



Octubre de 2009

ÁREA DE PASCUA LAMA, TERCERA REGIÓN DE ATACAMA

RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Preparado para:

Compañía Minera Nevada Ltda.
Proyecto Pascua Lama
Vitacura 2670, piso 8 (Edif. CCU)
Las Condes
Santiago - Chile

Informe

Número de **Informe:** 079 215 5019-3.0-IT 005

Distribución:

Compañía Minera Nevada Ltda.
Golder Associates S. A.

A world of
capabilities
delivered locally





ÍNDICE

1.0	INTRODUCCION.....	1
1.1	Ubicación del área de estudio.....	1
1.2	Perfil del Proyecto Pascua-Lama.....	1
1.3	Antecedentes generales.....	3
2.0	OBJETIVO DEL INFORME.....	4
3.0	ALCANCES DEL INFORME.....	5
3.1	Clasificación de criofomas.....	5
3.2	Definición del área de estudio de las criofomas.....	6
3.2.1	Regional.....	6
3.2.2	Local.....	6
3.3	Referencias bibliográficas relacionadas a criofomas.....	14
3.4	Selección de variables para la caracterización de la criosfera.....	17
4.0	DESCRIPCION DEL MEDIO FISICO RELACIONADO A LA CRIOSFERA.....	20
4.1	Clima y meteorología.....	20
4.1.1	Clima.....	20
4.1.2	Registros meteorológicos locales.....	20
4.1.3	Temperatura.....	23
4.1.4	Precipitación.....	26
4.1.5	Rutas de nieve.....	31
4.1.6	Dirección de los vientos.....	33
4.1.7	Rapidez de los vientos.....	36
4.1.8	Estabilidad de la atmósfera y altura de mezcla.....	38
4.1.9	Radiación global y nubosidad.....	40
4.1.10	Humedad.....	41
4.2	Geología.....	42
4.2.1	Glaciar Estrecho.....	45
4.2.2	Glaciarete Esperanza.....	46
4.2.3	Glaciaretes Toro 1 y Toro 2.....	47



4.2.4	Glaciar Guanaco	48
4.3	Geomorfología	49
4.4	Hidrología.....	53
4.4.1	Caracterización de las cuencas.....	56
4.4.2	Registros fluviométricos locales	58
4.4.3	Procesos de registros fluviométricos regionales	70
4.5	Cambio climático.....	73
5.0	CARACTERIZACION FÍSICA DE LAS CRIIFORMAS	74
5.1	Inventario de crioformas.....	74
5.1.1	Trabajos realizados	74
5.1.2	Metodología.....	74
5.1.3	Resultados	77
5.2	Superficie, espesor del hielo y volúmenes de crioformas seleccionadas.....	79
5.2.1	Trabajos realizados	79
5.2.2	Metodología.....	80
5.2.3	Resultados	87
5.3	Temperatura del hielo	94
5.3.1	Trabajos realizados	94
5.3.2	Metodología.....	95
5.3.3	Resultados	99
5.4	Presencia de polvo y detritus en la superficie de los glaciares y estratigrafía del hielo	102
5.4.1	Trabajos realizados	103
5.4.2	Metodología.....	103
5.4.3	Resultados	108
5.5	Albedo.....	113
5.5.1	Trabajos realizados	113
5.5.2	Metodología.....	113
5.5.3	Resultados	117
5.6	Caracterización del permafrost	119
5.6.1	Trabajos realizados	120



5.6.2	Metodología.....	121
5.6.3	Resultados	124
5.7	Caracterización de glaciares de roca.....	131
5.7.1	Trabajos realizados	133
5.7.2	Metodología.....	133
5.7.3	Resultados	139
6.0	CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS QUE DETERMINAN LA EVOLUCIÓN DE LOS CUERPOS DE HIELO DESCUBIERTOS.....	145
6.1	Evolución de superficies de los cuerpos de hielo.....	145
6.1.1	Trabajos realizados	145
6.1.2	Metodología.....	145
6.1.3	Resultados	146
6.2	Balance de masa	158
6.2.1	Trabajos realizados	159
6.2.2	Metodología.....	160
6.2.3	Resultados	162
6.3	Balance de energía de los glaciares y glaciaretos	166
6.3.1	Trabajos realizados	167
6.3.2	Metodología.....	168
6.3.3	Resultados	169
6.4	Movimiento de glaciares	171
6.4.1	Trabajos realizados	171
6.4.2	Metodología.....	171
6.4.3	Resultados	172
7.0	EVALUACIÓN DEL ROL DE LAS CRIIFORMAS EN EL BALANCE HÍDRICO.....	174
7.1	Trabajos realizados.....	174
7.2	Generalidades y caudales.....	174
7.3	Balance Hídrico.....	177
7.3.1	Balance Hídrico cuenca superior río El Toro	177
7.3.2	Balance Hídrico cuenca superior río Del Estrecho	179
7.4	Rol Hídrico de la criosfera.....	182



8.0 SELECCIÓN DE GLACIARES DE REFERENCIA	183
8.1 Descripción del medio físico relacionado a los glaciares de referencia	183
8.1.1 Geología	183
8.1.2 Meteorología	186
8.1.3 Temperatura	186
8.1.4 Dirección de los vientos.....	187
8.1.5 Rapidez de los vientos	187
8.1.6 Radiación global y nubiosidad.....	187
8.1.7 Humedad.....	187
8.2 Caracterización física de los Glaciares de Referencia	188
8.2.1 Superficie y volumen	188
8.2.2 Temperatura del glaciar.....	188
8.2.3 Presencia de polvo.....	188
8.2.4 Albedo	189
8.3 Caracterización de procesos que determinan la evolución de los Glaciares de Referencia	190
8.3.1 Evolución.....	190
8.3.2 Balance de masa.....	193
8.3.3 Balance de Energía	193
8.3.4 Movimiento del glaciar.....	194
8.3.5 Caudales desde el glaciar	194
9.0 DISCUSION.....	196
10.0 BIBLIOGRAFIA.....	198
 TABLAS	
Tabla 3-1: Variables y métodos de estudio de los glaciares	18
Tabla 4-1: Ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas en el área de Pascua - Lama.....	21
Tabla 4-2: Variables de monitoreo en estaciones meteorológicas	23
Tabla 4-3: Temperatura promedio anual del aire para la estación Frontera	24
Tabla 4-4: Promedios mensuales de temperatura del aire (°C), máximos y mínimos instantáneos para los meses en que las mediciones son completas (en los glaciares).....	25
Tabla 4-5: Estimaciones de precipitación mensual en la estación Campamento Pascua (Altura 3.700 m s.n.m.), para distintos períodos de retorno.....	28



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Tabla 4-6:	Precipitaciones registradas en estación El Indio.....	29
Tabla 4-7:	Factores de corrección de precipitaciones subcuencas río Del Estrecho respecto de la estación El Indio.....	30
Tabla 4-8:	Resultados obtenidos de las rutas de nieve medidas y analizadas durante 2008.....	33
Tabla 4-9:	Promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa (%), para aquellos meses en los cuales las mediciones son completas, para el período de enero a junio 2008.....	41
Tabla 4-10:	Caudales medios mensuales río Del Estrecho (l/s).....	56
Tabla 4-11:	Estaciones fluviométricas CMN en el área del Proyecto.....	59
Tabla 4-12:	Características y distribución de las estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares y glaciaretos.....	66
Tabla 4-13:	Caudales máximos y mínimos durante el día, medidos por métodos manuales. Verano año 2008.....	68
Tabla 4-14:	Resumen de cuencas, datos disponibles y resultados de análisis de frecuencia de caudales anuales (m ³ /s).....	72
Tabla 5-1:	Relación entre superficie, volumen de hielo estimado y volumen de agua equivalente, en la cuenca del río Huasco.....	77
Tabla 5-2:	Glaciares descubiertos y de roca de la III Región, clasificados por el umbral de área de 0,1km ²	77
Tabla 5-3:	Comparación de espesores de Toro 1 por medio de GPR y sondeos.....	87
Tabla 5-4:	Áreas y volúmenes estimados de los glaciares y glaciaretos en el área del Proyecto.....	93
Tabla 5-5:	Áreas de glaciares en la zona del Proyecto y su porcentaje relativo a las cuencas.....	93
Tabla 5-6:	Áreas de subcuencas.....	94
Tabla 5-7:	Ubicación de los cables termistores.....	96
Tabla 5-8:	Ubicación de puntos de monitoreo de material particulado sedimentado.....	105
Tabla 5-9:	Fecha de retiro y primeros resultados de las muestras.....	112
Tabla 5-10:	Muestras de estratos del hielo con detritus proveniente del Glaciar Guanaco.....	112
Tabla 5-11:	Valores de albedo para distintas superficies de nieve/hielo (%) (Paterson, 1994).....	113
Tabla 5-12:	Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (diciembre 2007–marzo 2008), Índice 1.....	118
Tabla 5-13:	Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (diciembre 2007–marzo 2008), Índice 2.....	118
Tabla 5-14:	Resumen de los termistores instalados en permafrost en el lado chileno.....	122
Tabla 5-15:	Resumen de los resultados de las calicatas BGC 2009.....	125
Tabla 5-16:	Temperatura del suelo registrada en termistores (BGC 2009).....	126
Tabla 5-17:	Contenido de hielo en las capas de la geoforma Estrecho B.....	142
Tabla 6-1:	Imágenes utilizadas en el estudio de evolución de los cuerpos de hielo.....	146
Tabla 6-2:	Cambios estimados en los glaciares y glaciaretos entre 1986 y 2001.....	147



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Tabla 6-3:	Superficie del glaciaretos Toro 1 y Toro 2 entre 1955 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo.....	149
Tabla 6-4:	Superficie del glaciarete Esperanza 1956 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo.....	151
Tabla 6-5:	Superficie del glaciar Guanaco entre 1955 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo.....	153
Tabla 6-6:	Estimación de la desaparición de los cuerpos de hielo.....	158
Tabla 6-7:	Balance de masa 2006 - 2007.....	163
Tabla 6-8:	Balance de masa 2007 - 2008.....	164
Tabla 6-9:	Balance de masa 2003-2008 (m a.eq.).....	164
Tabla 6-10:	Fusión, sublimación y ablación mensuales puntuales en el lugar de las estaciones meteorológicas de Guanaco (en mm a.eq. por día).....	170
Tabla 6-11:	Velocidad promedio de desplazamiento horizontal al mes (m/mes).....	173
Tabla 7-1:	Comparación de los caudales de fines de verano en el río El Toro.....	175
Tabla 7-2:	Comparación de los caudales de fines de verano en el río Del Estrecho.....	175
Tabla 7-3:	Caudales en puntos de monitoreo cercanos a glaciares, verano 2008.....	176
Tabla 7-4:	Comparación caudales de deshielo glaciar monitoreados durante el día con caudales modelados (balance hídrico).....	177
Tabla 7-5:	Deshielo glaciar cuenca El Toro TO-1a y su impacto sobre VIT-3.....	178
Tabla 7-6:	Deshielo glaciar cuenca Del Estrecho NE-5 y su impacto sobre NE-4.....	180
Tabla 8-1:	Ubicación de la estación meteorológica instalada en la glaciar de referencia.....	186
Tabla 8-2:	Promedios mensuales de temperatura del aire (°C), máximos y mínimos instantáneos para los meses en que las mediciones son completas (en glaciar Ortigas 1).....	186
Tabla 8-3:	Promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa (%), para aquellos meses en los cuales las mediciones son completas, para el período de enero a junio 2008.....	187
Tabla 8-4:	Área de los glaciares y glaciaretos de referencia.....	188
Tabla 8-5:	Ubicación del cable termistores.....	188
Tabla 8-6:	Ubicación de punto de monitoreo de material particulado.....	188
Tabla 8-7:	Primeros resultados de las muestras.....	189
Tabla 8-8:	Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (enero 2008 – marzo 2008), Índice 1.....	190
Tabla 8-9:	Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (enero 2008 – marzo 2008), Índice 2.....	190
Tabla 8-10:	Superficie del glaciarete Ortigas 2 entre 1956 y 2007, y pérdida promedio anual por periodo.....	192
Tabla 8-11:	Estimación de la desaparición de los cuerpos de hielo 1955 - 2007.....	192
Tabla 8-12:	Balance de masa 2006 - 2008.....	193
Tabla 8-13:	Fusión, sublimación y ablación mensuales puntuales en el lugar de las estaciones meteorológicas de Ortigas 1 (en mm a.eq. por día).....	193



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Tabla 8-14:	Velocidad promedio de desplazamiento horizontal al mes (m/mes)	194
Tabla 8-15:	Características y distribución de las estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares y glaciaretos.....	194
Tabla 8-16:	Caudales en puntos de monitoreo cercanos a glaciares, verano 2008.....	195

FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación regional del Proyecto.....	2
Figura 3-1:	Ubicación de los glaciares y glaciaretos en estudio.....	7
Figura 3-2:	Ubicación de glaciares y glaciaretos por cuencas	8
Figura 3-3:	(a) Detritos y penitentes del glaciarete Toro 1 inferior, (b) Toro 1 en diciembre de 2007	9
Figura 3-4:	(a) Penitentes del glaciarete Toro 2, (b) Toro 2 en diciembre de 2007	10
Figura 3-5:	(a) Penitentes en glaciarete Esperanza, (b) Esperanza en el 8 de diciembre de 2007.....	11
Figura 3-6:	(a) Superficie de glaciar Guanaco con penitentes pequeños, (b) Guanaco en diciembre de 2007.....	12
Figura 3-7:	Estrecho en diciembre de 2007	13
Figura 3-8:	Geoforma Estrecho B.....	13
Figura 3-9:	Elementos de la caracterización de la criosfera	18
Figura 4-1:	Estaciones meteorológicas instaladas sobre Guanaco y Toro 1 mostradas de izquierda a derecha, respectivamente.....	21
Figura 4-2:	Ubicación de estaciones meteorológicas	22
Figura 4-3:	Variaciones mensuales de temperatura del aire para la estación Frontera (1999 a 2003)	24
Figura 4-4:	Variación de la temperatura media anual con la altura	25
Figura 4-5:	Variación de la temperatura promedio diaria (julio 2006 – junio 2007)	26
Figura 4-6:	Precipitación media mensual regional.....	27
Figura 4-7:	Correlaciones precipitación anual El Indio versus caudales río Del Estrecho.....	31
Figura 4-8:	Ejemplos de mediciones de ruta de nieve en calicatas.....	32
Figura 4-9:	Rosa de vientos estación Frontera	33
Figura 4-10:	Rosa de vientos estaciones Frontera, La Olla y El Toro (julio 2006 – junio 2007)	34
Figura 4-11:	Rosa de vientos, combinación de datos de La Olla y Frontera (1999-2004).....	35
Figura 4-12:	Porcentajes de mediciones de dirección de viento por grados (a partir de datos cada 30 minutos)	35
Figura 4-13:	Rapidez del viento en estaciones Frontera, El Toro y La Olla, julio 2006 – junio 2007.....	37
Figura 4-14:	Rapidez del viento regional.....	38
Figura 4-15:	Variación diurna de la estabilidad atmosférica para Pascua-Lama (1999-2004)	39
Figura 4-16:	(a) Alturas de mezcla durante los siguientes condiciones: (a) Altamente convectivas (b) Moderadamente convectivas, (c) Neutrales, y (d) Estables	40



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 4-17: Vista general de glaciares y glaciaretos, y su localización geológica	43
Figura 4-18: Mapa geológico.....	44
Figura 4-19: Glaciar Estrecho y su contexto geológico	45
Figura 4-20: Glaciarete Esperanza y su contexto geológico	46
Figura 4-21: Glaciaretos Toro 1 y Toro, y su contexto geológico	47
Figura 4-22: Glaciarete Guanaco y su contexto geológico.....	48
Figura 4-23: Mapa geomorfológico.....	50
Figura 4-24: Fotografías de los ríos del área de estudio y sus cuencas	54
Figura 4-25: Ubicación y superficies de las cuencas y sub-cuencas chilenas cercanas el Proyecto	55
Figura 4-26: Hidrogramas de caudales medios mensuales para río Del Estrecho.....	57
Figura 4-27: Ubicación de las estaciones de registro de caudal dentro la cuenca del río Huasco.....	60
Figura 4-28: Ejemplo de una estación fluviométrica CMN (NE-4)	61
Figura 4-29: Caudal horario de NE-1A, 2001-2005.....	61
Figura 4-30: Caudales subcuenca Chollay/Del Estrecho, julio 2006 – junio 2007	62
Figura 4-31: Caudales subcuenca Tres Quebradas/Potrerrillos, julio 2006 – junio 2007	63
Figura 4-32: Caudales subcuenca Del Carmen, julio 2006 – junio 2007.....	63
Figura 4-33: Serie históricas de caudales subcuenca Chollay/Del Estrecho.....	64
Figura 4-34: Serie históricas de caudales subcuenca Tres Quebradas/Potrerrillos	65
Figura 4-35: Serie históricas de caudales subcuenca Del Carmen	65
Figura 4-36: Ubicación de estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares	67
Figura 4-37: Medición manual de caudal	68
Figura 4-38: Caudal promedio mensual durante el día en los puntos de monitoreo cercanos a los glaciares y glaciaretos, verano 2008.....	69
Figura 4-39: Caudal promedio mensual durante el día en los puntos de monitoreo aguas abajo de los Glaciares, verano 2008.....	69
Figura 4-40: Estación fluviométrica DGA, Río Tránsito en Angostura Pinte.....	71
Figura 5-1: Ubicación de crioformas y las sub-cuencas según DGA, 1986.....	76
Figura 5-2: Distribución hipsométrica de cuerpos de hielo en la cuenca del Huasco Alto.....	78
Figura 5-3: Orientación promedio de los cuerpos de hielo	79
Figura 5-4: (a) Línea de GPR en Toro 2. Marzo 2003. (b) Primer plano de las antenas GPR	82
Figura 5-5: Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 1 de marzo de 2005, en el área del Proyecto Pascua-Lama.	83
Figura 5-6: Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 27 de marzo del año 2007, en el área del Proyecto Pascua-Lama.....	84



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 5-7:	Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 1 de abril del año 2008, en el área del Proyecto Pascua-Lama.....	85
Figura 5-8:	Perforación de testigo de hielo en el glaciar Guanaco.....	86
Figura 5-9:	(a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Toro 1, (b) Resultados de Toro 1 lower 03/11 Lat, (c) Resultados de Toro 1 lower 04/11 (TORO4-3)	88
Figura 5-10:	(a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Toro 2, (b) Resultados de Toro 2 lower 03/03, (c) Resultados de Toro 2 upper 01/10.....	89
Figura 5-11:	(a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Esperanza, (b) Resultados de Esperanza 03/03, (c) Resultados de Esperanza 04/11 ESP04-4.....	90
Figura 5-12:	(a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Guanaco, (b) Resultados de Guanaco 03/11 Long, (c) Resultados de Guanaco 03/03.....	91
Figura 5-13:	Comparación de perfiles GPR –Toro 1, perfil superior.....	92
Figura 5-14:	Gráfica comparativa entre temperaturas de hielo con profundidades del hielo, Glaciar Tapado.	95
Figura 5-15:	Ubicación de estaciones de monitoreo de temperatura del hielo.....	97
Figura 5-16:	Instalación de termistores	98
Figura 5-17:	Cadena de termistores instalada en el orificio del testigo	99
Figura 5-18:	Registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciarete Toro 1 lower	100
Figura 5-19:	Registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciar Guanaco.....	100
Figuras 5-20 a y b:	Perfil de temperatura mensual y estacional del glaciar Guanaco	101
Figura 5-21:	Perfiles de temperatura, glaciar Guanaco.....	102
Figura 5-22:	Ejemplo de utilización del taladro de vapor.....	104
Figura 5-23:	Lisímetros instalados cerca de Toro 1	104
Figura 5-24:	Estaciones de monitoreo polvo sedimentado (a) en glaciarete Toro 1, y (b) en glaciar Guanaco	105
Figura 5-25:	Ubicación de puntos de monitoreo de polvo sedimentado.....	106
Figura 5-26:	Ubicación de puntos de monitoreo de polvo sedimentado.....	107
Figura 5-27a:	Inspección visual de la estratigrafía del hielo en Estrecho.....	108
Figura 5-28:	Efecto del detrimento nieve y hielo: modelados y ejemplos reales de los Andes áridos.....	110
Figura 5-29:	Resultados de los lisímetros para el periodo de 17 al 20 de marzo de 2008 (en mm a.eq./m ² /hora)	111
Figura 5-30:	(a) Instalación de cámaras fotográficas (b) Estación meteorológica instalada en Toro 1	115
Figura 5-31:	Ubicación de las cámaras fotográficas (cuadro amarillo), de las estaciones meteorológicas (cuadro verde) y de los puntos de control de terreno (cuadro negro o blanco), en sector de glaciaretes Toro 1, Toro 2 y Estrecho (A), glaciar Guanaco (B) y glaciar Ortigas 1(C). Noviembre 2007 – marzo 2008.	116
Figura 5-32:	Mapa de albedo glaciaretes Toro 1 & 2, 20/12/2007	117
Figura 5-33:	Mapa de albedo glaciar Guanaco, 20/03/2008	117



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 5-34: Promedios diarios de la radiación neta y del albedo (promedio entre las 8 y las 18h,) medidos por la estación meteorológica del glaciar Guanaco	119
Figura 5-35: Ciclo hidrológico típico de una zona de permafrost	120
Figura 5-36: (a) Calicata PPTP-05-03 en permafrost, (b) Retroexcavadora CAT320C.....	122
Figura 5-37: Ubicación de estaciones de monitoreo de temperatura de permafrost.	123
Figura 5-38: Instalación de secuencia de termistores TH20.1	124
Figura 5-39: Resultados del monitoreo de la temperatura en TH100.1.....	127
Figura 5-40: Mapa de distribución estimada de permafrost en el área de Pascua-Lama.....	128
Figura 5-41: Mapa de profundidad estimada de permafrost en el área de Pascua-Lama.....	129
Figura 5-42: Mapa de profundidad estimada a la capa activa en el área de Pascua-Lama	130
Figura 5-43: Ubicación de los glaciares de roca.....	132
Figura 5-44: Geoforma Estrecho B.....	133
Figura 5-45: (a) Líneas de investigación sísmica, (b) Investigación topográfica	135
Figura 5-46: calicata en Estrecho B, enero 2006	136
Figura 5-47: Mediciones de movimiento de glaciar de roca Estrecho B (a) Pilar estación total, (b) Prisma no.1....	137
Figura 5-48: Ubicación de las balizas en glaciar de roca Estrecho B.....	138
Figura 5-49: Ubicación perfiles sísmicos (L1 y L2) y perfiles de modelamiento de volumen (A y B).....	140
Figura 5-50: Resultados de la investigación sísmica (perfil 1), Estrecho B	141
Figura 5-51: Resultados de la investigación sísmica (perfil 2), Estrecho B	141
Figura 5-52: Dirección del desplazamiento del punto “Vértice Meseta Antiguo”, Estrecho-B.....	143
Figura 5-53: Desplazamiento de los prismas de control topográfico ubicados en la geoforma Estrecho-B	143
Figura 6-1: Evolución de los glaciaretos Toro 1 y Toro 2 entre 1956 y 2007	148
Figura 6-2: Evolución del glaciarete Esperanza entre 1956 y 2007	150
Figura 6-3: Evolución del glaciar Guanaco entre 1955 y 2007.....	152
Figura 6-4: Pérdida promedio anual de superficie por periodo, considerando solamente los glaciaretos	154
Figura 6-5: Pérdida promedio anual de superficie por periodo para todos los glaciaretos de la zona de estudio	155
Figura 6-6: Pérdida promedio anual de superficie por periodo, considerando solamente los glaciares	156
Figura 6-7: Comparación entre las pérdidas, balance de masa, PDO, precipitación y caudal.	157
Figura 6-8: Diagrama de flujo – Balance de masa	159
Figura 6-9: Instalación de balizas de ablación/acumulación en la superficie de los glaciares.....	161
Figura 6-10: Áreas balizas glaciar Guanaco	162
Figura 6-11: Datos de ablación y acumulación de las estacas más representativas usadas para balance de masa, por glaciar.....	163



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 6-12:	Balance acumulado para todos los glaciares.....	165
Figura 6-13:	Flujos de energía que llegan a la superficie.....	166
Figura 6-14:	Diagrama de flujo – Balance de energía.....	167
Figura 6-15:	Prueba de Sublimación.....	168
Figura 6-16:	Promedios mensuales de los términos del balance de energía para Guanaco.....	170
Figura 6-17:	a) Baliza instalado sobre glaciar Guanaco y b)Baliza instalada sobre el glaciarete Toro 1.....	172
Figura 7-1:	Componentes de flujo en TO-1a.....	178
Figura 7-2:	Comparación de los balances del glaciar Echaurren y los glaciares de la cuenca El Toro (en mm de agua equivalente).....	179
Figura 7-3:	Modelo conceptual balance hídrico río Del Estrecho.....	180
Figura 7-4:	Caudales medidos v/s simulados, auditoría para punto de control NE-5.....	182
Figura 8-1:	Ortigas 1 el 29 de enero de 2008.....	183
Figura 8-2:	Glaciar Ortigas 1 y glaciarete Ortigas 2, y su contexto geológico.....	184
Figura 8-3:	Fragmentos rocosos en los bordes del glaciarete Ortigas 2 (no alterada).....	185
Figura 8-4:	Arrastre de sedimentos proveniente del flujo de agua estacional de la quebrada al Norte del glaciarete Ortigas 2 (Imagen Satelital IKONOS, 2007).....	185
Figura 8-5:	Mapa de albedo, glaciar Ortigas 1, 29/01/2008.....	189
Figura 8-6:	Evolución de los glaciarete Ortigas 2 entre 1956 y 2007.....	191
Figura 9-1:	Etapas del estudio de glaciares.....	196

ANEXOS

Anexo A	GLOSARIO
Anexo B	CEAZA 2008g Mediciones Meteorológicas sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama. 25 de agosto de 2008
Anexo C	Golder 2009a Monitoreo de temperatura de Glaciares y Glaciaretos en el Área Pascua-Lama, 079215019-2.1-IT 002
Anexo D	CEAZA 2008c Balance de energía sobre dos glaciares en la zona de Pascua-Lama. 21 de noviembre 2008
Anexo E	CMN 2008a Mediciones de caudales cercanos a los glaciares y glaciaretos. Cuencas superiores del río Huasco. Verano 2007-2008
Anexo F	CEAZA 2008b Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, 2004. 1 de diciembre de 2008.
Anexo G	CEAZA 2008a Evolución de la superficie de 20 glaciares en la zona y al Sur de Pascua-Lama, entre 1955 y 2007. 20 de noviembre 2008
Anexo H	Golder 2009c, Retroceso Glaciar e Impacto del Cambio Climático, 0792155019-2.6-IT 003
Anexo I	BCG 2009 Caracterización de Permafrost.
Anexo J	CEAZA 2008f Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2006-07. 26 de agosto de 2008



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

- Anexo K CEAZA 2008e Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2007-08. 26 de agosto de 2008
- Anexo L CMN 2009b Mediciones de Polvo Sedimentable en las cercanías de los Glaciares y Glaciaretos, Verano 2008
- Anexo M CMN 2008d Monitoreo de Movimiento de los Glaciares de Roca. Cuenca superior del río Huasco – Tránsito
- Anexo N CMN 2008b Monitoreo del Movimiento de los Glaciares. Cuenca Superior del Río Huasco – Tránsito
- Anexo O Golder 2009d Balance de Masa, verano de 2006, 079 215 5019-IT001, 22 de enero de 2009
- Anexo P CEAZA 2008d. Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua-Lama 23 de octubre de 2008
- Anexo Q Golder 2009b. Informe Actualización información Geoforma Estrecho B, 079 215 5019-2.5-IT 004,
- Anexo R CMN 2009c. Programa de monitoreo de glaciares y glaciaretos a través de imágenes satelitales de alta resolución.
- Anexo S CMN 2009a Geología y su relación con la depositación natural de polvo y detritos en los cuerpos de hielo, 13 de julio 2009
- Anexo T CMN 2009d. Glacierete de Referencia Ortigas 2, 9 de julio 2009



1.0 INTRODUCCION

Compañía Minera Nevada (CMN) solicitó a Golder Associates S.A. (Golder) realizar un informe resumen de los estudios de la criosfera en el área chilena en los alrededores del Proyecto Pascua-Lama (el Proyecto). Este informe consolida los datos y antecedentes disponibles a partir de informes y estudios existentes a julio 2009, sin elaborar nueva información ni nuevos análisis sobre la materia. La información presentada en cada sección de este informe viene acompañada de las referencias a los documentos de origen.

El contenido de este informe es el siguiente:

- Objetivos (sección 2)
- Alcances (sección 3);
- Resumen de información del medio físico de la criósfera del entorno del Proyecto (sección 4);
- Resumen, consolidación y actualización de la caracterización de la criosfera (sección 5), que comprende la síntesis de la información disponible hasta el año 2006 complementada con los nuevos antecedentes obtenidos entre 2006 y 2008.
- Resumen, consolidación y actualización de la caracterización de los procesos que determinan la evolución de los cuerpos de hielo descubiertos (sección 6).
- Evaluación del rol de las criofomas en el balance hídrico (sección 7).
- Caracterización de los glaciares de referencia (sección 8)

1.1 Ubicación del área de estudio

El Proyecto Pascua-Lama se encuentra en la Cordillera de los Andes, sobre la frontera internacional entre Chile y Argentina, entre los 3.700 y 5.500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), en las coordenadas 29°19' Latitud Sur y 70°02' Longitud Oeste. En el territorio chileno el Proyecto Pascua-Lama se ubica en la comuna de Alto del Carmen, Tercera Región de Atacama, al Norte de los Cerros Nevados, en la cabecera de dos subcuencas tributarias del río Huasco: la subcuenca del río Del Estrecho por el Norte (tributario del río Chollay), y la subcuenca del río El Toro por el Sur (tributario del río Del Carmen) (Figura 1-1).

En territorio argentino el Proyecto se ubica a unos 300 Km en línea recta al Noroeste de la ciudad de San Juan, en la cabecera de la subcuenca del arroyo Turbio, tributario del río de Las Taguas. Esta área pertenece al Departamento de Iglesia, Provincia de San Juan.

1.2 Perfil del Proyecto Pascua-Lama

CMN está desarrollando el Proyecto Pascua-Lama, el que tiene por objetivo la explotación de yacimientos de minerales de oro, plata y cobre y su beneficio para producir mineral doré (oro-plata).

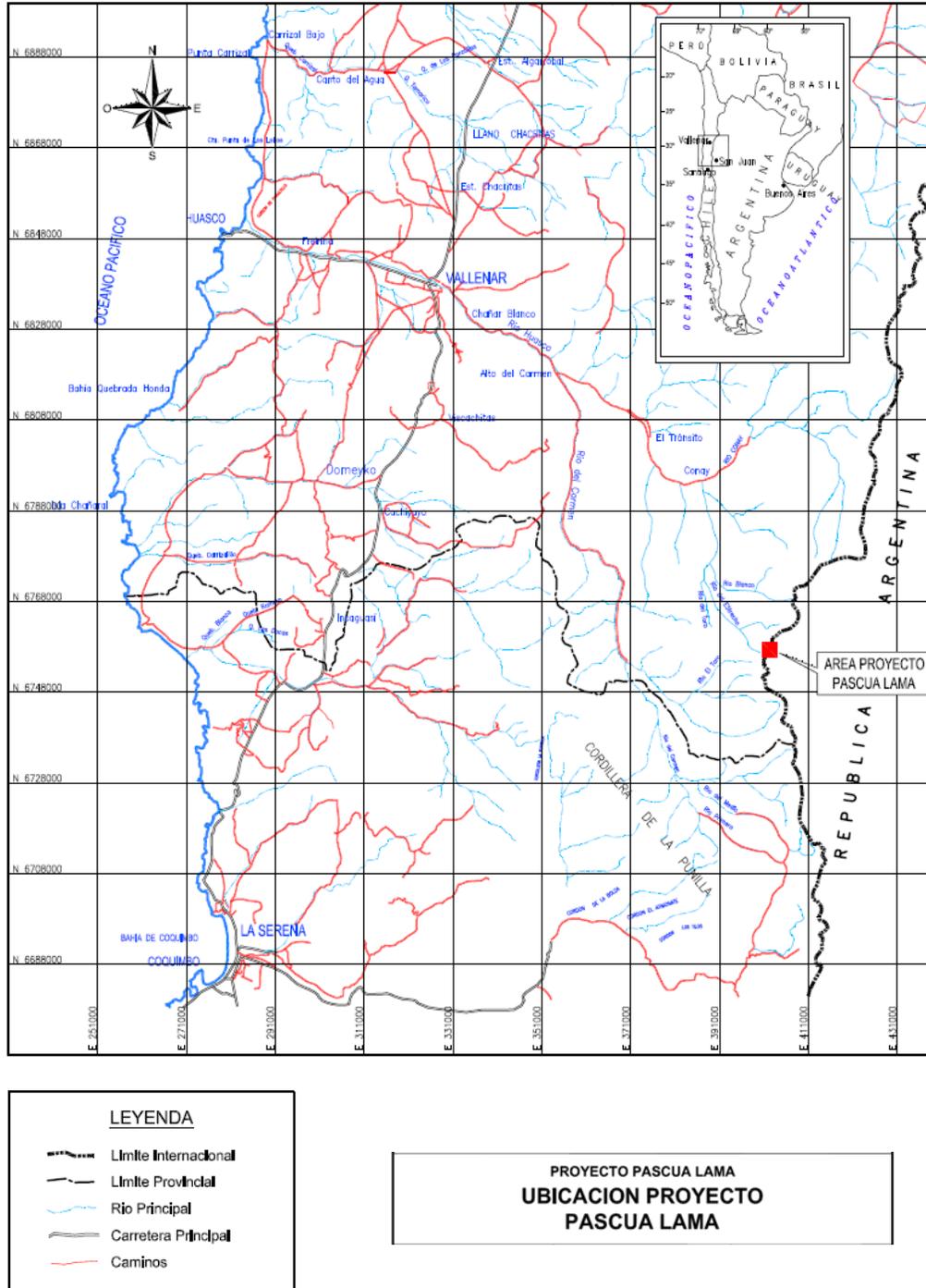
La explotación del futuro Proyecto Minero Pascua-Lama será por rajo abierto. La chancadora y el botadero se ubicarán en Chile y la planta de proceso y tranque de relaves en Argentina (CMN, 2004).

La fase de construcción tendrá una duración de tres años, Mientras que la fase de operación tendrá una duración de 20 años. El rajo Pascua-Lama se explotará por un período de 17 años.



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 1-1: Ubicación regional del Proyecto



Fuente: Golder 2005a



1.3 Antecedentes generales

En agosto de 2000, CMN presentó la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del Proyecto Pascua-Lama ante la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) de la Tercera Región de Atacama. Dicho Proyecto fue aprobado ambientalmente por la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA) en el año 2001 mediante Resolución de Calificación Ambiental (RCA) 039 (COREMA, 2001a); posteriormente dicha autorización fue modificada por la COREMA mediante Resolución 059 (COREMA, 2001b).

Luego, debido a cambios introducidos en el diseño del Proyecto original, CMN presentó a la CONAMA el EIA para la "Modificación del Proyecto Pascua-Lama" (CMN, 2004), la cual fue aprobada por la COREMA mediante RCA 024 en el año 2006 (COREMA, 2006).

La documentación presentada por CMN a la CONAMA incluyó en su oportunidad, una Línea Base Ambiental (CMN, 2004) dentro de la cual el titular del Proyecto facilitó una descripción del medio físico, biótico y humano, tal y como lo exige la Ley 19.300 (Artículo 12) y el Decreto Supremo 95 / 01 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES), Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Formando parte de esta Línea Base del medio físico, CMN entregó los antecedentes que describían los cuerpos de hielo o crioformas identificadas en el área de influencia directa e indirecta del Proyecto (Milana, 2005). En la Sección 3.3 de este documento se incluye una relación de toda la información entregada en las tres adendas del EIA.



2.0 OBJETIVO DEL INFORME

Este documento tiene por objeto presentar toda la información disponible sobre las criofomas en el área de influencia del Proyecto Pascua–Lama y las zonas referenciales. Con tal objeto, este informe integra los resultados de los trabajos realizados por CMN hasta el año 2009, compilando de forma exhaustiva los datos e información conocida, relacionada con los glaciares, glaciaretos y demás criofomas ubicadas en el área del Proyecto.



3.0 ALCANCES DEL INFORME

3.1 Clasificación de crioformas

Se define como crioforma a cualquier depósito o cuerpo de hielo, independientemente de su origen, que se encuentre sobre o formando parte de la corteza externa del planeta. Esta definición incluye glaciares, capas de hielo, cuerpos de hielo menores, permafrost, formaciones de hielo cubiertas, glaciares de roca u otros depósitos de hielo. Así, para los efectos de este estudio, se han considerado las siguientes crioformas:

■ Glaciares

Un glaciar es una masa de hielo sobre el suelo, que fluye en una pendiente debido a la acción de la gravedad (por deformación interna y/o al deslizarse su base) y está confinado por esfuerzos internos y fricción en su base y costados. Un glaciar se origina por la acumulación de nieve en elevaciones altas, balanceado por el deshielo o por descarga al mar cuando se encuentra en elevaciones bajas. Esta definición ha sido tomada a partir de Houghton et al. (2001) y traducido en Golder (2009c).

■ Glaciaretos

Los glaciaretos son pequeñas masas de hielo que se localizan sobre las laderas de montañas, depresiones, sectores en sombra o zonas receptoras de avalancha. Dichas pequeñas masas de hielo pueden no exhibir flujo y se pueden conservar u originar debido a la acumulación de nieve duradera por algunos años. Del mismo modo, en años muy secos estas masas tienden a desaparecer, cubriéndose de materiales o reduciéndose significativamente de tamaño (CMN 2008b, Anexo N).

■ Hielo Cubierto

El hielo cubierto corresponde a todos aquellos cuerpos de hielo no visibles, subyacentes, cuya superficie visible está formada por una capa de detritos de diferente espesor (Milana, 2005). (NOTA: esta "unidad" no está categorizada como parte de las "unidades geomorfológicas" definidas en el Capítulo 4.3).

■ Glaciares de roca

Un glaciar de roca corresponde a un depósito de distribución granulométrica generalmente pobre de detritos y material fino, cementado por cantidades variables de hielo, conteniendo inclusive hielo en su núcleo. Pueden ocurrir en áreas de permafrost (de hecho puede ser un fenómeno discontinuo de permafrost), al pie de farellones, de los cuales se desprenden fragmentos de roca contribuyendo así a la formación del depósito. Esta definición de glaciar de roca concuerda con la definición presentada en Golder (2009c). En la sección 5.7 se consigna información referente a los glaciares de roca presentes en el área del Proyecto.

■ Permafrost

El permafrost es un suelo o material orgánico el cual se encuentra a temperaturas iguales o menores a 0°C durante un periodo de por lo menos 2 años consecutivos. La definición de permafrost ha sido tomada de Van



Everdingen (1998), referenciado a su vez en Lembe (2007). En la sección 5.6 se consigna la información específica relacionada con el permafrost.

Adicionalmente, en Anexo A: Glosario, se han definido todos los términos que se usan en este informe.

3.2 Definición del área de estudio de las crioformas

3.2.1 Regional

A una escala regional, el área de estudio comprende la cabecera del Río Huasco, Tercera Región de Atacama. Esta área está situada entre los 28° 30' y los 30° latitud Sur, y entre los 68° 45' y los 70° 15' de longitud Oeste.

El presente informe se ciñe al territorio chileno, de manera que hacia el Este el límite de la cuenca coincide con la frontera internacional con la República Argentina. Hacia el Norte, el área de estudio limita con la cuenca del Río Copiapó y hacia el Sur se extienden los trabajos hasta la divisoria de aguas con la cuenca del río Elqui, situado en la región de Coquimbo.

A esta escala regional, la evaluación será bibliográfica y estará orientada a obtener información referencial sobre la localización y tendencias generales de las crioformas en la región.

3.2.2 Local

El área de estudio local comprende:

- 1) Las crioformas consideradas en el área de influencia de la zona del Proyecto, que corresponden a los glaciares Estrecho y Guanaco, los glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Esperanza y el glaciar de roca Estrecho B. Estas crioformas pertenecen a las subcuencas Del Estrecho, El Toro–Esperanza y Guanaco-Cañitos las cuales aportan un porcentaje residual de los recursos hídricos al Río Huasco, según se expone en la sección 4.4.
- 2) Las crioformas seleccionadas como testigo de referencia por estar fuera del radio de posible influencia del Proyecto. Estas son el glaciar Ortigas 1 y el glaciarete Ortigas 2, una caracterización de ellos se presenta en la sección 8.0.

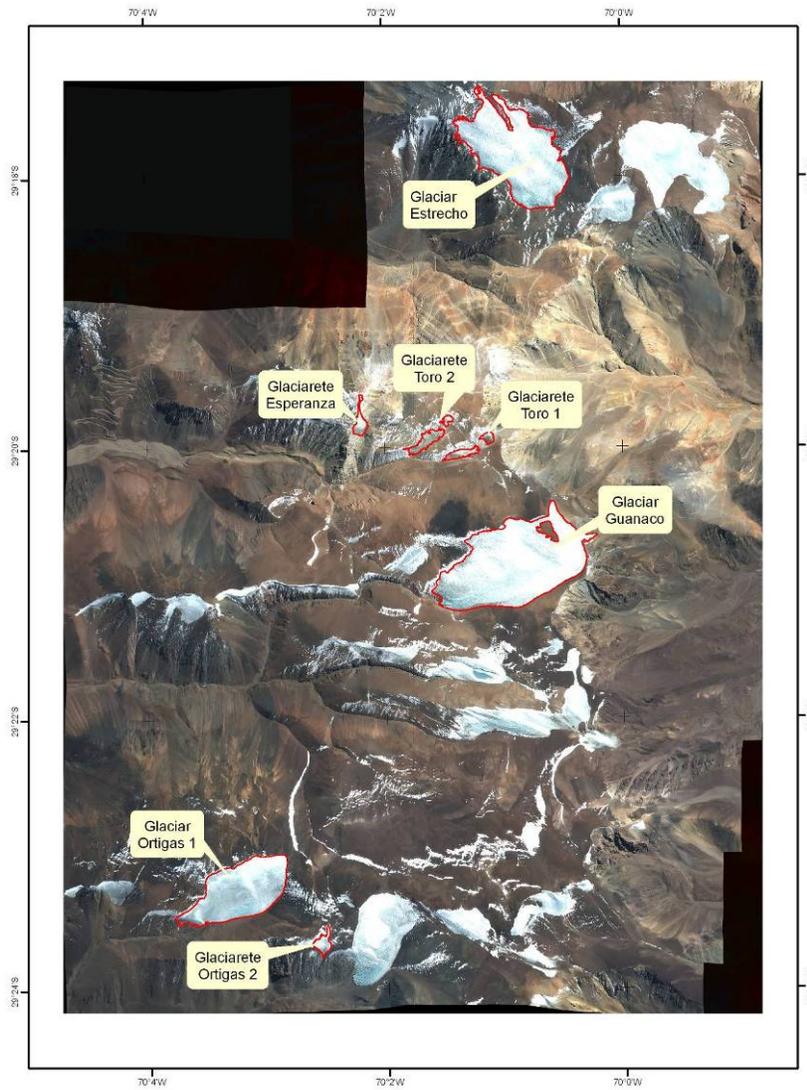
La Figura 3-1 muestra la ubicación general de cada uno de los cuerpos considerados, y la Figura 3-2 presenta la ubicación de los cuerpos relacionados a las subcuencas en las cuales se ubican.

A continuación se presenta una serie de fotografías que muestran cada una de las crioformas en estudio.



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

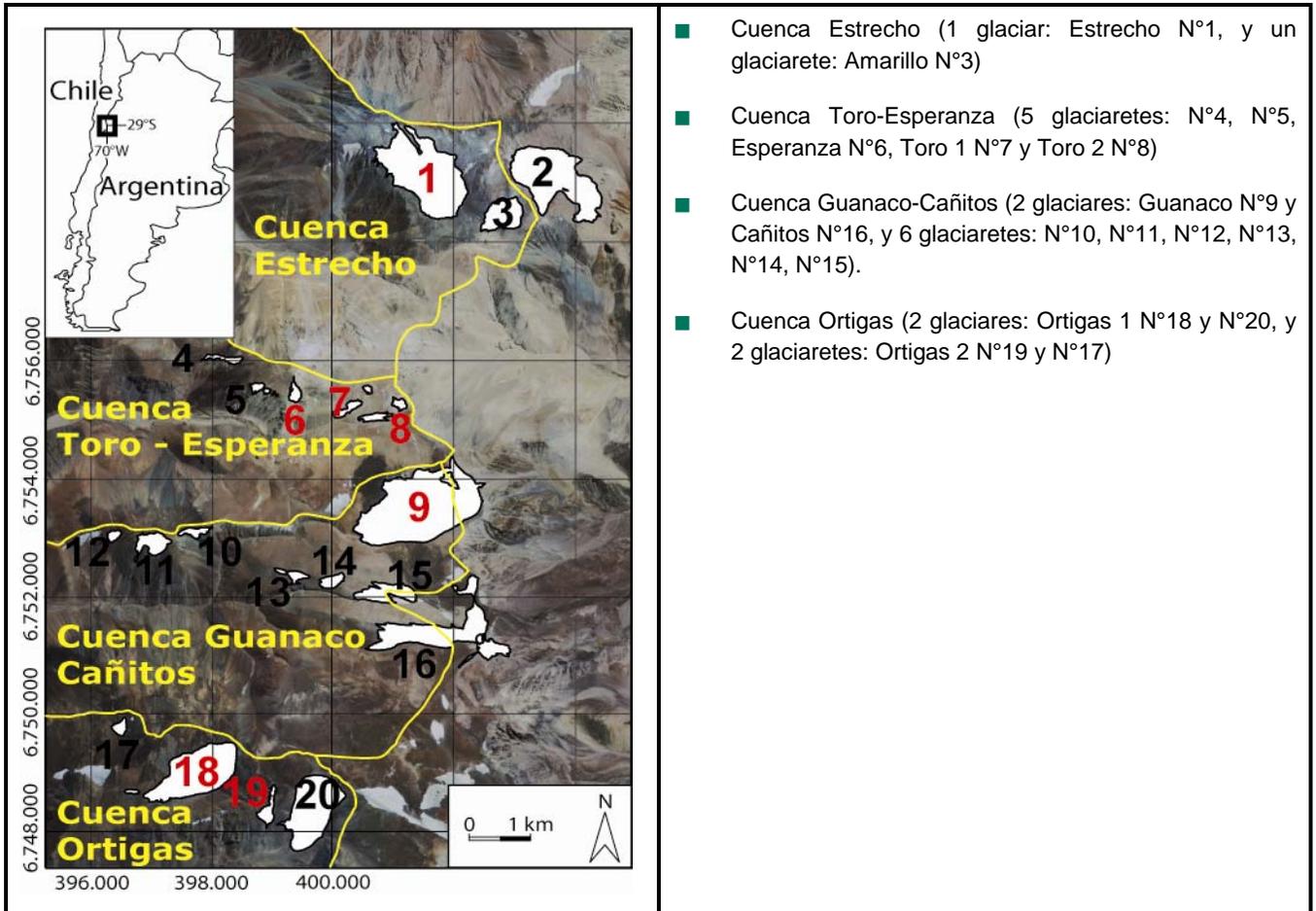
Figura 3-1: Ubicación de los glaciares y glaciaretos en estudio



Fuente: CEAZA 2008e



Figura 3-2: Ubicación de glaciares y glaciaretos por cuencas



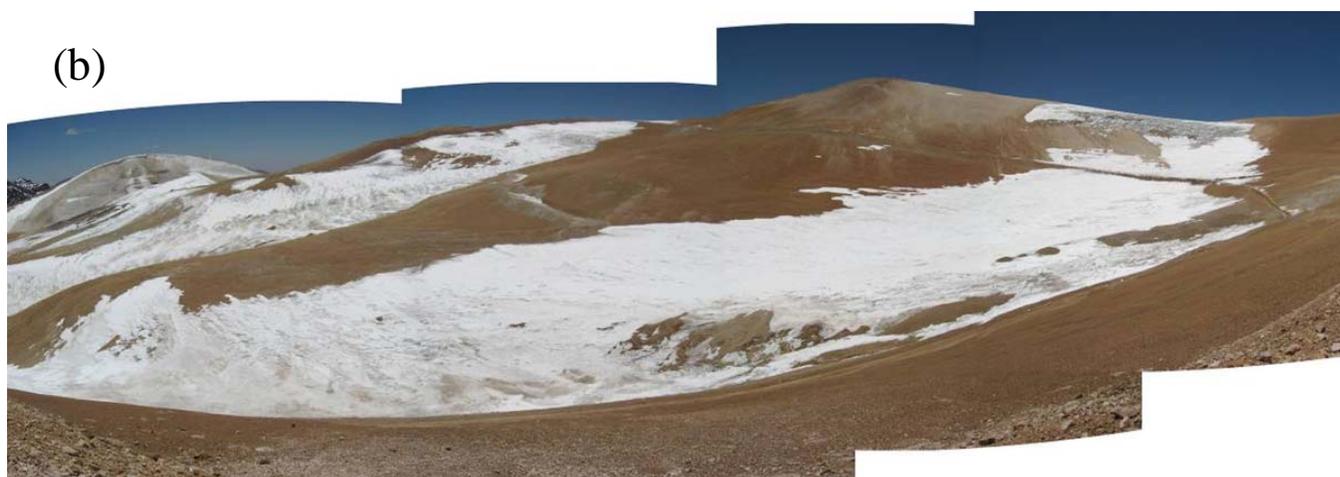
Fuente: CEAZA 2008a

Toro 1 Superior: Glaciarete con superficie de hielo irregular, con presencia de penitentes de 1,0 m de altura y pequeñas terrazas de hielo (asemejando un sistema de cascadas de hielo).

Toro 1 Inferior: Glaciarete con superficie de hielo irregular, (Figura 3-3) con algunas áreas cubiertas con detritos y penitentes de hasta 2,0 m de altura.



Figura 3-3: (a) Detritos y penitentes del glaciarete Toro 1 inferior, (b) Toro 1 en diciembre de 2007



Fuente: CEAZA 2008e

Toro 2: Glaciarete (Figura 3-4) cuya superficie de hielo posee penitentes iguales o mayores a 1,8 m de altura situados a corta distancia uno del otro.



Figura 3-4: (a) Penitentes del glaciarete Toro 2, (b) Toro 2 en diciembre de 2007



Fuente: CEAZA 2008e

Esperanza: Glaciarete (Figura 3-5) cubierto con penitentes de hasta 5 m de altura, observándose grietas entre ellos.



Figura 3-5: (a) Penitentes en glaciarete Esperanza, (b) Esperanza en el 8 de diciembre de 2007



Fuente: CEAZA 2008e

Guanaco: Este glaciar posee una amplia superficie plana (Figura 3-6), con penitentes pequeños, de alturas inferiores a 0,5 m, terrazas de hielo re-congelado y grietas en la superficie del glaciar.



Figura 3-6: (a) Superficie de glaciar Guanaco con penitentes pequeños, (b) Guanaco en diciembre de 2007



Fuente: CEAZA 2008e

Estrecho: Este glaciar posee una amplia superficie plana (Figura 3-7).



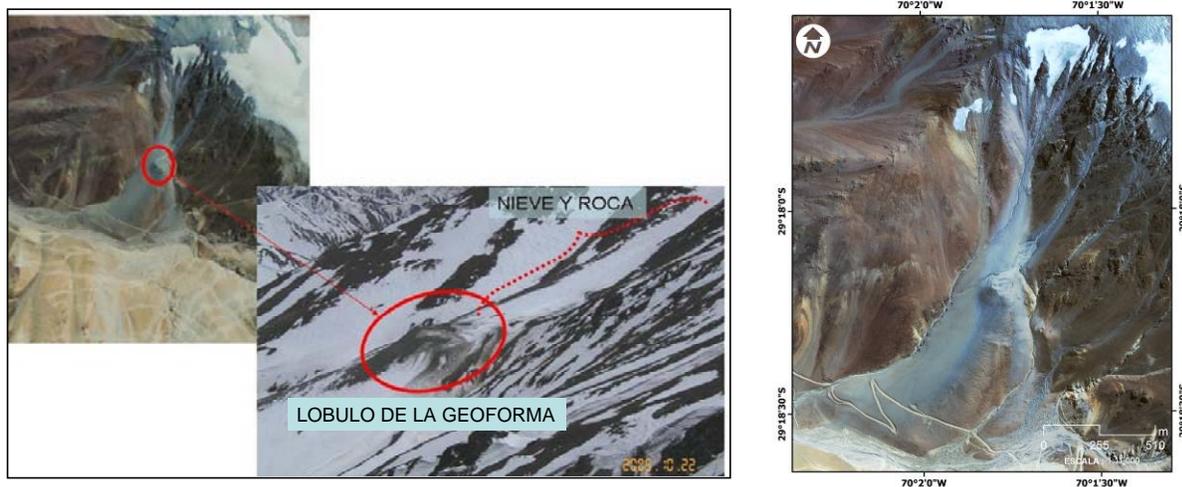
Figura 3-7: Estrecho en diciembre de 2007



Fuente: CEAZA 2008e

Estrecho B: Es un glaciar de roca del tipo "protalus rampart" (Figura 3-8)

Figura 3-8: Geoforma Estrecho B





3.3 Referencias bibliográficas relacionadas a crioformas

Para la elaboración de este Informe se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el objetivo de compilar toda la información disponible relacionada con la criosfera del área del Proyecto y a partir de ella preparar un resumen actualizado. Los informes y documentos enumerados en esta sección se presentan organizados según las diversas etapas que ha seguido la evaluación ambiental del Proyecto a través del tiempo, desde el año 2000 al 2006, y posteriormente los estudios se presentan organizados según autor.

■ EIA Proyecto Pascua-Lama (agosto 2000).

- Capítulo 5. Línea de Base

■ EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama (diciembre 2004).

- Capítulo 5. Línea de Base.
- Anexo D
 - ◆ Golder 2002b Glacier Survey Pascua-Lama, January 2002, 019-2021;
 - ◆ Golder 2003b Estudio de Glaciares Marzo 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2007; y
 - ◆ Golder 2004a Estudio de Glaciares Diciembre 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2041.

■ Adenda 1 (abril 2005).

- Golder 2005n. Viabilidad Manejo de los Glaciares, Proyecto Pascua-Lama, 051419017 (Adjunto al Adenda 1)

■ Adenda 2 (noviembre 2005).

- Capítulo 3 – Glaciares y Permafrost
- Anexo II-A Golder 2005r Informe Geológico Valle del Río Del Estrecho Proyecto Pascua-Lama
- Anexo II-B Golder 2005a. Línea base de Hidrología para el lado Chileno del Proyecto Pascua-Lama
- Anexo II-F Jones 2005a, Modelo Hidrológico de la Cuenca del Río Estrecho, octubre 2005
- Anexo II-G Jones 2005b, Modelo Hídrico de los Glaciares de la Cuencas Superior del Río El Toro y los Cambios Potenciales a los Caudales Aguas Abajo
- Anexo III-A Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama
- Anexo III-B Vallon M.y Vincent C. 2005. Balance Invernal 2005 de los Glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco
- Anexo III-C Golder. 2005b. Caracterización Geomorfológico Preliminar del Área de Pascua.
- Anexo III-D Golder. 2005c. Modelamiento de Vientos
- Anexo III-E CMN 2005a. Plan de Reubicación de Hielo.
- Anexo III-F Memorandos Técnicos Relacionado con Glaciares, incluyendo lo siguiente:
 - ◆ Golder 2005d Relevamiento de Cuerpos de Hielo Descubiertos en la Cuenca del Río Huasco-Algodones.
- Anexo III-G Golder 2005g Estudio de Campo de Hielo y Glaciares, incluyendo los siguientes:



- ◆ Golder 2002b Glacier Survey Pascua-Lama, January 2002, 019-2021
- ◆ Golder 2003b Estudio de Glaciares Marzo 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2007
- ◆ Golder 2004a Estudio de Glaciares Diciembre 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2041
- ◆ Golder 2005q, Abril 2005, Monitoreo de Glaciares de Noviembre de 2004, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- Anexo IV-A Golder 2005h. Simulación de Grilla Fina de la Depositación de Polvo debido a las Actividades Mineras Proyecto Pascua-Lama.

■ Adenda 3 (enero 2006).

- Anexo 2.1.D GOLDER. 2006e. Glaciar de Roca en el Sector Nevada Norte.
- Anexo 2.2.A. Rivera A. y Casassa. 2002. Mediciones de Espesor en Glaciares de Chile Centro-Sur.
- Anexo 2.2.B. Eisen O et al. 2003. Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined. investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body.
- Anexo 2.2.C. Ginot P. Reconstruction of Sublimation and Precipitation from The Cerro Tapado Ice Core (North Chilean Andes, 30°S).
- Anexo 2.2.D. Vergara J. 2003. The interannual variability of the Echaurren glacier mass balance: Chilean Andes (abstract).
- Anexo 2.2.E. Ammann C. 2001. Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18 - 29°S).
- Anexo 2.2.F. Schort L. 1991. Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report.
- Anexo 2.2.G. Humlum O. 2004. A Handbook on Periglacial Field Methods.
- Anexo 2.2.H. Carrasco J. et al. 2005. Changes of the 0°C isotherm and equilibrium line altitude in central Chile during last quarter of the 20th century.
- Anexo 6.1 Jones 2006 Modelo Hidrológico de la cuenca Río Estrecho, enero 2006,

■ Información Complementaria de Línea Base (2006-2008).

Además de los estudios realizados para y durante la evaluación ambiental del Proyecto (1999-2006), desde el año 2006 al presente, CMN ha continuado haciendo estudios de línea base física a fin de profundizar el conocimiento de la dinámica de las crioformas presentes en el área de influencia directa del Proyecto y en otros sectores más alejados seleccionados como testigo; trabajos de línea base que pueden definirse como complementarios a los indicados anteriormente.

En particular, tras la aprobación ambiental del Proyecto dictada en febrero de 2006, se han llevado a cabo los siguientes trabajos adicionales:

- Informes elaborados por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)
 - ◆ CEAZA 2008g, Mediciones Meteorológicas sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama. 25 de agosto de 2008 (Anexo B)
 - ◆ CEAZA 2008c. Balance de energía sobre dos glaciares en la zona de Pascua-Lama. 21 de noviembre 2008. (Anexo D)



- ◆ CEAZA 2008b Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en la Valle Huasco Alta, 2004. 1 de diciembre de 2008. (Anexo F)
- ◆ CEAZA.2008a. Evolución de la superficie de 20 glaciares en la zona y al Sur de Pascua-Lama, entre 1955 y 2007. 20 de noviembre 2008 (Anexo G)
- ◆ CEAZA 2008f. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2006-07. 25 de agosto de 2008. (Anexo J)
- ◆ CEAZA 2008e. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2007-08. 26 de agosto de 2008. (Anexo K)
- ◆ CEAZA 2008d. Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua-Lama 23 de octubre de 2008 (Anexo P)
- ◆ CEAZA 2008h, Medición de Rutas Nieve en el Sector de La Olla, Valle del Estrecho, Huasco Superior, III Región, 1 de septiembre de 2008

- Informes elaborados por CMN
 - ◆ CMN 2007. Plan de Monitoreo de Glaciares. Rev. 1.
 - ◆ CMN 2007. Plan de Monitoreo de Glaciares. Rev. 2.
 - ◆ CMN 2008. Plan de Monitoreo de Glaciares. Rev. 3.
 - ◆ CMN 2008a. Mediciones de caudales cercanos a los glaciares y glaciaretos. Cuencas superiores del Río Huasco. Verano 2007-2008 (Anexo E)
 - ◆ CMN 2008b Monitoreo del Movimiento de los Glaciares. Cuenca Superior del Río Huasco - Tránsito. (Anexo N)
 - ◆ CMN 2008d. Monitoreo de Movimiento de los Glaciares de Roca. (Anexo M)
 - ◆ CMN 2008f Selección de Glaciarrete de referencia, Plan de monitoreo de glaciares Proyecto Pascua-Lama
 - ◆ CMN 2009a Geología y su relación con la depositación natural de polvo y detritos en los cuerpos de hielo, 13 de julio 2009 (Anexo S)
 - ◆ CMN 2009b Mediciones de Polvo Sedimentable en las cercanías de los Glaciares y Glaciaretos, Verano 2008 (Anexo L)
 - ◆ CMN 2009c. Programa de monitoreo de glaciares y glaciaretos a través de imágenes satelitales de alta resolución.(Anexo R)
 - ◆ CMN 2009d. Glacierete de Referencia Ortigas 2, 9 de julio 2009 (Anexo T)

- Informes elaborados por GOLDER.
 - ◆ GOLDER 2006f, October 2006, Sublimation field data and discussion, Pascua-Lama Project 06-1419-018/5610
 - ◆ GOLDER. 2006a. Technical Memorandum 0614_06 - GPR Test Toro #1
 - ◆ GOLDER 2008e, julio 2008, Estudio de Barreras de Nieve, Proyecto Pascua-Lama, 079215 5019
 - ◆ GOLDER 2009a. Monitoreo de temperatura de Glaciares y Glaciaretos en el área Pascua-Lama. 079 215 5019-2.1-IT002. (Anexo C)



- ◆ GOLDER 2009b Actualización Información Geoforma Estrecho B. 079 215 5009-2.6-IT004, (Anexo Q), incluyendo:
 - ◆ GOLDER. 2006c. Technical Memorandum 0621_06 - Seismic Survey Results (Resultados Perfilaje Sísmico Geoforma Estrecho B), 18 de agosto de 2006
 - ◆ GOLDER. 2006b. Technical Memorandum 0818_06 - Updated Volume Estimate, Estrecho B Geoforma
 - ◆ GOLDER, 2006e. Glaciar de Roca en el Sector de Nevada Norte, 7 de enero de 2006
 - ◆ GOLDER 2009c, diciembre 2008, Retroceso Glaciar e Impacto del Cambio Climático, 0792155019-2.6-IT 003_ (Anexo H)
 - ◆ GOLDER 2009d Balance de Masa, verano de 2006, 079 215 5019-IT001, 22 de enero de 2009 (Anexo O)
- Informes elaborados por otros autores.
- ◆ BGC 2009 Caracterización de Permafrost (Anexo I)
 - ◆ Knight Piesold 2009, Modelo de Simulación Hidrogeológico Pascua (Ref No. SA202-00027/12-2) rev C, 25 de marzo 2009
 - ◆ MA&C 2007 Programa de Monitoreo Ambiental julio 2006 a junio 2007

3.4 Selección de variables para la caracterización de la criosfera

El objetivo central de los estudios de la línea base de la criosfera es determinar las relaciones que existen entre estas unidades geomorfológicas y la regulación de los recursos hídricos en las cuencas en que se encuentran.

Para ello es necesario conocer los procesos de acumulación y pérdida de la masa congelada, y los procesos secundarios y condiciones físicas que determinan tal acumulación y pérdida.

La acumulación procede de las precipitaciones, las que ocurren siempre en forma de nieve, mientras que las pérdidas de masa pueden producirse por fusión o por sublimación, dependiendo de la energía disponible y las condiciones del hielo. Será precisamente el proceso de fusión el que aportará los caudales líquidos a los cursos de agua que se alimentan de las criofomas.

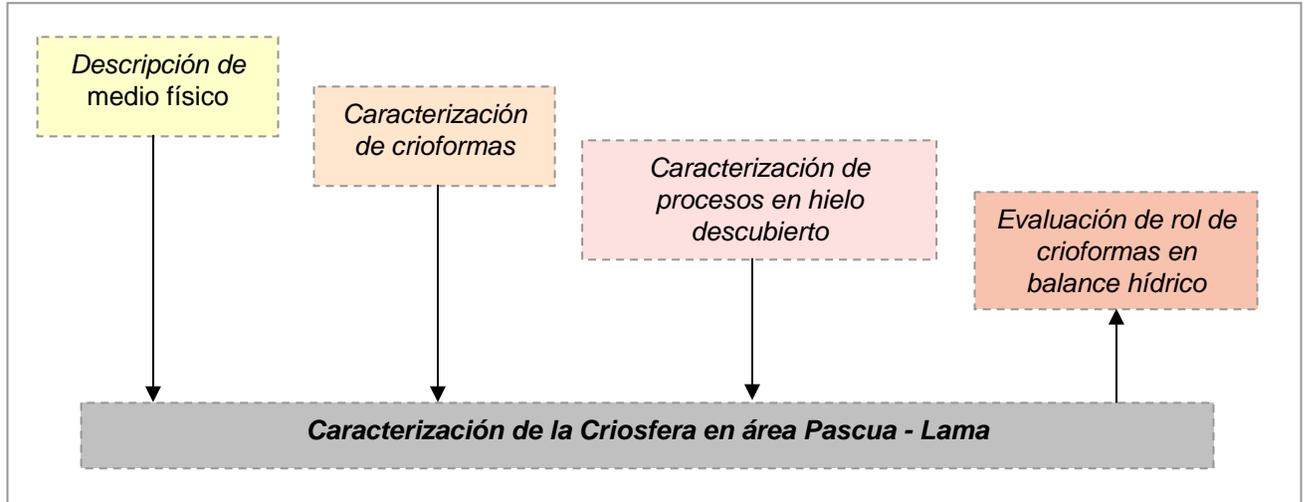
Para realizar una caracterización de la criosfera incluyendo los procesos de acumulación y pérdida de masa a través del tiempo así como su relación con los recursos hídricos; GOLDER y CMN han determinado que es necesaria la investigación en cuatro ámbitos principales, los cuales se desarrollan en los capítulos 4 a 7 del presente informe:

- 1) La descripción del entorno físico de la criosfera;
- 2) La caracterización física de las criofomas objeto de estudio, en su estado actual;
- 3) La caracterización de procesos que determinan la evolución de los cuerpos de hielo descubiertos; y
- 4) La evaluación del rol de las criofomas en el balance hídrico.

La Figura 3-9 presenta el flujo de información que proporcionan los elementos de caracterización.



Figura 3-9: Elementos de la caracterización de la criosfera



Fuente: Elaboración propia

Los estudios comprenden mediciones cuantitativas cuando ello es posible, y descripciones cualitativas a modo de complemento. La Tabla 3-1 presenta los métodos empleados en cada caso, los que se desarrollan con mayor detalle en capítulos sucesivos.

Tabla 3-1: Variables y métodos de estudio de los glaciares

Estudio	Unidad	Método	Tipo de estudio	
			Cuant.	Cual.
Caracterización física de las criofomas				
Inventario y descripción de criofomas		Interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite.	X	X
Superficie	m ²	Mediciones sobre fotografías aéreas e imágenes de satélite.	X	X
Espesor y volumen del hielo	m m ³	Ground Penetrating Radar, levantamiento en terreno.		
Estratigrafía y estructura		Descripción de experto a partir de calicatas en la nieve.	X	X
Temperatura del hielo	°C	Medición mediante Termistores, siguiendo el "Handbook on Periglacial Field Methods" (2004).	X	
Presencia de polvo sedimentado	mg/m ² /día	Instalación de envases siguiendo Normas ASTM D 1739 – 98 (2004) "Standard test methods for collection and measurement	X	



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Estudio	Unidad	Método	Tipo de estudio	
			Cuant.	Cual.
		of dustfall".		
Albedo	W	Ajuste de la fotografía al DEM y mapeo de albedo, según el método explicado en CEAZA 2008d	X	X
Caracterización del permafrost (mapa de distribución, profundidad de la capa activa, temperatura)	m ²	Investigación de calicatas y sondajes	X	X
	m			
	°C	Medición de temperatura en líneas de termistores instalados en sondajes de 20 a 100 m de profundidad.		
Caracterización de Glaciares de Roca (volumen y desplazamiento)	m ³	Geología de calicatas o literatura, investigación sísmica y GPR, evaluación topografía, y medición de movimiento por balizas	X	X
	cm/año			
Caracterización de procesos que determinan la evolución de los cuerpos de hielo descubiertos				
Balance de masas	m a.eq.	Mediciones de altura de la nieve y hielo en balizas, registrando la acumulación en invierno y la ablación en verano. Medición de densidad de la nieve. Medición de superficie con GPS diferencial y mediciones topográficas. Registro fotográfico.	X	X
	(metros agua equivalente)			
Balance de energía	W/m ²	Medición de radiación neta y albedo mediante sensores, presencia de polvo en superficie mediante lisímetros, T° del aire, T° del hielo y nieve, precipitación.	X	X
	%			
	m			
	°C			
	mm			
Movimiento de criofomas	cm/año	Medición de distancias desde una base fija a prismas situados sobre la criofoma, empleando una estación total.	X	
Evolución de superficies y volúmenes	m ²	Datos temporales de área de superficie de sensores remotes con datos o investigación GPR y estimaciones de profundidad de GPR, perforación y balizas.	X	X
	m ³			
Evaluación del rol de las criofomas en el balance hídrico				
Medición e interpretación de caudales aguas abajo de las criofomas	m ³ /seg	Registro de caudal en estaciones hidrométricas (canaletas Parshall) instrumentalizadas y en secciones manuales de aforo.	X	X
	l/seg			



4.0 DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO RELACIONADO A LA CRIÓSFERA

En esta sección se entrega una descripción general de las componentes del medio físico relacionadas a las crioformas en el área del Proyecto. La mayor parte de la información aquí presentada proviene de CMN (2000) y CMN (2004), excepto donde se indique otra fuente.

4.1 Clima y meteorología

4.1.1 Clima

La principal característica del clima de la zona es la gran sequedad del aire y las precipitaciones en forma de nieve. El cielo está normalmente despejado, lo que crea condiciones para que se produzca un marcado gradiente térmico entre las temperaturas diurnas y las nocturnas, cuando nada se interpone para atenuar la pérdida de calor por radiación. De acuerdo a la clasificación de Köppen (1900), se identifican las dos siguientes zonas climáticas en el área de influencia del Proyecto:

- **Desierto Frío de Montaña (BWk'G)** - Clima presente entre los 1.500 y los 4.000 m s.n.m. Las temperaturas medias anuales están por debajo de los 12° C, descendiendo a medida que se incrementa la altura. La temperatura media mensual del mes de enero es inferior a los 18° C y durante el invierno (mayo a septiembre) es menor a los 8° C. Las precipitaciones de régimen invernal son escasas, con un total anual que varía entre 50 y 150 mm aproximadamente, en un gradiente relacionado de forma directa con la altitud.
- **Tundra de Alta Montaña (EB)** - Clima característico de las cabeceras de las montañas del Norte Chico, en altitudes que superan los 3.000 m s.n.m. Está asociado a bajas temperaturas durante todo el año, con promedios inferiores a los cero grados centígrados, alcanzando -12,6° C sobre los 5.000 m s.n.m. Las precipitaciones ocurren preferentemente en período de invierno (mayo a septiembre), con más del 90% en forma de nieve.

Los cuerpos de hielo de interés en el presente estudio se ubican en un clima de Tundra de Alta Montaña.

4.1.2 Registros meteorológicos locales

El ambiente de Tundra de Alta Montaña es especialmente adverso para la instalación de equipos meteorológicos, por lo que la obtención de datos meteorológicos fidedignos en las inmediaciones de las crioformas es una tarea que reviste gran dificultad. Golder (2005a) plantea que existe un problema particular inherente a la medición de nieve caída en aquellas localidades con altas velocidades de viento, tal como es el sitio del Proyecto. En efecto, en el área de Pascua-Lama existe una extensa redistribución de la nieve a causa del viento; y por esta razón, es difícil obtener mediciones representativas de precipitación de nieve.

Durante los meses de diciembre 2007 y enero 2008 se instalaron tres estaciones meteorológicas adicionales a las dos ya instaladas por parte de CMN entre 1999 y 2000. Estas fueron denominadas Toro 1, Guanaco y Ortigas 1 (tratado en la sección 8.1.2) y están situadas sobre los cuerpos de hielo del mismo nombre con el objetivo de proporcionar información para caracterizar el medio físico local de los glaciares y glaciaretas.

La Tabla 4-1 presenta detalles de las estaciones meteorológicas instaladas sobre los cuerpos de hielo y en tierra firme en el área de Pascua-Lama. En la Figura 4-1 se muestran las instalaciones y la Figura 4-2 presenta



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

las ubicaciones de todas las estaciones indicadas en la Tabla 4-1. Mayores antecedentes están disponibles en el Informe CEAZA 2008g (Anexo B).

Tabla 4-1: Ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas en el área de Pascua - Lama

Id	Ubicación/ Nombre	Tipo de estación	Cota (m.s.n.m.)	Fecha instalación
1	Frontera	Meteorológica	4.927	1999
2	La Olla	Meteorológica	3.975	2000
3	Tres Quebradas / Toro	Meteorológica	3.700	Ene 1999*
1	Toro 1	Albedo	5.226	Dic 2007
2	Guanaco	Meteorológica y albedo	5.317	Dic 2007

Nota*: Fecha de inicio de registros

Fuente: CEAZA 2008g, Golder 2005^a

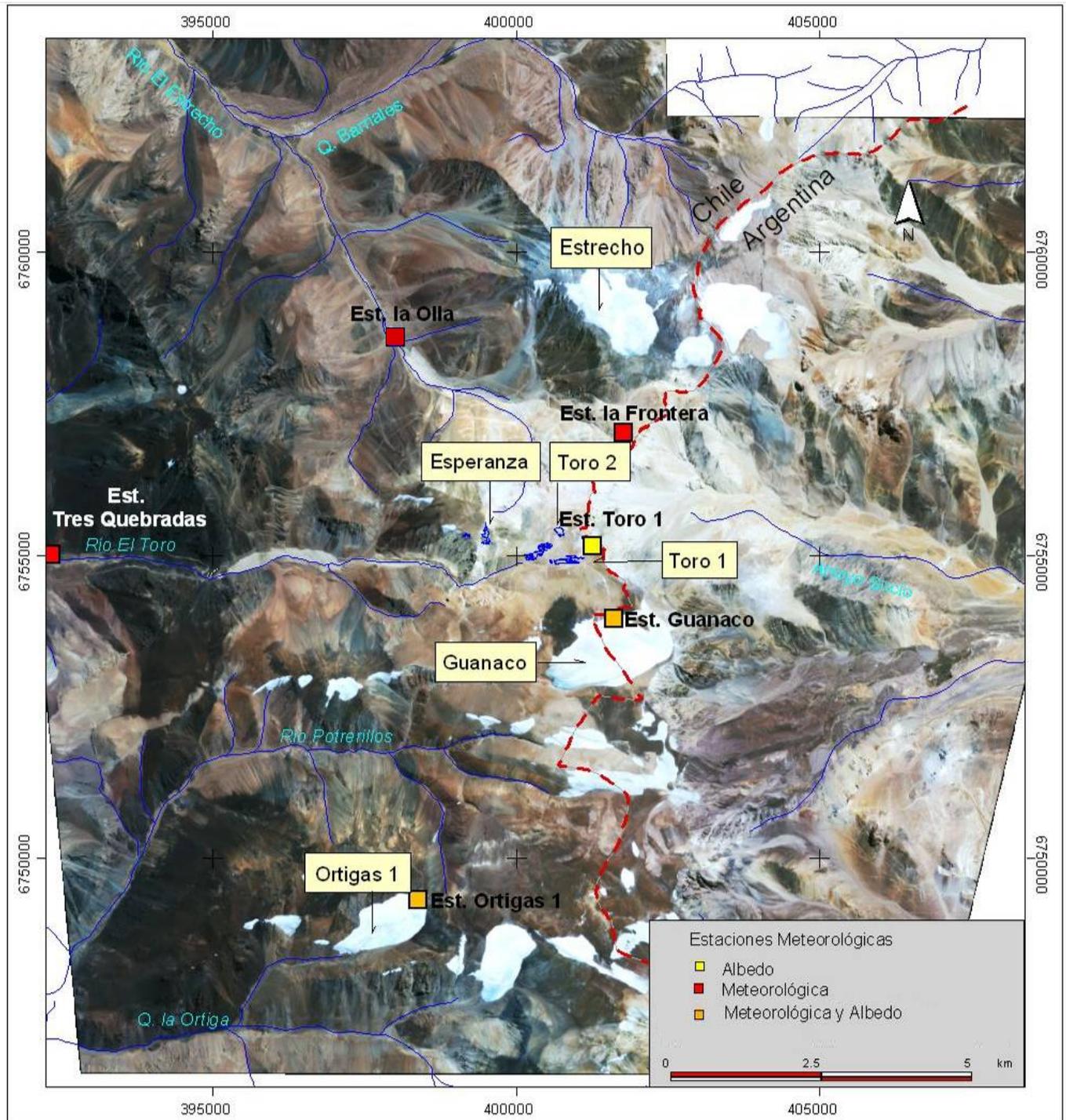
Figura 4-1: Estaciones meteorológicas instaladas sobre Guanaco y Toro 1 mostradas de izquierda a derecha, respectivamente.



Fuente: CEAZA 2008g



Figura 4-2: Ubicación de estaciones meteorológicas



Fuente: CMN 2008e



Las estaciones meteorológicas instaladas monitorean las variables indicadas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Variables de monitoreo en estaciones meteorológicas

Variable	Sensor	Altura, cm.	Precisión (cf. manual)
Temperatura del aire, °C	Vaisala HMP 45, ventilado (sobre el hielo) ³	300	±0,2°C (± 0,5°C a -40°C)
Humedad relativa, %	Vaisala HMP 45, ventilado sobre el hielo ³	300	±2 %
Velocidad del viento, m/s	Young 05103	300	±0,3 m/s
Dirección del viento, grados	Young 05103	300	±3 deg
Radiación de ondas cortas incidente, W/m ²	Kipp&Zonen CM3, 0,305<λ<2.8μm	150	±10 % ⁴
Radiación de ondas cortas reflejada, W/m ²	Kipp&Zonen CM3, 0,305<λ<2.8μm	150	±10 % ⁴
Radiación de ondas largas incidente, W/m ²	Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50 μm	150	±10 % ⁴
Radiación de ondas largas emitida, W/m ²	Kipp&Zonen CG3, 5<λ<50μm	150	±10 % ⁴
Nivel de la superficie de nieve/ hielo, m	Campbell Sci. SR50	300	±0,4%
Temperatura de la nieve (en glaciares), °C	Campbell Sci 107-L20	-40, -60, -90 y -110	±0,2°C (± 0,4°C a -40°C)
Flujo de calor en la nieve (en glaciares), W/m ²	Hukseflux HFP01SC	-50 y -100	±3 %

Fuente: CMN 2008e

4.1.3 Temperatura

La temperatura media del aire define el perfil térmico en el suelo, puesto que a mayor profundidad, la temperatura aumenta universalmente, salvo pocas excepciones. En general, para el cálculo de la variación de la temperatura del aire en el lugar se utilizaron las estaciones disponibles instaladas en tierra firme con datos completos de por lo menos un ciclo anual.

