



**Laboratorio De Glaciología
Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas**

**Investigaciones glaciológica sobre el Glaciar Guanaco en
las cercanías del Proyecto Pascua-Lama.
Periodos 2007-2008**

Informe N° 2008-07

Fecha 30 de agosto de 2009

Autor principal: Grupo glaciología de CEAZA

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
Benavente 980
Casilla 599
La Serena - Chile

tel: (+56) 51 20 43 78
fax: (+56) 51 33 47 41
info@ceaza.cl

Investigaciones glaciológica sobre el Glaciar Guanaco en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama

Contenidos

Introducción	2
1.- Meteorología	3
2.1.- Detalles técnicos de la Estación Meteorológica (EM)	4
2.2.- Periodos de datos disponibles	5
2.3.- Problemas encontrados y correcciones efectuadas	6
2.4.- Resultados	7
3.- Cambios en la superficie de glaciar Guanaco, periodo 1955-2007	8
3.1.- Imágenes utilizadas	8
3.2.-	9
Resultados	9
4.- Volumen y profundidad del glaciar	12
5.- Balance de masa	13
5.1.- Mediciones en terreno	13
5.2.- Cartografía	14
6.- Albedo	17
6.1.- Instrumentos y métodos	17
6.2.- Resultados de las mediciones	18
7.- Balance de energía	20
7.1.- Balance combinado de glaciar Guanaco	23
Referencias	23

Introducción

Los principales objetivos del plan de monitoreo glaciar son: la realización de mediciones de balance masa y energía. Como asimismo el desarrollo de un estudio base sobre la evolución de los cuerpos de hielo antes del inicio de la fase de explotación de la mina, estableciendo de este modo, referencias sobre la tendencia natural de los glaciares antes y después del desarrollo de la explotación minera. Este informe presenta las principales conclusiones de la investigación glaciológica llevadas a cabo en el Glaciar Guanaco entre los meses de marzo de 2007 y 2008.

1.- Meteorología

Como parte del Plan de Monitoreo de Glaciares en Pascua-Lama (PMG) fue instalada una estación meteorológica (EM) sobre el glaciar Guanaco por el equipo de investigaciones del laboratorio de glaciología.

La estación meteorológica está localizada en la parte superior del glaciar en el borde fronterizo de Chile y Argentina. El uso de esta estación meteorológica tiene por objetivos ampliar la red de mediciones meteorológicas en las zonas cercanas a los cuerpos de hielo con el fin de generar datos para:

- La realización de modelos del balance de energía y de los flujos turbulentos que permitan evaluar la pérdida de masa del glaciar en término de fusión y sublimación.
- Análisis sobre eventuales transporte desde el área de operaciones de la mina hacia los cuerpos de hielo, a través de mediciones de velocidad y dirección del viento.
- Análisis espaciales de la variación del albedo sobre la superficie de los cuerpos de hielo.

2.1.- Detalles técnicos de la Estación Meteorológica (EM)

- Los datos son recolectados y enviado a través de transmisión remota al campamento para posteriores análisis en el laboratorio del CEAZA.
- La programación inicial cargado en el dataloggers fue realizado por Alejandro Cordero de Barrick. Posteriormente esta programación fue revisada y mejorada por los miembros del CEAZA durante el mes de marzo e instalada a principios del mes de abril del años 2008.
- Los detalles de los sensores instalados en la EM se presentan en Tabla 1.
- A partir de abril 2008, los anemómetros y sensores de radiación de la EM fueron desinstalados para limitar el riesgo de deterioro durante los temporales de invierno.



Estación	Guanaco
WGS84	N: 6753608 / E : 401510
Cota (m)	5317
Fecha de instalación	19/12/2007
Instalada por	Hélène Castebrunet Antoine Rabatel

Figura 1: Estación Meteorológica Guanaco

Variable	Sensor	Altura inicial Guanaco (cm)	Precisión (cf. manual)
Temperatura del aire, °C	Vaisala HMP 45	160	±0.2°C (± 0.5°C a -40°C)
Humedad relativa, %	Vaisala HMP 45	160	±2 %
Velocidad del viento, m s ⁻¹	Young 05103	300	±0.3 m s ⁻¹
Dirección del viento, deg	Young 05103	300	±3 deg
Radiación y albedo	Kipp & Zonen CNR-1 constituido por dos CM3 y dos CG3		
Radiación de onda corta incidente, W m ⁻²	Kipp & Zonen CM3, 0.305< λ <2.8 μ m	160	±10 % ⁴
Radiación de onda corta reflejada, W m ⁻²	Kipp & Zonen CM3, 0.305< λ <2.8 μ m	160	±10 % ⁴
Radiación de onda larga incidente, W m ⁻²	Kipp & Zonen CG3, 5< λ <50 μ m	160	±10 % ⁴
Radiación de onda larga emitida, W m ⁻²	Kipp & Zonen CG3, 5< λ <50 μ m	160	±10 % ⁴
Nivel de la superficie	Campbell Sci. SR50	270	±0.4%
Temperatura de la nieve	Campbell Sci 107-L20	0, -40, -0, -90 (Profundidad)	±0.2°C (± 0.4°C a -40°C)

Tabla 1: Sensores en EM Guanaco

2.2.- Periodos de datos disponibles

- **Verano: 19/12/2007 – 03/04/2008**

Durante el primer periodo, los datos fueron registrados cada 15 min, cada una hora y en un lapso de 24 horas.

- **Invierno (1): 03/04/2008 – 01/05/2008**

A partir del periodo invierno, el registro cada 15 min. fue reemplazada por un registro cada 30 min. El análisis se hace a partir de promedio cada 30 min.

Lagunas en los datos:

- Para los datos cada 15min, el 11/01/2008 (1h); el 16/01/2008 (1h); entre el 30/01/2008 y el 05/02/2008.
- Para los datos cada 30min de temperatura, humedad y altura de nieve entre el 03/04/2008 y el 01/05/2008.

