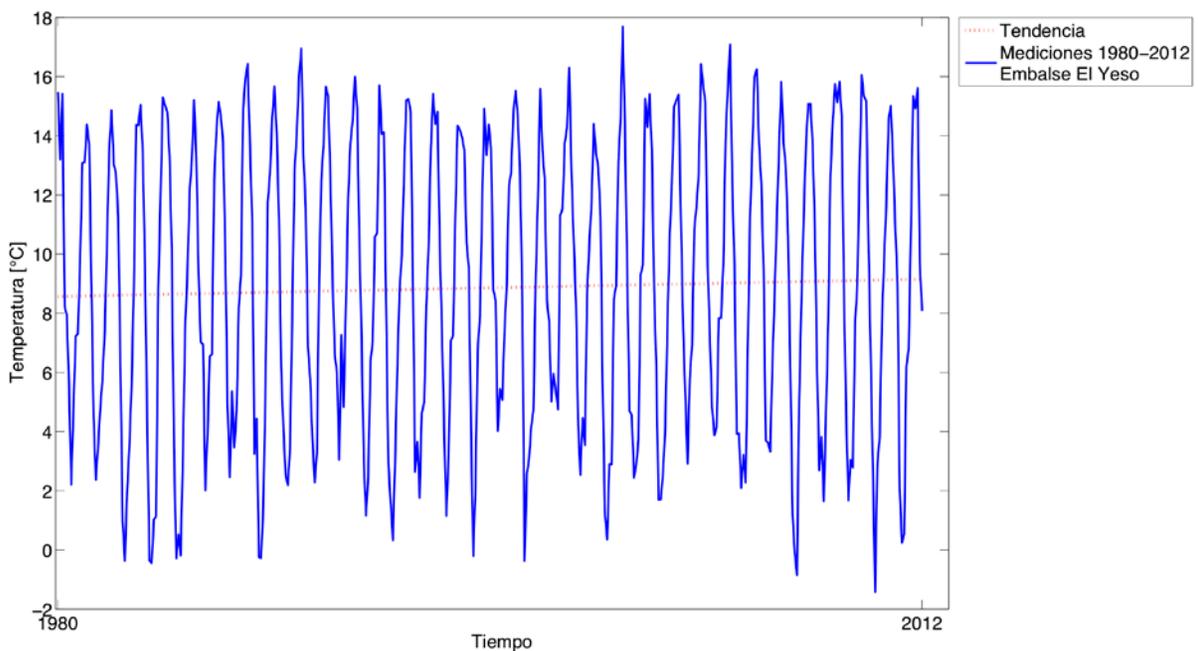


Figura 5.1.1 Temperaturas medias mensuales (en grados celcius) entre enero 1980 y marzo de 2012 (azul) en la estación Embalse El Yeso y la tendencia lineal del período (rojo). Fuente: DGA.

La evolución de la precipitación en Chile central está muy relacionada con las anomalías en el sistema océano-atmósfera en diferentes escalas temporales y espaciales (Rosenblüth et al., 1997; Escobar y Aceituno, 1998; Montecinos y Aceituno, 2003; Masiokas et al., 2006). El cambio hacia la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico a mediados de los setenta ha determinado una mayor frecuencia de episodios Niño y así también de años lluviosos (Quintana y Aceituno, 2012), sin embargo hoy es perceptible una situación de déficit pluviométrico asociado a variabilidad interanual que se ha prolongado en la última década. Así es como en el año 2012 la existencia de una condición Niño de intensidad moderada no logra contrarrestar el actual déficit y por el contrario, se anticipa una importante situación de sequía estival (Boletín Climático DGF: <http://met.dgf.uchile.cl/clima/>, visitado el 7 de Noviembre de 2012). Naturalmente, la acumulación nivosa sobre los glaciares de esta región se ve influida según el signo e intensidad de la señal en el Pacífico ecuatorial, aumentando por sobre lo normal durante los inviernos en que está presente la fase Niño, y por el contrario, disminuyendo bajo el promedio en presencia de la Niña (Escobar y Aceituno, 1998).