La Tabla 4-3 y la Figura 4-3 muestran las temperaturas del aire promedios anuales y variaciones mensuales de la estación Frontera de los años recientes (CMN 2004).

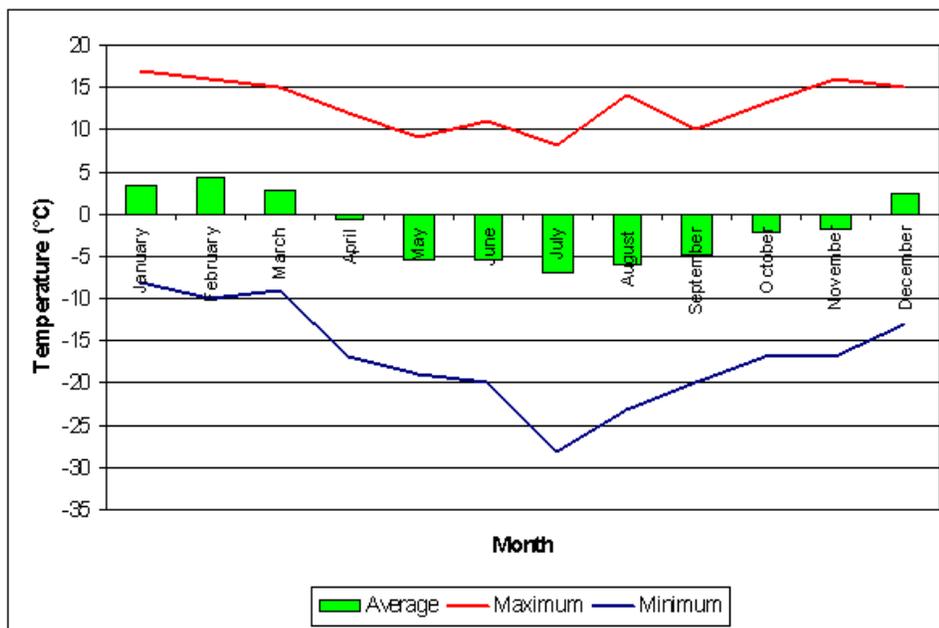


Tabla 4-3: Temperatura promedio anual del aire para la estación Frontera

Año	Temperatura promedio anual del aire (°C)
1999	-6,8
2000	-7,1
2001	-6,5
2002	-6,7
2003	n/d
2004	-6,1
2005	-6,8
Promedio	-6,7

Fuente BGC 2009

Figura 4-3: Variaciones mensuales de temperatura del aire para la estación Frontera (1999 a 2003)



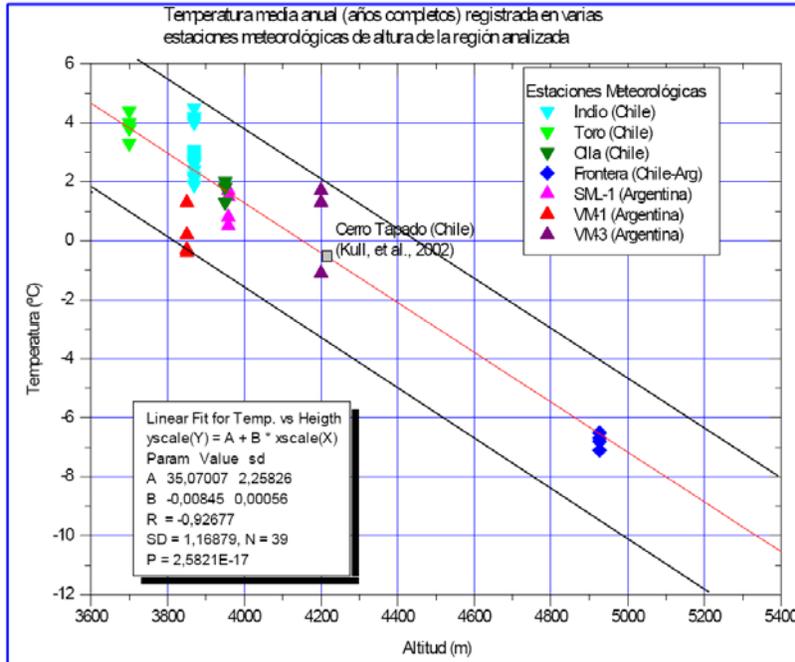
Fuente: Golder 2005h

Debido a la escasez de mediciones meteorológicas existentes en el área del Proyecto, particularmente por sobre los 3.800 m s.n.m., Milana 2005 complementó la estadística de temperaturas del aire con el registro de 11 meses de una estación instalada en el Cerro Tapado a 4.215 m s.n.m. (Ginot et al., 2001), ubicada al Noreste de la cuenca del río Elqui que se puede considerar como similar al área del Proyecto. Se efectuó un gráfico de estos datos (Figura 4-4) estableciéndose una línea de regresión que permite estimar el gradiente térmico altitudinal. El gráfico resultante indica una tendencia media, ya que a ésta se le suman numerosos factores que controlan la temperatura (por ejemplo, orientación de las laderas, incidencia del viento, etc.).



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 4-4: Variación de la temperatura media anual con la altura



Fuente: Milana 2005

La Tabla 4-4 muestra que la temperatura mínima del aire en los glaciares Toro 1 y Guanaco (con altitudes de 5.226 y 5.317 m s.n.m., respectivamente), es de -25,5 °C y la máxima es de 9,6° C. Además muestra que los promedios durante el verano están dentro de un rango de -2.8 a -12.3 °C (CEAZA 2008g).

Aun cuando no se disponga de mediciones de un año completo, las temperaturas mostradas en la Tabla 4-4 están dentro del rango de temperaturas mostradas en Figura 4-4, para similar altura. Por esta razón se asume que la relación mostrada en dicha figura puede ser aplicable a las inmediaciones del área de Proyecto.

Tabla 4-4: Promedios mensuales de temperatura del aire (°C), máximos y mínimos instantáneos para los meses en que las mediciones son completas (en los glaciares)

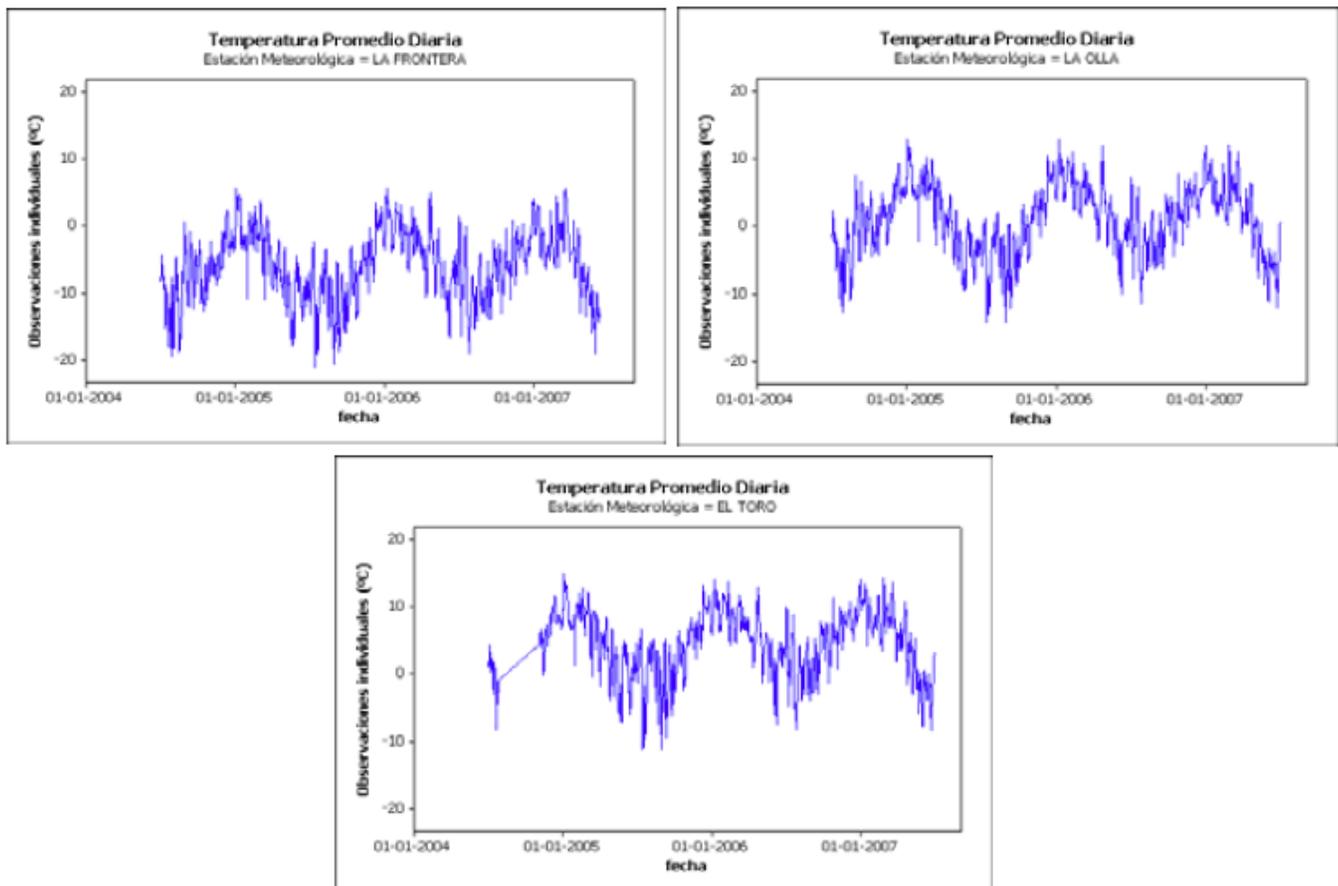
Fecha	Toro 1			Guanaco		
	Promedio	Max	Min	Promedio	Max	Min
Ene-08	-2,83	6,56	-10,90	-3,14	5,94	-11,55
Feb-08	-6,36	3,16	-14,47	-6,45	9,61	-14,40
Marzo-08	-6,34	2,65	-14,76	-6,52	3,17	-15,08
Abr-08	-8,72	2,74	-18,33	-	-	-
Mayo-08	-12,25	-2,96	-25,23	-12,01	-2,77	-25,49

Fuente: CEAZA 2008g



También se cuenta con la estadística de las mediciones manuales y automáticas de las variables meteorológicas monitoreadas durante el período julio 2006 – junio 2007 por MA&C (2007). En la se muestra la variación de la temperatura promedio diaria para las estaciones de monitoreo La Frontera, El Toro y La Olla. Los resultados de este estudio muestran la misma tendencia que Golder (2005a) y Ginot et al. (2001).

Figura 4-5: Variación de la temperatura promedio diaria (julio 2006 – junio 2007)



Fuente: MA&C 2007

4.1.4 Precipitación

Las características generales de la precipitación en el área chilena del Proyecto Pascua-Lama son las siguientes:

- La precipitación por sobre los 4.000 ms.n.m. ocurre en forma de nieve, con valores insignificantes de lluvia;

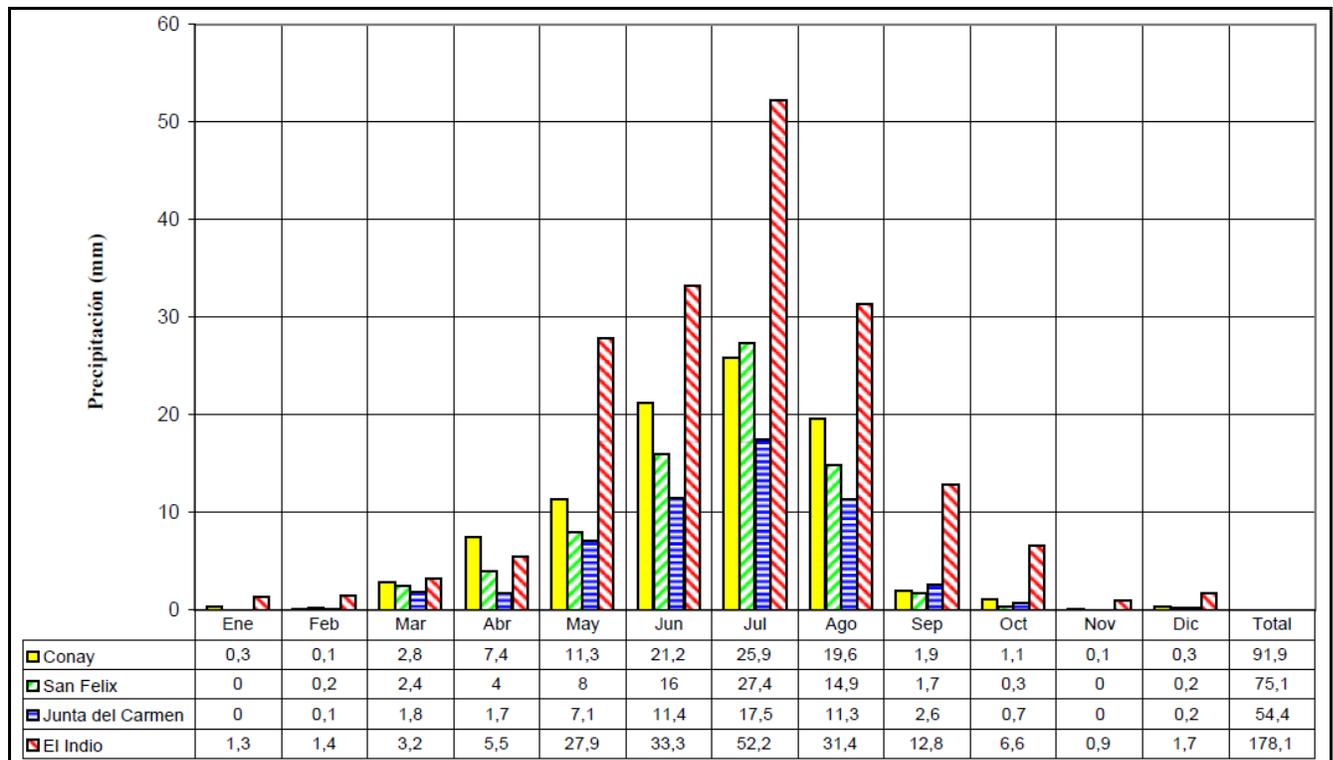


RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

- Más del 80% de la precipitación anual en la zona cercana del Proyecto ocurre típicamente en los meses de mayo, junio, julio y agosto;
- Los registros de precipitación de largo plazo en el área indican un patrón típico de un año húmedo seguido por varios años secos. Como resultado de esto, existe una diferencia apreciable entre los valores promedio y los valores de la mediana para la precipitación anual, siendo los valores de la mediana considerados como los “normales” o valores típicos.
- La precipitación que cae en forma de nieve está sujeta a una redistribución importante por efecto del viento. Las observaciones de redistribución de nieve en el sector superior de la cuenca del río Del Estrecho indican que la nieve generalmente tiende a acumularse en el talud del valle que mira al Sur. Esto sería en parte debido a la más baja intensidad de la radiación solar incidente en el lado Norte del valle con exposición hacia el Sur, que resultaría en pérdidas menores por sublimación.

Considerando el limitado periodo de registro de precipitación en el área del Proyecto, se analizaron datos de precipitación media mensual en estaciones cercanas ubicadas a diferentes elevaciones: San Félix (1100 ms.n.m) , El Indio (3869 ms.n.m), Junta de Carmen (674 ms.n.m) y Conay (1450 ms.n.m) cuyos datos se presentan en la Figura 4-6, las cuales se utilizaron para determinar la correlación entre elevación y precipitación (Golder, 2005a).

Figura 4-6: Precipitación media mensual regional



Fuente: Golder 2005a



Como se mencionara anteriormente, dada la escasez de datos en el área del Proyecto y los cortos registros pluviométricos disponibles, es que se ha recurrido a los datos de la estación pluviométrica del Indio para la estimación de registros de larga data representativos del área. La estación de El Indio se ubica aproximadamente 50 km al Sur del la zona del Proyecto y a una cota 3869 ms.n.m, similar a la cota mas baja del área del Proyecto.

Es así como los valores mensuales de precipitación, para el período comprendido entre los años 1981 a 2003, en la estación Campamento Pascua (3.700 ms.n.m.) fueron estimados de la siguiente manera:

- Los datos del período 1981 a 2000 fueron generados sobre la base de la ecuación de regresión con la estación El Indio ubicada a los 3.860 ms.n.m. Sin embargo, considerando que el Proyecto se extiende hasta los 5.500 ms.n.m., es posible que la relación precipitación – altura no sea tan confiable debido a factores como la redistribución de nieve a causa del viento, variabilidad topográfica y aspectos de la cuenca. Por lo tanto el uso de esta correlación debe usarse con precaución y reconociendo las limitaciones de la extrapolación (Golder, 2005a).
- Los datos del periodo 2001 a 2003 fueron calculados, para los meses con datos, como la profundidad de nieve caída en la estación Campamento Pascua convertida a su equivalente en agua. Para aquellos meses sin datos, se utilizó la ecuación de regresión con la estación El Indio.

La Tabla 4-5 muestra un resumen de las estimaciones de precipitación mensual, para distintos períodos de retorno, en el Campamento Pascua (a partir de datos entre 1981 y 2003).

Tabla 4-5: Estimaciones de precipitación mensual en la estación Campamento Pascua (Altura 3.700 m s.n.m.), para distintos períodos de retorno

Probabilidad de excedencia	Estimación de precipitación (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dic
5 %	9,5	9,0	15	19	169	134	279	134	44	39	9,0	14
10 %	6,5	5,0	13	15	94	109	159	129	39	25	4,5	9,5
20 %	3,0	2,0	7,0	13	62	61	65	59	31	9,0	1,5	6,0
Media	1,5	1,4	3,7	6,6	37	38	60	39	15	7,7	1,0	2,0
Mediana (50%)	0,0	0,0	0,6	5,7	12	24	40	12	3,6	0,0	0,0	0,0

Fuente: Golder 2005a

Los datos de registro de precipitación anuales en la estación Campamento Pascua, registrados por CMN desde el año 2001 al 2003, fluctuaron entre 189 cm y 546 cm expresados como profundidad de nieve, con un promedio de los tres años de 344 cm. Se puede convertir esta medición a un rango entre 159 mm y 460 mm expresados como su equivalente en agua (Golder 2005a).

Sujeto a los análisis de frecuencia de estaciones pluviométricas regionales, la precipitación anual en el Campamento Pascua puede variar desde 31 mm (99% de probabilidad de excedencia) hasta 1.334 mm (1% de probabilidad de excedencia) a una elevación de 3.700 m s.n.m., la mediana y promedio de precipitación son estimados como 137 mm y 212 mm respectivamente, (GOLDER, 2005a). Los valores promedios en la Tabla 4-5



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

corresponden a un factor aproximado de 1,1 de las mediciones de la estación El Indio. La sección 4.4 presenta una evaluación de la relación entre precipitación y caudal.

La Tabla 4-6 presenta los datos de registros mensuales de la precipitación en la estación El Indio entre los años 1981 y 2004, utilizados por Jones 2005a, Jones 2006 y Knight Piésold 2009 para la estimación de la precipitación en las cuencas del río El Toro y río Del Estrecho. A modo de ejemplo, en la Tabla 4-7 se muestran los factores de corrección de precipitaciones para las subcuencas (río Del Estrecho) respecto de la estación El Indio (Knight Piesold, 2009) para el área del Proyecto.

Tabla 4-6: Precipitaciones registradas en estación El Indio

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
1981	0,0	0,0	3,9	3,9	0,0	0,3	2,7	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	27
1982	0,5	0,5	1,7	0,0	1,8	32,0	45,5	2,0	26,5	3,4	0,0	0,0	114
1983	0,0	10,4	0,0	17,2	8,3	22,3	46,5	36,8	0,0	3,2	2,9	10,5	158
1984	5,0	5,6	4,0	0,0	3,2	114,7	241,9	26,3	12,4	0,0	1,0	0,0	414
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	21,1	49,1	1,6	3,1	18,7	0,0	0,0	100
1986	0,0	3,7	1,8	5,1	79,6	29,1	55,2	112,4	0,0	50,7	1,7	0,0	339
1987	3,8	2,7	20,9	12,7	146,0	34,4	264,4	201,9	34,9	32,6	0,0	0,0	754
1988	0,0	0,9	0,0	0,0	55,8	3,5	2,1	2,6	13,7	0,0	0,0	0,0	79
1989	9,8	0,0	0,0	0,0	33,8	4,2	20,0	49,4	1,2	0,0	5,0	4,6	128
1990	0,0	0,0	0,0	7,6	1,7	3,8	22,2	7,6	66,1	3,5	0,0	5,5	118
1991	0,0	0,0	0,0	2,2	12,9	52,2	20,2	5,6	9,5	0,0	0,0	0,0	103
1992	0,0	0,0	0,0	7,0	40,3	1,4	3,4	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	63
1994	0,0	0,0	10,0	1,1	0,2	6,8	49,3	13,1	0,5	0,0	0,0	0,0	81
1995	2,8	0,0	0,6	5,8	1,7	0,0	6,1	0,0	29,0	5,5	0,0	13,3	65
1996	0,0	0,0	0,8	3,9	0,0	7,1	5,5	23,7	0,0	0,0	0,0	0,0	41
1997	0,0	0,0	5,6	0,8	9,9	179,4	34,1	109,0	32,6	7,5	0,0	0,0	379
1998	0,0	0,0	4,2	5,2	8,8	32,0	13,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	64
1999	0,0	0,0	3,0	5,0	9,9	11,6	0,5	0,0	24,6	18,5	0,0	0,0	73
2000	2,5	1,0	0,0	10,3	15,1	53,3	41,4	0,0	10,3	0,0	0,0	0,0	134
2001	0,0	4,5	10,2	13,7	13,7	7,2	40,5	46,0	8,2	6,9	0,0	4,8	156
2002	0,0	0,0	0,0	4,7	126,3	43,6	187,5	41,9	21,0	0,0	0,0	1,5	426
2003	0,0	2,0	0,0	0,9	37,5	10,3	35,7	9,7	0,0	0,0	0,0	0,0	96
2004	0,3	2,1	3,0	0,0	2,4	1,2	33,3	3,3	1,8	0,6	12,1	0,0	60
promedio	1,3	1,4	3,2	5,3	26,8	31,9	51,4	30,2	12,3	6,4	1,3	1,7	173

Fuente: Jones 2006



Tabla 4-7: Factores de corrección de precipitaciones subcuencas río Del Estrecho respecto de la estación El Indio

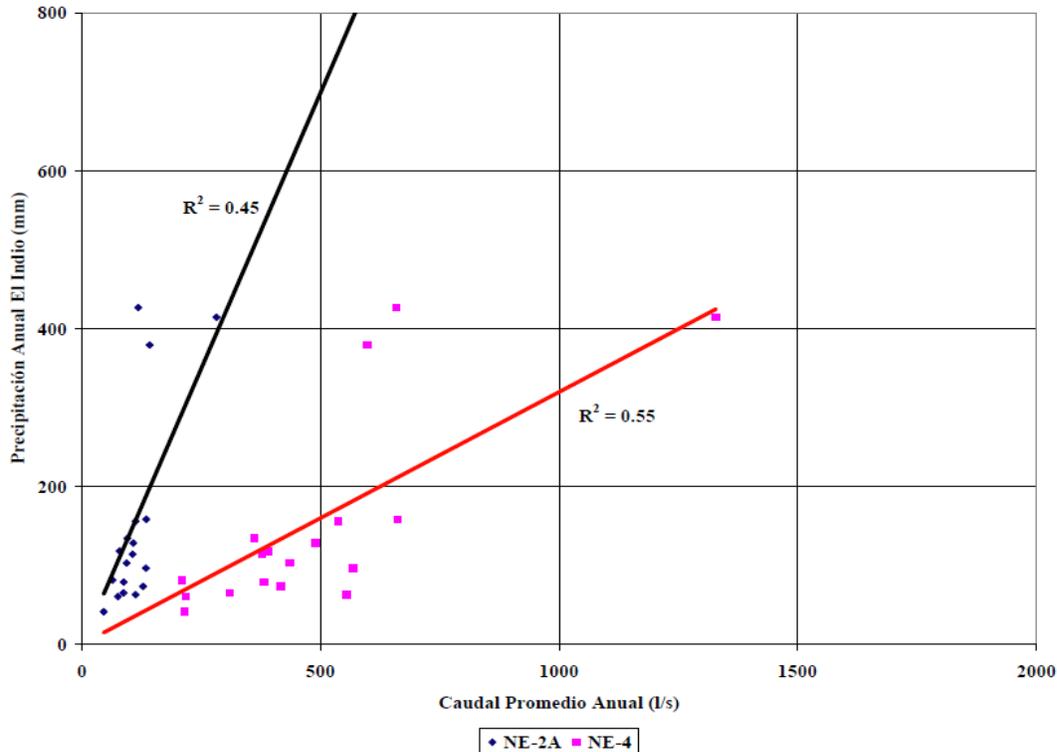
Información por subcuenca	Área (km ²)	Altitud (m s.n.m.)	Factor respecto Pp El Indio
Estación El Indio	-	3.869	-
Canal Norte (zona con glaciar)	2,0	5.200	4,5
Canal Norte (zona sin glaciar)	3,5	5.200	1,3
Canal Sur	2,0	4.600	0,8
Rajo	2,2	5.000	0,8
Aguas Arriba	1,4	4.800	0,8
Botadero	3,3	4.450	1,1
Aguas Abajo	1,2	4.300	1,1
Estrecho Intermedio	20,5	4.300	1,1
Barriales	34,9	4.550	1,1026
Estrecho Inferior	33,1	4.000	1,0005
La Falda	13,3	4.200	1,0405
Estrecho Inferior Extremo	10,9	4.000	0,8897

Fuente. Knight Piesold 2009

Se considera que la estación El Indio constituye un simil apropiado para representar el patrón de precipitaciones en la cuenca del río Del Estrecho (Knight Piesold 2009). El registro incluye tanto un periodo húmedo prolongado (1983-1987), como uno seco (1988-1996). En dicho informe se presentan correlaciones de la precipitación anual de El Indio con los caudales medidos en el río Del Estrecho (también a nivel anual) en las estaciones fluviométricas NE-2A y NE-4, durante el período 1982 a 2004, las cuales se reproducen en la Figura 4-7. Las correlaciones obtenidas son buenas, dado las limitaciones e incertidumbre que presentan este tipo de datos, y reflejan de manera general que existe una relación causa-efecto entre el monto de la precipitación en la estación pluviométrica El Indio y los caudales que se han medido en las dos estaciones de control fluviométrico (NE-2A y NE-4).



Figura 4-7: Correlaciones precipitación anual El Indio versus caudales río Del Estrecho



Fuente: Knight Piesold 2009

Más allá de la correlación con los caudales del río Del Estrecho, existe una correlación regional entre caudales de agua superficial y la precipitación de la estación El Indio (Jones 2006), señalando que existe un patrón regional de precipitación. Adicionalmente Jones 2006, presenta la correlación de la precipitación de El Indio con el caudal de la estación Pachimoco, ubicado en el Río Jachal aguas abajo del área argentina. De esta forma existe una correlación sobre el 97% entre el caudal promedio anual aforado en dicha estación y la precipitación anual de la estación pluviométrica (Jones 2006), lo que indicaría la representatividad de la estación El Indio en el área general del estudio.

En la sección 7.0 de este documento, se expone una evaluación sobre el rol hidrológico de los glaciares presentes en la cuenca.

4.1.5 Rutas de nieve

La estimación de la acumulación de nieve se realiza mediante mediciones de nieve acumulada denominadas rutas de nieve. El perfil de la densidad de la nieve se obtiene mediante la realización de una calicata en la cual se analiza el estado de la nieve (densidad, tipo de cristales) (CEAZA 2008h).

Las precipitaciones en el área del Proyecto se producen siempre en forma de nieve debido a la altitud del sector, que es superior a los 4.000 m s.n.m. La nieve se acumula durante el invierno (marzo a septiembre) sobre los glaciares y glaciaretos, y se fusiona en la época de primavera - verano, alimentando los cursos de agua de las cuencas objeto de estudio.



Se ha realizado varios estudios sobre las rutas de nieve durante los últimos años (incluyendo CEAZA 2008h). Todas las investigaciones comprenden estimaciones de la acumulación de nieve y perfiles de densidad de nieve, realizados en calicatas. La Figura 4-8 presenta un ejemplo de las calicatas usadas en los estudios de CEAZA.

Figura 4-8: Ejemplos de mediciones de ruta de nieve en calicatas



Fuente: CEAZA 2008h

Las mediciones de rutas de nieve se realizaron en el valle del río Del Estrecho (no en los glaciares), en el sector de “La Olla”, a 3 Km del campamento del Proyecto Pascua-Lama, entre los meses de julio y octubre de 2008 (CEAZA, 2008h). Dichas mediciones fueron realizadas de acuerdo a los protocolos establecidos para tal propósito por la Dirección General de Aguas (DGA). En particular, la metodología aplicada consistió en la medición de la nieve acumulada en puntos situados cada 20 m a lo largo de dos transectos, una línea de 300 metros (Ruta 1) de orientación Suroeste-Noreste y otra línea de 150 metros de longitud (Ruta 2) de orientación Noroeste-Sureste. En cada línea se realizaron calicatas o pozos de nieve, en las cuales se analizó el estado de la nieve (densidad y tipo de cristales), su espesor y se realizó un perfil de temperatura.

Los resultados indican una altura de nieve promedio de 77 y 89 cm y densidades de 258 y 318 kg/m³ en las dos rutas de nieve. Por su parte, las temperaturas de la nieve registraron valores entre 0 y -5 °C (CEAZA 2008h).

En la Tabla 4-8 se presentan los resultados obtenidos de las rutas de nieve medidas y analizadas por CEAZA durante 2008, en los meses de julio, septiembre y octubre de 2008. Estas mediciones forman parte de un programa de monitoreo de largo plazo.



Tabla 4-8: Resultados obtenidos de las rutas de nieve medidas y analizadas durante 2008

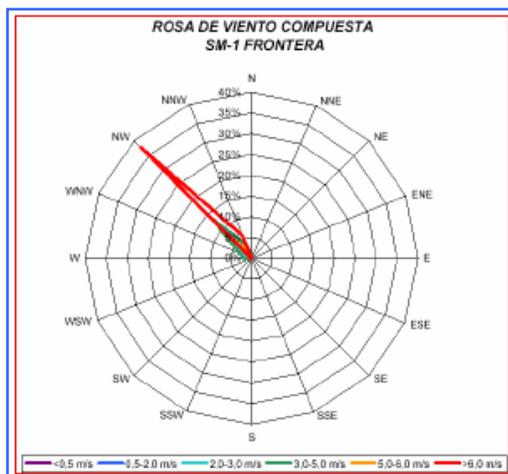
Fecha de mediciones	Ruta de nieve	Acumulación promedio (mm a. eq.)	Profundidad de la calicata (m)	Densidad promedio de la nieve (kg m ³)
01/07/2008	1	172	0,59	287
01/07/2008	2	198	0,73	289
01/09/2008	1	200	0,71	258
01/09/2008	2	282	0,92	318
04/10/2008	1	116	0,40	340
04/10/2008	2	195	53	413

4.1.6 Dirección de los vientos

En términos regionales, se observa una clara tendencia de vientos fuertes dominantes desde el sector Noroeste (NW), (Milana 2005). Evidencias de ello es la roseta de vientos de la estación Frontera, que se ubica en las cercanías del Proyecto, (4.930 m s.n.m.) (Figura 4-9) en una zona desprotegida topográficamente, por lo cual es capaz de registrar los sistemas principales de transporte atmosférico.

Este patrón de vientos es claramente coincidente con el ingreso de las principales tormentas que acarrean nieve, y por lo tanto es lógico que las acumulaciones de nieve tengan cierta relación con el mismo. Estas tormentas son producto de las “colas” de los frentes formados por la convergencia entre masas polares y subtropicales, que si bien ingresan desde el cuadrante Oeste en la V Región de Valparaíso, en la III Región de Atacama parecen ser deflectados, ingresando desde el Noroeste (Milana, 2005).

Figura 4-9: Rosa de vientos estación Frontera



Fuente: Milana 2005

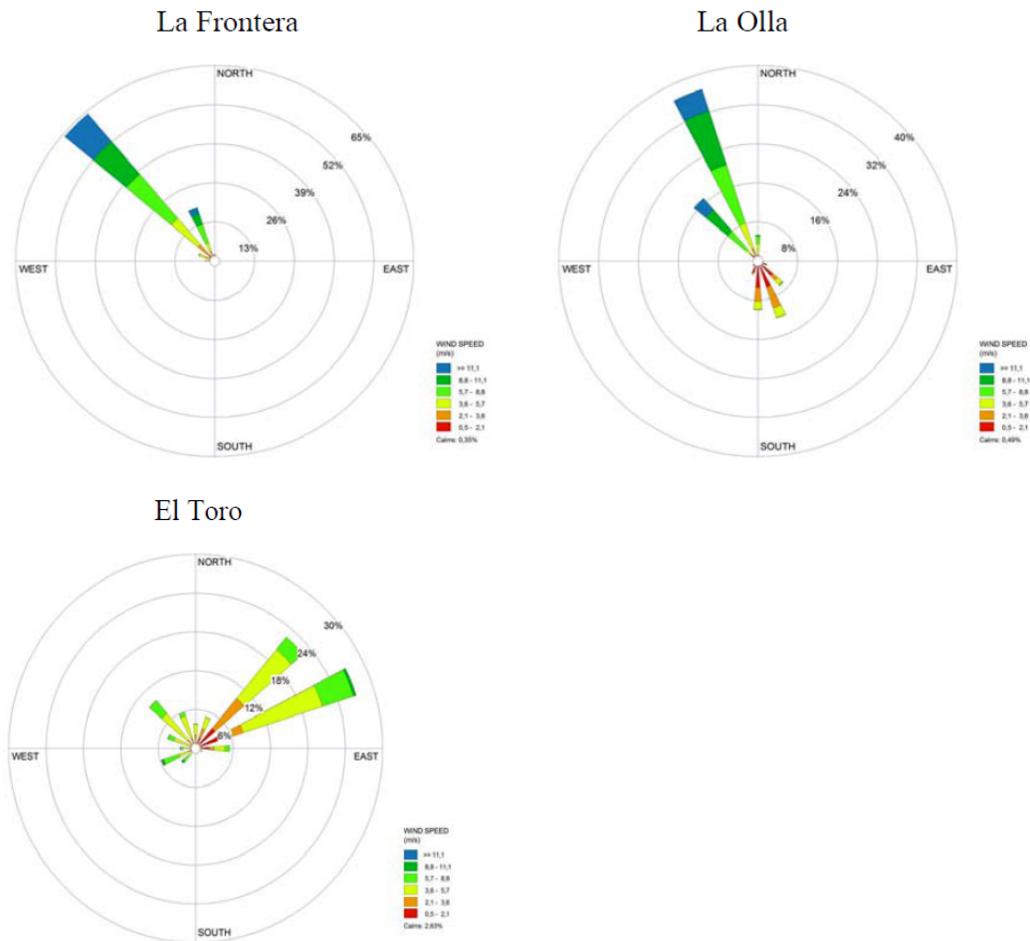
Los resultados del análisis del comportamiento de la dirección e intensidad del viento medida a 10 metros de altura realizados por MA&C (2007) son concordantes con los resultados de Milana (2005) y demuestran que las mayores intensidades de viento se encontraron asociadas a la estación Frontera, donde la dirección predominante la constituyó los vientos provenientes del NW (Figura 4-10). Vientos de menor intensidad



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

provenientes del NNW y NW caracterizaron a la estación La Olla. En cambio, la estación El Toro en Tres Quebradas se caracterizó por vientos promedio diarios bajos predominantemente menores a 6 m/s, siendo más importantes los provenientes de los cuadrantes NE y ENE.

Figura 4-10: Rosa de vientos estaciones Frontera, La Olla y El Toro (julio 2006 – junio 2007)



Fuente: MA&C 2007

La rosa de vientos para el Proyecto se calculó usando una combinación de datos de las estaciones La Olla y Frontera. La Figura 4-11 presenta los resultados de estos cálculos (Golder 2005h).

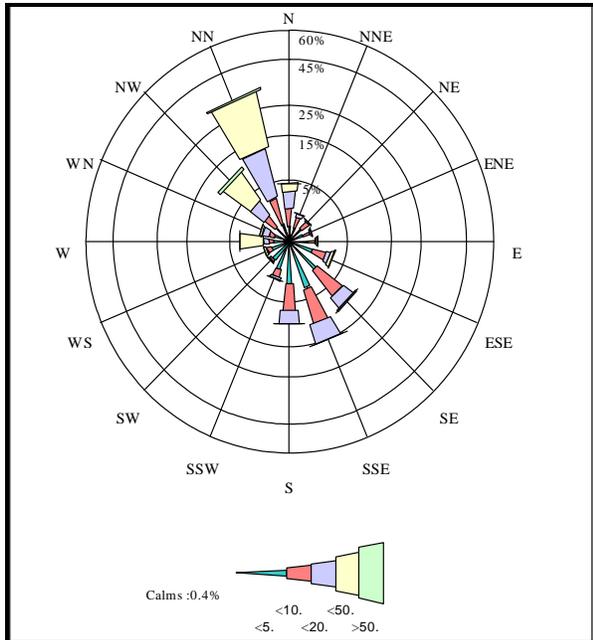
Por otra parte se instalaron estaciones meteorológicas en las cercanías del Proyecto en 2007 (ver sección 4.1.2). Estas estaciones registraron la dirección de los vientos (Figura 4-12), confirmando una marcada tendencia de la componente Noroeste (entre 247° y 360°) (CEAZA, 2008g).

En resumen, los resultados obtenidos en los estudios de CEAZA (2008g) en los años recientes, establecen una correlación con los datos discutidos en Milana (2005) y en MA&C (2007) para el área cercana al Proyecto.



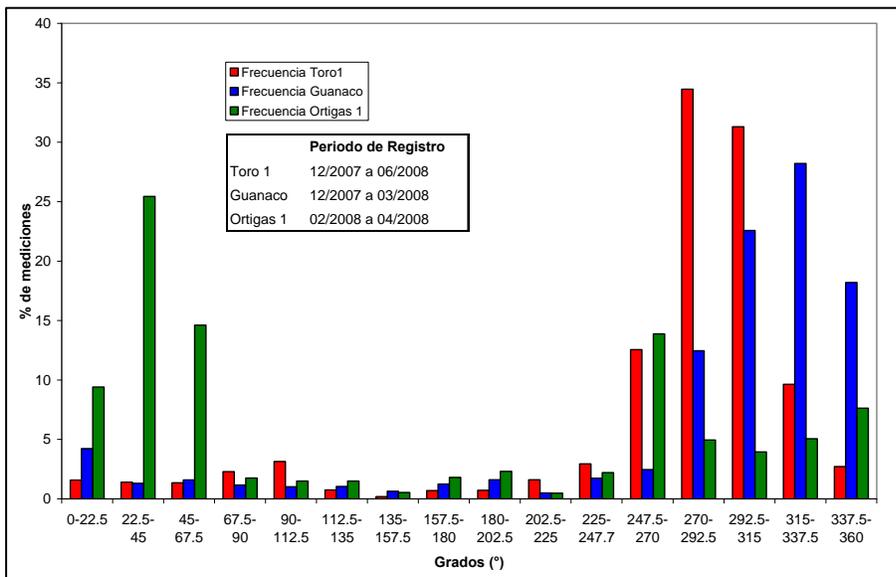
RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 4-11: Rosa de vientos, combinación de datos de La Olla y Frontera (1999-2004)



Fuente: Golder 2005h

Figura 4-12: Porcentajes de mediciones de dirección de viento por grados (a partir de datos cada 30 minutos)



Fuente: CEAZA 2008g



4.1.7 Rapidez de los vientos

Las mediciones de viento son muy importantes para el cálculo del balance de energía, ya que los flujos de calor debido a la turbulencia en los primeros metros sobre la superficie son muy sensibles a esta variable (CEAZA 2008g).

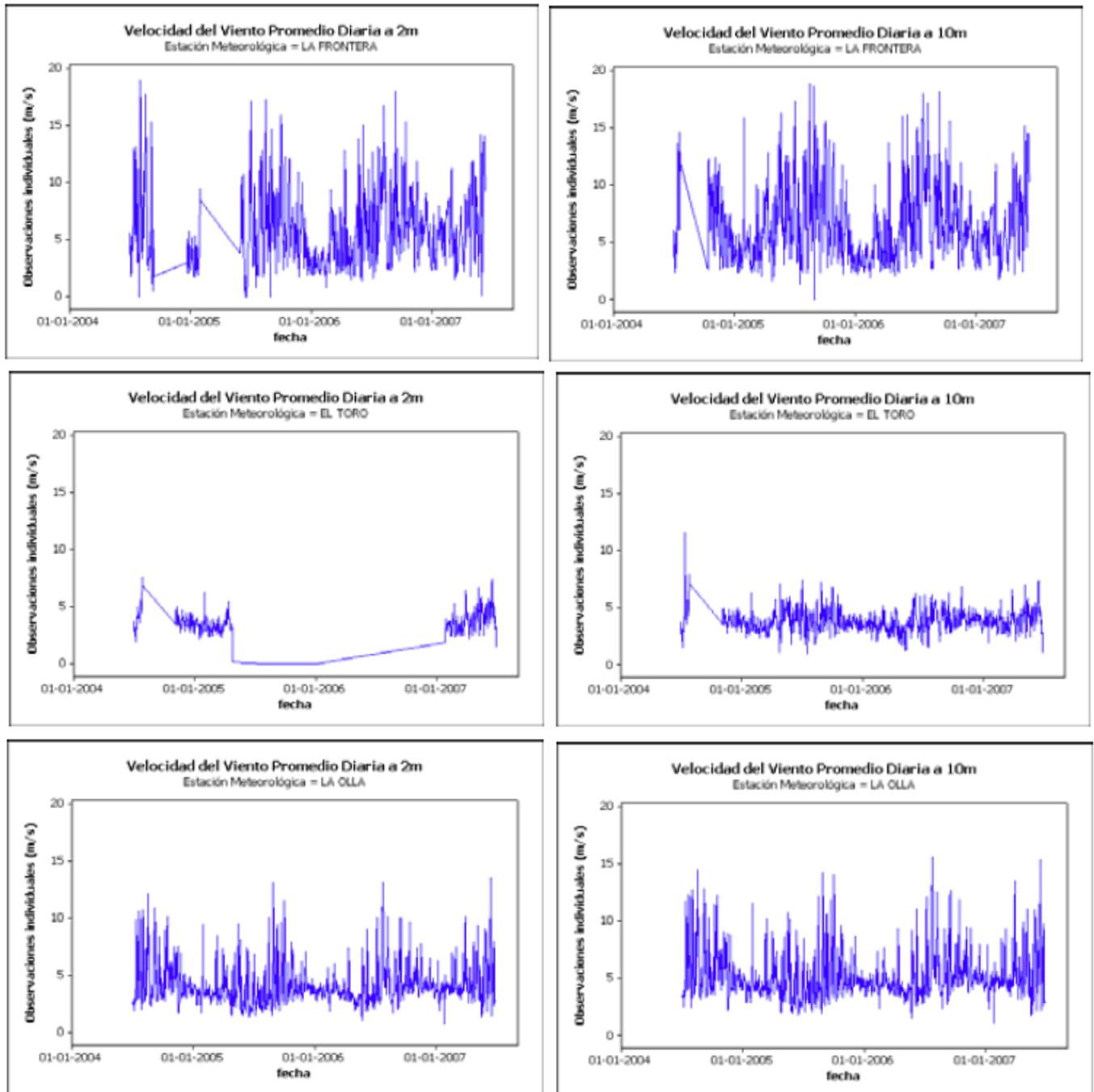
Datos de rapidez registrados indican vientos fuera de lo común, y demuestran que esta región es probablemente una de las más ventosas del mundo (Milana 2005). Esto es evidenciado por las numerosas marcas dejadas en terreno por la acción del viento. El mismo autor destacó que hay registros que indican que se ha alcanzado velocidades máximas instantáneas de hasta 440 km/h (122 m/s) en la estación Frontera. La Figura 4-14 muestra estos datos, donde se aprecia su distribución en una población log-normal, en forma coherente con los restantes. La media de velocidad máxima instantánea mensual ronda los 100 km/h (28 m/s) y generalmente ocurren con una frecuencia mensual en el área del Proyecto. Además, plantea la importancia que revisten los vientos en el balance de energía, en particular por su efecto en los flujos de energía sobre la superficie del hielo y el consecuente efecto sobre la sublimación.

También se cuenta con la estadística de las mediciones manuales y automáticas de las variables meteorológicas monitoreadas durante el período julio 2006 – junio 2007 por MA&C (2007). En la Figura 4-13 se muestra el análisis de las determinaciones horarias para las estaciones de monitoreo La Frontera, El Toro y La Olla. Los resultados de este estudio muestran que los registros de rapidez del viento sobre las estaciones La Frontera, El Toro y La Olla tienen máximos de hasta 19 m/s (68,4 km/h) y periodos de vientos débiles o en calma. De las tres estaciones, la mayor rapidez se registra en La Frontera, lo cual coincide con lo indicado por Milana (2005). De la observación de estas representaciones se infiere que en todos los casos, la rapidez del viento (2 y 10 metros) presenta una amplia variación a pequeña escala, sin mostrar un patrón estacional definido.

Adicionalmente entre enero y mayo 2008 se midió la rapidez de viento en las estaciones meteorológicas locales (ver sección 4.1.2). Los resultados de este estudio muestran que los registros de rapidez del viento sobre la superficie de los cuerpos de hielo Toro 1, Guanaco y Ortigas 1 tienen promedios de 4,2 m/s (15,1 km/h) a 7,2 m/s (25,9 km/h), con máximos de hasta 29,5 m/s (106,2 km/h) y periodos de vientos débiles o en calma. De las tres estaciones, la mayor rapidez se registra en Guanaco, lo cual está asociado a su mayor altitud y menor protección del relieve (CEAZA 2008g). Aún cuando el periodo de registro es bastante corto, los datos son concordantes con los registros de más larga data de la estación Frontera, ver Figura 4-14, donde se registra una media de la velocidad promedio mensual cercana a 20 km/h (5,5 m/s) y una media de la velocidad máxima instantánea mensual de 100 km/h (28 m/s), lo que ratifica que esta zona es altamente ventosa.



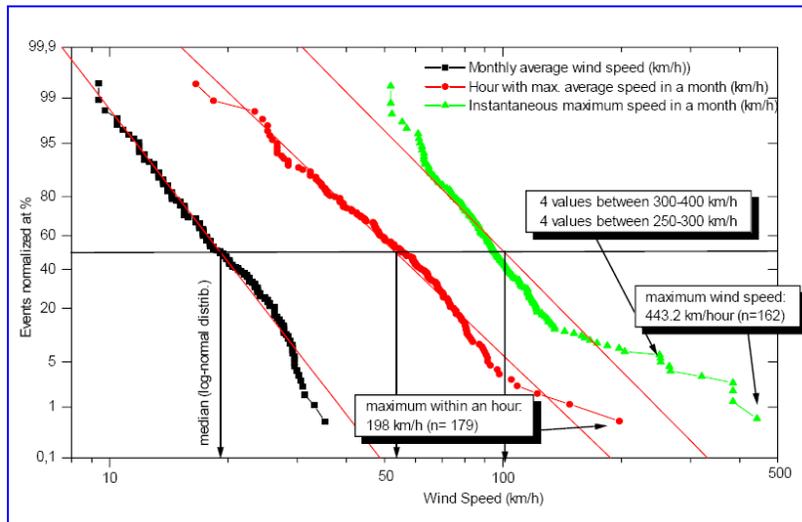
Figura 4-13: Rapidez del viento en estaciones Frontera, El Toro y La Olla, julio 2006 – junio 2007



Fuente: MA&C 2007



Figura 4-14: Rapidez del viento regional



Fuente: Milana 2005

4.1.8 Estabilidad de la atmósfera y altura de mezcla

La estabilidad de la atmósfera y la altura de mezcla son condiciones importantes a tener en cuenta para la evaluación del transporte de polvo por el viento.

La estabilidad de la atmósfera se define como su tendencia a resistir o mejorar el movimiento vertical de la capa límite (Golder 2005h),

La altura de mezcla es la extensión vertical o altura, a través de la cual una pluma de contaminantes se puede mezclar en la atmósfera (Golder 2005h).

Teniendo en cuenta que la transferencia de calor desde la superficie a la atmósfera genera convección y mezcla vertical, la altura de mezcla representa la altura en la atmósfera a la cual ocurre una inversión en el aumento de la temperatura con la altura sobre una capa límite neutral o convectiva.

Estas condiciones están explicadas con mayor detalle en el informe Golder (2005h), de donde se extrajeron las siguientes secciones.

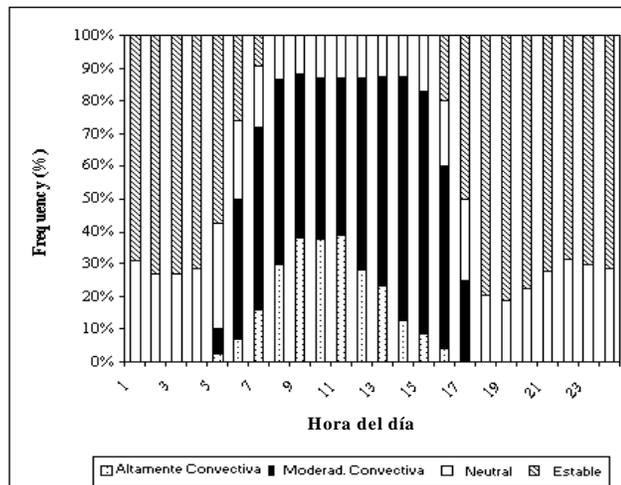
4.1.8.1 Estabilidad de la atmósfera

La Figura 4-15 muestra la variación diurna promedio de la estabilidad atmosférica de la zona del Proyecto. Para ese conjunto de datos meteorológicos, se detectaron condiciones convectivas entre las 7 AM y las 8 PM. Las condiciones estables dominaron las horas vespertinas (8 PM a 6 AM), mientras que las condiciones neutrales, se observaron en cualquier hora del día.



Se hace presente que la dispersión vertical de partículas es superior bajo condiciones atmosféricas convectivas (es decir, durante el día en la zona del Proyecto).

Figura 4-15: Variación diurna de la estabilidad atmosférica para Pascua-Lama (1999-2004)



Fuente: Golder 2005h

4.1.8.2 Altura de mezcla

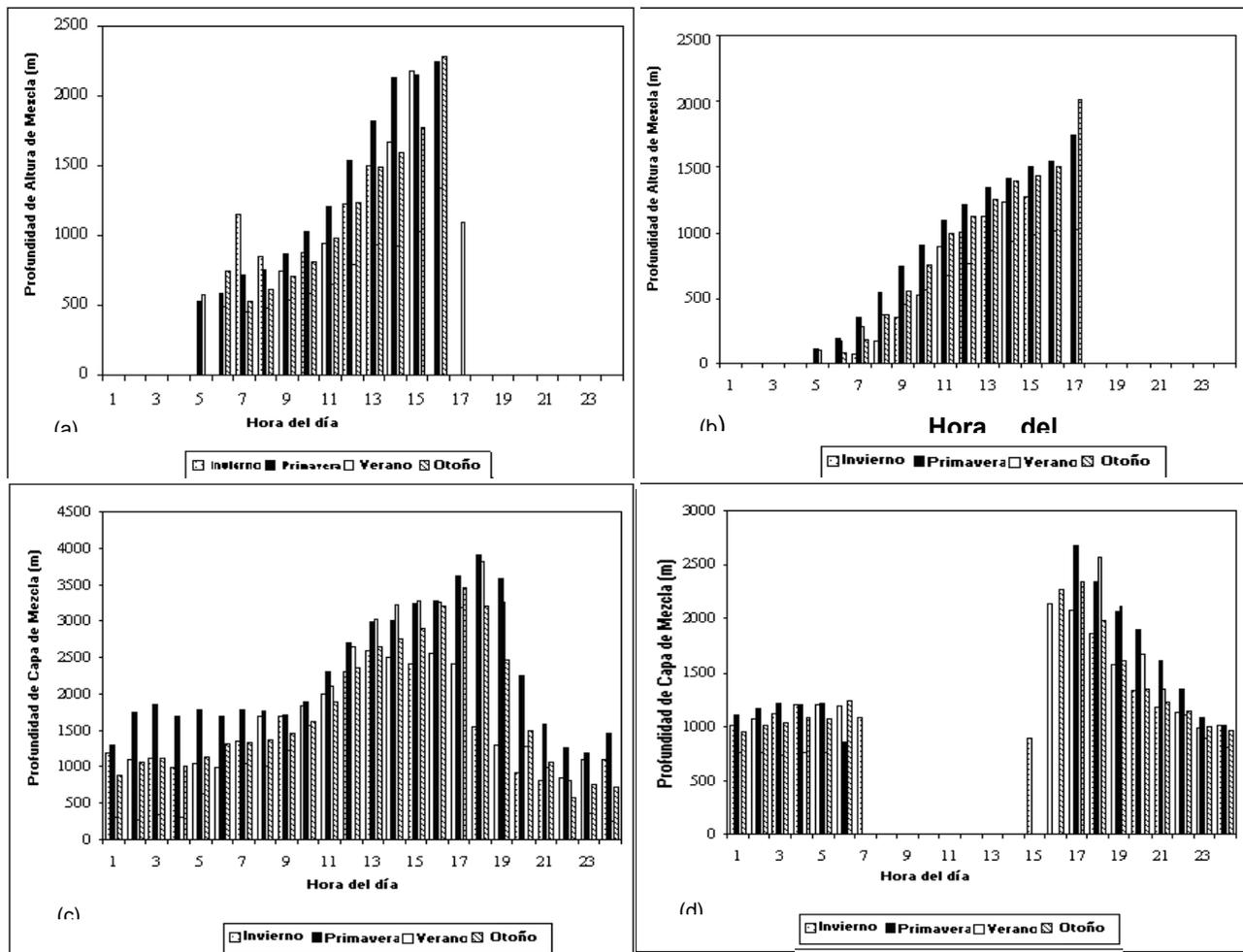
Además de la estabilidad atmosférica, el otro parámetro importante en la dispersión de polvo desde una fuente es la "altura de mezcla" (Golder 2005h).

La altura de mezcla es un parámetro que se calcula a partir del perfil de temperatura vertical medido por sondas meteorológicas. La distancia entre las estaciones que liberan sondas meteorológicas es de aproximadamente 300 km. Una de las estaciones de sondeo de aire a gran altura más cercanas a Pascua-Lama es Santo Domingo, en la V Región de Valparaíso. Esta estación cuenta con el conjunto de datos más completos del periodo 1999-2004 (ver Figura 4-16), los cuales son aplicables a este caso debido a que la altura de mezcla es un parámetro regional (Golder 2005h).

En los datos de esta estación se observa que durante las condiciones altas y moderadamente convectivas (generalmente durante el día), las alturas de mezcla generalmente aumentan de la mañana a la tarde (debido al calor del sol sobre la tierra). Las alturas de mezclas durante las condiciones neutrales y estables (generalmente durante la noche en el área del Proyecto), muestran un patrón diferente: las condiciones neutrales nocturnas generan alturas de mezcla menores como se muestra en la Figura 4-16 (c). Por su parte, las condiciones estables son extremadamente raras entre las 7 AM y las 3 PM (Figura 4-16 (d)) y no existentes entre las 8 AM y las 2 PM.



Figura 4-16: (a) Alturas de mezcla durante los siguientes condiciones: (a) Altamente convectivas (b) Moderadamente convectivas, (c) Neutrales, y (d) Estables



Fuente: Golder 2005h

4.1.9 Radiación global y nubosidad

Estos dos parámetros funcionan conjuntamente ya que las nubes son un efectivo filtro de radiación solar, reduciendo este valor drásticamente (Milana 2005). Si bien las nubes actúan reflejando la radiación de onda larga que emite la superficie de la Tierra, la magnitud de esta radiación es muy inferior a la que se recibe directamente por incidencia solar.

Esta zona de estudio reúne las condiciones que garantizan una alta tasa de radiación solar debido a:

- 1) Una alta verticalidad de los rayos solares durante el verano, dado que estamos a poca distancia del Trópico de Capricornio; y
- 2) Una muy baja nubosidad estival, ya que las tormentas nivales son características de invierno y primavera, y una muy baja humedad del aire.



Mediciones efectuadas a alturas comparables (Paso de Agua Negra, 4.720 m, provincia de Elqui) por Schrott (1991, 1992), indican que efectivamente los picos diarios de energía debido a radiación solar se encuentran entre los más altos medidos en el mundo, debido a las condiciones antes mencionadas.

El filtrado de energía en la zona de estudio es bastante bajo y a altura normal solo un 55% de la energía incidente llega al suelo. En Pascua-Lama los picos diarios de verano llegan a los 1.150 W/m² (Milana, 2005), bastante cercanos al valor superior que incide verticalmente en el límite exterior de la atmósfera (1.368 W/m²).

Los resultados de las mediciones de radiación¹ (R) realizadas por CEAZA (2008c) entre diciembre 2007 y abril 2008, indican que los rangos de la radiación promedio mensuales en Guanaco y Ortigas son entre 42 - 82 W/m² y 22 - 123 W/m² respectivamente. Los datos de CEAZA no son comparables con los datos de Milana, ya que los datos de CEAZA corresponden a radiación neta, la cual es mucho menor que la incidente. Debido a esto y a que los datos más recientes son considerados de mayor validez, atendiendo al hecho de que CEAZA realizó mediciones *in situ*, estos datos fueron usados en el balance de energía del período de verano 2007-2008 para los glaciares Guanaco y Ortigas 1(ver las secciones 6.3 y 8.1.6 respectivamente).

4.1.10 Humedad

La existencia de baja humedad ambiental facilita el desgaste de los cuerpos de hielo, dado que los gradientes de presión de vapor son altos y esto favorece el proceso de sublimación (Milana 2005).

En la estación Frontera el promedio de medidas válidas sugiere un valor medio de 38% de humedad ambiente. Por otra parte, la humedad no se comporta estable sino que aumenta durante las noches y disminuye cíclicamente a valores de 5-20% durante las horas diurnas, lo cual influye aumentando la sublimación del hielo, principalmente en verano en donde los valores de humedad son más bajos (Milana, 2005).

Por otra parte, la nueva estación instalada en Guanaco² permite calcular los promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa durante los primeros meses del año 2008 (enero a junio 2008). Los promedios mensuales de humedad variaron entre 35 y 47%. Se observaron valores máximos cercanos al 100%, estos valores corresponden a periodos de mal tiempo (Tabla 4-9) (CEAZA 2008g).

Tabla 4-9: Promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa (%), para aquellos meses en los cuales las mediciones son completas, para el periodo de enero a junio 2008.

Fecha	Guanaco		
	Promedio	Max	Min
Ene-08	46.85	100	2.09
Feb-08	46.96	100	5.77
Mar-08	42.26	99.1	2.23
Abr-08	-	-	-
May-08	34.87	92.2	3.68

Fuente: CEAZA 2008g

1 Las mediciones corresponden a radiación neta

2 Los registros en Toro 1 no fueron posibles debido a un error en el funcionamiento del sensor (CEAZA 2008g).



4.2 Geología

En términos generales, los glaciares identificados en las cercanías del Proyecto se encuentran localizados en diferentes unidades que varían de acuerdo a sus características geológicas locales, pudiéndose encontrar cuerpos intrusivos, volcánicos e hidrotermales. Los hay también de distintas edades, que van desde la era Paleozoica hasta el Cuaternario. Algunos de ellos presentan fuertes alteraciones que han modificado su estado original, pero otros presentan escasos grados de alteración, conservando todas las características originales que los definen (ver Figura 4-17, tomada de CMN (2009a)).

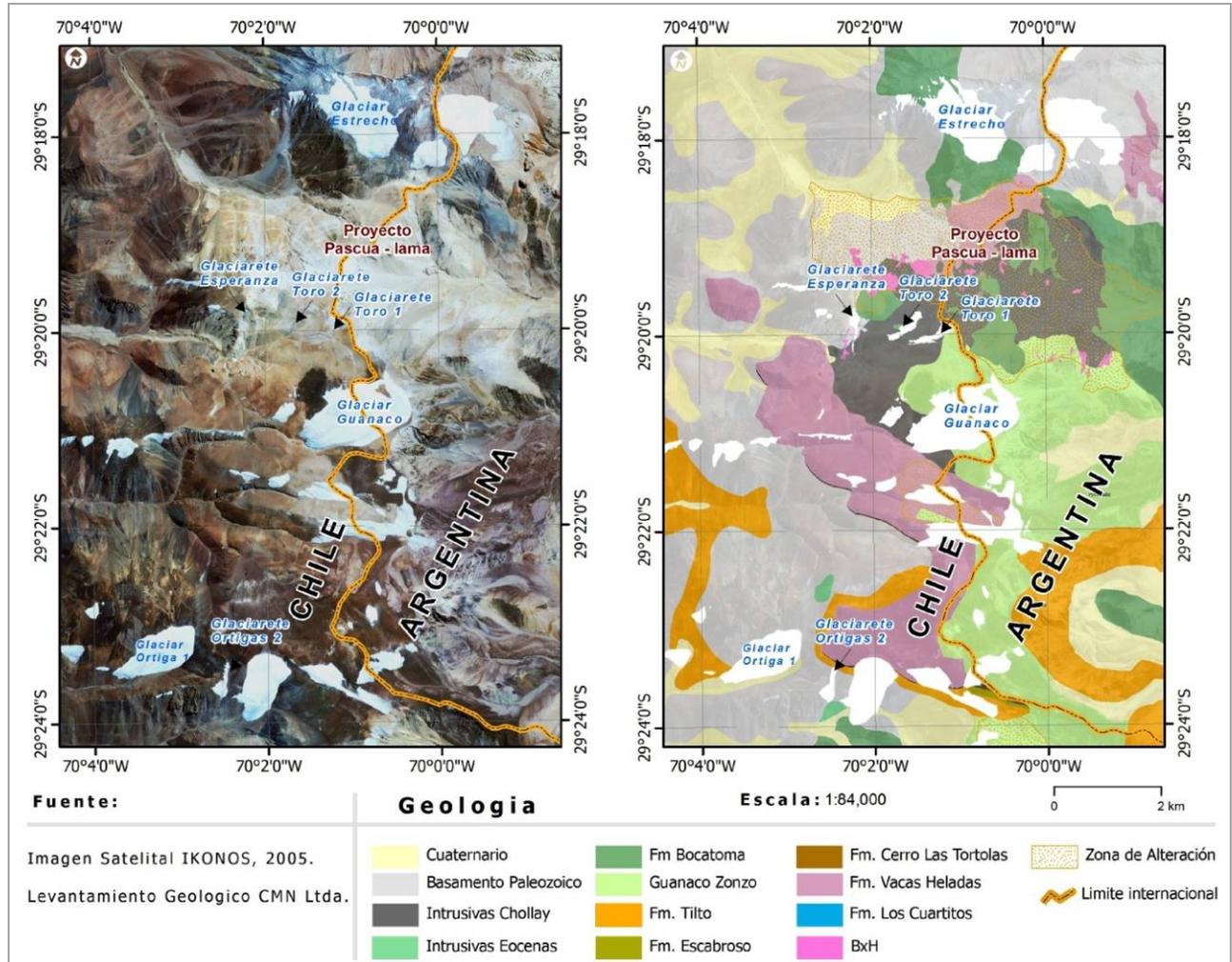
La Figura 4-17 se complementa con la Figura 4-18, la cual presenta el “Mapa Geología Superficial” en el cual se muestra la zona del Proyecto, reproducido a partir de Golder (2005r).

Los glaciares y glaciaretos en el área del Proyecto se caracterizan por estar naturalmente sometidos a constantes depósitos de polvo y detritos sobre su superficie, lo que resulta del arrastre de material particulado desde estratos altamente meteorizados provocado por los fuertes vientos cordilleranos (material fino) hacia la superficie de los cuerpos de hielo. Por consiguiente, muchos de los cuerpos de hielo, cuentan con un gran cantidad de polvo acumulado, tanto en la superficie, como estratificado en su interior (CMN, 2009a).

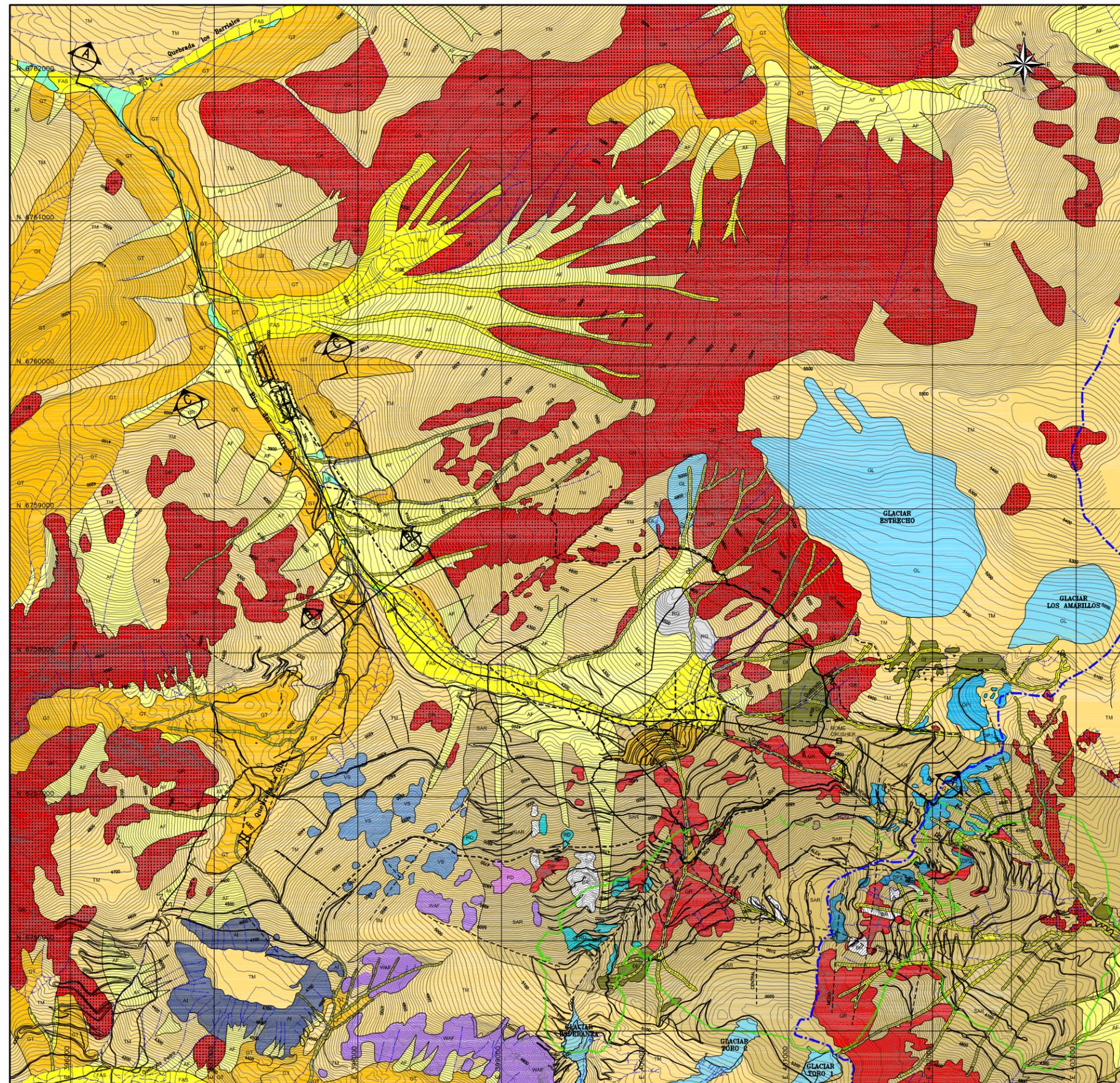
A continuación se detalla la geología local y su relación con la depositación natural de polvo y detritos en las cercanías de glaciares y glaciaretos, además de la influencia que podría tener a futuro en la evolución de los cuerpos de hielo, la cual ha sido tomada a partir del estudio CMN (2009a).



Figura 4-17: Vista general de glaciares y glaciaretos, y su localización geológica



Fuente: CMN 2009a



MAPA GEOLOGICO SUPERFICIAL PROYECTO PASCUA LAMA
Escala 1:10.000

ESCALA 1:10.000

LEYENDA

UNIDADES DE SUELO

- AM MATERIALES ANTROPICOS, principalmente marina de túneles.
- VE VEGA: Suelo vegetal saturado
- TM CUBIERTA DE SUELO INDIFERENCIADA. Incluye depósitos coluviales, escombros de loda, y depósitos de roca suelta, comúnmente con menos de 2 metros de espesor.
- AF ABANICOS ALUVIALES/COLUVIALES. Gravas arenosas con partículas y bloques angulares a subredondeados, potientemente estratificados, densos con un espesor reconocido de hasta 26 metros.
- FAS SUELOS FLUVIALES/ALUVIALES. Depósitos de los presentes ríos y relleno de quebradas. Gravas arenosas con bolones esporádicos, suelos y potientemente estratificados, con espesores estimados entre 10 y 30 metros a lo largo del valle del Río del Estrecho.
- GT TILL GLACIAR: Arenas arcillosas con gravas y bloques. Suelo denso y homogéneo con espesores estimados entre 10 y 40 metros a lo largo del valle del Río del Estrecho.
- RG GLACIAR DE ROCA: Mezcla de bloques de roca, nieve y hielo en variadas proporciones con espesores estimados superiores a 15 metros.
- SAR DELGADA CUBIERTA SUELO SOBRE ROCA. Delgada cubierta de suelo, menor a un metro, sobre roca fuertemente alterada y meteorizada. Localmente se observan lentes de hielo (permafrost).

UNIDADES DE ROCA

- GL GLACIARES Y PEQUEÑOS CUERPOS DE HIELO
- DP 1) DACITE PORPHYRY TUFF (Formación Cerro Las Tórtolas): Toba de lavas lávica, todos los afloramientos presentan alteración que va desde las facies aluminosilicáticas a argílicas hasta steam head, roca débil y desmenuzada.
2) PORFIDO DACITICO: Incluye el porfido cuarzo feldespato cumbre, todos los afloramientos presentan alteración.
- PD DIQUES DE PORFIDO DACITICO: Con intensa silificación y opacificación.
- AI IGNEMBRITA ANDESITICA. (Formación Cerro Las Tórtolas): Consistente en fragmentos cristalinos de filogabiosa, biotita y algunos de cuarzo en una matriz vítrea dispuesta de manera subhorizontal.
- DI DIORITA: Diorita leucocrítica, gris clara a oscura o gris verdoso, grano medio equigranular. Roca fresca y dura fuera de la zona de alteración.
- HDR HIBRIDODIORITA GRANITO (Complejo Intrusivo Pascua Lama): rocas de composición diorítica a granítica con textura equigranular porfiroblástica.
- GR a) GRANITO (Complejo Intrusivo Pascua Lama): Roca cristalina de grano fino con leve silificación. Roca fresca muy dura y fracturada.
b) GRANITO (Complejo Intrusivo Pascua Lama): Incluye Granito de grano fino débilmente porfírico (Ga), Porfido granítico (Go), granito grácido de grano grueso débilmente porfírico (Gc) y granito equigranular de grano grueso (Gd).
- RD FLUJOS DE CENIZA DACITICAS Y RIODACITICAS. (Grupo Pastos Blancos - Formación Guanaco Sonoce) Relleno dacítico de cuarzo sanidino y flujos de ceniza cristalinos y purificados dacíticos.
- WAF Tobsas solidadas de ceniza (Grupo Pastos Blancos, Formación Guanaco Sonoce): Flujos de ceniza sodácicas líticas de cuarzo y feldespato alcalino.
- VS Secuencia volcánica (Pastos Blancos, Formación Guanaco Sonoce): Tobsas de lavas, tobas de cristales, tenebras stockworkas interdigitadas con areniscas.

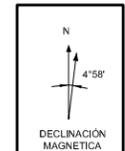
BR BRECHAS: Compuestas principalmente por material lítico derivado de las rocas de caja pascuenceras del depósito. Desmenuzadas durante los sucesivos periodos de empujamiento de las diferentes unidades biológicas.

SIMBOLOGIA

- GRIETA.
- ALINEAMIENTO ESTRUCTURAL O FALLA.
- ALINEAMIENTO DE CANAL PROPUESTO.
- LIMITE CHILE - ARGENTINA
- LIMITE ULTIMO DEL RAJO.

NOTAS:

- 1) Los tipos de rocas han sido basados y simplificados del mapa "GEOLOGY MAP-GEOLOGY SURFACE, AUGUST 1999, SCALE 1:5,000" y el Informe "GEOLOGY, ALTERATION AND MINERALIZATION AND GEOCHEMISTRY OF THE PASCUA ACID SULFATE AU-CU-CO DEPOSITS, CHILE AND ARGENTINA, 2002" de Leonardson et. al
- 2) Topografía basada en reutilización aérea realizada por GEOCEN, escala 1:2,000 usando fotos escala 1:8,000, de 1997.
- 3) Programa de pozos EDRA en informe de AQUA CONSULT, 1998.



PROYECTO PASCUA LAMA MAPA GEOLOGICA SUPERFICIAL			
PLANO N°	PLANO 3-1	ELABO	L.DIAZ
FECHA	13/07/05	REVISO	J. DIAZ
ESCALA	1:10.000	PROYECTO	S.C./F.C.

PASCUA LAMA (CANTONAMIENTOS) 6750-7100 MANEJO DE AGUAS, CONSULTORIA TECNICA DE GEOLOGIA SUPERFICIAL, INFORMACION TECNICA DE GEOLOGIA SUPERFICIAL, INFORMACION TECNICA DE GEOLOGIA SUPERFICIAL, INFORMACION TECNICA DE GEOLOGIA SUPERFICIAL

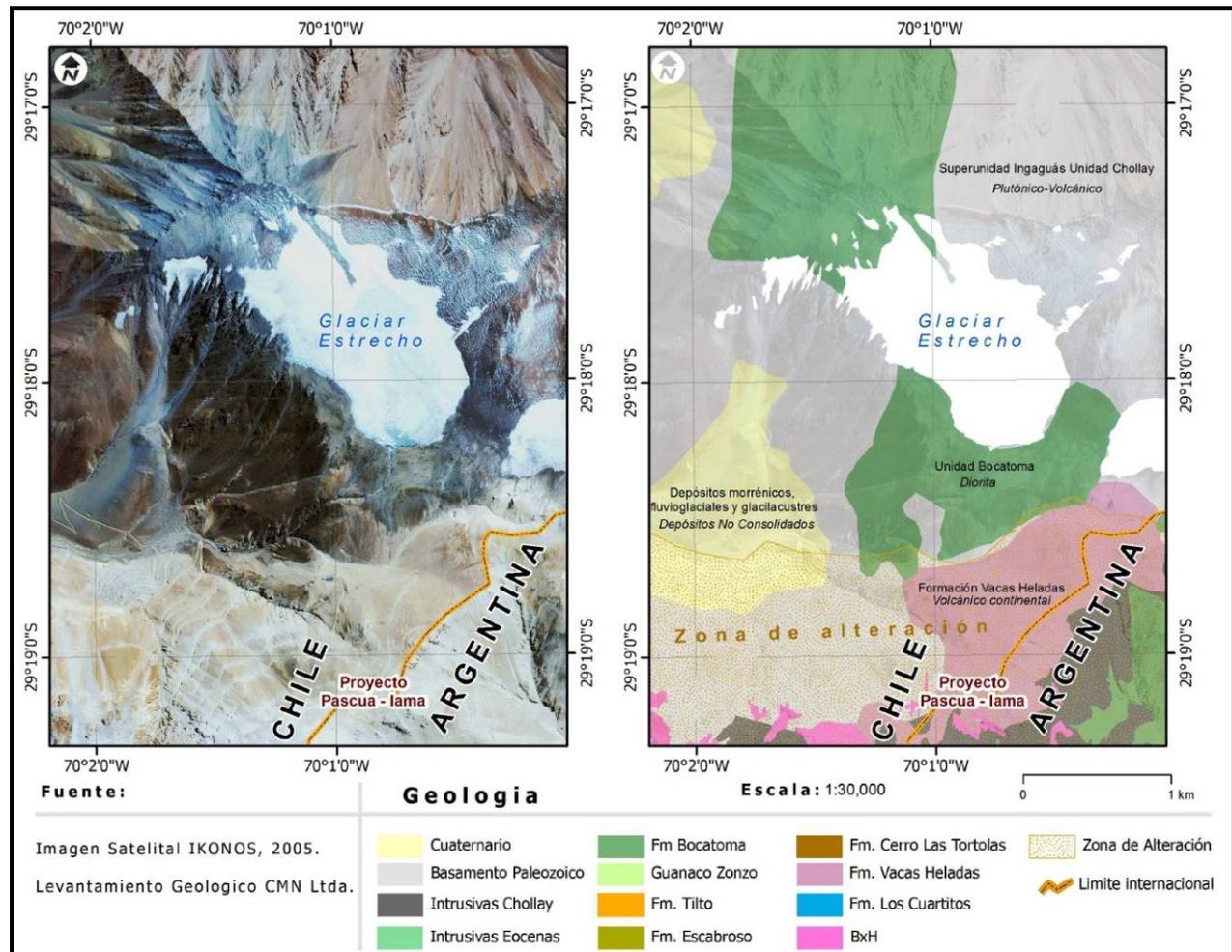


4.2.1 Glaciar Estrecho

El Glaciar Estrecho se encuentra localizado al Norte del proyecto Pascua-Lama, sobre unidades intrusivas graníticas del basamento paleozoico y unidades intrusivas dioríticas de la formación Bocatoma (Eocena) (Figura 4-19). Los cuerpos graníticos que se reconocen en este sector corresponden a granitos de grano grueso, equigranulares (cristales de igual tamaño) y que se encuentran ocasionalmente con cloritización, predominando los elementos inalterados. Las rocas se encuentran con escaso control estructural, destacando las fallas regionales que se encuentran al este del área. Estas rocas son compactas y resistentes a la fuerte erosión eólica que se encuentra en el sector.

