



Santiago, 9 de Septiembre de 2014
PL-093/2014

Señor
Cristian Franz T,
Superintendente de Medio Ambiente
Presente

ANT: Carta PL 0084, Plan de Comunicaciones por Excedencia en Plan de Monitoreo de Glaciares

MAT: Presenta Informe "Excedencia de Limites PMG 2014"

De nuestra consideración:

Por medio de la presente, de conformidad a lo establecido en el Plan de Monitoreo de Glaciares PMG v.3, adjuntamos informe individualizado en la MAT tal como fuera indicado en la Carta PL 0084 ingresada a esa Superintendencia con fecha 12 de agosto de 2014.

El informe concluye que *"las causas que explican los balances de masa negativos mostrados por los cuerpos de hielo de Pascua Lama, y la excedencia del Límite 1 del Índice A para el Glaciar Guanaco y el Glaciarrete Esperanza, debiesen asociarse a las condiciones meteorológicas reinantes durante el año hidrológico 2013-2014, en el marco de la tendencia de retroceso glacial y condiciones meteorológicas adversas durante la última década"*

Sin otro particular, le saluda muy atentamente,

Francisco Charlin Montero
Director Legal
Compañía Minera Nevada SpA

JBV/jbv

CC:

- Archivo.

Direcciones:

Alto del Carmen, 31 de enero S/N, fono: 051-202503. Vallenar, Ochandía 1460, fono: 051-202255. Copiapó, Callejón Diego de Almagro 204; fono: 052- 234832. Coquimbo, Barrio Industrial, sitio 58, Alto Peñuelas; fono: 051-202208

COMPAÑÍA MINERA NEVADA

PASCUA LAMA

EXCEDENCIA DE LÍMITES PMG 2014

FINAL - REVISIÓN A

PROYECTO No.: 0011-177-04
FECHA: 05 de Septiembre, 2014
DOCUMENTO No.:

DISTRIBUCIÓN:
CMN: 2 copias
BGC: 2 copias



BGC INGENIERIA LTDA.
AN APPLIED EARTH SCIENCES COMPANY

Av. Apoquindo 3039, Piso 10, Las Condes
Santiago, Chile CP 7550227
Teléfono +56 2 23740090

05 de Septiembre, 2014
Proyecto No.: 0011-177-04

Rodolfo Westhoff, Gerente de Medio Ambiente
Compañía Minera Nevada
Sitio 58, Barrio Industrial
Coquimbo, Chile

Estimado Sr. Westhoff,

Re: Excedencia de Límites PMGv3 año 2014.

Por favor sírvase encontrar a continuación el informe titulado "Excedencia de Límites PMGv3 año 2014".

Por favor no dude en contactarnos en caso que tenga cualquier duda o comentario.

Atentamente,

BGC INGENIERÍA LTDA.

Por:

Dr. Pablo Wainstein, M.Sc. Eng
Ingeniero Civil Hidráulico Sénior (Chile y Canadá)
Experto Glaciares / Permafrost
Gerente Regional Servicios Glaciales y Periglaciales para Sudamérica

RESUMEN EJECUTIVO

El año hidrológico 2013-2014 fue un año seco, y que junto al año anterior, constituyen uno de los bienios más secos de las últimas décadas en La Serena (CECs, 2014a). Las precipitaciones en La Serena, pese a no ser las más indicativas de la región cordillerana, pero al ser de largo plazo, ilustran cambios en las precipitaciones de la región en un periodo más largo. El año 2013-2014 se caracterizó por la presencia de una fase neutra de El Niño Oscilación del Sur (ENSO por su sigla en inglés), lo que agudizó los efectos negativos sobre los glaciares de una sequía de mediano plazo, debida a casi siete años de predominancia de eventos la Niña (CECs, 2013; 2014a). Este año también se caracterizó por una baja amplitud térmica estacional y una alta ablación estival respecto a la de años previos (CECs, 2014b). En respuesta a lo anterior, todos los cuerpos de hielo monitoreados en el PMGv3, tanto de referencia (fuera del área del proyecto) como aquellos ubicados en el área de influencia del proyecto minero, experimentaron un balance de masa negativo. Los valores observados son similares o más negativos que los identificados desde el inicio de las mediciones de este tipo el año 2002.

El balance de masa del Glaciar Guanaco durante el año 2013-2014, fue el segundo menos negativo de todos los cuerpos de hielo monitoreados (CECs, 2014a). De hecho, el balance del 2013-2014 tampoco es el más negativo de la serie con datos, puesto que durante el periodo de referencia, el año 2004-2005 exhibió un balance aún más negativo (-0.96 m eq.a.). El Glaciarrete Esperanza presentó durante este año hidrológico el valor más negativo de todos los cuerpos de hielo del área, pero al igual que en Guanaco, no presentó el más negativo de la serie de tiempo completa, el que se observó en el año 2008-2009 (-2.29 m eq.a.). Esto indica que a pesar de las desfavorables condiciones meteorológicas del 2013-14, ni el Glaciar Guanaco ni el Glaciarrete Esperanza tuvieron la respuesta más exacerbada de la serie disponible.

En este contexto, el hecho de que los límites 1 del Índice A del Glaciar Guanaco y del Glaciarrete Esperanza hayan sido superados no es sorprendente, porque son los dos cuerpos de hielo con más alto coeficiente de variación (136 y 118 respectivamente). En este escenario, un año seco como el 2013-2014 es muy probable que supere los extremos del periodo de referencia (2002-2009). Es así que el PMGv4 en desarrollo pretende abarcar e incluir la variabilidad mostrada en cada cuerpo de hielo para individualizar de mejor manera la aplicación de los límites y que estos no sean estándar para todos los casos independientemente de su comportamiento glaciológico particular.

En conclusión, y teniendo en cuenta lo expresado en el presente documento y la información disponible a BGC, consideramos que las causas que explican los balances de masa negativos mostrados por los cuerpos de hielo de Pascua Lama, y la excedencia del Límite 1 del Índice A para el Glaciar Guanaco y el Glaciarrete Esperanza, debiesen asociarse a las condiciones meteorológicas reinantes durante el año hidrológico 2013-2014, en el marco de la tendencia de retroceso y condiciones meteorológicas adversas durante la última década.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	i
TABLA DE CONTENIDO.....	ii
LISTA DE TABLAS	ii
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE APÉNDICES.....	iii
LIMITACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	iv
1.0 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE TRABAJO.....	1
2.0 OBJETIVOS	2
2.1. General	2
2.2. Específicos.....	2
3.0 EL PROYECTO Y SU PROGRAMA DE MONITOREO DE GLACIARES	3
3.1. Estado de Actividades del Proyecto.....	3
3.2. Plan de Monitoreo de Glaciares	3
3.3. Evaluación Índice A: Período 2013-2014.....	4
3.4. Evolución Temporal del Índice A	5
4.0 ANTECEDENTES METEOROLÓGICOS Y FÍSICOS	7
4.1. Meteorología	7
4.2. Cambios Glaciales Regionales y Locales	9
4.3. Características Superficiales, Geomorfología y Mediciones en Terreno.....	13
5.0 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	16
6.0 CIERRE	18
REFERENCIAS.....	19

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Índice A del período 2013-2014 comparado con el periodo de referencia. Fuente: CECs, 2014b. Los cuerpos marcados en gris son de referencia.	5
Tabla 3-2. Índice A: Balance de masa neto desde el inicio de las mediciones. Fuente: CECs (2013, 2014b). Achurado en naranja se presenta el período de referencia y en gris, los cuerpos de hielo de referencia.	6