De los numerosos estudios de variaciones de glaciares en la zona central se concluye una situación indiscutible de retroceso frontal y reducción areal en respuesta a los aumentos de temperaturas y parcialmente, a la disminución de la precipitación (Rivera et al., 2000 y 2002). En algunas cuencas ya se ha detectado, una tendencia a la disminución del caudal (Pellicciotti et al., 2007), pero la mayor contribución por derretimiento de los glaciares es probable que esté generando un aumento de caudales en varias cuencas superiores englaciadas de la región (Casassa et al., 2009). Los cambios de espesor de hielo son conocidos en pocos glaciares de la región pero se detecta una señal de adelgazamiento no despreciable en relación a los volúmenes allí almacenados. Entre ellos destacan los glaciares localizados en la cabecera del Maipo, Juncal Sur y G32, con tasas anuales respectivas de -1 y $-1,4$ [m a^{-1}] a partir de 1955, año en que se tuvieron las primeras fotografías verticales. En otros glaciares, tales como Esmeralda y Juncal Norte, se han obtenido valores negativos aunque bajo el error de medición (Rivera et al., 2002; Bown et al., 2008).

5.1.1 Glaciar Echaurren

El balance de masa acumulado del glaciar Echaurren es de $-7,2$ [m eq a.] (DGA, 2010), manteniéndose en niveles muy negativos en años recientes, en particular durante el período 2011-2012 cuando alcanzó un valor de $-2,4$ [m eq a.]. Este ha sido acompañado por el retroceso frontal estimado en los -18 [m a⁻¹] en el período 1986 y 2011 (DGA, 2011b).

La insuficiencia de resultados de espesores de hielo en el glaciar Echaurren en este estudio ha sido potencialmente debido a la condición de hielo temperado que presenta el glaciar, que resultó en alta dispersión y atenuación de la señal y que impidió visualizar claras y continuas reflexiones del fondo rocoso. Por lo tanto, se procedió a analizar las posibles variaciones del glaciar Echaurren basados en los datos GPS de superficie correspondientes al estudio realizado por DGA en el 2009 y los datos GPS de los vuelos 2012.

De acuerdo a lo visto en la sección 4.8.3 se obtuvo un anómalo engrosamiento (puntual) de entre 5 y 7 [m a⁻¹] en base al cruce de los datos GPS en los años 2009 y 2012, sin embargo, estos resultados no son suficientes ya que la muestra consiste en sólo cuatro puntos donde hay mediciones coincidentes para ambos estudios. Además los resultados son poco representativos espacialmente, ya que se encuentran en la parte superior (norte) del glaciar la que desde hace algunos años se había desconectado del cuerpo de hielo principal. Por lo tanto, un análisis estadístico de estos datos resultaría inválido.

Por los antecedentes del glaciar Echaurren, es factible esperar una tendencia al adelgazamiento que no ha sido posible confirmar con nuestros resultados.

5.1.2 Glaciar San Francisco

La tendencia sostenida de calentamiento troposférico y los cambios recientes en la pluviometría son indicativos de una situación de adelgazamiento que responde de forma similar a los glaciares antes mencionados para el Maipo superior. Los cuatro puntos de comparación de espesor de hielo en el glaciar San Francisco (sección 4.10.3) indicaron diferencias de entre $-1,7$ y -13 [m a⁻¹] en los últimos tres años (2009 y 2012). Si bien el rango de adelgazamiento obtenido se encuentra posiblemente sobreestimado, los valores estimados como resultado de la comparación de espesores son esperables frente a la variabilidad climática de la región. Tasas de adelgazamiento sobre los 10 [m] resultan razonables en glaciares de grandes extensiones y sometidos a controles topográficos y dinámicos como en Patagonia (Rignot et al., 2003), sin embargo, no sería el caso en glaciares andinos de menos de 10 [km²] de superficie y que no experimentan desprendimientos. Los datos disponibles han permitido representar moderadamente los cambios de espesor en la parte central del glaciar y son altamente sugerentes de un cambio de espesor, sin embargo, debido a la cantidad de puntos y la localización de estos, no se puede asumir que sean representativos del total de la masa glaciar.

5.1.3 Glaciar Universidad

Datos existentes del glaciar Universidad fueron utilizados para analizar posibles variaciones de su espesor de hielo. En primer lugar, los datos de variación de elevación previos al 2009 (IGM-GPS-SRTM) indican una disminución en la altura superficial promedio del glaciar de 2,5 [m] anuales. En segundo lugar, usando los datos GPS de los vuelos 2012 y comparados a la misma base de datos anterior (2009), resultaron en una disminución en la altura superficial promedio de -1,6 [m] anuales (para el período 2009-2012). Ambos resultados no difieren en gran medida, no obstante, esta aproximación considera toda la extensión del glaciar donde existen datos (ver Figura 4.12.11). Por lo tanto, la comparación entre mediciones de espesor de hielo utilizando radar terrestre (datos CECs 2009) y radar aerotransportado (2012) complementa la información previa para una zona específica en donde existen perfiles que coinciden espacialmente. En los resultados obtenidos para los puntos medidos en ambas oportunidades, la comparación entre puntos no supera la distancia máxima de 30 [m]. Dado este set de puntos comparables se obtiene una disminución promedio de -8,0 [m] anuales. Cabe destacar que la distancia entre puntos medidos no parece ser determinante en la variación de espesor observado. Una posible explicación es la ubicación de los puntos en el glaciar (ver Figura 4.12.13) que sugiere una mayor homogeneidad en la topografía subglacial y en que, por lo tanto, el radio utilizado en el análisis (30 [m]) no influencia diferencias de espesor substanciales.