Debido a la escasa alteración que afecta a estas unidades, las rocas se encuentran compactas y competentes. Por su naturaleza intrusiva, sus propiedades geomecánicas son de alta resistencia, y por tanto resistentes a la influencia de los vientos y a la generación de material particulado alrededor de los glaciares.

Figura 4-19: Glaciar Estrecho y su contexto geológico



Fuente: CMN 2009a

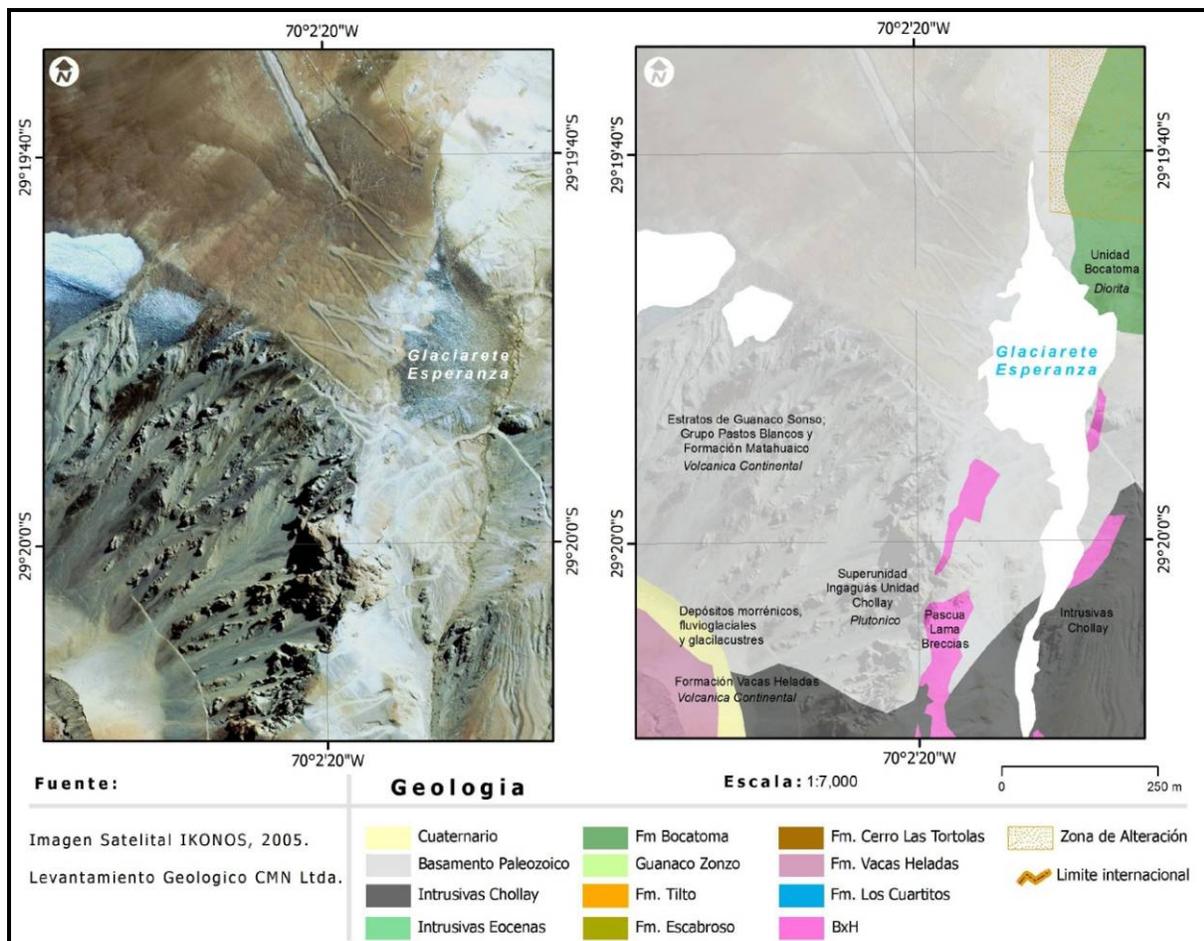


4.2.2 Glaciarete Esperanza

El Glaciarete Esperanza se encuentra en el borde Sur del Proyecto. Las rocas que lo rodean corresponden principalmente a unidades tobáceas de la formación Guanaco Zonzo y unidades intrusivas graníticas del Complejo Intrusivo Pascua-Lama, todas constituyentes del basamento Paleozoico definido en el proyecto (Figura 4-20). Estas rocas se encuentran con un fuerte grado de alteración, destacando en superficie la alteración argílica avanzada, constituida, en este caso en particular, por un reemplazo de los cristales constituyentes de la roca, por sílice alunita y caolín.

Además, se reconoce un fuerte control estructural de predominancia N-S y N30E, el que genera abundante fracturamiento de la roca. Estas dos condiciones generan abundante material fracturado y pulverulento en superficie, lo que favorece el transporte aéreo de partículas hacia el SE, precisamente sobre el glaciarete, como resultado de los fuertes vientos provenientes del Noroeste. Por su parte, la geometría del glaciarete (corniza) favorece la captación de polvo en estos sectores.

Figura 4-20: Glaciarete Esperanza y su contexto geológico



Fuente: CMN 2009a



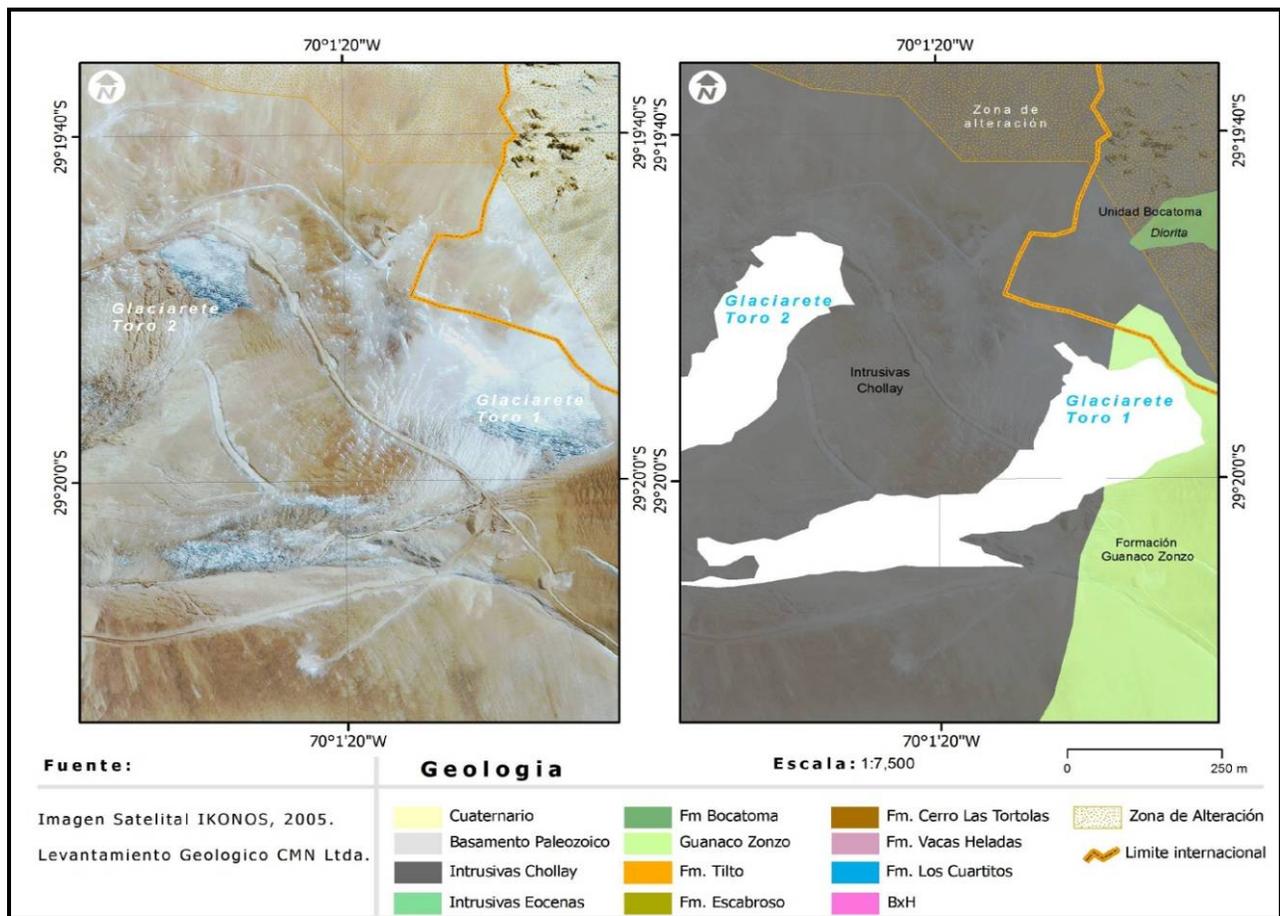
4.2.3 Glaciaretos Toro 1 y Toro 2

Al igual que el glaciarete Esperanza, los glaciaretos Toro 1 y Toro 2 se encuentran en el borde Sur del proyecto. Las rocas que lo rodean corresponden principalmente a unidades intrusivas graníticas correspondientes al complejo intrusivo Pascua-Lama, el que es constituyente del basamento paleozoico descrito en el sector (Figura 4-21).

Estas rocas corresponden a granitos de grano grueso, con variaciones porfídicas, que en este sector se encuentran con una incipiente alteración argílica, representada por la asociación cuarzo-alunita-arcillas (ilita-esmectita). Además se presenta un componente estructural N-S y N30E caracterizado como fuerte a moderado, y que se sectoriza en la parte Noroeste del área.

El polvo presente en los glaciaretos Toro 1 y Toro2 es generado en la zona de alteración, ubicada inmediatamente al norte de los glaciaretos (ver Figura 4-21), el cual es transportado como resultado de los fuertes vientos que provienen desde el Noroeste. Dado que estos glaciaretos se ubican en la dirección del transporte y dada la geometría de éstos, que enfrentan al viento, se produce la depositación de las partículas en la superficie de las crioformas.

Figura 4-21: Glaciaretos Toro 1 y Toro, y su contexto geológico



Fuente: CMN 2009a

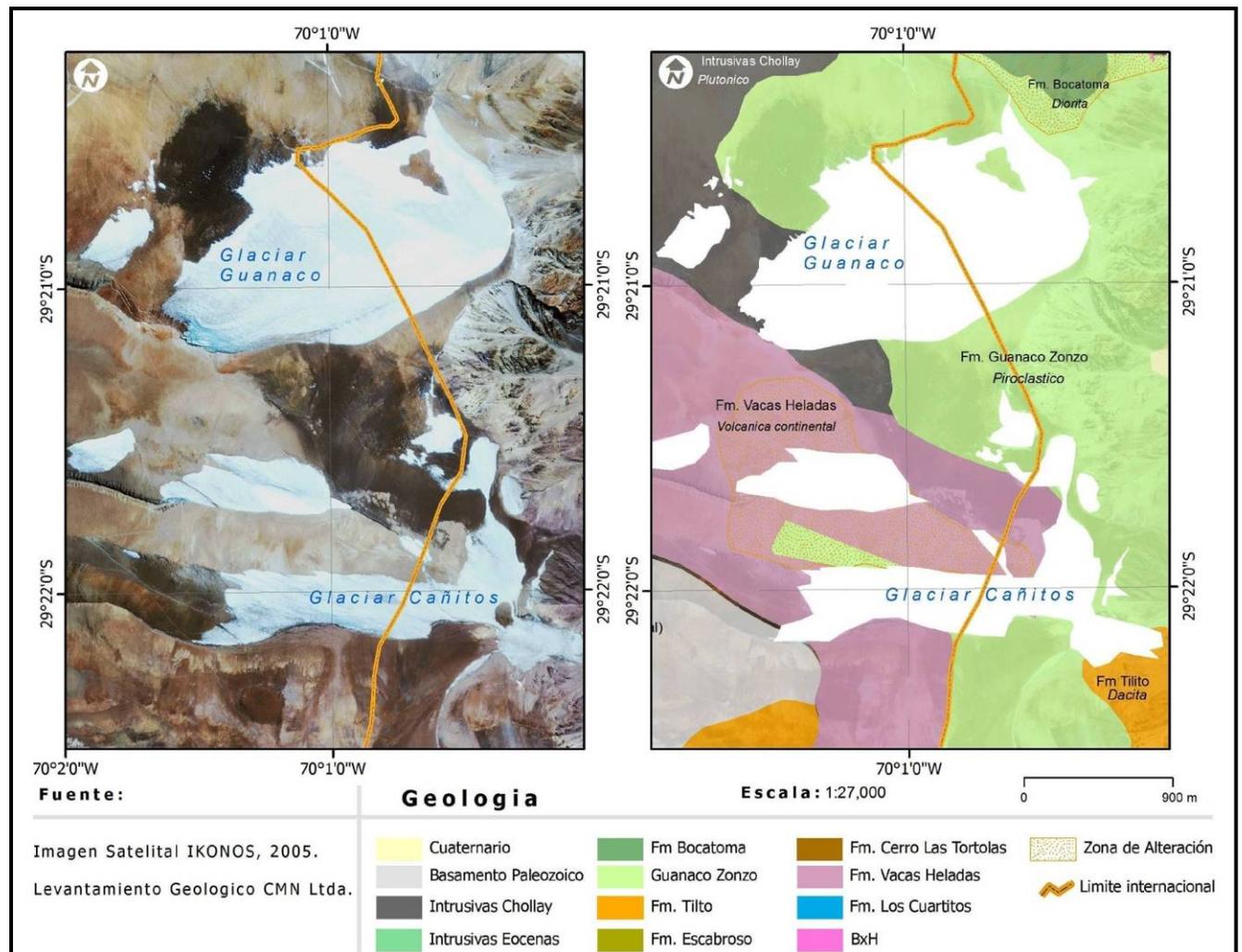


4.2.4 Glaciar Guanaco

El Glaciar Guanaco se encuentra depositado sobre un conjunto de rocas intrusivas representada por unidades graníticas del complejo Chollay, y por rocas volcánicas de la Formación Guanaco Zonzo, ambas de edad paleozoicas (Figura 4-22). Estas rocas se encuentran escasamente alteradas, normalmente se les reconocen texturas claras con minerales de rocas apenas alterados.

Del mismo modo que ocurre en los glaciaretos Toro 1 y Toro 2, el polvo presente en el glaciar Guanaco es producto del transporte aéreo de partículas desde la zona de alteración, ubicada inmediatamente al norte del glaciar (Figura 4-22), como resultado de los fuertes vientos provenientes desde el Noroeste. Dado que el glaciar se ubica en la dirección del transporte de polvo, pero su geometría no es favorable (no enfrenta al viento), la intensidad de depositación de este material debiera ser moderada, en comparación con los depósitos que se generarían en los glaciaretos Esperanza, Toro 1 y Toro 2.

Figura 4-22: Glaciar Guanaco y su contexto geológico



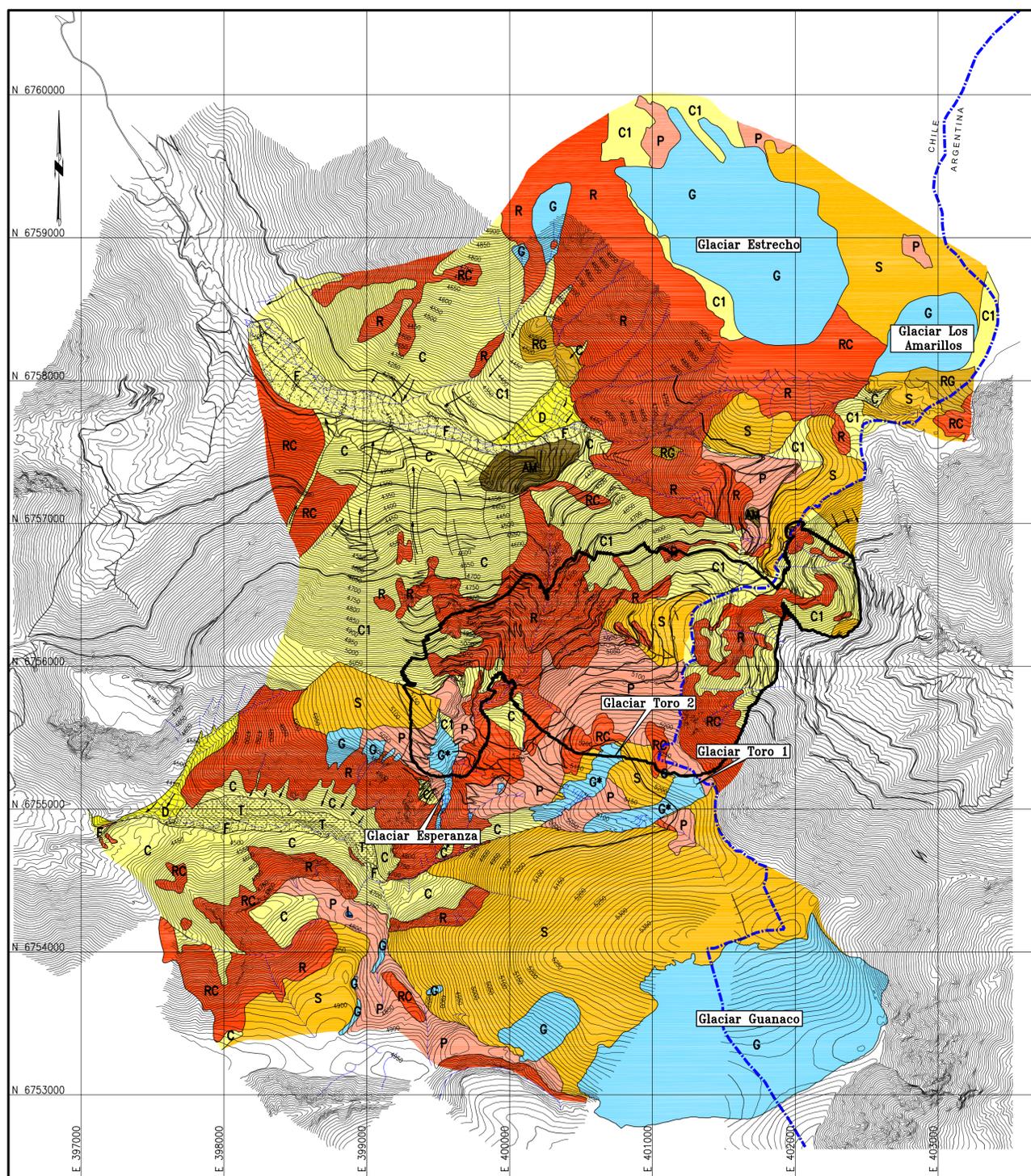
Fuente: CMN 2009a



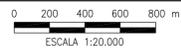
4.3 Geomorfología

El área del Proyecto Pascua-Lama se sitúa aproximadamente entre los 3.500 hasta los 5.500 m s.n.m., en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, en las cuencas hidrográficas del río El Toro y río Del Estrecho. Debido a su posición en altura, el área está marcada por las acciones glaciales ocurridas en los últimos milenios y por la acción erosiva típica de los ríos de alta montaña. Estos eventos se manifiestan en la presencia de formas y depósitos de geomorfología característica, como valles tipo "U" resultantes de la acción glaciar, y valles en donde las formas glaciales originales han sido borradas o modificadas por fenómenos posteriores a la última glaciación, generando quebradas con formas de "V", producto de la erosión fluvial moderna.

Para la caracterización de la geomorfología del área del Proyecto se han identificado unidades individuales sobre la base del análisis de fotografías aéreas y de imágenes satelitales. Posteriormente, se han realizado algunas verificaciones de terreno para confirmar la clasificación y para ajustar de mejor forma los límites de las unidades más relevantes. El área total evaluada cubrió una superficie de 25,2 km², y está situada entre las coordenadas aproximadas N 6.753.000 a 6.760.000 y E 397.000 a 403.000. Los resultados de este estudio fueron vertidos en un mapa geomorfológico superficial de dicha área a escala 1:10.000 (Golder, 2005b) denominado 059-2701-GMF-01, el cual se reproduce en la Figura 4-23.

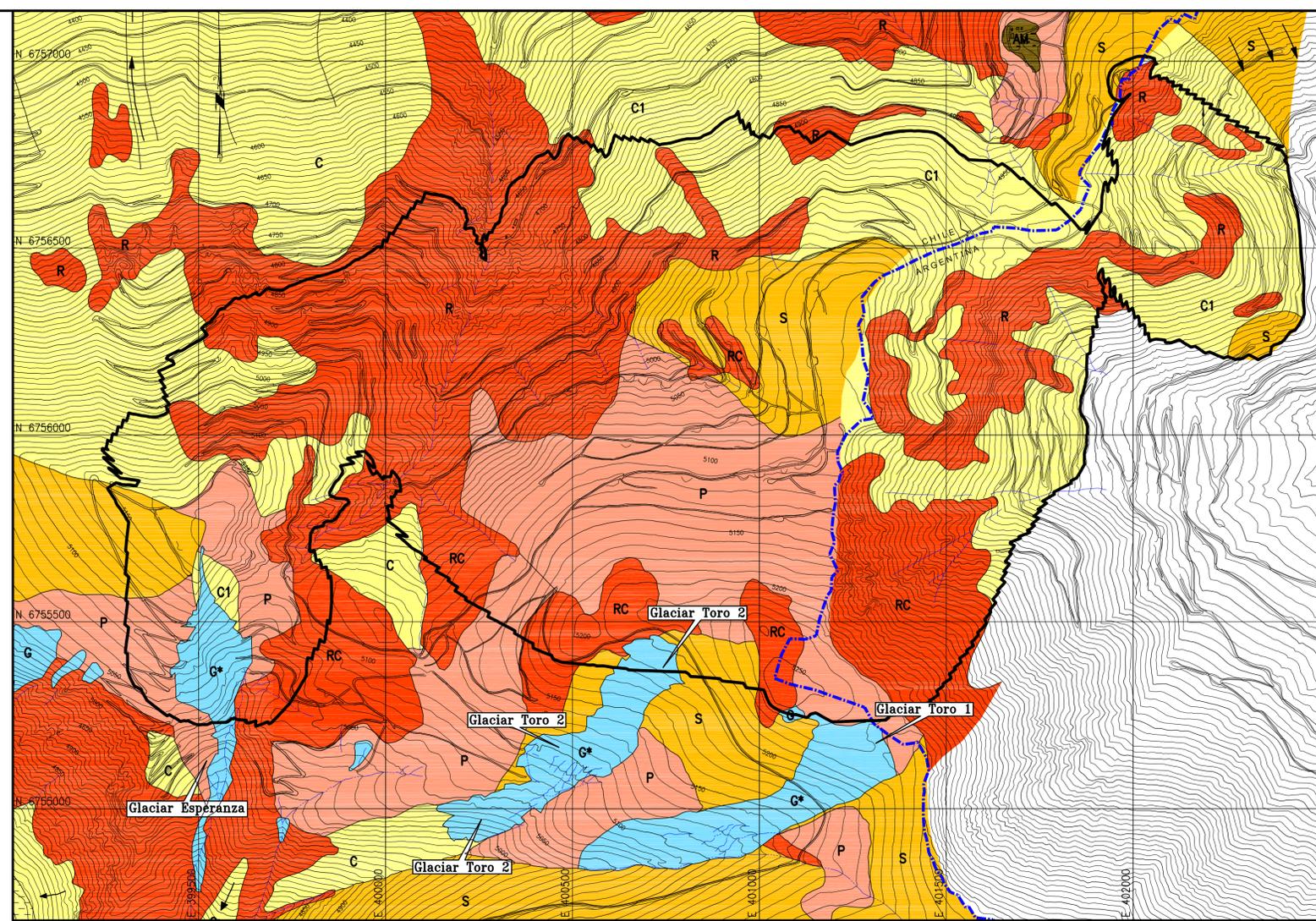


AREA DE ESTUDIO

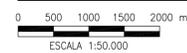
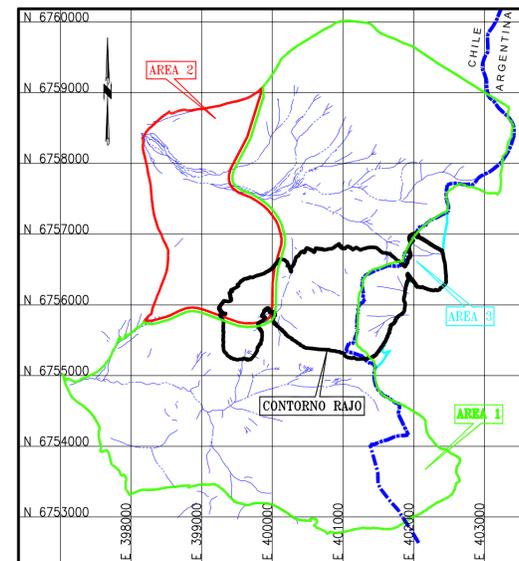
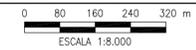


LEYENDA

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| AM Materiales de origen antrópico (marina de túneles, rellenos artificiales de plataformas o desmontes, etc.) | P Morfología permafrost |
| C Coluvio (las flechas señalan direcciones de movimientos de flujos de detritos) | R Roca / RC Roca, en algunas áreas parcialmente cubierta por coluvio |
| C1 Coluvio indiferenciado / permafrost | RG Glaciar de roca (localmente "protalus rampart") |
| D Depósitos aluviales (deltas o abanicos aluviales) | S Soliflujión |
| F Depósitos fluviales | T Depósitos (aluviales) aterrazados |
| G Glaciar (G* : Límites del glaciar ajustados por observaciones del terreno) | |
| L Lagunas | |



DETALLE AREA DEL RAJO



AREA 1: Geomorfología interpretada a partir de pares estereográficos de fotografías aéreas en color, sin control de terreno, escala 1:8.000 (año 2000) y 1:10.000 (año 1997), y actualizada con mapa geológico (Plano 3-1, escala 1:10.000, Golder Associates, Agosto 2005).

AREA 2: Geomorfología interpretada a partir de pares estereográficos de fotografías aéreas en blanco y negro, escala 1:30.000 (año 1981).

AREA 3: Geomorfología interpretada a partir de pares estereográficos de fotografías aéreas en color, sin control de terreno, escala 1:8.000 (año 2000), y actualizada con mapa geológico (Plano 3-1, escala 1:10.000, Golder Associates, Agosto 2005).

CONTORNO DEL RAJO: Basado en plano MI-OP-31-A "Pit Limit End of Year 13", escala 1:10.000, NCL, Julio 2004.

MAPA GEOMORFOLOGICO ORIGINAL: Figura 4, "Mapa Geomorfológico", escala 1:30.000, en "Informe sobre Estudio de Glaciares Marzo 2003", Golder Associates, Junio 2003.

CONTORNOS DE GLACIARES: Los glaciares mayores han sido ajustados en base al plano "Relevamiento de Glaciares Cuenca del Río La Tagua", escala 1:100.000, Golder Associates, Agosto 2005.



PROYECTO PASCUA LAMA
MAPA GEOMORFOLOGICO

PLANO	059-2701-GMF-01	DISEÑO	F. CARRASCO	APROBÓ	J. SCHMOK
REV.	A	FECHA	12/AGO/05	DIBUJO CAD	L. DÍAZ
				ESCALA	INDICADAS



Como resultado de la investigación expuesta en Golder (2005b), se han descrito once unidades geomorfológicas en el área del Proyecto:

AM – Materiales Antrópicos

Corresponden a depósitos ubicados principalmente en las cabeceras del río Del Estrecho, producto de algunas faenas y construcciones propias de las exploraciones mineras. Corresponden fundamentalmente a bloques angulosos de roca generada por las excavaciones de algunos túneles en el sector, rellenos artificiales de plataformas o desmontes, etc.

C/C1 – Coluvio

Los depósitos coluviales son acumulaciones de material erosionado y transportado gravitacionalmente o por lavado de las pendientes y se localizan en las faldas y al pie de ellas. Estos depósitos están compuestos frecuentemente por materiales heterogéneos en tamaño (gravas, arenas, finos, ocasionales bloques), de variada esfericidad y angulosos. Es común que exhiban una cierta estratificación, aproximadamente paralela a la pendiente. Los espesores de los depósitos son variables, desde una decena de centímetros a algunos metros. Dentro de esta unidad se encuentran los conos de depositación coluvial (conos de talus), escombros de falda y fenómenos de remoción en masa (flujos de detritos).

D – Depósitos Aluviales (deltas o abanicos aluviales)

Se originan por las crecidas de agua ocasionales que arrastran materiales de formas angulosas, desde bloques de varios metros de diámetro, hasta finos. Constituyen depósitos mal graduados, que en general son más gruesos en el sector apical y más finos en el sector distal. Estos depósitos son escasos en el área, reconociéndose muy esporádicamente asociados a algunas quebradas que desembocan por los flancos de los ríos Del Estrecho y El Toro.

F – Depósitos Fluviales

Están asociados a los cursos de agua mayores existentes en el área, tales como los ríos Del Estrecho y El Toro. Se componen de gravas, arenas gruesas y finas, y bolones de buen redondeamiento y regular esfericidad, con algunos sectores con bloques, los cuales han sido transportados por aluviones, avalanchas y/o también gravitacionalmente desde las laderas hacia el río. Es probable, además, que estos depósitos fluviales interdigiten con materiales aluviales.

G – Glaciares y glaciaretas

Los glaciares son cuerpo significativos de hielo acumulado sobre el terreno, formado directamente por precipitación nival, y que muestra signos de movimiento. Se sitúan sobre las cumbres más altas, en el Norte y Sur del área de estudio. Estos glaciares, en general, son del tipo de montaña, en cascadas o colgantes. Hacia fines de la época estival es normal observar la formación de penitentes (pináculos de nieve o hielo) sobre la superficie de los glaciares, de hasta 3 metros de altura, alineados según la trayectoria del sol en el cielo.



Los glaciaretos son aquellos cuerpos de hielo que se ubican normalmente en laderas, áreas sombreadas o protegidas del viento, en los que puede estar ausente un comportamiento dinámico, es decir, que no muestran signos de movimiento. Dependiendo de las condiciones topográficas y de la frecuencia y cantidad de alimentación nival, los glaciaretos pueden incluso desaparecer (y reaparecer).

En ocasiones, los glaciares y glaciaretos se encuentran cubiertos por una capa de detritus.

L – Lagunas

En el área del Proyecto existe un pequeño cuerpo de agua colgante ubicado al Suroeste del área de estudio, en la cabecera del río del Toro. Está emplazado en un terreno de superficie plana e impermeable. Probablemente correspondiente a una unidad del tipo permafrost o un depósito glacial tipo till.

P – Permafrost

Corresponden a suelos que pueden contener alguna presencia de agua en su interior, pero que termalmente permanecen bajo los 0° C, lo que significa que están “permanentemente congelados” o a lo menos lo hacen por dos temporadas sucesivas. Un permafrost se refiere más a un régimen termal que a un contenido de agua o hielo. En terreno se reconocen a través de patrones tales como marcas elongadas o formas trapezoidales, lóbulos de geliflución, surgencias de congelamiento,

R/RC – Roca y Roca “Coluvial”

Son afloramientos de rocas de diversos tipos geológicos. En algunos sectores, la roca se encuentra cubierta por una delgada capa de coluvio o escombros de falda, asignándole a esta unidad la variante Roca Cubierta con Coluvio – RC.

RG – Glaciar de Roca

Corresponde a un depósito de mezcla, en variadas proporciones, de detrito mal seleccionado y neviza o hielo como cemento o matriz, ocasionalmente con núcleos de hielo, que se parece a un glaciar de montaña y que muestra signos de flujo. Incluye desde aquellos que se forman bajo nieve y avalanchas – y flujos de detritos – hasta los que presentan cantidades variables de detrito superficial. Glaciares de roca inactivos, es decir, los que ahora no contienen hielo, no se incluyen en esta definición. El detrito superficial sin matriz de neviza o hielo está formado por gravas y bloques con escasa matriz de gravilla y arena y bajo contenido de finos.

En los glaciares de roca durante el verano se produce la fusión de la matriz de nieve de esta mezcla nieve/detrito, hasta una profundidad donde el detrito remanente en superficie actúa como aislante del calor. Por experiencia y mediciones en otros glaciares de roca de la Cordillera Central de Chile, este espesor de detritos (veraniego) sin matriz de neviza o hielo generalmente es del orden de 7 metros.

Por su constitución, el glaciar de roca fluye lentamente (repta) con velocidades anuales comúnmente del orden de centímetros o decenas de centímetros (mayor detalle se entrega en Sección 5.7).



S – Soliflucción

Corresponden a elementos morfológicos en los que se aprecian rasgos de movimientos vinculados a acciones de hielo-deshielo, típicamente lóbulos de reptación. Normalmente involucra suelos de grano fino y de poco espesor, posiblemente menor a un par de metros.

En sectores con mayores espesores de suelos y/o rocas intensamente meteorizadas o alteradas, muy sensibles a incorporar agua, los fenómenos de soliflucción podrían eventualmente crear condiciones favorables para el desarrollo de flujos de tierra (earth flows).

T – Depósitos (aluviales) Aterrazados

Sólo se ubican en la parte Sur poniente del área de estudio, en el flanco Norte del río del Toro. Su origen podría ser (a) aluvial desde el río El Toro; (b) aluvial, incluyendo avalanchas, desde farellones adyacentes; (c) morrénico o fluvio-glacial antiguo y erodado; (d) fluvial o lacustre generado por embancamientos debido a una obturación de la garganta rocosa situada aguas abajo de este sector.

En base al análisis estereoscópico y de la observación de las imágenes satelitales, se concluye que aproximadamente un 53% del área está compuesta por las geoformas correspondientes a Roca (R+RC) y Coluvio (C+C1), en tanto que un 27% está compuesto por las geoformas Permafrost y Soliflucción. El 15% del área analizada corresponde a glaciares y glaciaretos y el 5% restante está compuesto de Depósitos Aluviales, Fluviales, Aterrazados, Abanicos, Deltas, Depósitos Antrópicos y Glaciares de Roca

En relación al aporte de agua a la cuenca, los glaciares obviamente proporcionarán una cantidad substancial de agua a finales de los meses de verano debido a los procesos normales de fusión. No se espera que el Permafrost proporcione un flujo significativo debido al escaso porcentaje de hielo en su constitución, estimado del orden del 15%, excepto como un flujo base permanente de las capas activas, y pequeñas cantidades adicionales bajo un régimen de recalentamiento del clima.

No existen glaciares de roca significativos en el área del Proyecto, aunque hay varios glaciares de roca que se encuentran en cuencas cercanas. Es improbable que el hielo glacial en el área del Proyecto contenga cantidades significativas de detritos porque no hay pendientes empinadas rodeando a los glaciares.

Los penitentes (pináculos de nieve o hielo) se observaron en las superficies de las crioformas que estaban expuestas. Sus alturas varían hasta 3 a 5 m y están orientados generalmente paralelos a la trayectoria del sol, como es lo esperado. Estas estructuras indican que alguna masa se pierde de las crioformas directamente a la atmósfera por medio de la sublimación.

4.4 Hidrología

El Proyecto Pascua-Lama se extiende a ambos lados de la divisoria de aguas de tres cuencas de drenaje: río Del Estrecho y río El Toro en Chile, y río Turbio en Argentina (Figura 4-24). En la Figura 4-25 se muestra una aproximación de la ubicación de las cuencas en el sector chileno. Fotografías adicionales de las cuencas en cuestión se pueden ver en CMN 2008a (Anexo E) y Golder (2005a).

En la Figura 4-25 se muestran las cuencas y subcuencas que aportan recursos hídricos al río Huasco. Unos 20 km aguas abajo de la confluencia del río El Tránsito con el río Del Carmen se encuentra el embalse Santa Juana, el cual se usa para regular el abastecimiento de agua para riego.



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

A continuación, en la Sección 4.4.1, se describen en forma resumida las cuencas y subcuencas presentes en el área de influencia del Proyecto.

Figura 4-24: Fotografías de los ríos del área de estudio y sus cuencas

Foto 1. Río Del Estrecho.



Foto 2. La cuenca del río El Toro.



Foto 3. Río El Tránsito aguas abajo de Angostura Pinte.



Foto 4. Río Del Carmen

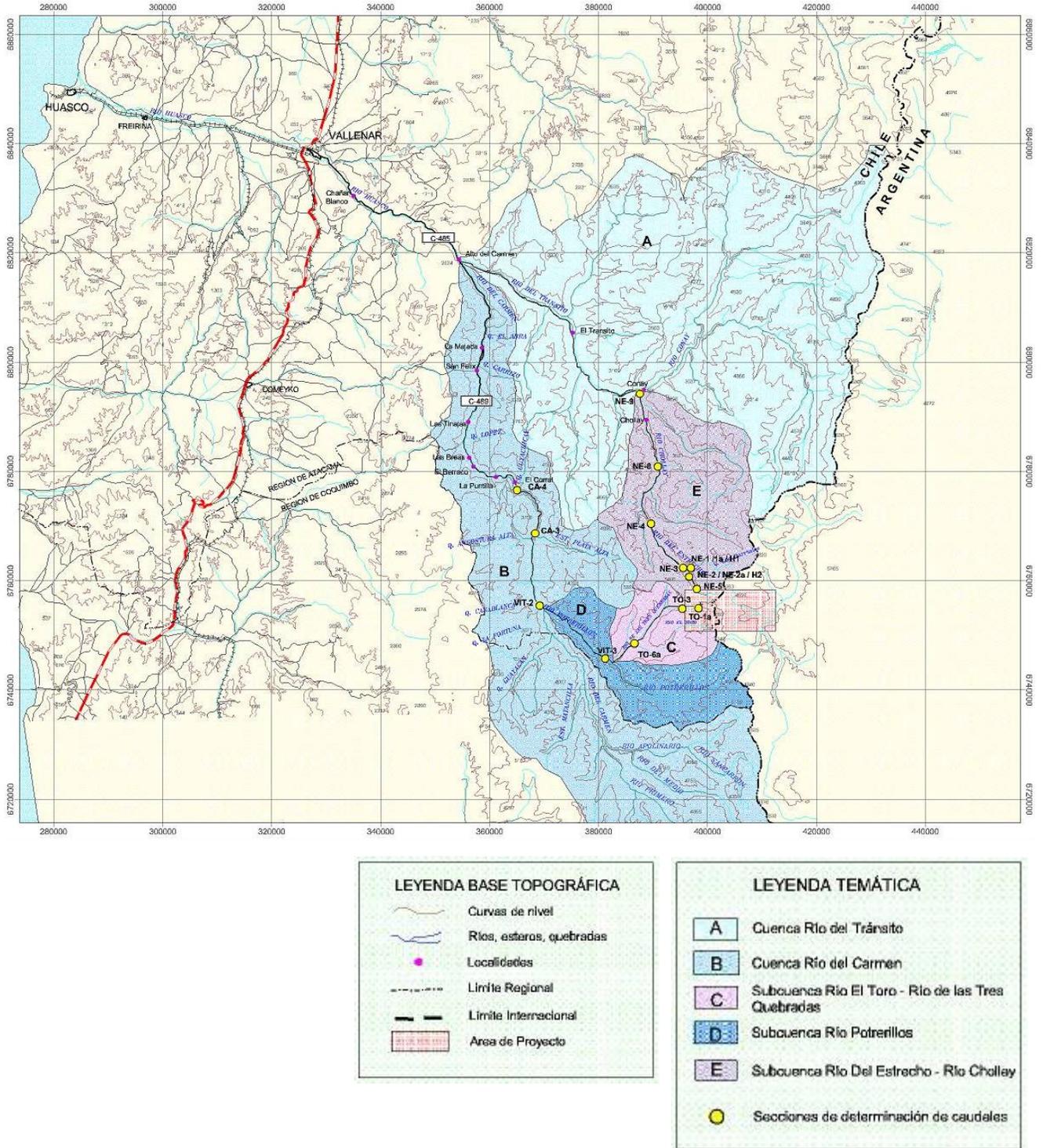


Fuente: Golder 2005a



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 4-25: Ubicación y superficies de las cuencas y sub-cuencas chilenas cercanas el Proyecto



Fuente: Registros CMN



4.4.1 Caracterización de las cuencas

Todas las cuencas del área de estudio tienen regímenes hidrológicos fundamentalmente nivales o nivo-pluviales (Golder 2005a). Las precipitaciones están concentradas en invierno. En una cuenca nival, el recurso hídrico proviene básicamente de deshielos ocurridos en la alta cordillera. En sectores más bajos de la cuenca, una menor contribución procede de los deshielos, mientras que es mayor el aporte de quebradas laterales al cauce principal. Conforme aumenta la temperatura del aire, también aumentan los caudales, hasta alcanzarse los máximos entre los meses de noviembre y enero.

En el caso de los ríos El Toro y Del Estrecho, según se explica más adelante, el deshielo de las crioformas contribuye en una parte pequeña al abastecimiento de agua en estas cuencas. En las zonas de cabecera de estas subcuencas existen algunos glaciares y glaciaretos de extensión relativamente reducida, que sin embargo mantienen flujos de agua por derretimiento en períodos estivales. En el caso de los ríos El Tránsito, Del Carmen y Potrerillos la contribución de los glaciares y glaciaretos existentes en las cabeceras de las cuencas al caudal de estos ríos es menos significativa.

El río Del Estrecho recibe toda su escorrentía desde el deshielo de la nieve y de los glaciares. Los caudales máximos observados, coinciden con los períodos de deshielo de primavera y verano. Los flujos más bajos tienen lugar durante los meses de julio a septiembre. La Tabla 4-10, tomada de Knight Piesold (2009), resume el flujo mensual promedio en el río Del Estrecho en tres estaciones de monitoreo ubicadas a lo largo de él. En la Figura 4-26 se observan los hidrogramas asociados a los caudales medios mensuales en cada estación, donde es claro ver que el aumento de caudal está asociado a un aumento del área aportante a cada estación. Los períodos de medición de las estaciones corresponden a 1981 – 2005 para las estaciones NE-2a y NE-4, y 1996 – 2005 para la estación NE-5.

Los caudales observados durante el invierno, se pueden asociar a los flujos bases debido a que la precipitación cae sólo en forma de nieve y los derretimientos ocurren durante los meses de primavera y verano (Knight Piesold, 2009).

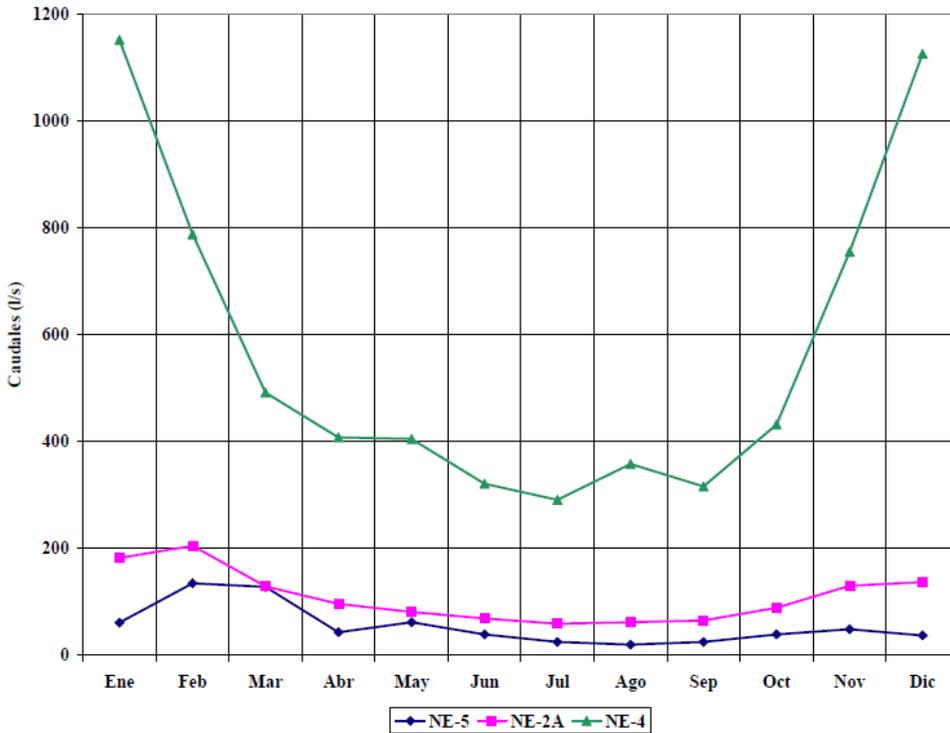
Tabla 4-10: Caudales medios mensuales río Del Estrecho (l/s)

Mes	NE-5 (1996 – 2005) Área = 15,6 km ²	NE-2a (1981 – 2005) Área = 33,6 km ²	NE-4 (1981 – 2005) Área = 129,0 km ²
Ene	61	182	1152
Feb	135	205	788
Mar	128	129	492
Abr	43	96	408
May	62	81	405
Jun	39	69	321
Jul	25	59	291
Ago	20	62	358
Sep	25	65	316
Oct	39	89	432
Nov	49	130	755
Dic	37	137	1126
Promedio	55	109	570
Caudal Específico Anual (l/s/km²)	3,53	3,24	4,45

Fuente: Knight Piesold 2009, Golder 2005t



Figura 4-26: Hidrogramas de caudales medios mensuales para río Del Estrecho



Fuente: Knight Piesold (2009)

A continuación se detalla la caracterización de las cuencas:

Subcuenca del río El Toro

La cuenca del río El Toro (mostrada como Cuenca C en la Figura 4-25, junto con río de las Tres Quebradas) contiene parte del área del Proyecto. El río El Toro tiene una cuenca hidrográfica de orientación oriente-poniente de 8 km de longitud, cuya superficie drenante es de 27,3 km², con una pendiente media del orden de 19%.

Cuenca río Del Estrecho

La cuenca de río Del Estrecho (Cuenca E en la Figura 4-25) contiene también parte del área del Proyecto. Este río tiene una longitud de aproximadamente 20 km y abarca una superficie de cuenca de 128,3 km². El río Del Estrecho drena hacia el río Chollay, que tiene una cuenca total de 728 km².

Cuenca río Del Carmen

Esta cuenca (Cuenca B en la Figura 4-25) abarca una superficie de 3.020 km²; presenta una orientación de Sur a Norte con una longitud de 105 km y una pendiente media de 1,9% (Golder 2005a). Constituye uno de los



principales afluentes del río Huasco y está denominado como un sub sub cuenca del rio Huasco en CEAZA 2008b.

El régimen es nivo-pluvial, con precipitaciones que varían en promedio entre 400 mm/año en su porción más alta hasta 50 mm/año en la porción de menor altitud.

Subcuenca río Potrerillos

Este río, cuya cuenca está mostrada como Cuenca D en la Figura 4-25 y está catalogada como una sub sub cuenca de la cuenca del Huasco Alto (CEAZA 2008b), drena una superficie de 631,9 km². La pendiente media del cauce es de 4,3% (Golder 2005a).

Subcuenca río Tres Quebradas

El río Tres Quebradas, (Cuenca C en la Figura 4-25), nace de la confluencia de los ríos El Toro y de un afluente sin nombre. La cuenca del río Tres Quebradas drena una superficie de 226,8 km² y tiene una pendiente media de 8,9%.

Cuenca río El Tránsito

Este río tiene una cuenca hidrográfica (Cuenca A en la Figura 4-25) que abarca una superficie de 4.130 km² y una longitud total de 63 km. La pendiente media es de 1,8% (Golder 2005a). Nace en la confluencia de los ríos Conay y Chollay.

El régimen hidrológico es nivo-pluvial con escasas precipitaciones anuales en la cuenca, las que varían desde menos de 50 mm/año en el curso bajo de la cuenca, hasta 300 mm/año en el extremo superior Norte y 500 mm anuales en su extremo superior Sur.

4.4.2 Registros fluviométricos locales

CMN recolecta datos fluviométricos en forma automática en varios lugares en el área de Pascua-Lama y en cursos inferiores. Se han medido caudales instantáneos esporádicamente en diferentes lugares alrededor del Proyecto Pascua-Lama desde 1982. La Tabla 4-11 y la Figura 4-27 muestran los detalles y la ubicación, respectivamente, de las estaciones más importantes cercanas al Proyecto.

Además, hay instaladas canaletas Parshall con registradores de datos que han recolectado información continua desde enero del 2002 (una estación desde marzo de 1999).



Tabla 4-11: Estaciones fluviométricas CMN en el área del Proyecto

Número de la estación	Estación	Área aportante (km ²)	Altura (m.s.n.m)	Período de registro de datos continuo (data logger)	Período de registro de mediciones manuales de caudales
Cuencas río Del Estrecho/río Chollay					
NE-1 NE-1a/H1	Quebrada Barriales arriba de la confluencia con el río Del Estrecho	34*	3.753*	Oct 1993 a Mar 1996 (H1) ¹ Dic 2001 a 2005 (NE-1a)	Nov 1981- 2005 ¹
NE-5	Río Del Estrecho Superior	15	3.980	Dic 2000 a 2005 ¹	Dic 1996 - 2005 ¹
NE-2 NE-2a/H2	Río Del Estrecho sobre Quebrada Barriales	33*	3.833*	Oct 1993 a Nov 1995 (H2) ¹ Nov 2000 a 2005 (NE-2a) ¹	Nov 1981 - 2005 ¹
NE-4	Río Del Estrecho sobre Quebrada Agua de la Falda	117	2.911	Dic 2001 a 2005	Nov 1981 - 2005 ¹
NE-8	Río Chollay bajo la confluencia de los ríos Blanco y Del Estrecho	446**	2.167	-	Feb 1983 - 2005 ¹
NE-9	Río Chollay sobre la confluencia del río ElTránsito	728**	1.579	-	Feb 1983 - Oct 2001 ¹
Cuencas río El Toro / río Tres Quebradas / río Potrerillos / río Del Carmen					
TO-1a	Parte superior río El Toro	7,5	4.317	Feb 2002 a Feb 2004 ¹	Feb 2000 - 2005
TO-6a	Río Tres Quebradas sobre Quebrada Ortigas	72,7	3.160	Mar 1999 ¹	Abr 1997 - 2005
PO-7b	Parte superior río Potrerillos	118	3.300	Ene 2002 ¹	Oct 2001 - 2005
VIT-3	Río Potrerillos bajo Río Tres Quebradas	507	2.613	Dic 2001	Feb 1997 - 2005
VIT-2	Río Del Carmen bajo río Potrerillos	1.838**	2.206**	-	Dic 1996 - 2005
VIT-7	Río Potrerillos sobre Canales Vitalic	541**	2.444**	-	Sept 1997 – Dic 2001

* Área aportante y altura proporcionado para las estaciones NE-1a y NE-2a. Las estaciones alternativas referenciadas se ubican cerca.

** Datos provienen de Conic-BF 1999

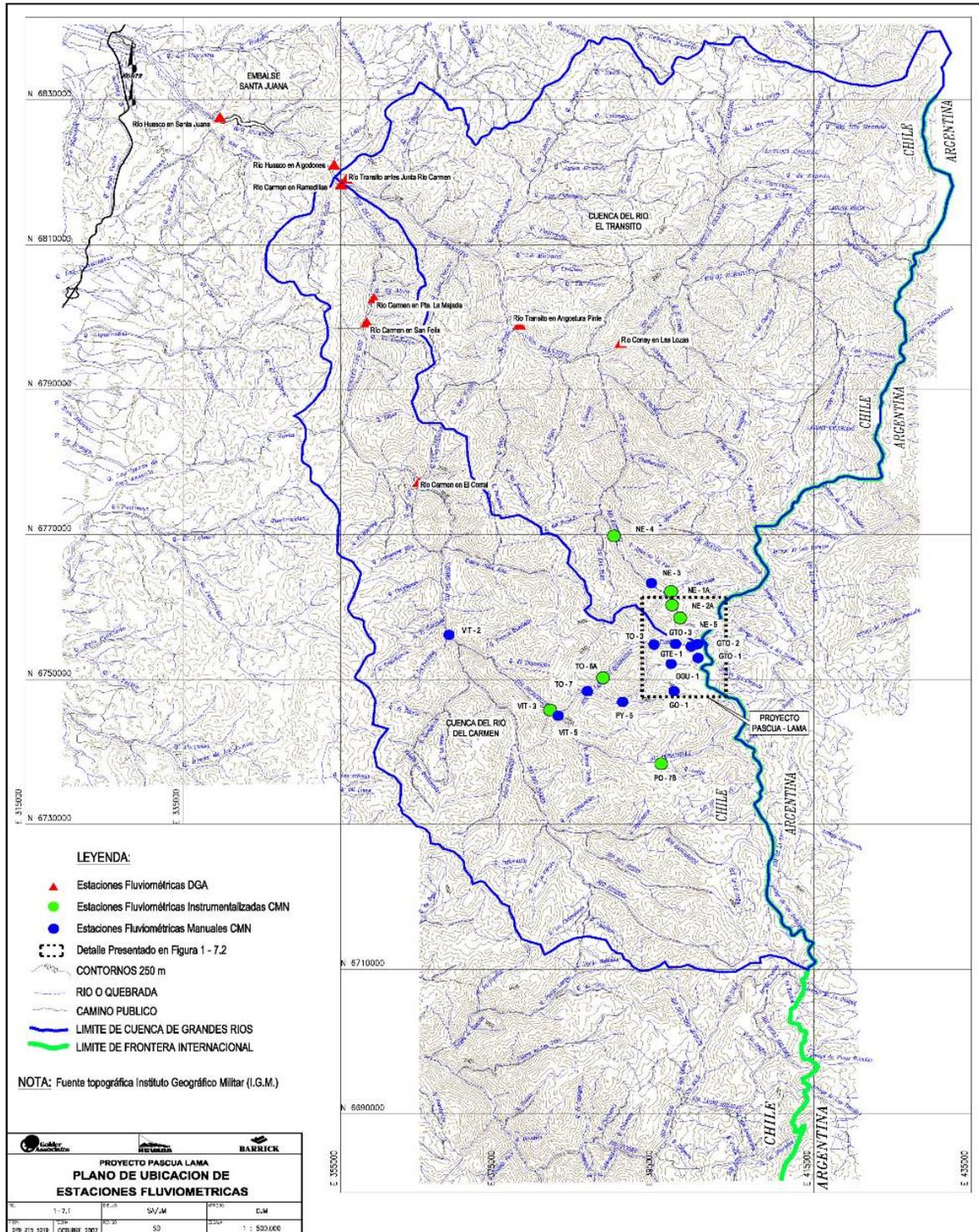
¹ Con algunos datos faltantes.

Fuente: Golder 2005a



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Figura 4-27: Ubicación de las estaciones de registro de caudal dentro la cuenca del río Huasco



Fuente: CMN 2008a



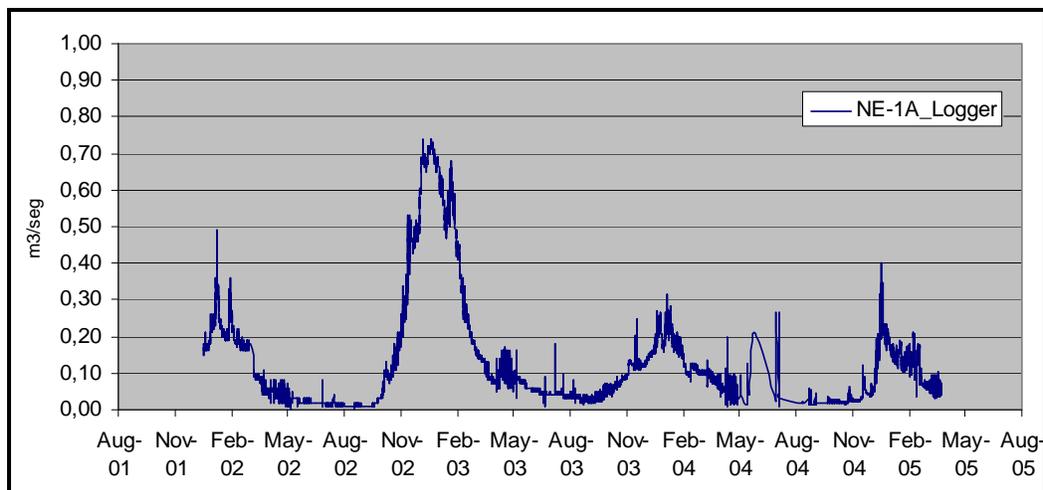
Figura 4-28: Ejemplo de una estación fluviométrica CMN (NE-4)



Fuente: Golder 2005a

La Figura 4-29 muestra los valores de caudal tomados con registros automáticos con base horaria en la estación NE-1A (Proust 2008), desde diciembre del 2001 hasta abril del 2005.

Figura 4-29: Caudal horario de NE-1A, 2001-2005



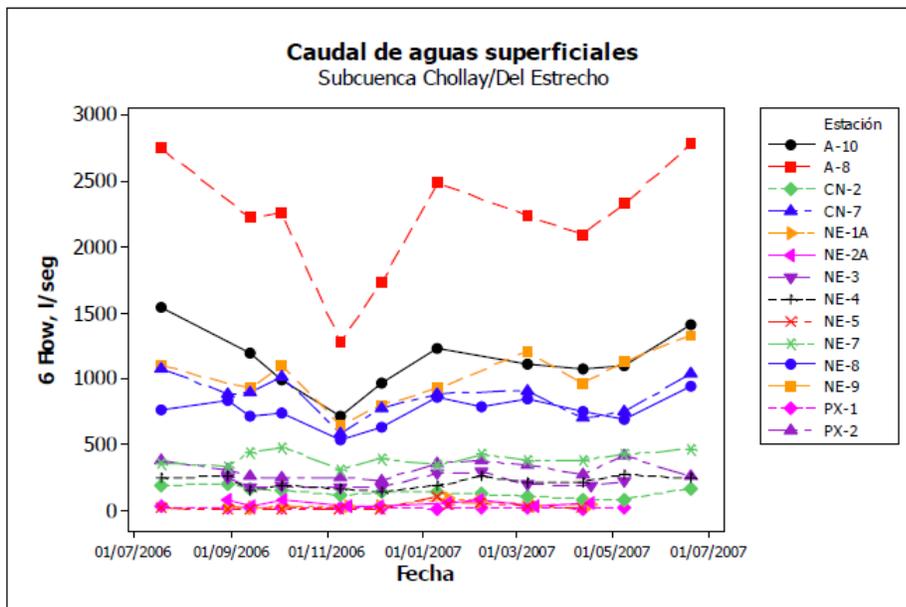
Fuente: Proust 2008

Cabe señalar que la información fluviométrica controlada en las estaciones presentadas en Tabla 4-11 se sigue recolectando hasta el día de hoy.



En el periodo de julio 2006 a junio 2007 se realizaron registros manuales de caudales para tres subcuencas, Chollay/Del Estrecho, Tres Quebradas/Potrerillos y Del Carmen (MA&C 2007). Del análisis de los registros en este periodo es posible inferir la existencia de cierta variabilidad estacional en los resultados de las determinaciones de caudales para algunas subcuencas. Las determinaciones realizadas en subcuenca Chollay/Del Estrecho y Del Carmen exhiben tendencias mas bien estables a lo largo del año, en tanto que en Tres Quebradas/Potrerillos es posible observar cierta estacionalidad, con incrementos en los flujos durante el mes de febrero de 2007. Se destaca que los mayores flujos fueron determinados en subcuenca Del Carmen, seguidos de los niveles observados en subcuenca Chollay/Del Estrecho. Los gráficos de los registros se muestran en las Figura 4-30, Figura 4-31 y Figura 4-32.

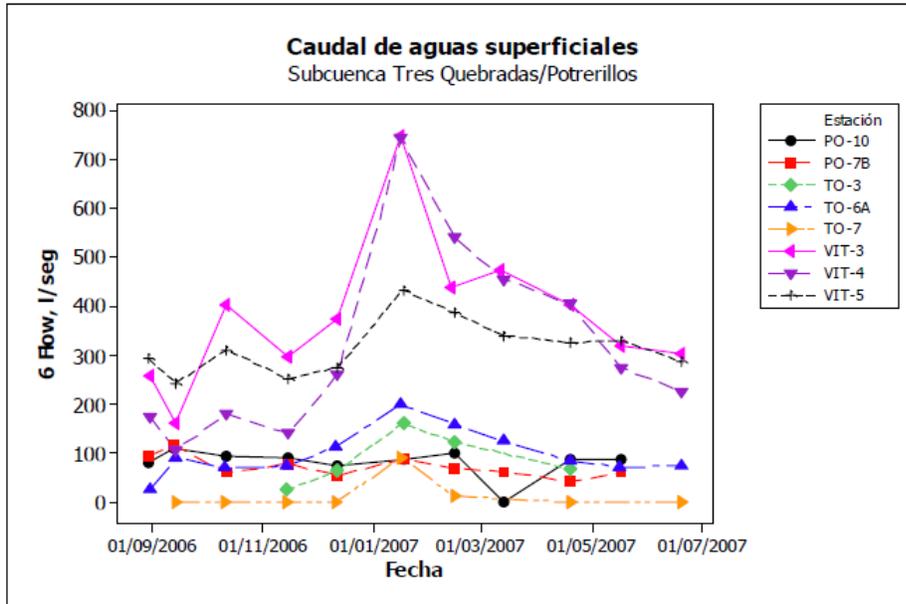
Figura 4-30: Caudales subcuenca Chollay/Del Estrecho, julio 2006 – junio 2007



Fuente: MA&C 2007

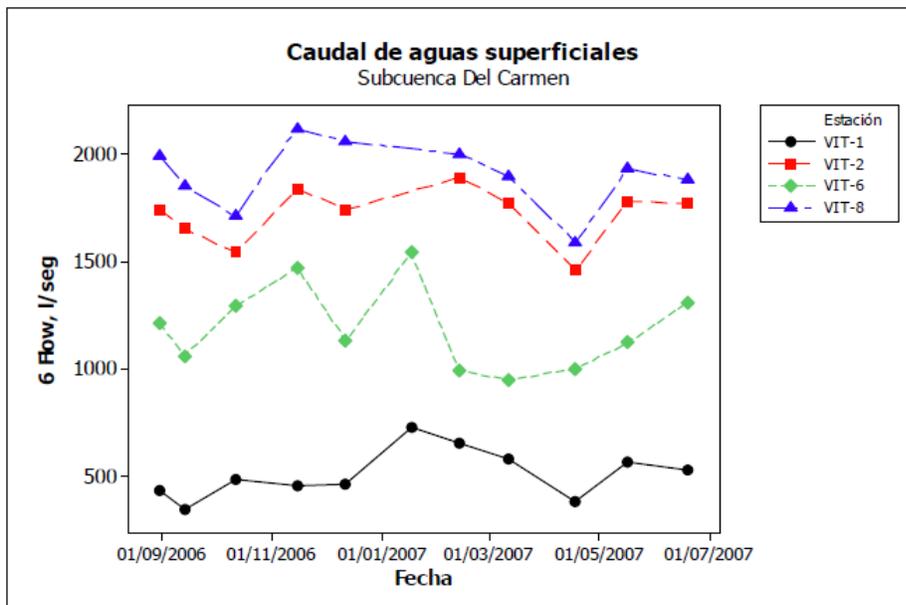


Figura 4-31: Caudales subcuena Tres Quebradas/Potrerrillos, julio 2006 – junio 2007



Fuente: MA&C 2007

Figura 4-32: Caudales subcuena Del Carmen, julio 2006 – junio 2007



Fuente: MA&C 2007



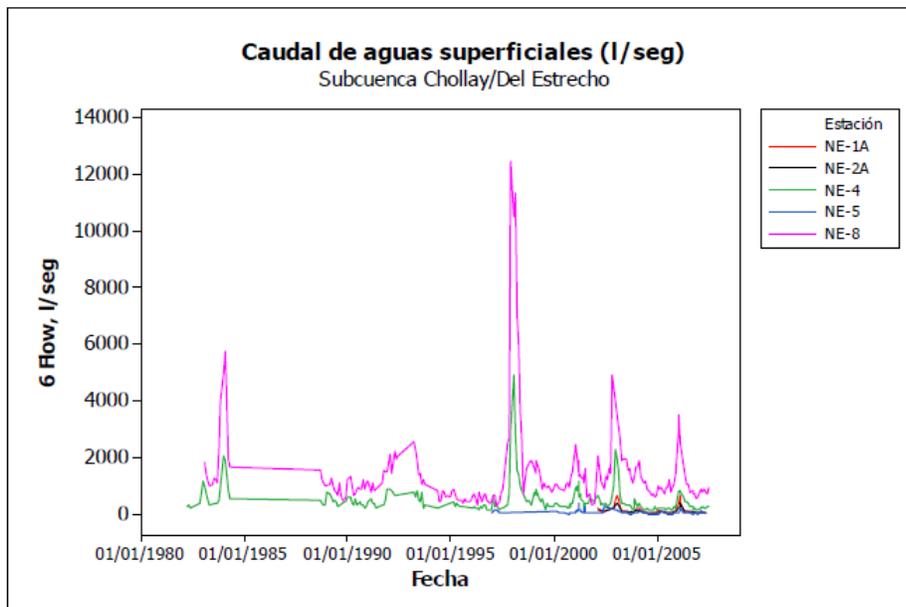
Adicionalmente, se realizó un análisis de los registros históricos (de todos los años con datos) de las determinaciones de flujos de aguas superficiales por subcuenca, la cual permite observar la existencia de diferencias significativas entre campañas para la mayor parte de las estaciones de muestreo, sólo en el caso de la estación TO-7 (subcuenca Tres Quebradas/Potrerillos) las diferencias observadas entre periodos (año a año) no alcanzan significancia estadística, lo cual tendría relación con los bajos flujos determinados históricamente en esta estación de monitoreo (Figura 4-34) (MA&C 2007).

En la subcuenca Chollay/Del Estrecho, las diferencias significativas observadas se deben en mayor proporción a valores puntuales elevados en fechas tales como febrero de 1984, marzo de 1993, enero y febrero de 1998, octubre de 2002 y enero de 2006 (Figura 4-33).

Para la subcuenca Tres Quebradas/Potrerillos se observa a partir de 1998 una tendencia marcadamente descendente en los flujos medidos para el total de estaciones, observándose adicionalmente una estacionalidad bien definida en cuanto a las fluctuaciones mensuales de las mediciones realizadas, con máximos entre enero y febrero de cada año (Figura 4-34) (MA&C 2007).

Para el caso de la subcuenca Del Carmen (estación VIT-2) las tendencias históricas también exhiben una cierta estacionalidad, definida en este caso por mayores niveles observados entre febrero y abril de cada año; siendo los años 1998 y 2003 los cuales mostraron mayores flujos. La tendencia general de esta serie, también muestra un patrón descendente a partir de 1998 (Figura 4-35) (MA&C 2007).

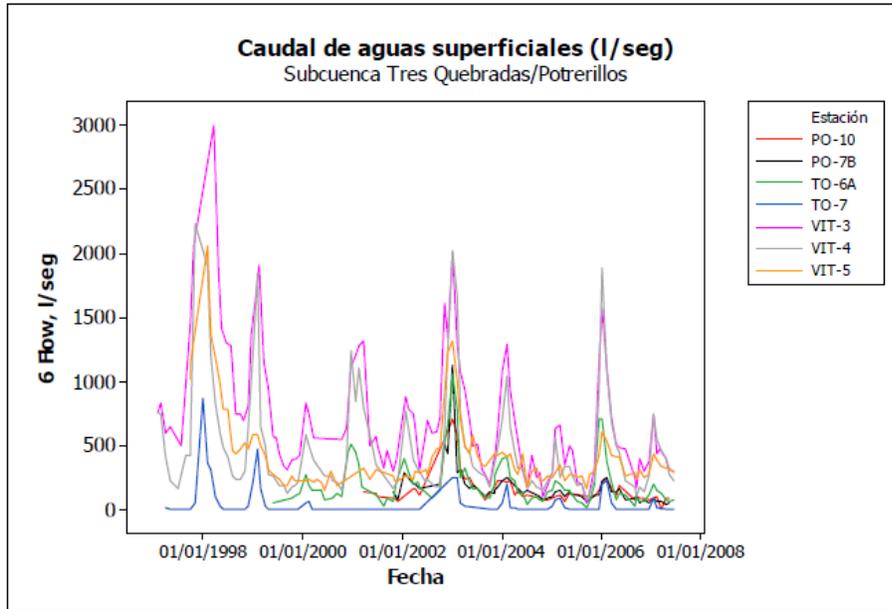
Figura 4-33: Serie históricas de caudales subcuenca Chollay/Del Estrecho



Fuente: MA&C 2007

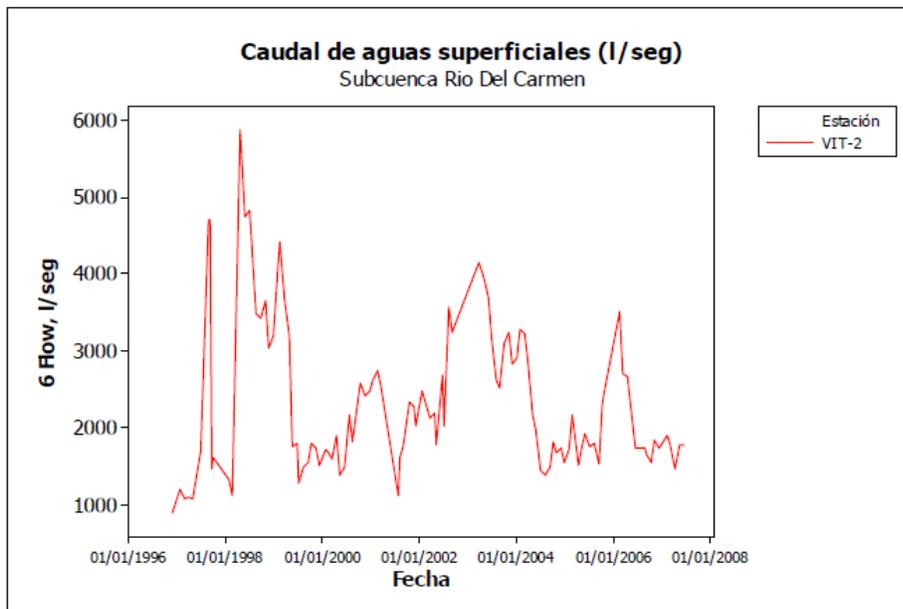


Figura 4-34: Serie históricas de caudales subcuenca Tres Quebradas/Potrerillos



Fuente: MA&C 2007

Figura 4-35: Serie históricas de caudales subcuenca Del Carmen



Fuente: MA&C 2007



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Para completar el registro, durante los meses de verano 2008 se realizaron mediciones a la salida de los cuerpos de hielo con una frecuencia de tres veces por semana, tomándose hasta un máximo de cinco mediciones diarias en cada punto de aforo. El objetivo de estas mediciones fue poder captar la curva de derretimiento de estas criofomas. Los datos extraídos han sido expresados en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (l/s).

Los puntos de control se instalaron al pie de las criofomas Toro 1, Guanaco y en otras secciones cercanas a los frentes glaciares, tales como la confluencia de Toro 1, Toro 2 y Esperanza (Tabla 4-12 y Figura 4-36). Adicionalmente, en esta campaña de medición se tomaron mediciones manuales en puntos ya establecidos (de frecuencia de medición mensual y permanente), ubicados aguas abajo de los glaciares-glaciaretos en las partes bajas de cada subcuenca, incluyendo puntos donde existe medición permanente instrumentalizada, tales como NE-5 y TO-6A.

Tabla 4-12: Características y distribución de las estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares y glaciaretos

Punto	Tipo	Norte	Este	Elevación (m s.n.m.)	Período de registro	Frecuencia	Ubicación
GUANACO	Aforo Manual	6.752.604	400.157	4.753	Febrero 2006 Enero – febrero 2007	Semanal en verano	Guanaco. 100 m aguas abajo de camino
TORO-1	Aforo Manual	6.754.480	400.053	4.970	Febrero 2006 Enero – febrero 2007	Semanal en verano	Toro 1, antes de confluencia con Toro 2
CONFL T1-T2	Aforo Manual	6.754.527	399.982	4.955	Enero – febrero 2007 Enero - marzo 2008	Semanal en verano	Aguas abajo confluencia de Toro 1 y Toro 2
CONFL T1-T2-ESPE.	Aforo Manual	6.754.197	399.273	4.726	Febrero 2006 Enero 2007	Semanal en verano	100 m aguas abajo de confluencia T1, T2 y Esperanza.
TO-3	Aforo Manual	6.754.459	394.560	3.897	Enero - abril 2008	Mensual	Vega del río El Toro.
TO-7	Aforo Manual	6.748.035	386.097	3.170	Enero - marzo 2008	Mensual	Quebrada Las Ortigas aguas arriba de Tres Quebradas
TO-6A	Estación Fluviom. Instrum.	6.749.891	388.097	3.160	Enero - abril 2008	Permanente	Río El Toro aguas arriba quebrada La Ortiga.

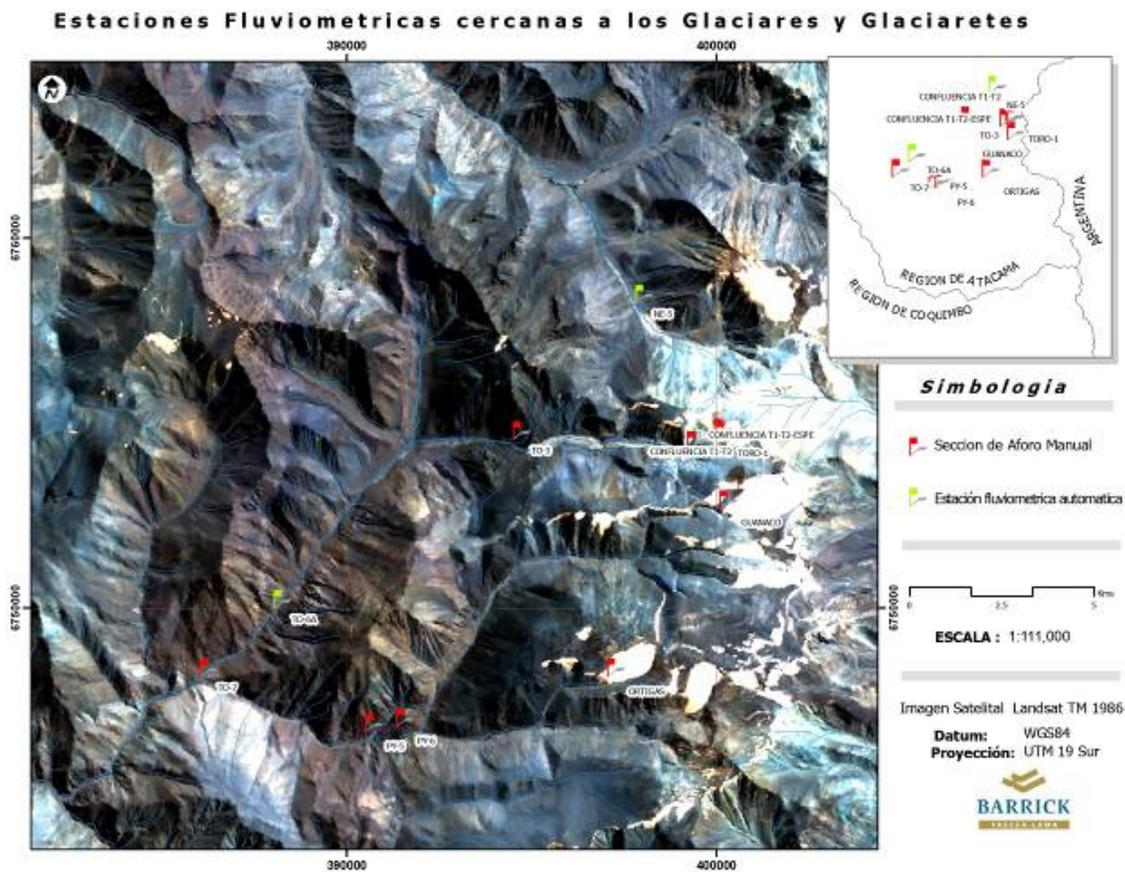


RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Punto	Tipo	Norte	Este	Elevación (m s.n.m.)	Período de registro	Frecuencia	Ubicación
NE-5	Estación Fluviom. Instrum.	6.758.149	397.877	3.978	Enero - marzo 2008	Permanente	Río Del Estrecho alto.
PY-5	Aforo Manual	6.746.553	390.566	3.400	Ene - abril 2008	Mensual	Quebrada Guanaco, antes de confluencia con Quebrada Ortiga.

Fuente: CMN 2008a

Figura 4-36: Ubicación de estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares



Fuente: CMN 2008e, CMN 2008a

En la Tabla 4-13 se muestran los rangos de caudales de las 10 estaciones, ubicadas al pie de los cuerpos de hielo y aguas abajo de ellos, (NE-5, Guanaco, Toro-1, Confl T1-T2, Confl T1-T2 Esperanza, TO-3, TO-6A, TO-7, PY-5 y PY-6), donde se hicieron mediciones de caudal manuales (Figura 4-37) durante el periodo 2007 a 2008 (CMN 2008a). Datos adicionales de estas estaciones se muestran en la Tabla 4-12..



Figura 4-37: Medición manual de caudal



Fuente: Registros CMN

Los mayores registros de caudal cercanos a glaciares ocurrieron durante los meses de enero y febrero, disminuyendo notoriamente en el mes de marzo (Tabla 4-13).

Tabla 4-13: Caudales máximos y mínimos durante el día, medidos por métodos manuales. Verano año 2008.