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Balance de masa glacial neto en metros equivalentes de agua (m eq. a.). Fuente: CECs (2014b).	6
---	---

Figura 4-1.	Isoterma 0°C interpolada (línea azul) para año hidrológico 2013-2014. Además se muestra promedio de la altitud de la isoterma 0°C para el periodo 2000-2013 (línea roja) junto a los valores máximos y mínimos alcanzados durante el mismo periodo (líneas segmentadas). Datos re-análisis NCEP-NCAR. Fuente: CECs (2014a).	8
Figura 4-2.	Cambios globales relativos en el tamaño de los cuerpos de hielo superficial desde 1973 a 1998/99, versus tamaño de éstos. Tendencia general (línea roja): Mientras mayor es el cuerpo de hielo, menor es el cambio temporal relativo.	10
Figura 4-3.	Balance de masa acumulativo medio de todos los glaciares y glaciaretes informados (línea azul) y cuerpos de hielo de referencia (REF) (línea roja). Las líneas amarillas gruesas destacan cambios en las tendencias desde el año 2000 (Fuente: World Glacier Monitoring Service).	10
Figura 4-4.	Cambios en la longitud y área de algunos glaciares seleccionados en América del Sur (Fuente: Vuille et al., 2008)	11
Figura 4-5.	Comparación de balance de masa glacial entre cuerpos de hielo ubicados en el Proyecto Pascua Lama y otros ubicados fuera del sitio industrial.	12
Figura 4-6.	Balance de masa glacial del Glaciar Echaurren según información provista por la DGA de Chile.	12
Figura 4-7.	Comparación visual de la evolución del Glaciar Guanaco entre los años 1955 y 1996.	13
Figura 4-8.	Comparación visual de la evolución del Glaciarete Esperanza entre los años 1956 y 1996.	13
Figura 4-9.	Rugosidades superficiales y penitentes en Pascua Lama.	14
Figura 4-10.	Proceso de cubrimiento por derretimiento. El glaciarete se cubre de detritos al éstos emerger como resultado del derretimiento de las capas de hielo internas bajo escenarios de balances de masa negativos continuos. Ilustración: BGC.	15

LISTA DE APÉNDICES

APÉNDICE A COMPARACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL GLACIAR GUANACO Y EL GLACIARETE ESPERANZA

LIMITACIÓN DE RESPONSABILIDAD

BGC Ingeniería Ltda. (BGC) preparó este documento a cuenta de Compañía Minera Nevada SpA. El material en este documento refleja el criterio del personal de BGC de acuerdo con la información disponible al momento de la preparación del documento. El uso del presente documento por parte de terceros, o cualquier decisión adoptada en base al él es responsabilidad de terceros. BGC no acepta responsabilidad alguna por eventuales daños que sufra un tercero como resultado de las decisiones adoptadas en base a este documento.

Como forma de protección mutua a nuestro cliente, al público y a nuestra compañía, todos los documentos y planos son presentados como información confidencial de nuestro cliente para un proyecto específico. La autorización para el uso y/o publicación de este documento o cualquier otra información, declaraciones, conclusiones o resúmenes de nuestros documentos o planos, por medio de cualquier forma de impresión o por medios electrónicos, que incluyen sin limitación, la colocación o reproducción en cualquier sitio web, se encuentra reservada y depende de la aprobación por escrito de BGC. Si este documento se emite en forma electrónica, BGC archivará la copia original en papel y dicha copia es la principal referencia con prioridad frente a cualquier copia electrónica de dicho documento o frente a cualquier extracto de nuestros documentos publicados por terceros.

1.0 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE TRABAJO

En el marco de la ejecución del Plan de Monitoreo de Glaciares (PMGv3) (Barrick, 2008) del proyecto Pascua Lama, Compañía Minera Nevada SpA (CMN) entregó a la autoridad ambiental correspondiente, el informe anual del balance de masa de los glaciares y glaciaretes, correspondiente al período hidrológico 2013-2014 (CECs, 2014b). El informe, con fecha 31 de Julio de 2014, evidenció una excedencia en el Límite 1 del Índice A para el Glaciar Guanaco y para el Glaciarete Esperanza.

El Índice A en cuestión se define como *“El balance de masa del glaciar o glaciarete comparado con el balance de masa de dicho glaciar o glaciarete en un período sin influencia de la actividad minera, el que para estos efectos ha sido definido entre los años 2002-2003 y 2008-2009”* (Barrick, 2008). El balance de masa glacial se expresa en metros equivalente de agua (m eq. a.).

Ante la ocurrencia de un evento como el señalado, el PMGv3 establece la activación del plan comunicacional ante la autoridad ambiental correspondiente. Así también se requiere de la elaboración de un informe que explique la excedencia de los límites en cuestión, teniendo en cuenta la situación actual del proyecto y de la evolución temporal de los cuerpos de hielo respectivos sometidos a las particularidades y variabilidades meteorológicas anuales y decadales.

Dado lo anterior, CMN ha solicitado a BGC Ingeniería Ltda. (BGC) preparar un informe que analice las razones que explican la excedencia del Límite 1 en las crioformas mencionadas, durante el periodo comprendido entre el 1 de Abril del año 2013 y el 31 de Marzo del 2014. Es así que el presente informe se enfoca solamente en los casos del Glaciar Guanaco y el Glaciarete Esperanza, y específicamente en el desarrollo de su balance de masa que ha mostrado la excedencia del Límite 1 para el periodo correspondiente a 2013-2014.

El informe se organiza de la siguiente manera:

- La sección 1 presenta una introducción al informe y describe el alcance del trabajo a ser presentado.
- La sección 2 describe los objetivos generales y específicos buscados en el informe.
- La sección 3 explica los antecedentes relacionados al proyecto y su programa de monitoreo de glaciares.
- La sección 4 presenta una caracterización física y meteorológica breve del ambiente glacial regional y local. Se incluyen descripciones de la meteorología, y cambios glaciológicos experimentados por cuerpos de hielo de relevancia, para finalmente entregar un marco conceptual que entregue luces con respecto a la excedencia del límite en cuestión.
- La sección 5 discute los resultados y describe las principales conclusiones del informe.
- La sección 6 da cierre al presente documento.

2.0 OBJETIVOS

2.1. General

El objetivo general del presente documento es presentar el marco conceptual, meteorológico, geomorfológico y glaciológico que ayuden a entender las razones que explican la excedencia del Límite 1 del Índice A para el Glaciar Guanaco y el Glaciarrete Esperanza según lo informado en el informe de balance de masa glacial del periodo 2013-2014 (CECs, 2014b). El desarrollo del presente informe da cumplimiento al requerimiento de activación del plan comunicacional establecido en el PMGv3 debido a la excedencia del límite antes mencionado.

2.2. Específicos

De modo de poder dar cumplimiento al objetivo general antes estipulado, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- a. Realizar una caracterización del ambiente glacial regional y local con respecto a su meteorología, cambios glaciológicos y geomorfología de modo de establecer el marco conceptual en donde se da lugar a la excedencia del límite en cuestión.
- b. Contextualizar el comportamiento de los glaciares y glaciaretos monitoreados en el marco del PMGv3 con el comportamiento de otros glaciares de la zona Central de Chile.
- c. Describir los antecedentes del PMGv3 que enmarcan la excedencia del límite antes mencionado y establecer la cuantía de la excedencia.
- d. Contextualizar la excedencia del límite con el nivel de actividades del proyecto Pascua Lama.

