
Reporte N° 4017014.1b

Alto Maipo SpA

Monitoreo de Glaciares

Informe Consolidado de Línea de Base 2018

Santiago de Chile, 13.12.2018

GEOTEST CHILE SPA
LOS MILITARES 5001
OF. 1101, LAS CONDES
CL-SANTIAGO DE CHILE
T + 56 (0)2 2840 35 59
M + 56 (9) 9505 72 97
www.geotest.cl

13.12.2018

Autores	Temas tratados / Áreas de especialización
Anne Schauss	Línea Base Monitoreo de Glaciares
Sebastián Fernández	Cálculo de balance de Masa SF
Isabelle Kull	Soporte científico
Supervisión	Contenidos supervisados
Lukas Rohrbach	Control de calidad, supervisión técnico
Indicios	
Este documento da respuesta al Ordenario D.G.A. N° 602 y N° 912 dirigido al Sr. Andres Cabello Blanco, Alto Maipo SpA.	

GEOTEST CHILE SPA

Lukas Rohrbach

Representante Legal
Geotest Chile SpA

Anne Schauss

Jefe de Proyecto/ Especialista

13.12.2018

Resumen

Geotest Chile SpA ha realizado un estudio de línea base de glaciares en el área del Cajón de Morado, Monumento Natural El Morado, Cajón Rubillas y Cajón El Yeso con el objetivo de describir la evolución de las superficies de los glaciares blancos, glaciares cubiertos y glaciares de roca desde 1955 hasta 2018 a través del uso de fotografías aéreas, imágenes satelitales e imágenes LIDAR. A partir de la estimación de la superficie de los glaciares en el área de estudio, se calcula también su volumen, el equivalente de agua de las masas de hielo y los balances de masas respectivos. Con respecto a los glaciares de roca, se estima además el porcentaje de hielo/detritos y el equivalente de agua.

Durante el período analizado se pudo constatar una tendencia significativa de retroceso de los glaciares blancos y cubiertos, y consecuentemente, una disminución de los volúmenes y del equivalente en agua de los glaciares correspondientes. Los balances de masa respectivos resultaron mayoritariamente negativos. No se detectaron modificaciones en la superficie de los glaciares de roca durante el periodo analizado.

13.12.2018

Contenido

Resumen

1.	Antecedentes y objetivos	5
2.	Metodología	7
2.1	Evolución de las superficies de los glaciares y glaciares de roca	7
2.2	Estimación volumétrica de los glaciares blancos y cubiertos	8
2.3	Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares blancos y cubiertos	9
2.4	Estimación de porcentaje de detritos de glaciares de roca	9
2.5	Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares de roca	13
2.6	Balance de masa para glaciares blancos y cubierto	14
3.	Resultados	16
3.1	Evolución de las superficies de los glaciares y glaciares de roca	16
	Glaciares blancos y cubiertos	16
	Glaciares de roca:	21
3.2	Estimación volumétrica de los glaciares blancos y cubiertos	22
3.3	Determinación de equivalente en agua de las masas de hielo de los glaciares blancos y cubiertos	22
3.4	Estimación de porcentaje de detritos de glaciares de roca	22
3.5	Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares de roca	24
3.6	Balance de masa para glaciares blanco y cubiertos	24
4.	Discusión	26
5.	Conclusiones y recomendaciones	33
	Bibliografía	35
	Anexos	36

13.12.2018

1. Antecedentes y objetivos

Por mandato de Alto Maipo SpA, Geotest Chile SpA se encuentra realizando un programa de monitoreo de glaciares en el área de estudio que se muestra en Figura 1.

El área de estudio ha sido definida considerando la incorporación de todas las estructuras glaciares presentes en las citadas cuencas a lo largo de la proyección en superficie del trazado del túnel El Volcán; la que incluye, a su vez, a todos los glaciares presentes al interior del Monumento Natural El Morado y aquellos pertenecientes al Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural.

Cabe señalar que el área de estudio corresponde al área propuesta por Alto Maipo para el monitoreo de superficie y de volumen de glaciares en el documento “Programa de Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras en Túnel El Volcán, Etapa II”.

Por otra parte, la Dirección General de Aguas Región Metropolitana (DGA RM), mediante Ord. D.G.A. N° 602 y el Ord. D.G.A. N° 912, solicitó la preparación de una línea de base actual de los glaciares en el Sitio Protegido.

El presente documento ha sido preparado para dar respuesta a los Ord. D.G.A. N° 602 , N° 912 y N° 1523 y tiene por objetivo general identificar, describir y evaluar el estado actual de los glaciares presentes en el área de estudio. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Describir la evolución reciente de las superficies de los glaciares en base a imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- Registrar las superficies actuales de los glaciares.
- Estimar el volumen y el equivalente en agua de las masas de hielo.
- Calcular en porcentaje de detritos de los glaciares de roca y calcular su equivalente en agua.
- Calcular balances de masa respectivos para los glaciares.

13.12.2018

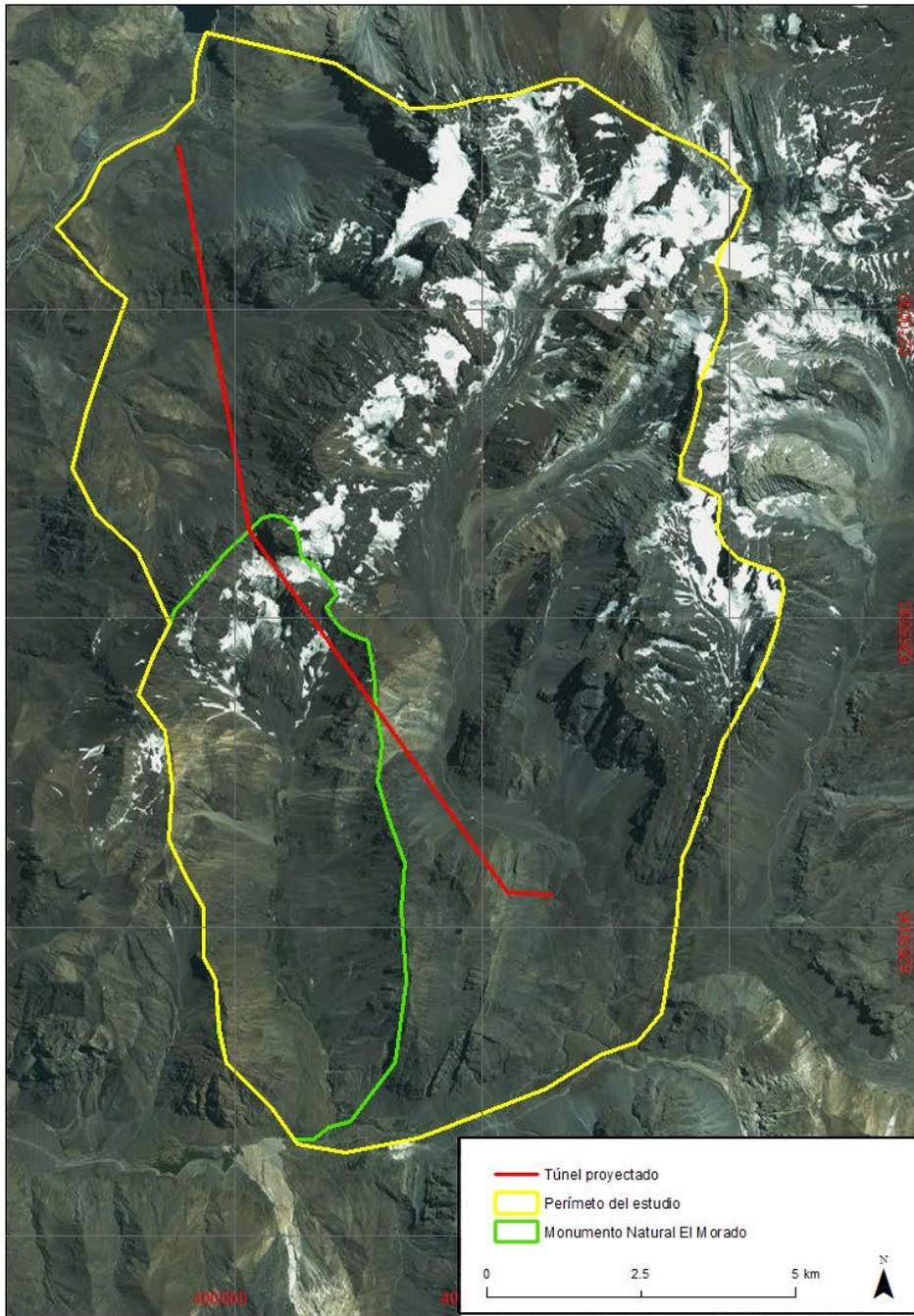


Figura 1: Área de estudio del monitoreo de glaciares.