Punto	Tipo	Frecuencia	Ubicación	Caudal (l/s)			
				Enero	Febrero	Marzo	Abril
CONF. T1 - T2	Manual	Semanal en verano	Aguas abajo confluencia de Toro 1 y Toro 2	17 - 54	7 - 56	1 - 7	n/d
CONF. T1-T2-E	Manual	Semanal en verano	100 m aguas abajo de confluencia T1, T2 y Esperanza.	28 - 104	2 - 110	3 - 11	n/d
GUANACO	Manual	Semanal en verano	Guanaco. 100 m aguas abajo de camino	44 - 237	3 - 306	2 - 37	n/d
NE-5	Instrumental-medición manual.	Permanente	Río Del Estrecho alto.	139 - 194	97 - 175	37 - 46	n/d
PY-5	Manual	Mensual	Quebrada Guanaco, antes de confluencia con Quebrada Ortiga.	n/d	167 - 515	40 - 52	29 - 33
TO-3	Manual	Permanente	Punto en la vega del río El Toro.	147 - 258	186 - 227	55 - 89	54 - 56
TO-6A	Instrumental - medición manual	Permanente	Río Toro aguas arriba quebrada La Ortiga.	n/d	174 - 236	106 - 172	82 - 86
TO-7	Manual	Mensual	Quebrada Las Ortigas	170 - 232	13 - 206	2 - 87	n/d



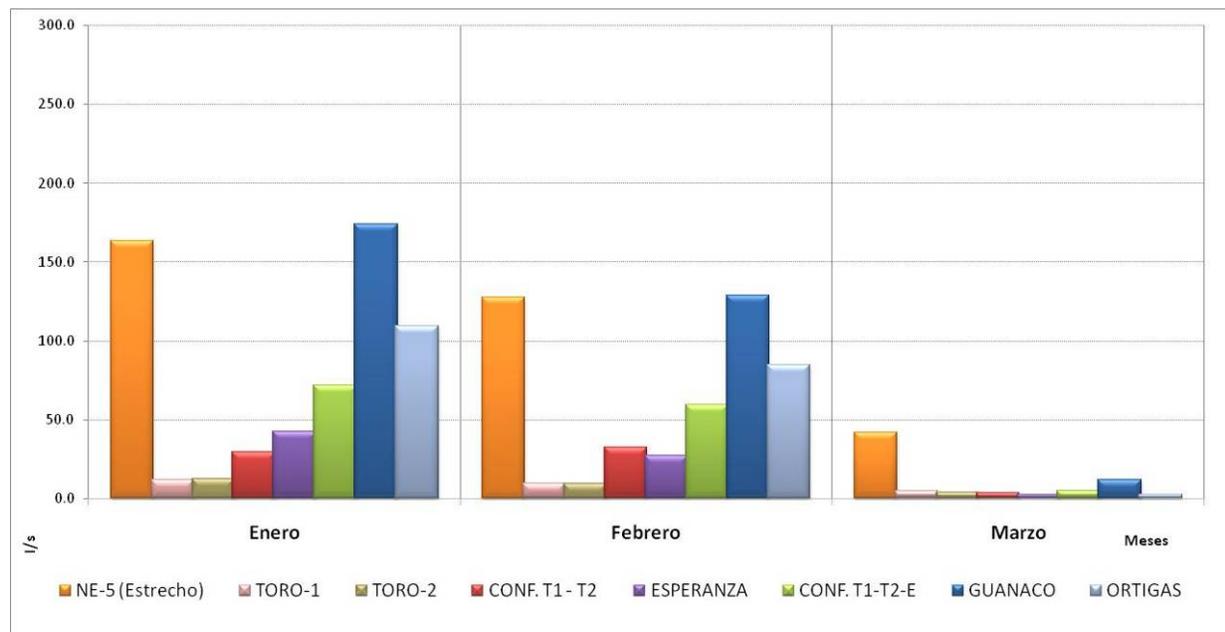
RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Punto	Tipo	Frecuencia	Ubicación	Caudal (l/s)			
				Enero	Febrero	Marzo	Abril
			aguas arriba de Tres Quebradas				
TORO-1	Manual	Semanal en verano	Toro 1, Antes de confluencia con Toro 2	10 - 16	4 - 18	4 - 5	n/d

Fuente: Elaboración propia a partir de información en CMN 2008a

La inexistencia de datos diarios y continuos de caudal para todos los puntos de medición impide realizar comparaciones diarias exactas entre el conjunto de puntos. Sin perjuicio de ello, pueden realizarse algunas comparaciones relativas a nivel mensual de los valores de caudal promedio³ registrado en dichos puntos. La Figura 4-38 y la Figura 4-39 presenta los resultados de las mediciones realizadas por CMN durante el verano de 2008, en los puntos ubicados cercanos a las crioformas y en los ubicados aguas abajo de ellas, respectivamente.

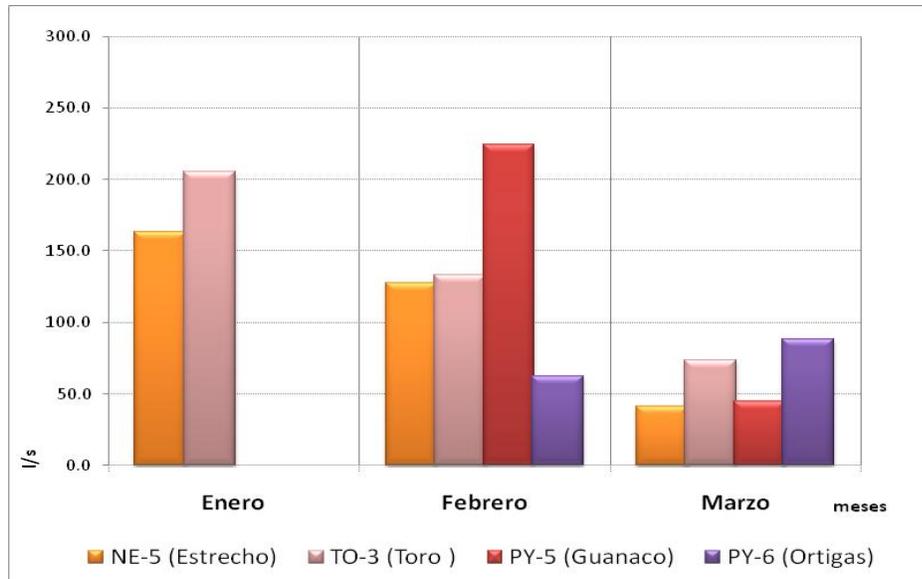
Figura 4-38: Caudal promedio mensual durante el día en los puntos de monitoreo cercanos a los glaciares y glaciaretas, verano 2008



Fuente: CMN 2008a

Figura 4-39: Caudal promedio mensual durante el día en los puntos de monitoreo aguas abajo de los Glaciares, verano 2008

³ El caudal promedio mensual fue calculado en promedios mensuales simples y no hidrológicos, debido a que el universo de datos es limitado.



Fuente: CMN 2008a

Las mediciones muestran que los mayores flujos de caudal ocurren durante los meses de enero y febrero, y que provienen principalmente de los Glaciares Estrecho y Guanaco, cuyos aportes individuales durante el día son superiores a los 84 l/s como caudal promedio mensual. En tanto, los glaciaretos del Grupo Toro (confl. T1-T2-Esp) entregaron un caudal promedio mensual cercano a los 70 l/s en el mes de enero, pero en los meses siguientes su aporte fue significativamente menor (inferior a 32 l/s) (CMN 2008a).

4.4.3 Procesos de registros fluviométricos regionales

Se realizó un estudio de datos promedios y periodos de retorno generados por análisis de frecuencia para caudales en estaciones regionales y locales presentes en el área del Proyecto (Golder 2005a). El estudio se concentró en definir periodos de retorno a las siguientes estaciones operadas por la DGA:

- Río Del Carmen en El Corral (10 años completos);
- Río Del Carmen en San Felix (22 años completos);
- Río Del Carmen en Puente La Majada (10 años completos);
- Río Del Carmen en Ramadillas (42 años completos);
- Río El Tránsito en Angostura Pinte (28 años completos);
- Río El Tránsito antes junta río Del Carmen (49 años completos);
- Río Huasco en Algodones (8 años completos); y
- Río Huasco en Santa Juana (31 años completos).



Figura 4-40: Estación fluviométrica DGA, Río Tránsito en Angostura Pinte



Fuente: Golder 2005a

A partir de estos datos, y dado que las estaciones de monitoreo de caudales de Pascua–Lama (ver Tabla 4-14) tienen periodos de registros relativamente cortos, se desarrolló una serie de cálculos de caudales más extenso por medio de correlaciones con las estaciones regionales; realizando además análisis de frecuencia (Golder 2005a). La Tabla 4-14 muestra un resumen de los resultados de este proceso, indicando las estaciones, las cuencas y los resultados del análisis de frecuencia. Por su parte, la Figura 4-11 muestra las ubicaciones de las estaciones relevantes al estudio (Golder 2005a y CMN 2008a).



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRIÓSFERA

Tabla 4-14: Resumen de cuencas, datos disponibles y resultados de análisis de frecuencia de caudales anuales (m³/s)

Probabilidad de excedencia	NE-5	NE-2a/H2/NE-2a	NE-1a/H1/NE-1	NE-4	NE-8	TO-6a	PO-7b	VIT-3	VIT-2
Periodo de registro continuos	Dic. 00 a 2005	Oct. 93 a Nov. 95; Nov. 00 a 2005	Oct. 93 a Mar. 96; Dic. 01 a 2005	Dic. 01 a 2005	-	Mar. 99	Ene. 02	Dic. 01	-
Periodo de registro manual	Dic. 96 a 2005	Nov. 81 a 2005	Nov. 81 a 2005	Nov. 81 a 2005	Feb. 83 a 2005	Abr. 97 a 2005	Oct. 01 a 2005	Feb. 97 a 2005	Dic. 96 a 2005
Área de cuenca (km ²)	15,5	33,6	34,6	128	446	72,7	118	507	1.838
Elevación (m.s.n.m)	3.980	3.833	3.753	2.911	2.167	3.300	2.951	2.613	2.206
1%	0,32	0,43	0,62	2,8	8,4	1,07	0,56	2,3	11,0
2%	0,23	0,34	0,51	2,2	6,4	0,81	0,42	1,8	8,0
5%	0,15	0,24	0,37	1,5	4,3	0,53	0,28	1,3	5,3
10%	0,10	0,19	0,27	1,0	3,0	0,37	0,21	0,98	3,9
20%	0,061	0,14	0,18	0,70	1,9	0,24	0,16	0,76	2,8
Promedio	0,041	0,109	0,068	0,49	1,34	0,16	0,13	0,65	2,31
Mediana (50%)	0,026	0,089	0,050	0,35	0,90	0,12	0,11	0,56	1,87

Fuente. Golder 2005a



4.5 Cambio climático

Los estudios disponibles sobre cambio climático y sus efectos sobre los glaciares a niveles local, regional y global, permiten rescatar las siguientes conclusiones (Golder 2009c):

- Según los datos de balance de masa y tamaño de glaciares, a nivel global y regional existe una disminución en la mayoría de éstos a lo largo de las últimas décadas considerando datos cuantitativos definitivos; mientras que también se evidencia una disminución a lo largo de los últimos siglos según evidencia cualitativa.
- El estudio de espesor de glaciares y la disminución de la línea de nieve durante el siglo XX indica que las criofomas en esta región presentan un balance de masa negativo, que señala un estado de retroceso de glaciares y glaciaretos.
- Las principales fuerzas atmosféricas que controlan el retroceso y avance de los glaciares locales y regionales son: el evento de El Niño y el efecto PDO4 (Pacific Decadal Oscillation). De esta forma, el comportamiento de los glaciares ha estado marcado en los últimos 25 años por un cambio en la intensidad y periodicidad en los eventos de El Niño debido a la influencia de un régimen cálido de PDO presente desde 1976 hasta mediados de la década de 1990.

4 Es un patrón de variabilidad climática a largo plazo del Océano Pacífico. El cual tiene un modo de temperatura cálido y un modo frío y en el último siglo ha cambiado entre estos dos modos cada 20-30 años. En la fase cálida o positiva la parte Oeste del océano se enfría y la parte Este del océano se calienta.. En la fase fría o negativa ocurre lo contrario.



5.0 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS CRIOFORMAS

La siguiente sección presenta una breve caracterización de los distintos cuerpos de hielo o crioformas del área de influencia del proyecto y zonas de referencia, tomada de los estudios ya realizados

5.1 Inventario de crioformas

5.1.1 Trabajos realizados

El inventario de las crioformas ha sido documentado en los siguientes informes:

- GOLDER. 2005d. Relevamiento de cuerpos de hielo descubierto en la cuenca del río Huasco-Algodones 28 Oct 2005. Adenda 2 EIA, Anexo III-F;
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criósfera. Proyecto Pascua-Lama. Adenda 2 EIA. Anexo III-A
- CEAZA 2008b. Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, Ref 2004. (Anexo F)

5.1.2 Metodología

La extensión de los glaciares y glaciaretos puede ser difícil de definir con exactitud en un mapa, debido a que es posible que las nevadas de la estación oculten los límites del hielo. En los Andes Centrales, la llegada de las nevadas en años con influencia de El Niño, con una frecuencia de 5 a 10 años, puede ocasionar que los cuerpos de hielo permanezcan ocultos durante años, lo que significa que fotografías aéreas o imágenes satelitales obtenidas a finales del verano no siempre revelan la verdadera área de los cuerpos de hielo en aquellos lugares donde las nevadas se hayan mantenido de un verano a otro.

La metodología utilizada para la identificación de las crioformas consiste en la interpretación y comparación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes años para deducir el área y la evolución de los cuerpos de hielo en cada cuenca.

Los trabajos más recientes en el área del Proyecto (CEAZA 2008b), se han realizado sobre la imagen satelital ASTER 2004 por poseer buena resolución (15 m) y por la facilidad de ocupar procesos automatizados.

La evolución histórica de las áreas de los cuerpos de hielo y las imágenes usadas para ello se tratan en profundidad en la sección 6.1.

El estudio de CEAZA (2008b) se enfocó en identificar aquellos cuerpos de hielo que se encontraban distribuidos en las subcuencas hidrográficas de la cuenca alta del valle del Huasco. Los límites de las subcuencas hidrográficas se basan en la información detallada en la Sección 4.4 con referencia a la información de la DGA mostrada en la Figura 5-1. Además los cuerpos de hielo se clasificaron en razón de su tamaño, según fuesen mayores o menores de 0,1 km² (10 ha).

La preparación de la base de datos se basó en los lineamientos establecidos por el World Glacier Inventory (WGI) y el Global Land Ice Measurement from Space (GLIMS). En consecuencia, se generaron dos identificadores para cada cuerpo de hielo mapeado: un primer nombre basado en el país y la cuenca hidrográfica de pertenencia (según metodología de WGI/UNESCO) y un segundo nombre elaborado a partir de la longitud y la latitud (GLIMS).

Para el cálculo de las áreas y volúmenes de las crioformas descubiertas, se siguió el siguiente procedimiento:



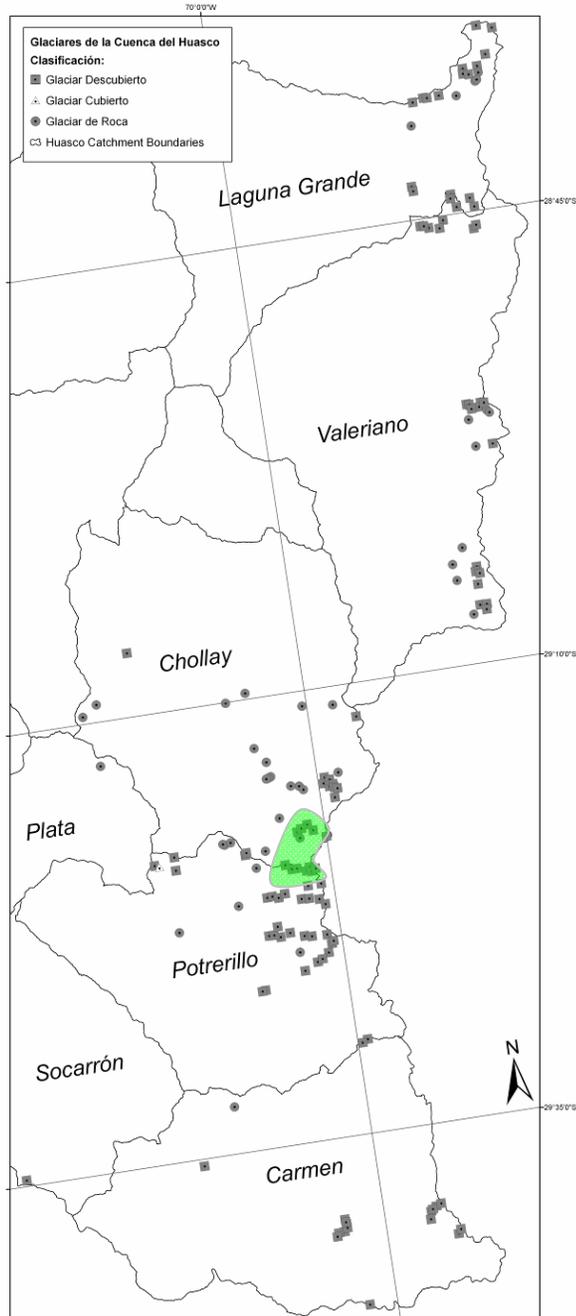
- 1) Elaboración de un Modelo Digital del Terreno, con una resolución de 15 m, empleando un par de imágenes estereoscópicas ASTER;
- 2) Ortorrectificación de imágenes ASTER;
- 3) Unión de las imágenes ortorrectificadas en un mosaico.
- 4) Delimitación de las cuencas hidrográficas;
- 5) Delineación de los límites del cuerpo de hielo, para calcular la superficie, y
- 6) Estimación de espesores y volúmenes de hielo en base a fórmulas de Marangunic (Marangunic, 1979). Se discute este método con más detalle en la sección 5.2.

Para la identificación de los glaciares de roca, se recurrió a identificar la presencia de rasgos geomorfológicos indicativos en las fotografías aéreas. Se usaron las fotografías aéreas debido a que la resolución de las imágenes satelitales no permite la completa delimitación de este tipo de glaciar, sino tan sólo la delineación de su margen activo o frente.

De este modo, los glaciares de roca activos fueron identificados por medio de la visualización de superficies rocosas “frescas” expuestas en su frente. Como el flujo de un glaciar de roca es causado por reptación gravitacional, el frente activo aparece como una línea más clara que las superficies compuestas por roca que han sufrido procesos de intemperismo o meteorización. Haciendo uso de esta observación, el límite superior de cada glaciar rocoso se definió como el quiebre de pendiente sobre la superficie más alta de la geofoma identificada. La estimación de volumen se realizó de acuerdo al método de Brenning (2005) desarrollado para glaciares de roca en la zona central de Chile (CEAZA 2008b).



Figura 5-1: Ubicación de crioformas y las sub-cuencas según DGA, 1986.



Fuente: CEAZA 2008b



5.1.3 Resultados

Los cuerpos de hielo descubiertos, observados en la cuenca del Huasco, no están incorporados en su totalidad en el estudio DGA 1986 que se muestra graficado en la Figura 5-1. El inventario de glaciares realizado por la DGA para la III Región considera un total de 66 km² de áreas de glaciar. Dicho valor fue actualizado en el 2005 a 84 km² (Golder 2005d), incluyendo una amplia zona de hielo descubiertos (no considerada en DGA 1986) entre los glaciares Tronquito y Alto de la Flecha y entre los glaciares Los Tambillos y Los Cuartitos ubicados en la cuenca alta del Huasco, aguas arriba de Algodones, los que corresponden a 18 km². Así, se identificaron 102 glaciares y glaciaretos en la cuenca del Río Huasco, correspondientes a 22,66 km² (Golder 2005d).

Posteriormente, se realizó un nuevo inventario en 2008 (CEAZA 2008b) de los cuerpos de hielo ubicados en la cuenca del río Huasco, que incluyó además de glaciares y glaciaretos descubiertos, glaciares cubiertos y glaciares rocosos, el que presenta un total de 152 glaciares, con el siguiente desglose: 111 glaciares descubiertos, 1 glaciar cubierto y 40 glaciares de roca activos (Tabla 5-1 y Figura 5-3).

Tabla 5-1: Relación entre superficie, volumen de hielo estimado y volumen de agua equivalente, en la cuenca del río Huasco.

	Numero	Área (ha)	Volumen de hielo estimado (Mm ³)	Volumen de agua equivalente (Mm ³)
Glaciares	112	1686	599	539
Glaciares de roca	40	630	95	76
Total	152	2316	694	615

Fuente: CEAZA 2008b

Este mismo estudio señala que la superficie de los cuerpos de hielo suma un total de 23,2 km² (CEAZA 2008b), repartida entre 16,9 km² de glaciares y glaciaretos descubiertos (73%) y 6,3 km² de glaciares de roca (27%). Cabe señalar que el área de cuerpos de hielo descubiertos, en comparación a lo estimado anteriormente por Golder 2005d, presenta una reducción de aproximadamente 25%. Tal diferencia se explica por la aplicación de distintos metodos de interpretación e imágenes utilizadas, además de las pérdidas mismas de los cuerpos de hielo que se analizan en la sección 6.1.

En relación a los glaciares y glaciaretos, del total de 112 unidades identificadas, 78 de ellos (70%) presenta un área menor de 0,1 km² (Tabla 5-2). No obstante, estos glaciares pequeños (glaciaretos) constituyen solamente el 3% de toda la superficie de hielo descubiertos de la III Región. (CEAZA 2008b).

Tabla 5-2: Glaciares descubiertos y de roca de la III Región, clasificados por el umbral de área de 0,1km²

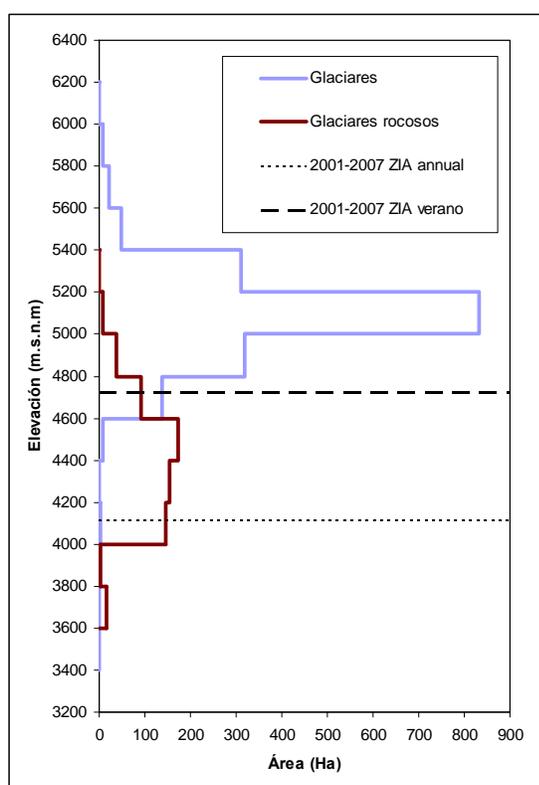
	Todos los cuerpos de hielo identificados		Cuerpos de hielo > 0,1km ²		Cuerpos de hielo < 0,1km ²		Cuerpos de hielo pequeños como porcentaje del total	
	Glaciares	Rocosos	Glaciares	Rocosos	Glaciares	Rocosos	Glaciares	Rocosos
Número	112	40	34	20	78	20	70%	50%
Área (ha)	1686	630	1383	538	303	93	18%	15%
Volumen de hielo estimado (Mm³)	599	95	584	81	15	14	3%	15%

Fuente: CEAZA 2008b



La distribución hipsométrica de glaciares y glaciaretos descubiertos y de roca (Figura 5-2) al interior de la cuenca del Huasco presenta marcadas diferencias, ya que demuestra la existencia y supervivencia de glaciares de roca en ambientes que presentan temperaturas positivas durante algunas partes del año. En efecto, el derretimiento de nieve de avalanchas y precipitaciones y su consecuente recongelamiento dentro del glaciar de roca es el mecanismo básico de construcción del hielo intersticial. Por otro lado, los glaciares descubiertos existen mayoritariamente donde las temperaturas presentan valores bajo cero a lo largo de todo el año (CEAZA 2008b).

Figura 5-2: Distribución hipsométrica de cuerpos de hielo en la cuenca del Huasco Alto



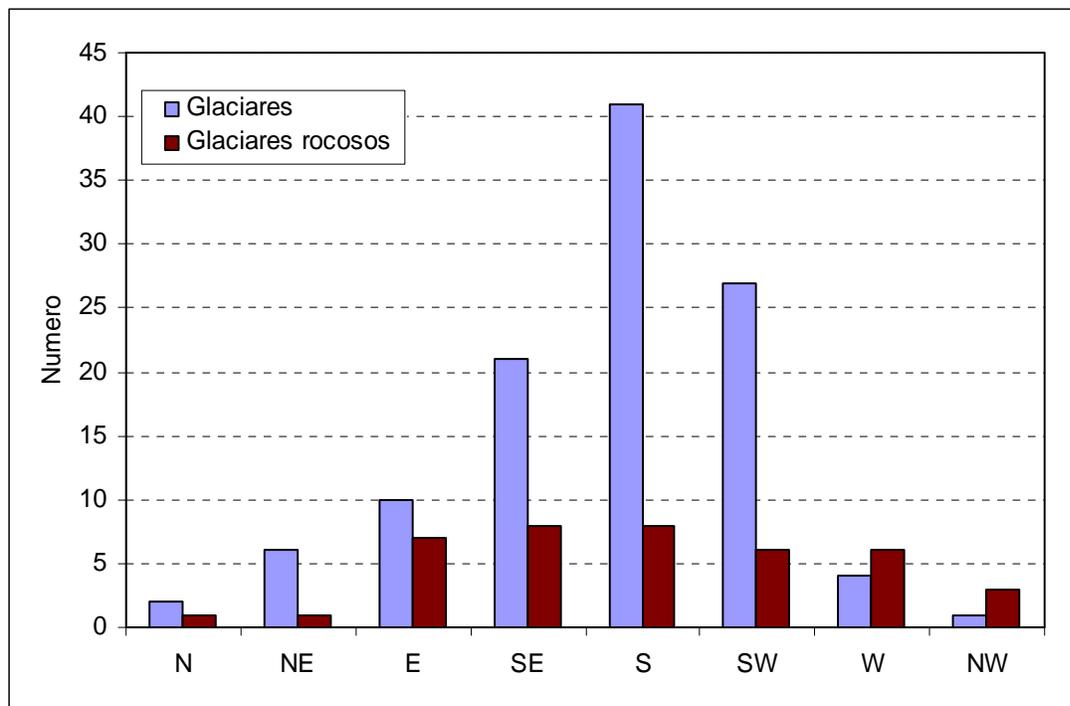
N.B. ZIA = La altitud de la isoterma cero

Fuente: CEAZA 2008b

La orientación preferente de los glaciares y glaciares de roca en la cuenca es hacia el Sur, tanto de los glaciares cubiertos como los descubiertos. El grupo de ellos con las orientaciones Sur, Sureste y Suroeste equivale a aproximadamente el 73% del total de los cuerpos de hielo identificados. Esta orientación predominante se debe a que las criofomas se emplazan en los sectores de menor intensidad de radiación solar, la cual es más alta en las pendientes de exposición Norte; junto con sectores de menor exposición a los vientos, (que es justamente la exposición Sur), dado que en el área del Proyecto predominan los procedentes del Noroeste (NW).



Figura 5-3: Orientación promedio de los cuerpos de hielo



Fuente: CEAZA 2008b

Un 60% de los cuerpos de hielo identificados en CEAZA 2008b corresponden a cuerpos de hielo tipo “de cornisa”, formados a lo largo de líneas de cumbres. Estos rasgos pueden ser identificados por medio del cociente entre su largo y su ancho.

5.2 Superficie, espesor del hielo y volúmenes de crioformas seleccionadas

5.2.1 Trabajos realizados

- Golder. 2005g. Estudios de Campo de hielo y Glaciares Proyecto Pascua-Lama, Chile, 059-2701, noviembre 2005. (Anexo 1 – Monitoreo de glaciares de noviembre 2004041419017), que incluye como anexos Golder 2002b, 2003a, 2003b y 2004a. (Adenda 2 Anexo III-G)
- Golder. 2006a. Technical Memorandum 0614_06 - GPR Test Toro #1
- Golder 2009b Informe Actualización Información Geoforma Estrecho B, 079 215 5109-2.5-IT 004 (Anexo Q)
- Golder 2009d Balance de Masa, verano de 2006, , 079 215 5019-IT001, 22 de enero de 2009 (incluye Technical Memorandum 05-1419-018-5600 - 2005/2006 Pascua-Lama Field Summary) (Anexo O) – incluyendo:



- Golder. 2005d. Memorandum Técnico 003. Relevamiento de cuerpos de hielo descubierto en la cuenca del río Huasco-Algodones 28 Oct 2005
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criósfera. Proyecto Pascua-Lama. (Anexo III-A. Adenda 2. EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama).
- CEAZA 2008a Evolución de la superficie de 20 glaciares en la zona y al Sur de Pascua-Lama, entre 1955 y 2007. (Anexo G)
- CEAZA 2008b. Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, 2004. (Anexo F)
- CEAZA 2008e. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2007-08 (Anexo K)
- IRD, 2008 (Institut de recherche pour le développement), IRD Field Report on Pascua-Lama, 08/12/2008
- CMN 2009c. Programa de monitoreo de glaciares y glaciaretos a través de imágenes satelitales de alta resolución. (Anexo R)

5.2.2 Metodología

El cálculo de los volúmenes de cada cuerpo de hielo se obtuvo a partir de la determinación de la superficie y el espesor de cada uno. Distintos estudios han realizado las estimaciones de las dimensiones de los cuerpos de hielo por los siguientes métodos:

- Mediante los datos de Landsat 2001 y el método Marangunic/Muller (Golder 2005d y Milana 2005);
- Determinación de el espesor de los glaciares por perfiles de penetración con radar (GPR) en Esperanza, Toro #1, Toro #2 y Guanaco en los años 2001, 2003, 2004, 2005 y 2006 (Golder 2005g y Golder 2009d);
- Mediante la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas, GPR, topografía y perforación (Golder 2005g).

5.2.2.1 GPR (Ground-penetrating radar)

Se considera que el GPR (Ground-penetrating radar) es el método más apropiado para investigar el espesor de los glaciares. El GPR es un método geofísico no-invasivo (no requiere de excavaciones o algún otro tipo de intervención destructiva) que utiliza pulsos de radar para obtener imágenes del subsuelo. Una antena transmisora irradia ondas electromagnéticas mediante pulsos cortos de alta frecuencia en el suelo. Cuando la onda golpea un objeto enterrado o una frontera con distinta constante dieléctrica, la antena receptora registra la variación en la señal de la onda reflejada que retorna. La Figura 5-4 muestra los técnicos trabajando en terreno con equipo GPR.



El levantamiento GPR se aplica en líneas trazadas a lo largo de la superficie, por lo que se necesita de precisión en el posicionamiento y en los perfiles verticales de estas líneas. Para los levantamientos GPR, se configura el sistema PulseEkko con los siguientes parámetros (Golder 2005g):

- Antenas de 100 MHz con un espaciamiento de 1 m;
- Levantamiento operado en el modo de antena TE;
- Una ventana total de tiempo de 500 a 3000 ms;
- Un paso de medición de 0.25 a 0.8 m;
- Voltaje del pulsador de 1000 Volts; y
- El número de estacas = 32 a 256 a lo largo de la línea de GPR para su posicionamiento.

Adicionalmente, cabe señalar que en el estudio de Golder 2006a se muestra que la presencia del detritus dentro y en la cabecera del hielo no afectan los resultados del GPR. Esta conclusión se alcanzó mediante la comparación entre los resultados GPR y los resultados de las investigaciones intrusivas.

Con el fin de realizar una comparación entre los resultados de diferentes años, algunos de los perfiles realizados durante el 2005 se sobrepusieron sobre los perfiles obtenidos en los levantamientos de años anteriores. Los perfiles de radar restantes se posicionaron en otras áreas de los glaciares para mejorar las estimaciones del volumen de glaciar mediante nuevos perfiles de profundidad. Se ha utilizado el GPR para mejorar las mediciones puntuales en estacas, esencialmente extendiendo las mediciones de los espesores de la nieve acumulada en dos dimensiones a lo largo del perfil GPR.



Figura 5-4: (a) Línea de GPR en Toro 2. Marzo 2003. (b) Primer plano de las antenas GPR



Fuente: Registros CMN

Las secciones GPR son similares a un perfil geológico y muestran la distancia horizontal de cada línea en metros, y la elevación en metros sobre el nivel del mar en la escala vertical. El método GPR proporciona un conjunto de figuras, en las que la base del glaciar se representa como una línea segmentada, y donde es posible identificar la capa de nieve. Cabe mencionar que los espesores de glaciar presentados en este informe indican profundidades verticales de hielo, y no el espesor de hielo perpendicular al terreno.

Para el cálculo de los volúmenes se puede utilizar los perímetros de cada glaciar, a partir de la imagen Landsat 2001, y las profundidades de hielo obtenidas con los perfiles GPR (Golder 2005g). Se debe distinguir en los perfiles GPR entre los espesores totales de nieve y los espesores de hielo que son los usados en el cálculo del volumen de las criofomas. Este procedimiento permite mejorar las estimaciones de volumen en la medida que se tengan suficientes perfiles de GPR. Por separado se analizan las variaciones anuales de balances de masa.

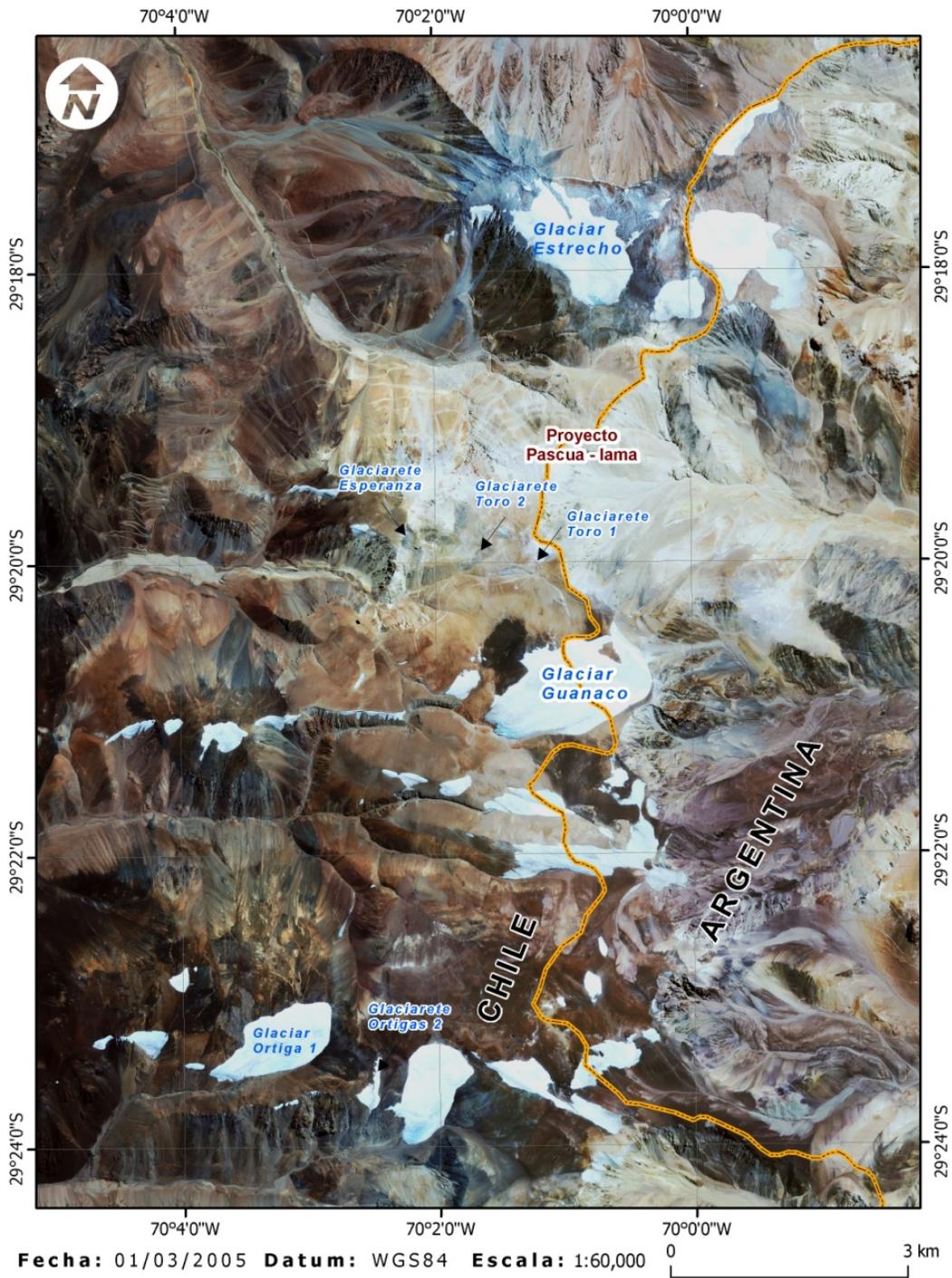
5.2.2 Interpretación y comparación de datos satelitales (Ikonos)

Adicionalmente, se puede realizar una evaluación de la evolución de los glaciares detectando cambios en su superficie mediante interpretación y comparación de datos satelitales (Ikonos) para distintos años (CEAZA 2008a), ejemplos de ello se muestran en la Figura 5-5 a la Figura 5-7. Este método se describe con mayor detalle en la sección 6.1, donde se explica la forma en que fue estimada la superficie de cada glaciar de la zona local de este estudio como parte del balance de masa realizado, y su evolución desde el año 1955 hasta el presente (CEAZA 2008e).



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 5-5: Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 1 de marzo de 2005, en el área del Proyecto Pascua-Lama.

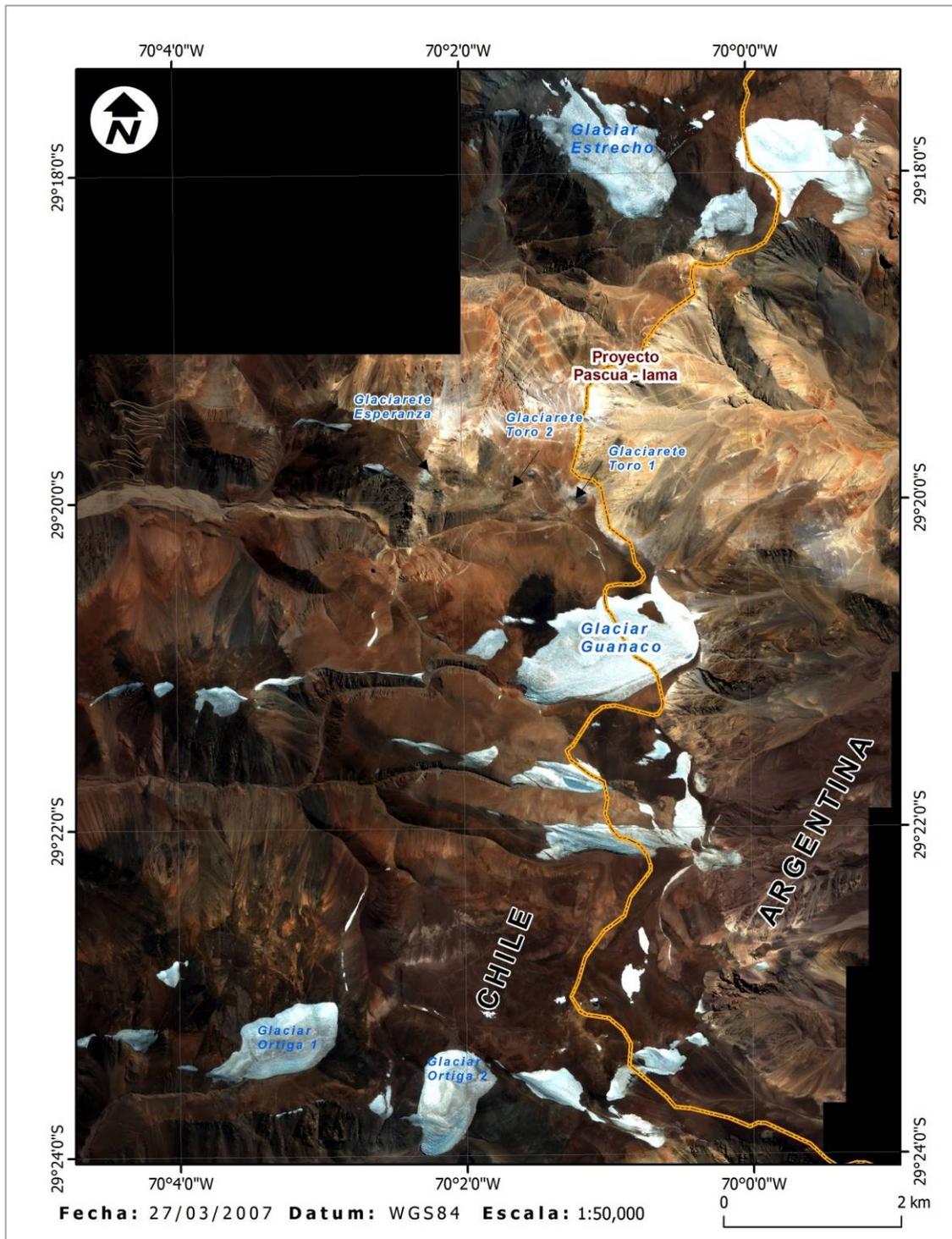


Fuente: CMN 2009c



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 5-6: Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 27 de marzo del año 2007, en el área del Proyecto Pascua-Lama.

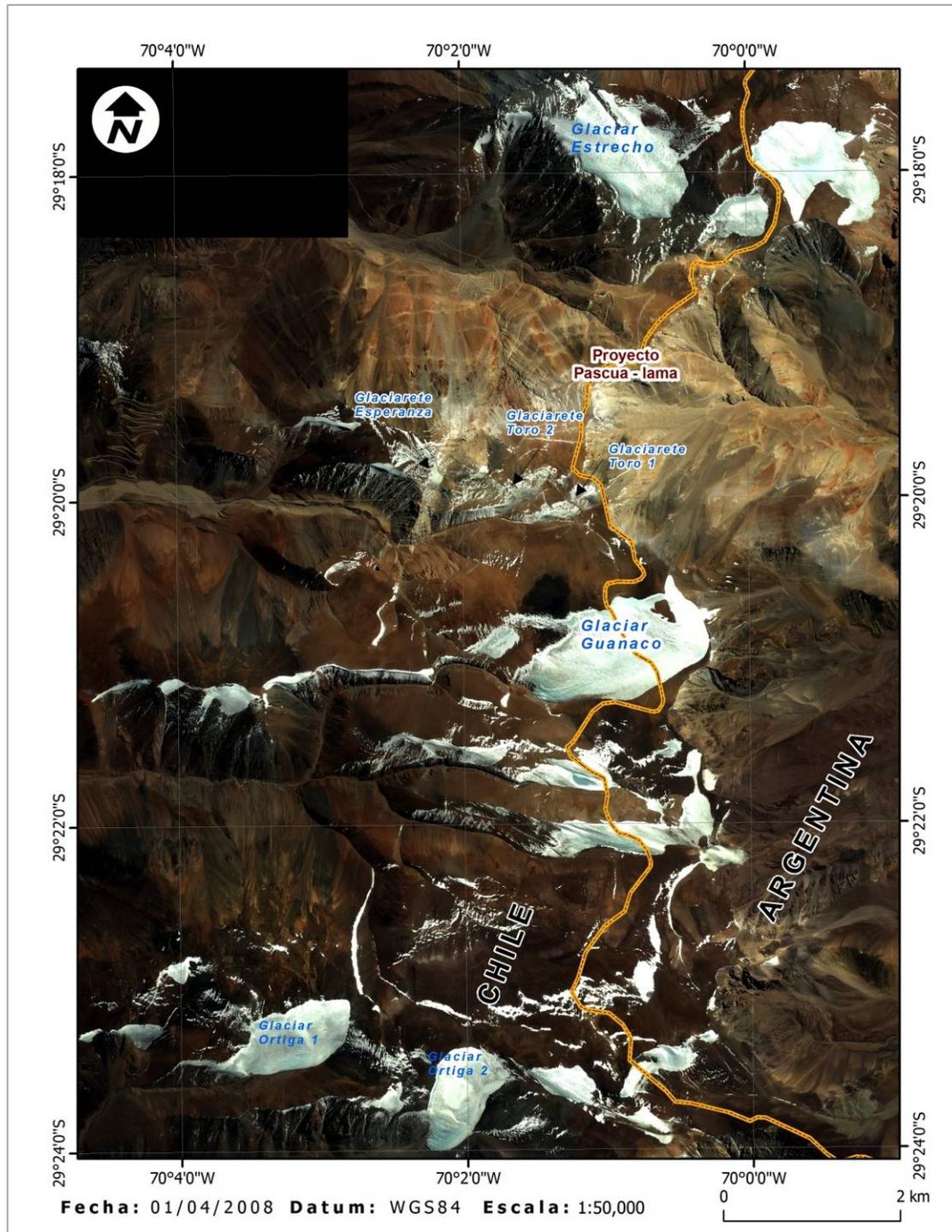


Fuente: CMN 2009c



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 5-7: Imagen proveniente del satélite de alta resolución IKONOS (resolución de 1 metro) tomada el 1 de abril del año 2008, en el área del Proyecto Pascua-Lama.



Fuente: CMN 2009c

Octubre de 2009

N° Informe: 079 215 5019-3.0-IT 005



5.2.2.3 Perforación de testigos de hielo

En adición al GPR e interpretación de datos satelitales, en diciembre 2008 CMN continuó con el trabajo de terreno realizando una perforación en el cuerpo del hielo del glaciar Guanaco efectuado por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) (IRD 2008). Los objetivos del trabajo realizado por IRD incluyeron:

- 1) Perforar un testigo de hielo hasta el fondo del glaciar Guanaco, en una línea GPR, con el objetivo de confirmar la medición de profundidad del GPR;
- 2) Medir el perfil de temperatura en el glaciar; y
- 3) Evaluar la posible existencia de agua dentro del glaciar.

En la perforación del testigo se utilizó el sistema de perforación de testigos de hielo FELICS (Ginot et al., 2002), el cual fue especialmente desarrollado para campañas de terreno de gran altura. Este sistema fue utilizado anteriormente por el IRD y sus socios en Cerro Tapado (5.536 m, Norte Chico, Chile), San Valentín (3.700 m, Patagonia, Chile), Illimani (6.300 m, Perú) y Chimborazo (6200 m, Ecuador). El sistema permite la extracción de firn (neviza) y testigos de hielo a partir de glaciares fríos y limpios. El trabajo de terreno efectivo fue llevado a cabo entre el 9 y 20 de noviembre 2008. La Figura 5-8 muestra fotografías de la perforación del testigo.

Figura 5-8: Perforación de testigo de hielo en el glaciar Guanaco



Fuente: IRD 2008



La elección del lugar de perforación tuvo que satisfacer 3 requerimientos: el estar localizado en una línea GPR, coincidir con el mayor espesor del glaciar y ubicarse donde fuera posible preparar una superficie horizontal en la que todo el equipamiento se pudiera transportar e instalar. Todas las secciones de núcleos de 70 cm de longitud fueron registradas y luego empacadas en tubos de PE y cajas aisladas (IRD 2008). Las cajas fueron guardadas en una zanja en la nieve cercana al camino, a la espera del camión frigorífico que las transportaría al aeropuerto de Santiago y luego al laboratorio en Francia (LGGE, Grenoble). Se colocaron medidores de temperatura en las cajas de muestras hasta su llegada y almacenamiento en Grenoble.

5.2.3 Resultados

5.2.3.1 Perfiles GPR

Las investigaciones GPR, realizadas entre 2002 y 2006 permitieron caracterizar perfiles de los glaciares y glaciaretos en diferentes secciones de los cuerpos de hielo.

La evaluación de la exactitud de las mediciones de GPR (Golder 2006a) (Tabla 5-3) muestra una buena correspondencia entre los espesores registrados mediante perforación y la registrada mediante GPR, puesto que las diferencias se encuentran en un rango de entre 0 a 0,4 m.

Tabla 5-3: Comparación de espesores de Toro 1 por medio de GPR y sondeos.

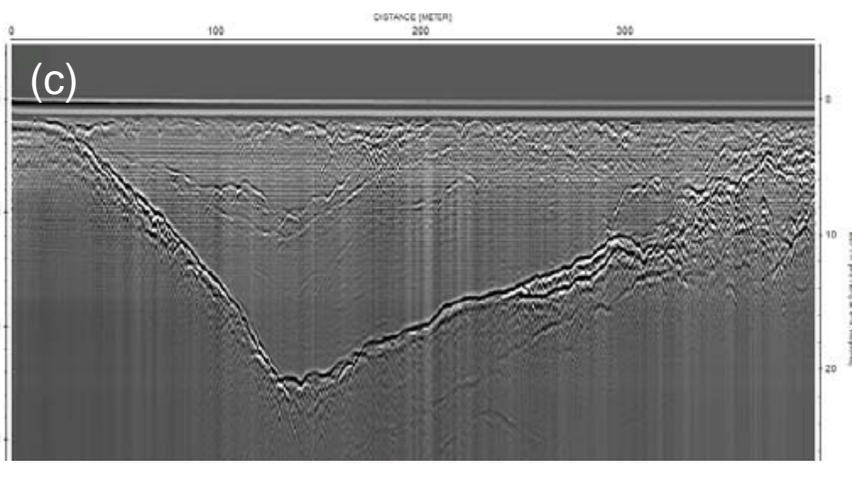
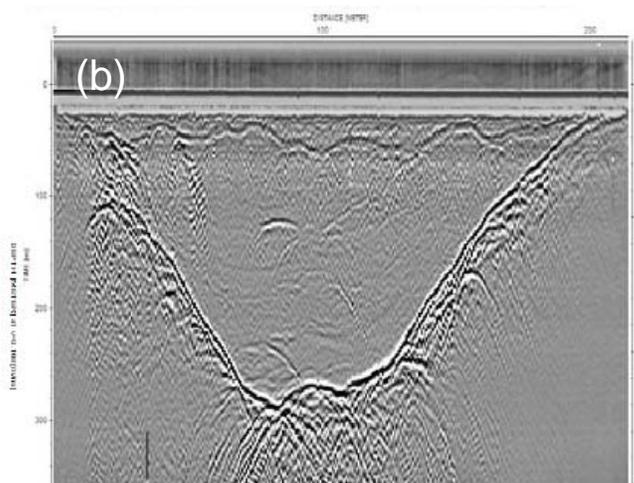
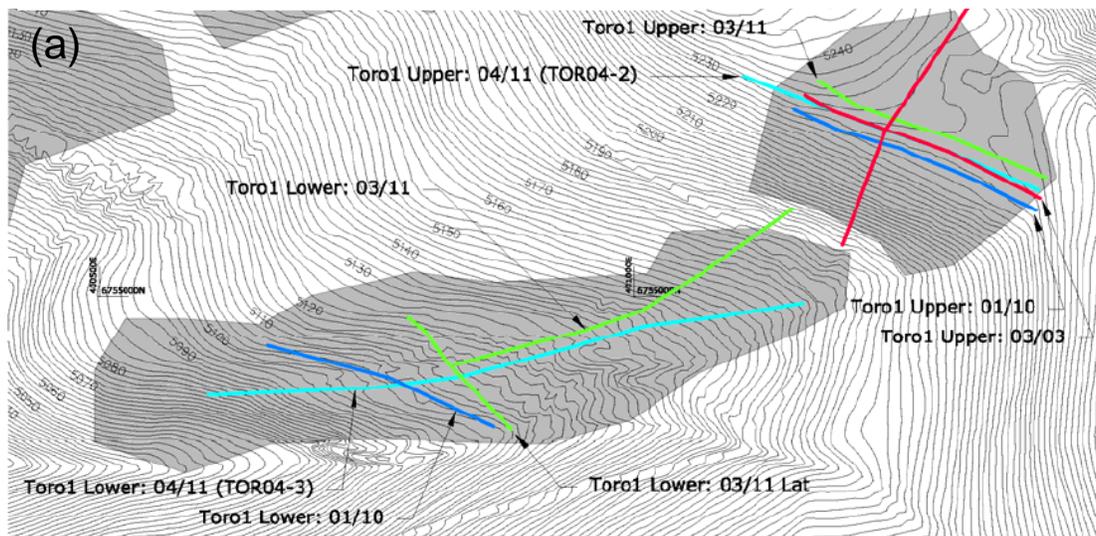
Etapa de investigación	28 m	38 m	42 m
Perforación de sondeos (m)	2,2	4	5
GPR (m)	3	4,8	5,7
Cambio de nivel superficial (m)	0,6-0,9	0,6-0,9	0,6-0,9
Diferencia entre la perforación y el GPR (m)	0,05	0,05	0,05

Fuente: Golder 2006a

La Figura 5-9 a la Figura 5-12 muestran ejemplos correspondiente a las investigaciones GPR en los glaciares en estudio. De cada una de estas secciones se obtuvo un registro de la profundidad del basamento rocoso, con una precisión estimada del 6%.



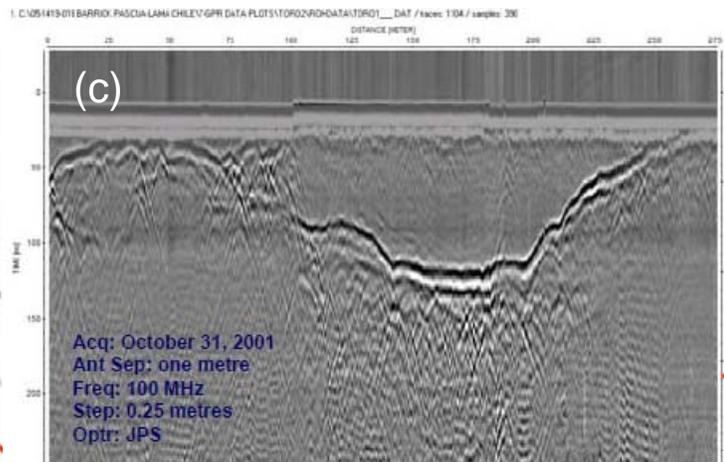
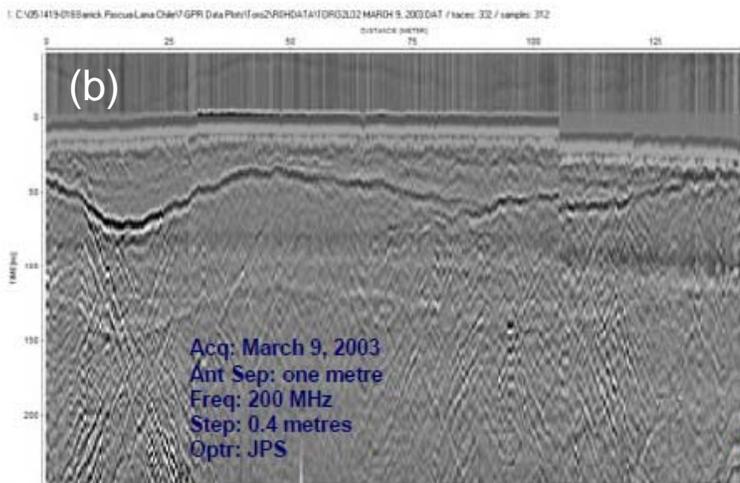
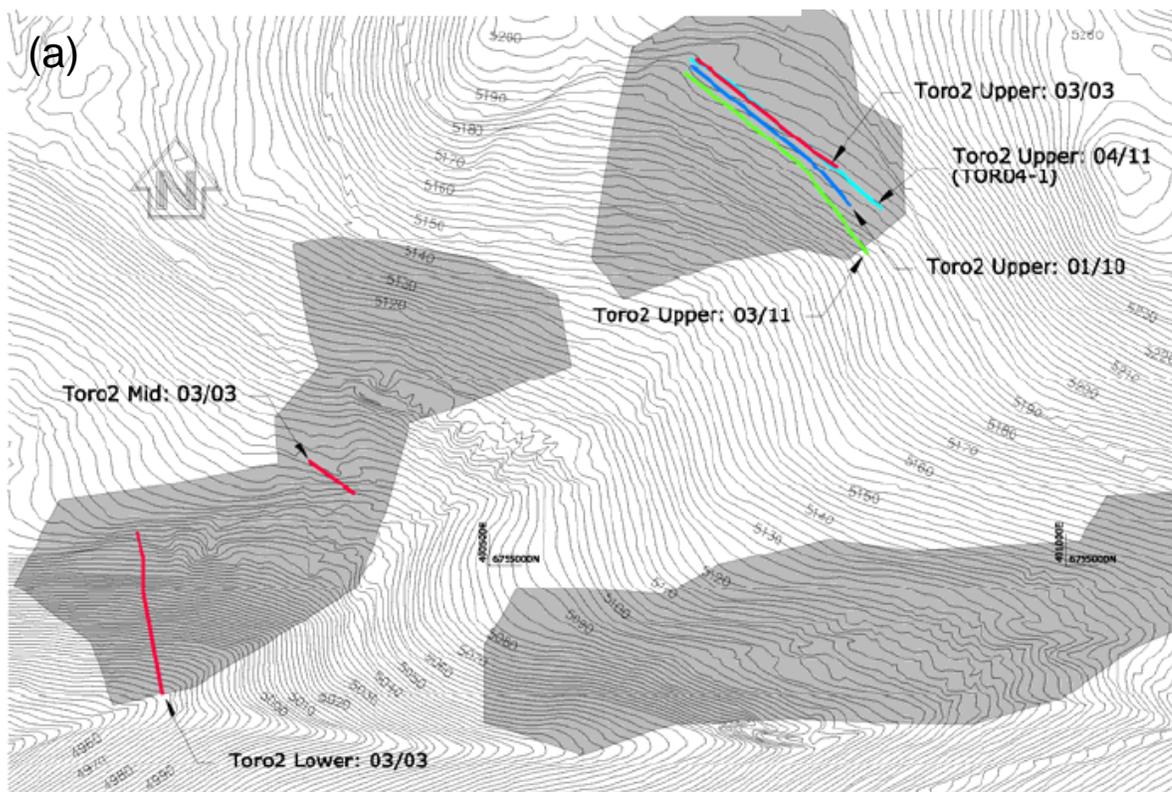
Figura 5-9: (a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Toro 1, (b) Resultados de Toro 1 lower 03/11 Lat, (c) Resultados de Toro 1 lower 04/11 (TORO4-3)



Fuente: Milana 2005



Figura 5-10: (a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Toro 2, (b) Resultados de Toro 2 lower 03/03, (c) Resultados de Toro 2 upper 01/10

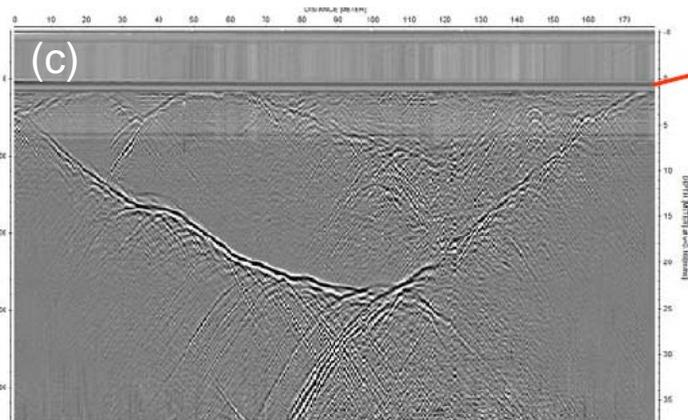
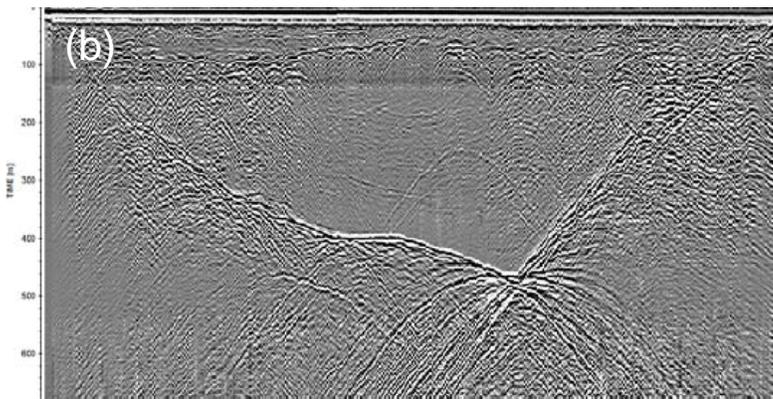
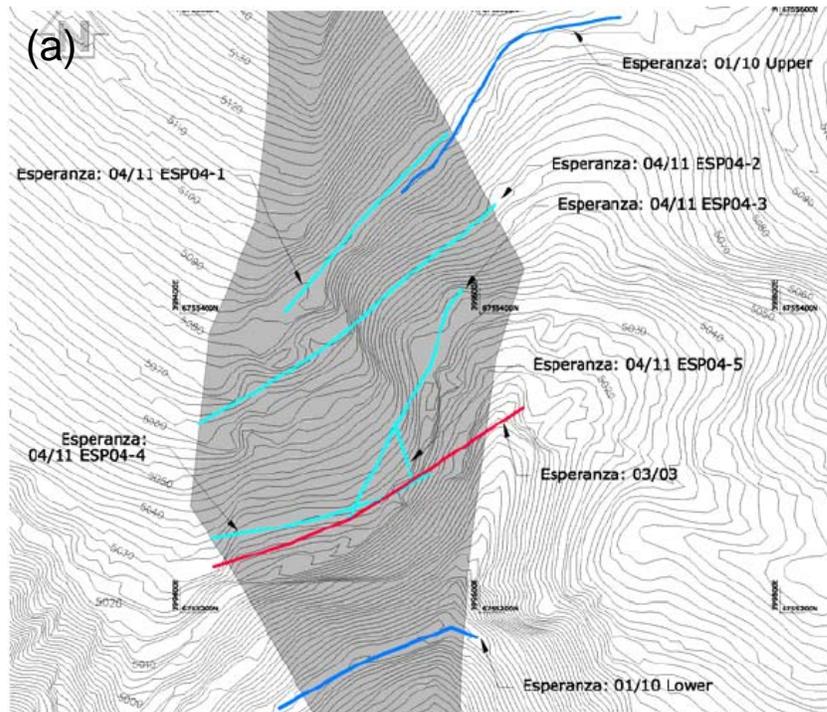


Fuente: Milana 2005



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 5-11: (a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Esperanza, (b) Resultados de Esperanza 03/03, (c) Resultados de Esperanza 04/11 ESP04-4

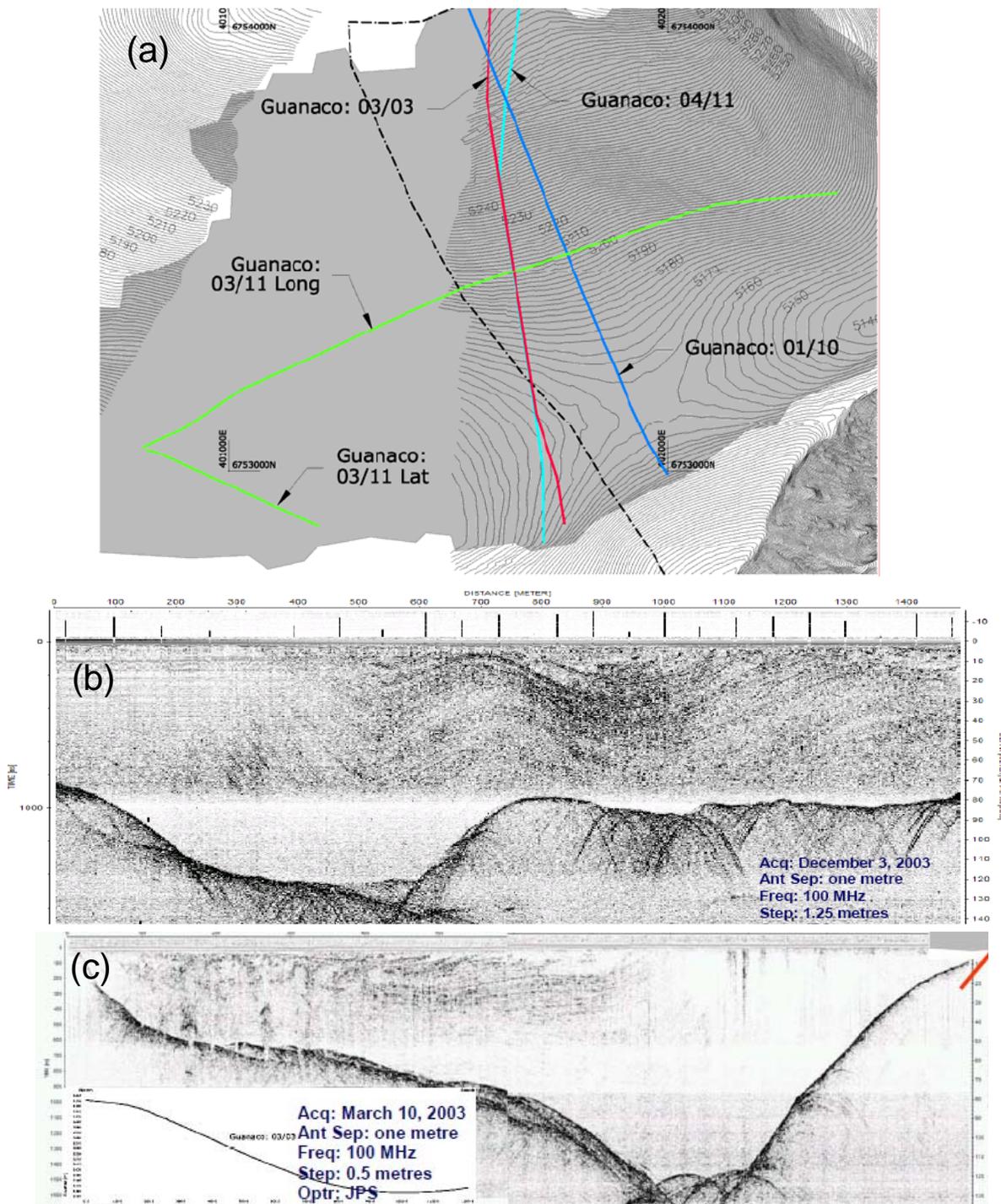


C:\05\419-018\BARRIO_PASCUA-LAMA-04\GPR-DATA\PL01\ESPERANZA\REF\DW\PRO\DATA\ESP04-4.DAT / traces: 303 / samples: 1502

Fuente: Milana 2005



Figura 5-12: (a) Investigaciones con GPR realizadas sobre el glaciar Guanaco, (b) Resultados de Guanaco 03/11 Long, (c) Resultados de Guanaco 03/03



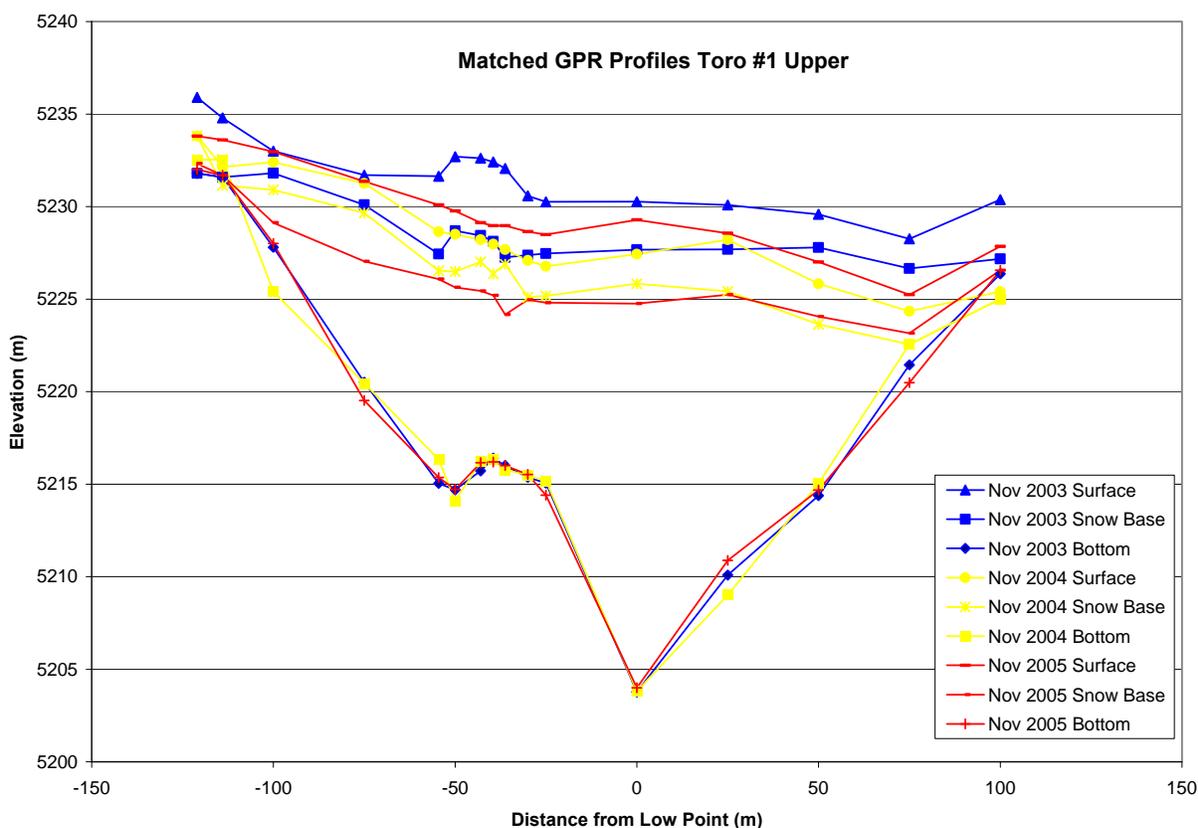
Fuente: Milana 2005



Se realizaron perfiles de GPR adicionales en los años 2004, 2005 y 2006 (Golder 2009d) sobre Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco y Estrecho.

La Figura 5-13 presenta una comparación de los perfiles de GPR de distintos años en el Toro 1. Esta figura compara la información de GPR de 2003 (Figura 5-9) y los perfiles de 2004 y 2005.

Figura 5-13: Comparación de perfiles GPR –Toro 1, perfil superior



Fuente: Golder 2009d

5.2.3.2 Perforación por IRD

Posterior al levantamiento de secciones GPR, la perforación efectuada por IRD indica que a una profundidad de 113 m, se alcanzó la base del Glaciar Guanaco (IRD 2008).

5.2.3.3 Áreas y volúmenes de glaciares y glaciaretas

A partir de la interpretación de la imagen Landsat 2001 y de los datos GPR obtenidos en 2004, se realizaron estimaciones de área de los glaciares entre los años 2002 y 2006.



En la Tabla 5-4 se muestran las áreas relacionadas a las estimaciones actuales de áreas (CEAZA 2008e) estimadas por la interpretación de los datos satelitales y volúmenes estimados por los datos GPR más datos superficiales de Landsat (Golder 2003b) de los cuerpos de hielo Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco y Estrecho.

Adicionalmente, se presentan en la Tabla 5-5 las superficies de los glaciares mencionados y su porcentaje relativo al total de la superficie glaciada en la cuenca del Huasco y sus subcuencas altas. La

Tabla 5-6 muestra las áreas de las subcuencas utilizadas.

Complementariamente, en la sección 6.1 se presenta la evolución en el tiempo (desde 1955 a 2007) de las áreas de los glaciares y glaciaretos.

Tabla 5-4: Áreas y volúmenes estimados de los glaciares y glaciaretos en el área del Proyecto

Crioforma	Área en hectáreas (2003)*	Área en hectáreas (2008) +	Profundidad Máxima Estimada (m)*	Volumen Total Estimado (10 ⁶ m3) (2003)
Toro 1	10,4	6,5 (2,3 ¹)	28	0,8
Toro 2	10,6	8,2 (1,3 ¹)	11	0,3
Esperanza	4,4	4,0	36	0,5
Guanaco	218,9	180,8 ²	113**	102,3
Estrecho	n/d	130,5	n/d	n/d

Fuente: +CEAZA 2008e *Golder 2003b **IRD 2008

1 Indica valores para la parte superior del glaciarete

2 Incluye los dos lados del glaciar Guanaco (Chileno y Argentino)

n/d = no disponible

Tabla 5-5: Áreas de glaciares en la zona del Proyecto y su porcentaje relativo a las cuencas

Nombre Glaciar o Glaciarete	Superficie (2008)	% relativo a las áreas de las cuencas					
		Área Subcuenca* El Tránsito		Área Subcuenca* Del Carmen		Área Cuenca alta* Huasco	
		Ha	glaciada	total	glaciada	total	glaciada
Estrecho	130,5 ⁺	9,35%	0,03%			5,68%	0,02%
Estrecho B (glaciar de roca) ^{Nota 1}	3,04#	0,22%	<0,01%			0,13%	<0,01%
Toro 1	6,5 ⁺			0,72%	<0,01%	0,28%	<0,01%
Toro 2	8,2 ⁺			0,91%	<0,01%	0,36%	<0,01%
Esperanza	4,0 ⁺			0,51%	<0,01%	0,20%	<0,01%
Guanaco ^{Nota 2}	180,8 ⁺			20,02%	0,06%	7,87%	0,03%
Totales	333,64	9,57%	0,03%	22,16%	0,07%	14,52%	0,05%

Nota 1: Se incluye en esta tabla el glaciar de roca Estrecho B

Nota 2: Incluye los dos lados del glaciar Guanaco (chileno y argentino)

Fuente: +CEAZA 2008e; *CEAZA 2008b; #GOLDER 2009b



Tabla 5-6: Áreas de subcuencas

Cuenca	Area (ha)	
	Glaciada ^{NOTA1}	Total
Subcuenca El Tránsito	1395	409175
Subcuenca Del Carmen	903	303815
Cuenca alta Huasco (aguas arriba de Huasco en Algodones)	2298	712990

Nota 1: Las áreas glaciadas incluyen glaciares descubiertos, cubiertos y de roca
Fuente: CEAZA 2008b

5.3 Temperatura del hielo

La temperatura de la crioforma, especialmente en su base, es un factor fundamental a considerar para el estudio de las tasas de fusión, erosión y depositación. La variable principal objeto de las observaciones es la temperatura del hielo, medida en grados Celsius, a diferentes profundidades.

Existen las siguientes definiciones para la clasificación de glaciares con respecto a su temperatura (Cogley 2005):

- **Glaciar Polar o Frío:** son aquellos en los que la temperatura T está por debajo de la temperatura de fusión (T_f), es decir a 0° , excepto posiblemente en una capa superficial de hasta 10-15m de espesor durante el verano.
- **Glaciar Politermal:** tiene, además de las fluctuaciones estacionales de la capa superficial, una capa basal en donde $T=T_f$ y una capa intermedia en la cual $T < T_f$.
- **Glaciar Templado:** son aquellos en que todo el cuerpo de hielo se encuentra a la temperatura de fusión, excepto en la capa superficial durante el invierno.

Los glaciares fríos son glaciares de base seca, mientras que los glaciares politermales y templados son, al menos localmente, glaciares de base húmeda.

5.3.1 Trabajos realizados

- International Permafrost Association (IPA) 2004, Handbook on Periglacial Fields Methods
- Milana. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama (Adenda 2 al EIA, Anexo III-A)
- Golder. 2009a. Monitoreo de Temperatura de Glaciares y Glaciaretos en el Área Pascua-Lama (Anexo C)
- IRD, 2008 (Institut de recherche pour le développement), IRD Field Report on Pascua-Lama, 08/12/2008
- CMN 2008e. Plan de Monitoreo de Glaciares. Rev.3

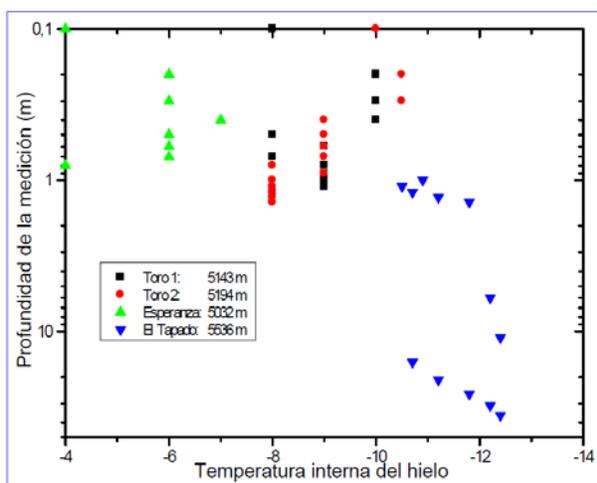


5.3.2 Metodología

5.3.2.1 Extrapolación usando mediciones existentes

En un principio, dada la escasez de datos de terreno en el área del Proyecto, se recurrió a registros en la literatura de crioformas similares, con la finalidad de extrapolar las mediciones existentes de temperatura (en profundidades de hasta 1,4 m) a una mayor profundidad. De acuerdo a lo anterior, se comparó el Glaciar Tapado (ubicado en la IV Región, a una altitud de 5.536 m) con los resultados obtenidos en las mediciones realizadas a escasa profundidad en Toro 1, Toro 2 y Esperanza. En la Figura 5-14, se presentan los resultados de tal comparación (Milana 2005).

Figura 5-14: Gráfica comparativa entre temperaturas de hielo con profundidades del hielo, Glaciar Tapado.



Fuente: Milana 2005

5.3.2.2 Instalación de sensores de temperatura

Posteriormente, entre abril y mayo de 2006 se instalaron sensores de temperatura (termistores) en los glaciares Toro 1, Toro 2 y Esperanza, y en los glaciares Guanaco y Estrecho.

La metodología empleada es la establecida en IPA 2004. Este procedimiento estándar regula el protocolo de registro de datos en condiciones como las que se presentan en este Proyecto.

Las especificaciones técnicas de los sistemas de monitoreo de temperatura son las siguientes:

- 7 Data Logger Industrial con conexión USB. Ruggedized HOBO ® U12 4 External Channel Outdoor. Capacidad de memoria: 43,000. Rango de operación: -20°C a 70°C. Se muestra el datalogger en Figura 17a; y
- 28 Termistores (TMCx-HD) conectados a canales separados, de acuerdo con especificaciones técnicas, sujetos a cables de longitudes 1.83 m, 6.10 m y 15.24 m.



La instrumentación utilizada en cada equipo de medición de temperatura de hielo se compone de cuatro termistores conectados a un sistema de grabación de datos (datalogger). La serie de termistores se inserta en una perforación realizada en cada uno de los siete glaciares (o glaciaretes), según se detalla en la Tabla 5-7 y en la Figura 5-15. En cada lugar el equipo se congela conjuntamente con la masa del glaciar, mientras que el datalogger permanece en la superficie registrando datos cada hora. Las profundidades a las que están ubicados los cuatro termistores son, por lo general, 0.1, 2, 5 y 14 m. En aquellas ocasiones en que los termistores quedaron al aire se descartaron los datos medidos. La Figura 5-16 muestra ejemplos de las instalaciones de los termistores.