5.2 Tamaño de glaciar versus espesores

En la Figura 5.2.1 se observa la gráfica de volumen de hielo total (en km^3) versus espesor máximo (en metros) para los glaciares en estudio (excepto glaciar Echaurren). Se aprecia una relación entre estas variables, ya que a medida que el espesor aumenta, también lo hace el volumen de hielo total, especialmente a partir de los 125 [m] de espesor.

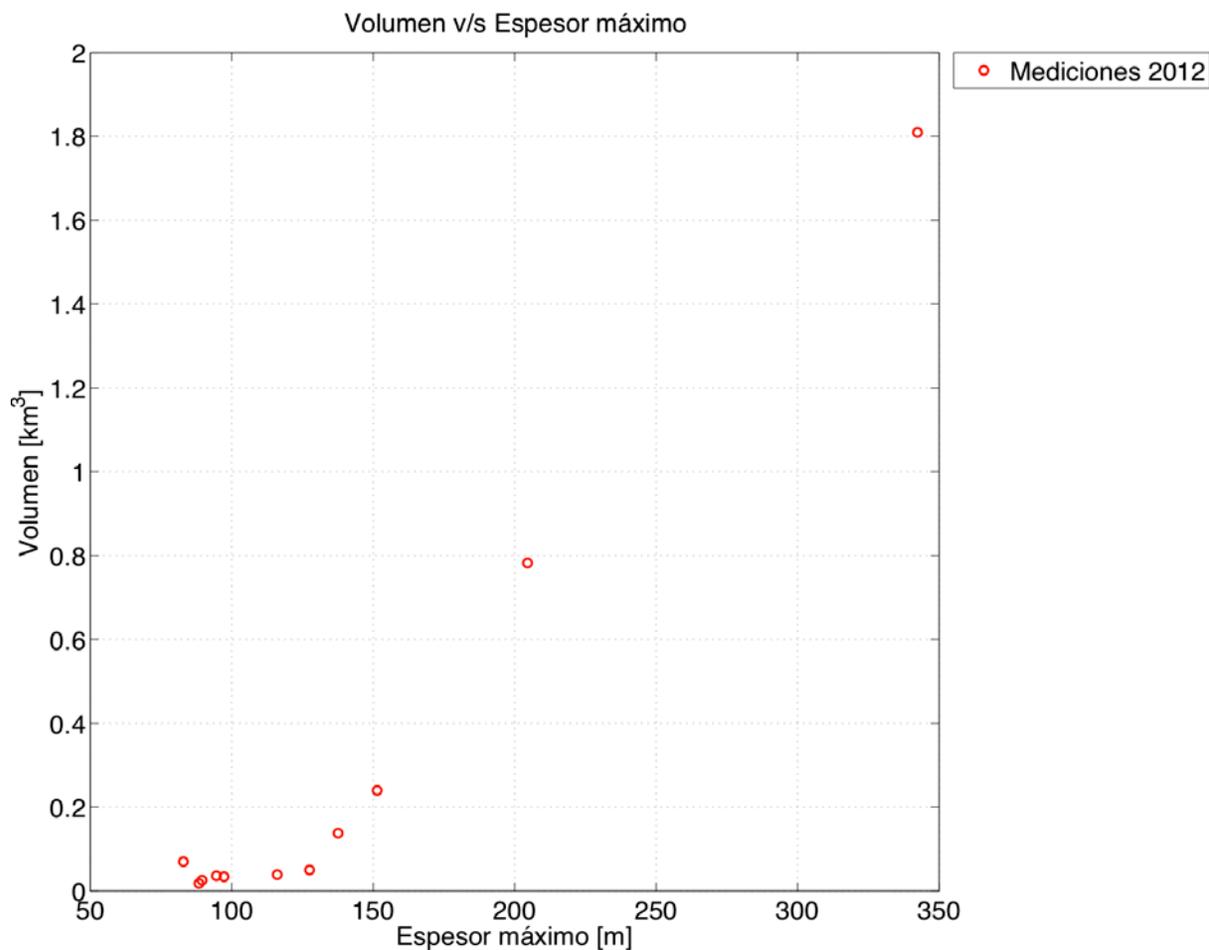


Figura 5.2.1 Gráfico de volumen versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente estudio.