2.3.- Problemas encontrados y correcciones efectuadas

- Sobre el glaciar, se utilizaron los sensores SR50 para medir la distancia a la superficie, como así mismo tanto la ablación como la acumulación. Esta medición permite conocer la altura de todos los sensores de las EM, condición indispensable para alcanzar un buen cálculo del balance de energía. Al inicio de abril de 2008, el programa de los *dataloggers* de los 3 EM para la medición de la altura de nieve, fue cambiado a objeto de corregir un error de programación. En efecto, inicialmente, el programa utilizado para el sensor SR50 sobre el glaciar fue idéntico al utilizado para las EM sobre tierra. Un aumento de la distancia entre el sensor y la superficie estaba corregido por 0. Así, los eventos de ablación no estaban siendo considerados, y por consiguiente tampoco los eventos de acumulación que ocurrieron después de una ablación. De ellos se siguen consecuencias importantes y necesitamos utilizar los datos de balance de masa (estacas) para conocer la ablación alrededor de las EM en esta temporada de verano, lo que implica algunas incertidumbres para el cálculo de balance de energía puntual al nivel de la EM.
- Durante una primera fase del segundo periodo (entre el 3/04 y el 1/05 para Guanaco), los sensores HMP45 no fueron conectados. La medición de altura de nieve (sensor SR50) ha sido calibrada por la medición de temperatura y humedad, los datos de altura de nieve son incorrectos durante este periodo.
- A partir de los valores de radiaciones de onda larga emitidas por la superficie, se puede deducir la temperatura. Para el periodo de medición, el cálculo teórico realizado a partir de los valores de radiaciones de onda larga, da un máximo de 4,5°C para la temperatura de la superficie sobre Guanaco. Sin embargo, temperaturas de más de 0°C no se encuentran en realidad para una cobertura de nieve.
- Una hipótesis es que los sensores se calientan cuando están expuestos a la radiación solar. Este efecto es común y ha sido estudiado en el pasado por otros investigadores. Obleitner y de Wolde (1999) han propuesto introducir una corrección sistemática de la medición de las radiaciones de onda larga, proporcional a la radiación de onda corta incidente, con una corrección máxima de 2,5%. Con esta corrección por ejemplo se obtiene una temperatura de la superficie máxima de 0,89°C para Guanaco. Sin embargo, esta corrección da temperaturas de superficie demasiado bajas, Además es posible observar aún episodios de fusión cerca de las EM durante algunos días de verano.
- Para el cálculo de balance de energía finalmente no usamos corrección pero la temperatura de superficie calculada fue limitada a valores iguales o inferiores a 0. Es importante notar que el hecho de corregir o no las radiaciones de larga onda no influye sobre el cálculo del balance radiativo de onda larga ya que dicha corrección está hecha para las radiaciones de onda larga incidentes e emitidas.
- Para evitar el potencial efecto de la placa roja en la base del mástil, la mejor solución para el año próximo será de pintar la placa de color rojo en blanco y disminuir su tamaño de superficie.

- La utilización de un sistema de ventilación artificial para el sensor de temperatura sobre un glaciar se recomienda para limitar los efectos sobre las mediciones de temperatura de (i) la radiación que calienta el sensor y, (ii) la "stephenson screen" en términos de prevención de una libre circulación del aire alrededor del sensor para que el aire no se caliente. Dos sensores de temperatura HMP45 (uno con el sistema de ventilación y otro sin ventilación) fueron colocados en Ortigas 1 y las mediciones fueron comparadas. El sistema de ventilación fue construido según el modelo de J-P. Chazarin (IRD). Los resultados de esta prueba son poco concluyentes, ya que las diferencias entre las mediciones de temperatura no son estadísticamente atribuibles a los factores supuestos. Es posible que el sistema de ventilación instalado no difunda una circulación de aire suficiente al interior del sistema una vez que el sensor está colocado. Además, suponemos que el sistema de ventilación no funcionaba durante algunos periodos (problema con la alimentación del motor).
- Georges y Kasser (2002) han mostrado que con vientos fuertes (superiores a 3 m/sec), la ventilación natural es suficiente. Como estas condiciones de viento se encuentran en esta zona de alta altura, parece muy probable que los resultados de balance de energía sean poco afectados. En conclusión, se propone seguir con las mediciones de rutina, sin ventilación y reiterar esta prueba el año próximo para evaluar precisamente el impacto potencial de una ventilación artificial sobre las mediciones de temperatura.

2.4.- Resultados

Al comparar las mediciones de viento realizadas durante los meses de febrero y marzo sobre glaciar Guanaco con las demás EM instaladas en el lado Chileno en el glaciarete Toro 1 y el glaciar Ortigas 1 en la zona del proyecto y fuera del área influencia respectivamente, se detectaron vientos de mayor intensidad sobre glaciar Guanaco.

Las mediciones de viento son trascendentales para el cálculo del balance de energía, ya que los flujos de calor debidos a la turbulencia en los primeros metros sobre la superficie son muy sensibles a esta variable. De este modo se espera, que los fuertes vientos en Guanaco inducen flujos turbulentos más importantes, aumentando de este modo, la sublimación.

Fecha	Guanaco		
	Promedio	Max	Min
ene-08	-3.14	5.94	-11.55
feb-08	-6.45	9.61	-14.40
marzo-08	-6.52	3.17	-15.08
abr-08	-	-	-
mayo-08	-12.01	-2.77	-25.49

Tabla 2: Promedios mensuales de temperatura (°C), máximos y mínimos instantáneos sobre el Glaciar Guanaco (meses con serie de datos completos)

Guanaco			
Fecha	Promedio	Max	Min
ene-08	46.85	100	2.09
feb-08	46.96	100	5.77
marzo-08	42.26	99.1	2.23
abr-08	-	-	-
mayo-08	34.87	92.2	3.68

Tabla 3: Promedios mensuales de humedad relativa (%), máximos y mínimos instantáneos sobre el Glaciar Guanaco (meses con serie de datos completos)

Guanaco			
Fecha	Promedio	Max	Min
ene-08	5.49	11.65	0.26
feb-08	6.52	25.66	0
marzo-08	7.23	29.53	0
abr-08	-	-	-
mayo-08	-	-	-

Tabla 4: Promedios mensuales de velocidad de viento (m/sec), máximos y mínimos instantáneos sobre el Glaciar Guanaco (meses con serie de datos completos)

3.- Cambios en la superficie de glaciar Guanaco, periodo 1955-2007

Estudiar la evolución de la superficie del glaciar a través del tiempo a partir de fotografías aéreas antiguas e imágenes más recientes obtenidas por satélite proporciona una oportunidad para crear una amplia base de referencia del cambio del glaciar durante un período de 52 años. Permite de este modo, identificar las tendencias naturales en el área del glaciar asociado con los parámetros climáticos. Los cambios en la superficie de glaciar Guanaco fueron detectados a través del análisis de una serie de imágenes entre 1955 y 2007 (Tabla 5).

Por otro lado, definir la evolución de la extensión de los glaciares es importante debido a que la función hídrica del glaciar depende casi exclusivamente del área de hielo expuesta a la radiación solar y de su poder de captación de la misma.