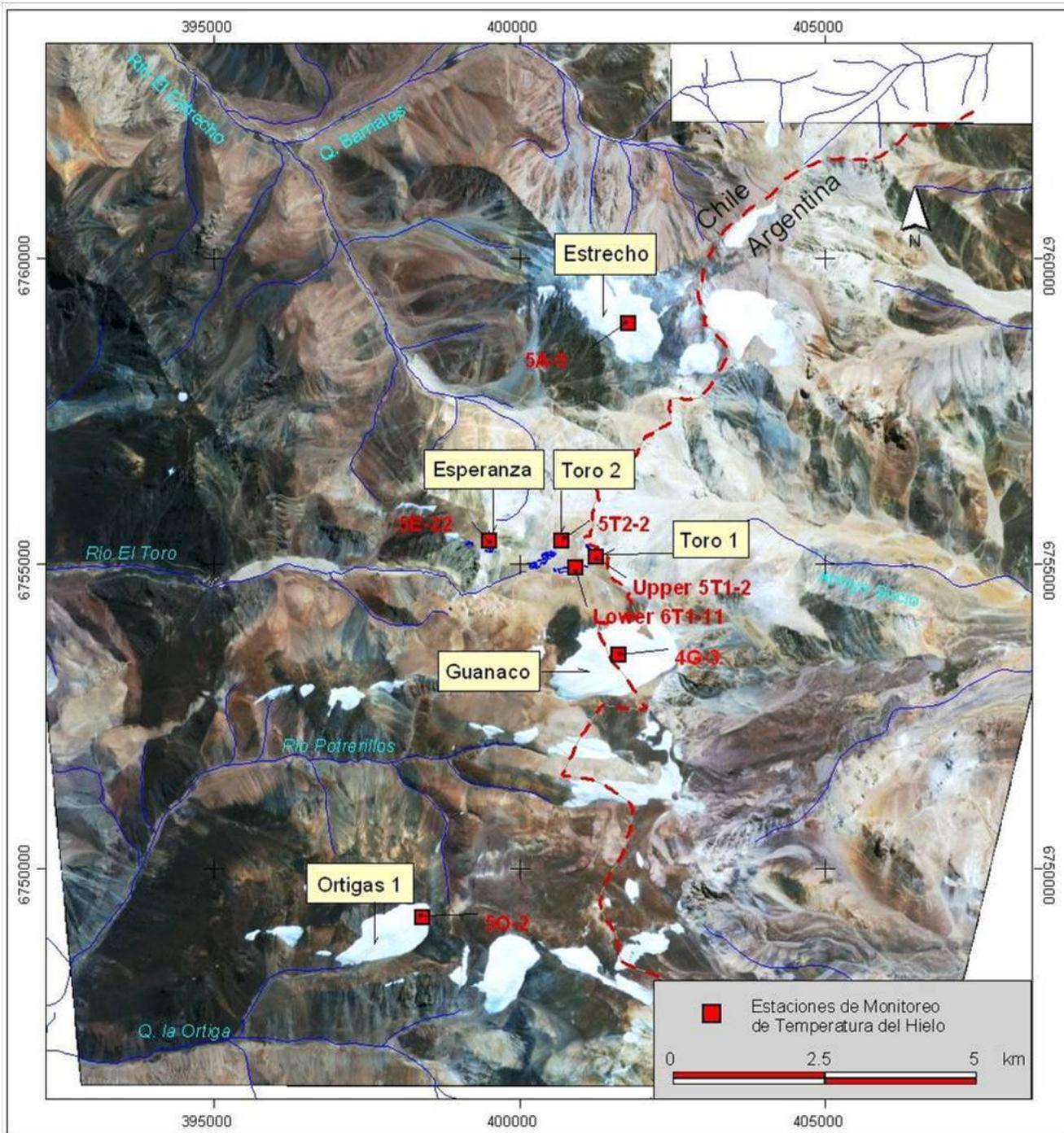
Tabla 5-7: Ubicación de los cables termistores

Punto	Glaciar/ Glaciarete	Código (estaca de ablación)	Norte (UTM WGS84)	Este (UTM WGS84)	Cota (m.s.n.m.)
1	Toro 1	Upper 5T1-2	401.072	6.754.771	5.226
2	Toro 1	Lower 6T1-11	400.736	6.754.598	5.124
3	Toro 2	5T2-2	400.508	6.755.039	5.189
4	Esperanza	5E-22	399.308	6.755.034	5.074
5	Guanaco	4G-3	401.455	6.753.159	5.220
6	Estrecho	5A-5	401.671	6.758.491	5.222

Fuente: Golder 2009a



Figura 5-15: Ubicación de estaciones de monitoreo de temperatura del hielo.



Fuente: CMN 2008e



Figura 5-16: Instalación de termistores



Fuente: CMN 2008e

Los dataloggers fueron equipados con baterías nuevas y desecantes antes de su instalación en el terreno en abril de 2006. La programación de los dataloggers se realizó con el programa Hoboware por una computadora portátil y fueron ajustados a una captura de datos cada hora. La perforación fue realizada mediante un sistema de perforación de vapor (Figura 5-22) marca Heucke, propiedad de CMN. Cada equipo se ata a una tubería de PVC (de 1,5”), que le proporciona soporte estructural a lo largo del orificio.



La descarga de datos de los dataloggers se llevó a cabo siempre que las condiciones lo permitieron. Estas visitas a los puntos de monitoreo permiten la verificación del funcionamiento y daños en el equipo. Durante cada visita, si fue necesario, se realizaron operaciones de mantenimiento como el reemplazo de baterías, verificación del funcionamiento adecuado del equipo, etc. Cabe señalar que la memoria interna de estos aparatos permite almacenar continuamente los registros de temperatura por todo un año.

En el glaciar Guanaco, aprovechando la extracción de testigo de hielo (vea sección 5.2), se realizaron unas mediciones de temperatura hasta una profundidad de 113 m. . La perforación en el glaciar fue utilizada para instalar una cadena de termistores cubriendo todo el espesor del glaciar. La cadena tiene 120 m de largo (con 20 m de cable de reserva) y contiene 15 sensores distribuidos entre una profundidad de 2 y 112,5 m (IRD 2008).

Figura 5-17: Cadena de termistores instalada en el orificio del testigo



Fuente: IRD 2008

5.3.3 Resultados

Los equipos instalados siguen funcionando en todos los lugares y el CEAZA mantiene un programa de visitas a terreno para recolectar los datos de los dataloggers. A continuación, a modo de ejemplo, se resumen los resultados obtenidos en el glaciarete Toro 1 y en el glaciar Guanaco.

En relación al glaciarete Toro 1 Lower, se procesaron los registros obtenidos de los termistores instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 5,9 metros de profundidad, en el periodo comprendido entre mayo de 2006 y febrero de 2007. Los resultados se muestran en la Figura 5-18. En términos generales, se pueden observar rangos de variaciones normales para los dos termistores más profundos, entre -5 y -7 °C; mientras que los dos más superficiales muestran mayores variaciones de temperatura, entre -1 y -8 °C, debido a una mayor influencia de la temperatura atmosférica (Golder 2009a).

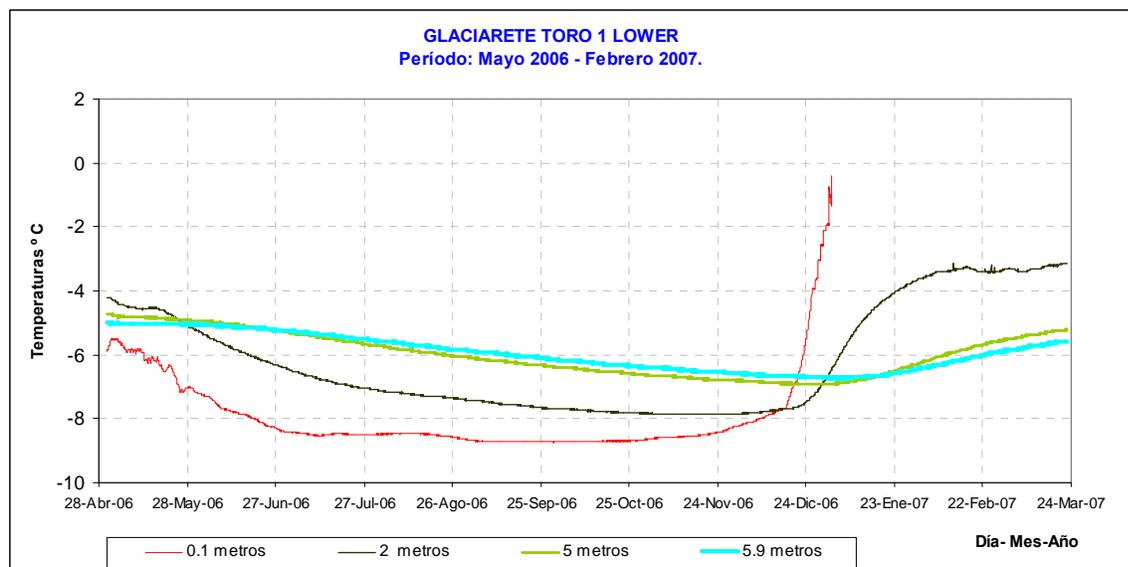
Para el glaciar Guanaco, los termistores se instalaron a 0,1; 2,0; 5,0 y 14,0 metros de profundidad y se obtuvieron registros desde mayo 2006 a mayo 2007. Los resultados se grafican en la Figura 5-19. En general, es posible observar que el termistor más profundo no muestra variaciones significativas de temperatura, alrededor de -7 °C; en tanto que los tres termistores restantes y más superficiales muestran tendencias de variación (ascensos y descensos) similares entre ellos, con registros entre -12 °C y -1 °C, y en concordancia con su relación térmica ambiental en función de su ubicación.

En este mismo glaciar se evaluó la temperatura en función de la profundidad y la temperatura ambiental, a fin de encontrar patrones de comportamiento con la profundidad, tendencias a la estabilización de temperaturas y eventuales gradientes térmicos. Para realizar este análisis se graficó la temperatura promedio mensual y de



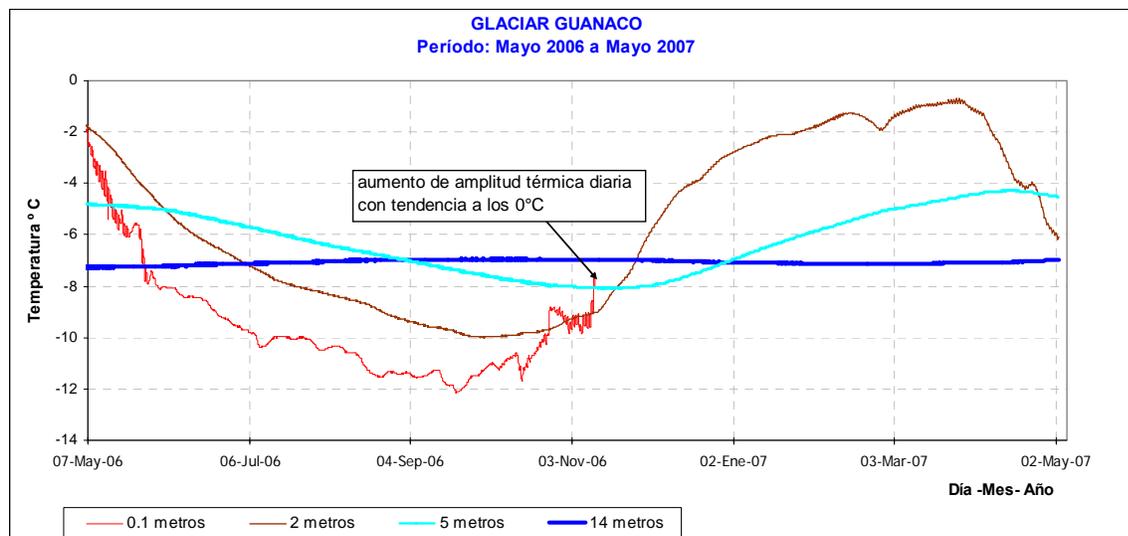
cada estación para las profundidades monitoreadas (ver Figuras 5-20 a y b). La profundidad aproximada de este basamento en el lugar de medición se determinó en base al método GPR y alcanza unos 100 m.

Figura 5-18: Registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciarete Toro 1 lower



Fuente: Golder 2009a

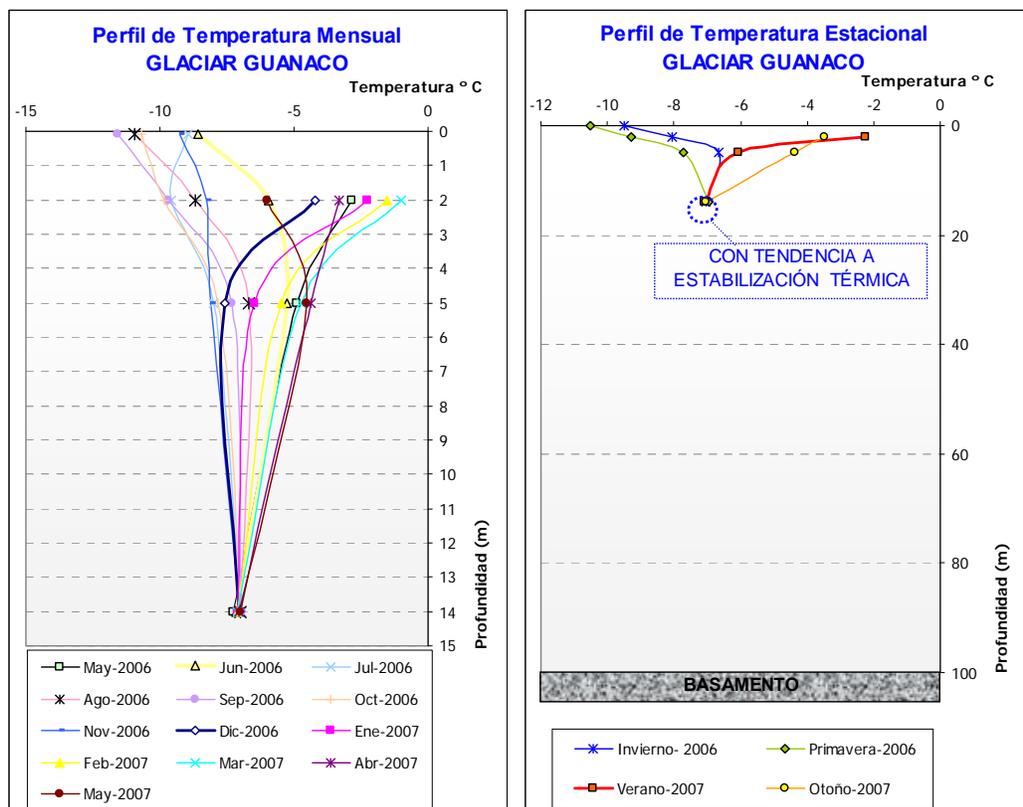
Figura 5-19: Registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciar Guanaco



Fuente: Golder 2009a



Figuras 5-20 a y b: Perfil de temperatura mensual y estacional del glaciar Guanaco



Fuente: Golder 2009a

Las observaciones más relevantes obtenidas para los glaciares y glaciaretos estudiados (glaciares Guanaco, Estrecho y glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Esperanza) son las siguientes (Golder 2009a):

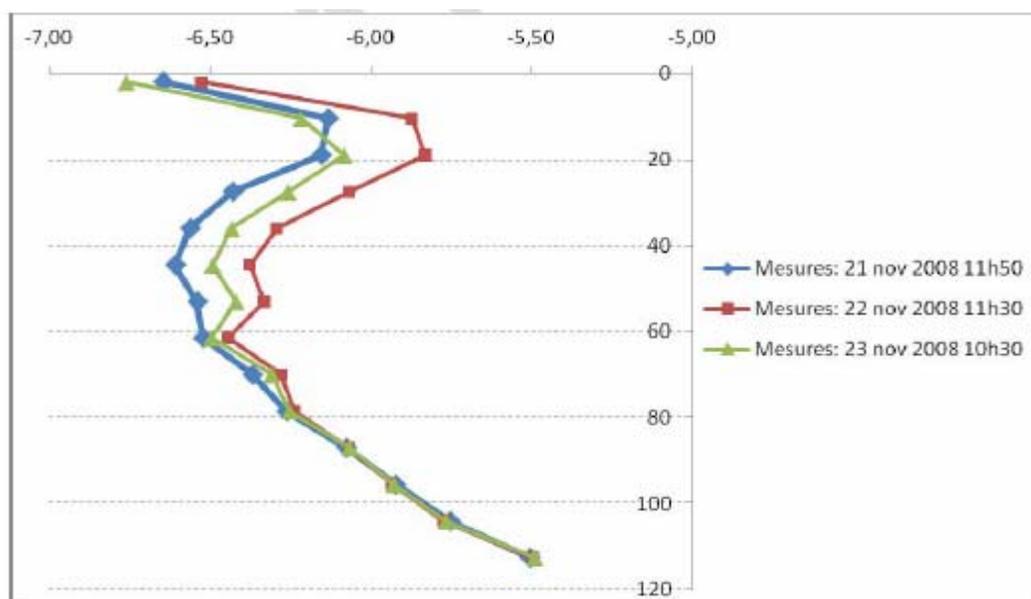
- Para casi la totalidad de los casos analizados, se observa que las temperaturas más bajas se presentan en primavera e invierno, aumentando levemente hacia el otoño y alcanzando el máximo en el verano;
- Las zonas más superficiales de los cuerpos analizados presentan una tendencia a aumentar su temperatura, sobre el punto de fusión, en ciertos periodos de verano. Esta situación correspondería a la interacción entre estas capas superficiales y la atmósfera, cuando se observa un aumento de la temperatura ambiente en verano;
- La tendencia de la temperatura para profundidades mayores a 14 metros tiende a mantenerse estable para todas las estaciones (y muy inferior a la temperatura del punto de congelación). A pesar de esto, no es posible definir con certeza un gradiente térmico que permita extrapolar los datos hacia mayores profundidades, es decir, no es posible, con la información disponible, indicar la temperatura que alcanzaría el hielo en su contacto con el basamento.



- Reuniendo las observaciones realizadas para todos los glaciares y glaciaretos estudiados se deduce que todos los cuerpos de hielo presentan temperaturas inferiores a 0°C, por lo tanto, por definición de esta característica, pueden ser clasificados como Polares o Politermales.

Confirmando lo anterior, los resultados de los registros de temperatura a mayor profundidad en el glaciar Guanaco (ver Figura 5-21) indican que este glaciar es frío en toda su profundidad (< -5° C) (IRD 2008).

Figura 5-21: Perfiles de temperatura, glaciar Guanaco



Fuente. IRD 2008

5.4 Presencia de polvo y detritus en la superficie de los glaciares y estratigrafía del hielo

La presencia de material particulado en la superficie de los cuerpos de hielo puede disminuir el albedo y con ello cambiar el balance de energía y de masa de las criofomas, lo que puede eventualmente afectar la regulación hídrica de la cuenca. De ahí la importancia de este fenómeno.

Los glaciares y glaciaretos en el área del Proyecto se caracterizan por estar sometidos en forma natural a constantes depósitos de polvo sobre su superficie, producto del arrastre del material particulado que transportan los fuertes vientos cordilleranos, desde estratos altamente meteorizados (material fino) hacia la superficie de los cuerpos de hielo. Esta acumulación de polvo con el paso del tiempo forma parte del perfil y el sedimento queda estratificado en el interior de glaciares y glaciaretos. Esta sección presenta también los estudios de la estratigrafía del hielo e información sobre el muestreo de los sólidos en el hielo.



5.4.1 Trabajos realizados

- CMN 2009a Geología y su relación con la depositación natural de polvo y detritos en los cuerpos de hielo, 13 de julio 2009 (Anexo S)
- CMN 2009b. Mediciones de Polvo Sedimentable en las cercanías de los Glaciares y Glaciaretos, Verano 2008 (Anexo L)
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Anexo III-A. Adenda 2. EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama)
- Golder 2005h noviembre 2005, Simulación de Grilla Fina de la Depositación de Polvo debido a las Actividades Mineras Proyecto Pascua-Lama (Adenda 2 Anexo IV-A)
- Golder 2005n, Abril 2005, Viabilidad de Manejo de los Glaciares, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- GOLDER 2005s, noviembre 2005, Plan de Reubicación de Hielo Proyecto Pascua-Lama Versión Final, (Adenda 2 Anexo III-E)
- Golder 2006a, Technical Memorandum 0614_06-GPR Test Toro #1
- CEAZA 2008c. Balance de energía sobre dos –glaciares en la zona de Pascua-Lama. 21 de noviembre 2008 (Anexo D)
- Proust 2008 Antecedentes Sistematizados de Procesos de Evaluación Ambiental del Proyecto Pascua-Lama en Chile, Capítulo 3 - Elementos del Medio Ambiente
- IRD, 2008 (Institut de recherche pour le développement), IRD Field Report on Pascua-Lama, 08/12/2008

5.4.2 Metodología

Desde el año 2006 se ha monitoreado la acumulación de polvo encima de los glaciares, a través de:

- Inspecciones visuales de la cobertura del polvo encima de los glaciares y glaciaretos.
- Evaluación por GPR (técnica usada principalmente para medir la profundidad de hielo) de la profundidad de la cabecera de polvo.
- Instalación de lisómetros, para determinar el impacto a la ablación de las distintas cabeceras de polvo.
- Instalación de los equipos de monitoreo de polvo sedimentable.

En el año 2006 se realizaron trabajos con GPR en el glaciarete Toro 1 (Golder 2006a), los cuales tenían por propósito contrastar los espesores de detritos obtenidos mediante esta metodología con los valores registrados de forma directa mediante sondajes. Para ello se realizó un perfil de GPR en áreas de penitentes hasta alcanzar la base del glaciarete Toro 1. Los estudios se aplicaron sobre sectores del glaciarete cubiertos por detritos. Después de la medición del perfil con el GPR, se realizó una perforación con un taladro de vapor (Figura 5-22) hasta alcanzar la base del glaciarete, con la finalidad de confirmar su profundidad. Estas perforaciones se realizaron en puntos coincidentes con el perfil de GPR.



Figura 5-22: Ejemplo de utilización del taladro de vapor



Fuente: Registros CMN

Por otra parte se realizaron investigaciones sobre los efectos del polvo depositado sobre los cuerpos de hielo, usando lisímetros que se instalaron cerca de Toro 1. En cada uno de ellos se colocaron diferentes cantidades de polvo sobre el hielo/nieve ya presente en los lisímetros. Esto permitió evaluar el impacto de la presencia de detritos en la ablación. Los lisímetros (mostrados en Figura 5-23) se instalaron durante dos periodos de tres días cada uno, en marzo y abril de 2008 (CEAZA 2008c).

Figura 5-23: Lisímetros instalados cerca de Toro 1



Lisímetro 1



Lisímetro 2



Lisímetro 3



Lisímetro 4

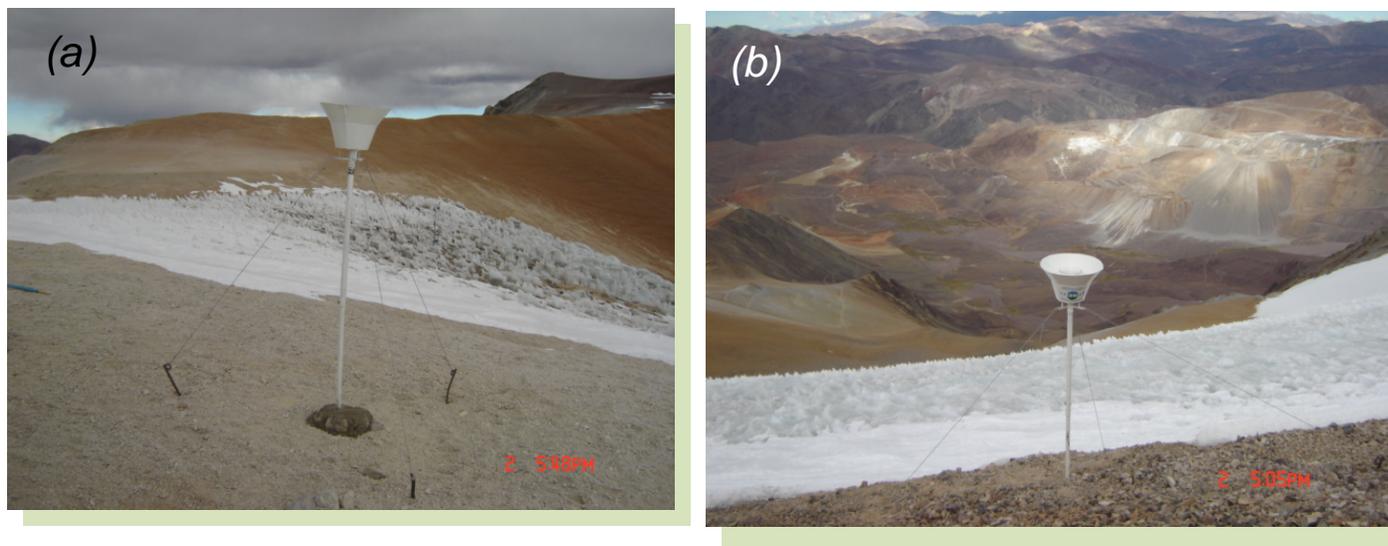
Fuente: CEAZA 2008c

Adicionalmente, en abril de 2008 se instalaron 6 equipos de medición de polvo sedimentado (mostrados en la Figura 5-24), usando la metodología estándar de medición planteada en la norma ASTM 2004. Esta metodología incluye el envío de las muestras al laboratorio para el análisis de su contenido. Las instalaciones se realizaron en abril del 2008 y se retiraron al cabo de 30 días (CMN 2009b)

La ubicación de los equipos se muestra en la Tabla 5-8 y Figura 5-26. Los criterios para la selección de los puntos de medición fueron la cercanía a los cuerpos de hielo, la accesibilidad y la representatividad del lugar considerando la dirección de los vientos (descrita en la sección 4.1.6).



Figura 5-24: Estaciones de monitoreo polvo sedimentado (a) en glaciarete Toro 1, y (b) en glaciar Guanaco



Fuente: CMN 2009b

Este tipo de medición tiene por objetivo medir la tasa de material particulado sedimentado; soluble, insoluble y total, que se expresa en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$.

Tabla 5-8: Ubicación de puntos de monitoreo de material particulado sedimentado

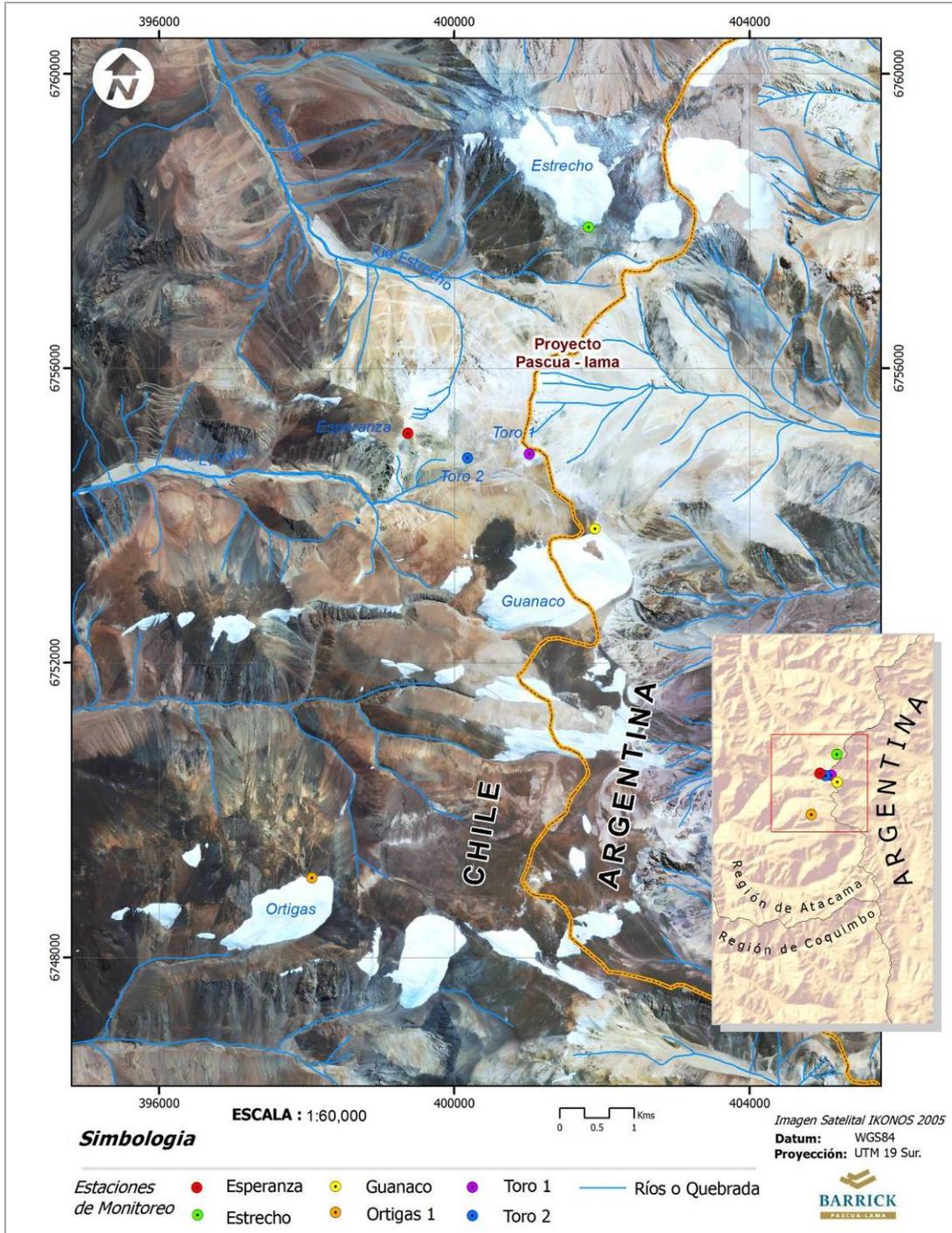
Glaciar - Glaciaretes	Coordenadas		Altitud
	Este	Norte	m.s.n.m
Estrecho	401.820	6.757.916	5.064
Toro 1	401.017	6.754.839	5.244
Toro 2	400.183	6.754.782	5.121
Esperanza	399.375	6.755.114	5.093
Guanaco	401.906	6.753.822	5.337

Fuente: CMN 2009b



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

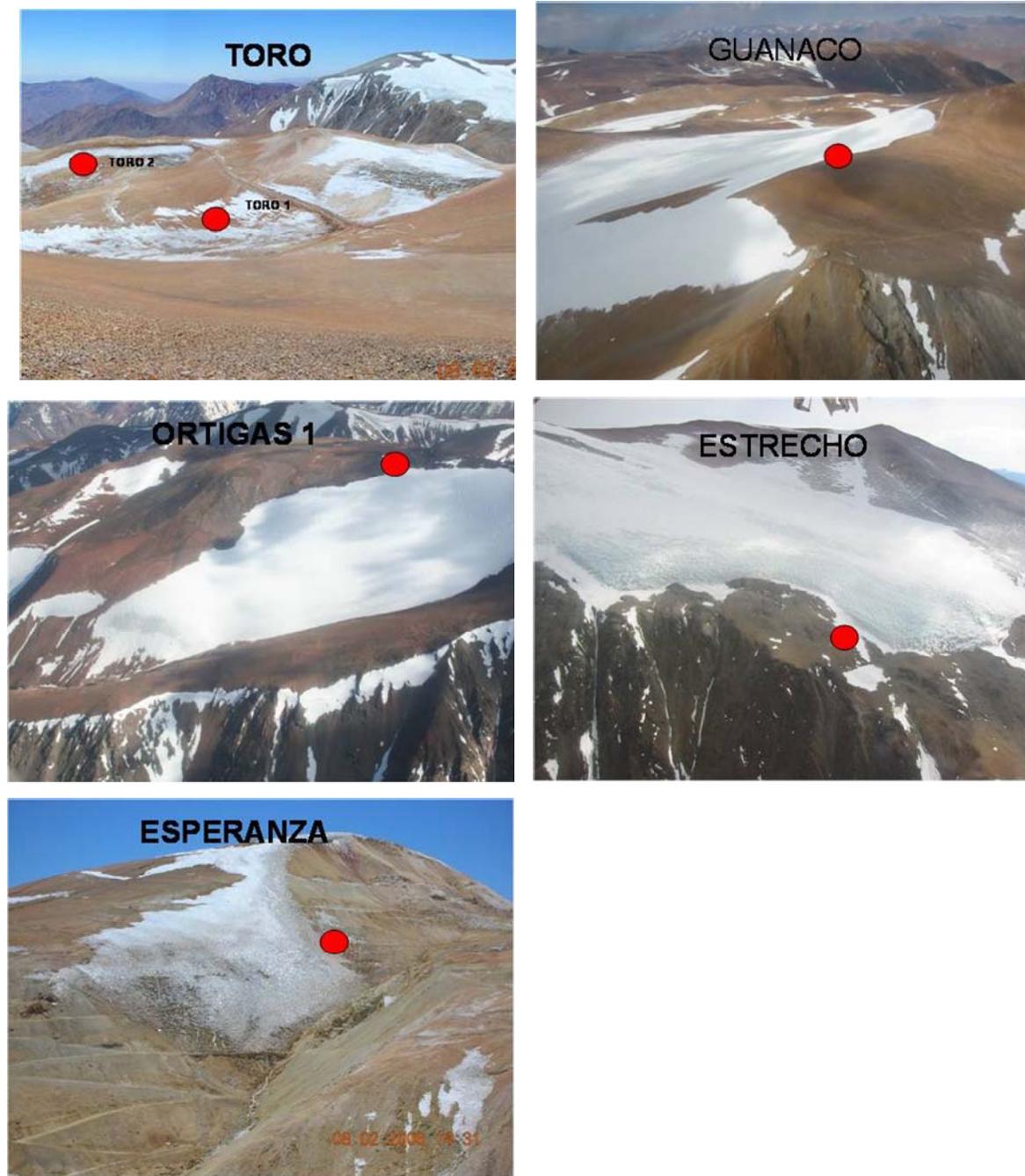
Figura 5-25: Ubicación de puntos de monitoreo de polvo sedimentado



Fuente: CMN 2009b.



Figura 5-26: Ubicación de puntos de monitoreo de polvo sedimentado

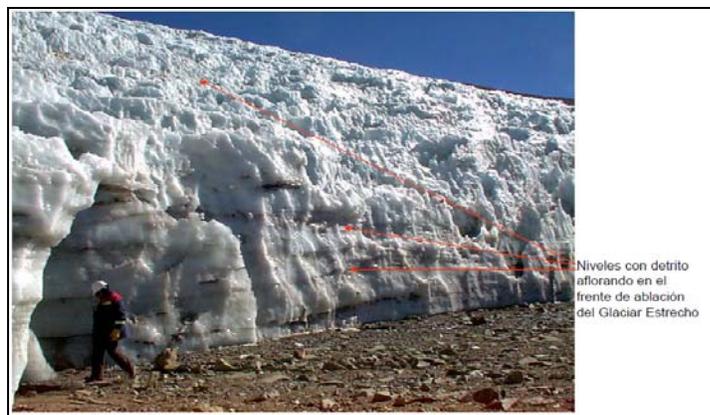


Fuente: CMN 2009b

La estratigrafía del hielo, se ha estudiado mediante inspecciones visuales realizadas por especialistas durante los años 2001 al 2006. En la Figura 4-24 a, b y c, se muestran ejemplos de actividades de inspección visual.



Figura 5-27a: Inspección visual de la estratigrafía del hielo en Estrecho



Fuente: Milana 2005

Figura 5-24 b y c: Inspección visual de la estratigrafía del hielo en Esperanza en noviembre 2001 (izquierda) y en Guanaco (derecha)



Fuente: CMN 2009a

Además de los registros visuales de detritos presentes en los glaciares, en diciembre de 2005 (CMN 2009a) se recolectaron muestras de hielo del Glaciar Guanaco para la evaluación del contenido de sólidos; y también se realizaron observaciones de la estratigrafía del hielo durante el proceso de perforación del Glaciar Guanaco en el año 2008 (IRD 2008).

5.4.3 Resultados

5.4.3.1 Inspecciones visuales

5.4.3.1.1 Presencia de polvo en superficie

Los glaciares acumulan en forma natural detritus y polvo sobre sus superficies (Golder 2005n), los que se concentran en las áreas de ablación en la medida que el hielo se derrite bajo ellos. Debido a las diferencias en el calentamiento solar entre el polvo/detritus más oscuro y el hielo/nieve más brillante, el deshielo puede incrementarse si el tipo y espesor del polvo es favorable (Mattson et al, 1993).



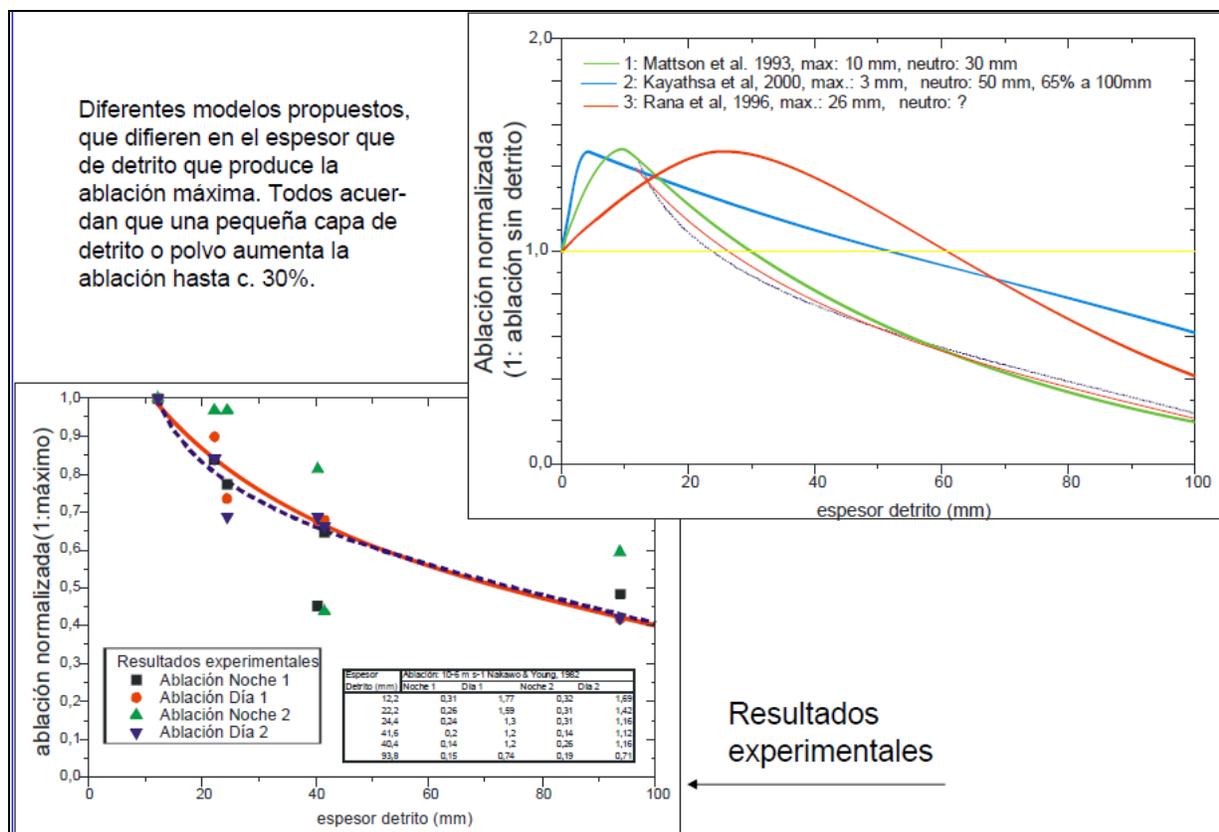
Además de la descripción de la geología local de los glaciares, la que incluye su relación con la depositación natural de polvo y detritos en las cercanías de glaciares y glaciaretos, presentados en la sección 4.2, se han realizado varias descripciones, durante las inspecciones visuales, de la acumulación de polvo y detritus encima de los cuerpos de hielo, incluyendo las siguientes:

- Glaciarete Toro 1 & 2: La porción inferior del glaciarete Toro 1 presenta una suficiente cubierta de grava que ha permitido la formación de conos de material y cordones donde las aguas superficiales han dejado concentraciones de detritus fluvial (Golder 2005n)..
- Glaciarete Esperanza: Se observa una capa de grava que cubre hasta 10 metros de espesor de hielo en el margen Oeste del glaciarete el cual reduce la tasa de ablación. La ablación se vio incrementada en ubicaciones con menores acumulaciones de polvo, resultando en la formación de grandes penitentes (Golder 2005n).
- Glaciar Guanaco: En el margen Sur se observan acumulaciones de detritus transportados hidráulicamente sobre la superficie del glaciar, y éstas han formado cordones de conos de material (Golder 2005n). Se observó un promedio de 5 cm de detrito encima del hielo, este espesor de detrito permitió que existiesen unos 2,5 m de espesor aproximado de hielo subyacente mayor al de las áreas circundantes, las cuales estuvieron expuestas a la radiación directa del sol. En este caso, la cubierta de detrito aflorante, ya se había formado y al aparecer comenzó a actuar como elemento protector. (Milana 2005),
- Glaciar Estrecho: En general en este glaciar las rocas se encuentran compactas y competentes, y de alta resistencia a la influencia de los vientos y a la generación de material particulado. No obstante, es posible observar la presencia de depósitos de detritus producto del arrastre de sedimentos provenientes de una quebrada al Noreste del glaciar (CMN 2009a).

Existen varios modelos que predicen algunos patrones relacionados con el aumento de ablación y con la presencia de detritus superficial, que se muestran en la Figura 5-28 (Milana 2005).



Figura 5-28: Efecto del detrito nieve y hielo: modelados y ejemplos reales de los Andes áridos



Fuente: Milana 2005

5.4.3.1.2 Estratigrafía del hielo

Los distintos estudios efectuados en el área del Proyecto concuerdan en que los glaciares y glaciaretos ubicados en la zona y alrededores presentan abundante polvo en forma natural. En relación a la estratigrafía y presencia de detritos y polvo, los estudios realizados indican que: :

- Los glaciares y glaciaretos en el área del proyecto y alrededores son naturalmente polvorientos, considerando que las inspecciones visuales muestran que ya existe una gran cantidad de polvo estratificado al interior de los cuerpos de hielo (CMN 2009a).
- El hielo subyacente no es perfectamente limpio ya que las tormentas de nieve acarrean bastante polvo natural. Por lo tanto existen cantidades considerables de polvo depositado en forma natural dentro del cuerpo y en la cabecera de hielo de los glaciares (Milana 2005) y que la estratigrafía interna del glaciar se puede usar para determinar el nivel de suciedad natural del hielo.
- Los glaciares en el área de Pascua–Lama presentan gran cantidad de polvo transportado por la acción del viento y depositado naturalmente sobre su superficie. La geología del área es tal que las exposiciones superficiales son fácilmente erosionables y transportables producto del viento y resultado del derretimiento, cubriendo frecuentemente cuerpos de hielo situados a elevaciones más bajas. (Proust 2008).

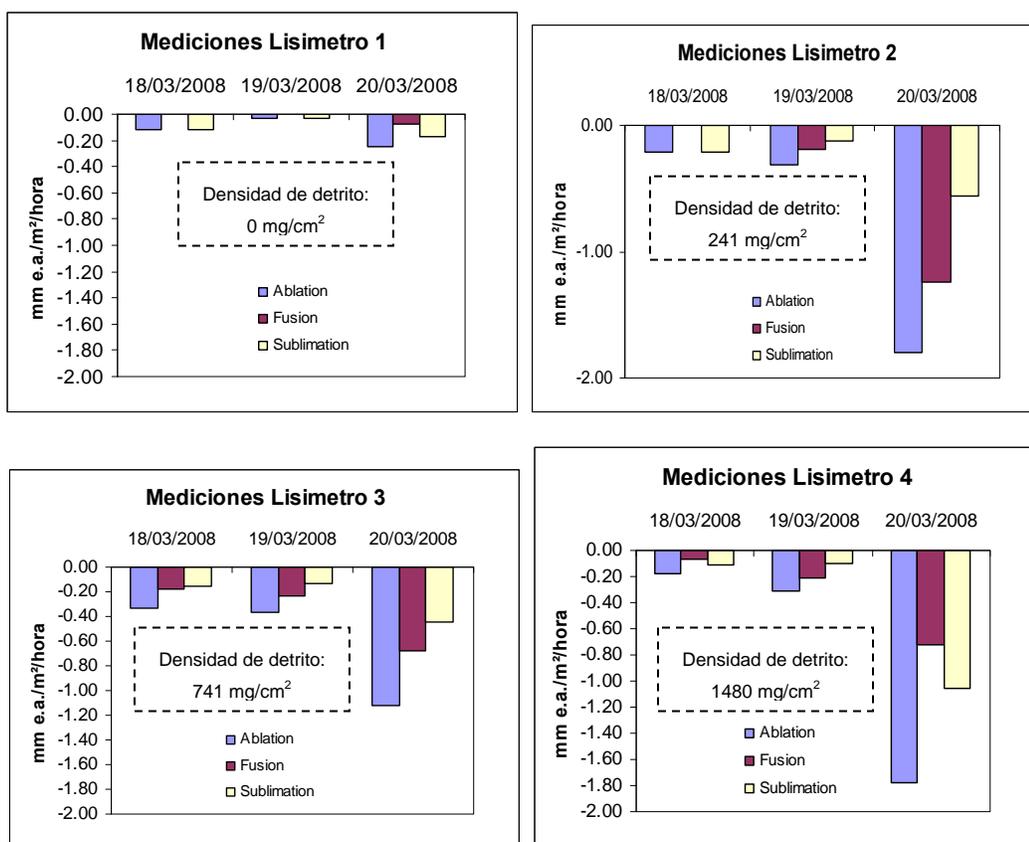


5.4.3.2 Efectos del polvo en la ablación (lisímetros)

Las capas de detritos invariablemente aumentan la ablación hasta lo que se puede denominar un espesor crítico, y a partir de este espesor la cubierta comienza a proteger el hielo. En el área del Proyecto se han encontrado valores de espesor crítico que van desde 3 mm hasta 30 mm (Milana 2005).

En la Figura 5-29 se presenta, según los resultados de los lisímetros (ver Figura 5-23), que, en general, la tasa de ablación es mayor en la caja con capa de detritos que en las cajas sin detritos (CEAZA 2008c) lo que confirma que la presencia de detritos en la superficie del hielo aumenta la tasa de ablación. Además se observa que cuando no hay detritos en la superficie del hielo, la sublimación tiene una gran influencia en los procesos de ablación.

Figura 5-29: Resultados de los lisímetros para el periodo de 17 al 20 de marzo de 2008 (en mm a.eq./m²/hora)



Fuente. CEAZA 2008c

La Tabla 5-9 muestra los primeros resultados de la campaña de monitoreo de polvo sedimentado (CMN 2009b).



Tabla 5-9: Fecha de retiro y primeros resultados de las muestras

Estaciones de polvo sedimentado	Fecha de retiro de muestras	Material particulado sedimentado total (Mg/cm ² x 30 días)	Material particulado soluble (Mg/cm ² x 30 días)	Material particulado insoluble (Mg/cm ² x 30 días)
Toro 1	13/05/2008	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Toro 2	13/05/2008	0.3	< 0.01	0.3
Esperanza	13/05/2008	0.1	< 0.01	0.1
Guanaco	13/05/2008	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Fuente: CMN 2009b

5.4.3.3 Muestreo de sólidos en el hielo

La cantidad estimada de acumulación de polvo natural se encuentra en un orden de magnitud de 100 g/m² o más en el caso de las capas más gruesas de polvo (Golder 2005s). Esta cantidad es mayor de la que se suele encontrar en otros glaciares más grandes y se debe probablemente a los fuertes vientos y a la falta de vegetación en los taludes circundantes.

Análisis de muestras de hielo provenientes de glaciares y glaciaretos han mostrado que el origen del polvo estratificado deriva de zonas geológicas aledañas (CMN 2009a), y que han sido transportados en forma natural sobre los cuerpos de hielo por medio de viento y arrastre (flujo de sedimentos). En la Tabla 5-10, se muestran los resultados del análisis del Glaciar Guanaco.

Tabla 5-10: Muestras de estratos del hielo con detritus proveniente del Glaciar Guanaco

Muestras tamaño > 10 µm		
Tamaño	10 µm – 1mm (89%)	1mm-8mm (10%)
Color	Diferentes colores principalmente pardos	Gris a pardo rojizos
Forma	Subredondeados a redondeados	Subredondeados-angulosos
Composición	Volcánica e intrusivas	Volcánicas de origen piroclástico

Fuente: CMN 2009^a

En los trabajos de perforación del hielo efectuados en el Glaciar Guanaco (IRD 2008), hasta una profundidad de 113m, se encontró hielo glaciar natural compacto con una densidad de 0,9 g/cm³, con presencia de burbujas de gas compactadas y numerosas capas de polvo con partículas que alcanzaban los 10 mm.



5.5 Albedo

El albedo es la razón (cuociente) entre la energía reflejada y la energía incidente (Valon et al, 2005). Se expresa en porcentaje o en valores decimales. En el caso de los glaciares y glaciaretos, la diferencia entre ambas magnitudes es la energía solar absorbida por el cuerpo de hielo, la cuál será empleada para la ablación, a través de procesos de fusión o sublimación.

El albedo puede variar significativamente con las condiciones de la superficie, puesto que la nieve seca tiene un promedio de albedo del 84 %, mientras que en el hielo cubierto con detritos esta variable puede descender hasta el 12 % (Tabla 5-11). En el primer caso, como la mayor parte de la radiación solar es reflejada, es escasa la energía solar disponible para la ablación, mientras que en el segundo caso estará disponible una mayor cantidad de energía para la fusión o sublimación (Paterson, 1994).

Tabla 5-11: Valores de albedo para distintas superficies de nieve/hielo (%) (Paterson, 1994)

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

A lo largo del tiempo, la precipitación en forma de nieve conduce a un incremento del albedo, mientras que la depositación de polvo o detritos, lo reduce. Otra forma de disminución progresiva natural del albedo se produce a partir de la ablación, cuando capas de hielo sucio con detritos quedan al descubierto.

5.5.1 Trabajos realizados

- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Anexo III-A. Adenda 2. EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama).
- Valon M.y Vincent C. 2005. Balance Invernal 2005 de los Glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco (Adenda 2 Anexo III-B).
- CEAZA 2008d, Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua - Lama. (Anexo P)
- CEAZA 2008c, Balance de energía sobre dos glaciares en la zona de Pascua –Lama. (Anexo D)
- Knight Piésold 2009, Modelo de Simulación Hidrogeológico Pascua.

5.5.2 Metodología

En el 2005, se realizó una evaluación de albedo en base a datos de terceros como los obtenidos de la estación Frontera, al no disponer de datos recolectados directamente en el área de Pascua-Lama.



Posteriormente, durante 2007 y 2008 se realizó un programa de monitoreo de albedo, realizando las mediciones en las estaciones meteorológicas instaladas sobre la superficie de glaciares y glaciaretos objeto de estudio (Figura 5-30a y b). Adicionalmente, se diseñó una metodología capaz de generar mapas de albedo para el conjunto del cuerpo de hielo. Estos mapas, combinados con la información meteorológica, particularmente en relación a la ocurrencia de precipitaciones en forma de nieve medida en los puntos de ubicación de las estacas, permiten mejorar la comprensión del comportamiento del albedo en distintas condiciones, tales como después de una nevada (CEAZA 2008d).

Para la medición de albedo se instalaron dos estaciones que corresponden al glaciar Guanaco, y al sector de glaciaretos Toro 1, Toro 2 y vista de Estrecho (Figura 5-31). La primera campaña de registro fotográfico automático y diario de la superficie de los glaciares se realizó desde noviembre 2007 a marzo 2008.

Las estaciones de albedo llevan instalados sensores Kipp & Zonen, para la medición de ondas cortas y largas, tanto incidentes como reflejadas. Las mediciones se realizan cada 15 segundos y se registran los promedios en el datalogger cada 30 minutos; a partir de la información registrada se calculan promedios diarios y mensuales entre las 12 y 14 horas. Los sensores miden la radiación solar de onda corta ($0,31 < \lambda < 2,8 \mu\text{m}$) incidente y reflejada, a una altura de 1,5 metros. Para este propósito se emplea una cámara Pentax K110D.

La metodología de generación de los mapas de albedo comprende las siguientes etapas (CEAZA 2008d):

- 1) Obtención de fotografías de los cuerpos de hielo indicados;
- 2) Medición del albedo en estaciones meteorológicas instaladas sobre la superficie de los glaciares y glaciaretos;
- 3) Creación de un modelo digital del terreno de 4 m de resolución a partir de la imagen Ikonos 2005;
- 4) Conversión de la imagen fotográfica desde su condición original de vista oblicua hacia una vista vertical;
- 5) Georreferenciación de la fotografía sobre el modelo digital del terreno (DEM);
- 6) Extrapolación del valor de albedo obtenido en la estación meteorológica al conjunto del cuerpo de hielo, a través de la información de reflectancia registrada en cada píxel de la fotografía; y
- 7) Optimización del procedimiento, consistente en aplicar una rutina adicional para tomar en cuenta las propiedades de reflexión "no-lambertianas" de la nieve (dado que la radiación incidente no se refleja de la misma manera en cada dirección sobre una cobertura de nieve). Esta rutina involucra una función que describe el comportamiento de la reflectancia para cada píxel de la imagen según la pendiente del terreno, el ángulo de incidencia de la radiación solar y el ángulo de observación.

Después de realizar el mapa de albedo, se puede obtener el valor de albedo en cualquier punto de la superficie de los glaciares y glaciaretos.

Luego se evalúan los cambios de albedo presentando las tendencias del albedo estival, medido puntualmente en las estaciones meteorológicas que se encuentran en cada glaciar estudiado, relacionados con la evolución de unos índices, 1, 2 y 3, tal como se indica a continuación (CEAZA 2008d):

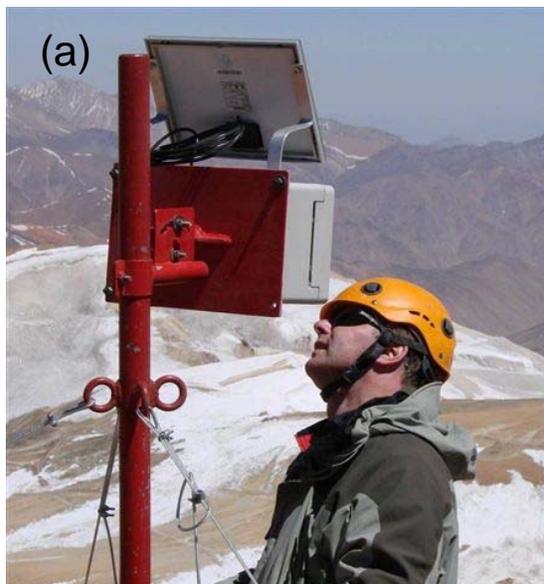
Índice 1: Diariamente se calcula el **albedo diario promedio puntual** a partir de las radiaciones incidente y reflejada.

Índice 2: De igual forma, se calcula el valor de **albedo promedio puntual entre las 12:00 y las 14:00 horas** del día para servir de comparación.



Índice 3: Para cada día de cada semana se calcula el albedo distribuido a escala del glaciar. Los mapas de valores obtenidos permitirán calcular cada semana un **albedo promedio instantáneo alrededor de las balizas** visibles en las fotografías.

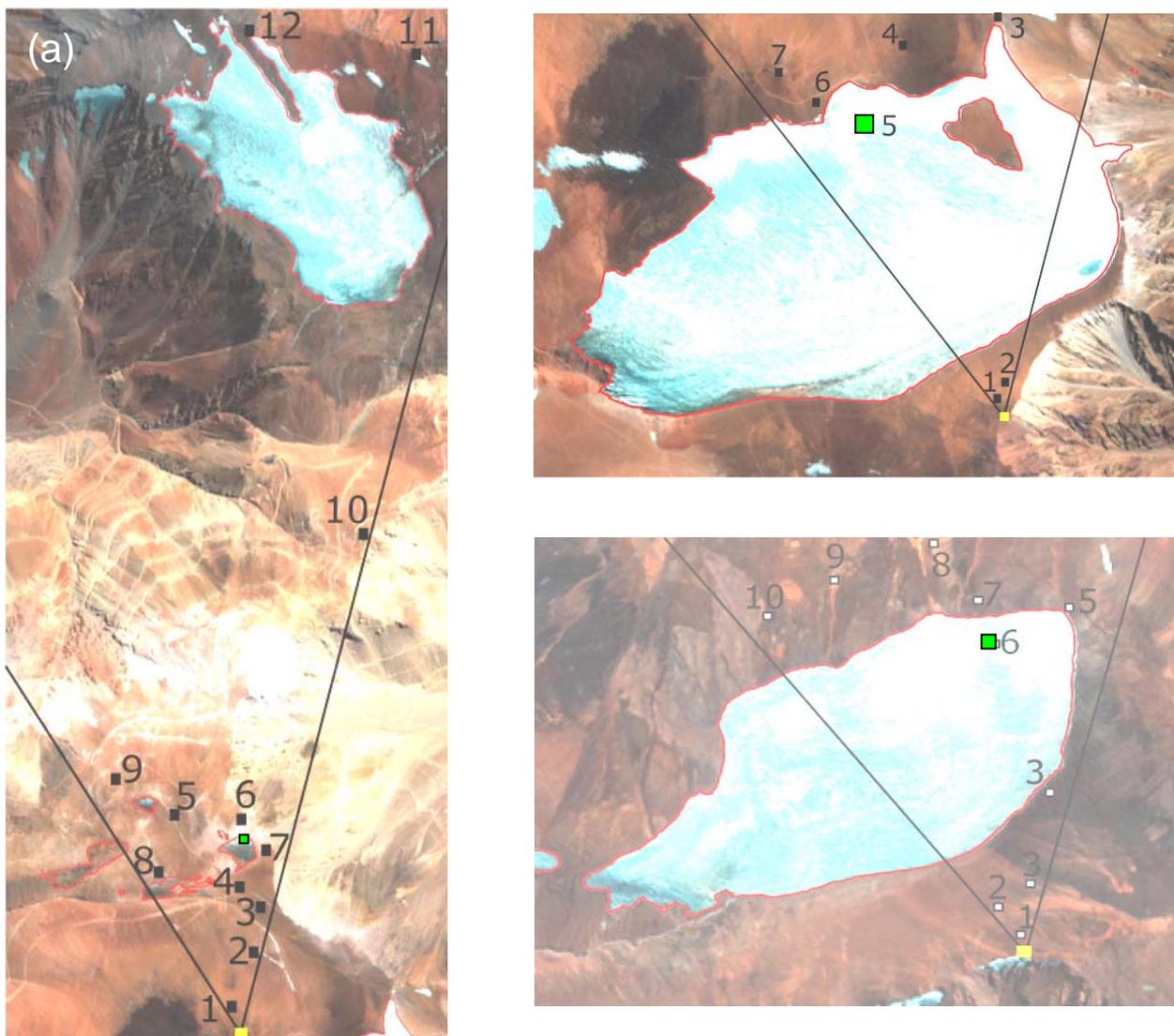
Figura 5-30: (a) Instalación de cámaras fotográficas (b) Estación metereológica instalada en Toro 1



Fuente: Registros CMN, CEAZA 2008g



Figura 5-31: Ubicación de las cámaras fotográficas (cuadro amarillo), de las estaciones meteorológicas (cuadro verde) y de los puntos de control de terreno (cuadro negro o blanco), en sector de glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Estrecho (A), glaciar Guanaco (B) y glaciar Ortigas 1(C). Noviembre 2007 – marzo 2008.



Fuente: CEAZA, 2008d

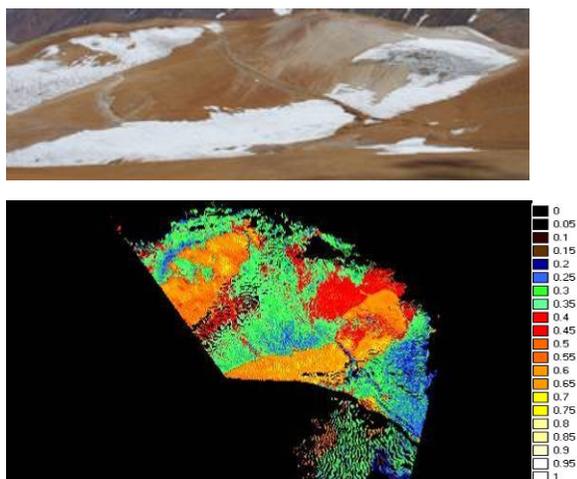


5.5.3 Resultados

Anterior a la realización de los estudios en 2007 y 2008, el albedo en la superficie del glaciar Guanaco podría ser considerado como 0,40 (40%) para hielo limpio y 0,21 (21%) para hielo sucio (Milana 2005).

Las siguientes figuras muestran los resultados de los cálculos de albedo, obtenidos a partir de mediciones registradas en las estaciones durante la campaña de monitoreo de 2007 y 2008 (CEAZA 2008d).

Figura 5-32: Mapa de albedo glariaretos Toro 1 & 2, 20/12/2007



Fuente: CEAZA, 2008d

Figura 5-33: Mapa de albedo glaciar Guanaco, 20/03/2008



Fuente: CEAZA, 2008d

Se presentan tablas resumen de los resultados para Toro 1 y Guanaco (CEAZA 2008d) de acuerdo a los índices 1 y 2 en la Tabla 5-12 y Tabla 5-13, respectivamente.



Debido a la ausencia de toma de fotos en forma continua, no es posible concluir una evolución distinta entre los valores de albedo en la superficie del glaciar y en la estación (CEAZA 2008d). Por ello los resultados del índice 3 no se presentan en el presente informe.

Tabla 5-12: Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (diciembre 2007–marzo 2008), Índice 1

Índice 1	Toro 1		Guanaco	
	Promedio diario	Desviación estandar	Promedio diario	Desviación estandar
Dic -07	0,56	0,04	0,59	0,03
Ene-08	0,32	0,10	0,56	0,05
Feb-08	0,22	0,05	0,51	0,07
Mar-08	0,38	0,15	0,51	0,10
Abr-08	0,31	0,07	-	-
May-08	0,36	0,22	-	-
Jun-08	0,73	0,12	-	-

Fuente: CEAZA 2008d

Tabla 5-13: Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (diciembre 2007–marzo 2008), Índice 2

Índice 2	Toro 1		Guanaco	
	Promedio 12 h - 14 h	Desviación estandar	Promedio 12 h - 14 h	Desviación estandar
Dic-07	0,52	0,05	0,57	0,03
Ene-08	0,27	0,09	0,53	0,04
Feb-08	0,19	0,03	0,47	0,07
Mar-08	0,41	0,15	0,47	0,09
Abr-08	0,31	0,08	-	-
May-08	0,36	0,21	-	-
Jun-08	0,75	0,10	-	-

Fuente: CEAZA 2008d

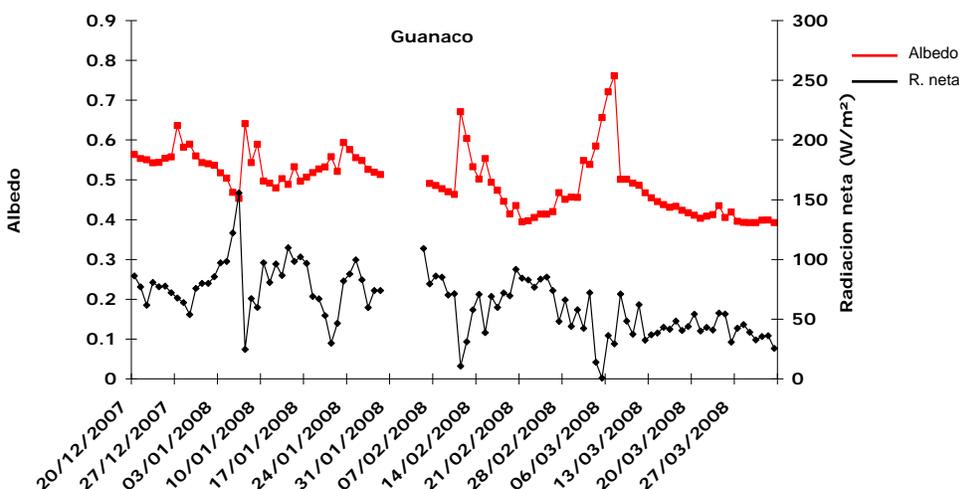
De acuerdo a los resultados presentados en Tabla 5-12 y Tabla 5-13, los cuales proporcionan una estimación del rango de albedo en los glaciares de interés, es posible señalar que la estimación de albedo hecha por Milana (2005) para el glaciar Guanaco (0,40 para hielo limpio y 0,21 para hielo sucio), en base a datos de la estación Frontera ubicada en tierra firme, fue razonable, aunque subestima los mayores valores registrados.

Adicionalmente se realizó una relación entre albedo y radiación neta, la cual muestra una tendencia de acuerdo a lo esperado, esto es, que la radiación neta está fuertemente correlacionada de manera inversa con el albedo (CEAZA 2008c). En efecto, los días durante los cuales se registraron intensidades altas del albedo corresponden a días durante los cuales la radiación neta disminuyó. Esto se explica en gran parte por las



caídas de nieve, las que producen un aumento del albedo; como la nieve fresca tiene un alto poder de reflexión de la radiación solar y las radiaciones de ondas cortas reflejadas aumentan, ello induce una disminución de la radiación neta. Estos resultados se muestran en la Figura 5-34.

Figura 5-34: Promedios diarios de la radiación neta y del albedo (promedio entre las 8 y las 18h,) medidos por la estación meteorológica del glaciar Guanaco



Fuente: CEAZA, 2008c

El rango del albedo usado en el modelo del balance hídrico (sección 2.3.3) (Knight Piesold 2009), es de 0,5 a 0,84, el cual es consistente con las mediciones presentadas en esta sección.

5.6 Caracterización del permafrost

El permafrost es definido como todo terreno que se mantiene por debajo de los 0° C durante al menos dos años consecutivos. Esta descripción alude al carácter “térmico” del suelo y no a sus componentes, como pudiese ser su contenido de hielo o agua o al tamaño y proporción de las partículas que lo constituyen. De este modo, el permafrost podría contener agua descongelada, incluso aunque el material esté bajo cero, debido a la depresión del punto de congelamiento (BGC 2009).

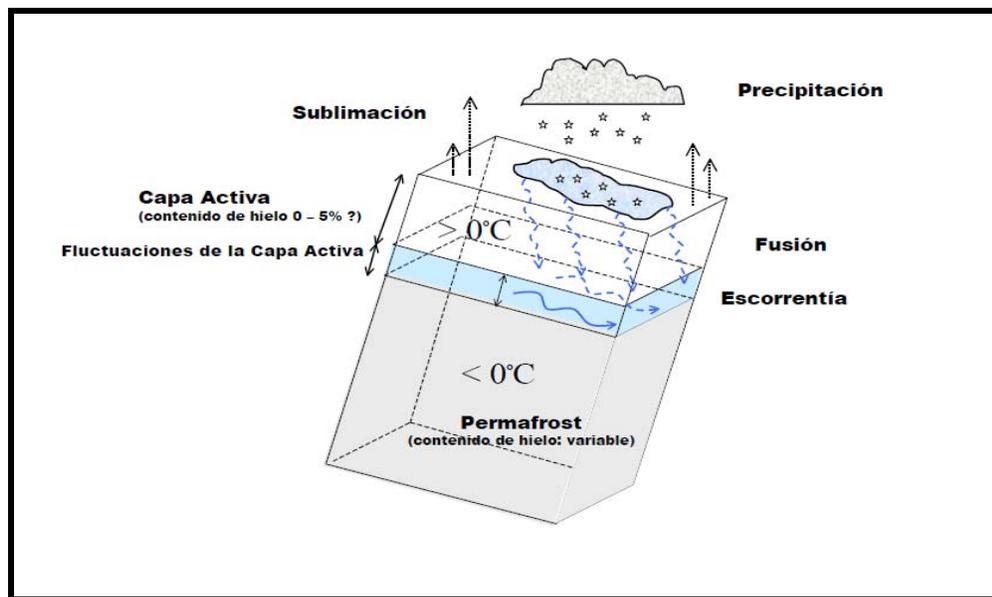
La formación y extensión del permafrost está controlada por tres factores principales:

- 1) El balance de energía que controla la ganancia y pérdida de calor sobre la superficie de la tierra;
- 2) El calor derivado desde el interior de la tierra, generalmente definido como gradiente geotérmico en profundidad; y
- 3) La presencia cercana de cuerpos de agua significativos como ríos o lagos, los cuales no se congelen completamente durante el año y que actúan como una fuente potencial de calor, impidiendo la formación de permafrost.



En ambientes que contienen permafrost (pero también en los glaciares de roca), la capa activa corresponde a la parte o capa superior de suelo que está sujeta a congelamiento y descongelamiento cada año. En esta capa normalmente el descongelamiento se produce cada verano producto del aumento de la temperatura del aire y de la mayor radiación solar incidente, en tanto que se vuelve a congelar durante el otoño (BGC 2009).

Figura 5-35: Ciclo hidrológico típico de una zona de permafrost



Fuente Proust 2008

En la sección 3.1 se presentan las definiciones de permafrost y glaciares de roca, así como las diferencias en la formación de los dos fenómenos. A continuación se presenta un resumen de los parámetros de permafrost, mientras que los parámetros del glaciar de roca se presentan en la sección 5.7. Permafrost y glaciares de roca comparten varias propiedades, por ejemplo la capa activa, pero al mismo tiempo tienen algunas propiedades diferentes que muestran una caracterización distintiva para cada fenómeno y apoyan la estimación del aporte potencial al balance hídrico tanto del permafrost como de glaciares. Además existe una diferencia importante en la disposición de cada uno. La presencia de permafrost es posible en elevaciones superiores a los 4.000 ms.n.m (BGC 2009). El permafrost se encuentra distribuido en la zona del Proyecto, mientras que existe un solo glaciar de roca en la misma zona.

5.6.1 Trabajos realizados

- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Anexo III-A. Adenda 2. EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama)
- BGC 2009 Caracterización de Permafrost. (ANEXO I)
- CMN 2004, EIA Modificación de Proyecto Pascua-Lama



- GOLDER 2006d. Observaciones de contenido de hielo en el sector de cabecera del estrecho, 059-2701-220-008, 6 de enero de 2006
- Gruber S, Haeberli W 2005, Results of inicial permafrost modelling (PASCUA_RAD), University of Zurich, 26 septiembre 2005
- CMN 2008e, Programa de Monitoreo de Glaciares Rev.3, enero 2008

5.6.2 Metodología

El permafrost se ha caracterizado con un mapa de ubicación de áreas, estimaciones de la temperatura según profundidad del permafrost y estimaciones del volumen de hielo y agua contenido en el permafrost; basado en las siguientes actividades de terreno (BGC 2009):

- La medición de la temperatura del suelo a diferentes profundidades mediante la instalación de termistores dentro de sondajes; y
- La descripción de calicatas abiertas con retroexcavadora en suelos de permafrost.

Las siguientes secciones describen la metodología empleada en este proceso.

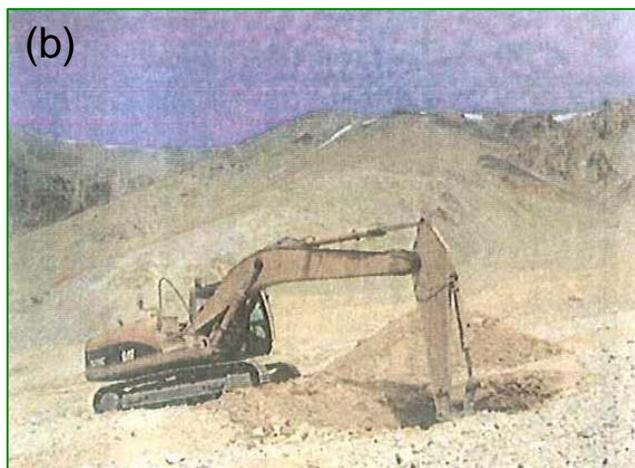
5.6.2.1 Investigación de calicatas

Durante los meses de abril y mayo de 2006 se excavaron 4 calicatas en el lado chileno del Proyecto Pascua-Lama y otras 14 en el lado argentino, utilizando una máquina retro-excavadora . Donde no se encontró el suelo congelado; las calicatas alcanzaron los 4 a 5 metros de profundidad. En caso de encontrar suelo congelado la maquinaria empleada no fue capaz de profundizar más allá de unos pocos decímetros del material congelado, por lo tanto las excavaciones terminaron en dicha profundidad (BGC 2009). La caracterización de las calicatas comprendió:

- Registro de la profundidad de la calicata;
- Descripción de la estratigrafía;
- Perfil de la temperatura del suelo (medición cada 0,5 m);
- Observación de la presencia o ausencia de terreno congelado/suelos bajo cero (probable permafrost);
- Descripción del hielo del suelo; y
- Estimación volumétrica del contenido de hielo.



Figura 5-36: (a) Calicata PPTP-05-03 en permafrost, (b) Retroexcavadora CAT320C



Fuente: BGC 2009

5.6.2.2 Temperatura del permafrost

En abril 2006 se instalaron 6 secuencias de termistores, 3 en el lado chileno y otras 3 en el lado argentino del Proyecto Pascua-Lama (BGC 2009). Los detalles de las instalaciones en el lado chileno se presentan en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14: Resumen de los termistores instalados en permafrost en el lado chileno

Termistor N°	Elevación del suelo (m s.n.m.)	Profundidad vertical máxima de cable (m)
BGC – TH20.1	5.082	19,9
BGC – TH20.3	4.794	20,0
BGC – TH100.1	5.092	99,8

Fuente: BGC 2009

En la Figura 5-37, Tabla 5-14 y la Figura 5-38, se presentan la ubicación de las secuencias de termistores y fotografías representativas del proceso de instalación en TH20.1.

Los termistores utilizados tienen una precisión de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Se recolectaron todos los datos de los termistores con los dataloggers instalados, los que toman datos con una frecuencia de dos veces por día.

En general, todos los cables de 20 m de largo fueron instalados dentro del sondaje utilizando tuberías de PVC de 25 mm de diámetro. El espacio anular entre la pared del sondaje y la tubería fue relleno con una combinación de piedras angulares y gravas, arena y grava.

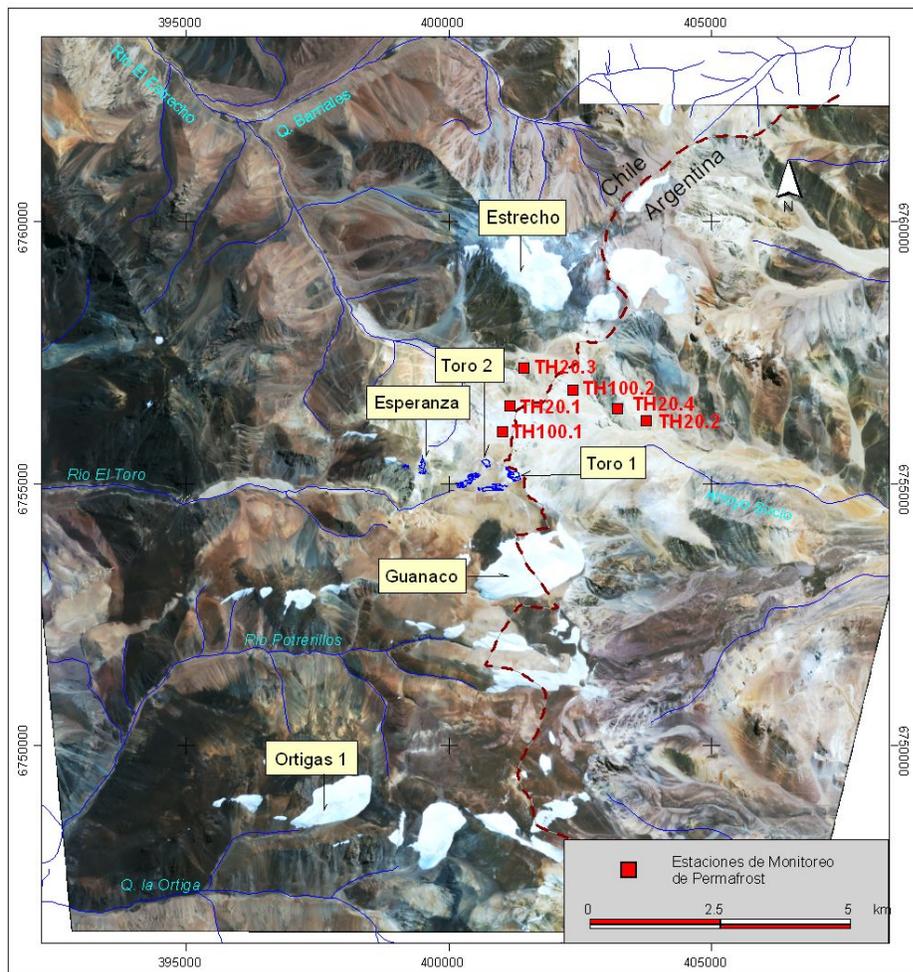
El Anexo I proporciona una explicación detallada del proceso de instalación de los termistores, incluyendo información sobre el tipo de equipo empleado.



5.6.2.3 Contenido de humedad

Fueron tomadas muestras de suelo para medir el contenido de humedad, pues con ello se obtiene el nivel estimado de la capa activa.