3.0 EL PROYECTO Y SU PROGRAMA DE MONITOREO DE GLACIARES

3.1. Estado de Actividades del Proyecto

Actualmente el proyecto Pascua Lama se encuentra paralizado. Su paralización se debe, principalmente, a dos eventos en particular, los que han resultado en una disminución casi total de las actividades industriales que se llevaban a cabo en la zona del proyecto. Primeramente, el proyecto paralizó sus actividades de “pre-stripping” el 27 de Octubre del año 2012, debido al aumento de polvo observado en el área del rajo. Seguido de esto, por medio de la carta PL-120/2013 de fecha 07 de Junio del 2013, CMN procedió a la paralización total de las actividades de la fase de construcción del proyecto de acuerdo a lo instruido por la Superintendencia del Medio Ambiente a través de su Resolución Exenta N° 477 de fecha 24 de Mayo de 2013. Sin perjuicio de lo anterior, se mantuvo la continuidad del programa de monitoreo ambiental y el sistema completo de supresión de polvo. En resumen, y según lo establecido en la Resolución Exenta N° 477 de fecha 24 de Mayo de 2013, las obras sujetas a la paralización corresponden a:

- Construcción de corredores techados en el sector del campamento Barriales
- Área mina
- Construcción de talleres temporales de mantenciones de camiones
- Construcción de torres temporales de comunicación
- Instalación de la línea de distribución de energía para el rajo
- Construcciones en el taller de mantenciones de camiones
- Construcción del túnel de traslado del mineral a Lama
- Excavación y construcción de cavernas subterráneas del chancador
- Finalización y puesta en servicio de la subestación La Mesa (donde termina la línea de transmisión eléctrica de alta tensión)
- Finalización de la construcción de oficinas temporales en la plataforma C-4
- Construcción de la plataforma del patio de almacenamiento de residuos peligrosos
- Construcción de la bocatoma de la planta de tratamiento de las aguas de contacto
- Reparaciones, mejoras y obras de seguridad en la planta de tratamiento de aguas de contacto
- Construcción de la estación de bombeo de la planta de tratamiento de aguas de contacto
- Construcción del incinerador
- Construcción de los canales del sistema de no contacto en la zona del taller de mantenciones de camiones

3.2. Plan de Monitoreo de Glaciares

El PMGv3 (Barrick, 2008) describe los procedimientos a seguir para estudiar el estado actual de los cuerpos de hielo identificados, y metodologías para evaluar los potenciales efectos adversos sobre los glaciares y glaciaretos ubicados en el área de influencia proyecto Pascua

Lama. En particular, éste contiene la metodología para identificar un eventual efecto adverso sobre el estado de los glaciares y glaciaretes ubicados en su área de influencia. Para esto, el PMGv3 plantea una serie de índices a monitorear, identificados como: A, B, C, D, E, F y G. De estos, solamente las variaciones fuera de límites de los índices A y B activan un plan de comunicaciones interno y con las autoridades respectivas.

El programa cuenta con dos límites de excedencias, siendo estos los denominados: Límite 1 y Límite 2, de los cuales el segundo es más restrictivo que el primero y por lo tanto denota una mayor excedencia. La determinación de estos límites se realiza en función del promedio y desviación estándar del índice durante el período de referencia en comparación con lo observado en un año en particular. Los detalles de la descripción de cada índice y límite se encuentra en el documento PMGv3 (Barrick, 2008). Los límites son definidos como:

Límite 1: *“Se calcula como el promedio del balance de masa del periodo de referencia de cada glaciar más el 75% de la desviación estándar de dicho periodo”.*

$$\text{Límite 1} = [\text{Media} \pm 0.75 * \text{Sigma}] \quad (1)$$

Límite 2: *“Se calcula como el promedio del balance de masa del periodo de referencia de cada glaciar más la desviación estándar de dicho periodo”.*

$$\text{Límite 2} = [\text{Media} \pm 1 * \text{Sigma}] \quad (2)$$

En las ecuaciones 1 y 2 se denota la desviación estándar como *Sigma*.

3.3. Evaluación Índice A: Período 2013-2014

En el caso particular del balance de masa del periodo hidrológico 2013-2014, el plan de comunicaciones se activó como resultado de la excedencia del Límite 1 del Índice A para el caso del Glaciar Guanaco y del Glaciarete Esperanza. El Índice A corresponde al balance de masa anual superficial neto de un glaciar o glaciarete que se estima cada año hidrológico. Este valor se compara con su tendencia temporal presentada durante el período denominado de referencia (años 2002-2003 a 2008-2009), durante el cual no existía influencia de actividad minera del presente proyecto.

El Centro de Estudios Científicos (CECs) estimó el balance de masa neto de todos los glaciares y glaciaretes comprometidos en el PMGv3 durante el período 2013-2014. La Tabla 3-1 presenta los resultados del Índice A según lo informado a las autoridades (CECs, 2014b). Como puede verse en la Tabla 3-1, el balance de masa neto del Glaciar Guanaco (-0.88 m. eq.a.) superó el Límite 1 y fue igual al Límite 2 del Índice A. El Glaciarete Esperanza tuvo un balance de masa neto (-1.92 m eq.a.) que también excedió el Límite 1, pero fue inferior al Límite 2. En el caso de los glaciaretes Toro 1 y Toro 2, donde también se aplica este índice, no superaron los límites establecidos.

Tabla 3-1. Índice A del período 2013-2014 comparado con el periodo de referencia. Fuente: CECs, 2014b. Los cuerpos marcados en gris son de referencia.

GLACIAR/ Glaciarete	Balance neto (m eq. a.) 2013-2014	Balance neto (m eq. a.) 2002-2009		Límites	
		Media	Sigma	1	2
GUANACO	-0.88	-0.20	0.67	-0.71	-0.88
ESTRECHO	-1.02	s/d	s/d	n/a	n/a
Toro1	-1.44	-1.05	0.93	-1.75	-1.98
Toro 2	-0.66	-0.88	0.73	-1.43	-1.62
Esperanza	-1.92	-0.73	1.28	-1.69	-2.01
ORTIGAS 1	-1.30	s/d	s/d	n/a	n/a
Ortigas 2	-1.56	s/d	s/d	n/a	n/a

3.4. Evolución Temporal del Índice A

La Tabla 3-2 y Figura 3-1 presentan el desarrollo temporal del Índice A para el Glaciar Guanaco y el Glaciarete Esperanza. Se observa que el Índice A, estimado desde el período 2002-2003 al período 2013-2014, no muestra una tendencia temporal clara. Sin embargo, la mayoría de sus valores son negativos, es decir, los cuerpos de hielo ubicados tanto dentro como fuera del área de influencia del proyecto, han estado perdiendo masa durante todo el período de estudio. Esto concuerda con lo observado en otros cuerpos de hielo de la región, incluso desde la década de 1950. Se observa también, que para el período 2004-2005, durante el cual no hubo actividades, el Índice A del Glaciar Guanaco tuvo un valor de -0.96 m eq. a., es decir con mayor pérdida de masa que durante el periodo 2013-2014. Es así como es posible concluir que no se observa una relación directa de efectos adversos en el balance de masa anual neto de los glaciares y glaciaretes, ocasionados por las actividades industriales del proyecto.

Tabla 3-2. Índice A: Balance de masa neto desde el inicio de las mediciones. Fuente: CECs (2013, 2014b). Achurado en naranja se presenta el período de referencia y en gris, los cuerpos de hielo de referencia.