3.1.-Imágenes utilizadas

La imagen satelital IKONOS 2005 fue previamente ortorectificada por el proveedor INFOSAT. Las demás imágenes fueron corregidas geométricamente sobre la base de los parámetros geométricos de la imagen IKONOS 2005 y un modelo digital de terreno (DEM) de dos metros de resolución derivada de esta.

En el caso de las imágenes satelitales la corrección geométrica fue realizada a través del módulo del *Orthorectify Ikonos* del software de análisis espacial ENVI 4.4. Por otro lado, las fotografías aéreas fueron corregidas en el módulo *OrtoEngine* del programa PCI Geomatica

La delimitación del glaciar fue realizada manualmente, es decir, sin unos de clasificación automática.

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)		1 m
Imagen Ikonos	2007 (26 de marzo)	226552	1 m

Tabla 5: Lista de las imágenes utilizadas en el estudio.

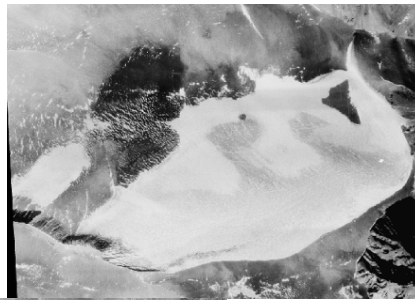
3.2.- Resultados

El Glaciar Guanaco, el más grande de toda la zona, muestra una pérdida de superficie de 15% durante el periodo en estudio. En este glaciar se pueden distinguir tres periodos: entre 1955 y 1978 con un retroceso anual marcado, el periodo 1978 – 1996 con una pérdida menor, y el periodo 1996 – 2006 con una aceleración de la pérdida de superficie (Figura 4). A pesar de que existan diferencias entre los tres periodos, esas diferencias no son significativas desde un punto de vista estadístico.

Finalmente, la fotografía aérea del año 1955 tiene una cobertura de nieve residual, sobre todo al nivel del frente del glaciar (parte sur a oeste). Por ejemplo, un brazo de nieve está uniendo el pequeño glaciarete ubicado al oeste al Glaciar Guanaco. Este cuerpo no fue considerado como una parte del Glaciar Guanaco, sino que se mira como separado del cuerpo principal.



1955



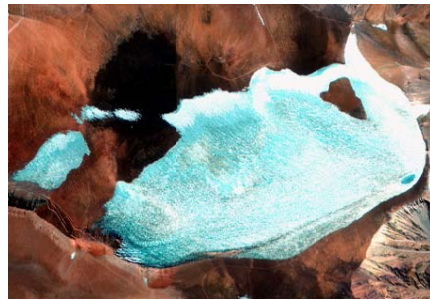
1978



1996



2005



2007

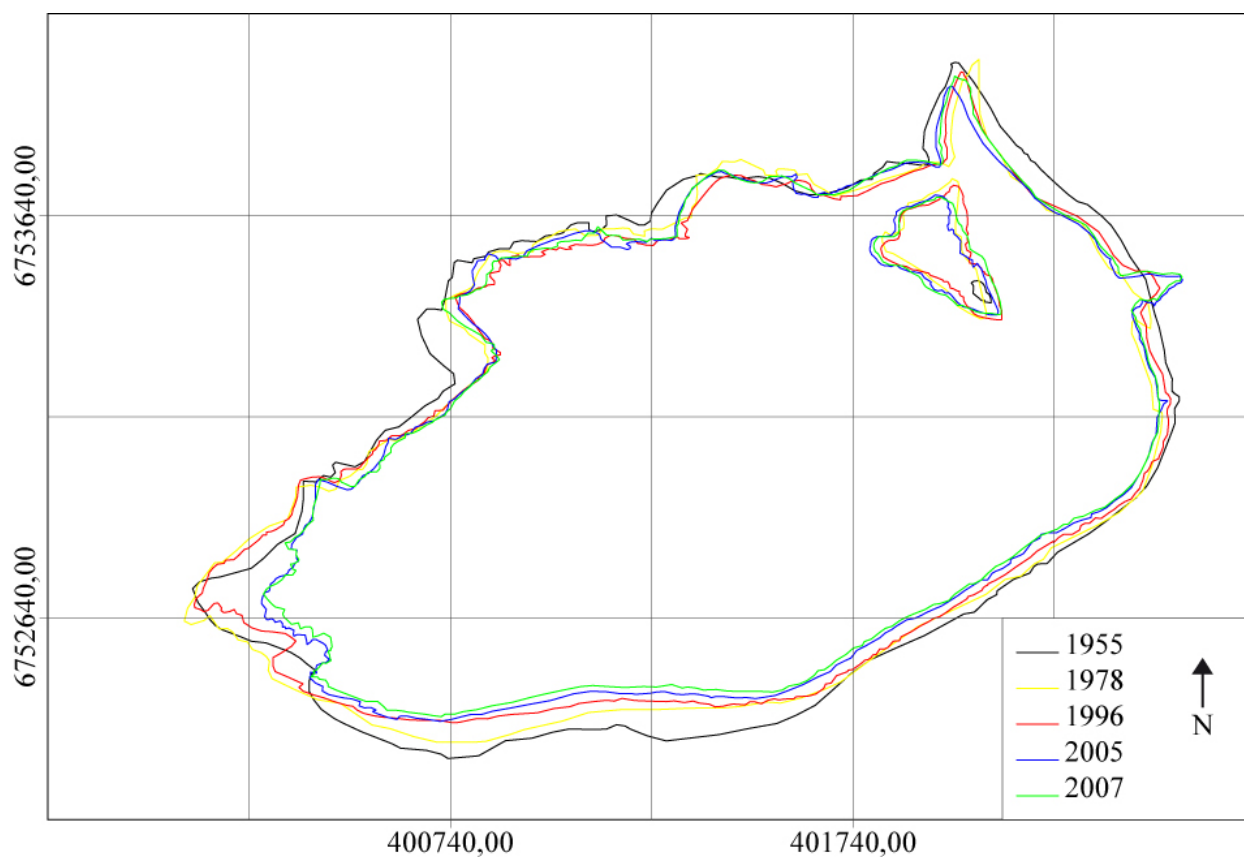


Figura 2: Evolución del Glaciar Guanaco entre 1955 y 2007.

Glaciar Guanaco	Año	Superficie (km²)
	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 promedio anual de superficie por periodo (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

Tabla 6: Superficie del Glaciar Guanaco entre 1955 y 2007, y pérdida promedio anual por periodo.