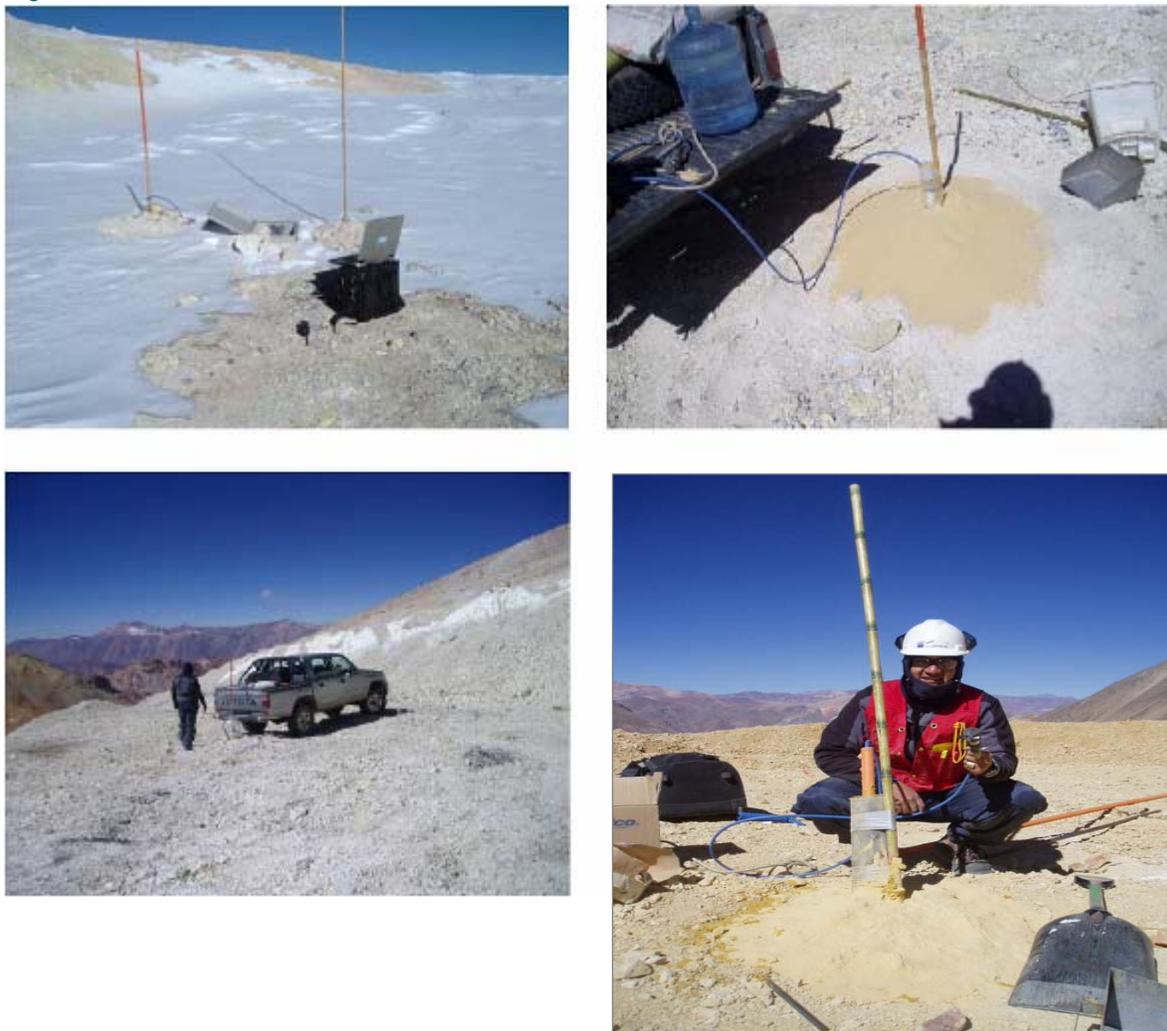
Figura 5-37: Ubicación de estaciones de monitoreo de temperatura de permafrost.



Fuente: CMN 2008e



Figura 5-38: Instalación de secuencia de termistores TH20.1



Fuente CMN 2008e

5.6.3 Resultados

5.6.3.1 Calicatas

Un resumen de resultados de las calicatas es presentado en la Tabla 5-15..El registro detallado de las calicatas se encuentra incluido en los anexos de BGC 2009 (Anexo I).



Tabla 5-15: Resumen de los resultados de las calicatas BGC 2009

Calicata	Elevación (m)	Profundidad estimada al Permafrost (m)	Presencia de permafrost
TP-P1	4365	<5.0	No
TP-P2	4503	1,8	Si
TP-P3	5013	0,4	Si
TP-P4	4883	1,1	Si

Fuente: BGC 2009

Como las calicatas fueron realizadas a fines de la estación cálida (con alguna evidencia de los primeros congelamientos del año), fue relativamente fácil observar la profundidad a la capa activa (BCG 2009). Sin embargo, se planteó que es probable que la profundidad a la capa activa varíe considerablemente durante el año.

El tipo de suelo probablemente no ejerce un papel relevante en la distribución del permafrost, dado que los suelos fueron en su mayoría de tipo franco arenos, es decir arenas y gravas.

5.6.3.2 *Temperatura*

Debido a las similitudes de los flujos de energía asociados a glaciares en la colindante Provincia de San Juan, en Argentina (Milana 1998), es posible considerar que el gradiente térmico local de Pascua-Lama debería ser de 1°C por 33 m de profundidad del suelo (Milana 2005).

Un resumen de los estudios existentes sobre permafrost en el área del Proyecto está incluido en BGC 2009 (ANEXO I). Este resumen incluye trabajos realizados por Golder (Golder 2002a) en Veladero, yacimiento minero ubicado cercano al área de Pascua-Lama y a una elevación de entre 4300 y 4500 m.s.n.m.,. Este estudio indica un gradiente térmico de entre 2,1 y 2,6°C /100m (1 °C por 48 – 38m).

Los resultados del monitoreo de la temperatura del permafrost durante el periodo comprendido entre 2006 y 2008, incluyendo perfiles de temperatura, se encuentran en los anexos de BGC 2008. Un resumen se entrega en la Tabla 5-16.

No se puede estimar un gradiente geotérmico ni el espesor del permafrost en los sondajes TH20.1 y TH20.3, porque el equipo instalado no profundizó lo suficiente como para proporcionar datos adecuados. Un ejemplo del perfil de temperatura se muestra en la Figura 5-39.



Tabla 5-16: Temperatura del suelo registrada en termistores (BGC 2009)

Termistor	Espesor de la capa activa (m)	Profundidad de la amplitud cero anual (m)	Temperatura del subsuelo a la profundidad de amplitud cero anual	Gradiente geotérmico
TH20.1	<1	19,9	-5,2°C	n/d
TH20.3	0,9	20	-2,9°C	0°C/100m @ 20m
TH100.1	<1	99,8	-5,5°C	2,0°C/100m @ 35m 1,7°C/100m @ 55m 2,3°C / 100m @ 70m

n/d = no disponible

Fuente: BGC 2009

Se puede considerar que el rango de gradientes geotermicos presentado para TH100.1 en la Tabla 5-16, se corresponde con las estimaciones anteriores (1°C por 33 –48 m) realizadas por Milana y Golder. La Figura 5-39 presenta los resultados de el monitoreo del temperatura en TH100.1 (BGC 2009).

5.6.3.3 Hidrología del permafrost

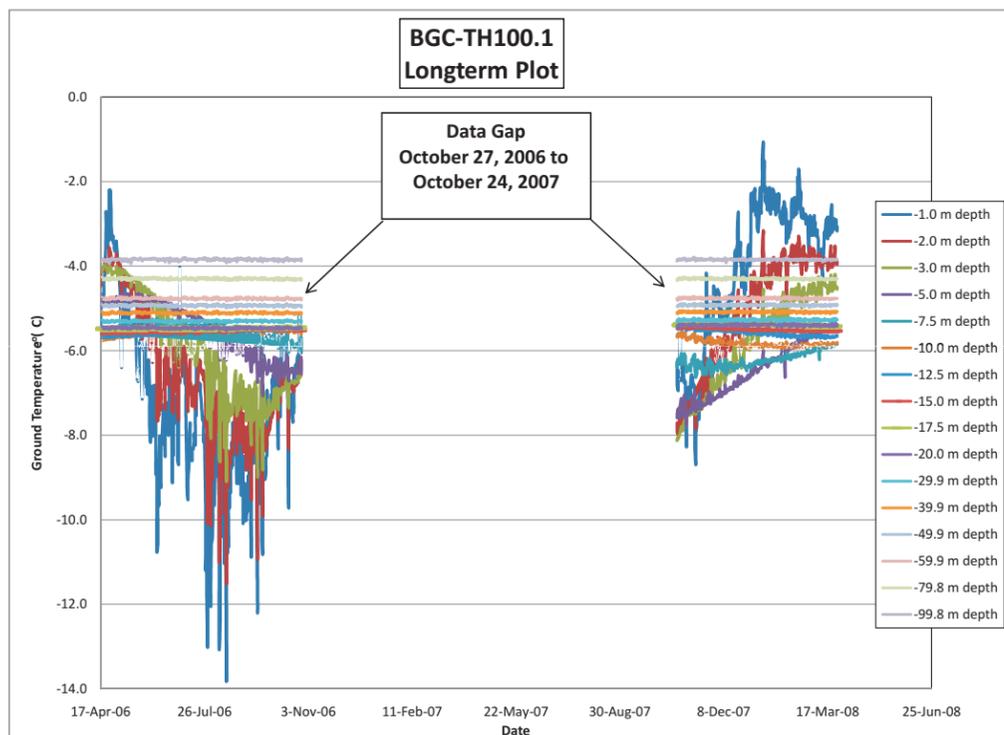
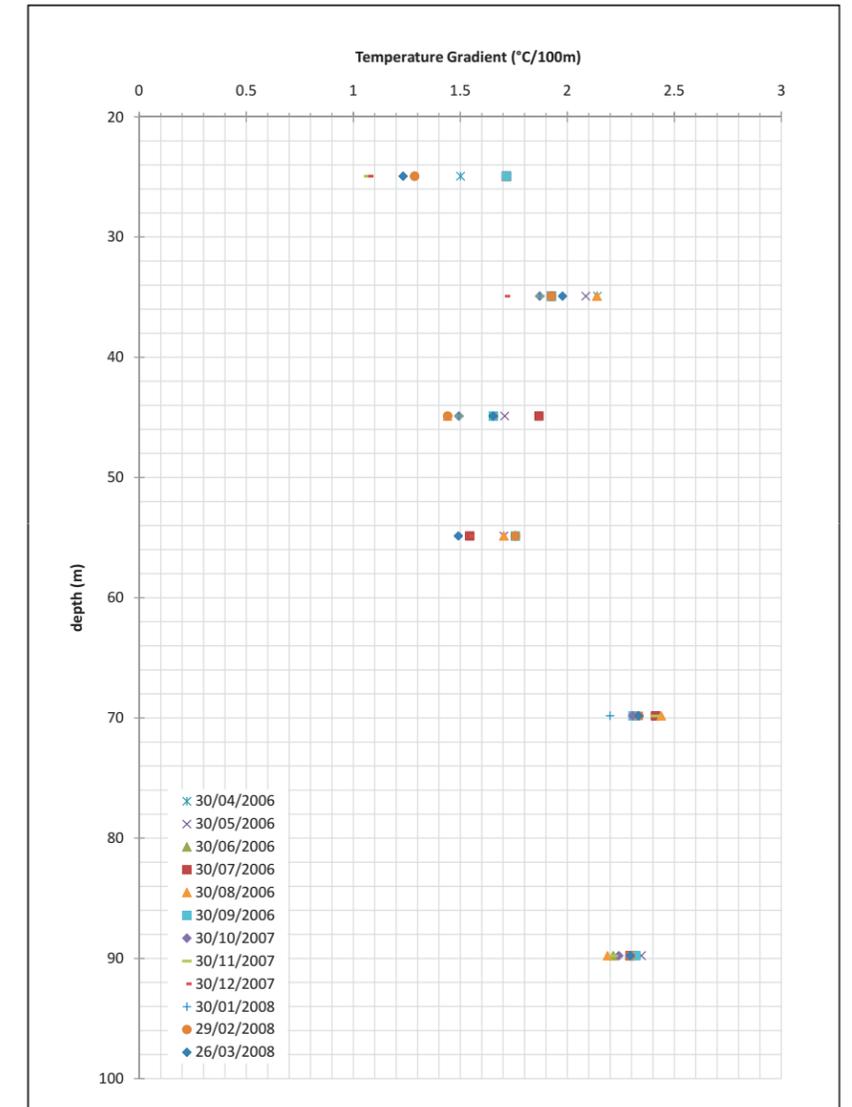
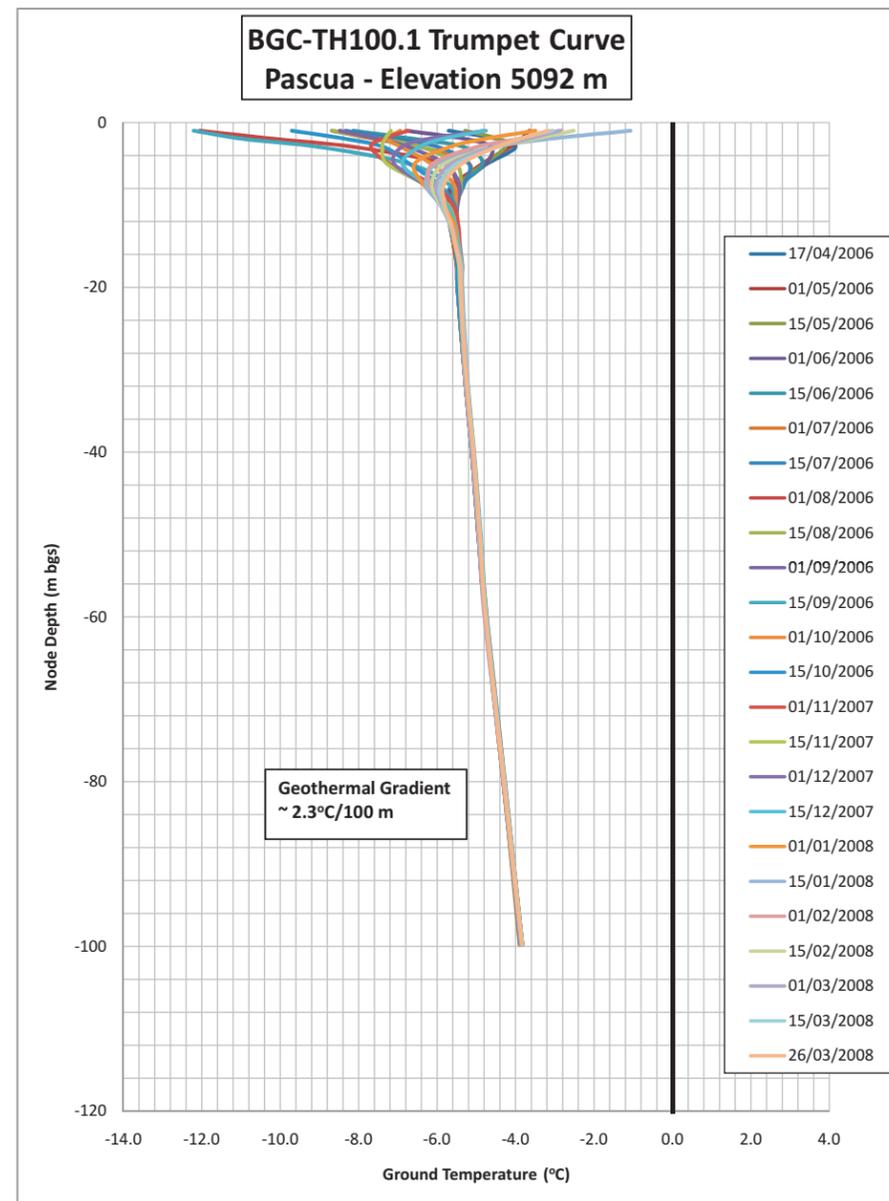
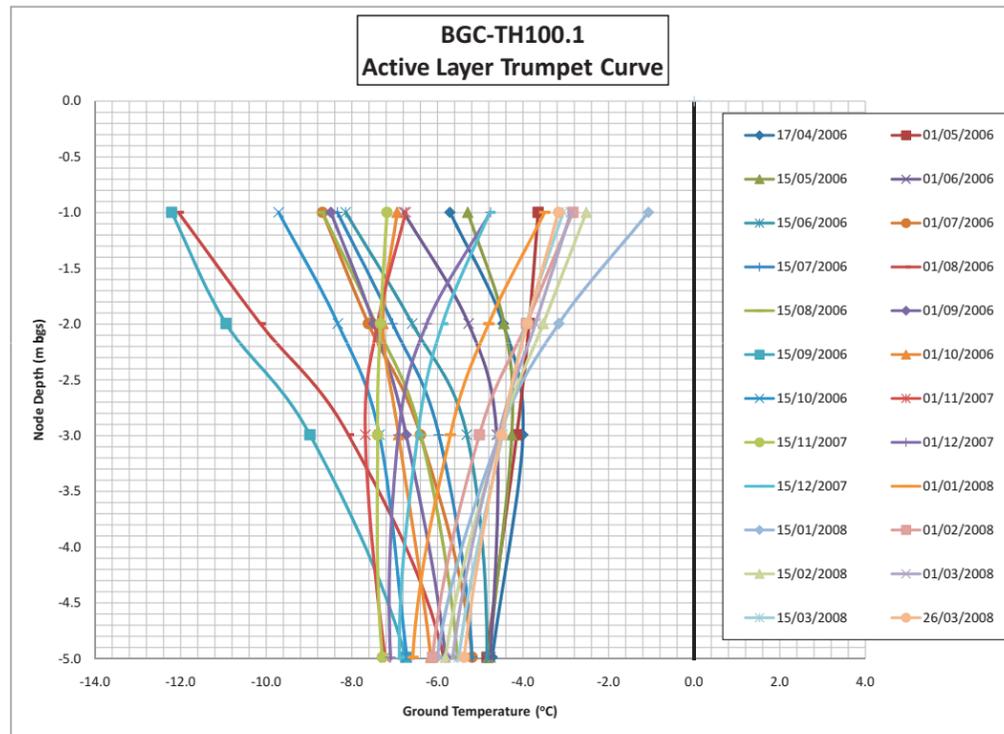
La capa activa se derrite y congela según la estación del año, es decir que la proporción de la capa activa congelada cambia durante el año, pero la capa activa mantiene un espesor constante.

En términos generales el descongelamiento de la capa activa contribuye con la escorrentía, vale decir con los flujos superficiales de las cuencas en las que se ubican estras crioformas. El hielo, en el evento de estar presente debajo de la capa activa, no se derretirá a menos que el calentamiento climático cauce el deterioro del cuerpo permafrost. En resumen, si bien en los años calientes y secos es teóricamente posible que el hielo en la parte superior del cuerpo permafrost se derrita y origine escorrentía, el hielo contenido en el cuerpo permafrost debajo de la capa activa no contribuye con el ciclo hidrológico anual. El agua que aporta la capa activa es pasajera originada por la nieve derretida (CMN 2004).

5.6.3.4 Mapa de permafrost

Se realizó una modelación de la distribución del permafrost en el área de Pascua-Lama (BGC 2009 y Gruber et al 2005), la que fue basada en la información de las calicatas y el sondeo BGC. El resultado de la modelación fue un mapa de la distribución de tres categorías elegidas de permafrost: No permafrost, probabilidad baja de permafrost y probabilidad alta de permafrost. Los resultados del modelo indican que la relación entre estas categorías es 14%, 52% y 34%, respectivamente. La Figura 5-40 presenta un mapa de dicha distribución (BGC 2009).

Adicionalmente, se realizó un mapeo de la distribución de la profundidad estimada del permafrost, el cual es presentado en la Figura 5-41 (BGC 2009), y una distribución de profundidad estimada a la capa activa (Figura 5-42, BGC 2009).



AS A MUTUAL PROTECTION TO OUR CLIENT, THE PUBLIC, AND OURSELVES, ALL REPORTS AND DRAWINGS ARE SUBMITTED FOR THE CONFIDENTIAL INFORMATION OF OUR CLIENT FOR A SPECIFIC PROJECT. AUTHORIZATION FOR ANY USE AND/OR PUBLICATION OF THIS REPORT OR ANY DATA, STATEMENTS, CONCLUSIONS OR ABSTRACTS FROM OR REGARDING OUR REPORTS AND DRAWINGS, THROUGH ANY FORM OF PRINT OR ELECTRONIC MEDIA, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, POSTING OR REPRODUCTION OF SAME ON ANY WEBSITE, IS RESERVED PENDING BGC'S WRITTEN APPROVAL. IF THIS REPORT IS ISSUED IN AN ELECTRONIC FORMAT, AN ORIGINAL PAPER COPY IS ON FILE AT BGC ENGINEERING INC. AND THAT COPY IS THE PRIMARY REFERENCE WITH PRECEDENCE OVER ANY ELECTRONIC COPY OF THE DOCUMENT, OR ANY EXTRACTS FROM OUR DOCUMENTS PUBLISHED BY OTHERS.

SCALE:	N/A
DATE:	Dec 2008
DRAWN:	SLF
DESIGNED:	GKC
CHECKED:	LUA
APPROVED:	

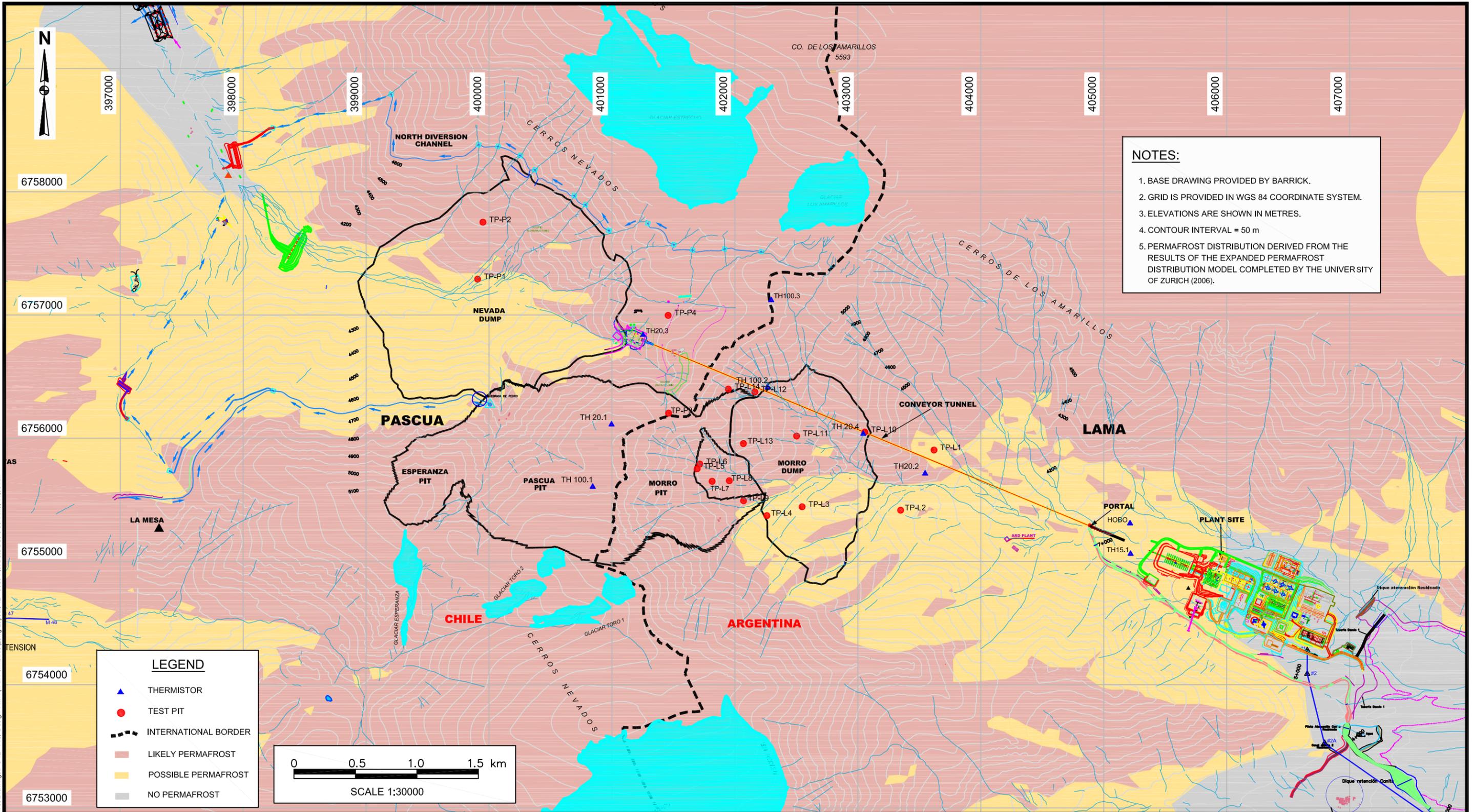
PROFESSIONAL SEAL:

BGC BGC ENGINEERING INC.
AN APPLIED EARTH SCIENCES COMPANY

CLIENT:

PROJECT:	PASCUA LAMA PERMAFROST CHARACTERIZATION STUDY		
TITLE:	THERMISTOR TH100.1		
PROJECT No.:	0443-009A-02	FIGURE No.:	5
REV.:			

REV.	DATE	REVISION NOTES	DRAWN	CHECK	APPR.



AS A MUTUAL PROTECTION TO OUR CLIENT, THE PUBLIC, AND OURSELVES, ALL REPORTS AND DRAWINGS ARE SUBMITTED FOR THE CONFIDENTIAL INFORMATION OF OUR CLIENT FOR A SPECIFIC PROJECT. AUTHORIZATION FOR ANY USE AND/OR PUBLICATION OF THIS REPORT OR ANY DATA, STATEMENTS, CONCLUSIONS OR ABSTRACTS FROM OR REPRODUCING OUR REPORTS AND DRAWINGS, THROUGH ANY FORM OF PRINT OR ELECTRONIC MEDIA, INCLUDING WITHOUT LIMITATION POSTING OR REPRODUCTION OF SAME ON ANY WEBSITE, IS RESERVED PENDING BGC'S WRITTEN APPROVAL. IF THIS REPORT IS ISSUED IN AN ELECTRONIC FORMAT, AN ORIGINAL PAPER COPY IS ON FILE AT BGC ENGINEERING INC. AND THAT COPY IS THE PRIMARY REFERENCE WITH PRECEDENCE OVER ANY ELECTRONIC COPY OF THE DOCUMENT, OR ANY EXTRACTS FROM OUR DOCUMENTS PUBLISHED BY OTHERS.

REV.	DATE	REVISION NOTES	DRAWN	CHECK	APPR.

SCALE:	AS SHOWN
DATE:	DEC 2008
DRAWN:	JL
DESIGNED:	GKC
CHECKED:	LUA
APPROVED:	-

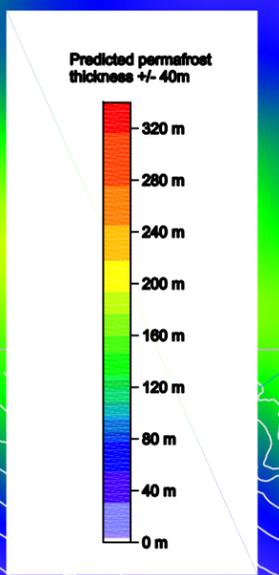
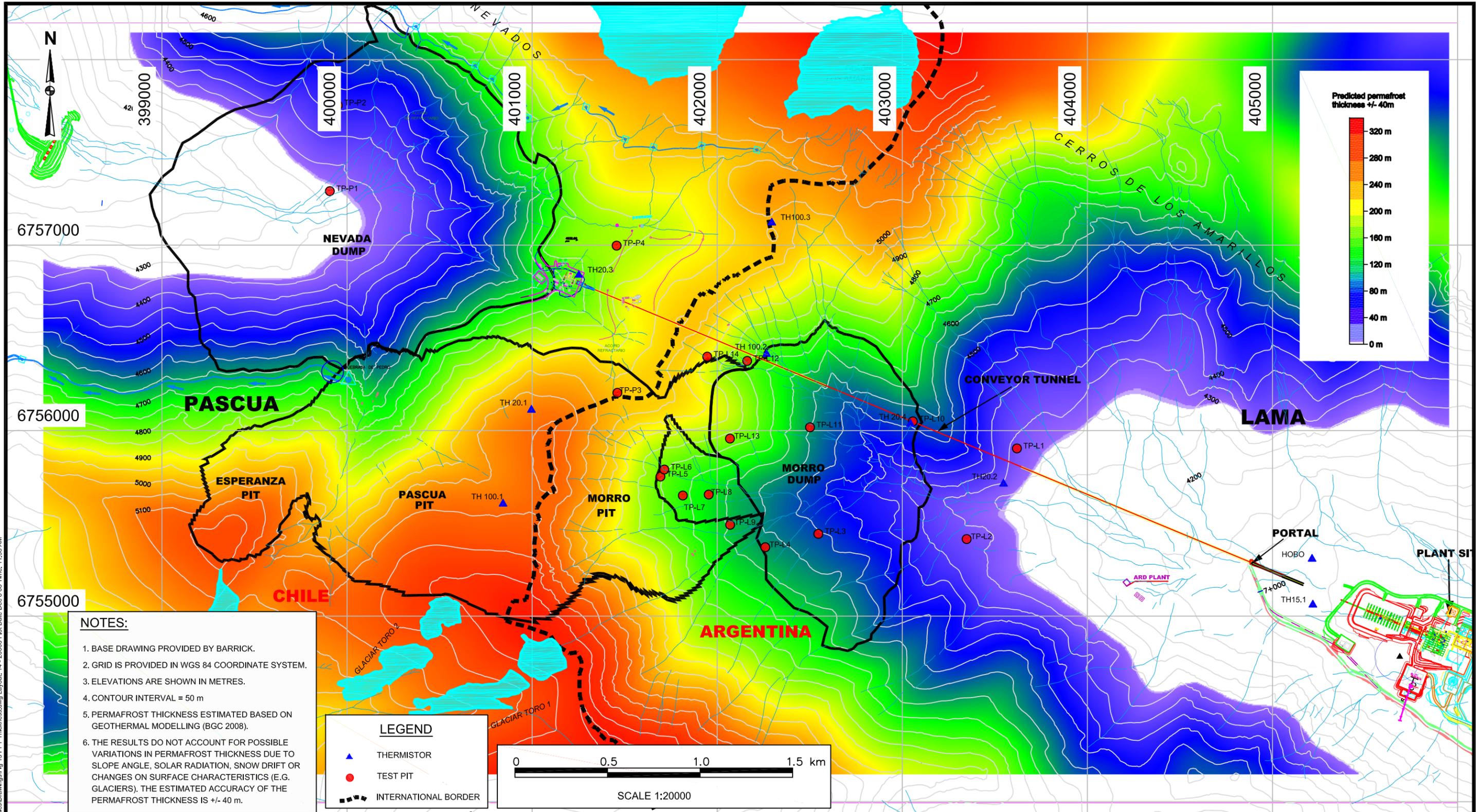
PROFESSIONAL SEAL:

DRAFT

BGC ENGINEERING INC.
AN APPLIED EARTH SCIENCES COMPANY

CLIENT:

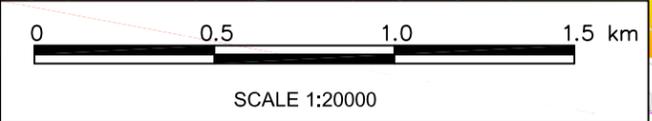
PROJECT:	PASCUA LAMA PERMAFROST CHARACTERIZATION STUDY		
TITLE:	PERMAFROST DISTRIBUTION MAP		
PROJECT No.:	0443-009A-02	FIGURE No.:	12
REV.:			0



- NOTES:**
1. BASE DRAWING PROVIDED BY BARRICK.
 2. GRID IS PROVIDED IN WGS 84 COORDINATE SYSTEM.
 3. ELEVATIONS ARE SHOWN IN METRES.
 4. CONTOUR INTERVAL = 50 m
 5. PERMAFROST THICKNESS ESTIMATED BASED ON GEOTHERMAL MODELLING (BGC 2008).
 6. THE RESULTS DO NOT ACCOUNT FOR POSSIBLE VARIATIONS IN PERMAFROST THICKNESS DUE TO SLOPE ANGLE, SOLAR RADIATION, SNOW DRIFT OR CHANGES ON SURFACE CHARACTERISTICS (E.G. GLACIERS). THE ESTIMATED ACCURACY OF THE PERMAFROST THICKNESS IS +/- 40 m.

LEGEND

	THERMISTOR
	TEST PIT
	INTERNATIONAL BORDER



K:\Projects\0443 BEASA Barrick\009A\02\Graphics\Drawings\Fig 13 PFT Thickness.dwg Plot Date Dec 8 08 Time: 11:38 AM

<small>AS A MUTUAL PROTECTION TO OUR CLIENT, THE PUBLIC, AND OURSELVES, ALL REPORTS AND DRAWINGS ARE SUBMITTED FOR THE CONFIDENTIAL INFORMATION OF OUR CLIENT FOR A SPECIFIC PROJECT. AUTHORIZATION FOR ANY USE AND/OR PUBLICATION OF THIS REPORT OR ANY DATA, STATEMENTS, CONCLUSIONS OR ABSTRACTS FROM OR REGARDING OUR REPORTS AND DRAWINGS, THROUGH ANY FORM OF PRINT OR ELECTRONIC MEDIA, INCLUDING WITHOUT LIMITATION POSTING OR REPRODUCTION OF SAME ON ANY WEBSITE, IS RESERVED PENDING BGC'S WRITTEN APPROVAL. IF THIS REPORT IS ISSUED IN AN ELECTRONIC FORMAT, AN ORIGINAL PAPER COPY IS ON FILE AT BGC ENGINEERING INC. AND THAT COPY IS THE PRIMARY REFERENCE WITH PRECEDENCE OVER ANY ELECTRONIC COPY OF THE DOCUMENT, OR ANY EXTRACTS FROM OUR DOCUMENTS PUBLISHED BY OTHERS.</small>					
REV.	DATE	REVISION NOTES	DRAWN	CHECK	APPR.

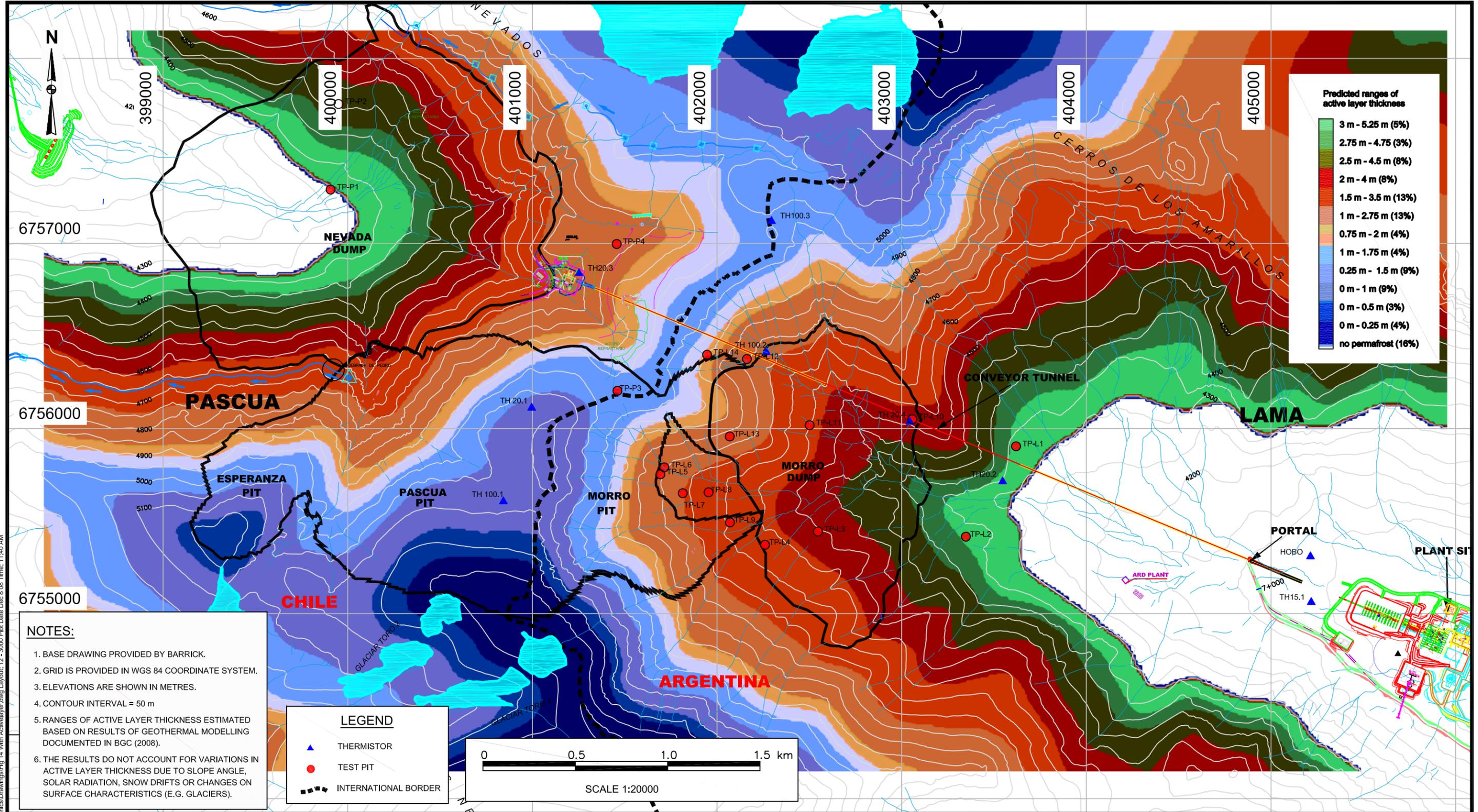
SCALE:	AS SHOWN
DATE:	DEC 2008
DRAWN:	JL
DESIGNED:	LUA
CHECKED:	GKC
APPROVED:	-

PROFESSIONAL SEAL:
DRAFT

BGC ENGINEERING INC.
AN APPLIED EARTH SCIENCES COMPANY

CLIENT:

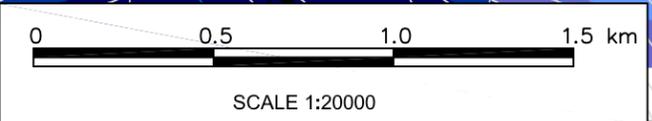
PROJECT: PASCUA LAMA PERMAFROST CHARACTERIZATION STUDY		
TITLE: ESTIMATED PERMAFROST THICKNESS		
PROJECT No.:	FIGURE No.	REV.:
0443-009A-02	13	0



- NOTES:**
1. BASE DRAWING PROVIDED BY BARRICK.
 2. GRID IS PROVIDED IN WGS 84 COORDINATE SYSTEM.
 3. ELEVATIONS ARE SHOWN IN METRES.
 4. CONTOUR INTERVAL = 50 m
 5. RANGES OF ACTIVE LAYER THICKNESS ESTIMATED BASED ON RESULTS OF GEOTHERMAL MODELLING DOCUMENTED IN BGC (2008).
 6. THE RESULTS DO NOT ACCOUNT FOR VARIATIONS IN ACTIVE LAYER THICKNESS DUE TO SLOPE ANGLE, SOLAR RADIATION, SNOW DRIFTS OR CHANGES ON SURFACE CHARACTERISTICS (E.G. GLACIERS).

LEGEND

- ▲ THERMISTOR
- TEST PIT
- INTERNATIONAL BORDER



AS A MUTUAL PROTECTION TO OUR CLIENT, THE PUBLIC, AND OURSELVES, ALL REPORTS AND DRAWINGS ARE SUBMITTED FOR THE CONFIDENTIAL INFORMATION OF OUR CLIENT FOR A SPECIFIC PROJECT. AUTHORIZATION FOR ANY USE AND/OR PUBLICATION OF THIS REPORT OR ANY DATA, STATEMENTS, CONCLUSIONS OR ABSTRACTS FROM OR REGARDING OUR REPORTS AND DRAWINGS, THROUGH ANY FORM OF PRINT OR ELECTRONIC MEDIA, INCLUDING WITHOUT LIMITATION POSTING OR REPRODUCTION OF SAME ON ANY WEBSITE, IS RESERVED PENDING BGC'S WRITTEN APPROVAL. IF THIS REPORT IS ISSUED IN AN ELECTRONIC FORMAT, AN ORIGINAL PAPER COPY IS ON FILE AT BGC ENGINEERING INC. AND THAT COPY IS THE PRIMARY REFERENCE WITH PRECEDENCE OVER ANY ELECTRONIC COPY OF THE DOCUMENT, OR ANY EXTRACTS FROM OUR DOCUMENTS PUBLISHED BY OTHERS.

REV.	DATE	REVISION NOTES	DRAWN	CHECK	APPR.

SCALE:	AS SHOWN
DATE:	DEC 2008
DRAWN:	JL
DESIGNED:	LUA
CHECKED:	GKC
APPROVED:	-

PROFESSIONAL SEAL:
DRAFT

BGC ENGINEERING INC.
AN APPLIED EARTH SCIENCES COMPANY

CLIENT: **BARRICK**

PROJECT: PASCUA LAMA PERMAFROST CHARACTERIZATION STUDY		
TITLE: ESTIMATED ACTIVE LAYER THICKNESS		
PROJECT No.:	FIGURE No.	REV.:
0443-009A-02	14	0



5.7 Caracterización de glaciares de roca

Un glaciar de roca o glaciar rocoso - corresponde a una geoforma compuesta por detritus y material fino cementados por cantidades variables de hielo, y que puede eventualmente contener un núcleo de hielo (Golder 2009b). Normalmente ocurre en áreas de permafrost (suelos congelados), al pie de farellones rocosos que aportan los fragmentos de roca que conforman el depósito. Por su constitución, los glaciares de roca se movilizan lentamente con velocidades anuales del orden de centímetros o decímetros, ocasionalmente algunos metros (Neuendorf, K.et al, 2005).

Según el origen del material, hay diversas clasificaciones de los glaciares de roca o de escombros, de los cuales, los más comunes son los glaciares de roca de talus y los glaciares de roca morrénicos, los que incluyen variaciones laterales tales como los protalus rampart o protalus lobes.

Un protalus rampart es una geoforma formada por una cresta o rampa que está compuesta por detritos gruesos, subangulares, sin estratificación y de mala selección, que se disponen generalmente al pie de los farellones o, más comúnmente, de gargantas rocosas. Para la formación de protalus rampart se requiere de la existencia de aportes de nieve en forma permanente y persistente (Ballantyne, 2002).

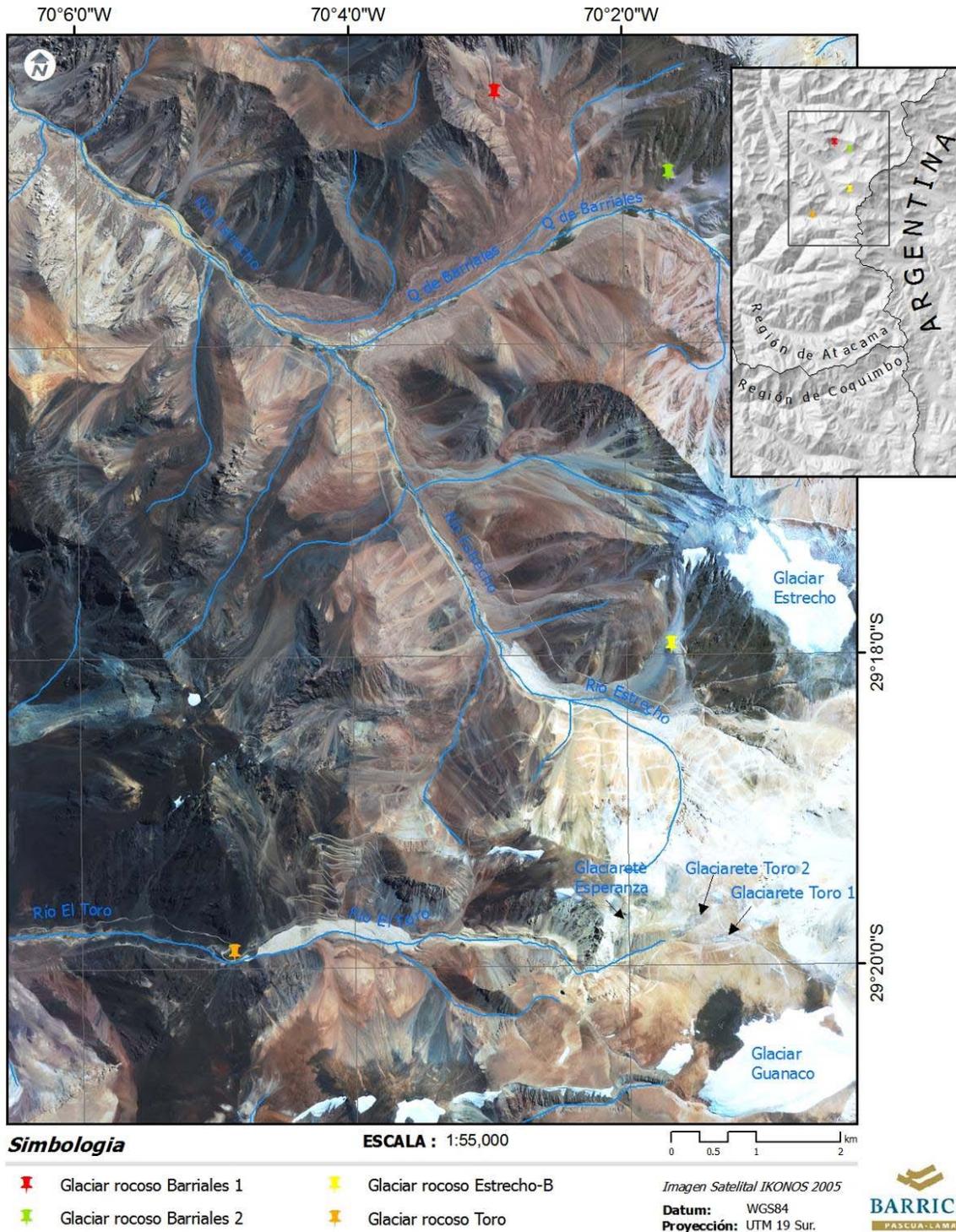
En la Figura 5-43 se muestra la ubicación de esta crioforma, mientras que la Figura 5-44 presenta fotografías representativas de dicho glaciar de roca.

En este informe se recogen los resultados de los estudios de los cuatro glaciares de roca en los alrededores del Proyecto (Barrales 1, Barrales 2, Toro y Estrecho B).



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

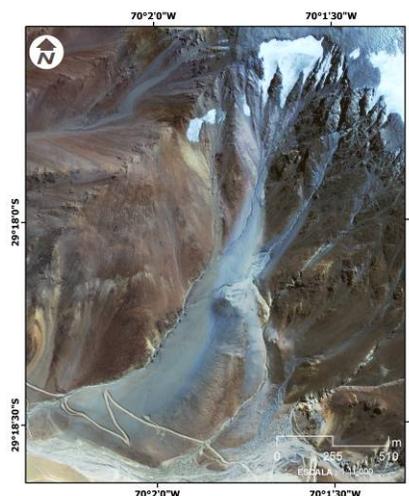
Figura 5-43: Ubicación de los glaciares de roca



Fuente: CMN 2008d



Figura 5-44: *Geoforma Estrecho B*



Fuente: registros de CMN

5.7.1 Trabajos realizados

- BGC 2005 Plan de Trabajo de la Hidrología de glaciares de Rocas
- GOLDER 2009b. Informe. Actualización información Geoforma Estrecho B, 079 215 5109-2.5-IT 003, 25 julio 2008 (Anexo Q), incluyendo los siguientes:
 - GOLDER 2006b. Technical Memorandum 0818_06 - Updated Volume Estimate, Estrecho B Geoforma.
 - GOLDER 2006c. Technical Memorandum 0621_06 - Seismic Survey Results (Resultados Perfilaje Sísmico Geoforma Estrecho B), 18 de agosto de 2006
 - GOLDER, 2006e. Glaciar de Roca en el Sector de Nevada Norte, 7 de enero de 2006.
- CMN. 2008d. Monitoreo de Movimiento de los Glaciares de Roca. Cuenca superior del río Huasco – Tránsito (Anexo M)
- CEAZA 2008b Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, 2004. 1 de diciembre de 2008 (Anexo F)
- GOLDER 2008f enero 2008, Revisión Geotécnica Botaderos Nevada Norte Proyecto Pascua-Lama, Revisión 1, 079 215 1018

5.7.2 Metodología

Desde el año 2006 CMN ha desarrollado una serie de estudios de línea base con el propósito de conocer la dinámica, comportamiento y características naturales, físicas e hídricas de Estrecho B. Además sigue monitoreando los otros tres glaciares de roca en la zona (Barrales 1, Barrales 2, Toro), con objeto de registrar información de referencia.



Los trabajos de línea base realizados, que se explican con mayor detalle en las siguientes secciones, tuvieron por objeto determinar:

- Volumen de los glaciares de roca;
- Recurso hídrico potencial de los glaciares de roca;
- La estratigrafía y el contenido de hielo en cada capa del Estrecho B;
- Estabilidad del Estrecho B; y
- El movimiento del Estrecho B y otras 3 geoformas considerados como glaciares de roca de referencia.

5.7.2.1 Estudios de volumen de los glaciares de roca

Se han aplicado varios métodos para estimar y medir el espesor del glaciar de roca Estrecho B (investigación sísmica, GPR y calicatas), así como se ha evaluado el área superficial (a partir de imágenes satelitales e investigaciones topográficas). A partir de esta información se han realizado estimaciones del espesor y volumen del glaciar de roca y espesor de la capa activa para caracterizar Estrecho B y estimar su aporte potencial en el balance hídrico.

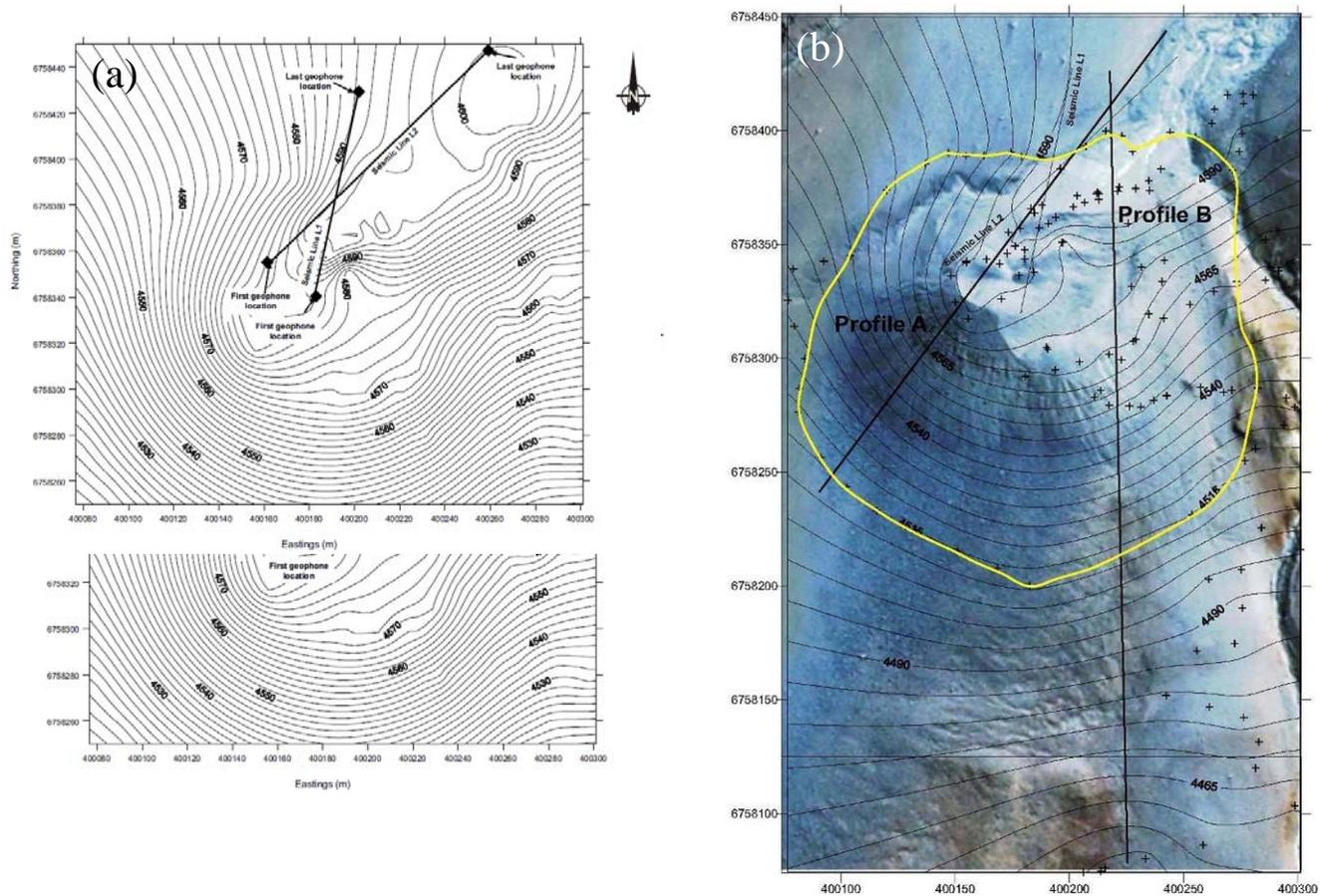
La metodología utilizada para llevar a cabo las investigaciones sísmicas, incluyó la ejecución de dos perfiles de refracción sísmica en el extremo Norte del cuerpo (Figura 5-45a), los cuales, a partir de velocidades de propagación de ondas sísmicas, identifican el espesor y la composición de las capas que componen el cuerpo y el contenido volumétrico del hielo en las diferentes capas (Golder 2009b).

Además, se llevaron a cabo investigaciones con GPR, el cual usa un proceso similar al empleado en la investigación sísmica, pero que en este caso depende del contraste de las propiedades eléctricas a través de la interfaz reflectora, además de las propiedades geométricas tales como la rugosidad del reflector para la propagación y la reflexión del radar (Golder 2009b).

Adicionalmente se estimó el área superficial de Estrecho B a partir de una investigación topográfica. En la Figura 5-45b se muestran las curvas de nivel resultantes y la extensión estimada de Estrecho B. Los resultados de esta investigación permitieron definir los límites del cuerpo, y estimar el área superficial.



Figura 5-45: (a) Líneas de investigación sísmica, (b) Investigación topográfica



Fuente: Golder 2009b

Finalmente de manera adicional, se realizó un proceso alternativo e independiente para estimar el área de los glaciares de roca a partir de imágenes ASTER del 2004 (CEAZA 2008b). Este proceso fue aplicado a todos los glaciares de roca presentes en la cuenca de Huasco Alto.

5.7.2.2 Recurso hídrico potencial de los glaciares de roca

A partir de la estimación del volumen de hielo en el Estrecho B, se realizaron unas estimaciones del rol hidrico de este Glaciar de roca por el proceso de fusión del hielo contenido.

Para estimar el volumen de hielo disponible en el Estrecho B se utilizaron los siguientes métodos y supuestos:

- Se asumió un rango del contenido de hielo entre 50 y 90% del volumen total, de acuerdo a información registrada en la literatura (BGC 2005).



- De igual forma que el punto anterior, se asumió un contenido de hielo entre 50 y 90% del volumen total, el que fue complementado con los resultados de las investigaciones sísmicas y con la inspección visual del contenido de hielo de una calicata excavada de 5 m de profundidad. (Golder 2009b).
- Usando el método de Brenning (2005), se estimó el contenido de hielo en todos los glaciares de roca en la cuenca de Huasco alto, asumiendo que el hielo del glaciar presenta una densidad de $0,8\text{kg/m}^3$, el espesor de los glaciares es 30m, y un contenido de hielo en su volumen de 50% (CEAZA 2008b).

5.7.2.3 La estratigrafía y el contenido de hielo en cada capa del Estrecho B

A partir de la información entregada por los perfiles de refracción sísmica anteriormente mencionados; se excavó una zanja de 5 m de profundidad (Figura 5-46) en la misma ubicación del perfil sísmico, (Figura 5-50) para describir visualmente la estratigrafía y calibrar las indicaciones del perfil sísmico (Golder 2009b).

Figura 5-46: calicata en Estrecho B, enero 2006



Fuente: Golder 2009b



5.7.2.4 El movimiento de los glaciares de roca

El movimiento de los glaciares de roca se evaluó mediante técnicas de topografía. Se realizaron mediciones de distancias y ángulos desde una base instalada fuera de la geoforma, hasta prismas instalados sobre la superficie del glaciar (CMN 2008d).

La estación total utilizada corresponde a una Geodimeter modelo 500, que entrega una precisión de lectura angular al segundo y distancia al mm. El registro de distancias y ángulos se realiza siempre a la misma hora y por duplicado.

La Figura 5-47 presenta fotografías del pilar donde se apoya la Estación Total y de uno de los prismas. Por su parte, la Figura 5-48 presenta las ubicaciones de los ocho prismas instalados en Estrecho B. Desde la fecha de comienzo de las mediciones, el 6 de diciembre de 2005, se han realizado 24 mediciones. La última medición registrada disponible fue el 9 de enero del 2008 (CMN 2008d). Cabe señalar que debido a las inclemencias del tiempo sólo seis de los ocho prismas se mantienen operativos.

Además de los prismas, cabe destacar que en la geoforma Estrecho B se dispone de un punto de control adicional denominado "Vértice meseta antiguo", el cual fue instalado en el año 1982 y cuyos datos permiten obtener una estimación de las tasas de deformación ocurridas desde entonces.

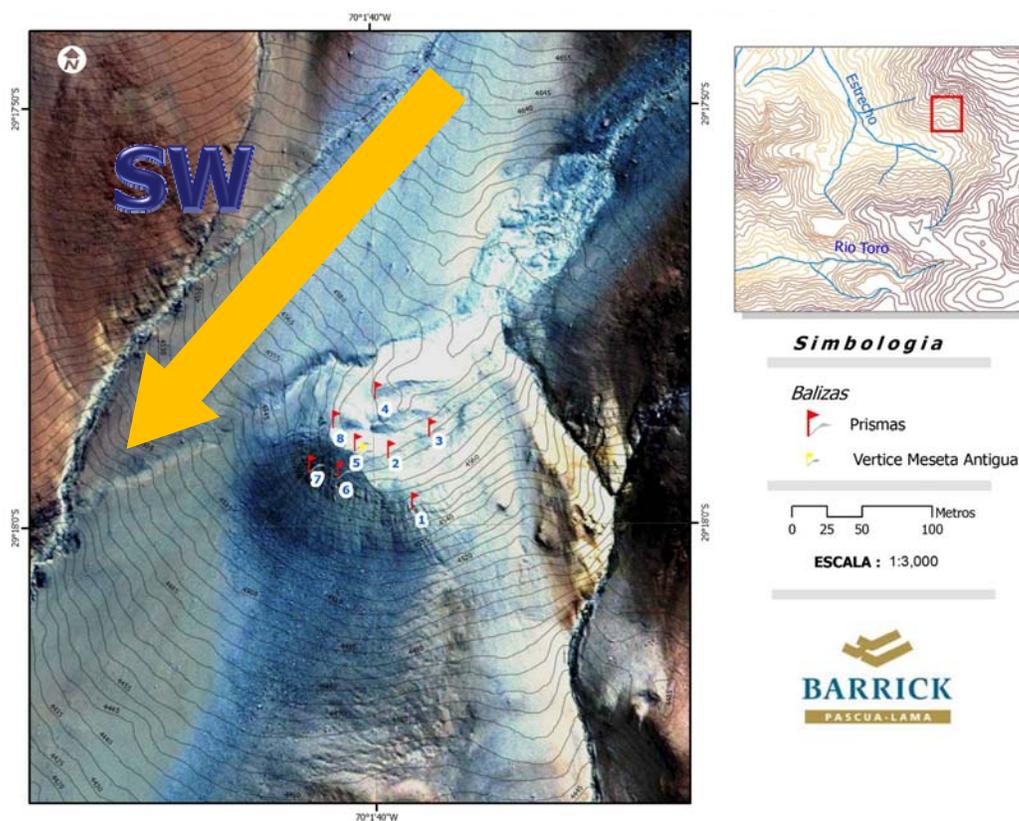
Figura 5-47: Mediciones de movimiento de glaciar de roca Estrecho B (a) Pilar estación total, (b) Prisma no.1



Fuente. CMN 2008d



Figura 5-48: Ubicación de las balizas en glaciar de roca Estrecho B



Fuente: CMN 2008d

Además del monitoreo del movimiento del glaciar Estrecho B, se han monitoreado otros tres glaciares de roca en la zona del proyecto, mediante la instalación de los siguientes puntos de monitoreo:

- **Glaciar de roca Toro** (superficie de alrededor de 3 ha y elevación entre los 4.000 y 4.100 ms.n.m.). Se llevó a cabo mediciones del movimiento en siete puntos de control desde el 06 de noviembre de 2006 al 23 de enero 2008.
- **Glaciar de roca Barriales 1** (superficie de 47 ha y elevación entre los 4.100 y los 4.500 ms.n.m.). Se llevó a cabo las mediciones de movimiento en tres puntos de control desde el 22 de diciembre 2007 al 17 de marzo 2008.
- **Glaciar de roca Barriales 2** (superficie de 8,5 ha y elevación entre los 4.100 y los 4.300 ms.n.m.). Se llevó a cabo las mediciones de movimiento en dos puntos de control desde el 22 de diciembre 2007 al 17 de marzo 2008.



5.7.3 Resultados

5.7.3.1 Volumen de los glaciares de roca

A partir de la investigación topográfica realizada, se calculó una superficie de 3,04 ha para Estrecho B (Golder 2009b). Por su parte, el espesor de la geoforma determinado por los perfiles extrapolados A y B se estima en un máximo aproximado de 30 m. A partir de estos datos, se determina que el cuerpo del glaciar de roca posee alrededor de 390.000m³ de material.

A un nivel más regional, en la Tabla 5-1, se presenta la estimación del área ocupada por todos los glaciares de roca presentes en la cuenca de Huasco Alto, que corresponde a un área total de 630 ha (CEAZA 2008b).

5.7.3.2 Recurso hídrico potencial de los glaciares de roca

Los varios estudios han resultado en las siguientes estimaciones de volumen de hielo para el glaciar Estrecho B:

- Volumen de agua potencial situado entre 110.000 y 190.000 m³ (BGC 2005).
- Después de la investigación sísmica, y contando con un mejor conocimiento de las capas geológicas que componen esta crioforma, se estimó el volumen de hielo contenido en Estrecho B en un rango entre 34.850 y 152.800m³ (Golder 2006c).
- Posteriormente se mejoró el rango estimado a partir de los datos sísmicos obtenidos con GPR y el entendimiento del Estrecho B, lo que arrojó una estimación del orden de 41.550 a 159.500 m³ (Golder 2009b).

Si bien todas las estimaciones, por distintos métodos, arrojan valores de volúmenes de hielo en rangos muy similares, se ha considerado que los más actualizados (41.550 a 159.500 m³) son los más representativos.

Considerando que es incierto el grado en que se derrite el hielo, para simular el peor escenario se considera un periodo de fusión potencial de 50 años. Con esta premisa se estimó un caudal promedio anual de deshielo que varía entre 0,03 y 0,1 l/s (Golder 2009b).

Adicionalmente, el estudio con una perspectiva regional arroja un volumen total del hielo estimado para los 40 glaciares de roca en la cuenca del Huasco Alto, de 95Mm³ (Tabla 5-1), con un volumen de agua equivalente estimado del orden de 76 Mm³ (CEAZA 2008b). Considerando estas cifras, y aplicando un criterio conservador, es posible señalar que el glaciar de roca Estrecho B aloja menos del 0,02% del hielo contenido en todos los glaciares de roca presentes en la cuenca del Huasco Alto.

5.7.3.3 La estratigrafía y el contenido de hielo en el Estrecho B

Se analizó una calicata de 5 m de profundidad excavada sobre la geoforma Estrecho B específicamente en la capa A (capa activa). Ésta está compuesta, en general, por una grava arenosa con un 3 a 5 % de contenido de hielo que se presenta en forma de cristales, los que recubren las partículas a partir de los 3 m de profundidad, y aportan una baja cementación (Golder 2009b).

La Figura 5-49 presenta la ubicación de los perfiles sísmicos, mientras que la Figura 5-50 y la Figura 5-51 muestran los resultados de estas investigaciones. El contacto entre los colores azul y verde representa la interface entre el lecho de roca y la geoforma.

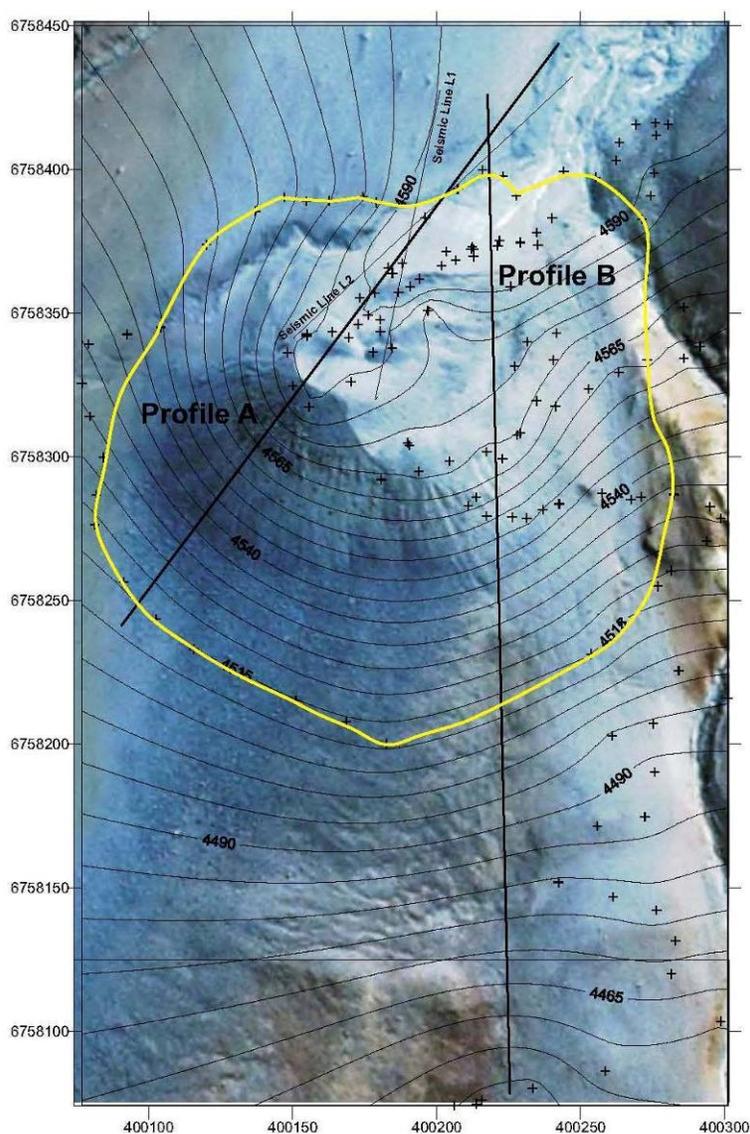


A partir de los resultados de las investigaciones sísmicas, se puede estimar que la potencia máxima del glaciar Estrecho B sería de 30m, y el perfil estaría compuesto, en términos generales, por los siguientes:

- Una capa activa (en acuerdo con la definición proporcionado en la sección 5.6) de 6m espesor promedio,
- Una capa de suelos de compactación incipiente de hasta 18 m.
- Una capa promedio de permafrost de 5m (Golder 2009b).

La Tabla 5-17 presenta las descripciones de las capas observadas, las estimaciones de los contenidos de hielo y el volúmen de hielo estimado para cada capa.

Figura 5-49: Ubicación perfiles sísmicos (L1 y L2) y perfiles de modelamiento de volumen (A y B)

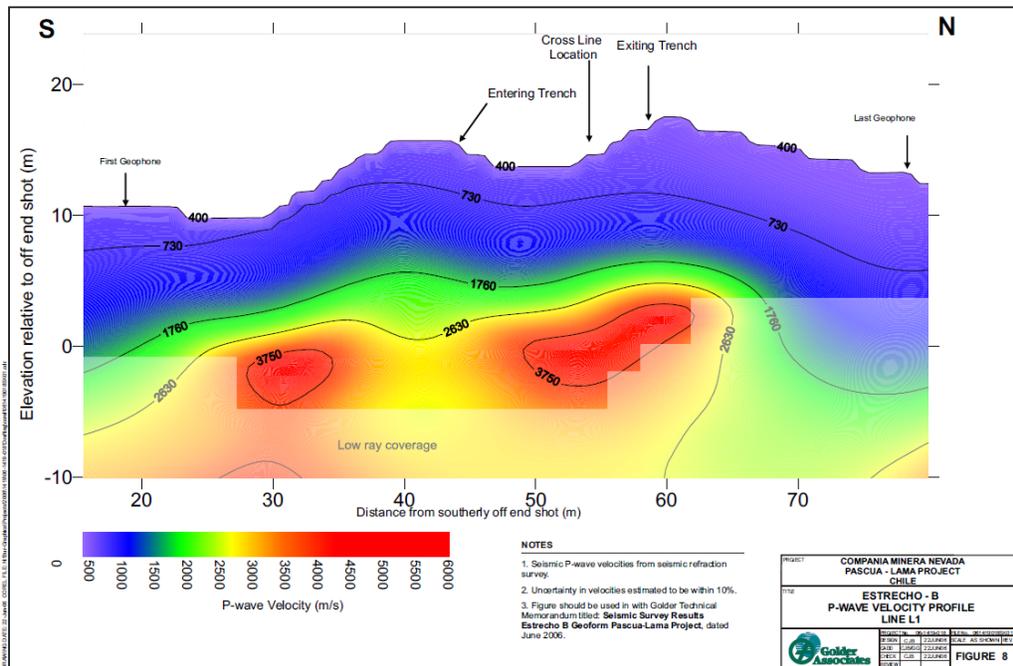


(Fuente: Golder 2009b)



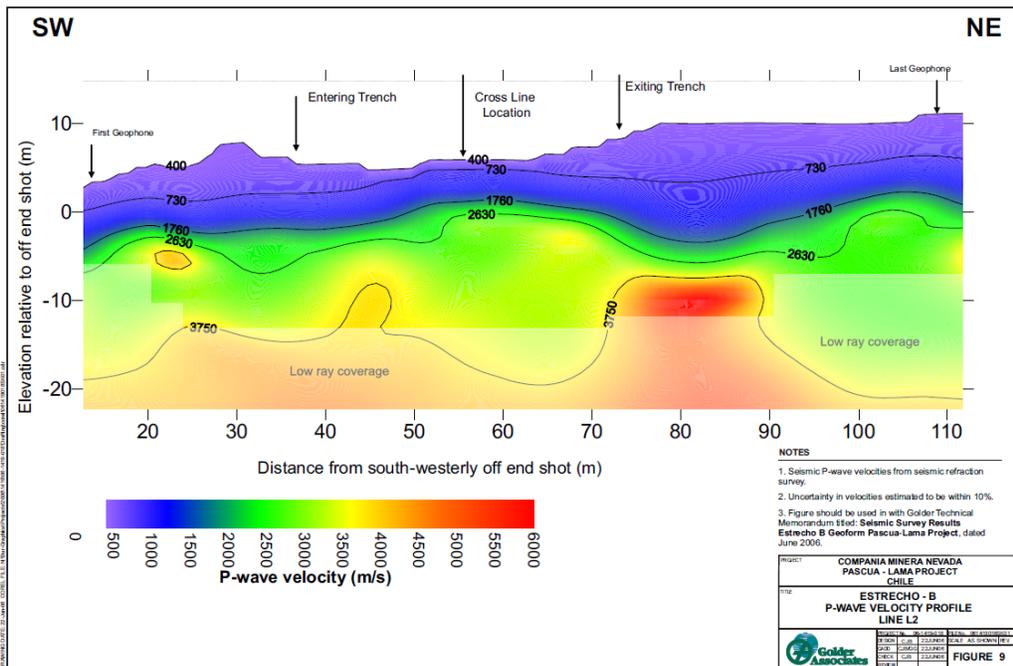
RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 5-50: Resultados de la investigación sísmica (perfil 1), Estrecho B



Fuente: Golder 2009b

Figura 5-51: Resultados de la investigación sísmica (perfil 2), Estrecho B



Fuente: Golder 2009b



Tabla 5-17: Contenido de hielo en las capas de la geoforma Estrecho B

Capa	Velocidad de ondas sísmicas P (m/s)	Material	Comentario	Volumen Capa (m ³)	Posible Contenido de Hielo** (%)	Posible Volumen de Hielo (m ³)
A	500-730	Suelo Seco	Capa activa*	103,700	0	0
B	730-1730	Suelos de compactación y humedad en aumento	Geoforma sin hielo consolidado	161,000	5%	8.050
					20%	32.200
C	2650-3500	Permafrost, suelos cementados	Geoforma con hielo consolidado	134,000	20%	26.800
					40%	53.600
					50%	67.000
					90%	120.600
D	2650-3500	Contacto con roca basal	No es Geoforma: con hielo intersticial	134,000	5%	6.700
E	3750-6000	Roca Basal	Menor contenido de hielo	-	-	-

Fuente: Golder 2009b

* Se defina la Capa Activa en la sección 5.6

** Estimado como el espacio intersticial del suelo y como valores del contenido de hielo reportados en la literatura

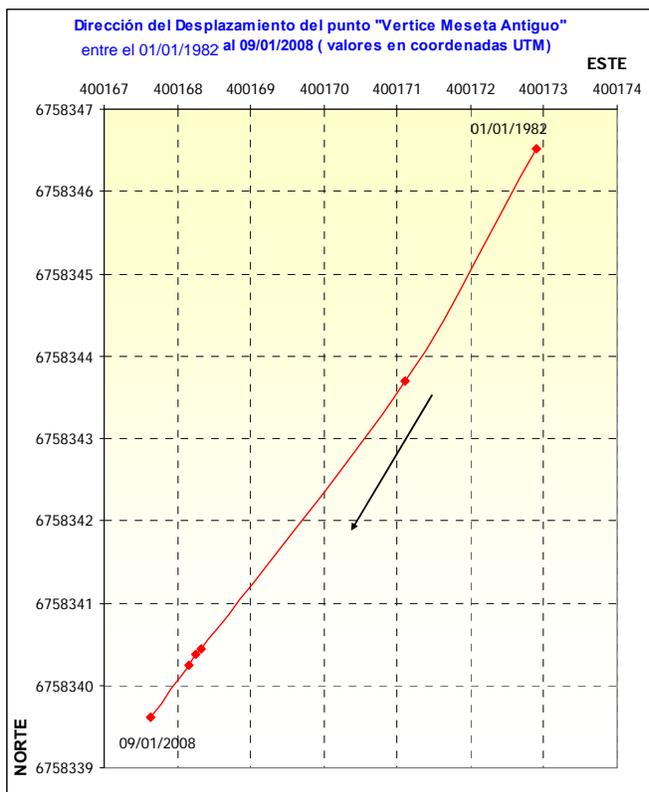
5.7.3.4 Movimiento de las glaciares de roca

El desplazamiento que ha experimentado la geoforma Estrecho B medido en el punto de control “Vértice Meseta Antigua”, en los últimos 26 años, es aproximadamente 30 cm/año (Golder 2009b). La Figura 5-52 presenta las mediciones de este desplazamiento entre los años 1982 y 2008.

Esta tasa promedio de largo plazo es muy similar a las mediciones de desplazamiento observadas en seis prismas de control en los que se realizaron mediciones en el periodo de 2005 a 2008, los cuales demostraron un desplazamiento promedio de 30 cm /año (Golder 2009b) (ver Figura 5-53). Por lo tanto, las mediciones de largo plazo y corto plazo son correspondientes y el desplazamiento promedio de la geoforma Estrecho B se puede estimar aproximadamente 30 cm/año.

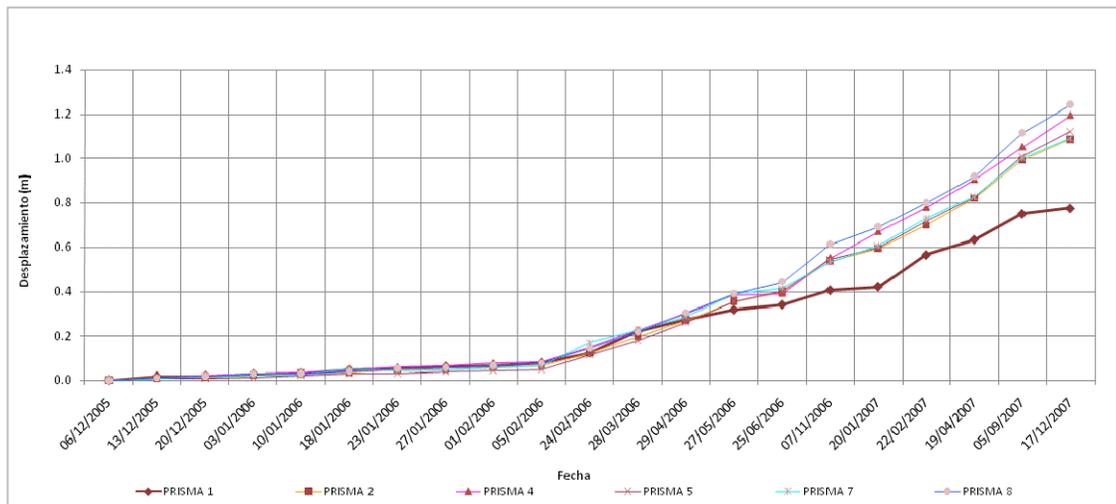


Figura 5-52: Dirección del desplazamiento del punto "Vértice Meseta Antigua", Estrecho-B



Fuente: Golder 2009b

Figura 5-53: Desplazamiento de los prismas de control topográfico ubicados en la geoforma Estrecho-B



Fuente: Golder 2009b



A partir de los desplazamientos calculados es posible clasificar el glaciar Estrecho B como activo, es decir, que ha experimentado desplazamientos verticales y horizontales a través del tiempo. Por otra parte, esta geoforma presenta características geomorfológicas acordes a esta clasificación; estas son: un frente del lóbulo no meteorizado, ausencia de grandes surcos en el área de la cabecera y existencia de arcos detríticos (CMN 2008d).

La dirección predominante del desplazamiento de la geoforma Estrecho B es la Suroeste (Figura 5-48 y Figura 5-52), lo que es consistente con el eje longitudinal del glaciar de roca.

En relación a los otros tres glaciares de roca cuyos movimientos son objeto de monitoreo mediante controles topográficos, los resultados se presentan a continuación:

Glaciar de roca Toro. Las mediciones de movimiento realizadas sobre los puntos de control muestran que durante el periodo de monitoreo hubo un desplazamiento promedio de apenas 0,7 cm/año, siendo la dirección de desplazamiento, con las incertidumbres del caso, hacia el Suroeste. Es un glaciar de roca inactivo o fósil.