13.12.2018

2. Metodología

2.1 Evolución de las superficies de los glaciares y glaciares de roca

Se compararon fotografías aéreas e imágenes de alta resolución de 1955 a 2018. Los criterios de uso de las imágenes fueron su resolución y una cobertura nival mínima. Para asegurar que el mapeo de la superficie de los glaciares sea fiable, se necesita una resolución de imagen en el rango de un metro y la fecha de su toma debe ser en los meses de menor cobertura nival (Marzo, Abril). Para la ortofoto de marzo 2016 se programó exclusivamente el satélite Worldview-2 para obtener una foto ortogonal de resolución 0,5 m. Los datos más recientes de abril de 2017 y 2018 fueron levantados por un vuelo LIDAR.

Tabla 1: Imágenes utilizadas para el estudio

Año / mes	Tipo	Fuente	Escala/Resolución Espacial
Febrero 1955	Fotografía aérea	IGM	1:60.000
Marzo 1996	Fotografía aérea	SAF	1:30.000
Mayo 2010	Imagen satelital	Worldview-2	2 m
Diciembre 2013	Imagen satelital	Google Earth	10 m
Marzo 2015	Imagen satelital	Geoeye-1	2 m
Febrero 2016	Imagen satelital	Worldview-2	2 m
Marzo 2017	Foto aérea LIDAR	UAS Vision	1 m
Marzo 2018	Foto aérea LIDAR	UAS Vision	1 m

Para todos los años con datos fiables, la extensión de los glaciares fue digitalizada manualmente sobre la referencia de criterios morfológicos mediante el software Arc Gis. La imagen del año 2015 representó la base de la digitalización por su cobertura nival mínima y por su alta resolución. Cabe señalar que, dado que las imágenes se

13.12.2018

obtuvieron de diferentes proveedores, estas fueron ortorectificadas mediante distintas metodologías, lo que puede provocar desplazamientos espaciales, particularmente en zonas de altas pendientes. Para la orientación exacta dentro de las imágenes se usaron puntos específicos de terreno y líneas auxiliares.

Se definieron 3 clases de glaciares para la digitalización de sus límites: glaciares blancos, glaciares cubiertos y glaciares de roca. Los cambios fueron capturados a través de cambios en superficie y en longitud de las lenguas a lo largo del thalweg¹.

2.2 Estimación volumétrica de los glaciares blancos y cubiertos

Para la determinación de la cantidad de reservas de agua almacenada en los glaciares es fundamental estimar el volumen de hielo.

La metodología aplicada para la estimación de volumen es el enfoque del “V-A-Scaling” (Escalamiento Volumen-Area). Se trata de una metodología simple y robusta con fórmulas empíricas derivadas de glaciares estudiados a detalle. El volumen de hielo está calculado como función de la superficie, teniendo en cuenta que glaciares de tamaños grandes generalmente tienden a ser más potentes ([13]). La fórmula base es:

$$V = cA^{\gamma}$$

Con V= volumen, A=superficie y c y γ dos parámetros de escala.

En este estudio fueron aplicadas los enfoques de Chen y Ohmura (1990) [4] y Bahr et al (1997) ([1]). Chen y Ohmura (1990) [4] usan mediciones de 63 glaciares para determinar los parámetros de escala relacionados; mientras que Bahr et al (1997) [1] derivan una relación teórica entre volumen y superficie mediante tendencias empíricas, observadas en más de 100 glaciares. En la Tabla 2 se muestran los parámetros derivados para establecer estas relaciones.

¹ Thalweg es la línea de menor elevación dentro de un valle o curso de agua.

13.12.2018

Tabla 2 : Parámetros de las relaciones V-A aplicadas (Fuente: Frey et al. (2013)).

Fuentes	c	γ
Chen y Ohmura (1990)	0,2055	1,360
Bahr et al (1997)	0,191	1,375

2.3 Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares blancos y cubiertos

El equivalente de agua de las masas de hielo se puede calcular ocupando el volumen y la densidad del hielo. La densidad de hielo de glaciares corresponde a $916,7 \text{ kg/m}^3$.

La fórmula correspondiente es:

$$\text{Masa de hielo} = \text{Volumen de hielo} \times \text{Densidad de hielo}$$

2.4 Estimación de porcentaje de detritos de glaciares de roca

Generalmente, los glaciares de roca se pueden clasificar en tres clases:

- **Activos** (contienen hielo, presenten movimiento),
- **Inactivos** (contienen hielo pero ya no se mueven), y
- **Fósiles** (el hielo ya se derritió completamente).

Esta clasificación junto a la diferenciación de la evolución de los glaciares de roca influyen en el porcentaje de detritos o hielo de un glaciar. En la definición de un glaciar de roca y su formación u origen todavía hay preguntas abiertas y discusiones en la

13.12.2018

comunidad científica. Los geomorfólogos y glaciólogos a menudo ven un origen glacial (p.ej. [12]), mientras investigadores del permafrost están convencidos de un desarrollo periglacial (p. ej. [2], [7]). Por ende, se encuentran glaciares de roca con origen glacial, con origen periglacial y formas transicionales, por lo que emplear el término “continuo” resulta apropiado en esta materia. En el área de estudio se encuentran glaciares de roca de diferentes orígenes, tal como origen de protalud, origen de un glaciar (cubierto) anterior u origen de una morrena.

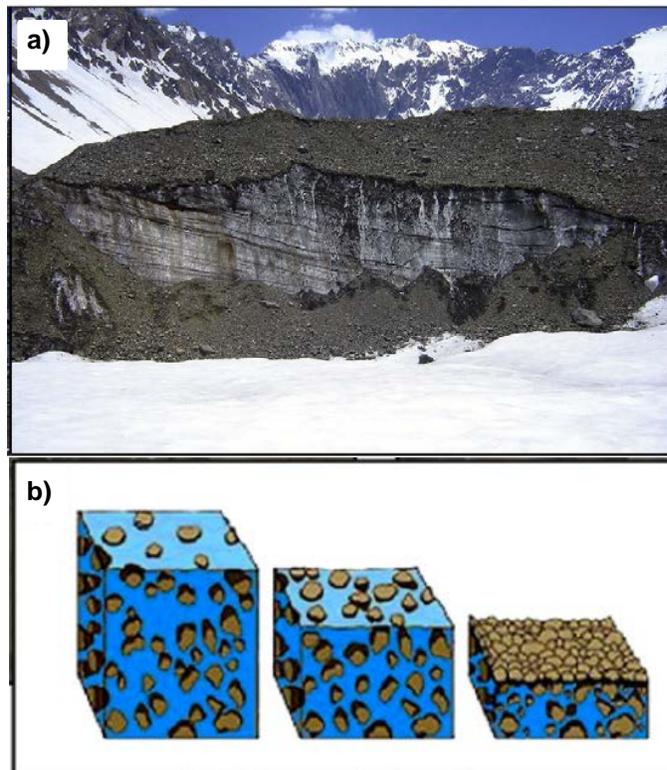


Figura 2:

a) Glaciar de roca: presencia de capas de déritos congelados con diferentes rangos de espesores de 0,2 a 0,3 m. El espesor total de normalmente varía de 1 a 2 metros en la cabeza pero ha sido reducido a 0,2 a 1 m por causa de colapso y transporte en este lugar.

b) Explicación de la formación de un glaciar de roca totalmente cubierto: La evolución de un glaciar blanco a un glaciar cubierto de escombros y posiblemente a un glaciar de roca se caracteriza por la reducción de la proporción de hielo interno en relación al volumen de detritos en glaciares y morrenicos (de Janke et al., 2015).

13.12.2018

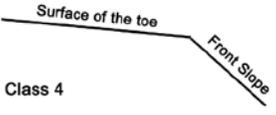
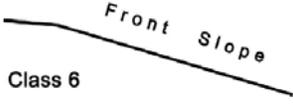
Según [12] , la morfología superficial del glaciar de roca está relacionada con la composición interna de hielo y de roca. La clasificación visual se basa en características comunes que relacionan el espesor y la extensión de la cobertura con la proporción de hielo a roca.

Sobre la base de formas geomorfológicas y según juicio de experto, se clasificaron los glaciares de roca en seis clases, indicando el contenido de hielo aproximado por clase (Tabla 3). En base a esta clasificación, se analizaron los glaciares de roca presentes en el área de estudio, considerando su morfología superficial y probables características de evolución mediante las imágenes de alta resolución, estableciéndose que en el área de estudio se encuentran únicamente glaciares rocosos de las clases 3, 4, 5 y 6.