GLACIAR/ Glaciarete	Balance de masa glacial neto (m eq. a.)											
	2002- 2003	2003- 2004	2004- 2005	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014
GUANACO	1.23	-0.66	-0.96	0.21	-0.59	-0.37	-0.27	-0.77	-1.00	-0.71	-0.51	-0.88
Esperanza	1.70	-1.64	-1.37	0.39	-1.49	-0.42	-2.29	-2.15	-0.90	s/d	s/d	-1.92
ORTIGAS 1	s/d	s/d	s/d	s/d	-0.65	-0.43	-0.19	-2.07	-1.63	-1.17	-0.85	-1.30
Ortigas 2	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	-0.08	-1.44	-0.98	s/d	s/d	-1.56

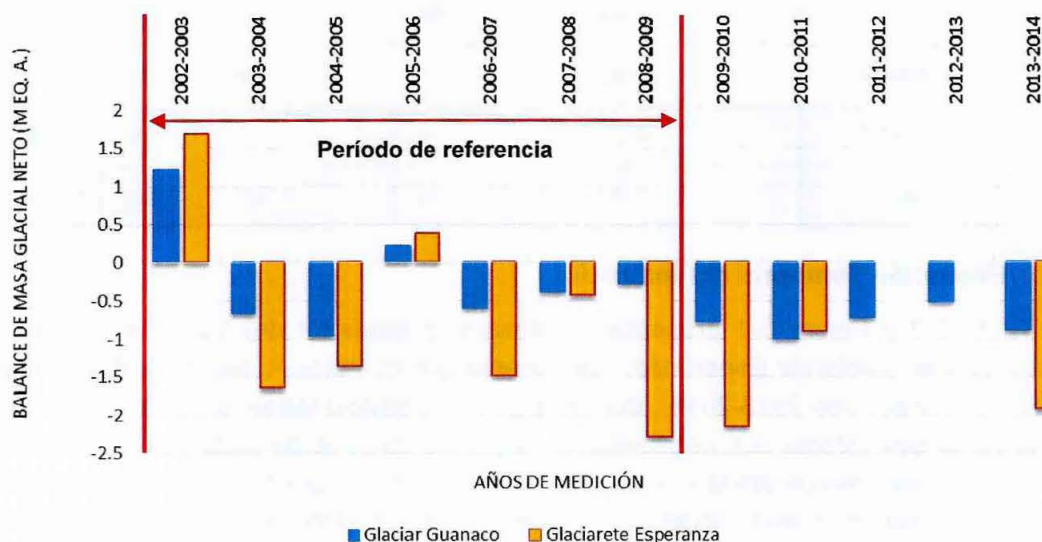


Figura 3-1. Balance de masa glacial neto en metros equivalentes de agua (m eq. a.). Fuente: CECs (2014b).

4.0 ANTECEDENTES METEOROLÓGICOS Y FÍSICOS

4.1. Meteorología

La meteorología de la Cordillera de Los Andes es ampliamente variable caracterizada generalmente por eventos o períodos más bien extremos, que últimamente, han tendido tendencia a ser de altas temperaturas del aire y bajos niveles de precipitación, acentuando la sequía de la zona y así la reducción de la masa glacial presente en el área. A continuación se presentan extractos, mostrados en fuente itálica, del informe de meteorología elaborado por CECs (2014a) que explican la situación meteorológica en más detalle.

“La zona de Pascua Lama (~29°S) se encuentra ubicada en la transición entre el Norte árido y la zona mediterránea en Chile Central (sur de los 33°S). Esta región corresponde a la zona de descenso de la Celda de Hadley. Sobre el océano Pacífico ecuatorial central existe una gran precipitación, la que es producida por la convergencia de vientos alisios en la denominada Zona de Convergencia Intertropical. En el ITCZ, debido a la convergencia en superficie, el aire es forzado a ascender, perdiendo la mayoría de su humedad hasta alcanzar la tropopausa tropical (~15 km) donde diverge en dirección hacia los polos. La Celda de Hadley completa su ciclo con el lento descenso o subsidencia del aire seco sobre las latitudes subtropicales. Esta subsidencia explica la presencia semi-permanente del Anticiclón del Pacífico en superficie, que se caracteriza por aumentar la temperatura de la tropósfera media-baja, hacer descender la humedad del aire, explicando parte de la aridez del Norte de Chile y la semi-aridez de la región conocida como Norte Chico (28-33°S). La presencia de la Cordillera de Los Andes mantiene prácticamente aislada esta región del régimen monzónico que prevalece en el lado oriental de la cordillera durante el verano austral (Garreaud, 2011).

Algo importante a destacar es que la mayor parte del periodo 2013-14, la isoterma 0°C se encontró bajo los 5000 m snm. Este hecho tiene gran trascendencia en relación al balance de masa glacial ya que al estar las alturas mínimas de los cuerpos de hielo en torno a los ~5000 m snm (Rabatel et al., 2011) excepto el glaciar Ortigas 1, los procesos de ablación no estarían predominantemente asociados a fusión sino que a sublimación. Respecto a años anteriores (2000-2013) se aprecia el mismo comportamiento en la isoterma 0°C, destacando sin embargo algunos máximos en que los valores se encuentran sobre o bajo los valores máximos y mínimos de isoterma 0°C, lo cual puede indicar que existió mayor variabilidad interdiaria en el año hidrológico 2013-2014.”

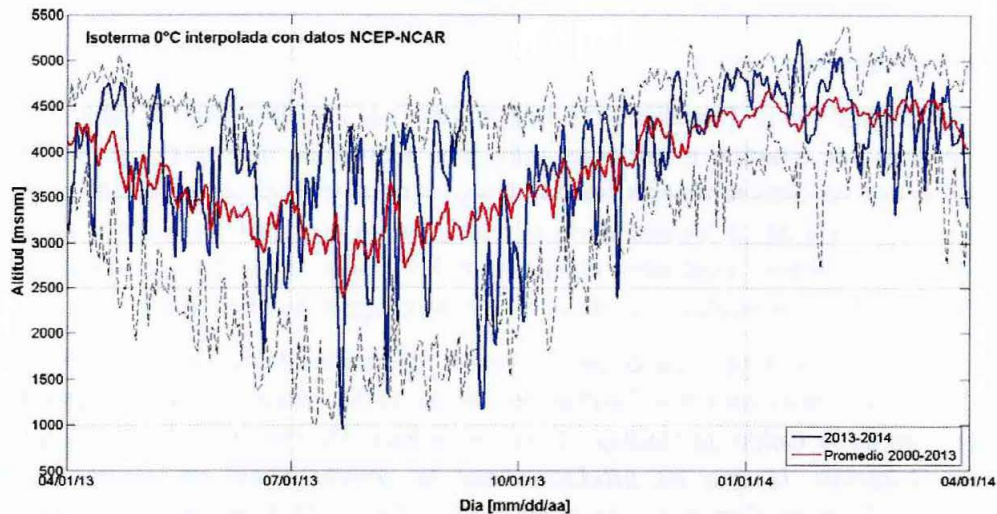


Figura 4-1. Isoterma 0°C interpolada (línea azul) para año hidrológico 2013-2014. Además se muestra promedio de la altitud de la isoterma 0°C para el periodo 2000-2013 (línea roja) junto a los valores máximos y mínimos alcanzados durante el mismo periodo (líneas segmentadas). Datos re-análisis NCEP-NCAR. Fuente: CECs (2014a).