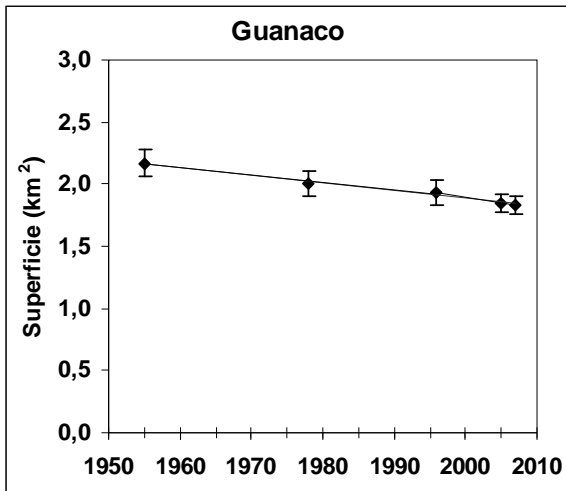


Figura 3: Evolución del Glaciar Guanaco entre 1955 y 2007

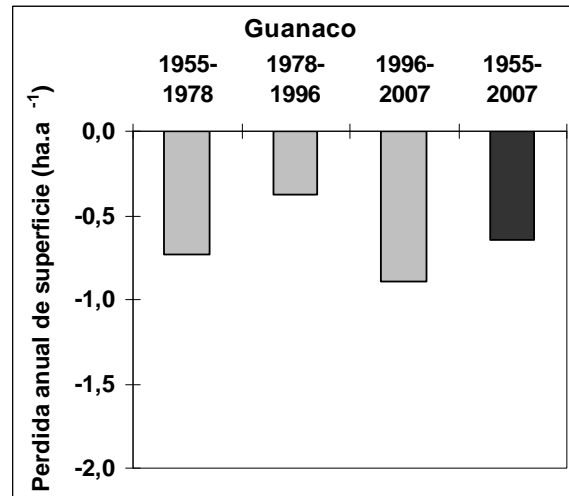


Figura 4: Pérdida promedio anual de superficie por periodo

4.- Volumen y profundidad del glaciar

El volumen del Glaciar Guanaco fue calculado sobre la base de mediciones de radar realizadas anteriormente por la consultora Golder Associates entre los años 2002 y 2004. Dichas mediciones fueron utilizadas para realizar el mapa de espesor del glaciar (Figura 5) con el software Surfer (Golden Software). Este software permite también calcular el volumen del glaciar. La profundidad máxima del glaciar es levementemente superior a los 120 m, con una profundidad media de 55 m y un volumen estimado de 101 millones de m³.

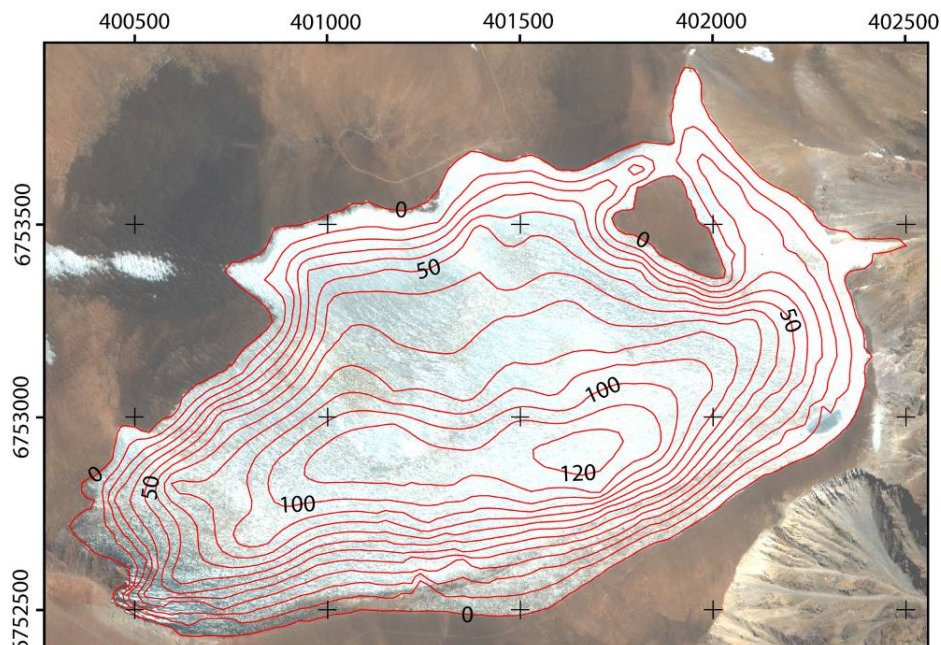


Figura 5: Espesor del Glaciar Guanaco (isolinias de misma espesor mapeadas sobre una imagen satelital IKONOS de 2007)

5.- Balance de masa

Para determinar el balance de masa en un lugar se requieren mediciones de acumulación¹ de nieve a fines del invierno, y mediciones de la ablación² de nieve y hielo producida durante el verano. La suma de estos dos parámetros da como resultado el balance de masa a escala anual. Esto corresponde a un cambio del nivel de la superficie en metros cúbicos de agua equivalente. El espesor del manto de nieve es convertido en agua equivalente utilizando la densidad de la nieve medida en el glaciar mismo. Por su parte, el espesor de hielo derretido es convertido en agua equivalente utilizando la densidad estándar del hielo de $0,9 \text{ g m}^{-3}$.

El balance de masa calculado en un punto está extrapolado sobre un área asignada para determinar el volumen de agua perdida o ganada sobre cada área del glaciar. La suma del volumen de agua de cada área representa el volumen total de agua ganada o perdida respecto de todo el glaciar.

En forma paralela, se realiza un registro y análisis de la condición de la superficie de hielo utilizando fotografías oblicuas obtenidas al final de la temporada de verano e invierno.

Además de las mediciones realizadas respecto de los glaciares, se mantiene un registro visual de la condición de cada superficie de hielo utilizando fotografías capturadas al final de cada temporada (figuras 7 y 8).

5.1.- Mediciones en terreno

Se realizaron mediciones de acumulación y ablación según el protocolo de *"Manual de Procedimientos para el Estudio de Efectos Adversos sobre los glaciares del Norte Chico de Chile debido a Actividades Industriales: Balance de Masa, Superficies, Volúmenes de Hielo"*.