Tabla 3: Clasificación de glaciares modificado sobre la base de [12].

Clase	Descripción	Contenido de Hielo [%]	Detritos [%]
1 "semicovered"	Cobertura de escombros no más de 0,5 m. >75% de hielo están visibles en el superficial del glaciar.	>85%	<25%
2 "fully covered"	>95 % del glaciar cubierto con escombros de 0,5-3,0 m.	65-85 %	15-45 %
3 "Buried glacier"	Origen glacial. Hielo puede ser visible en grietas o derrumbes de thermokast.	45-65 %	35-55 %
4 "Rock glacier"	Cubierto completamente por escombros. No hay hielo visible en superficie.	25 -45 %	55-75 %

13.12.2018

Clase	Descripción	Contenido de Hielo [%]	Detritos [%]
proper"	<p>Hielo interno en forma de lentes de hielo, hielo segregado, hielo intersticial.</p>  <p>Class 4</p>		
5 "Rock glacier"	<p>Origen de talud de escombros.</p> <p>Manifestación de estructuras de movimiento muy leve.</p> <p>Frente de glaciar menos empinado, forma general más redondo.</p>  <p>Class 5</p>	10-25 %	75-90 %
6 "Rock glacier"	<p>Origen de morrena, escombros morrénicos.</p> <p>No hay movimiento.</p> <p>Superficie caracterizada por escombros desordenados, pequeños cerros y bloques.</p> <p>Frente de glaciar casi inexistente.</p>  <p>Class 6</p>	< 10 %	>90 %

13.12.2018

2.5 Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares de roca

Estimación de espesor promedio

El espesor promedio de los glaciares rocosos y glaciares cubiertos fue estimado sobre la base del LIDAR 2018 (Diferencia de altura del cuerpo del glaciar respecto al terreno adyacente) y clasificados en 2 clases de 10 y 20 m de espesor.

Estimación del volumen de los glaciares rocosos

El volumen fue calculado en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen glaciar rocoso} = \text{Espesor promedio} \times \text{Superficie}$$

Determinación equivalente de agua

Para la determinación del equivalente de agua se calculó el volumen de hielo en base al volumen del glaciar rocoso y el porcentaje de hielo presente en él.

Luego, el equivalente de agua de las masas de hielo fue determinado tal como en capítulo 2.3 según la siguiente fórmula:

$$\text{Masa de hielo} = \text{Volumen de hielo} \times \text{Densidad de hielo}$$

13.12.2018

2.6 Balance de masa para glaciares blancos y cubierto

El cálculo de balances de masa de los glaciares fue realizado para el año 2017 sobre la base del ASTER DEM 2011 y el LIDAR DEM 2017 y para el año 2018 sobre las bases del LIDAR DEM 2017 y el LIDAR DEM 2018. Mediante el software ArcGIS se calculó la diferencia entre los dos DEM (DEM 2017 – DEM 2011 y DEM 2018 – DEM 2017 respectivamente). De esta manera se obtuvo la diferencia de altura de terreno entre los dos años.

Tabla 4: Características imágenes ASTER y LIDAR empleadas.

	ASTER	LIDAR 2017	LIDAR 2018	LIDAR DGA
Fecha adquisición	17. de Octubre 2011	19.-22. de Marzo	06. -15. de Marzo	23. – 27. de febrero 2015
Resolución horizontal	Aprox. 30 m	1 m	1 m	1 m
Resolución vertical	10-15 m	0,5 m	0,5 m	n/a

El promedio de las diferencias de altura (suma de diferencias divididas por el número de celdas de los DEM del glaciar) fue multiplicado con la superficie de glaciar respectivo, para tener el volumen total perdido entre los años examinados.

Balance de Masa Glaciar San Francisco

Para el Glaciar San Francisco se realizó un análisis de balance de masa a mayor detalle, con el fin de tener una estimación más confiable en base a datos LIDAR adicionales. Se usaron los datos LIDAR proporcionados por la DGA de los años 2009 (29 de

13.12.2018

abril) y 2015 (23-27 de febrero) junto a los LIDAR realizados para el propósito del informe de Línea de Base de Glaciares años 2017 y 2018 (ver Tabla 4). Mientras las imágenes de 2017 y 2018 cubren toda el área del glaciar, en el período de 2015-2017 están solamente 98,5 % de la superficie del glaciar cubiertos. Se calcularon las diferencias entre los DEM, resultando en balances de masa para los dos periodos 2015-2017 y 2017-2018. El balance para el periodo de 2009-2015 fue elaborado por la DGA y se encuentra en Anexo 7.

13.12.2018

3. Resultados

3.1 Evolución de las superficies de los glaciares y glaciares de roca

En total se estudiaron veintidós glaciares con un rango de superficie aproximada que va de 0,01 km² a 10,30 km². Estos glaciares se encuentran a una distancia horizontal hasta 8 km a la proyección en superficie del eje de túnel El Volcán del PHAM (el túnel está en promedio bajo 900 m de profundidad). Debido a la escasa información fotográfica de décadas anteriores (8 períodos de tiempo estudiados desde 1955) sólo se pudo identificar de manera más detallada los retrocesos ocurridos durante los últimos 7 años (6 series de datos desde 2010).

Glaciares blancos y cubiertos

En general, se pudo constatar una tendencia de retroceso de los glaciares en el área de estudio durante el período analizado (Anexo 1). Mientras en el año 1955 la superficie total de los glaciares en el área de estudio se estimó en 20,62 km²; en 2018 disminuyeron a una superficie de 19,32 km²: Durante los últimos 63 años la superficie total de los glaciares estudiados disminuyó más de 1,30 km² aproximadamente. El retroceso no se observó para todos los glaciares presentes en el área de estudio: Los glaciares de circo tal como el Mesón Alto no muestran cambios en su extensión durante las últimas décadas. Asimismo, los glaciares con lengua bajo cobertura de escombros (por ejemplo Mesonsito o la lengua norte del glaciar San Francisco) no muestran cambios en su extensión. Sin embargo, es muy probable que estos glaciares demuestren reducciones de volumen.

Las modificaciones de la superficie de los glaciares se limitan más que nada a la zona de la lengua. Cambios en superficie en la zona alta de los glaciares son escasos y de poca magnitud. Las modificaciones en superficie más significativas se observaron en los glaciares El Morado, San Francisco y Loma Larga.

Evolución de la superficie del glaciar El Morado

Desde 1955 hasta 2013, la lengua del glaciar El Morado muestra un retroceso continuo de aproximadamente 6 m anuales en promedio. En la imagen del año 2015, se evidencia un retroceso de más de 200 metros de la lengua en la zona blanca del cual representa una tasa mayor de retroceso respecto de los años anteriores. Las imáge-

13.12.2018

nes recientes de 2017 y 2018 muestran el progreso de esta tendencia y además un retroceso lateral de la lengua (parte cubierta por escombros). La laguna del Morado continúa su expansión gradual debido al retroceso de la lengua del glaciar. Cabe mencionar que muchas veces lagos periglaciares aumentan el retroceso mientras el hielo está en contacto con el agua del lago.