En la Figura 5.2.2 se encuentra la gráfica de área total (en km^2) versus espesor máximo (en metros) para los glaciares en estudio (excepto glaciar Echaurren). Se puede apreciar, al igual que en la Figura 5.2.1, una relación entre estas variables. A medida que el espesor aumenta, también hay un incremento en el área total del glaciar, especialmente a partir de los 125 [m] de espesor.

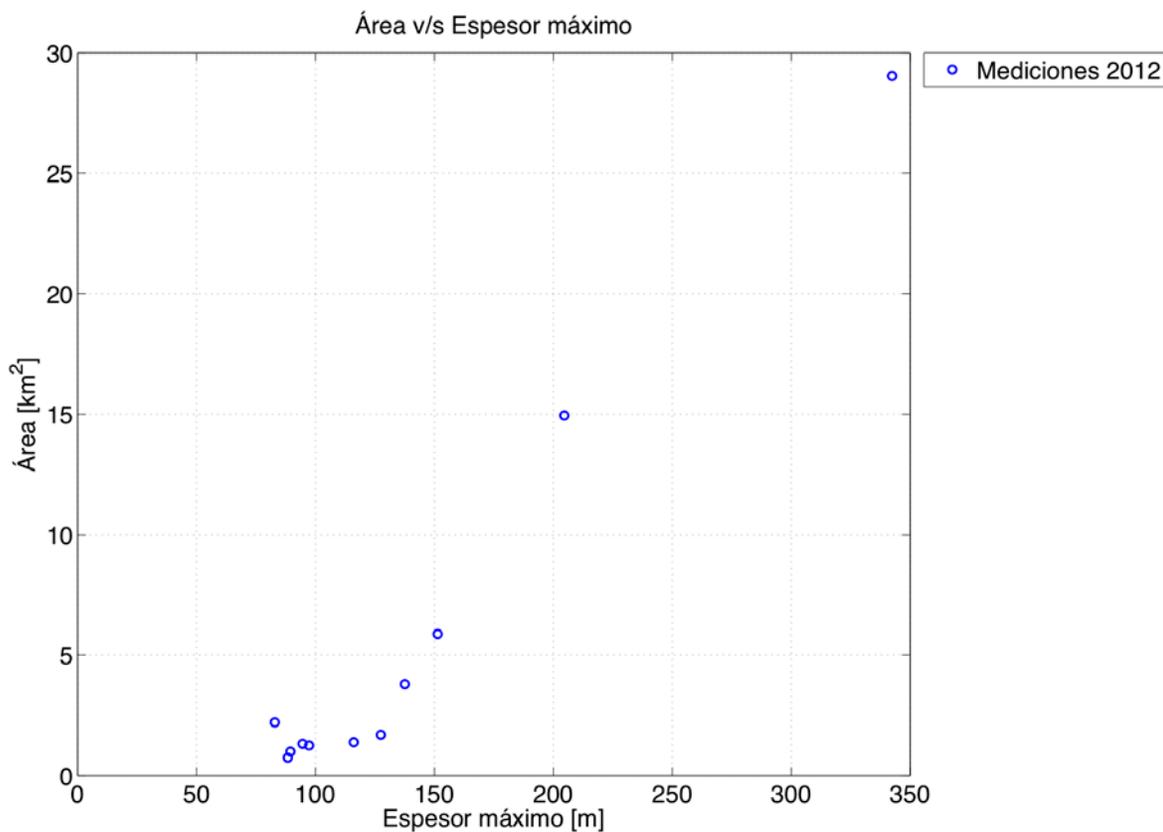


Figura 5.2.2 Gráfico de área total versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente estudio.

En la Figura 5.2.3, se han graficado los puntos de área total de glaciar versus espesor máximo de distintos estudios en glaciares Juncal Norte y Casa Pangué (Rivera et al., 2001), Mocho y Villarrica (Rivera et al., 2006), San Francisco y Echaurren (DGA, 2009b), Monos de Agua, Juncal Sur, Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma, Cipreses, Palomo y Cortaderal (DGA, 2011a), y los realizados en el presente estudio (excluyendo Echaurren). En este gráfico no se han incluido los glaciares presentes en Patagonia (San Rafael, Colonia, Steffen, Nef, entre otros), los cuales tienen espesores de hielo superiores a 700 [m]. En general, se aprecia que el espesor máximo aumenta a medida que el área aumenta su valor. Los puntos que están más dispersos en el gráfico corresponden a los glaciares Mocho, Villarrica, y al glaciar Cipreses. Esto se puede explicar señalando que el área total es mucho mayor al área considerada para las mediciones de espesor de hielo, como ocurrió en ese último glaciar (DGA, 2011a).