La estimación de la profundidad de nieve de invierno se realizó por medio de sondaje en cada punto en que las balizas fueron instaladas. Si se sospechara que la profundidad medida por este método no resulta confiable, puede utilizarse una estimación de la profundidad de nieve (1) registrándose el cambio en el largo de la sección de la baliza que se encuentra por sobre la superficie entre el invierno y el verano anterior, o bien pueden realizarse (2) mediciones de espesor de nieve a través calicatas o perforaciones con el taladro punta P.I.C.O.

Las mediciones de densidad de nieve se realizaron en las calicatas excavadas durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2008. La densidad de nieve utilizada para cada cuerpo de hielo es la densidad promedio del perfil medido en la calicata del glaciar correspondiente.

La estimación de la ablación de nieve y hielo se realizó midiendo la diferencia en el nivel de nieve/hielo. En el caso de las balizas que fueron visibles en la temporada de invierno, el cálculo de la ablación fue determinado usando el cambio del largo de la parte expuesta de la baliza entre el verano 2007 y el verano 2008, y la acumulación media de la sonda.

¹ **Acumulación:** Proceso mediante el cual el glaciar acumula masa, esencialmente a través de precipitaciones sólidas recogidas en su superficie, es decir, es la cantidad de nieve y hielo acumulada a lo largo de un año hidrológico.

² **Ablación:** Proceso por el cual el glaciar pierde masa, es decir, es la cantidad de nieve y hielo equivalente en agua que se derrite (en forma de fusión y de sublimación). Es resultado directo del balance energético a la superficie del glaciar.

A fin de medir posibles diferencias en la fusión en distintas partes de los glaciares por cambios en albedo, se instalaron más estacas de ablación en aquellas zonas que se encuentran más cercanas a las operaciones mineras con posible impacto de material particulado, principalmente hacia el este de la línea central original de estacas (estacas medidas por varios años por la consultora Golder Associates).

5.2.- Cartografía

El trabajo de cartografía fue realizado sobre la base de una imagen satelital IKONOS (28 de marzo 2008). La imagen fue corregida geoméricamente por investigadores del CEAZA. Posteriormente, los límites del cuerpo de hielo fueron mapeados. Algunos de los márgenes de los glaciares están ocultos por la nieve, debido a una nevada ocurrida antes de la fecha en que fue tomada la imagen. Para efectos de claridad, se utilizó una imagen IKONOS tomada el año 2007 cuando los márgenes eran difusos.

En el caso del glaciar Guanaco, el margen septentrional fue cubierto de nieve, pero los límites exteriores de la nieve se encuentran dentro del margen de hielo de 2007.

Las superficies representativas de cada baliza fueron definidas dividiendo el glaciar (1) por rangos de altitud derivados del modelo digital de terreno de la imagen IKONOS 2005 (DTM), y (2) analizando la localización de la baliza sobre el glaciar y su distribución en los rangos de altura previamente definidos. Adicionalmente, es necesario considerar la condición de la superficie del glaciar hacia el final del verano. De este modo se asegura que las balizas sean representativas del área asignada. Detalles de las áreas asignadas a cada baliza se muestran en la Figura 5.

	Coordenadas en WGS84				Detalles de los cuerpos de hielo 2008		
	Latitud (°S)	Longitud (°O)	UTM Norte	UTM Este	Superficie (ha)	Altitud min. (msnm)	Altitud max. (msnm)
Guanaco	-29,341	-70,018	6753803	401171	180,82	4990	5350

- Coordenadas de las cumbres más cercanas de cada glaciar.
- Alturas mínimas y máximas de los glaciares de estudio, y superficie total calculada a partir de una Imagen IKONOS, marzo de 2008.
- La altura está bloqueada a 5 m.

Tabla 7: Localización geográfica del Glaciar Guanaco.

Hay 11 balizas instalado en la superficie de Glaciar Guanaco. Mediciones a cada baliza se presentan en Tabla 8. En esta tabla balance de masa y sus componentes puntuales se presentan en términos de agua equivalente.

Las balizas 4G-2 y 6 G-2 están ubicadas en forma contigua, por lo que el promedio de las dos estacas se utilizó para representar la banda de elevación. El grosor de la nieve es muy variable en toda la superficie del glaciar Guanaco.

Estaca	Altura (m s.n.m.)	Acumulación puntual (m a. eq.)	Ablación puntual (m a. eq.)	Balance puntual (m a. eq.)	Superficie (m ²)	Rango altitudinal	Acu.	Abl.	Balance de masa (m a.eq.)	Volumen (m ³)
4G-2	5252	0,29	-0,83	-0,54	409827	5235-5350	0,05	-0,17	-0,12	-214135
6G-2	5252	0,19	-0,70	-0,51						
6G-3	5220	0,48	-0,85	-0,37	94814	5205-5235	0,03	-0,04	-0,02	-34891
7G-7	5212	0,00	-0,67	-0,67	71361	5205-5235	0,00	-0,03	-0,03	-47527
Poste	5197	0,25	-0,40	-0,14	134818	5185-5205	0,02	-0,03	-0,01	-19414
6G-4	5176	0,19	-0,44 [†]	-0,25	66312	5170-5185	0,01	-0,02	-0,01	-16711
CG7-2	5170	0,45	-1,04	-0,59	66445	5170-5185	0,02	-0,04	-0,02	-39203
6G-5	5160	0,00	-0,14	-0,14	160365	5155-5170	0,00	-0,01	-0,01	-23093
CG7-3	5165	0,31	-0,51	-0,20	136633	5155-5170	0,02	-0,04	-0,02	-27463
6G-6	5153	0,46	-0,63 [†]	-0,17	523091	4990-5155	0,13	-0,18	-0,05	-89449
7G-8	5149	0,10	-1,16	-1,06	144508	5140-5170	0,01	-0,09	-0,08	-153323
promedio/suma		0,25	-0,67	-0,42	1808175	5140-5350	0,29	-0,66	-0,37	-665207

[†] Cálculo de ablación usando ablación de hielo entre verano y verano

Tabla 8: Detalle de los cálculos para el glaciar Guanaco.