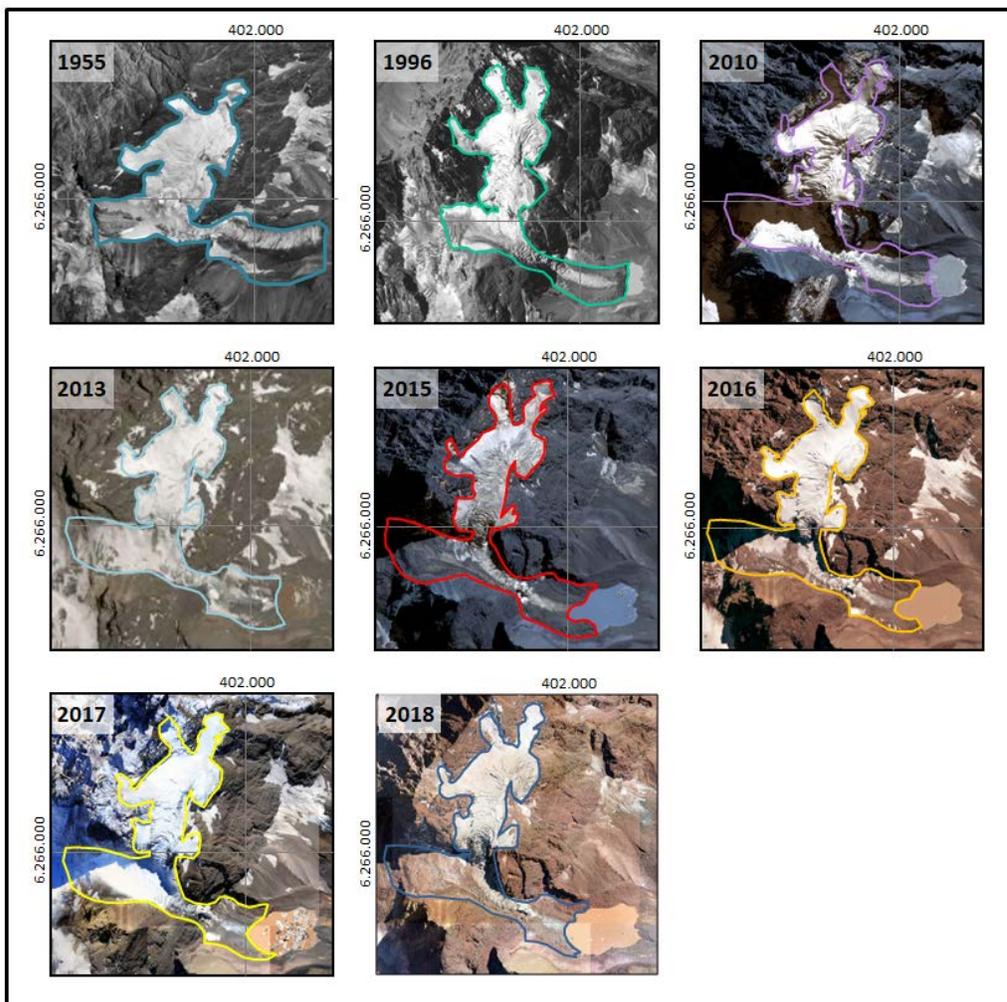


Figura 3: Representación de la evolución de la superficie del glaciar El Morado de 1955 a 2018 en base a las imágenes de la Tabla 1.

13.12.2018

Evolución de la superficie del glaciar San Francisco

El glaciar San Francisco tiene dos lenguas. Mientras la lengua sur ha experimentado modificaciones significativas desde 1955, la lengua norte ha permanecido estable. La lengua sur retrocedió en promedio 3 metros por año hasta 2010 y desde ahí en adelante permaneció estable. Recientemente en 2017 se nota nuevamente un retroceso de casi 8 metros y en 2018 de aproximadamente 10 m en un período de sólo un año respectivamente.

13.12.2018

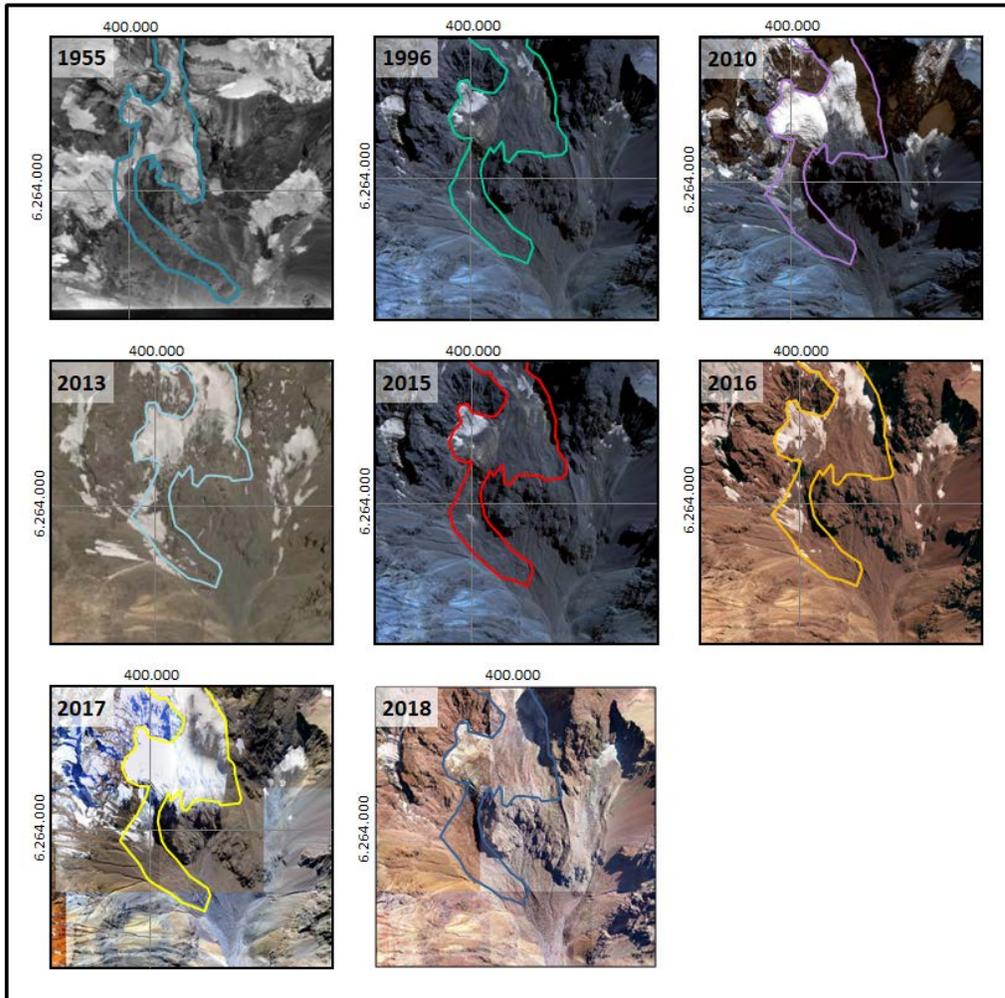


Figura 4: Representación de la evolución de la superficie del glaciar San Francisco de 1955 a 2018, en base a las imágenes de la Tabla 1.

Evolución de la superficie del glaciar Loma Larga:

El glaciar Loma Larga presenta un aglomerado de glaciares que se fusionan. Estos alimentan una lengua principal que sigue el valle del mismo nombre. Debido a una intensa cobertura con escombros y masas de hielo muerto disociado del glaciar, la delimitación de la lengua no se puede definir claramente. Sin embargo, mediante el análisis de las imágenes se puede observar un retroceso de aproximadamente 1.500 m en-

13.12.2018

tre 1955 y 1996 (36 m a^{-1}). Durante los años posteriores a 1996 el glaciar presentó un retroceso significativamente menor: De 1996 a 2010 retrocedió aproximadamente 62 m (5 m a^{-1}) hasta 2013, año en el cual se observó un retroceso de otros 26 m ($8,5 \text{ m a}^{-1}$). En los años siguientes hasta 2018 se observa un retroceso de aproximadamente unos 25 m más (5 m a^{-1}).

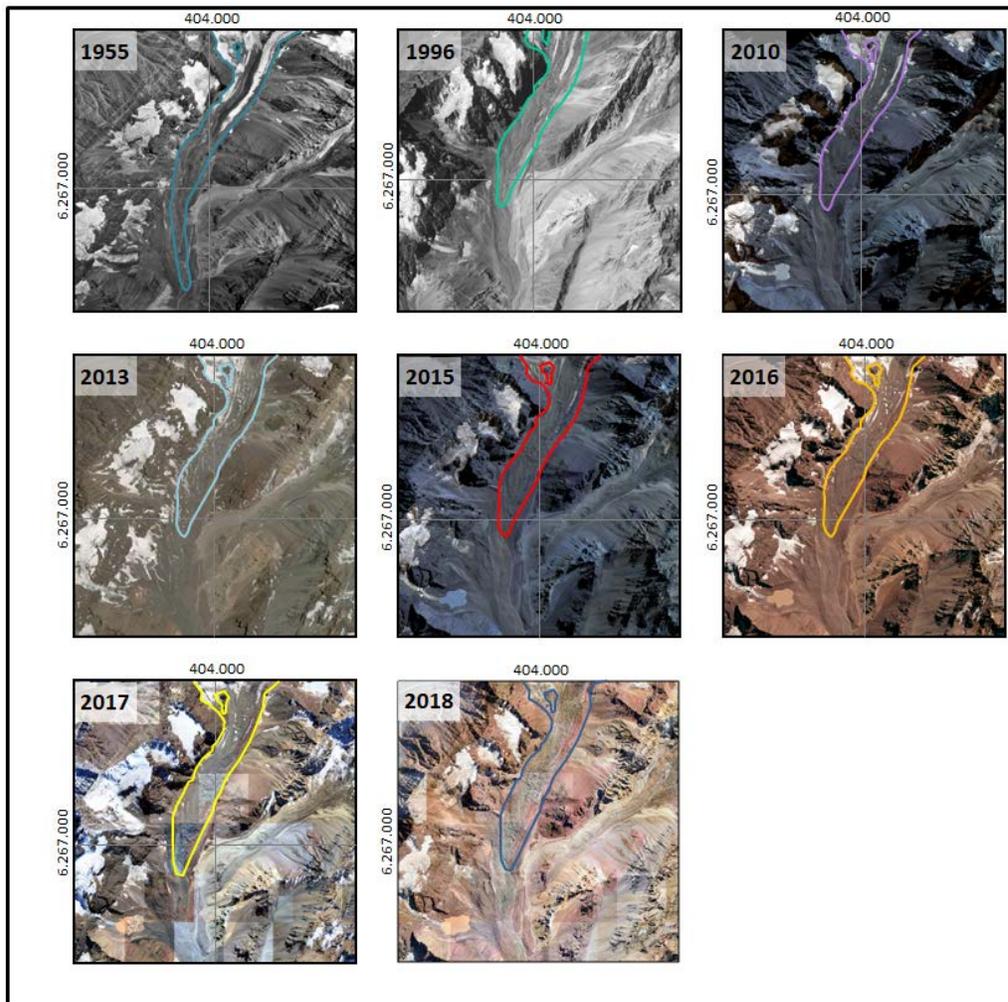


Figura 5: Representación de la evolución de la superficie del glaciar Loma Larga de 1955 a 2018 en base a las imágenes de la Tabla 1.