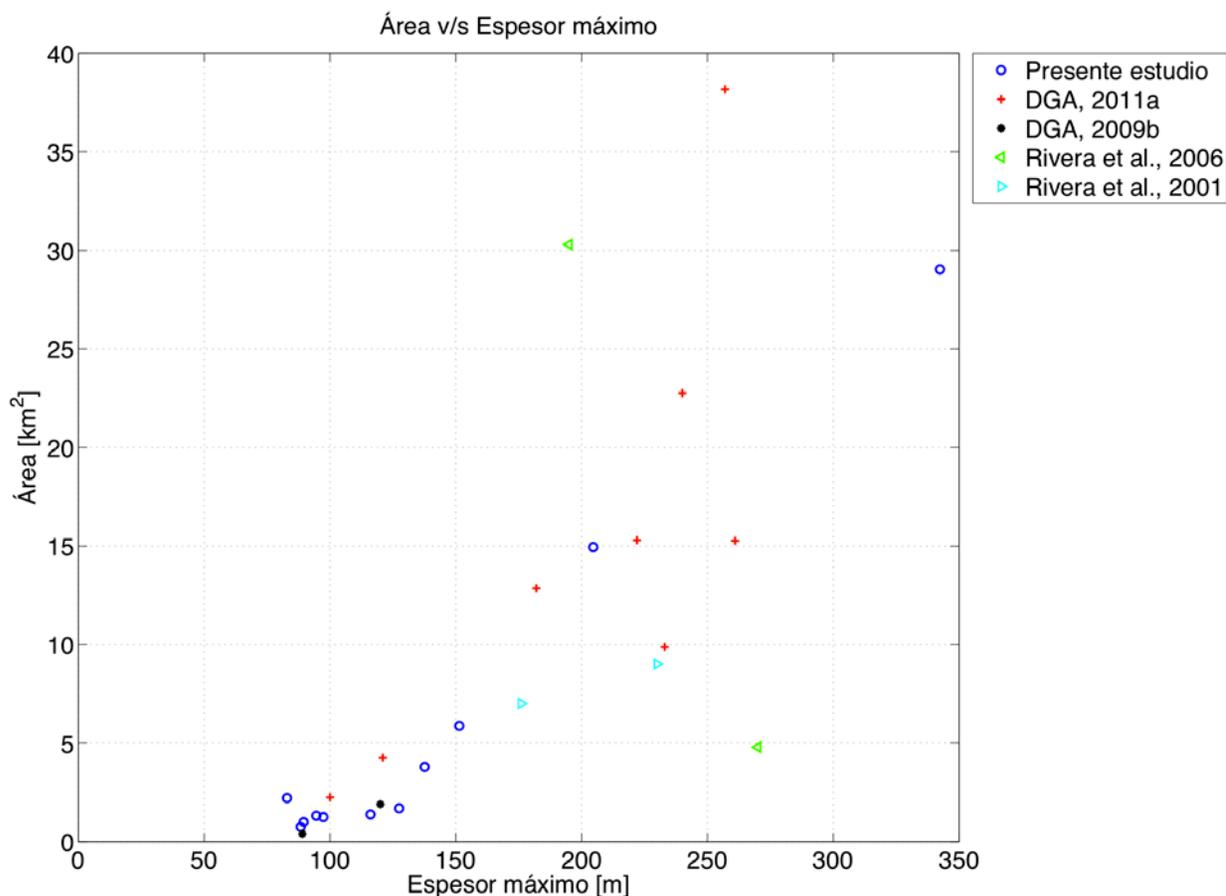


Figura 5.2.3 Gráfico de área versus espesor máximo en los distintos glaciares en estudio del presente proyecto y en glaciares estudiados por otros autores.

5.3 Estimación de error.

Desde la Tabla 5.3.1 hasta la Tabla 5.3.11 se observa un análisis de precisión de las mediciones realizadas con radar aerotransportado para los glaciares en estudio (exceptuando el glaciar Echaurren). La diferencia promedio máxima registrada se encontró en el glaciar Cipreses Norte con 11,7 [m], mientras que la menor diferencia promedio se registró en el glaciar Yeso 2, con 0,8 [m]. Por otro lado, considerando todos los glaciares se obtuvo una diferencia porcentual de 8,3%. Este valor, que corresponde al error de las mediciones, es similar a las estimaciones de error realizadas con RES en otras regiones del país (Rivera et al., 2001).