“Respecto a los vientos predominantes a la altitud del Proyecto Pascua Lama, se determina que éstos provienen del oeste y del norte. Mientras que sobre los registros de precipitaciones, según el sensor nival instalado sobre la superficie del Glaciar Guanaco, se identificaron solo 5 eventos de acumulación nival (17/Mayo/2013, 11/Junio/2013, 22/Junio/2013, 7/Julio/2013, 26/Julio/2013), de los cuales sólo uno de ellos tiene relación con eventos a una escala sinóptica regional, el resto son de carácter local. A su vez, existen eventos que a pesar de encontrarse asociado a un sistema frontal típico de latitudes medias, no generaron acumulación nival en Pascua Lama.

Si bien el año hidrológico 2013-2014 se presentó con condiciones predominantemente ENSO neutro, los datos pluviométricos obtenidos en La Serena mostraron un déficit pluviométrico, excepto en el mes de Mayo. Esta es una tendencia a nivel regional, donde se ha definido la última década como una de las más secas en la historia. A pesar de lo anterior, se debe indicar que en la zona de Pascua Lama existió una mayor cantidad de eventos de precipitación, los que son típicos de condiciones de un clima de alta montaña. Estos sin embargo, también dependen de las condiciones sinópticas a escala regional, ya que la condensación por el ascenso forzado de la masa de aire sobre la cordillera debe contener suficiente humedad como para que ocurra la precipitación en altura.

En relación a los efectos e impactos sobre los cuerpos de hielo existentes en la zona de Pascua Lama, es esperable que bajo las condiciones meteorológicas descritas anteriormente, la sublimación sea un proceso de importancia en la ablación durante los meses de invierno. En verano, existen escasos días en que la isoterma 0°C se ubicó sobre la altitud de los

glaciares, existiendo por lo tanto temperaturas positivas del aire sobre los glaciares. En estos casos, el derretimiento debiera ser significativo y el proceso de mayor importancia en la ablación. Además debe agregarse que la radiación solar penetra algunas decenas de centímetros al interior del manto de nieve, situación que favorece el derretimiento bajo superficie incluso en días con temperaturas bajo los 0°C, todos estos procesos, determinan que la ablación este mayormente controlada por el derretimiento. En las superficies de los glaciares, la temperatura se presentó como más fría en verano y más cálida en invierno respecto a los últimos 5 años hidrológicos”.

4.2. Cambios Glaciales Regionales y Locales

Las crioformas glaciales, en este caso glaciares y glaciaretos, reaccionan, dependiendo de su tamaño, considerablemente rápido a cambios en la meteorología anual y decadal. Estos son especialmente sensibles a las altas temperaturas de los veranos que aumentan los procesos de derretimiento, y a los regímenes de precipitación invernal que gobiernan las entradas de masa por concepto de caída de nieve.

Dentro de las crioformas glaciales más variables están los glaciaretos. Éstos, al ser más pequeños que un glaciar, de menor masa y espesor, reaccionan rápidamente a cambios meteorológicos (Figura 4-2). La Figura 4-2 presenta la relación general existente entre el tamaño de un cuerpo de hielo superficial y el cambio relativo que este puede experimentar. Es así que por ejemplo cuerpos de hielo de 100 km² experimentan cambios muy menores con respecto a su área total, mientras que glaciares chicos o glaciaretos, de 0,1 km² pueden experimentar cambios que involucran variaciones de un 100% de su área. Es así que es común encontrar estas masas de hielo siendo fraccionadas en pedazos menores, debido a los cambios naturales de la climatología regional, como lo es el caso de muchos glaciares y glaciaretos en el mundo (Figura 4-3) y Sudamérica bajo la influencia del cambio climático global (Figura 4-4).

En Los Andes secos de Sudamérica, la variabilidad temporal de los glaciaretos es particularmente alta debido a que se ubican, por lo general a lado de sotavento de filos montañosos, como es el caso del Glaciarete Esperanza. Su ubicación topográfica no es coincidencia, ya que el principal ingreso de masa a un glaciarete es por redistribución de nieve por viento, y es la turbulencia del viento encontrada en los lados de sotavento, la responsable de permitir la depositación de nieve. Junto con una depositación de nieve, también destaca la depositación natural de polvo en suspensión, lo cual se observa en bandeamientos de polvo y detritos englaciados en la mayoría de los cuerpos de hielo superficial en Los Andes. El bandeamiento corresponde a la depositación de material detrítico seguido del posterior cubrimiento por nieve durante el invierno, resultando a veces en una serie de capas alternadas de hielo y detritos o hielo sucio.

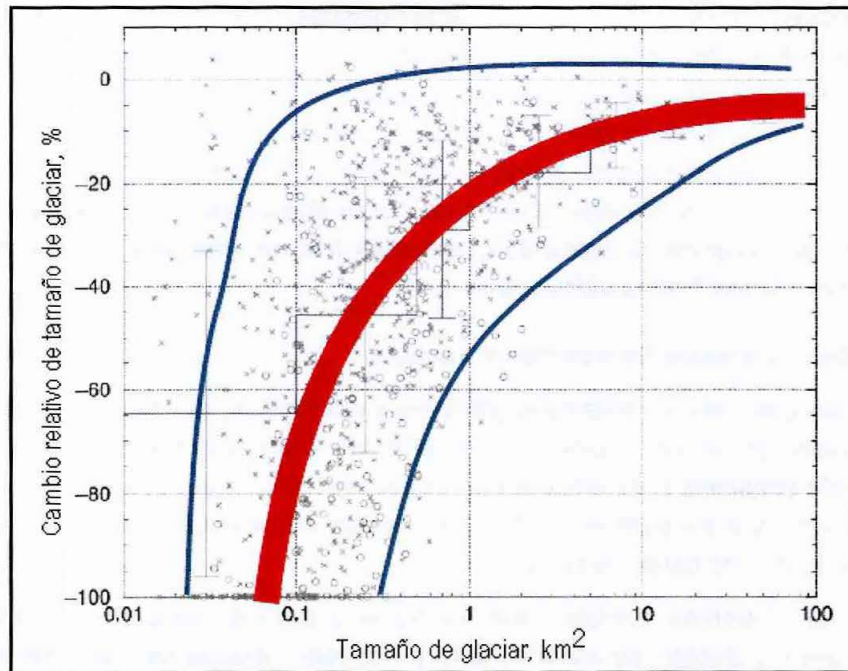


Figura 4-2. Cambios globales relativos en el tamaño de los cuerpos de hielo superficial desde 1973 a 1998/99, versus tamaño de éstos. Tendencia general (línea roja): Mientras mayor es el cuerpo de hielo, menor es el cambio temporal relativo.

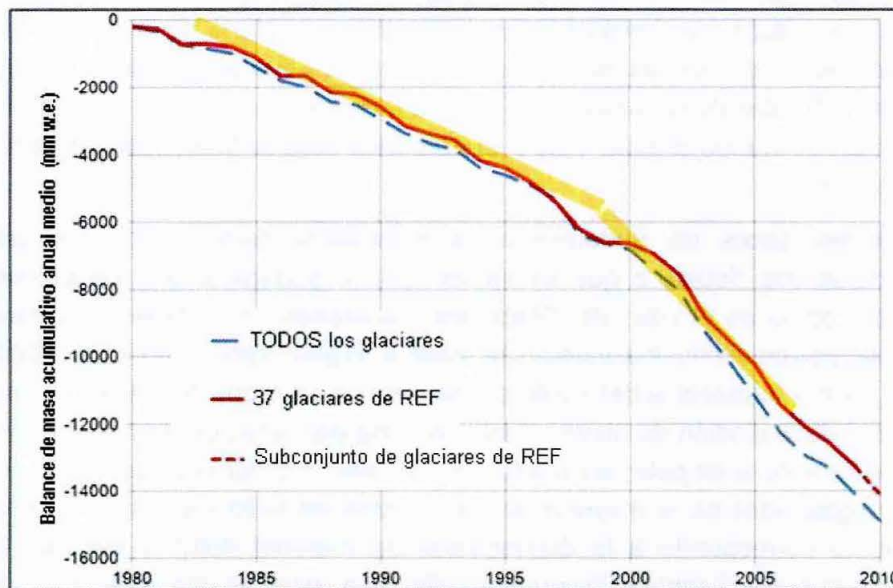


Figura 4-3. Balance de masa acumulativo medio de todos los glaciares y glaciaretos informados (línea azul) y cuerpos de hielo de referencia (REF) (línea roja). Las líneas amarillas gruesas destacan cambios en las tendencias desde el año 2000 (Fuente: World Glacier Monitoring Service).