Glaciar de roca Barriales 1. Durante el periodo de monitoreo los puntos de control se desplazaron a un promedio mensual de 8,5 cm/mes. Es un glaciar de roca activo.

Glaciar de roca Barriales 2. Durante el periodo de monitoreo los puntos de control se movieron entre 4 y 12 cm, estableciendo un promedio mensual de desplazamiento de 3,7 cm/mes. Es un glaciar de roca activo.

En síntesis, puede indicarse que el desplazamiento que han experimentado los glaciares de roca monitoreados en la cuenca superior de río Huasco - Tránsito ha resultado acorde a las velocidades de avance esperadas para este tipo de formas, activas e inactivas; detectándose una alta correlación entre los criterios morfológicos que definen formas activas - pasivas, con los resultados de las mediciones topográficas efectuadas en terreno.



6.0 CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS QUE DETERMINAN LA EVOLUCIÓN DE LOS CUERPOS DE HIELO DESCUBIERTOS

6.1 Evolución de superficies de los cuerpos de hielo

6.1.1 Trabajos realizados

- Milana, 2005. Línea Base de la Criósfera. Adenda 2. Anexo III-A.
- Golder, 2005g. Estudios de Campo de Hielo y Glaciares Proyecto Pascua-Lama, 059-2701, incluyendo los siguientes
 - Golder, 2002b. Glacier Survey Pascua-Lama, January 2002, 019-2021
 - Golder, 2003b. Estudio de Glaciares Marzo 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2007
 - Golder, 2004a. Estudio de Glaciares Diciembre 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2041
- Golder, 2005q. Abril 2005, Monitoreo de Glaciares de Noviembre de 2004, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- CEAZA, 2008a. Evolución de la superficie de 20 cuerpos de hielo en la zona y al Sur del Proyecto Pascua-Lama, entre 1955 y 2007. (Anexo G)

6.1.2 Metodología

Se realizaron varias evaluaciones de área y volumen de los glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Esperanza, y glaciar Guanaco durante el período comprendido entre los años 2001 y 2005 (Golder 2002b, 2003b, 2004a y 2005q). Estas evaluaciones se basaron en los datos obtenidos en las investigaciones GPR, las cuales se realizaron para conocer los espesores de los glaciares, así como en cálculos de superficies de glaciares realizadas sobre fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes años.

En 2002, se llevó a cabo una interpretación de los cambios observados en las áreas y volúmenes estimados entre los años 1981 y 2000, utilizando fotografías aéreas de los glaciares (Golder, 2002b). No se disponía de mediciones de espesor en 1981 y por consiguiente se supuso un espesor similar al que se midió en 2001. En 2005, se continuaron los trabajos de interpretación de los cambios observados en el área de los glaciares, realizando un estudio comparativo contando con imágenes Landsat de 1986 y 2001 (Golder 2005q).

Adicionalmente en 2005, se realizó un estudio independiente en cual se emplearon todas las fotografías aéreas disponibles en el área del Proyecto hasta esa fecha (Milana, 2005). En particular, se estimó la superficie de los cuerpos de hielo para estimar la evolución de los Glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco y Estrecho.

En 2008 se actualizó el proceso iniciado por Milana (2005) y se ampliaron sus alcances, estudiándose la evolución durante los últimos cincuenta años de la superficie de 20 cuerpos de hielo ubicados en la zona del Proyecto minero Pascua-Lama (Figura 3-2). Para cada glaciar y glaciarete se han obtenido los límites del cuerpo de hielo en los años 1955, 1978, 1996, 2005 y 2007. El objetivo de este trabajo fue determinar las tendencias o patrones de comportamiento general de las criofomas en las últimas décadas (CEAZA 2008a).



La pérdida del volumen de los glaciares es un indicador muy importante para entender su evolución, no obstante el cálculo o estimación del volumen es un proceso complicado, especialmente cuando se trata de glaciaretos, y considerando que las primeras mediciones de balance de masa empezaron en 2002 y las de balance de energía en 2007, la única manera de cuantificar la evolución de los glaciares y glaciaretos es reconstruir la evolución de su superficie (CEAZA, 2008a). Generalmente la relación entre la superficie de un glaciar y las condiciones climáticas no es tan directa como la existente entre el balance de masa y el clima, ya que hay un tiempo de repuesta que demuestran los glaciares para ajustar su superficie a cambios de balance de masa. Sin embargo, considerando que los glaciares de Pascua-Lama son glaciares pequeños (menos de 2 km²), el cambio de superficie debido a un balance de masa negativo es muy notorio a través de periodos cortos, por lo que se puede asumir entonces que el tiempo de respuesta de estos glaciares es corto (del orden de algunos años).

En este análisis se emplearon fotografías aéreas e imágenes satelitales. El mejor momento corresponde a los registros de verano (idealmente a fines del verano), dado que la cobertura de nieve es mínima. Así se pueden delinear los cuerpos de hielo, identificando el hielo descubierto y el hielo cubierto de detritos. Las fuentes de información empleadas en este trabajo se indican en la Tabla 6-1

Tabla 6-1: Imágenes utilizadas en el estudio de evolución de los cuerpos de hielo.

Tipo de Imagen	Año	Número de imagen	Escala o tamaño de píxel
Fotografía aérea	1955 (27 de abril)	8825 y 8826	1/70,000
Fotografía aérea	1956 (5 de abril)	26183 y 26184	Aprox. 1/60,000
Fotografía aérea	1978 (31 de mayo)	3997 y 3998	1/60,000
Fotografía aérea	1996 (26 de nov.)	1122 y 1123	1/50,000
Imagen Ikonos	2005 (1 de marzo)	n/d	1 m
Imagen Ikonos	2007 (26 de marzo)	226552	1 m

Fuente: CEAZA 2008a

n/d - no disponible

El proceso de ortorectificación, procesamiento de los datos y manejo de la incertidumbre se explica en detalle en Anexo G (CEAZA, 2008a). Después del procesamiento de las imágenes, la delimitación de los glaciares fue realizada manualmente.

6.1.3 Resultados

6.1.3.1 Glaciares/glaciaretos del presente estudio

En 2002, los resultados de las estimaciones de área y volumen de cinco de los glaciares involucrados en este estudio indican que entre 1981 y 2000 todos los glaciares disminuyeron su superficie, (Golder, 2002b).

En 2005, se realizó una evaluación del cambio del área de los glaciares y los glaciaretos utilizando datos de Landsat de 1986 y 2001 (Golder, 2005q). La Tabla 6-2 muestra los resultados obtenidos.



Tabla 6-2: Cambios estimados en los glaciares y glaciaretos entre 1986 y 2001

Glaciar	Estimación de área, Imagen 1986 (ha)	Estimación de área, Imagen 2001 (ha)	Cambio en área (%)
Toro 1	19,3	13,9	-28
Toro 2	22,6	12,9	-43
Esperanza	6,6	7,9	20
Guanaco	215,3	197,4	-8

Fuente: Golder 2005q

Los resultados presentados en la Tabla 6-2 muestran una tendencia general hacia una disminución de la superficie de los glaciares.

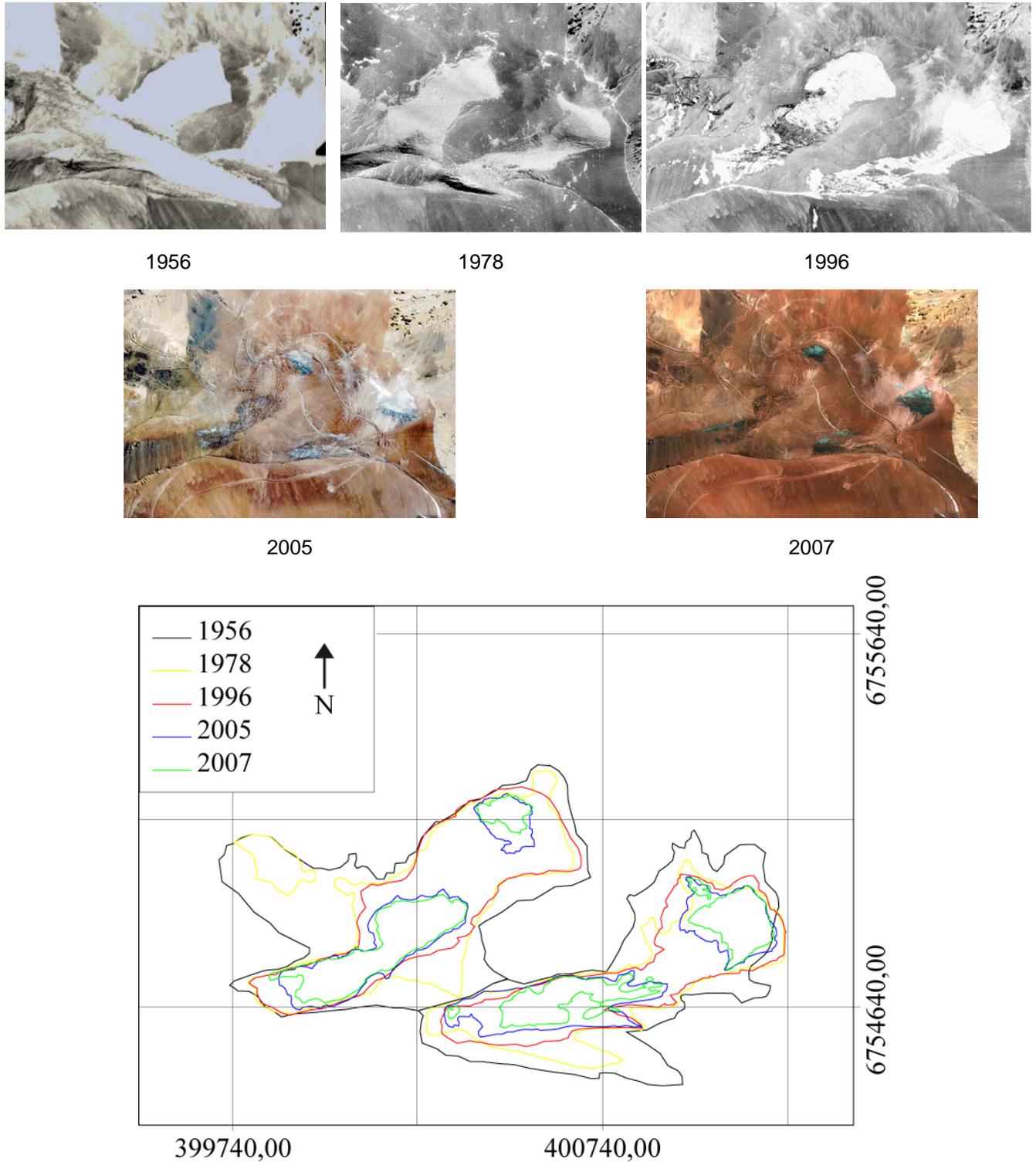
En la Figura 6-1 y la Tabla 6-3 se muestran los resultados de la evolución de los Glaciaretos Toro 1 y Toro 2. En este caso, las superficies de las criofomas disminuyeron un 72 % y 79% respectivamente en el periodo 1956-2007, pasando desde valores de 26 ha y 32 ha registradas al inicio del periodo, hasta las 7 ha cada una, que presenta la última imagen.

En la Figura 6-2 y la Tabla 6-4 se muestran los resultados de la evolución del Glaciarete Esperanza. En este caso, las superficies de las criofomas disminuyeron un 78% en el periodo 1956-2007, pasando desde valores de 19 ha, registrada al inicio del periodo, hasta las 4 ha, que presenta la última imagen.

La Figura 6-3 y la Tabla 6-5 muestran los resultados de la evolución del Glaciar Guanaco. En este caso, la superficie de la criofoma disminuyó un 15 % en el periodo 1955-2007, desde un total de 217 ha registradas al inicio del periodo, hasta las 183 ha que presenta en la última imagen. CEAZA (2008a) (Anexo G) proporciona resultados de este tipo para los 20 cuerpos de hielo cercanos al Proyecto.



Figura 6-1: Evolución de los glaciaretos Toro 1 y Toro 2 entre 1956 y 2007



Fuente: CEAZA 2008a



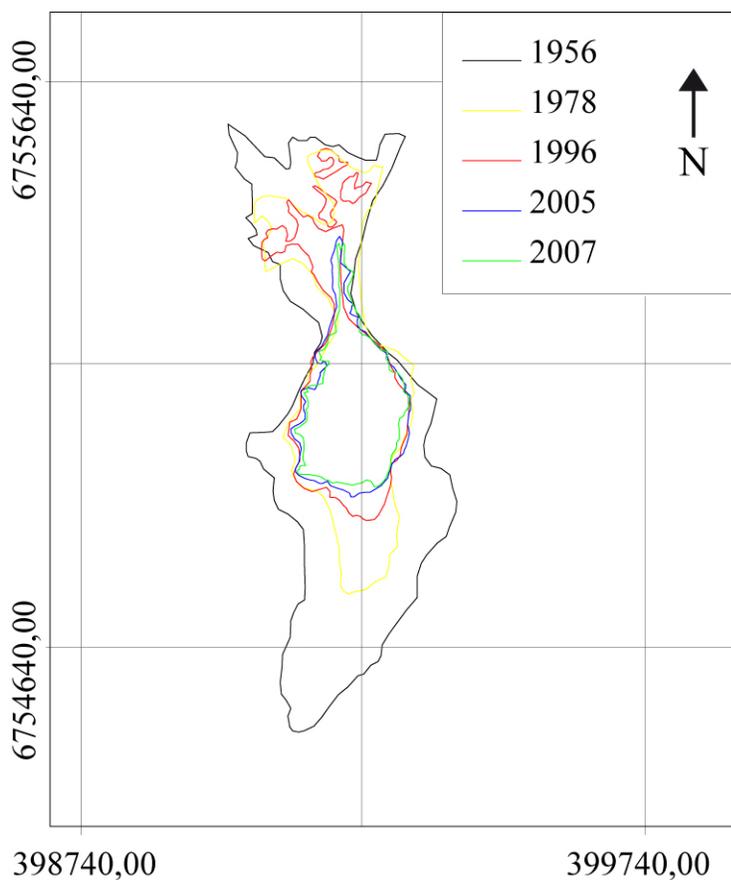
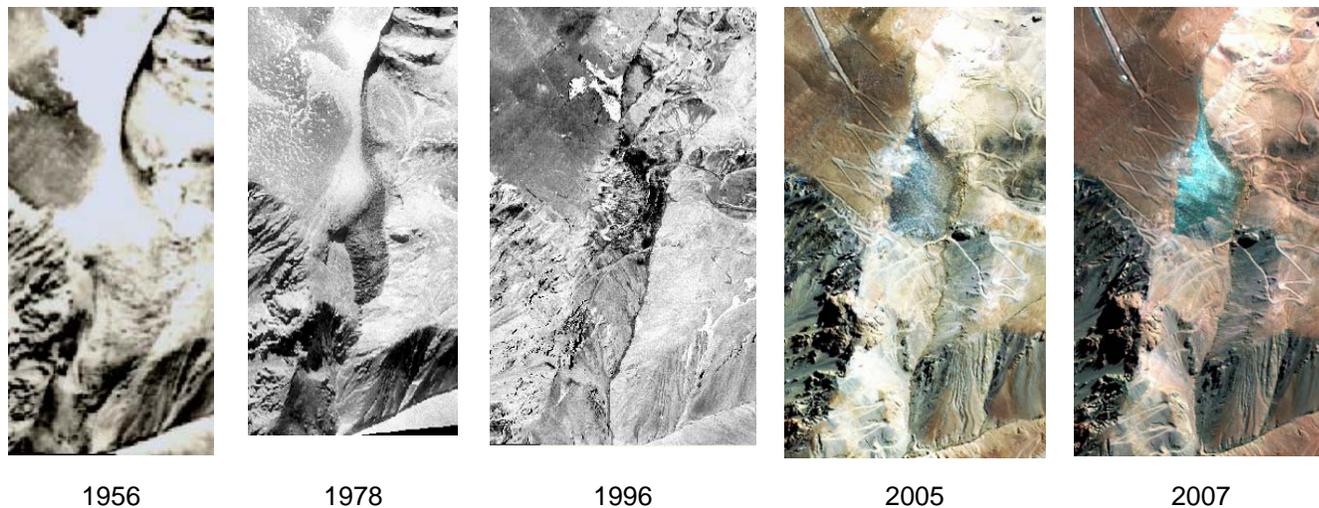
Tabla 6-3: Superficie del glaciaretos Toro 1 y Toro 2 entre 1955 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo

Observación	Año	Superficie (km ²) Toro 1	Superficie (km ²) Toro 2
Superficie (km ²)	1956	0,257 ± 0,02	0,316 ± 0,02
	1978	0,160 ± 0,02	0,185 ± 0,02
	1996	0,142 ± 0,01	0,166 ± 0,01
	2005	0,087 ± 0,01	0,070 ± 0,01
	2007	0,071 ± 0,01	0,066 ± 0,01
Pérdida de superficie (%)	1956-2007	-72	-79
Pérdida anual promedio de superficie por periodo (ha.a ⁻¹)	1956-1978	-0,4 ± 0,15	-0,6 ± 0,16
	1978-1996	-0,1 ± 0,14	-0,1 ± 0,15
	1996-2007	-0,6 ± 0,14	-0,9 ± 0,12
	1956-2007	-0,4 ± 0,05	-0,5 ± 0,05

Fuente: CEAZA 2008a



Figura 6-2: Evolución del glaciarrete Esperanza entre 1956 y 2007



Fuente: CEAZA 2008a



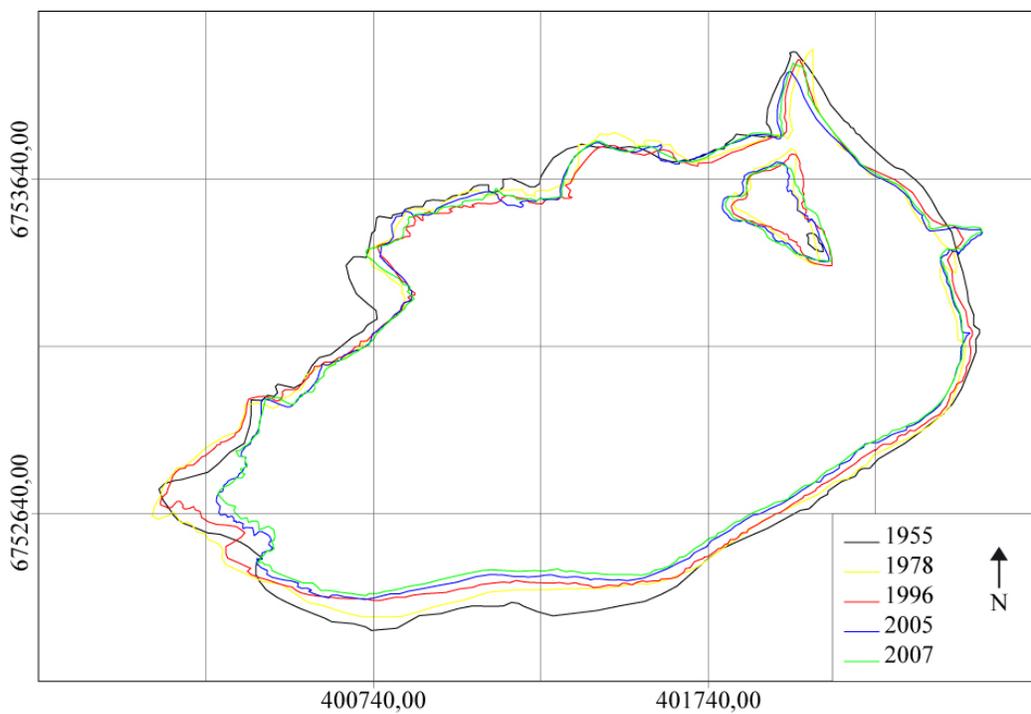
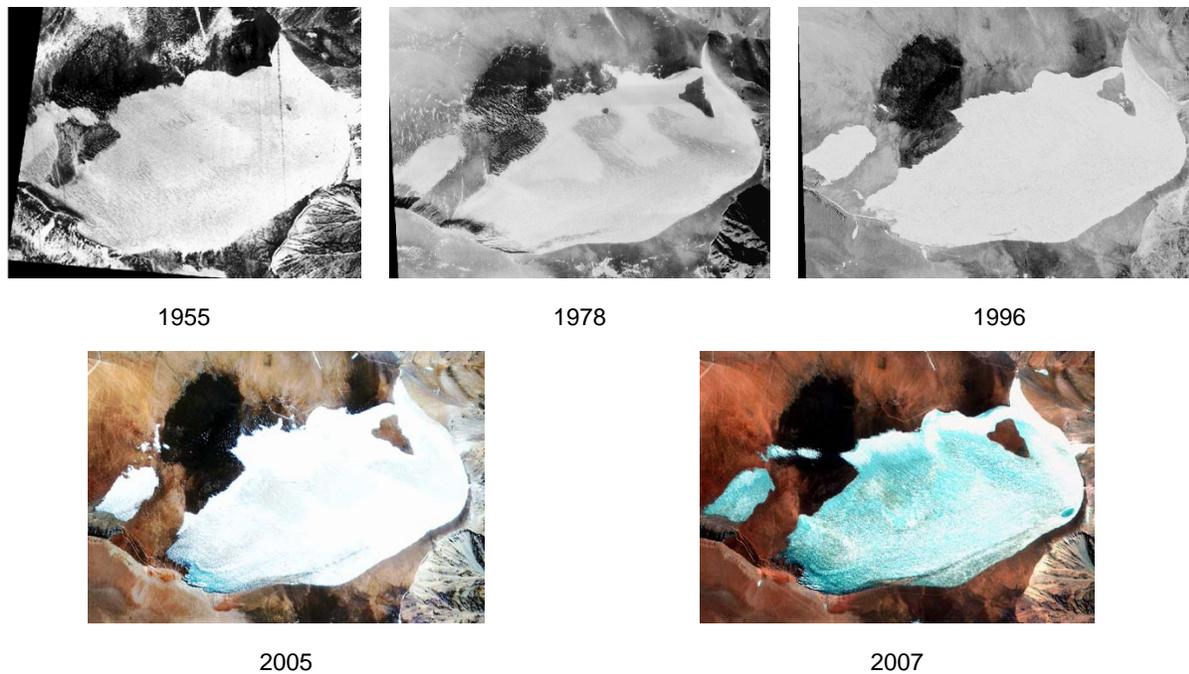
Tabla 6-4: Superficie del glaciarete Esperanza 1956 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo

Observaciones	Año	Superficie (km ²)
Superficie (km ²)	1956	0,186 ± 0,02
	1978	0,091 ± 0,02
	1996	0,059 ± 0,01
	2005	0,044 ± 0,01
	2007	0,041 ± 0,01
Pérdida de superficie (%)	1956-2007	-78
Pérdida anual promedio de superficie por período (ha.a ⁻¹)	1956-1978	-0,4 ± 0,12
	1978-1996	-0,2 ± 0,10
	1996-2007	-0,2 ± 0,08
	1956-2007	-0,3 ± 0,04

Fuente: CEAZA 2008a



Figura 6-3: Evolución del glaciar Guanaco entre 1955 y 2007



Fuente: CEAZA 2008a



Tabla 6-5: Superficie del glaciar Guanaco entre 1955 y 2007, y pérdida promedio anual en el periodo

Observaciones	Año	Superficie (km ²)
Superficie (km ²)	1955	2,170 ± 0,08
	1978	2,003 ± 0,05
	1996	1,935 ± 0,03
	2005	1,849 ± 0,01
	2007	1,836 ± 0,03
Pérdida de superficie (%)	1955-2007	-15
Pérdida anual promedio de superficie por período (ha.a ⁻¹)	1955-1978	-0,7 ± 0,40
	1978-1996	-0,4 ± 0,33
	1996-2007	-0,9 ± 0,37
	1955-2007	-0,6 ± 0,16

Fuente: CEAZA 2008^a

Es posible observar que todos los cuerpos de hielo sin excepción muestran una tendencia a la reducción de su superficie, siendo las mayores reducciones las que registran los glaciaretos Esperanza, Toro 1 y Toro 2, con una variación negativa de hasta 79 % (CEAZA, 2008a).

Los tres glaciares de mayor tamaño, Guanaco, Estrecho y Los Amarillos, todos ellos de más de 150 ha de extensión, presentan una reducción en un rango de -15 a -33 %. En el mismo período, los glaciaretos presentan disminuciones de superficie por lo general mayores al 50 %.

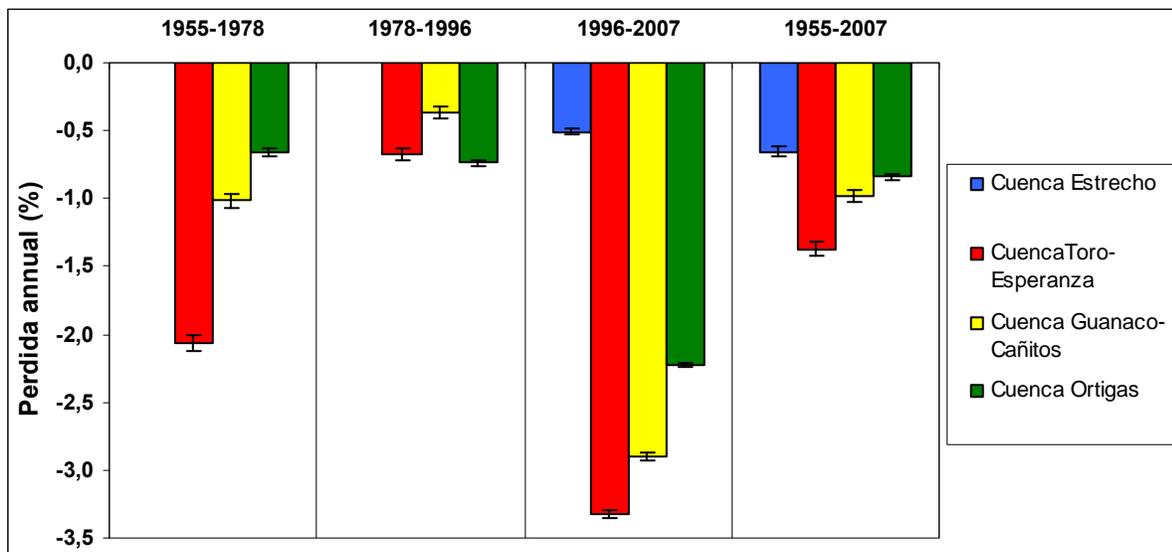
En la Sección 5.2, en la Tabla 5-4, se presentan los valores de áreas y volúmenes más actualizados para cada glaciar.

6.1.3.2 Glaciaretos por cuencas

La evolución de los glaciaretos por cada cuenca se muestra representado en la Figura 6-4, en que se muestran valores promedio de los glaciaretos de cada una de las cuencas.



Figura 6-4: Pérdida promedio anual de superficie por periodo, considerando solamente los glaciaretos

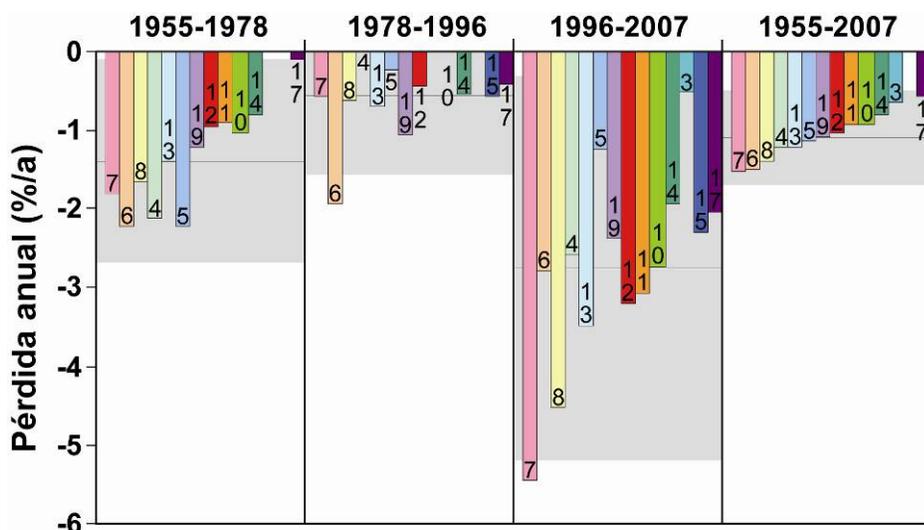


Fuente. CEAZA 2008a

Entre los años 1955 y 2007 la pérdida total de superficie fue de 55 +/- 16 % (promedio, para todos los glaciaretos). Sobre el periodo total (1955-2007) la pérdida promedio por año es de 1,08 +/- 0,30 % (CEAZA, 2008a). La Figura 6-5 muestra los resultados de la evaluación de la evolución de cada glaciarete en el área del estudio.



Figura 6-5: Pérdida promedio anual de superficie por periodo para todos los glaciaretos de la zona de estudio



Nota: La Figura 3-2 presenta los números que corresponden a los glaciaretos en la zona del Proyecto
Fuente. CEAZA 2008a

La Figura 6-4 muestra que durante el periodo 1978-1996, la pérdida de superficie es menor que durante los dos otros periodos, para todos los glaciaretos estudiados (promedio de 0,56 +/- 0,51 %) (CEAZA, 2008a). Cabe destacar que existiría una mayor pérdida de superficie de los glaciaretos entre 1996 y 2007. Sin embargo, todos los glaciaretos han sufrido un retroceso de sus superficies durante el periodo comprendido entre los años 1955 y 2007.

Los glaciaretos Toro 1 (no. 8), Toro 2 (no. 7) y Esperanza (no. 6) muestran retroceso durante todos los periodos del estudio. Toro 1 y Toro 2 sufrieron pérdidas mayores entre 1996 y 2007, mientras el cambio en superficie de Esperanza ha sido constante entre 1995 y 2007.

6.1.3.3 Glaciares por cuenca

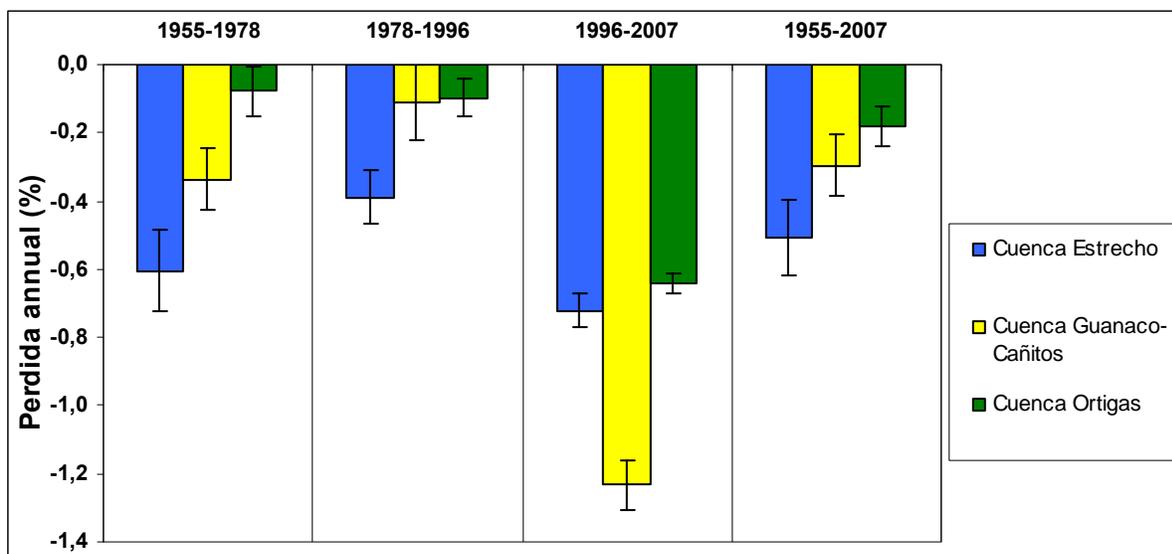
Se consideró la evolución de los glaciares por cada cuenca, lo cual incluye lo siguiente:

- Cuenca Del Estrecho, la cual contiene 1 glaciar (Estrecho, N°1)
- Cuenca Guanaco-Cañitos, la cual contiene dos glaciares (incluyendo Guanaco, N°9).

Para cada cuenca, el valor representado en la Figura 6-6 corresponde al promedio de los glaciares de la cuenca. Este gráfico indica que se puede notar un aumento de la pérdida durante el último periodo (1996-2007), no obstante existe una pérdida promedio desde el comienzo de los registros (1955).



Figura 6-6: Pérdida promedio anual de superficie por periodo, considerando solamente los glaciares



Fuente. CEAZA 2008a

La Figura 6-6 muestra que existía una pérdida mayor de superficie de los glaciares y glaciaretos entre 1996 y 2007 y que todos los glaciares y glaciaretos han sufrido un retroceso de sus superficies durante el periodo comprendido entre los años 1955 y 2007. Por otra parte durante el periodo 1978-1996, la pérdida de superficie es menor que durante los dos otros periodos, para todos los glaciares estudiados.

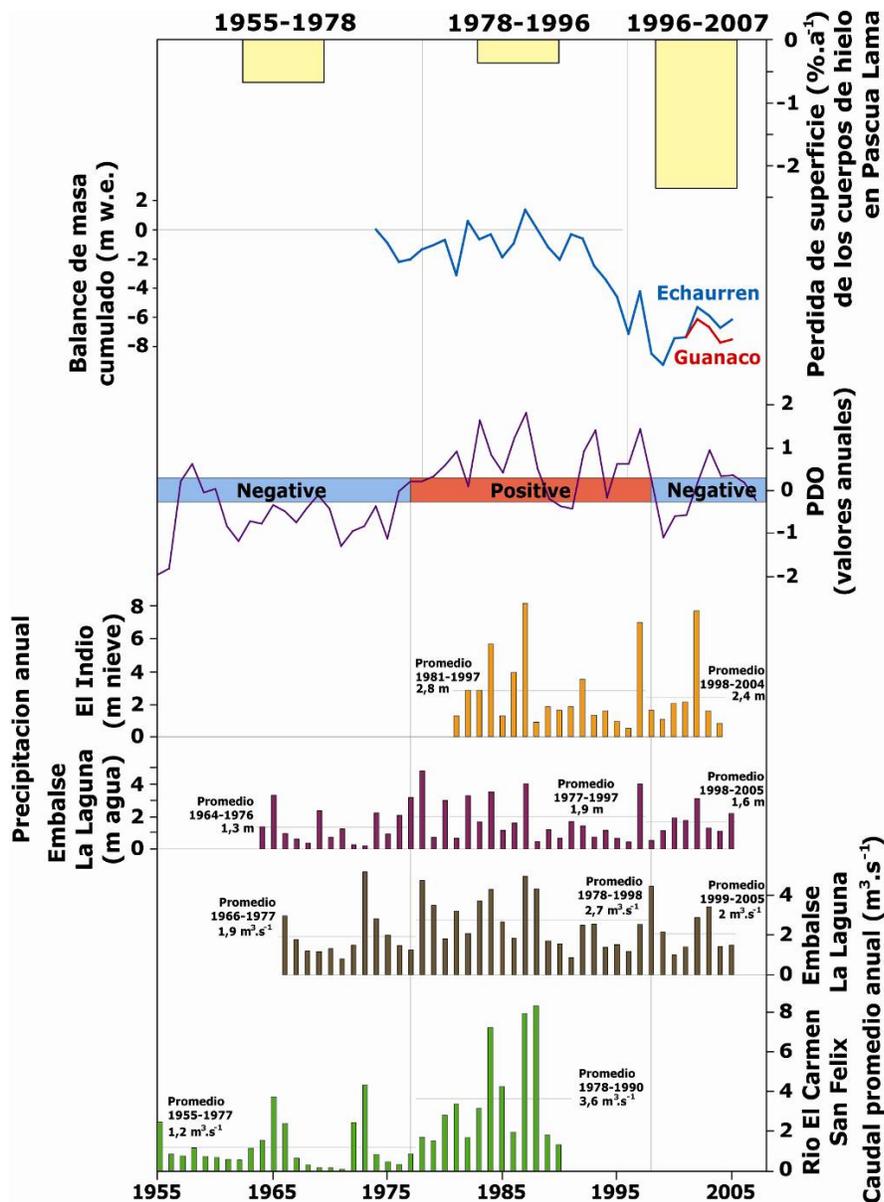
Sobre el periodo total (1955-2007) la pérdida más importante tanto en porcentaje como en hectáreas se registró para la cuenca Del Estrecho.

La Figura 6-7 muestra los resultados de la comparación entre la pérdida promedio anual de superficie de los cuerpos de hielo estudiados, el balance de masa acumulado de los glaciares Echaurren y Guanaco, el índice PDO y datos de precipitaciones y caudales.



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 6-7: Comparación entre las pérdidas, balance de masa, PDO, precipitación y caudal.



Fuente: CEAZA 2008^a

PDO = Pacific Decadal Oscillation

De lo anterior se deduce que todos los cuerpos de hielo mantienen una misma tendencia de pérdida de superficie y balance de masa negativo, tendencia que es mucho más marcada en los cuerpos más pequeños (glaciaretos) debido al efecto de borde, es decir, por tener una mayor proporción de su masa expuesta en situación de borde en relación a su superficie total.



La Tabla 6-6 muestra la evolución proyectada para las criofomas objeto de estudio, indicando los años que restan para su desaparición completa si se mantienen las pérdidas anuales registradas hasta la fecha (CEAZA 2008a).

Tabla 6-6: Estimación de la desaparición de los cuerpos de hielo.

Nombre local	Superficie 2007 (km ²)	Pérdida anual de superficie (km ² /año)		Desaparición (años)	
		1996-2007	1955-2007	según tasa 1996-2007	según tasa 1955-2007
Estrecho	1,30	0,010	0,009	127	146
Esperanza	0,04	0,002	0,003	25	15
Toro 2	0,07	0,009	0,005	7	14
Toro 1	0,07	0,006	0,004	11	20
Guanaco	1,84	0,009	0,006	205	286

n/d no disponible

Fuente: CEAZA 2008a

La Tabla 6-6 indica que independiente de la tasa de retroceso ocupada, sin intervención alguna, es probable que los glaciaretos y glaciares indicados puedan desaparecer durante los próximos 25 y 300 años, respectivamente.

Por otra parte, el estudio independiente realizado por otros expertos mediante la interpretación de fotografías aéreas, permite observar a lo largo de los años el lento pero inexorable decaimiento de los cuerpos Toro 1, Toro 2 y Esperanza, cuyo hielo descubierto probablemente desaparecería entre 2010 y 2020 de continuar su evolución registrada a 2005 (Milana, 2005). En el mismo documento se expone que existe una tendencia negativa evidente en los glaciares Guanaco y Estrecho, aunque la probabilidad de sobrevivencia de ellos supera los 200 – 300 años. Por lo tanto, las predicciones de Milana están en el orden de las predicciones de CEAZA, y por ello son consideradas factibles.

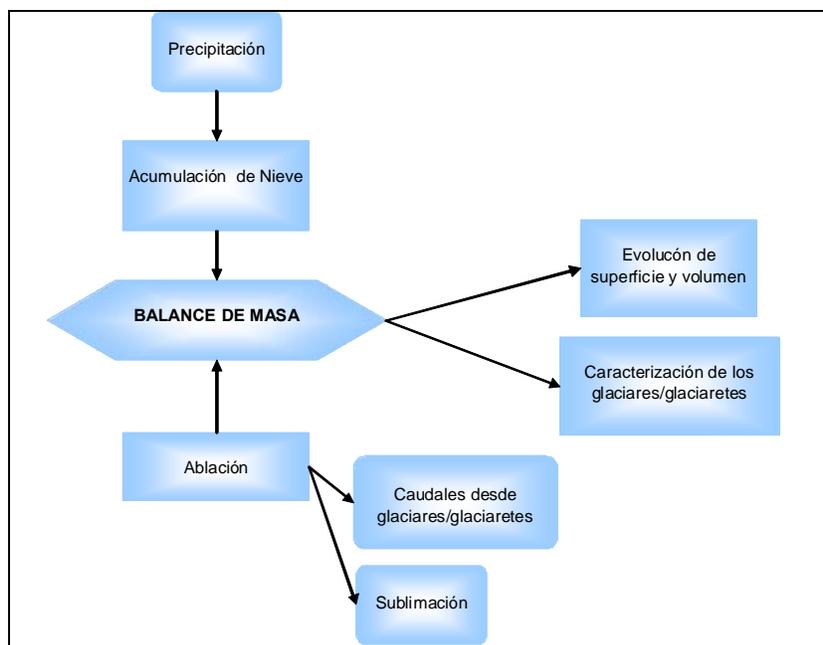
6.2 Balance de masa

El balance de masa de un glaciar es un medio para evaluar cambios en la masa del glaciar, especialmente cambios interanuales (UNESCO, 1970). Los glaciares de la zona del Proyecto ganan masa (acumulación) principalmente por caída de nieve y pierden masa (ablación) principalmente por derretimiento y sublimación. Si la acumulación excede la ablación en un año en particular, el glaciar tendrá un balance de masa positivo y crecerá. Un balance de masa negativo y disminución resultan de una ablación que supera la acumulación.

La Figura 6-8 presenta un diagrama de flujo con las entradas y salidas consideradas en el balance de masa.



Figura 6-8: Diagrama de flujo – Balance de masa



Fuente: Elaboración propia

6.2.1 Trabajos realizados

- Vallon M.y Vincent C. 2005. Balance Invernal 2005 de los Glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco (Adenda 2 Anexo III-B)
- CEAZA, 2008e. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2007-08. 26 de agosto de 2008 (Anexo K)
- CEAZA, 2008f,. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2006-07. 26 de agosto de 2008 (Anexo J)
- Golder, 2005d. Memorando Técnico 003. Relevamiento de cuerpos de hielo descubierto en la cuenca del río Huasco-Algodones 28 Oct 2005;
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Anexo III-A. Adenda 2. EIA Modificación Proyecto Pascua-Lama).
- Golder, 2009d. Balance de Masa, verano de 2006, 079 215 5019-IT001, 22 de enero de 2009 (incluye Technical Memorandum 05-1419-018-5600 - 2005/2006 Pascua-Lama Field Summary)
- Golder, 2002b. Glacier Survey Pascua-Lama, January 2002, 019-2021
- Golder, 2003a. Investigación de reconocimiento de los Glaciares de las Quebradas Ortigas y Poterillos, diciembre 2003, 039-2041



- Golder, 2003b. Estudio de Glaciares Marzo 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2007
- Golder, 2004a. Estudio de Glaciares Diciembre 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2041
- GOLDER, 2005q, Abril 2005, Monitoreo de Glaciares de Noviembre de 2004, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- Golder, 2005g. Estudios de Campo de Hielo y Glaciares Proyecto Pascua-Lama, 059-2701 (que incluye como anexos Golder 2002b, 2003a, 2003b, 2004a y 2005)
- Knight Piésold 2009, Modelo de Simulación Hidrogeológico Pascua, Rev.C, 25 de marzo 2009

6.2.2 Metodología

6.2.2.1 Manto de nieve

En marzo de 2003, se instalaron equipos para la evaluación específica del balance de masa en las crioformas consideradas en este estudio (Golder, 2003b). Se instalaron estacas y se llevaron a cabo mediciones iniciales del manto de nieve en Toro 1 (5 estacas), Toro 2 (6 estacas), Esperanza (3 estacas) y Guanaco (6 estacas). El número de estacas cambia a lo largo de los años, ya que algunas desaparecen y otras se caen durante el periodo de medición (debido a las condiciones climáticas que afectan a la superficie de las crioformas).

Las mediciones de las estacas, junto con los perfiles de GPR, proporcionan datos de los cambios ocurridos en la superficie de cada glaciar, los cuales aportan valiosa información para el cálculo del balance de masa. Se calculó el balance de masa de los glaciares del estudio para los siguientes periodos (los estudios de los cuales proviene la información se incluye entre paréntesis):

- Los años de 2001 a 2003 (Golder, 2003b).
- Entre marzo de 2003 y diciembre de 2003 (Golder, 2004a).
- Entre marzo de 2003 y junio de 2004 (Golder, 2005q).
- Entre 2005 y 2006 (Golder, 2009d).
- Entre 2006 y 2007 (CEAZA, 2008f)
- Entre 2007 y 2008 (CEAZA, 2008e)

Se realizaron las mediciones de acumulación de nieve a fines del invierno y de la ablación de la nieve y del hielo durante el verano (CEAZA 2008e), sobre una red de balizas o estacas instaladas sobre los glaciares (Guanaco y Estrecho) y glaciaretos (Toro 1, Toro 2 y Esperanza). La Figura 6-9 muestra el proceso de instalación de las balizas por CEAZA. La Figura 6-10 presenta un ejemplo de la distribución de las balizas en el glaciar Guanaco, mientras que los Anexos J y K muestran las distribuciones en todos los glaciares.

La suma de los dos parámetros resultantes (acumulación y ablación) dió como resultado el balance de masa a escala anual. Utilizando la densidad de la nieve medida en el glaciar mismo, se convierten las mediciones de acumulación y ablación en altura de agua equivalente.



Figura 6-9: Instalación de balizas de ablación/acumulación en la superficie de los glaciares



Fuente: CEAZA 2008f

6.2.2.2 Balance de masa

Los estudios realizados han utilizado distintas metodologías para calcular las estimaciones de balance de masa. Todos utilizaron los datos de las mediciones de profundidad de nieve de las estacas, pero algunos utilizaron metodologías complementarias, las cuales se explican a continuación:

En 2005 el estudio se realizó mediante observaciones de la acumulación invernal de nieve sobre los glaciares a través de perforaciones de poca profundidad (< 4m) y medidas complementarias de densidad del manto de nieve y en los testigos de nieve asociados. Con esta información fue posible convertir los espesores de nieve en alturas de agua equivalente, usando una distribución de densidad de nieve con profundidad. También se evaluaron los contornos y los límites de las superficies de nieve (Valon et al., 2005).

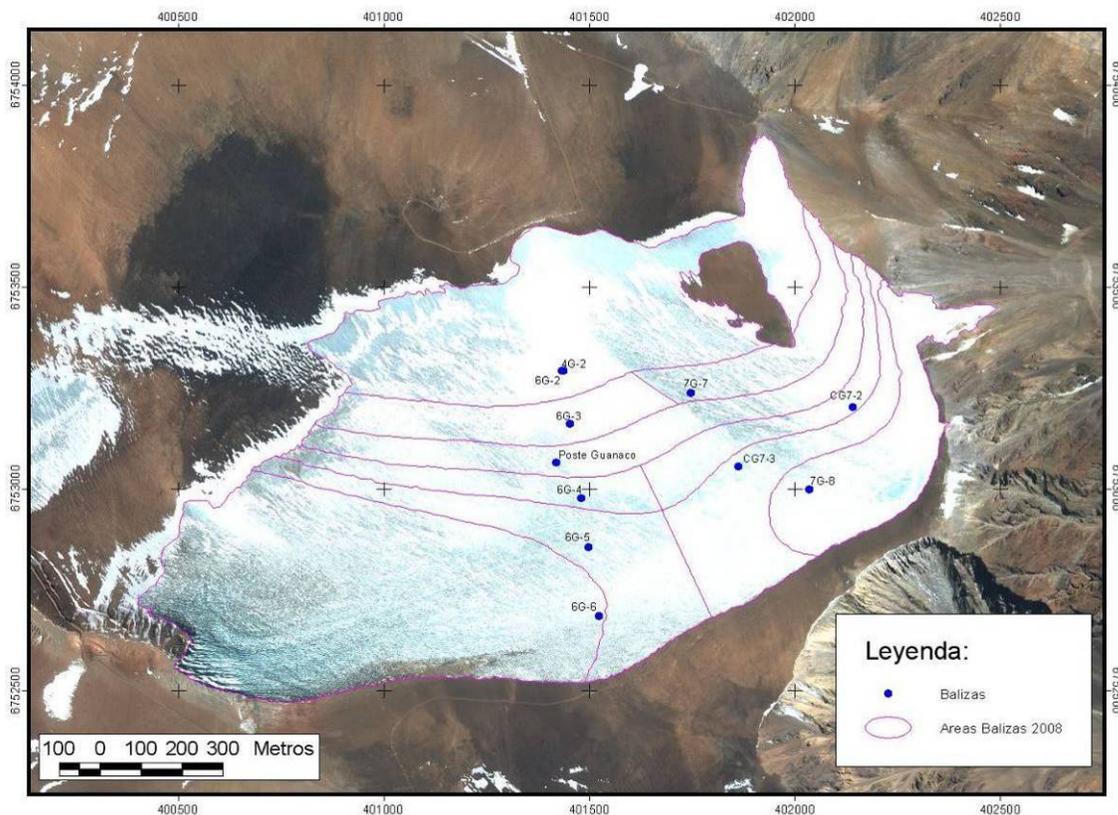
En 2008, el balance de masa calculado en cada punto mediante una baliza se extrapola sobre una cierta área asignada, para la cuál se considera que el punto de baliza es representativo a fin de determinar el volumen de agua perdida o ganada sobre cada sector del glaciar. La suma de los volúmenes de agua de cada sector representa el volumen total de agua ganado o perdido en todo el glaciar (CEAZA, 2008e, 2008f).

En el periodo 2004-2005 la asignación de áreas a cada baliza se realizó identificando las zonas de acumulación de nieve, las zonas preferenciales de ablación, y la información derivada de los perfiles GPR en trazados repetidos. Por su parte, la asignación de áreas en el periodo 2006-2007 y 2007-2008 se llevó a cabo mediante la definición de rangos de altitud sobre la base de un modelo digital de terreno y una imagen Ikonos de 2005, además de analizar la localización de la baliza sobre el glaciar y su distribución en los rangos de altura previamente definidos. Adicionalmente fue necesario considerar la condición de la superficie del glaciar al final del verano y a veces ajustar las áreas para asegurar que la baliza fuese representativa del área asignada.

Además de los balances de masa para el período 2006 - 2008, se realizó un balance de masa resumido para los años 2003 a 2006.



Figura 6-10: Áreas balizas glaciar Guanaco



Fuente: CEAZA 2008f

El área total del glaciar o glaciarete se obtiene mediante la interpretación de imágenes de satélite (Landsat 2000, Ikonos 2005, Ikonos 2007) y la comprobación de los límites de cada unidad mediante trabajos de terreno, principalmente de los hielos cubiertos por detritos. Adicionalmente, en forma independiente, se recopilaron varios datos sobre los glaciares en Chile y Argentina presentando comparaciones con los glaciares en Pascua-Lama (Milana, 2005 y Valon et al., 2005).

6.2.3 Resultados

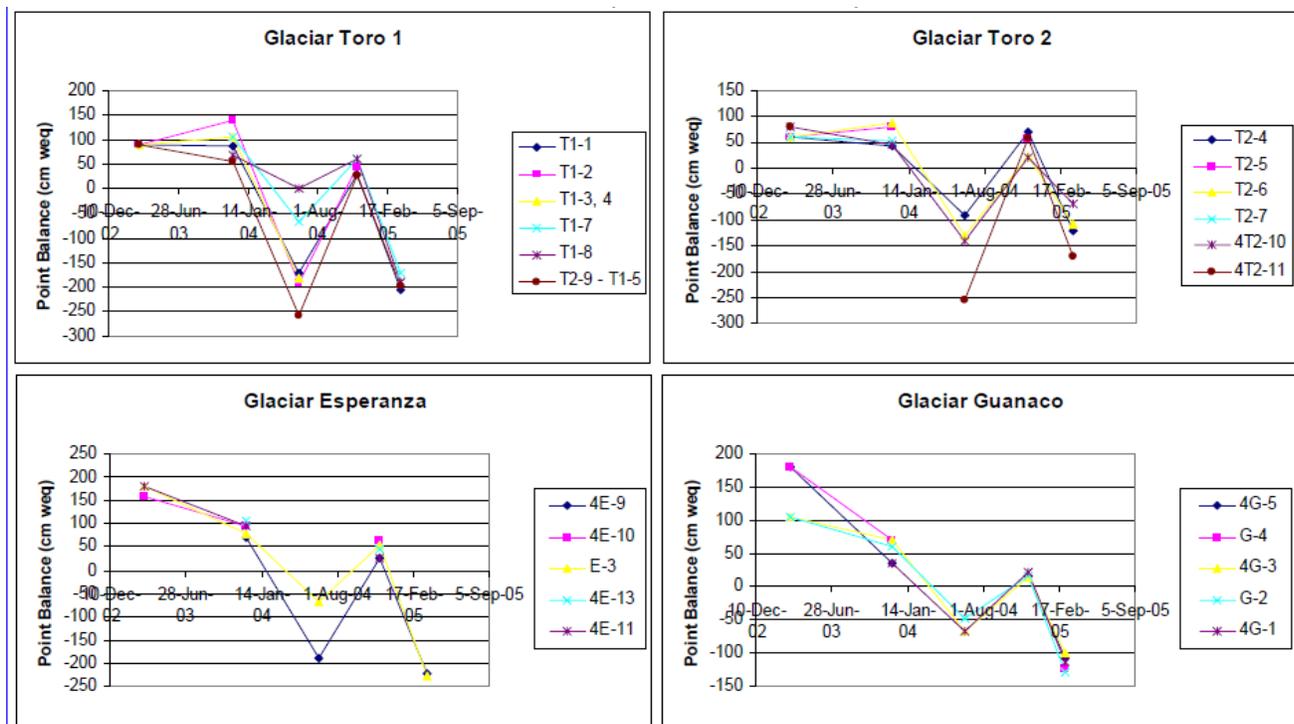
En el cálculo de balance de masa de cada año, se emplearon las mediciones de acumulación que fueron registradas a fines de la temporada de invierno, y las mediciones de ablación correspondientes a fines de la temporada de verano.

La Figura 6-11 muestra la interpretación de los datos de ablación de las estacas entre 2003 y 2005 (Valon et al., 2005 y Milana, 2005).



RECOPILACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Figura 6-11: Datos de ablación y acumulación de las estacas más representativas usadas para balance de masa, por glaciar



Fuente: Milana 2005

Posterior a 2005, CEAZA efectuó cálculos de balance de masa para los años 2006 al 2008, la Tabla 6-7 y la Tabla 6-8 muestran los resultados.

Tabla 6-7: Balance de masa 2006 - 2007

	Acumulación (m a.eq.)	Ablación (m a.eq.)	Balance (m a.eq.)
Toro 1	0,02	-1,96*	-1,94*
Toro 2	0,38*	-1,95*	-1,57*
Esperanza	1,09	-2,58	-1,49
Guanaco	0,17	-0,76	-0,59
Estrecho	0,18	-0,88	-0,70

*Solo se considera la parte alta del los glaciaretos Toro 1 y Toro 2 para efectos de comparación con el informe de balance de masa del año 2007.

Fuente: CEAZA 2008f



Tabla 6-8: Balance de masa 2007 - 2008

	Acumulación (m a.eq.)	Ablación (m a.eq.)	Balance (m a.eq.)
Toro 1	0,34*	-1,89*	-1,55*
Toro 2	0,87*	-1,72*	-0,85*
Esperanza	1,33	-1,74	-0,42
Guanaco	0,29	-0,66	-0,37
Estrecho	0,47	-0,80	-0,33

*Solo se considera la parte alta de los glaciaretos Toro 1 y Toro 2 para efectos de comparación con el informe de balance de masa del año 2007.

Fuente: CEAZA 2008e

La Tabla 6-9 muestra un resumen actualizado, realizado por CEAZA, de los cálculos de balances de masa de los glaciares entre 2003 y 2008.

Tabla 6-9: Balance de masa 2003-2008 (m a.eq.)

	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
Toro1	-1.43	-1.72	-0.28	-1.94*	-1.55*
Toro2	-1.67	-1.00	-1.27	-1.57*	-0.85*
Esperanza	-1.64	-1.37	0.39	-1.49	-0.42
Guanaco	-0.66	-0.96	0.21	-0.59	-0.37
Estrecho	n/d	n/d	n/d	-0.70	-0.33

*Solo se considera la parte alta de los glaciaretos Toro 1 y Toro 2

n/d = No Disponible

Fuente: Elaboración propia a partir de información en CEAZA 2008e

En general, según los datos registrados en la Tabla 6-9, se puede notar una diferencia en el balance de masa entre los glaciares y los glaciaretos. De los resultados, se deduce lo mismo que se indicó en la sección 6.1, es decir, que todos los cuerpos de hielo mantienen una misma tendencia negativa, pero ésta es mucho más marcada en los cuerpos más pequeños (glaciaretos). Todos los resultados de las estimaciones del balance de masa realizadas por otros autores (Golder, Milana) presentan las mismas tendencias negativas.

Se estima que la precisión de las mediciones del balance de masa es mejor en los glaciares mayores, como Guanaco, que en los menores (glaciaretos Toro #1, Toro #2, Esperanza). Entre otras razones, porque la presencia de penitentes, que es más importante en los glaciaretos en comparación a los glaciares, significa una mayor dificultad para mantener en pie las balizas y además, la superficie irregular de los penitentes crea un patrón de ablación más complicado. Esto hace que las mediciones y cálculos en los glaciaretos tengan una menor precisión y exactitud.

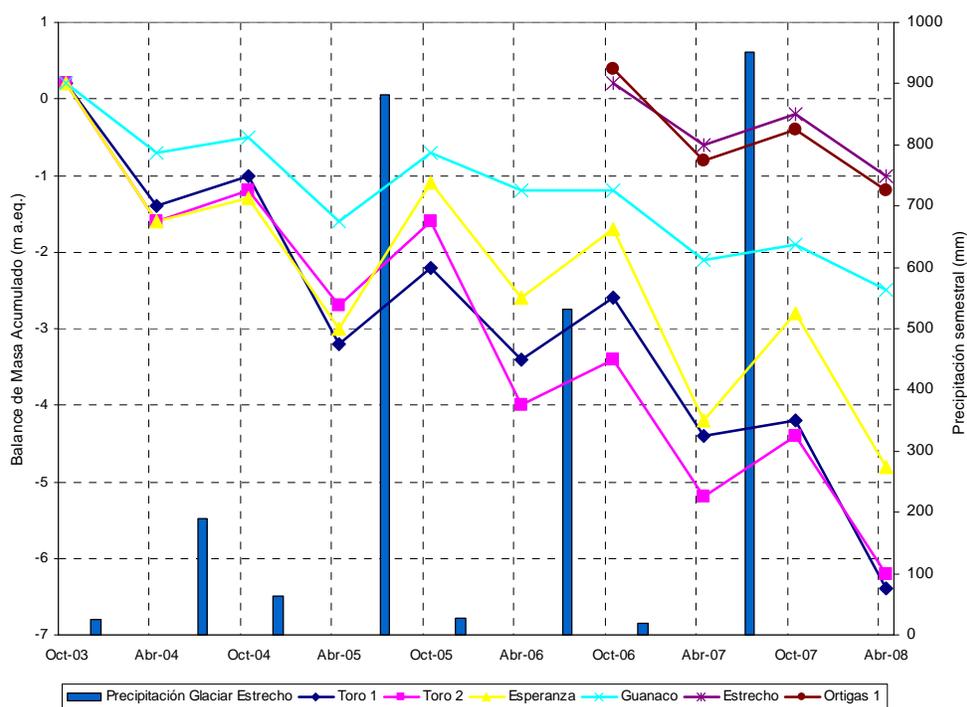
Específicamente, durante la realización de las mediciones en el año hidrológico 2007-2008, se observó que las partes bajas de Toro 1 y Toro 2 mostraron penitentes de hielo y firn (neviza) durante el verano de 2008, sobre una superficie más amplia que la medida en el verano de 2007 en cuando estas áreas correspondían a hielo cubierto por detritos (CEAZA, 2008e).



Adicionalmente, las diferencias entre los cuerpos de hielo de gran tamaño y pequeño tamaño se pueden explicar porque los glaciares más grandes pueden crear su propio microclima y se ven menos afectados por la radiación de onda larga que reciben de la superficie rocosa circundante (CEAZA 2008f).

En la Figura 6-12 se muestra el balance de masa acumulado durante el periodo de estudio. Cabe indicar que las mediciones realizadas en el glaciar Estrecho empezaron en 2006,

Figura 6-12: Balance acumulado para todos los glaciares.



Fuente: CEAZA 2008e, Knight Piésold 2009

En la Figura 6-12 (CEAZA 2008e), se agrega la precipitación estimada en el glaciar Estrecho (Knight Piésold 2009), obtenida como la precipitación semestral (desde abril a septiembre y desde octubre a marzo) en la estación El Indio multiplicada por un factor igual a 4,5 (ver Tabla 4-7).

De la gráfica es posible observar que la tendencia oscilante del balance de masa es correspondiente con la precipitación semestral, dado que en el periodo en que la precipitación es mínima (octubre a marzo), la ablación es el fenómeno dominante produciendo una disminución en la acumulación; en cambio en el periodo siguiente cuando la precipitación es importante (abril-septiembre) se observa lo contrario.



6.3 Balance de energía de los glaciares y glaciaretos

El estudio del balance de energía permite determinar la relación que existe entre el clima y el comportamiento de una superficie de nieve o hielo. El balance de energía está estrechamente vinculado con el balance de masa, ya que la ablación del glaciar es la consecuencia directa del balance de energía (CEAZA 2008c).

La comprensión de los procesos que siguen la nieve y el hielo en función de los flujos de energía a que están sometidos se realiza a través de un análisis del balance de energía, cuya expresión matemática está dada por la siguiente ecuación 6.3 (CEAZA, 2008c):

Ecuación 6.3 $R+H+LE+G+P = \Delta Q$ (W/m²)

Dónde:

R, Radiación neta para todas las ondas (cortas y largas). Es la energía solar que llega a la superficie. Este valor es medido en las estaciones meteorológicas a través de sensores de radiación.

H, flujo turbulento de calor sensible es la tasa de transferencia de calor desde el aire hacia la superficie, por efecto de la turbulencia que ocurre cuando el aire es más cálido que la superficie (Paterson 1994).

LE, flujo turbulento de calor latente es la multiplicación entre el calor específico latente de vaporización (2.8 x 10⁶ Jkg⁻¹) y la tasa de la evaporación desde la superficie (Paterson 1994).

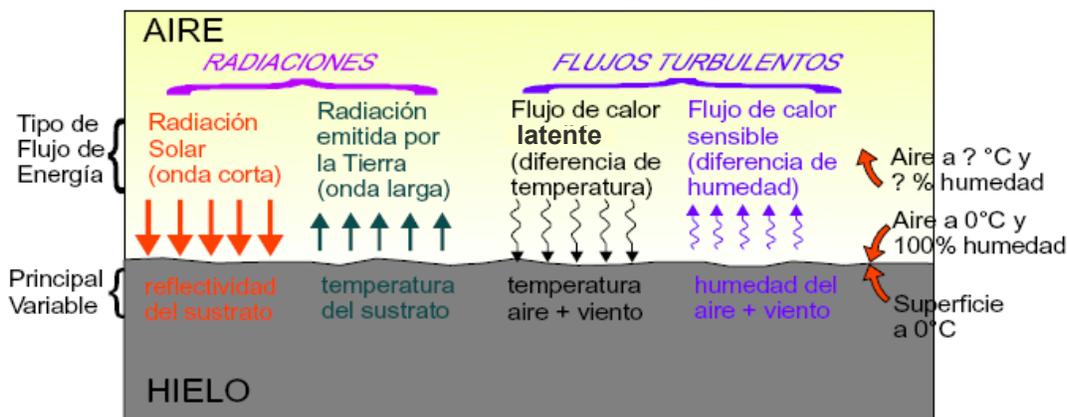
G, flujo de conducción en el hielo y la nieve. Es la transferencia de calor por conducción que se produce dentro de la capa de nieve/hielo y el flujo de energía de la radiación de ondas cortas penetrando a la superficie.

P, flujo de calor aportado por las precipitaciones. Aún cuando la caída de nieve/lluvia corresponde a una contribución energética hacia la superficie, durante la fusión de la superficie, el valor de este parámetro puede ser despreciable. Al contrario, si la precipitación puede congelarse, el parámetro puede ser más importante (Paterson 1994).

ΔQ, Variación de la energía de calor latente almacenada para la fusión y la congelación del hielo/agua

En la Figura 6-13, se muestran los procesos involucrados en el balance de energía y sus interacciones (Milana, 2005). Además la Figura 6-14 presenta una diagrama de flujo para el balance de energía.

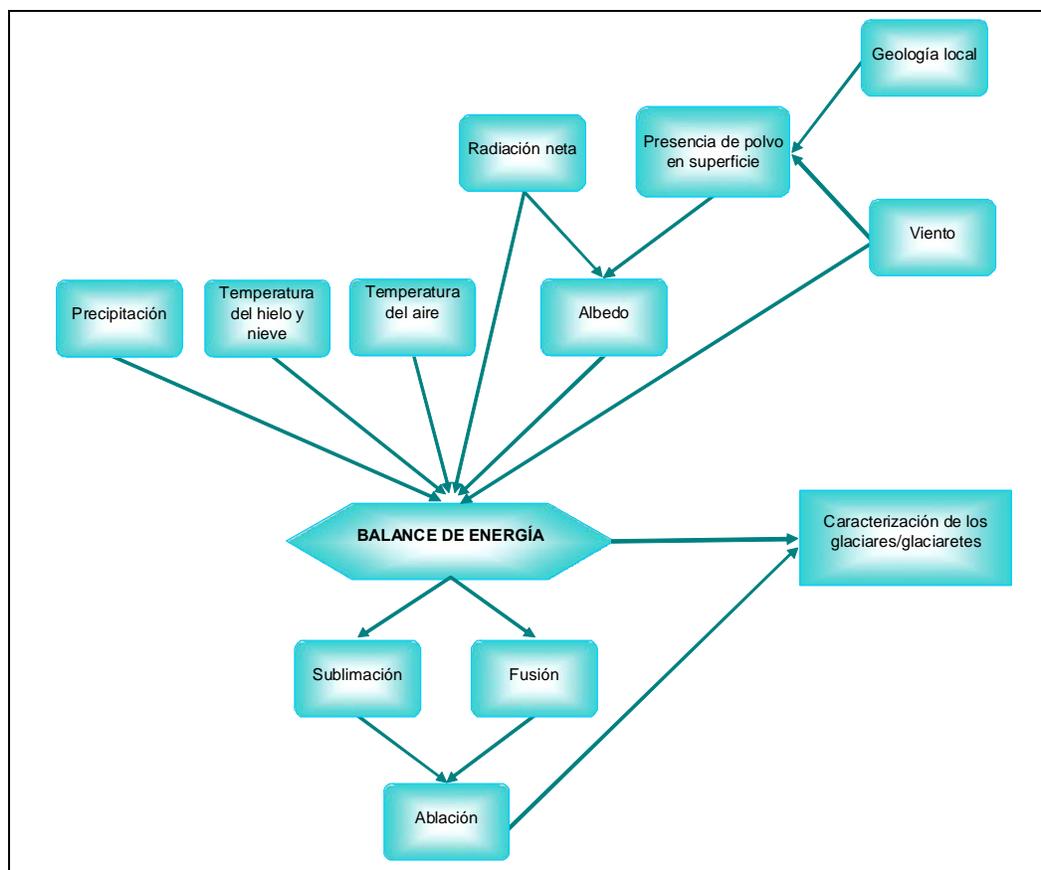
Figura 6-13: Flujos de energía que llegan a la superficie



Fuente: Milana 2005



Figura 6-14: Diagrama de flujo – Balance de energía



Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Trabajos realizados

- MILANA, 2005. Línea base de la criosfera. Proyecto Pascua-Lama. Anexo III A. Adenda 2.
- GOLDER, 2006f, October 2006, Sublimation field data and discussion, Pascua-Lama Project 06-1419-018/5610
- CEAZA, 2008c. Balance de energía sobre dos glaciares en la zona de Pascua-Lama. 21 de noviembre 2008
- CEAZA, 2008d. Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua-Lama 23 de octubre de 2008.
- CEAZA, 2008g, Mediciones Meteorológicas sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama. 25 de agosto de 2008 (Anexo B)



6.3.2 Metodología

Se realizaron evaluaciones de varios de los parámetros definidos en la sección anterior. Durante marzo de 2006, al lado de Toro 1 y Toro 2, se realizaron evaluaciones de la sublimación que ocurre en terreno y se extrajeron bloques de hielo de los glaciaretos. Dichos bloques se colocaron encima de soportes de madera, los cuales contenían un sistema de recolección del agua de fusión. De este modo se pudo medir la ablación total (Golder, 2006f). En la Figura 6-15 se muestra el equipo en sitio.

Figura 6-15: Prueba de Sublimación



Fuente: Golder 2006f

Una manera alternativa para medir la tasa de sublimación fue realizada por CEAZA entre marzo y mayo de 2006, mediante lisímetros (Figura 5-23) instalados en los glaciares Toro 1, Toro 2 y Guanaco (CEAZA 2008c). En la sección 5.5 se explica la metodología utilizada.

La **radiación neta (R)** fue medida cerca de las estaciones meteorológicas instaladas. En la Sección 4.1.2 se entrega mayor detalle sobre las mediciones realizadas y el equipo instalado en las estaciones meteorológicas (CEAZA, 2008g).

Los **flujos turbulentos de calor sensible y latente (H) y (LE)** pueden ser deducidos de perfiles verticales de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento (llamado método de los perfiles). La aplicación de este método depende de la disponibilidad de información meteorológica (CEAZA 2008c)

H y LE dependen en los valores de altura de rugosidad z_{0m} , z_t y z_q , que corresponden, respectivamente, a la cantidad de movimiento, temperatura y humedad (Hock y Holmgren, 1996; Wagnon et al., 1999). Las alturas de rugosidad están relacionadas entre sí, y dependen de z_{0m} y del número de Reynolds del flujo de aire. Las mediciones directas de sublimación con lisímetros permitieron la calibración de z_{0m} para una superficie casi lisa. (CEAZA 2008c).

Seguidamente se realizaron cálculos del **flujo de conducción en el hielo y la nieve (G)**. G corresponde a la transferencia de calor por conducción dentro de la capa de nieve/hielo (Garraat, 1992) y al flujo de energía de la



radiación de ondas cortas penetrando la superficie. Aparte de las mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas, se han realizado mediciones de temperatura en el hielo hasta una profundidad de 14 m. Los datos permitieron la calibración del valor de la convergencia o divergencia neta de los flujos de calor sensible en el volumen de hielo. A partir de este cálculo, se pudo calibrar el valor de G (CEAZA, 2008c).

Se consideró que el término P es totalmente despreciable frente a las incertidumbres adicionales que existen en el cálculo de balance (CEAZA 2008c). Se evaluó que el **flujo de calor aportado por las precipitaciones (P)** tiene un valor alrededor de 5 W.m^{-2} para precipitaciones de $5 \text{ mm a.eq. h}^{-1}$ (alrededor 5 cm de nieve en una hora). Es importante observar que la precipitación anual es del orden de $300 \text{ mm a.eq. a}^{-1}$ y los eventos con una intensidad de 5 mm w.e. h^{-1} son escasos. Por lo tanto, la incertidumbre sobre este factor es del orden del W.m^{-2} y solo existe durante los pocos eventos de precipitación.

La suma de los términos de la parte izquierda de la ecuación 6.3 es igual a la **variación de energía almacenada dentro del glaciar (ΔQ)**, lo cual corresponde al valor de energía disponible para la congelación/derretimiento del agua/hielo en la superficie. Si ΔQ es positivo, habrá energía disponible para ser utilizada en aumentar la temperatura de la nieve/hielo hasta el punto de fusión 0°C , y será también suficiente para iniciar la fusión. Al contrario, si ΔQ es negativo, el agua de la superficie se recongela y, la temperatura de la nieve/hielo disminuye

Con anterioridad a 2005, Milana realizó un balance de energía para varios glaciares en entornos y ubicaciones comparables a los de Pascua-Lama, y varios datos de literatura de referencia; estimándose valores para cada uno de los términos de la ecuación indicada anteriormente y realizando un modelo simple del balance de energía (Milana, 2005).

6.3.3 Resultados

Se entregaron estimaciones de la sublimación basadas en la pérdida de masa. La tasa de sublimación promedio en Toro 1 se estimó en $3,5 \text{ mm}$ de agua equivalente (mm a.eq./día) y el promedio estimado en Guanaco corresponde a $4,6 \text{ mm a.eq./día}$ (Golder, 2006f).

A partir de los resultados de los estudios de lisímetros, se realizaron estimaciones de ablación, fusión y sublimación. La Figura 5-29 muestra los resultados del monitoreo realizados con los lisímetros.

Estos resultados indican una tasa promedio de sublimación con un rango de entre $0,02$ y $0,42 \text{ mm/m}^2 \text{ a.eq./hora}$, que depende del espesor de la capa de polvo. Contando un día de 12 horas, este rango puede equivaler entre $0,24 \text{ mm}$ a $5,04 \text{ mm/m}^2$ por día (7 mm a $151,2 \text{ mm/m}^2$ por mes).

Si bien los resultados del estudio de lisímetros son iniciales, es posible indicar de una manera general, que la ablación es mucho más reducida cuando no hay detritos en la superficie de las cajas (CEAZA, 2008c). Además, se puede ver que la presencia de polvo favorece la fusión en vez de la sublimación. En general se observan las siguientes características en los dos periodos del monitoreo realizado con los lisímetros (tres días seguidos en marzo y tres días seguidos en abril de 2008):

Cuando no hay detritos en la superficie, la sublimación tiene una importancia grande en los procesos de ablación;

La presencia de detritos aumenta la ablación.

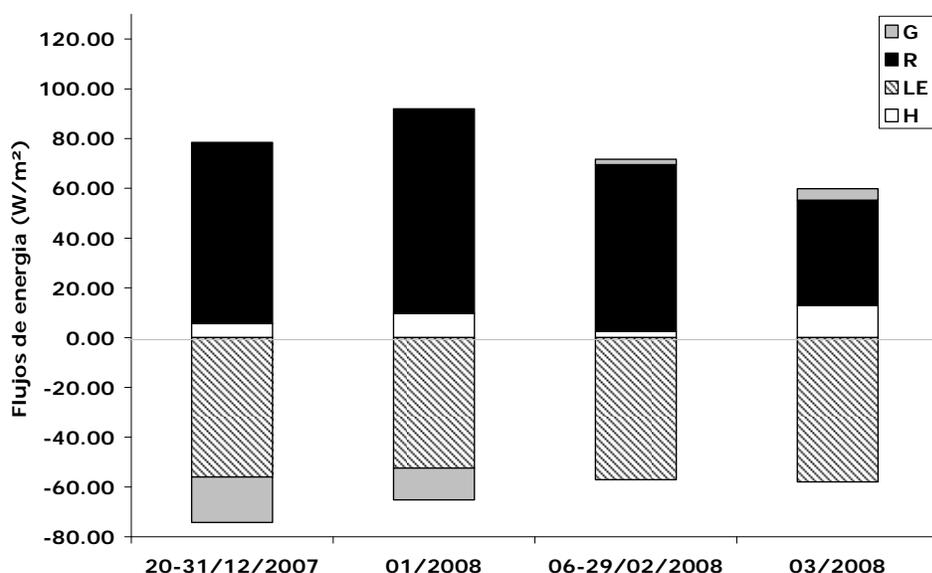
La Figura 5-34 muestra los promedios diarios de la radiación neta medido por la estación meteorológica de Guanaco



Cabe indicar que los resultados obtenidos por CEAZA tienen una condición preliminar, y deben ser interpretados con precaución, dado que el periodo de medición es corto (CEAZA, 2008c). A continuación se disponen los resultados del balance de energía para el glaciar Guanaco.

La pérdida de masa en milímetros equivalente de agua es calculada dividiendo la energía disponible por el calor latente de sublimación ($L_v = 2848000 \text{ J/kg}$) o de fusión ($L_f = 334000 \text{ J/kg}$). Siendo L_v 8,5 veces mayor que L_f , se deduce que la sublimación es responsable de una pérdida de masa menor en comparación con la fusión. Esto quiere decir que para la misma cantidad de masa perdida por el glaciar, el proceso de sublimación es más costoso (menos eficiente) en términos de energía que el proceso de fusión (CEAZA, 2008c). La Figura 6-16 muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el glaciar Guanaco.

Figura 6-16: Promedios mensuales de los términos del balance de energía para Guanaco.



Fuente: CEAZA. 2008c

Tabla 6-10: Fusión, sublimación y ablación mensuales puntuales en el lugar de las estaciones meteorológicas de Guanaco (en mm a.eq. por día)

Fecha Medición	Guanaco(mm a.eq./día)		
	Sublimación	Fusión	Ablación total
20-31 12/2007	1,71	2,14	3,86
01/2008*	1,45	6,02	7,48
06-29 02/2008	1,74	4,04	5,53
03/2008*	1,71	0,93	2,64
Total sobre el periodo de medición común	1,74 45%	2,23 55%	3,86 100%
Total sobre el periodo de medición	1,70 30%	3,59 70%	5,16 100%

*día específico desconocido

Fuente: CEAZA 2008c



El modelo de balance de energía permite calcular una pérdida de masa de 506 mm a.eq. para el Glaciar Guanaco (CEAZA, 2008c).

La sublimación consume la mayoría de la energía disponible para la ablación, pero resulta poco eficiente en términos de masa. La fusión domina los procesos de ablación en términos de pérdida de masa (CEAZA, 2008c).

Los fuertes vientos sobre Guanaco generaron flujos turbulentos aún más importantes. Debido a lo anterior, los procesos de sublimación fueron más intensos sobre Guanaco que sobre Ortigas 1 (CEAZA 2008c), los resultados para cual se presentan en la Tabla 8-13.

6.4 Movimiento de glaciares

Los glaciares se mueven debido a dos procesos mutuamente interdependientes (Ritter et al., 2002):

- La deformación interna del hielo.
- El deslizamiento del glaciar a lo largo de su base y costados.