13.12.2018

Glaciares de roca:

En base al análisis de las imágenes año 2017 se identificaron 19 glaciares de roca en el área de estudio. Estos glaciares de roca presentan superficies individuales que varían entre 0,005 km² y 0,5 km² y están ubicados en laderas expuestas al sur u oeste. Los glaciares de roca más extendidos y pronunciados se encuentran adyacentes al glaciar cubierto Mesonsito (Figura 6). Durante el periodo analizado (1955-2018) no se detectaron modificaciones en la superficie de los glaciares de roca. Sin embargo, según [12] los glaciares de roca no demuestran el mismo movimiento como los glaciares blancos. Más que en la superficie, los glaciares de roca suelen mostrar cambios verticales (reducción de volumen).



Figura 6: Glaciar Mesonsito en el área sureste del perímetro y varios glaciares de roca adyacentes.

13.12.2018

3.2 Estimación volumétrica de los glaciares blancos y cubiertos

Los volúmenes correspondientes de los glaciares se estimaron según las fórmulas de Chen y Ohmura (1990) y Bahr et al. (1997). Las fórmulas fueron desarrolladas para glaciares blancos y por ende no se pueden aplicar en glaciares de roca.

Para el año 2018 se estimó un volumen total de los glaciares estudiados entre 870.032.243 y 1.015.305.354 m³ (Chen y Ohmura / Bahr et al). Comparando con el volumen estimado para el año 1955 (943.318.632 y 1.101.636.784 Chen y Ohmura / Bahr et al), eso corresponde a una pérdida de 73.286.388 a 86.331.430 m³ durante los últimos 63 años. Los volúmenes individuales para todos los glaciares en el área de estudio se entregan en el Anexo 1.

3.3 Determinación de equivalente en agua de las masas de hielo de los glaciares blancos y cubiertos

El equivalente en agua de las masas de hielo fue calculado mediante los volúmenes resultantes según Chen y Ohmura y Bahr et al. En total, se estimó que en el año 2018 están presentes entre 798.000.000 y 931.000.000 m³ de agua (Chen y Ohmura / Bahr et al.) en los glaciares dentro del área de estudio.

3.4 Estimación de porcentaje de detritos de glaciares de roca

En base a observaciones de la ortofoto se clasificaron los glaciares según el esquema de clasificación propuesto en la Tabla 3 en base a [12]. Sin embargo, se consideraron solamente glaciares de roca originados de glaciares cubiertos por escombros. En la clasificación de [12] no se incluyeron glaciares rocosos periglaciares formados de taludes de escombros. Estos glaciares fueron detectados e incorporados en las clases 4-5 según su actividad. Glaciares rocosos periglaciares dentro del área de estudio se clasifican en clase 5. En el área de estudio se encuentran glaciares de clase 3-6. La figura 7 ilustra los glaciares de roca dentro del área de estudio con su respectivo porcentaje de contenido de hielo.

13.12.2018

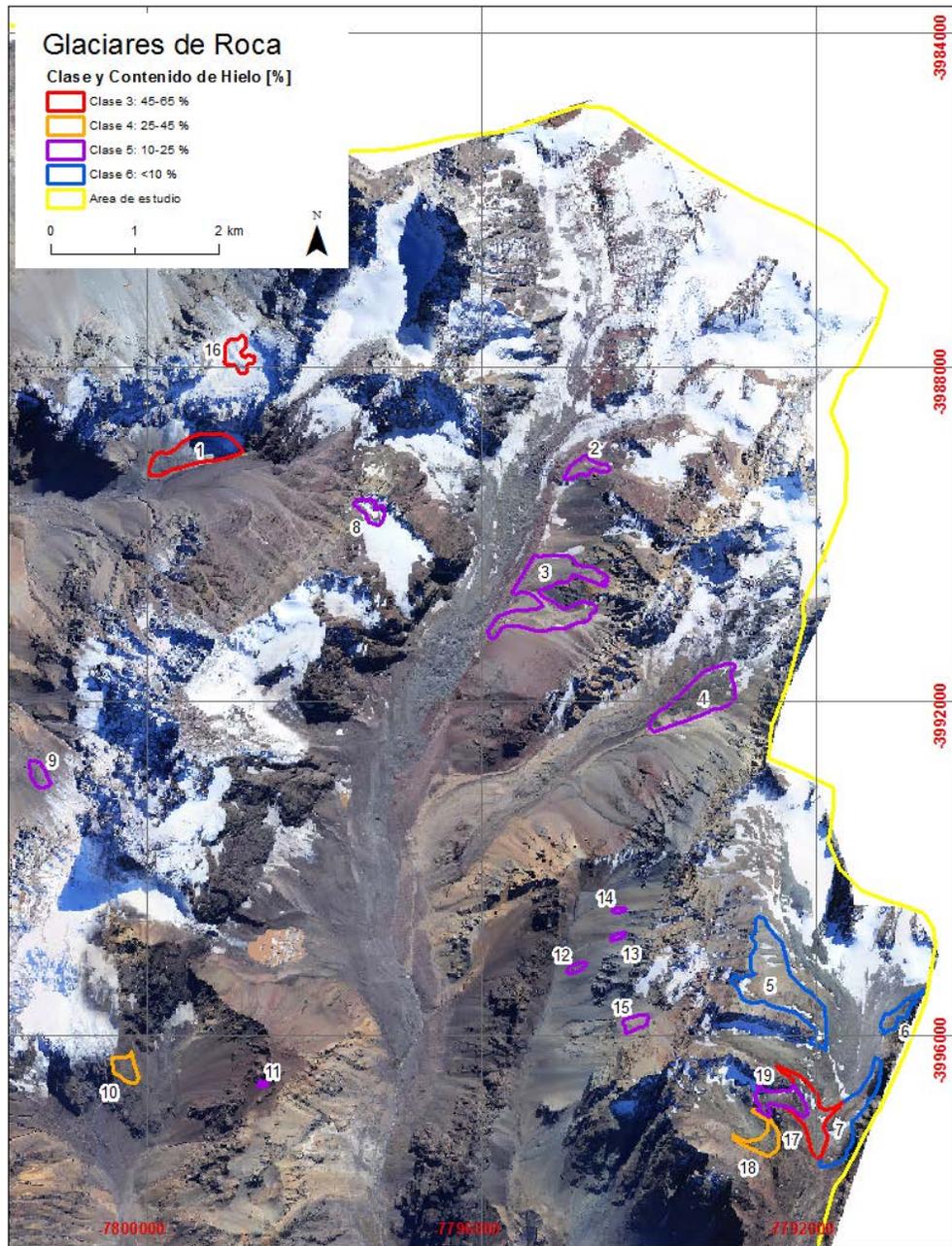


Figura 7: Glaciares de roca en el área de estudio indicando el contenido de hielo estimado en Porcentaje (%) según clasificación de [12].

13.12.2018

3.5 Determinación de equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares de roca

El equivalente en agua del porcentaje de hielo en los glaciares rocosos se calculó a partir de su volumen de hielo, el cual a su vez fue estimado en base a su espesor promedio. En total, se estimó que al año 2017, los glaciares de roca dentro del área de estudio poseen un valor de equivalente de agua de aproximadamente 9.300.000 m³ de agua. Para el año 2018 no se detectaron variaciones.

En el Anexo 3 se entrega la clasificación de los 19 glaciares de roca identificados en el área de estudio, indicando para cada uno de ellos los valores estimados de contenido de hielo (%), contenido de detritos (%), espesor promedio (m), superficie (km²), volumen (m³), volumen de hielo (m³) y equivalente de agua (m³).