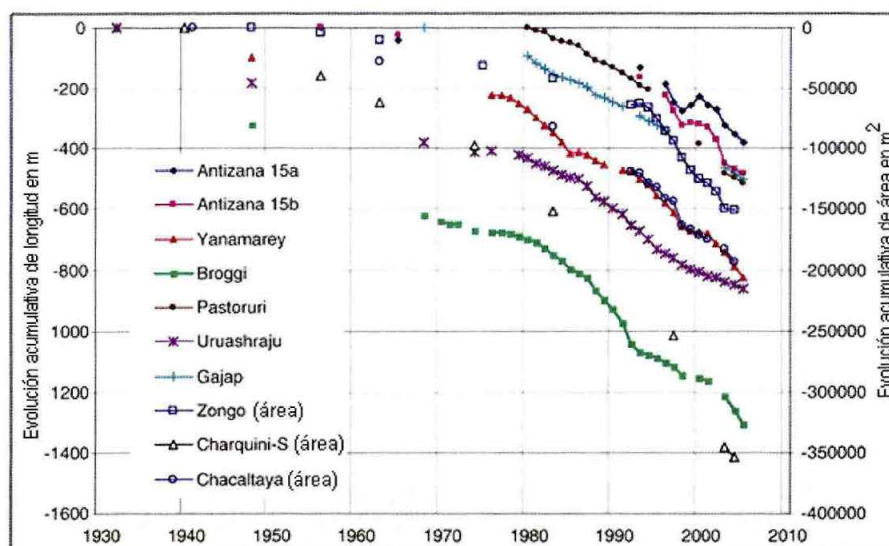


Figura 4-4. Cambios en la longitud y área de algunos glaciares seleccionados en América del Sur (Fuente: Vuille et al., 2008).

Como ya se mencionó, el balance de masa de un cuerpo de hielo superficial, es decir el balance entre las entradas de nieve y las pérdidas por fusión y sublimación son sensibles a la meteorología local y regional. En el caso particular de los glaciares, éstos son propensos al estar sometidos a meteorología que induce a balances de masa negativos por períodos largos, a ser cubiertos de detritos como resultado de pequeños movimientos de masa de las laderas circundantes y el derretimiento del hielo encontrado entre el bandeamiento de detritos que muchos presentan. Estos procesos afectan los balances de masa al estar estos cuerpos sometidos a una transición entre ser parte del ambiente glacial y el periglacial.

En el caso específico de los cuerpos de hielo ubicados en el proyecto Pascua Lama, tanto los ubicados dentro del área de influencia directa, como los cuerpos de hielo de referencia presentan altas tasas de derretimiento y balances de masa negativos. Esta disminución está a la par con las tasas de retroceso evidenciadas en otros cuerpos de hielo en Los Andes Centrales y del Norte de Chile (Figura 4-5), como por ejemplo el Glaciar Echaurren que es monitoreado por la Dirección General de Aguas de Chile (DGA) (Figura 4-6). Éste glaciar presentó un balance de masa negativo de -0.75 m eq. a. el 2013-2014 según lo presentado por la DGA en el año 2014, lo que demuestra que las condiciones meteorológicas desfavorables para los glaciares, afectaron a toda la región centro-norte del país.

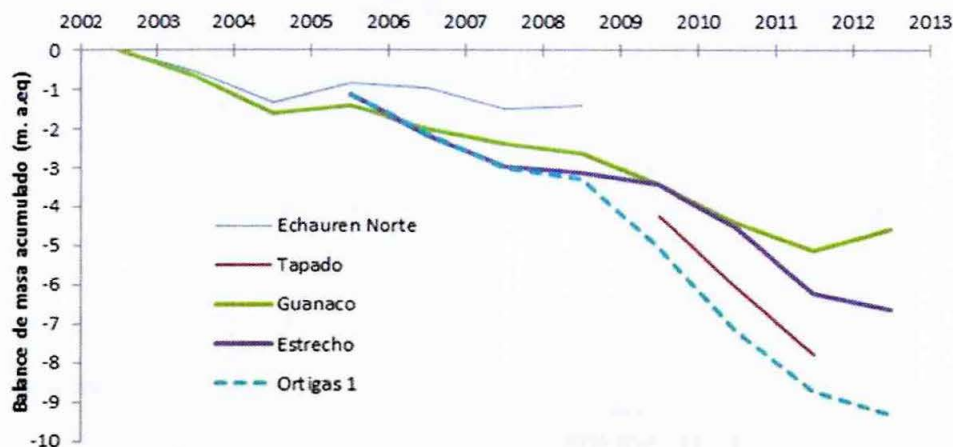


Figura 4-5. Comparación de balance de masa glacial entre cuerpos de hielo ubicados en el Proyecto Pascua Lama y otros ubicados fuera del sitio industrial.

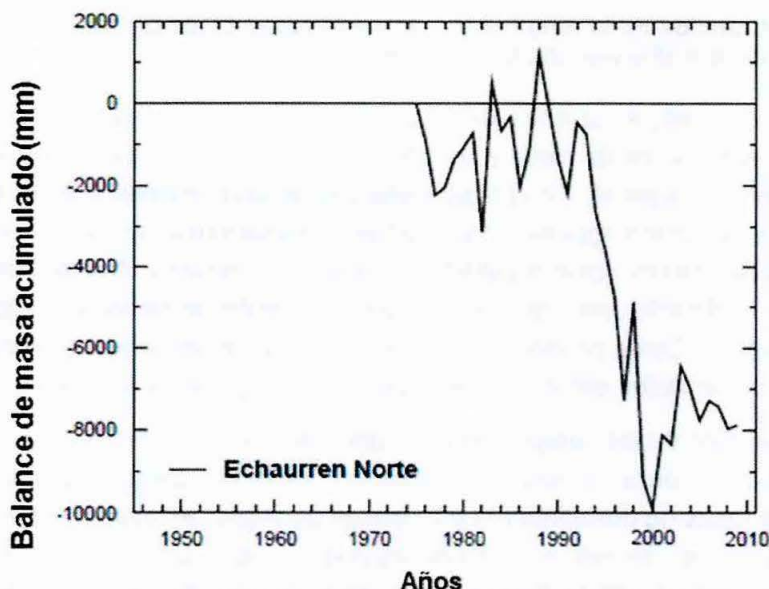


Figura 4-6. Balance de masa glacial del Glaciar Echaurren según información provista por la DGA de Chile.