De las mediciones realizadas con una antena de 30 [MHz] durante el año 2011 (DGA, 2011a) en la misma zona (cuenca del Maipo, Aconcagua y Rapel), se encontró que la menor diferencia promedio fue de 3,0 [m] en el glaciar Olivares Gamma considerando los cruces de mediciones y la mayor diferencia promedio se observó en el glaciar Olivares Beta con 4,6 [m].

De acuerdo a lo anterior, la precisión obtenida en las mediciones del presente estudio se mantiene dentro de un rango aceptable, en comparación a la precisión obtenida el 2011 (DGA, 2011a), y considerando los espesores máximos de cada glaciar.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₄	2.614	387149	6323313	24,8	7,5	30,2
L-T ₃	3.457	387982	6323254	108,7	9,1	8,3
L-T ₂	4.982	389419	6323614	36,8	4,9	13,4
Promedio					7,2	

Tabla 5.3.1 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Esmeralda.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₁	253	382190	6327599	13,7	1,1	8,3
L-T ₂	864	382162	6327077	17,3	2,6	15,3
L-T ₃	1.753	381558	6326445	41,3	0,7	1,8
Promedio					1,5	

Tabla 5.3.2 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar La Paloma.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₁	1.048	380540	6327674	56,8	2,2	3,9
L-T ₂	1.189	380604	6327553	26,7	3,7	13,8
L-T ₃	1.909	380515	6326934	16,4	1,0	6,0
Promedio					2,3	

Tabla 5.3.3 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Del Rincón.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₁	361	386049	6321463	26,2	3,9	14,9
L-T ₂	1.281	385688	6320678	68,9	0,2	0,3
L-T ₃	2.034	385750	6320092	52,3	3,8	7,2
Promedio					2,6	

Tabla 5.3.4 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Cerro El Plomo.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₁	1.674	414601	6288806	117,9	1,8	1,5
L-T ₂	2.455	414840	6289476	90,0	7,3	8,1
L-T ₃	3.335	414293	6290104	81,2	5,0	6,2
Promedio					4,7	

Tabla 5.3.5 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Yeso.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₃	1.621	412472	6288955	28,9	0,3	1,0
L-T ₂	2.471	412090	6289557	92,8	1,1	1,1
L-T ₁	3.116	411631	6289990	37,5	3,7	9,8
Promedio					1,7	

Tabla 5.3.6 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y los perfiles transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Bello.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₃	1.642	419125	6290173	62,5	0,8	1,2

Tabla 5.3.7 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversal (T₃) en coordenadas UTM en glaciar Yeso 2.

Perfiles	Distancia en L _i (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L _i (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L ₁ -T ₂	6.154	403132	6271666	82,6	4,3	5,3
L ₂ -T ₂	1.693	403146	6271658	91,0	1,2	1,3
L ₂ -T ₁	2.150	403423	6272012	77,6	6,2	8,0
Promedio					3,9	

Tabla 5.3.8 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre los perfiles longitudinales (L_i) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Mesón Alto.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₂	4.771	400533	6264882	62,6	8,0	12,7

Tabla 5.3.9 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y transversal (T₂) en coordenadas UTM en glaciar San Francisco.

Perfiles	Distancia en L (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L-T ₂	2.880	375746	6178097	95,4	0,8	0,9
L-T ₃	4.131	376016	6179293	58,99	33,8	57,3
L-T ₄	6.367	377060	6181236	113,0	0,6	0,5
Promedio					11,7	

Tabla 5.3.10 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre el perfil longitudinal (L) y los perfiles transversal (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Cipreses Norte.

Perfiles	Distancia en L _i (m)	Este (m)	Norte (m)	Espesor en L _i (m)	Diferencia (m)	Diferencia (%)
L ₁ -T ₁	5.852	379177	6165067	151,97	5,78	3,8
L ₂ -T ₂	2.850	377989	6160390	331,41	10,9	3,3
L ₂ -T ₃	4.428	377372	6158961	215,24	8,92	4,1
L ₃ -T ₄	11.989	375242	6161442	140,59	0,16	0,1
Promedio					6,7	

Tabla 5.3.11 Precisión en la estimación de profundidades observadas en cruces entre los perfiles longitudinales (L_i) y transversales (T_i) en coordenadas UTM en glaciar Universidad.