3.6 Balance de masa para glaciares blanco y cubiertos

El balance de masa fue calculado para 21 glaciares de los que se tenía información de cota de elevación para los años de comparación (2011, 2017 y 2018). El resultado indicó una pérdida de masa de los glaciares entre 2011 y 2017 de aproximadamente 170.000.000 m³; lo que equivale a una pérdida de masa de 30.000.000 m³ cada año entre 2011 y 2017. Entre los años 2017 y 2018 se detectó una pérdida de masa de aproximadamente 15.000.000 m³. En general, los resultados indican en forma aproximada una probable magnitud de los balances de masa. Sin embargo, particularmente los valores del periodo 2011-2017 están afectados por inexactitudes debido a resolución y desplazamiento de las imágenes. El balance del periodo de 2017 a 2018 se basa a imágenes de la misma resolución y con menos desplazamiento lo cual debería resultar en valores más probables. Los balances de masas y parámetros para su cálculo para todos los glaciares en los dos periodos se encuentran en Anexo 4.

Balance de Masa Glaciar San Francisco

Para el glaciar San Francisco se calculó el balance de masa para dos períodos: El periodo entre 2015 y 2017 y el periodo entre 2017 y 2018. El balance de masa para el periodo entre 2009 y 2015 elaborado por la DGA se encuentra en Anexo 7. Los resultados de los balances de masa de los períodos 2015-2017 y 2017-2018 se encuentran en Anexo 7 y 8.

13.12.2018

En el período 2015- 2017 se registró una pérdida de la masa total de $-1.844.435 \text{ m}^3$ lo que equivale una tasa anual de $922.217,5 \text{ m}^3$. El promedio de la pérdida en altura (adelgazamiento) equivale a $-1,20 \text{ m}$. El período 2017-2018 evidencia una pérdida total de $2.633.710 \text{ m}^3$ y una pérdida promedio de altura de $-1,69 \text{ m}$.

En Figura 8 y Figura 9 se muestran para los dos períodos analizados las variaciones del área de los glaciares y el balance de masa según banda de elevación. El balance en el período de 2017-2018 es considerablemente más negativo que lo del período 2015-2017. El balance 2015-2017 incluso evidencia un balance positivo en alturas mayores que 3.400 m.s.n.m .

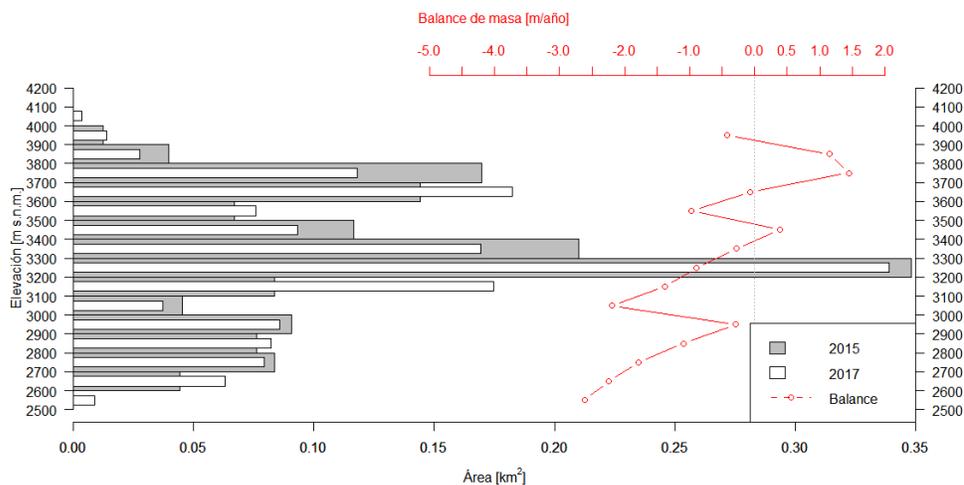


Figura 8: Hipsometría y balance de masa por bandas de elevación cada 100 m para el periodo 2015-2017. El histograma de color gris representa el área del glaciar por banda de elevación en el año 2015, el histograma en color blanco representa el área del glaciar por banda de elevación en el año 2017. En color rojo se representa el balance en m/año.

13.12.2018

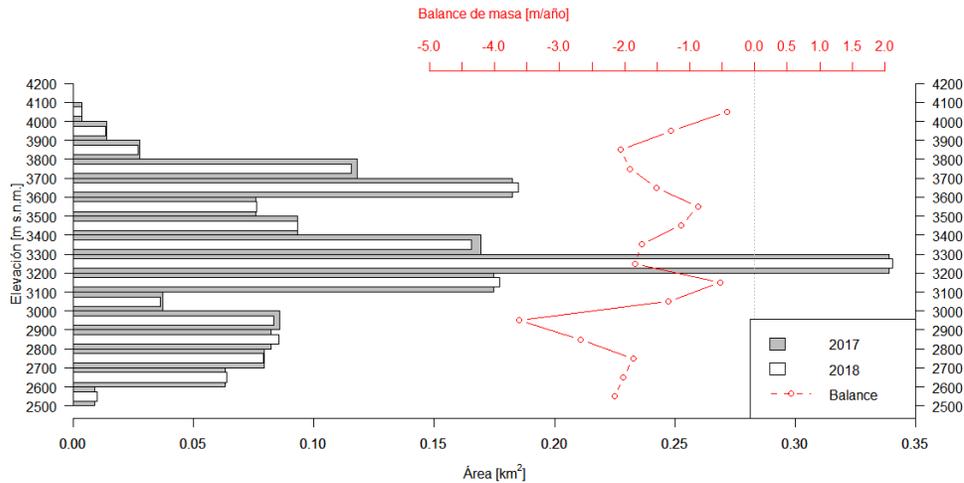


Figura 9: Hipsometría y balance de masa por bandas de elevación cada 100 m para el periodo 2017-2018. El histograma de color gris representa el área del glaciar por banda de elevación en el año 2017, el histograma en color blanco representa el área del glaciar por banda de elevación en el año 2018. En color rojo se representa el balance en m/año.

4. Discusión

Las superficies de los glaciares fueron delimitadas de manera manual a base de imágenes aéreas y satelitales. Se destaca que la resolución de las imágenes usadas mejoró fundamentalmente con los años. En consecuencia, con el mejoramiento de las imágenes se manifiestan importantes detalles en la morfología los cuales eran imposibles de identificar en las imágenes de menor calidad. Por lo tanto, la digitalización del último año analizado (2018) trajo el desafío de identificar las variaciones reales basados en los límites de los años pasados sin crear variaciones artificiales como consecuencia del aumento de resolución. Es decir, con la ventaja de tener dos imágenes recientes de alta resolución (2017 y 2018) para la comparación de la morfología se pudieron refutar algunos límites que fueron definidos a base de imágenes de menor resolución. La modificación de estos límites significaría una variación del respectivo glaciar en forma artificial y por ende no pudo ser considerado para no falsificar los resultados finales. Se destaca que este efecto afecta solamente algunos glaciares pequeños donde variaciones identificadas en las recientes imágenes son de magnitud menor.

13.12.2018

Los volúmenes se calcularon sobre la base de las superficies. Estas mismas representan por consiguiente un factor muy sensible en el cálculo de volúmenes. Otros factores que influyeron en los resultados volumétricos fueron los escombros que cubren las lenguas de los glaciares y dificultan la delimitación de la extensión de los mismos. Hay que tener en cuenta que no siempre es factible derivar el volumen de la superficie de un glaciar. Muchas veces los glaciares no presentan modificaciones en su superficie pero disminuyen el volumen. Este proceso no se puede abordar con el enfoque de V-A-Scaling empleado en el presente estudio.

En el estudio de Geoestudios [8] se realizó un análisis detallado de los glaciares San Francisco y Mirador el Morado. Los volúmenes fueron derivados de mediciones de espesor con georadar. Los resultados del informe de Geoestudios sirven de referencia para evaluar los resultados de este estudio (ver Tabla 5). En ambos glaciares la superficie delimitada por Geoestudios es mayor. Eso resulta a su vez en volúmenes mayores. En Anexo N° 2 se entrega el informe final de Geoestudios.