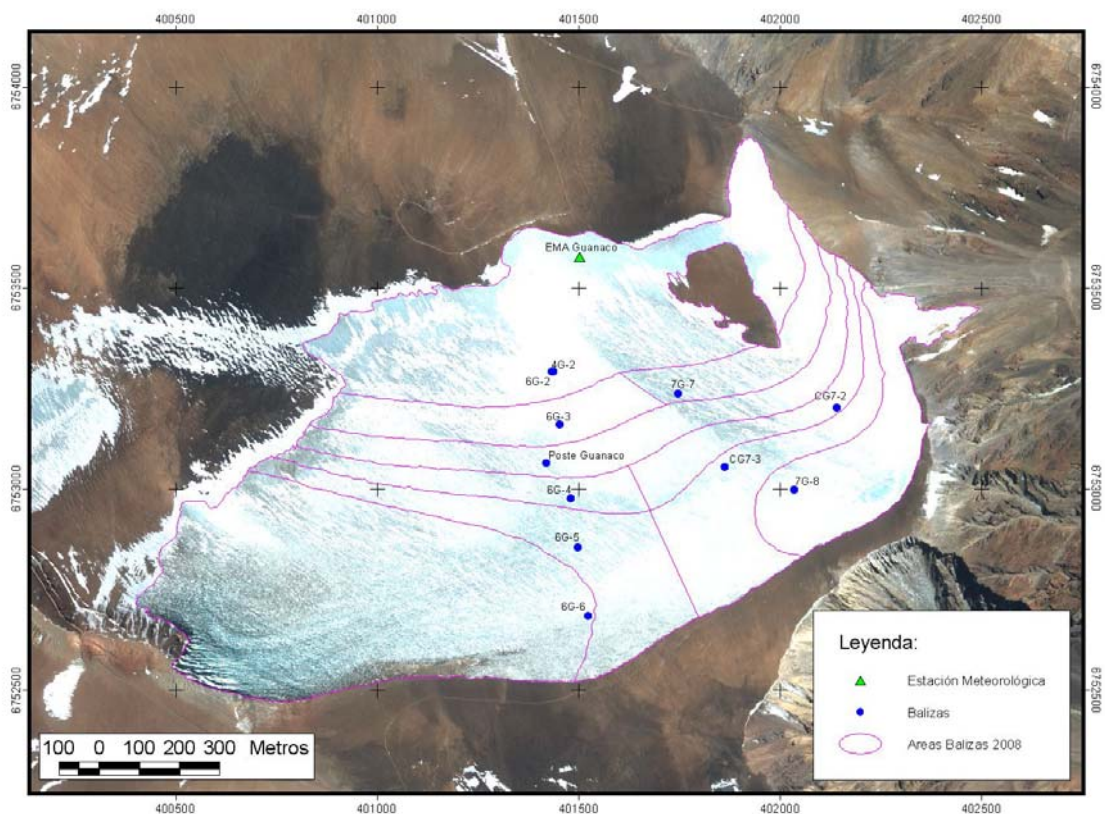


Figura 6: Áreas por cada baliza, locaciones de cada baliza y la estación meteorológica.

Las fotografías tomadas desde la estación fija muestran las condiciones de la superficie de los glaciares al final de la temporada de invierno y verano. Estas diferencias cualitativas sobre glaciar Guanaco se muestran en las siguientes figuras:



Figura 7: Guanaco diciembre 2007



Figura 8: Guanaco marzo 2008

Los balances de invierno de 2004 y 2006 fueron años de baja acumulación de nieve sobre glaciar Guanaco, aunque no está claro si esto está relacionado a la disminución de las nevadas o una mayor erosión eólica sobre los sitios donde fueron instaladas las balizas

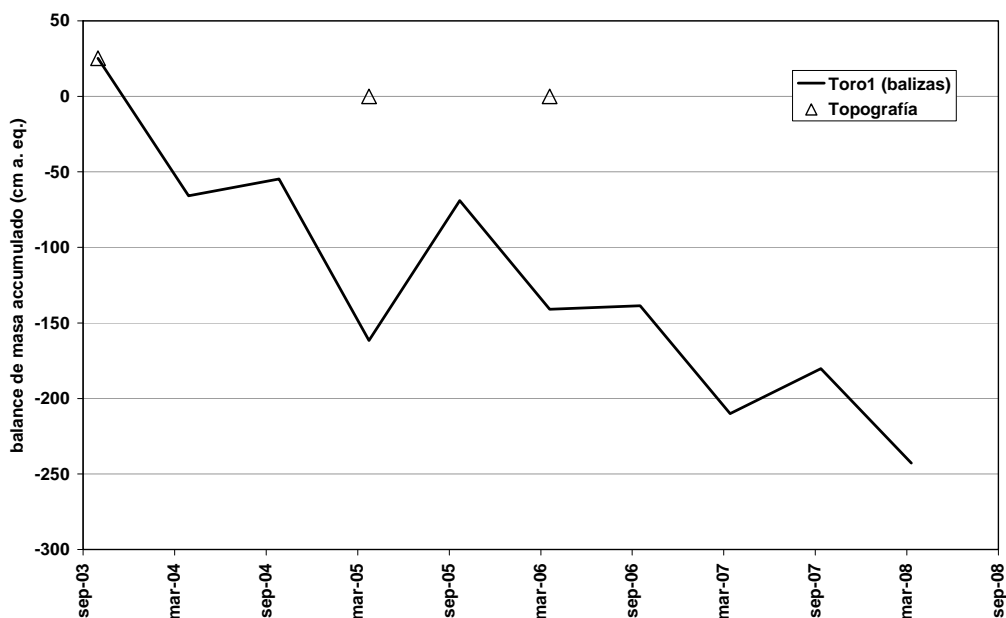


Figura 9: Balance de masa acumulada para glaciar Guanaco

6.- Albedo

Dentro del balance de energía, el albedo de la superficie del glaciar es uno de los parámetros más importantes. Efectivamente, el albedo de una superficie representa la parte de la energía solar incidente reflejada por esa superficie. Así, un cambio del albedo de la superficie se traduce en una cantidad distinta de energía disponible para la ablación, sea bajo fusión o sublimación: si el albedo disminuye, más energía estará disponible para la ablación y al contrario si el albedo aumenta.

Para calcular el albedo en la superficie del glaciar, CEAZA usó el método desarrollado por Javier Corripio durante su doctorado realizado en Edimburgo, Escocia. Una descripción detallada del método puede ser encontrada en su tesis de doctorado³ o en un artículo⁴ publicado en la revista: *International Journal of Remote Sensing*.

Dicho método permite determinar el valor del albedo para cada píxel en la imagen, mediciones de albedo en la estación meteorológica ubicada sobre el glaciar sirven de referencia. Efectivamente, el valor de reflectancia del píxel de la imagen donde se ubica la cámara fotográfica está relacionado al valor de albedo medido por la estación. Con esta relación, se puede convertir el valor de reflectancia de cada píxel de la imagen en un valor de albedo correspondiente.

6.1.- Instrumentos y métodos

Para ajustar las fotografías al modelo digital de terreno (DEM) fue necesario realizar mediciones de punto de control en terreno. Este trabajo fue con una estación geodésica total.