6 CONCLUSIONES

Luego de la realización de este proyecto se puede concluir lo siguiente:

- a) Se logró el principal objetivo de estimar el volumen de agua en todos los glaciares de estudio en las cuencas del río Maipo y río Rapel, exceptuando el glaciar Echaurren, debido a la insuficiencia de datos de espesor existentes en dicho glaciar. Los mayores volúmenes de agua de las cuencas Maipo y Rapel se obtuvieron en los glaciares Esmeralda (0,22 [km³]) y Universidad (1,67 [km³]), respectivamente.
- b) Se cumplió el objetivo de determinar el espesor y la topografía subglacial en distintos perfiles longitudinales y transversales de los glaciares en estudio mediante la técnica de radio eco sondaje. El uso del sistema de radar aéreo operando a una frecuencia de 50 [MHz] resultó ser más adecuado para los glaciares en estudio de la cuenca de Maipo que para los glaciares de la cuenca de Rapel (Universidad y Cipreses Norte), lo cual se evidenció con los claros retornos de fondo rocoso. En la región norte (Maipo) los glaciares están a una altura promedio de hasta 5.000 m.s.n.m., y en el sur (Rapel), éstos se encuentran en promedio a una altura inferior a los 4.000 m.s.n.m. Si bien los glaciares pertenecientes a ambas cuencas tienen características de hielo temperado, los de la cuenca de Rapel (al encontrarse a una menor altura) presentan mayor derretimiento supra e intraglacial produciendo mayor dispersión (scattering). Esto dificultó la interpretación de fondo de hielo en algunos sectores del glaciar. Por lo anterior, se recomienda el uso de antenas de menor frecuencia en glaciares temperados.
- c) Se realizó un levantamiento RES en un perfil longitudinal y al menos tres transversales en todos los glaciares en estudio. Además, se obtuvo información de espesor en longitudinales y transversales en todos los glaciares, exceptuando el glaciar Echaurren, donde sólo se interpretó fondo rocoso en una longitudinal, debido a la presencia de scattering en el resto de los perfiles. En el glaciar Universidad se entregaron tres longitudinales y cuatro transversales, para abarcar los dos ramales del glaciar. Los máximos espesores registrados en las cuencas Maipo y Rapel se obtuvieron en los glaciares Esmeralda (151 [m]) y Universidad (342 [m]), respectivamente.
- d) Se realizó un análisis de adelgazamiento en los glaciares Echaurren, San Francisco y Universidad. Debido a la poca representatividad espacial de los puntos de comparación en los glaciares Echaurren y San Francisco, no se puede concluir si existe o no cambio de elevación. Sin embargo, en glaciar Universidad, donde existe mayor información disponible, se puede afirmar que existe adelgazamiento, aunque su cuantificación sea todavía incierta debido a que no se conocen las tasas de error asociadas a las comparaciones hechas.

7 AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Dirección General de Aguas (DGA), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile. Especiales agradecimientos al Dr. Gino Casassa, Dr. NorbertBlindow, Sr. Marcelo Arévalo, Sr. Iván Clavero, Sr. David Ulloa, Unmanned Industrial Ltda. y a Helicopters.cl por su valiosa contribución a este proyecto.

8 REFERENCIAS

- ARCONE, S.A., DELANEY, A.J. 1984. Field dielectric measurements of frozen silt using VHF pulses. *Cold Regions Science and Technology*, 9, p. 29-37.
- BOGORODSKY, V., BENTLEY, C., GUDMANDSEN, P. 1985. Radio-glaciology. *D. Reidel Publishing Company*, 1st Ed., 254 pp.
- BOWN, F., RIVERA, A., ACUÑA, C. 2008. Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, p. 43-48.
- CARRASCO, J., OSORIO, R., CASASSA, G. 2007. Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54 (186), p. 538-550.
- CASASSA, G., LÓPEZ, P., POUYAUD, B., ESCOBAR, F. 2009. Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes. *Hydrological Processes*, 23, p. 31-41.
- CASASSA, G., RIVERA, A. 1998. Digital Radio Echo Sounding at Tyndall Glacier, Patagonia. *Anales Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*. 26, p. 129-135.
- DGA. 2009a. Estrategia Nacional de Glaciares. *S.I.T.* 205, 289 pp.
- DGA. 2009b. Radio Eco-sondaje en la cuenca del río Maipo y mediciones glaciológicas en el glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur. *S.I.T.* 204, 95 pp.
- DGA, 2010. Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte temporadas 1997-1998 a 2008-2009. DGA, Santiago, 32 pp.
- DGA. 2011a. Estimación de volúmenes de hielo en glaciares de Chile central. *S.I.T.* 264, 155 pp.
- DGA. 2011b. Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. *S.I.T.* 261, 142 pp.
- DGA. 2012. Bases Administrativas y Técnicas de la prestación de servicios generales denominada “ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE RADIO ECO SONDAJE EN CHILE CENTRAL”. *Resolución exenta D.G.A.* No. 401.
- ESCOBAR, F., ACEITUNO, P. 1998. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile Central durante el invierno austral. *Bull. Inst. Fr. E'tud. Andin. Lima*, 27 (3), p. 753-759.
- EVANS, S. 1965. Dielectric properties of ice and snow - a review. *Journal of Glaciology*, 5(42), p. 773-792.