En general, en los sectores con altas pendientes (hanging glaciers y steep serac zones), el V-A Scaling sobreestima el volumen de los glaciares ([10]). Además, el error del método es mayor en glaciares pequeños. Las estimaciones para el glaciar San Francisco coinciden bien con el resultado de Geoestudios, mostrando una diferencia de sólo 7%. En el caso del Mirador el Morado se obtuvo una gran diferencia al comparar los volúmenes obtenidos en ambos estudios. Esta diferencia se explica por las superficies diferentes de los dos estudios. Se destaca que a pesar de la sobreestimación de volúmenes para glaciares pequeños y empinados (que aplica al glaciar Mirador el Morado), el resultado del V-A-Scaling de GEOTEST resulta en un menor volumen frente al volumen estimado por Geoestudios. Cabe señalar que las estimaciones de volumen según Bahr et al (1997) [1] y Chen y Ohmura (1990) [4] en base a las superficies determinadas en el estudio de Geoestudios resultaría en un volumen de sólo 5.669.027 y 5.055.558 m³, respectivamente.

13.12.2018

Tabla 5: Comparación resultados de superficie y estimación volumétrica de Geoestudios [8] y resultados de este estudio, referente a la situación en el año 2010.

Glaciar	Geoestudios Situación en 2010		Geotest Situación en 2010		
	Superficie [km ²]	Volumen [m ³]		Bahr et al	Chen y Ohmura
			Superficie [km ²]	Volumen [m ³]	Volumen [m ³]
San Francisco	1,47	60.573.000	1,60	64.857.294	56.321.297
Mirador el Morado	0,27	8.295.000	0,19	3.606.278	3.231.937

Los datos bases utilizados para el cálculo de los balances de masa entre 2011 y 2017 presentan dos principales características que resultan en errores:

- La resolución de las imágenes. El DEM ASTER tiene una resolución espacial de aproximadamente 30 m (detalle desconocido), el LIDAR una resolución espacial de 1 m.
- Existe un desplazamiento desconocido entre las imágenes de los dos años. Se ha observado un desplazamiento de irregular distribución de hasta aproximadamente 20 m.

Sobre la base de estas características es imposible calcular el error numérico de manera fiable. Además, El ASTER DEM es compuesto de imágenes levantados durante un período de tiempo de aproximadamente 10 años. La resolución espacial y altimétrica varía dependiendo de lugar y tiempo. Mientras que la resolución espacial se puede reconstruir, la resolución vertical en el sector del área de estudio es desconocido. Asimismo es desconocido el desplazamiento del ASTER DEM en relación al LIDAR 2017. Estas dos características no permiten generalizar o calcular el error numérico del cálculo del balance de masas, lo que se explica con mayor detalle abajo:

13.12.2018

La baja resolución espacial del DEM ASTER provoca una generalización de pequeñas variaciones de topografía. Esta generalización junto con la baja precisión en altura provoca errores e inexactitudes en el resultado de la diferencia entre los dos DEM. Además, el DEM ASTER está desplazado hacia el oeste respecto al LIDAR 2017, (vea Figura 10). Esto provoca diferencias consistentes en el resultado de la sustracción de los dos DEM: En el lado este de las crestas resultan valores negativos (aparente disminución de terreno) mientras en el lado oeste resultan valores positivos (aparente aumento del terreno) (vea Figura 10, Figura 11). Las diferencias son mayores en terreno empinado que en terreno plano ya que en terreno empinado un desplazamiento puede llegar fácilmente a diferencias grandes en la sustracción (vea Figura 10, Figura 11). Si un glaciar se encuentra cerca de terreno empinado (p.ej. paredes rocosas) el cálculo puede presentar un error mayor.

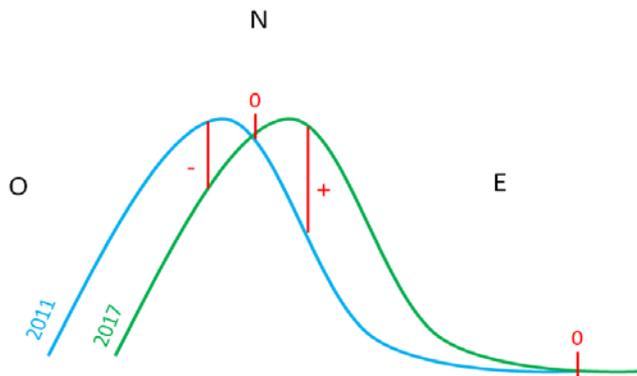


Figura 10: Esquema que muestra el desplazamiento del ASTER DEM 2011 (azul) y LIDAR DEM 2017 (verde). En terreno empinado el error por desplazamiento aumenta más, en terreno plano el error disminuye.

13.12.2018

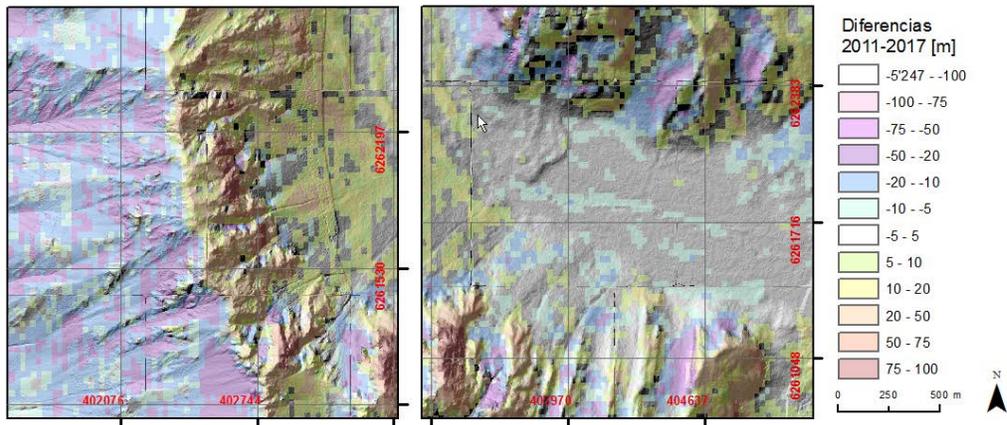


Figura 11: Ejemplo del resultado de la sustracción del DEM LIDAR 2017 y DEM ASTER 2011. A la izquierda se muestra un ejemplo de terreno empinado, a la derecha se muestra un ejemplo de terreno plano. Valores negativos significan una aparente disminución de terreno, valores positivos significan un aparente aumento de terreno. El resultado para el área de estudio completo se encuentra en Anexo 5.

En general se puede decir que las estimaciones en glaciares más pequeños ($0,10$ a $0,25 \text{ km}^2$) son más sensibles a los errores. Eso se debe por un lado a la resolución del DEM ASTER por la cual un glaciar pequeño se compone de unas pocas celdas. Además los glaciares pequeños dentro del área de estudio tienden a ser más empinados. En combinación con sus tamaños menores, un desplazamiento pequeño en el DEM llega a grandes errores en los balances de masa.

Los cálculos de balance de masa entre 2017 y 2018 cuentan con una base mucha más sólida, ya que para los dos años están disponibles imágenes LIDAR de alta resolución y procesado por la misma metodología. Sin embargo, aun así existen fuentes de error debido al ángulo del láser disparo, calibración del sistema LIDAR, Variación del GPS (Global Positioning System) al INS (Inertial navigation system), pendiente del terreno, pos tratamiento de los datos entre otros (ver Figura 12). Estos errores son normales y debido a que cada vuelo es diferente, por ejemplo, por el tema de viento y el avión, y así el láser disparo puede variar en su ángulo. Además hay que interpretar con mucho cuidado el resultado de la sustracción de la imagen 2018 y 2017: La imagen de 2017 tiene más nieve que el imagen de 2018. Especialmente los glaciares

13.12.2018

blancos cuentan con capas de nieve ubicadas encima del cuerpo del glaciar, lo que resulta en un cambio de volumen que no corresponde al balance de masa. Pese a estas incertidumbres, el resultado para el periodo de 2017 a 2018 es más confiable que el resultado del periodo de 2011 a 2017, lo cual permite suponer que los balances de masa en este primer periodo en realidad son menores de los valores calculados en este estudio.