6.4.1 Trabajos realizados

- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Adenda 2 Anexo III-A)
- CMN. 2008b. Monitoreo del Movimiento de los Glaciares. Cuenca Superior del Río Huasco - Tránsito. (Anexo N)

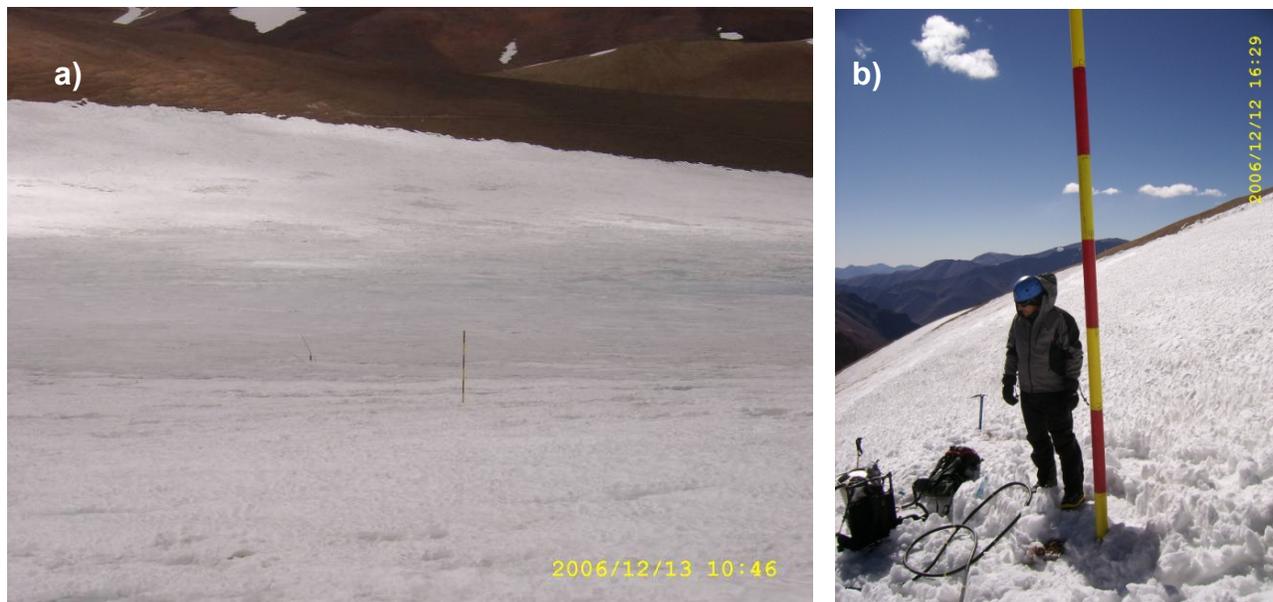
6.4.2 Metodología

La estimación de las velocidades de glaciares se llevará a cabo en base a espesores y pendientes (Milana, 2005). Para ello se instalaron, sobre la superficie de los glaciares, balizas consistentes en tubos de aluminio colocadas en forma vertical y hasta cierta profundidad dentro del hielo. , Además se construyeron las estaciones fijas adyacentes al glaciar sobre bases de hormigón, en las cuales se colocó un tubo de acero. Al monitorear las posiciones de las balizas mediante la medición de ángulos desde las estaciones fijas instaladas, se determina el movimiento del glaciar al milímetro (CMN, 2008b).

La Figura 6-17 muestra algunas balizas instaladas.



Figura 6-17: a) Baliza instalada sobre glaciar Guanaco y b) Baliza instalada sobre el glaciarete Toro 1



Fuente. CMN 2008b

Los cuerpos de hielo en que se ha medido el movimiento de balizas son: Esperanza, Estrecho, Guanaco, Toro 1 y Toro 2. A la fecha se han completado 5 campañas de monitoreo mensuales, desde la inicial realizada en diciembre de 2006, hasta la última documentada en el informe CMN 2008b que corresponde al mes de Abril de 2008. En algunos casos las balizas se encontraban caídas, por lo que no se cuenta con los datos respectivos.

6.4.3 Resultados

Las mediciones del desplazamiento del glaciar Guanaco indicaron una tasa estimada de desplazamiento de 10 a 14 m/año (Milana, 2005).

La Tabla 6-11 muestra los resultados de las velocidades promedio de desplazamiento horizontal obtenidas (CMN, 2008b). Entre los glaciaretes se observa que Esperanza tiene el mayor desplazamiento. Entre los glaciares evaluados Estrecho es el que muestra las mayores velocidades, mientras que el glaciar menos dinámico fue Guanaco.



Tabla 6-11: Velocidad promedio de desplazamiento horizontal al mes (m/mes)

PERIODO	Glaciares			Glaciaretos		
	Estrecho	Guanaco	Ortigas 1	Esperanza	Toro 1	Toro 2
30/12/2006-25/02/2007	0,48	0,15	0,17	0,25	0,02	0,06
25/02/2007-19/04/2007	0,73	0,15	0,21	0,81	0,003	0,059
19/04/2007-23/01/2008	0,2	0,13	0,15	Sin datos	0,12	0,14
23/01/2008-19/04/2008	Sin datos	0,09	0,17	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Dirección principal	Sureste	Suroeste	Suroeste	Sureste a Suroeste	Suroeste	Suroeste

Fuente. CMN 2008b



7.0 EVALUACIÓN DEL ROL DE LAS CRIOFORMAS EN EL BALANCE HÍDRICO

7.1 Trabajos realizados

- CEAZA 2008a. Evolución de la Superficie de 20 glaciares en la zona y al Sur de Pascua Lama, entre 1955 y 2007. 20 de noviembre 2008 (Anexo G)
- CEAZA 2008b. Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, 2004. 1 de diciembre de 2008. (Anexo F)
- CMN. 2008a. Mediciones de caudales cercanos a los glaciares y glaciaretos. Cuencas superiores del río Huasco. Verano 2007 – 2008. (Anexo E)
- Golder 2009b Informe. Actualización información Geoforma Estrecho B, 0792155019-2.5-IT 004 (Anexo Q)
- Golder 2005a. Línea base de Hidrología para el lado Chileno del Proyecto Pascua-Lama, (Adenda 2 Anexo II-B)
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Adenda 2 Anexo III-A)
- Jones 2005b, 1 de noviembre de 2005, Modelo Hídrico de los Glaciares de la Cuencas Superior del río El Toro y los Cambios Potenciales a los Caudales Aguas Abajo (Adenda 2 Anexo II-G)
- Jones 2006, enero 2006, Modelo Hidrológico de la Cuenca Río Estrecho (Adenda 3 Anexo 6-1)
- Knight Piésold 2009, 25 de Marzo de 2009, Modelo de Simulación Hidrogeológico Pascua

7.2 Generalidades y caudales

El régimen de caudales en la región está dominado por los derretimientos de nieve acumulados en las partes altas de las cuencas durante el invierno, lo que sumado a la escasez de precipitación por lluvia, determina que los caudales en los cauces sean máximos durante los meses de verano (ver sección 4.4). La influencia del deshielo glaciar en los caudales de las cuencas superiores se caracteriza por flujos máximos producidos en los meses de enero y febrero y por no aportar caudales (o aportar caudales mínimos) en los meses de invierno, donde el agua disponible se congela, por lo que esta sección tratará los caudales en verano durante un año de sequía como los indicadores más extremos y críticos para entender el rol hídrico de los cuerpos de hielo.

La mayoría de los glaciares ubicados en las cuencas donde se ubica el Proyecto (cuenca superior El Toro y cuenca superior Del Estrecho, ver Figura 4-25) poseen áreas menores a $0,1 \text{ km}^2$ (Tabla 5-1, sección 5.1.3), a excepción del glaciar Estrecho, ubicado en la cuenca del mismo nombre, que posee un área de $1,3 \text{ km}^2$.

En un contexto mas local, los glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Esperanza situados en la cuenca superior del río El Toro (cercaos al rajo del futuro proyecto Pascua-Lama) representan menos del 0,05% del área de drenaje de la estación VIT-3 (río Potrerillos aguas abajo junta con río Las Tres Quebradas) y menos del 0,01% del área de drenaje de la estación DGA río Del Carmen en El Corral. La Figura 4-25 muestra las cuencas locales y las estaciones fluviométricas referenciadas en esta sección y la Figura 3-2 muestra la ubicación de los cuerpos de hielo (glaciares y glaciaretos) en las cuencas superiores en estudio.

En tanto en la cuenca del río Del Estrecho el área ocupada por glaciares representa aproximadamente el 5% del total del área de drenaje de la estación NE-2a (río Del Estrecho aguas abajo quebrada Los Barriales, la cual



contiene el glaciar El Estrecho y glaciarete Amarillo) y sólo el 0,05% del área de drenaje de la estación DGA Río El Tránsito en Angostura Pinte.

La Tabla 7-1 y Tabla 7-2 muestra resultados de una evaluación de la influencia de los caudales de fines de verano, donde el caudal es principalmente producto del deshielo glaciar y nival, sobre los caudales de cursos situados aguas abajo (Golder 2005a) para las cuencas altas del río Del Estrecho (la cual aporta al río El Tránsito) y del río El Toro (la cual aporta al río Del Carmen) respectivamente.

Tabla 7-1: Comparación de los caudales de fines de verano en el río El Toro

Nombre de la estación caudales	Área de drenaje (km ²)	Caudales de fines del verano (m ³ /s)	Caudales específicos de la cuenca de fines del verano (l/s/km ²)	Proporción del caudal de TO-1a de fines de verano en relación al caudal en las otras estaciones (%)
TO-1a	7,5	0,15 ^{Nota 1}	20	100
TO-6a	72,7	0,32 ^{Nota 1}	4,4	47
VIT-3	507	1,00 ^{Nota 1}	2,0	15
Río Del Carmen en El Corral	2.395	3,3 ^{Nota 2}	1,5	5

Notas:

1. Promedio de observaciones de rango de flujo en febrero y marzo a partir de mediciones manuales y datos de monitoreo de caudales , 2000 a 2003.

2. Promedio de caudales mensuales medios en febrero y marzo, 2000 a 2003.

Fuente. Golder 2005a

Tabla 7-2: Comparación de los caudales de fines de verano en el río Del Estrecho

Nombre de la estación	Área de drenaje (km ²)	Caudales de fines del verano (m ³ /s)	Caudales específicos de la cuenca de fines del verano (l/s/km ²)	Proporción del caudal de NE-2a de fines de verano en relación al caudal en las otras estaciones (%)
NE-2a	33,6	0,20 ^{Nota 1}	6,0	100
NE-4.	128	0,67 ^{Nota 1}	5,2	30
Río El Tránsito en Angostura Pinte	3.220	4,1 ^{Nota 2}	1,3	5

Notas:

1. Promedio de observaciones de rango de flujo en febrero y marzo a partir de mediciones manuales y datos de monitoreo de caudales , 2000 a 2003.

2. Promedio de caudales mensuales medios disponibles en febrero y marzo, 2000 a 2003.

Fuente. Golder 2005^a

Los valores presentados en las Tabla 7-1 y la Tabla 7-2 entregan un orden de magnitud de los caudales de deshielo en las cuencas altas y una proporción de estos caudales en relación a otros puntos de control.

En la Tabla 7-1, se indica que entre los años 2000 y 2003, durante los meses de febrero y marzo, la cuenca TO-1a (cuenca superior río El Toro, la cual contiene los glaciaretes Esperanza, Toro 1 y Toro 2) puede suministrar 15% del caudal medido en VIT-3 (río Potrerillos aguas abajo junta con río Las Tres Quebradas).



En la Tabla 7-2, se indica que entre los años 2000 y 2003, durante los meses de febrero y marzo, una comparación entre los caudales de la estación río Del Estrecho NE-2a (río Del Estrecho aguas abajo quebrada Barriales, la cual contiene el glaciar El Estrecho y glaciarete Amarillo) y la Estación DGA ubicada aguas abajo (río El Tránsito en Angostura Pinte), muestra que el caudal de NE-2a es aproximadamente el 5% del caudal de la Estación DGA durante los meses de máximo deshielo (Golder 2005a).

Dado que los datos presentados son promedios de los años 2000 a 2003, los caudales no corresponden solamente a deshielo glaciar (aporte de las crioformas a la escorrentía), pues no corresponden a un año seco en particular, condición que sí informaría de los caudales de deshielo glaciar.

En todo caso, los valores de caudal de fines de verano (Tabla 7-1 y Tabla 7-2) siguen siendo consistentes con los valores presentados en las Tabla 7-3, Tabla 7-5 y Tabla 7-6 (caudales de deshielo glaciar), porque son mayores a éstos últimos, lo que estaría indicando una componente de deshielo nival y un área de aporte más grande.

La Sección 4.4 contiene un resumen de la información fluviométrica disponible actualmente. Adicionalmente, CMN 2008a ha registrado mediciones de caudales en puntos cercanos a glaciares y glaciaretos durante los meses de verano 2006 y 2007 en forma preliminar, y luego en forma más intensiva durante el año 2008. En Tabla 7-3 a continuación se presentan los valores de caudal promedio, mínimo y máximo absoluto diarios registrados en los puntos de medición cercanos a los frentes Glaciares. Estos datos son interpretados a partir de la información presentada en la Tabla 4-13.

Tabla 7-3: Caudales en puntos de monitoreo cercanos a glaciares, verano 2008

Punto	Crioforma asociada	Caudal promedio mensual l/s			Caudal absoluto l/s		Caudal absoluto l/s	
		Ene	Feb	Mar	Máximo	Fecha	Mínimo	Fecha
NE-5	Glaciar Estrecho	165	130	40	194	fin de enero	37	11-mar
TORO-1	Glaciarete Toro 1	12	10	5	18	13-feb	4	04-mar
CONFL. T1,T2	Glaciaretos Toro 1 y Toro 2	30	32	3	56	20-feb	1	24-mar
CONFL. T1-T2-E	Glaciaretos Toro 1, Toro 2 y Esperanza	72	60	5	110	13-feb	3	24-mar
GUANACO	Glaciar Guanaco	175	130	12	306	20-feb	1,8	24-mar

1: para ubicación ver Figura 4-36
 Fuente: Elaboración propia a partir de gráfico N°7 CMN 2008a

En relación a la evolución de los aportes en las subcuencas, es posible apreciar que durante los meses de enero y febrero se registraron los valores más elevados de caudal; posteriormente en el mes de marzo el caudal tendió a disminuir notoriamente en cada punto de medición,

Cabe señalar que los caudales de verano registrados en la Tabla 7-3, en particular para los puntos NE-5 y CONFL. T1-T2-E representativos del aporte de los glaciares a la escorrentía en las subcuencas altas Del Estrecho y El Toro respectivamente, son muy similares a los caudales de deshielo glaciar determinados de los modelos de balance hídrico aplicados a cada subcuenca (ver Tabla 7-5 y Tabla 7-6 en sección 7.3), lo que indica la bondad del modelo de balance efectuado. En Tabla 7-4 siguiente se presenta tal comparación.



Tabla 7-4: Comparación caudales de deshielo glaciar monitoreados durante el día con caudales modelados (balance hídrico)

Monitoreo				Modelo Balance Hídrico			
Punto	Caudal promedio mensual l/s			Cuenca	Caudal promedio mensual l/s		
Monitoreo ^(Nota 1)	Ene	Feb	Mar		Ene	Feb	Mar
NE-5	165	130	40	Río Del Estrecho	141	139	62
CONFL. T1-T2-E	72	60	5	Río El Toro	73	72	33

1: para ubicación ver Figura 4-36

Fuente: Elaboración propia a partir de gráfico N°7 CMN 2008a, Jones 2006 y Jones 2005b

7.3 Balance Hídrico

Se han efectuado balances hídricos en las cuencas superiores de los ríos Del Estrecho y El Toro (cuencas equivalentes a los controles fluviométricos NE-5 y TO-1a, respectivamente) de manera de evaluar los recursos hídricos en el área directa del Proyecto (ver Figura 4-25). De estos trabajos es posible extraer los caudales de deshielo que aportan las crioformas en las cuencas en estudio y su distribución temporal.

7.3.1 Balance Hídrico cuenca superior río El Toro

El balance hídrico efectuado para la cuenca superior El Toro (Jones 2005b) corresponde a un modelo basado en datos meteorológicos, en las mediciones del flujo de agua superficial y en las mediciones directas de los glaciares. El modelo calcula el balance de masa de nieve y hielo para el período mayo 1981 a mayo 2005, considerando los procesos de precipitación, sublimación, deshielo y acumulación de nieve, efectuando balances por separado para las áreas con glaciar y no glaciadas. Reproduce con precisión las medidas de flujo de agua y las medidas del volumen de los glaciares.

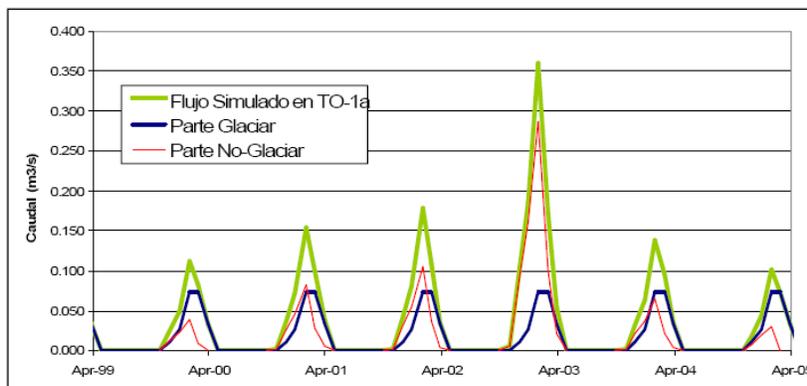
Se utilizaron datos de la estación meteorológica instalada en el Indio usando una relación precipitación/elevación (Golder 2005a) para estimar la precipitación en la cuenca superior El Toro, dado que no existen registros disponibles de precipitaciones de largo plazo para esta última, y se estimaron otros parámetros usando valores de la literatura. Los registros de precipitación del Indio y los ajustes aplicados para realizar las estimaciones de precipitación en la zona del Proyecto han sido presentados en la sección 4.1.4 de este documento.

Cabe señalar que, dada la corta distancia al área del estudio Indio, la estación El Indio es considerada un sustituto apropiado para representar el patrón de precipitaciones en las cuencas superiores estudiadas. En la sección 4.4 se argumenta más extensamente la representatividad de dicha estación.

De acuerdo a lo simulado, el deshielo glaciar es constante de año en año, alcanzando un nivel máximo en enero-febrero de aproximadamente $0,072 \text{ m}^3/\text{s}$ (Jones 2005b). El flujo de la parte no-glaciada es variable, dependiendo de la precipitación, alcanzando los niveles máximos en enero como se puede observar en la Figura 7-1 siguiente.



Figura 7-1: Componentes de flujo en TO-1a



Fuente: Jones 2005b

En Tabla 7-5 siguiente se resume el deshielo glaciar modelado de la cuenca TO-1a (cuenca superior río El Toro) mes a mes y su impacto sobre el caudal en el Río Potrerillos (VIT-3).

Tabla 7-5: Deshielo glaciar cuenca El Toro TO-1a y su impacto sobre VIT-3

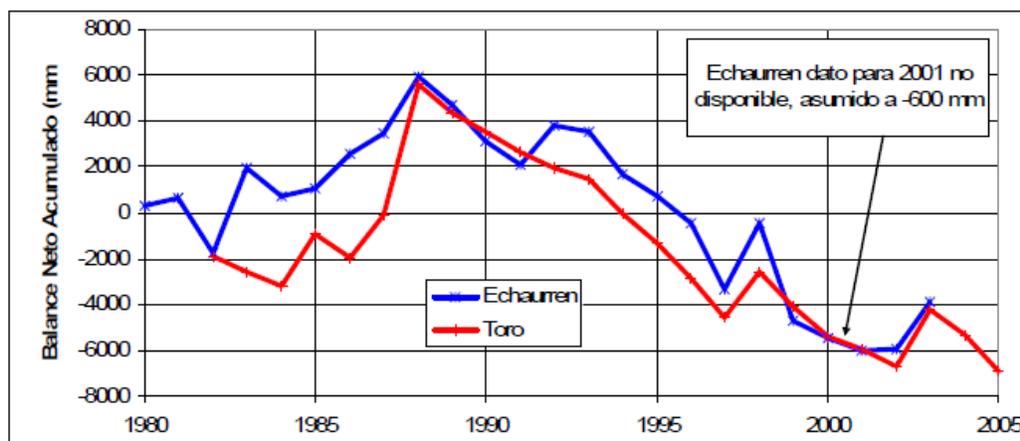
Mes	Deshielo glaciar	Río Potrerillos			
		Caudal en VIT-3 (año seco 2001-02)	%	Caudal en VIT-3 (año humedo 2002-03)	%
	l/s	l/s		l/s	
May	0	500	0	700	0
Jun	0	500	0	700	0
Jul	0	450	0	600	0
Ago	0	450	0	600	0
Sep	0	400	0	600	0
Oct	0	300	0	1000	0
Nov	11	500	2,2	1500	0,7
Dic	26	700	3,7	1600	1,6
Ene	73	900	8,1	1800	4,1
Feb	72	800	9,0	1300	5,5
Mar	33	700	4,7	1000	3,3
Abr	0	600	0	700	0

Fuente: Elaboración propia a partir de tabla 6, Jones 2005b



De manera adicional, cabe señalar que se realizó una comparación del balance acumulativo de los glaciares de la cuenca El Toro con los obtenidos para el Glaciar Echaurren ubicado en la cuenca alta del río Maipo a 3.800 ms.n.m. de altura, donde se observa que ambos balances están de acuerdo y que muestran un descenso general en volumen, el que ha sido observado en otros glaciares Andinos. La Figura 7-2 muestra tal comparación.

Figura 7-2: Comparación de los balances del glaciar Echaurren y los glaciares de la cuenca El Toro (en mm de agua equivalente).



Fuente: Jones 2005b

7.3.2 Balance Hídrico cuenca superior río Del Estrecho

El balance efectuado para la cuenca superior del río Del Estrecho (Jones 2006) consiste en balances por separado de nieve/hielo, de agua superficial y de agua subterránea, relacionados entre sí según se muestra en la Figura 7-3. Los balances de nieve reflejan los procesos de acumulación, sublimación y fusión de las precipitaciones en diferentes partes de la cuenca. El balance hídrico del glaciar refleja los mismos componentes más uno de almacenaje de hielo. Finalmente, los balances hídricos de aguas superficiales y de aguas subterráneas reflejan los escurrimientos de agua de deshielo a través de la cuenca Del Estrecho hasta sus sectores de descarga.

Los balances hídricos se han desarrollado mediante uso de un grupo de planillas de cálculo en EXCEL para las componentes de derretimiento y superficial, apoyado por un modelo numérico que fue elaborado mediante el software MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988). El programa MODFLOW es utilizado como estándar a nivel mundial en lo referente a la modelación de aguas subterráneas y acuíferos.

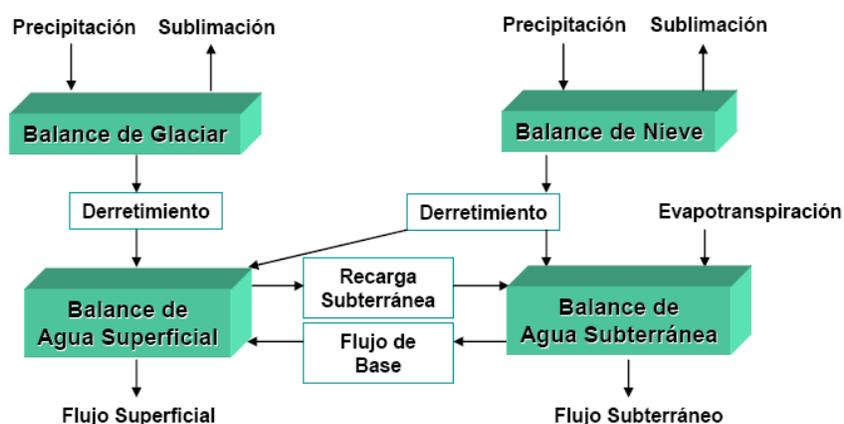
Los componentes de fusión calculados para los balances hídricos de nieve y de glaciares alimentan al modelo numérico hidrológico, que se emplea luego para calcular los demás componentes de los balances hídricos de aguas superficiales y de aguas subterráneas.

En una primera iteración interna del modelo, el derretimiento o fusión de nieve y glaciares interactúa con el modelo subterráneo a través de las infiltraciones o recarga al acuífero. En las iteraciones siguientes, a estos flujos por derretimiento se debe sumar las descargas que el modelo subterráneo genere por cruzamiento de los niveles piezométricos y el nivel de terreno (denominado flujo base). Luego estos derretimientos, más el flujo base, entran a una nueva iteración.



El detalle del modelo numérico puede ser consultado en el documento Jones 2006. Adicionalmente el documento de Knight Piésold 2009 presenta un análisis bastante detallado del mismo.

Figura 7-3: Modelo conceptual balance hídrico río Del Estrecho



Fuente: Jones 2006

De acuerdo a lo simulado, para la cuenca superior del río Del Estrecho (conteniendo el Glaciar Estrecho y el glaciarete Amarillo), el deshielo glaciar es constante de año en año, alcanzando un nivel máximo en enero-febrero de aproximadamente 0,140 m³/s. El flujo de la parte no-glaciada es variable, dependiendo de la precipitación.

En Tabla 7-6 siguiente se resume el deshielo glaciar mes a mes del río Del Estrecho en el punto de control NE-5 (cuenca superior río Del Estrecho) y su impacto sobre el caudal aguas abajo en el mismo río (NE-4, río del Estrecho, aguas abajo qbda. Agua de La Falda).

Tabla 7-6: Deshielo glaciar cuenca Del Estrecho NE-5 y su impacto sobre NE-4

Mes	NE-5	Río Del Estrecho punto NE-4			
	Deshielo glaciar	NE-4 (año seco 2001-02)	%	NE-4 (año humedo 2002-03)	%
	l/s	l/s		l/s ^{nota2}	
May	0	302 ^{nota1}	0	310	0
Jun	0	379 ^{nota1}	0	352	0
Jul	0	389 ^{nota1}	0	288	0
Ago	0	356 ^{nota1}	0	346	0
Sep	0	582 ^{nota1}	0	366	0
Oct	0	-	-	647	0
Nov	17	420 ^{nota1}	4	976	2



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

Mes	NE-5	Río Del Estrecho punto NE-4			
	Deshielo glaciar	NE-4 (año seco 2001-02)	%	NE-4 (año humedo 2002-03)	%
	l/s	l/s		l/s ^{nota2}	
Dic	47	526 ^{nota2}	9	2300	2
Ene	141	620 ^{nota2}	23	2002	7
Feb	139	571 ^{nota2}	24	1570	9
Mar	62	481 ^{nota2}	13	656	9
Abr	0	383 ^{nota2}	0	352	0

Nota1: Mediciones manuales puntuales

Nota2: Registro continuo con data logger

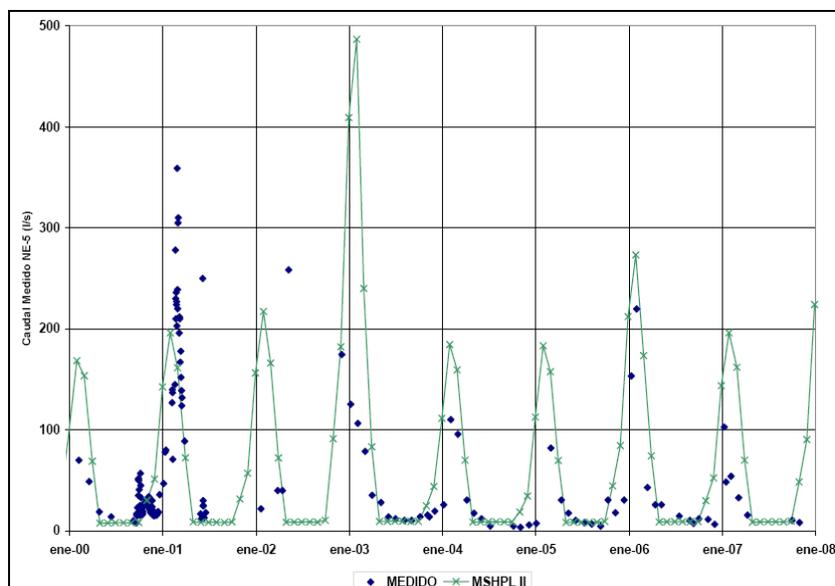
Fuente: Elaboración propia a partir de tabla 6.3, Jones 2006

Cabe señalar que el modelo de balance hídrico efectuado por Jones 2006 ha sido convertido para que la componente subterránea utilice la plataforma Visual MODFLOW (Knight Piésold 2009), usada por varias instituciones públicas en el país. En el estudio citado se ha efectuado una intensiva revisión del modelo de Jones, demostrando que tanto el modelo conceptual como el modelo numérico son válidos y reflejan los procesos de interés dentro de la cuenca. Particularmente se señala que el modelo conceptual incorpora de manera adecuada las componentes más relevantes del ciclo hidrológico, utilizando todos los antecedentes disponibles a la fecha del estudio; que las consideraciones generales utilizadas para la estructuración de este modelo de balance superficial y subterráneo están de acuerdo con el nivel y tipo de información disponible en el área; y que si bien la estructuración computacional del modelo es compleja es técnicamente adecuada.

De manera adicional, el estudio de Knight Piésold 2009 llevó a cabo una simulación del balance hídrico en la cuenca del río Del Estrecho con datos posteriores (años 2005 a 2007) a los considerados por Jones 2006 (años 1981-2005), obteniendo como resultado que ambos modelos reproducen de buena manera los caudales y niveles de aguas subterráneas en los distintos puntos de control, extendiendo la validez del modelo. La Figura 7-4 siguiente muestra la reproducción de los caudales en el punto NE-5 en el último periodo simulado.



Figura 7-4: Caudales medidos v/s simulados, auditoría para punto de control NE-5



Fuente: Knight Piésold 2009

7.4 Rol Hídrico de la criosfera

En un marco regional, como se ha indicado en el capítulo 5.1.3, se han identificado 112 glaciares y glaciaretos en la cuenca del río Huasco, de los cuales 78 (70%) presentan un área menor de 0,1 km² (Tabla 5-2). Estos 78 glaciares constituyen el 3% de toda la superficie de hielo descubierto y contienen un 2% de las reservas en agua sólida en el Huasco Alto. En consecuencia, se puede aseverar que la gran mayoría de estas unidades tienen una superficie reducida y éstas tienen escasa contribución a la cuenca en términos de volumen de hielo y aporte hídrico (CEAZA 2008b). Sin embargo, los siete cuerpos de hielo en este estudio (Estrecho, Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco, Ortigas 1 y Ortigas 2) representan el 29% del total de hielo descubierto en la cuenca del Huasco Alto (CEAZA 2008b).

En la modelación del deshielo glaciar en la cuenca El Toro, se estimó que, durante un año seco, el aporte hídrico de los glaciaretos puede alcanzar a un 9% del caudal total de la estación VIT-3 (Jones 2005b). A partir de la relación entre el área de la cuenca y el caudal presentado en la Tabla 7-1, se estima que este porcentaje podría alcanzar entre un 2% y un 3% en la estación río Del Carmen en Corral.

En la modelación del deshielo glaciar en la cuenca Del Estrecho, se estimó que, durante un año seco, el aporte hídrico de los glaciares puede alcanzar a un 24% del caudal total de la estación NE-4 (Jones 2006). A partir de la relación entre el área de la cuenca y el caudal presentado en la Tabla 7-2, se estima que este porcentaje podría alcanzar entre un 1% y un 4% en la estación río El Tránsito en Angostura Pinte.



8.0 SELECCIÓN DE GLACIARES DE REFERENCIA

En junio de 2008, CMN realizó la selección de un glaciar de referencia (CMN, 2008f, CMN 2009d), definiendo que Ortigas 1 (Figura 8-1) será utilizado como un patrón de comparación de la evolución de los glaciares ubicados en el área de influencia del Proyecto Pascua-Lama, los que corresponden a los glaciares Estrecho y Guanaco.

También se definió que Ortigas 2 será utilizado como glaciarete de referencia y estableciéndolo como parámetro de comparación respecto de los glaciaretos ubicados en el área de influencia del Proyecto, Toro 1, Toro 2 y Esperanza.

Figura 8-1: Ortigas 1 el 29 de enero de 2008



Fuente: CEAZA 2008e

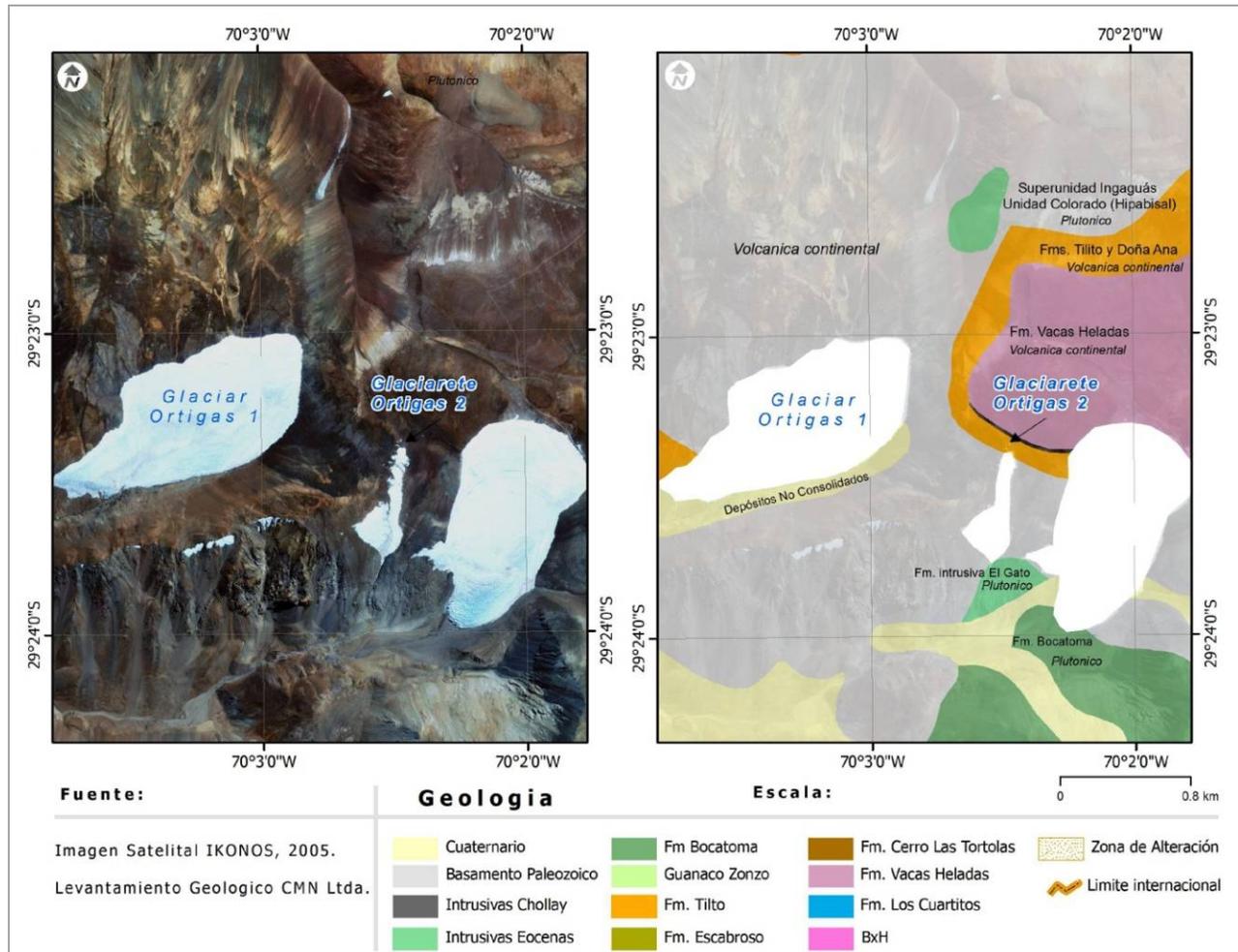
8.1 Descripción del medio físico relacionado a los glaciares de referencia

8.1.1 Geología

El Glaciar Ortigas 1 se encuentra ubicado dentro de la unidad intrusiva Paleozoica que se asocia a las unidades graníticas. La textura de estas rocas son equigranulares de grano grueso, formadas principalmente por cuarzo, feldspatos y escasos máficos. La roca se encuentra sin alteración extrema y el control estructural es regional, con escasas evidencias locales, lo que la hace muy competente (ver Figura 8-2) (CMN 2009a).



Figura 8-2: Glaciar Ortigas 1 y glaciarete Ortigas 2, y su contexto geológico



Fuente: CMN 2009a

El Glaciarete Ortigas 2, se encuentra rodeado por unidades intrusivas graníticas del paleozoico y unidades volcánicas del Terciario. Las unidades graníticas continúan siendo de textura equigranular de grano grueso con escasa alteración. Las unidades volcánicas corresponden a rocas tobáceas de cristales y líticos perteneciente a la Formación Tilito. Estas unidades se encuentran con una moderada argilización, normalmente constituidas por cuarzo-ilita ± esmectita. Sobreyaciendo a esta unidad se encuentra la Formación Vacas Heladas, que la conforman principalmente rocas tobáceas de lapilli con variaciones brechosas y cristalinas (ver Figura 8-4 y Figura 8-3) (CMN 2009a).

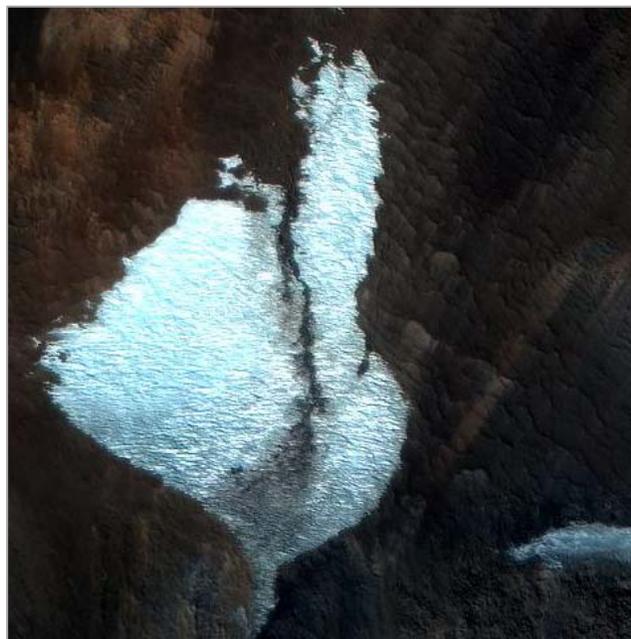


Figura 8-3: Fragmentos rocosos en los bordes del glaciarete Ortigas 2 (no alterada)



Fuente: CMN 2009a

Figura 8-4: Arrastre de sedimentos proveniente del flujo de agua estacional de la quebrada al Norte del glaciarete Ortigas 2 (Imagen Satelital IKONOS, 2007).



Fuente: CMN 2009a



La tendencia evolutiva que ha experimentado Ortigas 2 ha sido casi lineal, y por consiguiente sigue la misma tendencia de retroceso que los glaciaretos localizados en el área del proyecto Pascua-Lama (Toro, Toro 2 y Esperanza) entre los años 1956-2007 (CMN 2009d).

El glaciarete Ortigas 2 se encuentra localizado en una cuenca distante del área del proyecto Pascua-Lama y sus posibles impactos, y en las cercanías del glaciar de referencia Ortigas 1, de manera que es posible observar la evaluación de un cuerpo que no es susceptible de sufrir alteración o impacto alguno sino por causas naturales (CMN 2009d).

8.1.2 Meteorología

Durante los meses de diciembre 2007 y enero 2008 CMN instaló una estación meteorológica adicional denominada Ortigas 1, la que está situada sobre el cuerpo de hielo del mismo nombre. Esta estación ha registrado datos durante el año 2008. (CEAZA, 2008g). La Figura 4-2 presenta la ubicación de la estación indicada en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1: Ubicación de la estación meteorológica instalada en la glaciar de referencia

Id	Ubicación/ Nombre	Tipo de estación		Cota (m.s.n.m.)	Fecha instalación
3	Ortigas 1	Meteorológica y albedo		5.209	Ene 2008

Fuente: CEAZA 2008g.

La estación meteorológica monitorea las variables indicadas en la Tabla 4-2.

8.1.3 Temperatura

La Tabla 8-2 muestra que la temperatura mínima del aire en el glaciar Ortigas 1 (con altitud de 5.209 m s.n.m.), es de -24 °C y la máxima es de 10,3° C. Además muestra que los promedios durante el verano están dentro de un rango de -5,6 a -11,2 °C (CEAZA 2008g).

Tabla 8-2: Promedios mensuales de temperatura del aire (°C), máximos y mínimos instantáneos para los meses en que las mediciones son completas (en glaciar Ortigas 1)

Fecha	Ortigas 1		
	Promedio	Max	Min
Ene-08	-	-	-
Feb-08	-6,06	6,46	-13,95
Marzo-08	-5,57	10,26	-14,43
Abr-08	-	-	-
Mayo-08	-11,18	-0,31	-23,96

Fuente: CEAZA 2008g



8.1.4 Dirección de los vientos

En la sección 4.1.6 se presenta un capítulo detallado de la dirección de vientos. La estación de Ortigas 1 registró la dirección de los vientos sobre el glaciar del mismo nombre, resultados que son presentados en la Figura 4-12. En el sector de Ortigas 1, se produjeron vientos frecuentes del Noreste, lo cual puede ser explicado por la topografía y su pertenencia a otra cuenca. En efecto, el relieve al norte del glaciar puede proteger la sección alta del glaciar, disminuyendo la fuerza de los vientos y/o desviándolos. (CEAZA, 2008g).

8.1.5 Rapidez de los vientos

En la sección 4.1.7 se presenta un resumen compilado (promedio, mínimo y máximo) de las mediciones registradas durante el periodo enero-mayo de 2008 en las estaciones meteorológicas locales, incluyendo la que esta instalada en Ortigas 1.

8.1.6 Radiación global y nubiosidad

Los resultados de las mediciones de radiación neta (R) en la estación Ortigas 1, realizadas por CEAZA (2008c) entre diciembre 2007 y abril 2008, indican que los rangos de la radiación promedio mensuales están en el rango 22 - 123 W/m²

8.1.7 Humedad

La nueva estación instalada en Ortigas 1 permitió calcular los promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa durante los primeros meses del año 2008 (enero a junio 2008), los que se presentan en la Tabla 8-3. Los promedios mensuales de humedad variaron entre 29 y 48%. Se observaron valores máximos cercanos al 100%, los que correspondieron a periodos de mal tiempo. En términos relativos al glaciar Guanaco, se observan valores de humedad relativa más bajos para el glaciar Ortigas 1, pero en magnitudes poco significativas (CEAZA 2008g), como se puede observar en la Tabla 4-9.

Tabla 8-3: Promedios mensuales, máximos y mínimos instantáneos de humedad relativa (%), para aquellos meses en los cuales las mediciones son completas, para el período de enero a junio 2008.

Fecha	Ortigas 1		
	Promedio	Max	Min
Ene-08	-	-	-
Feb-08	37.04	99.3	1.588
Mar-08	29.60	87.60	2.50
Abr-08	29.48	93.30	2.03
May-08	48.38	100	4.702

Fuente: CEAZA 2008g



8.2 Caracterización física de los Glaciares de Referencia

8.2.1 Superficie y volumen

La Tabla 8-4 muestra las estimaciones de áreas superficiales de los glaciares de referencia (CEAZA, 2008e).

Tabla 8-4: Área de los glaciares y glaciaretos de referencia

Crioforma	Área (ha)
Ortigas 1	85,2
Ortigas 2	5.6

Fuente: CEAZA 2008e

Se realizaron perfiles de GPR en los años 2005 y 2006 (Golder, 2009d) en Ortigas 1. Estos proporcionan datos para las estimaciones futuras de la profundidad y volumen del glaciar.

8.2.2 Temperatura del glaciar

En enero de 2008, CMN procedió a la instalación de termistores en el glaciar Ortigas 1. La Tabla 8-5 muestra la ubicación de los termistores, y la sección 5.3 presenta la metodología utilizada y los resultados preliminares.

Tabla 8-5: Ubicación del cable termistores

Punto	Glaciar/ Glaciarete	Código (estaca de ablación)	Norte (UTM WGS84)	Este (UTM WGS84)	Cota (m.s.n.m.)
7	Ortigas 1	50-2	398.140	6.749.004	5.213

Fuente: Golder 2008a

8.2.3 Presencia de polvo

En la sección 5.4 se presentan los detalles de la instalación del equipo para el monitoreo de polvo. La Tabla 8-6 muestra la ubicación (presentada también en la

Figura 5-26) del equipo y la Tabla 8-7 presenta los resultados iniciales del monitoreo.

Tabla 8-6: Ubicación de punto de monitoreo de material particulado

Glaciar - Glaciaretos	Coordenadas		Altitud
	Este	Norte	m.s.n.m
Ortigas 1	398.070	6.749.082	5.225

Fuente: CMN 2009b



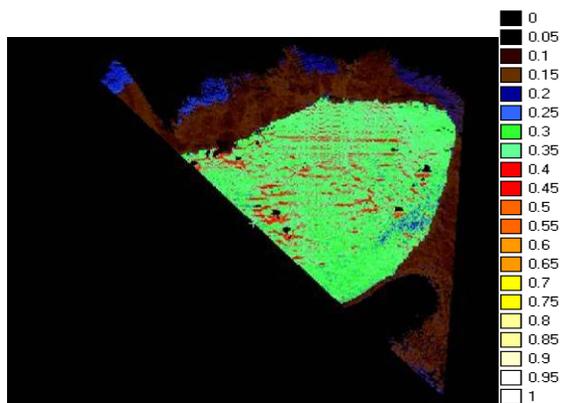
Tabla 8-7: Primeros resultados de las muestras

Estaciones De Polvo Sedimentado	Fecha de Retiro De Muestras	Material Particulado Sedimentado TOTAL (Mg/cm ² x 30 días)	Material Particulado Soluble (Mg/cm ² x 30 días)	Material Particulado Insoluble (Mg/cm ² x 30 días)
Ortigas 1	12/05/2008	0.1	< 0.01	0.1

8.2.4 Albedo

Se instaló una estación para la medición de albedo en el glaciar Ortigas 1, en la sección 5.5 del presente informe se explica el método de instalación y de medición. La Figura 5-31 presenta la ubicación de la cámara fotográfica. La Figura 8-5 muestra los resultados de la evaluación del albedo.

Figura 8-5: Mapa de albedo, glaciar Ortigas 1, 29/01/2008



Fuente: CEAZA, 2008d

Los resultados en las Tabla 8-8 y Tabla 8-9 proporcionan una estimación del rango de albedo. Los índices utilizados se explican en la sección 5.5.



Tabla 8-8: Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (enero 2008 – marzo 2008), Índice 1

Índice 1	Ortigas 1	
	Promedio diario	Desviación estandar
Ene-08	0,41	0,02
Feb-08	0,47	0,08
Mar-08	0,56	0,07

Fuente: CEAZA 2008d

Tabla 8-9: Resumen de los resultados de los cálculos de albedo realizados por CEAZA (enero 2008 – marzo 2008), Índice 2

Índice 2	Ortigas 1	
	Promedio 12 h - 14 h	Desviación estandar
Ene-08	0,38	0,02
Feb-08	0,43	0,07
Mar-08	0,54	0,07

Fuente: CEAZA 2008d

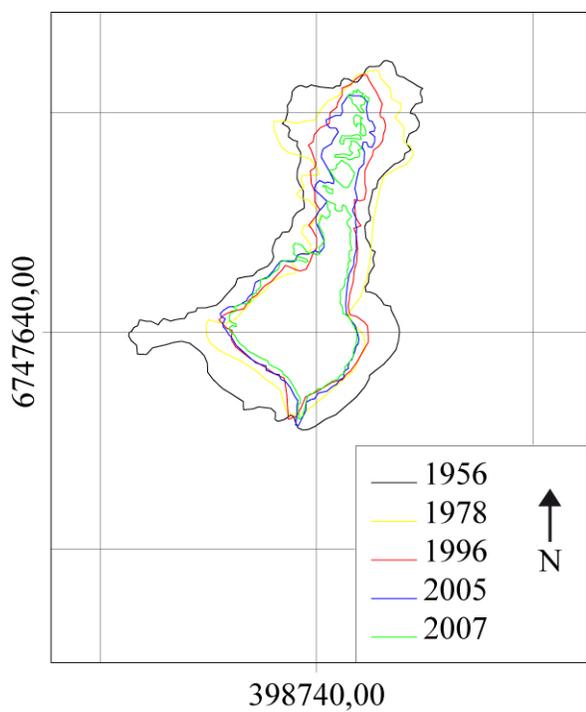
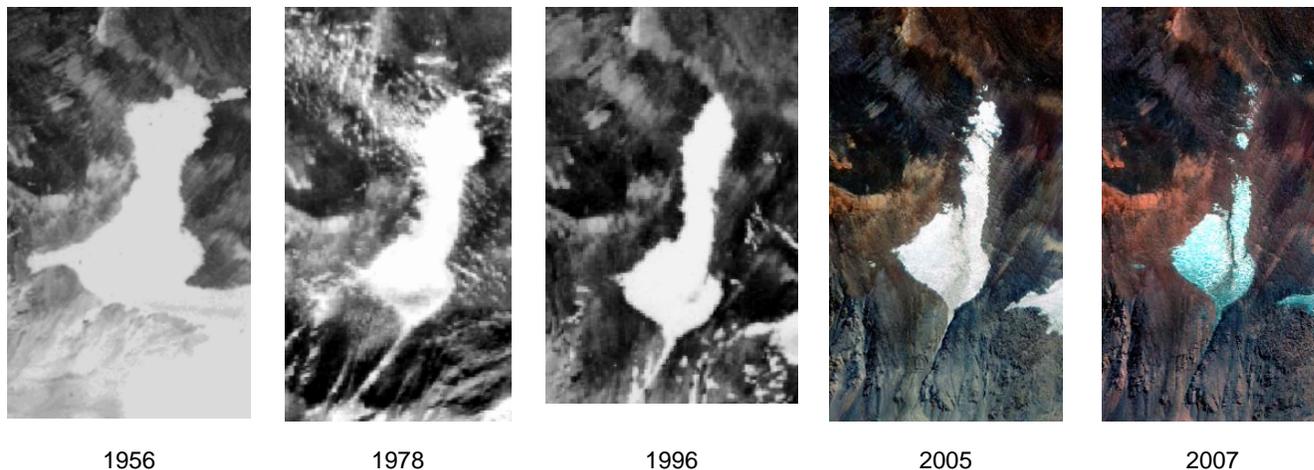
8.3 Caracterización de procesos que determinan la evolución de los Glaciares de Referencia

8.3.1 Evolución

En la Figura 8-6 y la Tabla 8-10, se muestran los resultados de la evolución del Glaciar Ortigas 2. La superficie de la crioforma disminuyó un 57 % en el periodo 1956-2007, desde un total de 16,5 ha registradas al inicio del periodo hasta las 7,1 ha que presenta en la última imagen (CEAZA, 2008a).



Figura 8-6: Evolución de los glaciarete Ortigas 2 entre 1956 y 2007



Fuente: CEAZA 2008a



Tabla 8-10: Superficie del glaciarrete Ortigas 2 entre 1956 y 2007, y pérdida promedio anual por periodo

Observaciones	Año	Superficie (km ²)
Superficie (km ²)	1956	0,165 ± 0,02
	1978	0,119 ± 0,02
	1996	0,096 ± 0,01
	2005	0,090 ± 0,01
	2007	0,071 ± 0,01
Pérdida de superficie (%)	1956-2007	-57
Pérdida anual promedio de superficie por periodo (ha.a ⁻¹)	1956-1978	-0,2 ± 0,11
	1978-1996	-0,1 ± 0,10
	1996-2007	-0,2 ± 0,12
	1956-2007	-0,1 ± 0,04

Fuente: CEAZA 2008a

Es posible observar que Ortigas 2 demuestra una disminución de su superficie con un -9 % de variación (CEAZA, 2008a). La Tabla 8-11 presenta, a partir de la información de la Tabla 8-10, las predicciones de la desaparición de los cuerpos de hielo, según las distintas tasas estimadas (CEAZA, 2008a).

Tabla 8-11: Estimación de la desaparición de los cuerpos de hielo 1955 - 2007.

Nombre local	Superficie 2007 (km ²)	Pérdida anual de superficie (km ² /año)		Desaparición (años)	
		1996-2007	1955-2007	según tasa 1996-2007	según tasa 1955-2007
Ortigas 1	0,87	0,006	0,002	145	506
Ortigas 2	0,07	0,002	0,002	31	39

Fuente: CEAZA 2008a

La evolución de los glaciaretos por cada cuenca se muestra representado en la Figura 6-4, en que se muestran valores promedio de los glaciaretos de cada una de las cuencas, incluyendo cuenca Ortigas, definida en la Figura 3-2.

La Figura 6-5 muestra los resultados de la evaluación de la evolución de cada glaciarrete en el área del estudio, incluyendo glaciarrete Ortigas 2 (no. 19).

La Figura 6-6 presenta la pérdida promedio anual de los glaciares de la cuenca, incluyendo la cuenca Ortigas. Este gráfico indica que se puede notar un aumento de la pérdida durante el último periodo (1996-2007), no obstante existe una pérdida promedio desde el comienzo de los registros (1955).

La sección 6.1 presenta varias conclusiones generales para la evolución de todos los glaciares y glaciaretos en estudio, incluyendo Ortigas 1 y 2.



8.3.2 Balance de masa

Se realizaron las mediciones de acumulación de nieve a fines del invierno y de la ablación de la nieve y del hielo durante el verano (CEAZA 2008e), sobre una red de balizas o estacas instaladas sobre el glaciar Ortigas 1 y el glaciar Ortigas 2.

En la Tabla 8-12 se muestran los resultados del balance de masa para Ortigas 1 (CEAZA, 2008f, CEAZA, 2008e). En la sección 6.2, se presenta el método por el cual se estimaron estos resultados

Tabla 8-12: Balance de masa 2006 - 2008

Ortigas 1	Acumulación (m a.eq.)	Ablación (m a.eq.)	Balance (m a.eq.)
2006-2007	0,20	-0,85	-0,65
2007-2008	0,47	-0,90	-0,43

Fuente: CEAZA 2008f, CEAZA2008e

En la Figura 6-12 se muestra el balance de masa acumulado durante el periodo de estudio. Cabe indicar que en el caso del glaciar Ortigas 1, las mediciones comenzaron en el 2006, mientras que para el glaciar Ortigas 2 CMN inició las mediciones durante el 2008, pero aun no hay resultados de estas últimas.

8.3.3 Balance de Energía

En la Tabla 8-13, se presenta los resultados del modelo de balance de energía para Ortigas 1, durante el periodo diciembre 2007- marzo 2008.

Tabla 8-13: Fusión, sublimación y ablación mensuales puntuales en el lugar de las estaciones meteorológicas de Ortigas 1 (en mm a.eq. por día)

Fecha Medición	Ortigas 1 (mm a.eq./día)		
	Sublimación	Fusión	Ablación total
26-31 01/2008	1,81	13,96	15,77
02/2008	1,44	7,63	9,07
03/2008	1,19	1,63	2,82
Total sobre el periodo de medición común	1,33	4,27	5,61
	24%	76%	100%
Total sobre el periodo de medición	1,37	5,36	6,74
	20%	80%	100%

Fuente: CEAZA 2008c

En general, los vientos fuertes tienen un efecto importante en los penitentes sobre el aumento de la sublimación y la fusión debido a la turbulencia. Al mismo tiempo la radiación solar que ocurre dentro de los huecos puede tener un efecto aún mayor sobre la fusión que el producido por el viento, tal como ocurre en el glaciar Ortigas 1.



8.3.4 Movimiento del glaciar

Se instaló un punto de control manual al pie de Ortigas 1. En la sección 6.4 se explica la metodología por la cual se monitoreó el movimiento. A la fecha, según lo documentado, se han completado 5 campañas de monitoreo mensuales, desde la inicial realizada en diciembre de 2006, hasta la última finalizada en el mes de abril de 2008. La Tabla 8-14 presenta los resultados de estas campañas.

Tabla 8-14: Velocidad promedio de desplazamiento horizontal al mes (m/mes)

Velocidad del desplazamiento	m mes ⁻¹
30/12/2006-25/02/2007	0.17
25/02/2007-19/04/2007	0.21
19/04/2007-23/01/2008	0.15
23/01/2008-19/04/2008	0.17

Fuente: CMN, 2008d

8.3.5 Caudales desde el glaciar

Durante los meses de verano de 2008 se realizaron mediciones a la salida de los cuerpos de hielo. Se instaló un punto de control fluviométrico al pie del glaciar Ortigas 1 y otro punto aguas abajo del glaciar, en la subcuenca de la quebrada Ortigas (PY-6). La Tabla 8-15 presenta el detalle de dichos puntos de control. La Figura 4-36 muestra un mapa de ubicación.

Tabla 8-15: Características y distribución de las estaciones fluviométricas cercanas a los glaciares y glaciaretos

Punto	Tipo	Norte	Este	Elevación (m s.n.m.)	Período de registro	Frecuencia	Ubicación
ORTIGAS	Aforo Manual	6.748.038	397.104	4.757	Enero - marzo 2008	Semanal en verano	Aguas abajo de Ortigas 1
PY-6	Aforo Manual	6.746.693	391.402	3.400	Enero - abril 2008	Mensual	Quebrada Ortiga antes de confluencia con Quebrada Guanaco.

En la Tabla 8-16, se muestran los caudales medidos entre enero y marzo de 2008.



Tabla 8-16: Caudales en puntos de monitoreo cercanos a glaciares, verano 2008

Crioforma asociada	Caudal promedio mensual			Caudal absoluto		Caudal absoluto	
	Ene	Feb	Mar	Máximo	Fecha	Mínimo	Fecha
Glaciar Ortigas 1	110	85	2	152	30-Ene	1,4	19-Mar
PY-6	n/d	60	90	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia a partir de gráfico N°7 y N°9 CMN 2008a

En la Figura 4-38 y la Figura 4-39 se presentan los resultados de las mediciones realizadas por CMN durante el verano de 2008 para todos los puntos de control cercanos a los glaciares y glaciaretos.

Se puede mencionar que el glaciar Ortigas 1, junto con los glaciares Guanaco y Estrecho, es de los glaciares que aporta los mayores flujos de caudal a la cuenca.

Se observa también que de manera general, tanto en glaciares y glaciaretos como en los puntos ubicados aguas abajo de ellos, el caudal tiende a disminuir notablemente hacia el fin del verano, con la excepción del punto PY-6 (Ortigas) que aumentó su caudal promedio en el mes de marzo.

En relación a lo mismo, se observa que durante el mes de febrero, el caudal que sale de la subcuenca Ortigas (PY-6), comparado con los caudales mostrados en la Tabla 4-13 y con el caudal del glaciar Ortigas 1 (Tabla 8-16), es bastante bajo teniendo en cuenta que esta zona se ubica aguas abajo del mencionado glaciar y que además están presentes otros varios grandes cuerpos de hielo (CMN, 2008a). Pero aún no es posible concluir al respecto, dado que los resultados pueden estar influenciados por variaciones específicas de caudal en las fechas de mediciones y debido a la escasa cantidad de datos.

El rol hídrico de los glaciares de referencia esta discutido en una forma integrada en la sección 7.4.

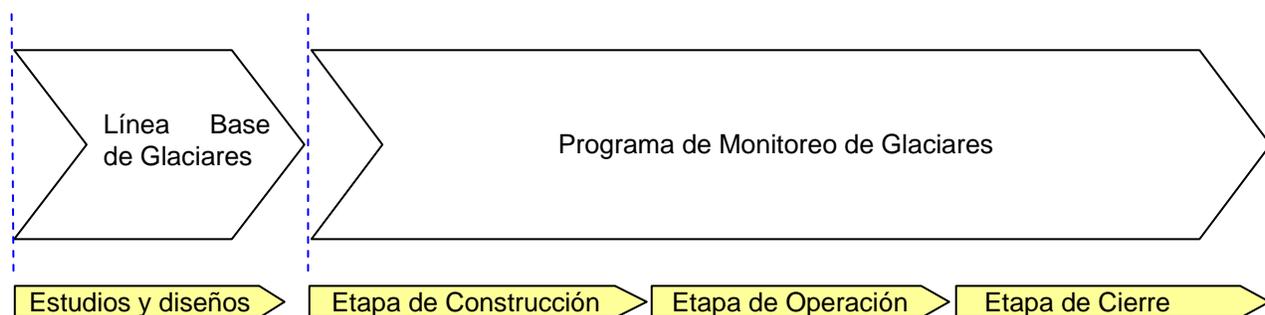


9.0 DISCUSION

Desde la aprobación ambiental de la Modificación del Proyecto Pascua-Lama, CMN ha seguido profundizando en el conocimiento de la línea base de la criósfera. Los antecedentes recabados constituyen progresivamente una base documental cada vez más amplia, que servirá de punto de referencia para evaluar a futuro la magnitud de los impactos ambientales que pudieran derivarse del Proyecto y además permitirán apoyar nuevos estudios científicos.

Una vez que se inicie la etapa de construcción del Proyecto, comenzará entonces el Programa de Monitoreo de Glaciares, el que se mantendrá vigente durante las etapas de construcción, operación y cierre (Figura 9-1). La información que se vaya reuniendo en tales etapas permitirá confirmar que no se produzcan sobre los glaciares impactos ambientales diferentes a los pronosticados durante la evaluación ambiental y que su magnitud es, precisamente, la prevista en dichos estudios. Para tales efectos CMN habrá implementado los Planes de Manejo Ambiental.

Figura 9-1: Etapas del estudio de glaciares



Fuente: Elaboración propia

Es por tanto de gran relevancia disponer de los antecedentes de línea base para poder evaluar posibles cambios a futuro, especialmente, considerando que los cuerpos de hielo son entidades dinámicas sujetas a procesos complejos y muy variables en virtud de las condiciones climáticas que se producen cada año o con ocasión del Fenómeno de El Niño. El cambio climático registrado globalmente es otro de los factores determinantes que también influyen en la dinámica de los glaciares, y al cual CMN está prestando atención por sus posibles efectos en el área de estudio.

CMN lleva trabajando en esta línea varios años, en los cuales ha quedado de manifiesto que el conocimiento previo existente sobre las crioformas en el Norte de Chile era muy reducido y que la mayor parte de la bibliografía científica disponible estaba referida al Hemisferio Norte. Más aún, estas investigaciones escasas veces estaban relacionadas con situaciones de gran altura. Este era el caso de procesos como la sublimación o la fusión, que son claves en el estudio de balances de masa y energía y, por ende, en la comprensión del rol hídrico de los cuerpos de hielo. Ante este escenario CMN ha venido desarrollando una amplia gama de estudios, tanto para el hielo cubierto como el descubierto, como se puede apreciar en este documento.

A la complejidad asociada a la comprensión de estos procesos hay que sumar además la enorme dificultad que conlleva realizar los estudios a altitudes mayores a 4.000 m.s.n.m, en condiciones atmosféricas frecuentemente adversas. Las principales dificultades están asociadas al frío, intensidad del viento, aislamiento geográfico y problemas de acceso, todo lo cual presenta una alta exigencia tanto a los científicos que desarrollan los



estudios como al equipamiento mismo que debe resistir estas condiciones extremas, cuidando de manera especial en este proceso la adecuada seguridad de las personas.

Los estudios realizados desde 2006 por CMN y presentados en este informe constituyen una base de información amplia; que complementa las imágenes de satélite y fotografías aéreas compiladas que cubren en su conjunto un periodo de unos 50 años. Cabe destacar además que el trabajo realizado incluyó la instalación de diversos sistemas de medición, tales como estaciones meteorológicas o termistores para el registro de temperaturas del hielo, sistemas que registran datos en forma continua desde el momento de su instalación.

Los desafíos de este programa de trabajo consisten ahora en el mantenimiento de los sistemas, el procesamiento y análisis de la información que vaya siendo generada y la difusión de estas investigaciones a la comunidad, autoridades e instituciones académicas interesadas. Todo ello en el marco del desarrollo sustentable del Proyecto Pascua Lama, por el cual CMN ha suscrito un compromiso respecto a la gestión y manejo de los impactos ambientales y sociales del Proyecto a lo largo de todo su ciclo de vida.



10.0 BIBLIOGRAFIA

- American Society of Testing Materials (ASTM) 2004, Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter) 1739-98
- Arck, M., and D. Scherer (2002), Problems in the determination of sensible heat flux over snow, *Geograf. Ann. A*, 84(3/4), 157– 169
- Ballantyne CK. 2002. The Conachair protalus rampart, St Kilda."; *Scottish Geographical Journal*;
- BGC 2005 Plan de Trabajo de la Hidrología de glaciares de Rocas
- BGC 2008 Draft Review of Pascua-Lama Geothermal Monitoring data
- BGC. 2009. Caracterización de Permafrost. (Anexo I)
- Brenning, A. (2005). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile, *Permafrost and Periglac. Process.*,
- Brenning, A. Azócar G.F, 2008. Mapping and modeling rock glacier distribution in the dry Andes
- CEAZA 2007, 24 septiembre 2007 Medición de rutas en sectores la Olla y Vertedero-Estrecho Valle del Estrecho, Región Copiapó, Informe 2007-1,
- CEAZA.2008a. Evolución de la superficie de 20 glaciares en la zona y al Sur de Pascua-Lama, entre 1955 y 2007. 20 de noviembre 2008 (Anexo G)
- CEAZA 2008b Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares de rocas activas en el Valle Huasco Alto, 2004. 1 de diciembre de 2008. (Anexo F)
- CEAZA 2008c. Balance de energía sobre dos glaciares en la zona de Pascua-Lama. 21 de noviembre 2008 (Anexo D)
- CEAZA 2008d. Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua-Lama 23 de octubre de 2008. (Anexo P)
- CEAZA 2008e. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2007-08. 26 de agosto de 2008 (Anexo K)
- CEAZA 2008f. Balance de masa de los glaciaretos Toro 1, Toro 2, Esperanza y Ortigas 2, y los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1, región de Pascua-Lama, año hidrológico 2006-07. 26 de agosto de 2008 (Anexo J)
- CEAZA 2008g, Mediciones Meteorológicas sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama. 25 de agosto de 2008 (Anexo B)
- CEAZA 2008h, Medición de Rutas Nieve en el Sector de La Olla, Valle del Estrecho, Huasco Superior, III Región, 1 de septiembre de 2008.
- CMN 2000, EIA Proyecto Pascua-Lama. Capítulo 5. Línea Base.
- CMN 2004, EIA Modificación de Proyecto Pascua-Lama.



- CMN 2005a. Plan de Reubicación de Hielo (Adenda 2 Anexo III-E)
- CMN 2007b al Programa de Monitoreo de Glaciares Rev 2, marzo 2007
- CMN 2007c Respuesta a Consultas de las autoridades sobre versión 2 del PMG, Marzo 2007
- CMN. 2008a. Mediciones de caudales cercanos a los glaciares y glaciaretos. Cuencas superiores del río Huasco. Verano 2007-2008 (Anexo E)
- CMN. 2008b. Monitoreo del Movimiento de los Glaciares. Cuenca Superior del Río Huasco - Tránsito. (Anexo N)
- CMN. 2008d. Monitoreo de Movimiento de los Glaciares de Roca. Cuenca superior del rio Huasco – Tránsito (Anexo M)
- CMN 2008e. Plan de Monitoreo de Glaciares. Rev 3
- CMN 2008f Selección de Glaciarrete de referencia, Plan de monitoreo de glaciares Proyecto Pascua-Lama
- CMN 2009a Geología y su relación con la depositación natural de polvo y detritos en los cuerpos de hielo, 13 de julio 2009 (Anexo S)
- CMN. 2009b. Mediciones de Polvo Sedimentable en las cercanías de los Glaciares y Glaciaretos, Verano 2008 (Anexo L)
- CMN 2009c. Programa de monitoreo de glaciares y glaciaretos a través de imágenes satelitales de alta resolución. (Anexo R)
- CMN 2009d. Glaciarrete de Referencia Ortigas 2, 9 de julio 2009 (Anexo T)
- Cogley (2005). Mass and Energy Balances of Glaciers and Ice Sheets. Encyclopedia of Hydrological Sciences
- CONAMA 2007 Ordinario N° 392 de CONAMA Tercera Región. 25 de abril de 2007
- COREMA 2001a, Resolución de Calificación Ambiental Resolución 39 de fecha 25 de abril de 2001
- Conic-BF, 1999. Estudios Hidrológicos para los Estudios Ambientales del Proyecto Pascua-Lama, Lado Chileno (Rev.A) por Barrick Chile, October 1999
- COREMA 2001b, Resolución 059 de COREMA Tercera Región. 3 de julio de 2001.
- COREMA 2006, Resolución de Calificación Ambiental 024 de COREMA Tercera Región. 15 de febrero de 2006
- Denby, B., and W. Greuell (2000), The use of bulk and profile methods for determining surface heat fluxes in the presence of glacier winds, J. Glaciol., 46(154), 445–452
- DGA 1986. Inventario de glaciares de los Andes Chilenos desde la I Región a la IV Región;
- Freeze R, Cherry J 1979, Groundwater
- Garratt, J. R. (1992), The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge Univ. Press, New York, p. 117



- Ginot P., Kull C., Schwikowski M., Schotterer U. and Gaggeler H., 2001, Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes)
- Ginot P., Stampfli F., Stampfli D., Schwikowski M. 2002, FELICS, a new ice core drilling system for high-altitude glaciers
- P. Ginot, C. Kull, U. Schotterer, M. Schwikowski, and H. W. Gaggeler, (2006) Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes)
- GOLDER 2002a Subsurface Thermal Survey Program , MAGSA, April 26 2002
- GOLDER 2002b Glacier Survey Pascua-Lama, January 2002, 019-2021
- GOLDER 2003a Investigación de reconocimiento de los Glaciares de las Quebradas Ortigas y Poterillos, diciembre 2003, 039-2041
- GOLDER 2003b Estudio de Glaciares Marzo 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2007
- GOLDER 2004a Estudio de Glaciares Diciembre 2003 Proyecto Pascua-Lama, 039-2041
- GOLDER 2005a. Línea base de Hidrología para el lado Chileno del Proyecto Pascua-Lama, (Adenda 2 Anexo II-B)
- GOLDER. 2005b. Caracterización Geomorfológico Preliminar del Área de Pascua. (Adenda 2 Anexo III-C)
- GOLDER. 2005c. Modelamiento de Vientos (Adenda 2 Anexo III-D)
- GOLDER |2005d Relevamiento de Cuerpos de Hielo Descubierta en la Cuenca del Río Huasco-Algodones
- GOLDER 2005e Efecto de las Tronaduras sobre los Glaciares
- GOLDER 2005f Plan de Trabajo de la Hidrología de Glaciares de Rocas
- GOLDER. 2005g. Estudio de Campo de Hielo y Glaciares 059-2701 (que incluye como anexos Golder 2002b, 2003a, 2003b y 2004a) (Adenda 2 Anexo III-G)
- GOLDER. 2005h. Simulación de Grilla Fina de la Depositación de Polvo debido a las Actividades Mineras Proyecto Pascua-Lama (Adenda 2 Anexo IV-A)
- GOLDER. 2005i. Estabilidad General de los Glaciares Impactados, Proyecto Pascua-Lama, (Adenda 3 Anexo 2.1.A)
- GOLDER. 2005k. Glaciar de Roca en el Sector Nevada Norte (Adenda 3 Anexo 2.1.D)
- GOLDER 2005n, Abril 2005, Viabilidad de Manejo de los Glaciares, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- GOLDER 2005q, Abril 2005, Monitoreo de Glaciares de Noviembre de 2004, Proyecto Pascua-Lama, 051419017
- GOLDER 2005r, noviembre 2005, Informe Geológico Valle del Río Del Estrecho Proyecto Pascua-Lama 0592701 (Adenda 2 Anexo II-A)
- GOLDER 2005s, noviembre 2005, Plan de Reubicación de Hielo Proyecto Pascua-Lama Versión Final, (Adenda 2 Anexo III-E)



- GOLDER 2005t, Condiciones Hidrogeológicas de línea base sector superior del río del Estrecho, Proyecto Pascua-Lama (versión 4.0), 059-2701
- GOLDER. 2006a. Technical Memorandum 0614_06 - GPR Test Toro #1
- GOLDER 2006d. Observaciones de contenido de hielo en el sector de cabecera del estrecho, 059-2701-220-008, 6 de enero de 2006
- GOLDER 2006f, October 2006, Sublimation field data and discussion, Pascua-Lama Project 06-1419-018/5610
- GOLDER 2008e, julio 2008, Estudio de Barreras de Nieve, Proyecto Pascua-Lama, 079215 5019
- GOLDER 2008f enero 2008, Revisión Geotécnica Botaderos Nevada Norte Proyecto Pascua-Lama, Revisión 1, 079 215 1018
- GOLDER 2009a Monitoreo de temperatura de Glaciares y Glaciaretos en el Área Pascua-Lama, 079215019-2.1-IT 002 (Anexo C).
- GOLDER 2009b Informe. Actualización información Geoforma Estrecho B, 079 215 5109-2.5-IT 004, (Anexo Q), incluyendo:
- GOLDER 2006b. Technical Memorandum 0818_06 - Updated Volume Estimate, Estrecho B Geoforma.
- GOLDER 2006c. Technical Memorandum 0621_06 - Seismic Survey Results (Resultados Perfilaje Sísmico Geoforma Estrecho B), 18 de agosto de 2006
- GOLDER, 2006e. Glaciar de Roca en el Sector de Nevada Norte, 7 de enero de 2006.
- GOLDER 2009c Retroceso Glaciar e Impacto del Cambio Climático Proyecto Pascua-Lama, 0792155019-2.6-IT 003 (Anexo H)
- GOLDER 2009d Balance de Masa, verano de 2006, 079 215 5019-IT001, 22 de enero de 2009 (Anexo O)
- Gruber S, Haeberli W 2005, Results of inicial permafrost modelling (PASCUA_RAD), University of Zurich, 26 septiembre 2005
- Hock R. y B. Holmgren (1996), Some aspects of energy balance and ablation of Storglaciären, northern Sweden, Geogr. Ann., 78A, 121–131
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguera, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.) (2001) IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY,
- International Permafrost Association (IPA) 2004, Handbook on Periglacial Fields Methods
- IRD, 2008 (Institut de recherche pour le développement), IRD Field Report on Pascua-Lama, 08/12/2008
- Jones, 2005a, octubre 2005, Modelo Hidrológico de la cuenca río Estrecho (adenda 2 anexo II-F)
- Jones 2005b, 1 de noviembre de 2005, Modelo Hídrico de los Glaciares de la Cuenca Superior del Río El Toro y los Cambios Potenciales a los Caudales Aguas Abajo



- Jones, 2006, enero 2006, Modelo Hidrológico de la cuenca río Estrecho (adenda 3 anexo 6-1)
- Knight Piesold 2009, Modelo de Simulación Hidrogeológico Pascua (Ref No. SA202-00027/12-2) rev C, 25 de marzo 2009
- Köppen 1900, clasificación climática de Köppen
- Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas and T. Zhang, 2007: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lettau, H (1969), Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness element description, J. Appl. Met., 8, 828–832.
- MA&C 2007. Programa de Monitoreo Ambiental julio 2006 a junio 2007
- Mattson, L.E., Gardner, J.S. and Young, G.J., 1993. Ablation on debris covered Glaciars: an example from the Rakhiot Glaciar, Punjab, Himalaya. In: G.J. Young (Editor), Snow and Glaciar hydrology. IAHS-IASH Publication 218, Wallingford, pp. 289-296.
- Milana, J.P. 1998 Predicción de caudales de ríos alimentados por deshielo mediante balances de energía: Aplicación en los Andes Centrales, Argentina. Asociación Argentina de Sedimentología, revista, v. 5 (2), p. 53-69.
- Milana J.P. 2005. Línea Base de la Criosfera. Proyecto Pascua-Lama. (Adenda 2 Anexo III-A)
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia Ley 19.300, Ley de Bases del Medio Ambiente (Artículo 12), 1994
- MINSEGPRES, 2001. D.S. N°95, 2001. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. D.of. 7 de diciembre de 2002. Chile. , (Artículo 12, letra f)
- Neuendorf, k. K. E., Mehl, J. P., JR & Jackson, J. A. 2005. Glossary of Geology,
- Paterson W.S.B 1994 The physics of glaciers 3ra Ed.,
- Proust 2008 Antecedentes Sistematizados de Procesos de Evaluación Ambiental del Proyecto Pascua-Lama en Chile, Capitulo 3 - Elementos del Medio Ambiente
- Ritter DF., Kochel R C, and. Miller JR 2002, Process Geomorphology 4th edition 2002
- UNESCO, 1970, Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins. Part I: A guide for compilation and assemblage of data for glacier mass balance measurements. UNESCO/IAHS Technical Papers in Hydrology 5.
- Vallon M.y Vincent C. 2005. Balance Invernal 2005 de los Glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco (Adenda 2 Anexo III-B)



RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS DE LÍNEA BASE ACTUALIZADA DE LA CRÍOSFERA

- Van Everdingen, R. (ed.): 1998. Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms, revised May 2005. National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, Boulder, CO, <http://nsidc.org/fgdc/glossary>
- Wagnon, P, P. Ribstein, B. Francou et al. (1999), Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, J. Geophys. Res., 104, 3907–3923

Golder Associates S. A.

Jeff Schmok
Glaciólogo
Principal

Paul Horrey
Associate

AM/JS/MEP/ca

r:\079\abiertos\079 215 5019 cmn, glacier technical support\informacion tecnica\task_3_linea base\informe\19 oct. 2009\079 215 5019-3.0-it 005-recop. est. l.b. criosfera.doc

En Golder Associates nos esforzamos por el ser grupo global más respetado especializado en proveer servicios de ingeniería de la tierra y ciencias ambientales. Operando como una compañía de propiedad de sus empleados desde nuestra formación en 1960, hemos creado una cultura única de compromiso que nos lleva a una estabilidad organizacional de largo plazo. Como resultado, nuestros clientes cuentan con el apoyo de profesionales que entienden sus necesidades en los ambientes específicos en los que operan. Seguimos expandiendo nuestras capacidades técnicas y experimentando un crecimiento constante de nuestras oficinas en África, América del Norte, América del Sur, Asia, Europa y Oceanía.

África	+ 27 11 254 4800
América del Norte	+ 1 800 275 3281
América del Sur	+ 55 21 3095 9500
Asia	+ 852 2562 3658
Europa	+ 356 21 42 30 20
Oceanía	+ 61 3 8862 3500

solutions@golder.com
www.golder.com



Golder Associates S.A.
Av.11 de Septiembre 2353 - Piso 2
Providencia
Santiago
Chile
T: +56 (2) 594 2000