Con respecto a las áreas englacadas del Glaciar Guanaco (Figura 4-7 y Apéndice A) y el Glaciar Esperanza (Figura 4-8 y Apéndice A) se observa una disminución de su superficie desde los inicios del registro aéreo fotogramétrico en el año 1956 tal como lo evidencia el informe elaborado por CEAZA (2008) y la comparación de imágenes satelitales presentadas en el Apéndice A. Esta disminución de áreas englacadas denota que, en general, estos cuerpos de hielo han estado sometidos a balances de masa glacial negativos desde hace aproximadamente 60 años.



Figura 4-7. Comparación visual de la evolución del Glaciar Guanaco entre los años 1955 y 1996.

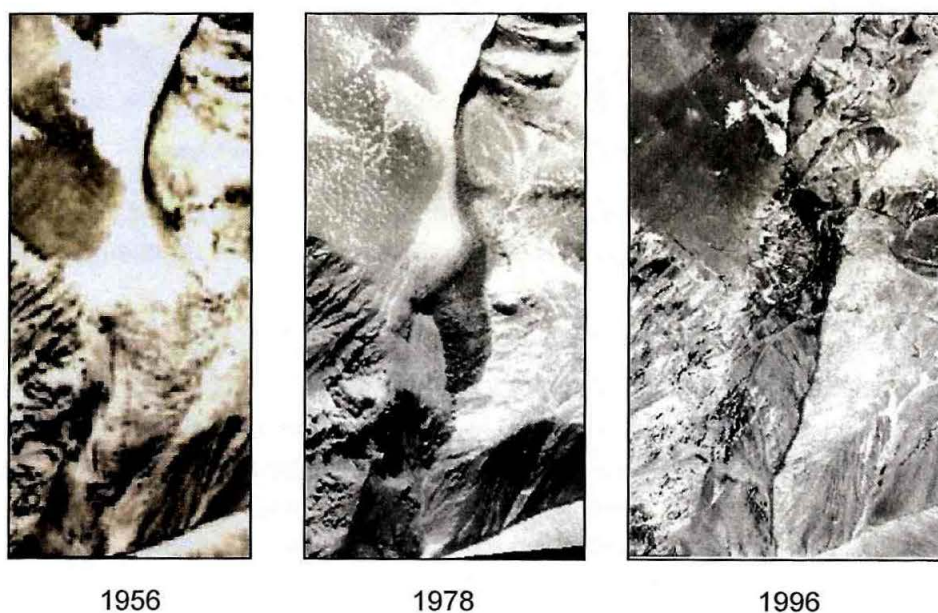


Figura 4-8. Comparación visual de la evolución del Glaciar Esperanza entre los años 1956 y 1996.

4.3. Características Superficiales, Geomorfología y Mediciones en Terreno

Los glaciares y glaciaretos Andinos son constantemente sometidos a altas tasas de radiación solar, fuertes vientos y bajos niveles de humedad relativa. Estas condiciones son propicias para la formación de penitentes, no siendo los cuerpos de hielo de Pascua Lama una excepción a esto (Figura 4-9).



Figura 4-9. Rugosidades superficiales y penitentes en Pascua Lama.

La presencia de penitentes afecta directamente a las mediciones de balance de masa y a la caracterización del balance entre entradas y salidas de masa de un cuerpo de hielo en dos principales aspectos. Estos son:

- Medición de la acumulación y ablación de nieve y hielo en las estacas de nieve.
- Medición y determinación de nevadas mediante el uso del sensor ultrasónico SR50.

La presencia de penitentes aumenta, en forma natural e inevitable, la variabilidad e incertidumbre de las medidas de balance de masa glacial tal como ha sido expresado en los informes de balance de masa glacial (CECs, 2014b). Además, la ubicación de las estacas de nieve coincide en muchos casos con los valles formado entre penitentes, los cuales albergan una acumulación natural mayor de polvo y detritos, por lo que presentan un mayor nivel de ablación específico que estacas no ubicadas en fondos de penitentes. Es así que en general estas estacas presentarán un balance de masa relativamente más negativo, lo cual afecta la determinación del balance de masa neto del cuerpo de hielo completo, haciendo que sus índices sean proclives a presentar valores más desfavorables.

Así también los sensores de medición de acumulación de nieve (SR50) se ven afectados por estas rugosidades superficiales, las cuales se ven reflejadas en los datos como ruido y que deben ser filtrados. Proceso que se lleva a cabo en el análisis de los datos previos a su uso y reporte.

La geomorfología superficial de un cuerpo de hielo también afecta las mediciones en terreno y la determinación del balance de masa glacial. La depositación natural de material detrítico sobre un glaciarete no solo proviene de una depositación de material arrastrado eólicamente sino que también de material más grueso arrastrado por el agua de derretimiento superficial. Esta agua, originada por el derretimiento natural estacional del hielo y nieve en las zonas superiores del glaciarete, arrastra material de granulometría más gruesa hacia las zonas bajas

y lo deposita, cubriendo así partes del glaciarete. Adicionalmente, un glaciarete puede ser cubierto por material detrítico como respuesta a un constante derretimiento de su masa como consecuencia de años de poca caída de nieve y altas temperaturas en verano. Es así que durante años seguidos de balance de masa glacial negativo, el hielo se derrite y estas capas de detritos englaciados emergen, concentrándose en la superficie y haciendo ver que los glaciaretes se están cubriendo de material. Este proceso se denominada cubrimiento por derretimiento (Figura 4-10). El cubrimiento natural de glaciaretes sometidos a continuos balances de masa negativos induce a la crioforma a cambiar de estado térmico, cambiar su balance de masa e incluso lentamente metamorfosearse a una crioforma periglacial, la cual tiene un comportamiento dinámico, térmico y de equilibrio másico muy diferente a una forma glacial de superficie.

Ambos aspectos geomorfológicos, tanto las características superficiales de rugosidad del hielo y nieve (presencia de penitentes), como la presencia de una cubierta de detritos afectan la determinación del balance de masa del cuerpo de hielo muchas veces exagerando la tendencia negativa general del cuerpo.