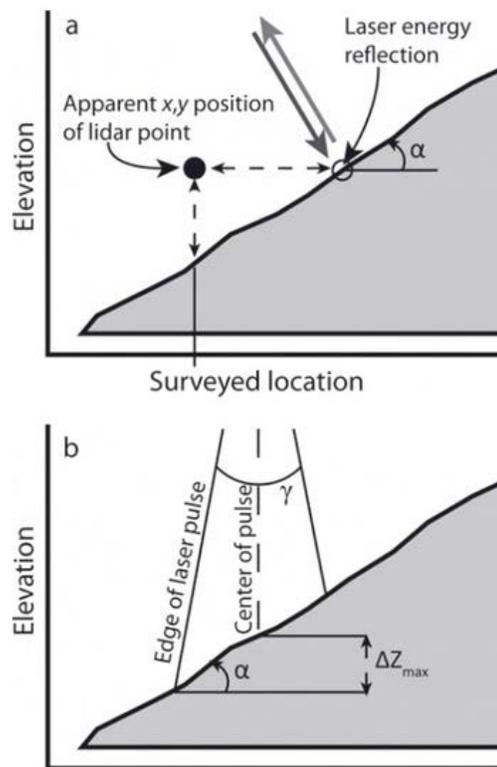


Figura 12: Errores inducidos por la pendiente del terreno: a) Error vertical inducido por errores horizontales; b) Error vertical ("Time-walk") inducido por la mancha láser extendida sobre terreno inclinado. α = ángulo de inclinación; γ = divergencia del rayo láser; ΔZ_{max} = error de elevación máximo; $\Delta x, y, max$ = error horizontal máximo. Fuente: [6]

13.12.2018

En 2011 Geoestudios realizó investigaciones en terreno calculando el balance de masa de los glaciares San Francisco y Mirador del Morado en base a estimaciones apoyadas con mediciones en terreno [8].

En Tabla 6 se muestra para los glaciares San Francisco y Mirador del Morado el valor (promedio) anual de la pérdida de volumen calculado en base a datos de Geoestudios entre 1955 y 2010; así como también el promedio anual de pérdida de volumen de estos dos glaciares obtenidos para el período entre 2011 y 2017 y el volumen perdido entre 2017 y 2018. Se aprecia que las pérdidas de volumen promedio anual en el período de 2011 a 2017 son significativamente mayores que en los dos otros periodos.

En cuanto al glaciar San Francisco, para el período 2010 - 2011 Geoestudios calculó una pérdida de masa de $1.900.000 \text{ m}^3$, lo cual demuestra una pérdida significativamente mayor que el promedio de los años anteriores (1955-2010). Las pérdidas más recientes se estiman en $-1.844.435 \text{ m}^3$ para el período 2015-2017 y $-2.633.710 \text{ m}^3$ para el período 2017-2018. Ambos valores indican un aumento reciente de las pérdidas de masa.

En cuanto al Mirador del Morado los valores resultantes de este estudio están marcados por los errores mencionados. El glaciar es más pequeño y tiene una pendiente relativamente grande. Además, los dos glaciares se encuentran adyacentes a partes rocosas que aumentan el error. En general se nota el aumento excesivo de los valores resultantes del periodo entre 2011 y 2017 que debe a los errores discutidos arriba.

13.12.2018

Tabla 6: Valor (promedio) anual de pérdida de volumen (m³) estimado para los glaciares San Francisco y Mirador del Morado, de acuerdo a metodologías de Geoestudios [8] y Geotest en tres períodos distintos.

	San Francisco	Mirador del Morado
Promedio anual entre 1955-2010 Geoestudios 2011 [8]	563.000 m ³	68.566 m ³
Promedio anual entre 2011-2017 Geotest 2017	3.108.000 m ³	440.000 m ³
Perdida de volumen entre 2017 y 2018 Geotest 2018	1.000.000 m ³	180.000 m ³

5. Conclusiones y recomendaciones

Las investigaciones demostraron un retroceso general de los glaciares en el área de estudio para el período del estudio. Comparando el desarrollo de los glaciares estudiados con glaciares de referencia de características similares [14], se concluye que el comportamiento de retroceso de estos glaciares es parte de un proceso progresivo observado desde varias décadas anteriores al inicio del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

13.12.2018

Se pudo constatar una reducción de superficie y de volumen de los glaciares blancos y cubiertos durante el período de estudio (1955 a 2018). No se detectaron modificaciones en superficie de los glaciares en roca. Se destaca que pese al aumento continuo de la resolución de las imágenes disponibles, la delimitación de los glaciares ha sido un desafío mayor ya que en las imágenes más recientes aparecen más detalles que en las imágenes más antiguas que ya han sido digitalizadas.

Acerca de la metodología para la estimación de volúmenes de los glaciares, hay que tener presente que para este estudio no se han usado datos reales de terreno. Por ende, la calidad de los resultados obtenidos depende de la similitud de las propiedades físicas (altura, pendiente, etc.) que existan entre los glaciares incluidos en los estudios de Bahr et al (1997) y Chen y Ohmura (1990) y los glaciares analizados en este informe.

En base a la aplicación de criterios de clasificación de glaciares de roca elaborados según [12] sobre la interpretación de las imágenes para el área de estudio, los glaciares rocosos se asociaron a las clases 3, 4, 5 y 6 de la Tabla 3. A partir de esta identificación se estimó el contenido de detritos y el equivalente en agua respectivo (Anexo 3).

El balance de masa fue calculado para 21 glaciares en los dos periodos (2011 a 2017 y 2017 a 2018) comparando los DEM de los años respectivamente. Pese a mayores diferencias de resolución entre los DEM de 2011 (20 m) y 2017 (1 m) y un desplazamiento considerable entre las imágenes, el balance de masa de este periodo resultó en valores excesivamente altos. El periodo de 2017 a 2018 contó con una base más sólida y pudo mostrar resultados más confiables. En general las incertidumbres aumentan en glaciares más pequeños y con mayor pendiente. Para el glaciar San Francisco se obtuvieron resultados de balance de masa más sólidos, aunque el desplazamiento entre las imágenes sigue siendo una fuente de error importante.

La presente línea base se actualizará en el año 2019 empleando la misma metodología del presente estudio y levantando imágenes LIDAR para mantener la base de alta resolución.

13.12.2018

Bibliografía

- [1] Bahr, D., Meier, M. and S. Peckham 1997: The physical basis of glacier volume-area scaling. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol.12, No. B), P. 20335-20362.
- [2] Barsch, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments.
- [3] A. Brenning 2005: Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile. Dissertation Humboldt University Berlin.
- [4] Chen, J. and A. Ohmura 1990: Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. In: *Proceedings of the 10th Lausanne Symposium*, August 1990.
- [5] Croce, F. and J.P. Milana 2002: Internal structure and behavior of a rock glacier in the arid Andes of Argentina. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 13: 289-299 (2002). DOI: 10.1002/ppp.431
- [6] Deems, J.S, Painter, T.H. and D.C. Finnegan (2013): Lidar measurement of snow depth: a review. In: *Journal of Glaciology*, Volume 59, Issue 215, 2013, pp. 467-479.
- [7] Frauenfelder, R 2004: Regional-scale Modeling of the Occurrence and Dynamics of Rockglaciers and the Distribution of Paleopermafrost. In: *Physische Geographie, Glaziologie und Geo,orphodynamik* 45: 1-70.
- [8] Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., Kulkarni, A., Linsbauer, A., Salzmann, N., and Stoffel, M.: Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods, *The Cryosphere*, 8, 2313-2333, <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>, 2014.
- [9] Geoestudios (2011): Captura de información y evaluación de glaciares San Francisco y Mirador del Morado del año 2010, Informe final, Santiago.
- [10] W. Haeberli, 2016: Brief Communication: On area-and slope-related thickness estimates and volume calculations for unmeasured glaciers. DOI: 10.5194/tc-2015-222, 2016
- [11] Hauck, C., Böttcher, M. and H. Maurer 2011: A new model for estimating subsurface ice content based on combined electrical and seismic data sets. In: *The Cryosphere*, 5, 453-468, 2011. DOI: 10.5194/tc-5-453-2011
- [12] Janke, R. J., Bellisario, A.C. and F. A. Ferrando 2015: Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. In: *Geomorphology* 241 (2015) 98-121.

13.12.2018

- [13] Monnier, S. and C. Kinnard 2013: Internal structure and composition of a rock glacier in the Andes (upper Choapa valley, Chile) using borehole information and ground-penetrating radar. In: Annals of Glaciology 54(64) 2013. DOI: 10.3189/2013AoG64A107
- [14] Geotest Chile SpA 2017: Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), Glacier Monitoring Assessment Report, Summer 2016/2016. Informe 4015024.1 Revisión 0.

Anexos

Anexo 1 Tablas superficies, volúmenes y equivalente en agua de masas de hielo.

Anexo 2 Informe Geoestudios (2011). Captura de información y evaluación de glaciares San Francisco y Mirador del Morado”.

Anexo 3 Tabla Porcentaje de detritos de glaciares rocosos e equivalente en agua

Anexo 4 Tabla Balances de masa

Anexo 5 Resultado de sustracción de DEM 2017 y DEM 2011.

Anexo 6 Resultado de sustracción de DEM 2017 y DEM 2018

Anexo 7 DGA: Balance de Masa geodésico Glaciar San Francisco 2009 – 2015

Anexo 8 Balance de Masa Glaciar San Francisco 2015-2017

Anexo 9 Balance de Masa Glaciar San Francisco 2017-2018