FALVEY, M., GARREAUD, R. 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the Southeast Pacific and along the West Coast of Subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.

GADES, A. M. 1998. Spatial and temporal variations of basal conditions beneath glaciers and ice sheets inferred from radio echo sounding measurements. *Ph. D. Thesis*, University of Washington, USA. 192 pp.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: the scientific basis. Summary for Policymakers. Eds. J.T. Houghton et al. *Cambridge University Press*. 83 pp.

KENNETT, M., LAUMANN, T., LUND, C. 1993. Helicopter-borne radio-echo sounding of Svartisen, Norway. *Annals of Glaciology*, 17, p. 23-26.

MASIOKAS, M., VILLALBA, R., LUCKMAN, B., LE QUESNE, C., ARAVENA, J.C. 2006. Snowpack variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the Region. *Journal of Climate*, 19, p. 6334-6352.

MONTECINOS, A., ACEITUNO, P. 2003. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16, p. 281-296.

NOLAN, M., MOTKYA, R., ECHELMMEYER, K., TRABANT, D. 1995. Ice-thickness measurements of Taku Glacier, Alaska, USA, and their relevance of its recent behavior. *Journal of Glaciology*, 41, p. 541-553.

PELLICCIOTTI, M., BURLANDO, P., VAN VLIET, K. 2007. Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, central Chile. En: *Glacier Mass Balance Changes and Meltwater Discharge, IAHS Publ.* 318, p. 17-38.

RAYMOND, C., NEUMANN, T., RIGNOT, E., ECHELMMEYER, K., RIVERA, A., CASASSA, G. 2005. Retreat of Glaciar Tyndall, Patagonia, over the last half-century. *Journal of Glaciology*, 51(173), p. 239-247.

RIGNOT, E., RIVERA, A., CASASSA, G. 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302, p. 434-436.

RIVERA, A., BOWN, F., MELLA, R., WENDT, J., CASASSA, G., ACUÑA, C., RIGNOT, E. CLAVERO, J., BROCK, B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, p. 111-122.

RIVERA, A., CASASSA, G. 2002. Detection of ice thickness using radio-echo sounding on the Southern Patagonia Icefield. En: *The Patagonian Icefields: a unique natural laboratory for*

environmental and climate change studies. Eds. Casassa, G; Sepúlveda, F. and Sinclair, R. *Series of the Centro de Estudios Científicos*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, p. 101-115.

RIVERA, A., CASASSA, G., ACUÑA, C. 2001. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. *Invest. Geogr. Chile*, 35, p. 67-100.

RIVERA, A., CASASSA, G., ACUÑA, C., BOWN, F. 2002. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, p. 367-372.

RIVERA, A., CASASSA, G., ACUÑA, C., LANGE, H. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista de Investigaciones Geográficas*, 34, p. 29-60.

ROSENBLÜTH, B., FUENZALIDA, H., ACEITUNO, P. 1997. Recent temperature variations in Southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, p. 67-85.

SANDMEIER, K., 2004: Reflexw manual ver. 3.5. Karlsruhe, 377 pp.

WATTS, R., ENGLAND, A. 1976. Radio-echo sounding of temperate glaciers: ice properties and sounder design criteria. *Journal of Glaciology*, 17(75), p. 39-48.

WATTS, R., WRIGHT, D. 1981. System for measuring thickness of temperate and polar ice from the ground or from the air. *Journal of Glaciology*, 27(97), p. 459-469.

ZAMORA, R., ULLOA, D., GARCÍA, G., MELLA, R., URIBE, J., WENDT, J., RIVERA, A., GACITÚA, G., CASASSA, G. 2009. Airborne radar sounder for temperate ice: initial results from Patagonia. *Journal of Glaciology*, 55(191), p. 507-512.