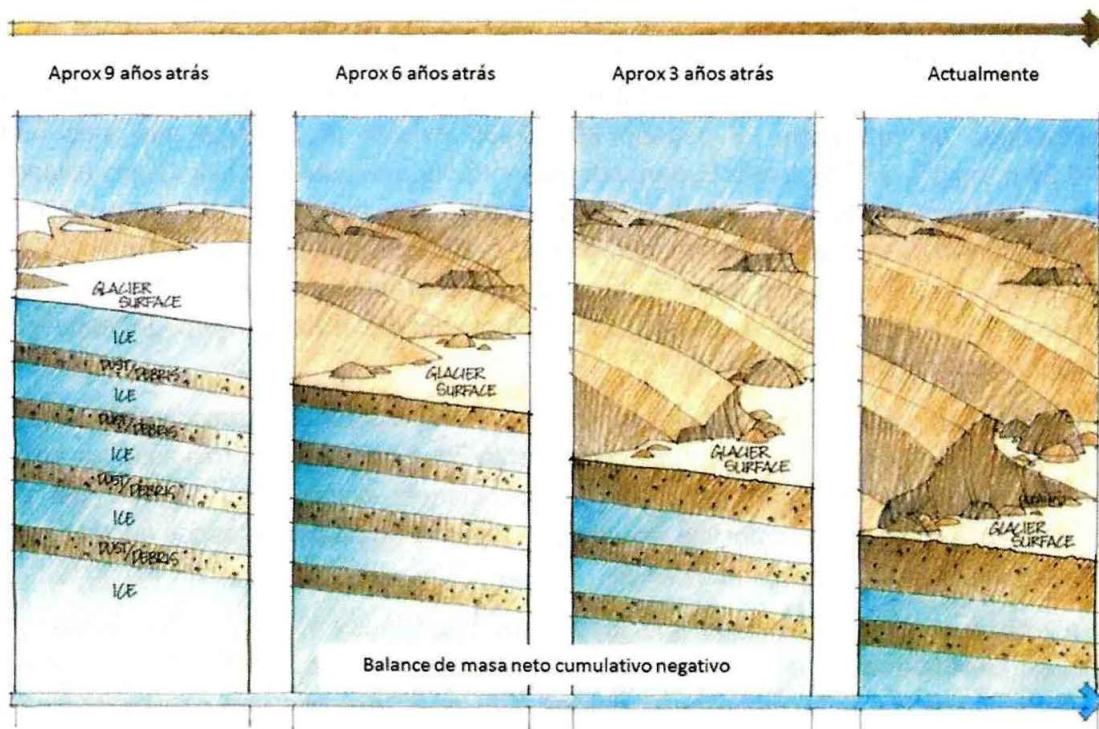


Figura 4-10. Proceso de cubrimiento por derretimiento. El glaciarete se cubre de detritos al éstos emerger como resultado del derretimiento de las capas de hielo internas bajo escenarios de balances de masa negativos continuos. Ilustración: BGC.

5.0 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El periodo hidrológico 2013-2014 fue un periodo seco, y que junto al periodo anterior, constituyen uno de los bienios más secos de las últimas décadas en la zona de la ciudad de La Serena (CECs, 2014a). Las precipitaciones en la ciudad de La Serena, pese a no ser las más indicativas de la región cordillerana, pero al ser de largo plazo, ilustran cambios en las precipitaciones de la zona en un periodo más largo. El año 2013-2014 se caracterizó por la presencia de una fase neutra de El Niño Oscilación del Sur, ENSO, lo que agudizó los efectos negativos sobre los glaciares de una sequía de mediano plazo, debida a casi siete años de predominancia de eventos la Niña (CECs, 2014a). Este año también se caracterizó por una baja amplitud térmica estacional y una alta ablación estival respecto a la de años previos (CECs, 2014b). En respuesta a lo anterior, todos los cuerpos de hielo monitoreados en el PMGv3, tanto de referencia (fuera del área del proyecto) como aquellos ubicados en el área de influencia del proyecto minero, experimentaron un balance de masa negativo durante el periodo 2013-2014. Los valores observados son similares o más negativos que los identificados desde el inicio de las mediciones de este tipo en el año 2002.

El balance de masa del Glaciar Guanaco durante el periodo 2013-2014, fue el segundo menos negativo de todos los cuerpos de hielo monitoreados (CECs, 2014b). De hecho, el balance del periodo 2013-2014 tampoco es el más negativo de la serie con datos, puesto que durante el periodo de referencia, el periodo 2004-2005 exhibió un balance aún más negativo (-0.96 m eq.a.). El Glaciarrete Esperanza presentó durante este año hidrológico el valor más negativo de todos los cuerpos de hielo del área, pero al igual que en Guanaco, no presentó el más negativo de la serie de tiempo completa, el cual se observó durante el periodo 2008-2009 (-2.29 m eq.a.). Esto indica que a pesar de las desfavorables condiciones meteorológicas del periodo 2013-14, ni el Glaciar Guanaco ni el Glaciarrete Esperanza tuvieron la respuesta más exacerbada de la serie disponible.

El Índice A se calcula a partir de una referencia definida a partir del promedio del periodo 2002 al 2009. Este periodo de referencia no presentó condiciones meteorológicas tan negativas (en términos de temperaturas, ni de precipitaciones) comparadas con las del periodo 2013 - 2014, por lo que es posible esperar que en años un poco más secos que la referencia, los balances netos sean más negativos.

En este contexto, el hecho de que los límites 1 del Índice A del Glaciar Guanaco y del Glaciarrete Esperanza hayan sido superados no es inesperado, ya que corresponden a dos cuerpos de hielo con la más alta variabilidad (CECs, 2014b). En este escenario, un periodo seco como el 2013-2014 es muy probable que supere los extremos del periodo de referencia (2002-2009). Es así que el PMGv4 en desarrollo pretende abarcar e incluir la variabilidad mostrada en cada cuerpo de hielo para individualizar de mejor manera la aplicación de los límites y que estos no sean estándar para todos los casos independientemente de su comportamiento glaciológico particular.

Enmarcando lo expuesto anteriormente se tiene que los cuerpos de hielo del proyecto Pascua Lama han estado sufriendo retroceso y adelgazamiento desde al menos la década de 1950, tiempo desde el cual se cuenta con registros aéreos comparables. Esta tendencia es comparable con el comportamiento de otros cuerpos de hielo a nivel mundial y regional sudamericano.

Por último, cabe mencionar que el proyecto Pascua Lama se encuentra detenido desde el mes de Junio del 2013, sin contar con actividades de “pre-stripping” desde Octubre del 2012.

En conclusión, y teniendo en cuenta lo analizado anteriormente y la información disponible a BGC, consideramos que las causas que explican los balances de masa negativos mostrados por los cuerpos de hielo de Pascua Lama, y la excedencia del Límite 1 del Índice A para el Glaciar Guanaco y el Glaciarrete Esperanza, debiesen asociarse a las condiciones meteorológicas reinantes durante el año hidrológico 2013-2014, en el marco de la tendencia de retroceso glacial y condiciones meteorológicas adversas durante la última década.

6.0 CIERRE

Confiamos en que este informe satisfaga sus requerimientos. En caso de dudas o comentarios, por favor no dude en contactarnos.

Atentamente,

BGC INGENIERÍA LTDA.
Por:



Dr. Pablo Wainstein
Ingeniero Civil Hidráulico Sénior (Chile y Canadá)
Experto Glaciares / Permafrost



Karen Sepúlveda
Ingeniero en Recursos Naturales
Renovables (Chile)



Revisado por:
Dr. Matthias Jakob, P. Geo.
Geo-científico Sénior (Canadá)

PW/MJ/sc/jp

REFERENCIAS

- Barrick. 2008. Plan de monitoreo de glaciares proyecto Pascua Lama. Versión 3. 178 pp.
- CEAZA. 2008. Evolución de la superficie de 20 cuerpos de hielo en la zona y al sur del proyecto Pascua Lama entre 1955 y 2007. Informe N° 2008-09. Noviembre 2008. 65 p.
- CECs. 2013. Balance de Masa (Informe Año Hidrológico 2012-2013) Proyecto Pascua Lama. Preparado por el Centro de Estudios Científicos (CECs), para CMN. 78 pp.
- CECs. 2014a. Informe de meteorología Abril 2013 – Marzo 2014 en la zona del proyecto Pascua Lama. Preparado por el Centro de Estudios Científicos (CECs), para CMN. 51 pp.
- CECs. 2014b. Balance de Masa Año Hidrológico 2013 – 2014. Preparado por el Centro de Estudios Científicos (CECs), para CMN. 103 pp.
- Garreaud, R. 2011. The Climate of Northern Chile: mean state, variability and trends, *RevMexAA*. 41, 5–11.
- Rabatel, A., H. Castebrunet, V. Favier, L. Nicholson, y C. Kinnard. 2011. Glacier changes in the Pascua-Lama region, Chilean Andes (29° S): recent mass balance and 50 yr surface area variations, *The Cryosphere*, 5(4), 1029–1041, doi:10.5194/tc-5-1029-2011.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., Bradley, R. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89, 3–4, 79-96.

APÉNDICE A

COMPARACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL GLACIAR GUANACO Y EL GLACIARETE ESPERANZA