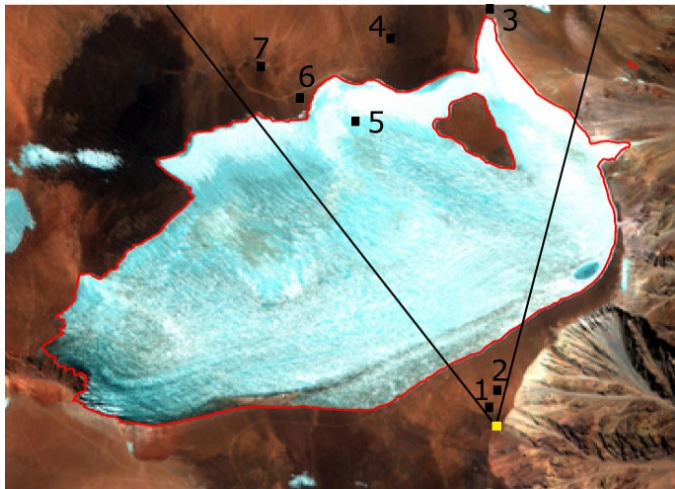
La cámara fotográfica utilizada es una Pentax K110D. Esta cámara tiene una resolución de 6 millones de píxel. Su distancia focal es de 24 mm. Cada foto está tomada desde un punto fijo, georeferenciado.

La medición del albedo es realizada con sensores Kipp & Zonen de tipo CM3 en la EM de Guanaco. El sensor mide la radiación solar de onda corta ($0,31 < \lambda < 2,8 \mu\text{m}$) incidente y reflejada, a una altura de 1,5 metros.

Finalmente, el tratamiento de las fotografías requirió el uso de un modelo digital de terreno (DEM) para la fase de georeferenciamiento. Para dicho propósito, el DEM realizado por la Sociedad Infosat a partir de imágenes Ikonos de 2005 fue utilizado. La resolución espacial original de dicho DEM era de 2 metros, por razones técnicas asociadas al software utilizado (el software no puede funcionar con un archivo demasiado pesado), dicha resolución fue cambiada a 4 metros.

³ <http://www.uibk.ac.at/geographie/personal/corripio/publications/corripiohd.pdf>

⁴ Corripio, J.G. 2004. Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *Int. J. Rem. Sens.*, **25** (24), 5705-5729.



Ubicación de la cámara:

X = 401.984,75
 Y = 6.752.419,33
 Z = 5.251
 Azimut = 345°

Ubicación de la estación meteorológica:

X = 401.510
 Y = 6.753.608
 Z = 5.317

Figura 10: Localización del cámara y de los puntos de control.

Referencia en Figura 1	X	Y	Z	Nombre local
1	401980	6752440	5247	Mojón 1
2	401994	6752471	5241	Mojón 2
3	401940	6753985	5346	Mirador Argentino
4	401742	6753784	5360	Cumbre Central
5	401510	6753608	5317	Estación meteorológica
6	401291	6753659	5357	Mojón al lado del camino
7	401111	6753744	5401	Cumbre Guanaco

Tabla 9: La lista de los puntos de control de terreno utilizados para el sector Guanaco (WGS84).

6.2.- Resultados de las mediciones

A continuación se presentan los mapas de albedo realizados para el sector este del Glaciar Guanaco. Solamente dos imágenes están disponible para la temporada de verano 2007-2008.

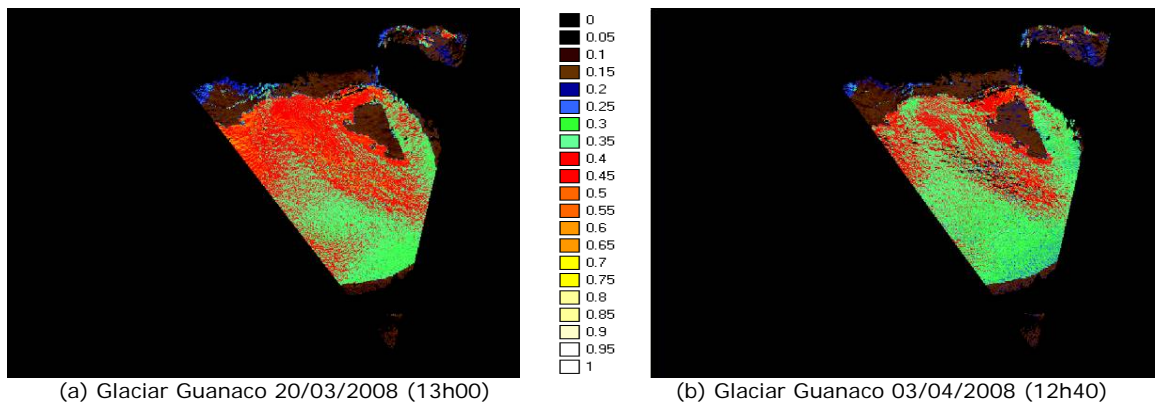


Figura 11: Mapeo del albedo de la superficie del Glaciar Guanaco (parte este)

La figura 11 muestra una disminución del albedo con el tiempo, tal como se espera, a lo largo del avance de la temporada de verano. También muestra cómo la parte superior del glaciar mantiene un albedo mayor durante más tiempo en la temporada de ablación, debido a la presencia de nieve.

Durante las dos fechas analizadas en este trabajo la evolución del albedo de superficie aparece como normal.

La Figura 12 presenta los valores diarios medidos en la estación Guanaco durante toda la temporada de mediciones. Pequeñas y frecuentes precipitaciones de nieve permiten mantener un albedo bastante alto.

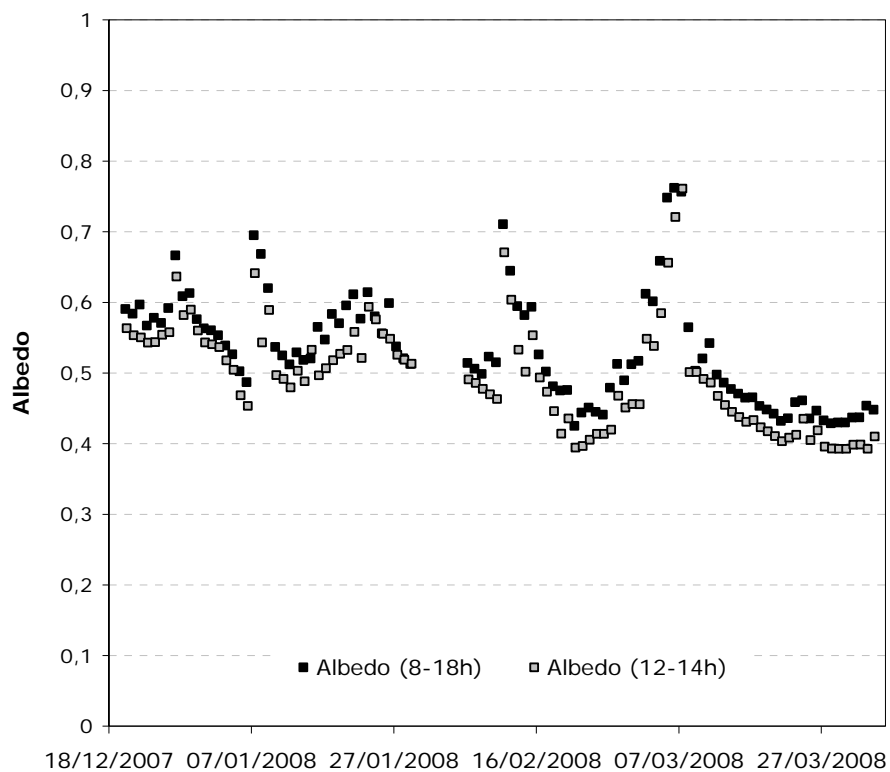


Figura 12: Albedo diario medido en el Glaciar Guanaco 1. En negro aparece el valor promedio entre las 8 y 18h, y en gris entre las 12 y 14h.

7.- Balance de energía

El estudio del balance de energía de superficie permite conocer la relación que existe entre el clima y el comportamiento de una superficie de nieve o hielo. El balance de masa se encuentra estrechamente vinculado con el balance de energía, ya que la ablación del glaciar es una consecuencia directa del balance de energía.

Un modelo de balance de energía se utilizó para determinar el balance de energía en el punto donde está localizada la estación meteorológica. Los datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, viento) son los datos de entrada. Este modelo fue propuesto para Dr. Vincent Favier de LGGE en Francia y desarrollado en gran parte por Dr. Patrick Wagon del IRD en Francia.

El estudio del balance de energía de la superficie trata de la capa límite de superficie, también llamada capa de flujos constantes. En efecto, los flujos verticales entre 0 y 3 m varían poco. Sin considerar las transferencias horizontales de energía, la ecuación del balance de energía (BE) se resume a un problema unidimensional:

$$\text{El balance de energía (BE):} \quad R+H+LE+G+P = \Delta Q_M + \Delta Q_S = \Delta Q \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

R: radiación neta para todas ondas (cortas y largas)

H: flujo turbulente de calor sensible

LE: flujo turbulente de calor latente

G: flujo de conducción en la nieve/hielo

P: flujo de calor traída por las precipitaciones

ΔQ_M : variación de calor latente traída por la fusión o el recongelación

ΔQ_S : convergencia o divergencia neta de los flujos de calor sensible en el volumen de nieve/hielo

ΔQ : termo residual: energía almacena en el volumen

Este modelo permite calcular los diferentes flujos de energía en la superficie del glaciar, evaluar la energía disponible para la ablación en la superficie del glaciar via procesos de fusión o de sublimación.

Los resultados presentados no son definitivos. En efecto, el modelo sigue todavía en desarrollo: varios procesos específicos a los glaciares de esta región necesitan trabajo de investigación mas largo para su buena representación.

La Figura 13 presente los promedios mensuales (o de los días disponibles cuando el mes es incompleto) para cada término del balance de energía, permitiendo ver el aporte de cada tipo de flujo de calor. Ya que, el periodo de medición fue muy cortó, no discutimos estos valores mensuales.

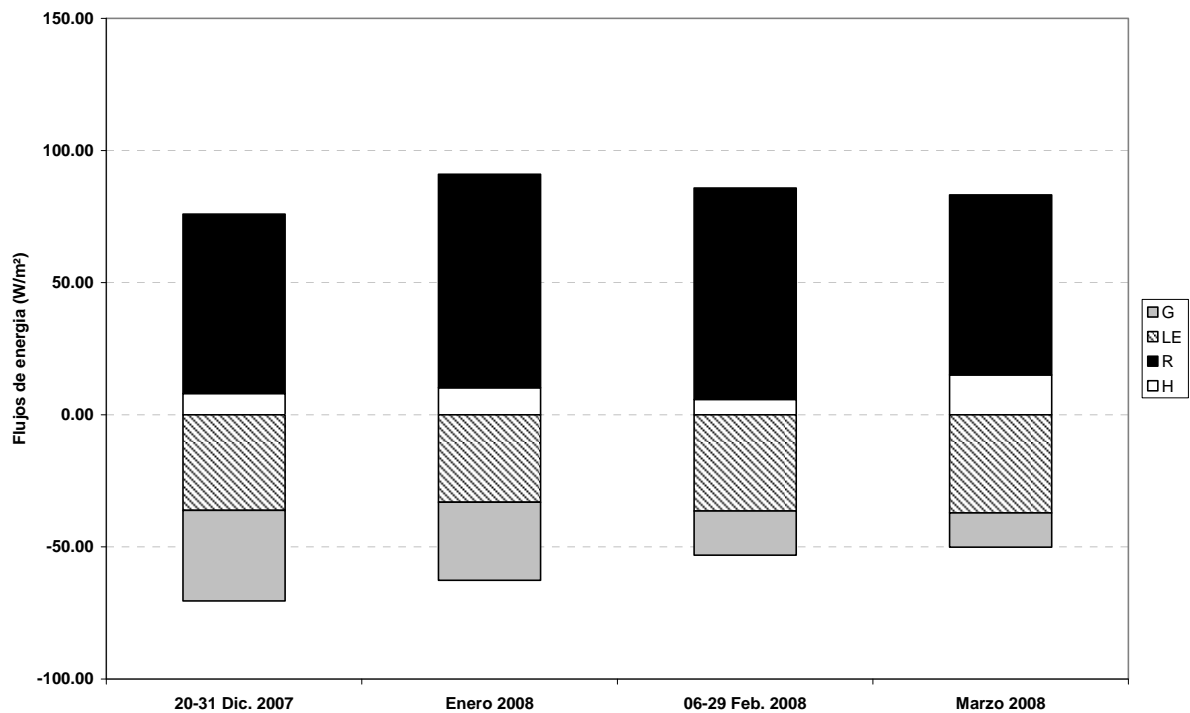


Figura 13: Promedios mensuales de los términos de balance de energía para Guanaco.

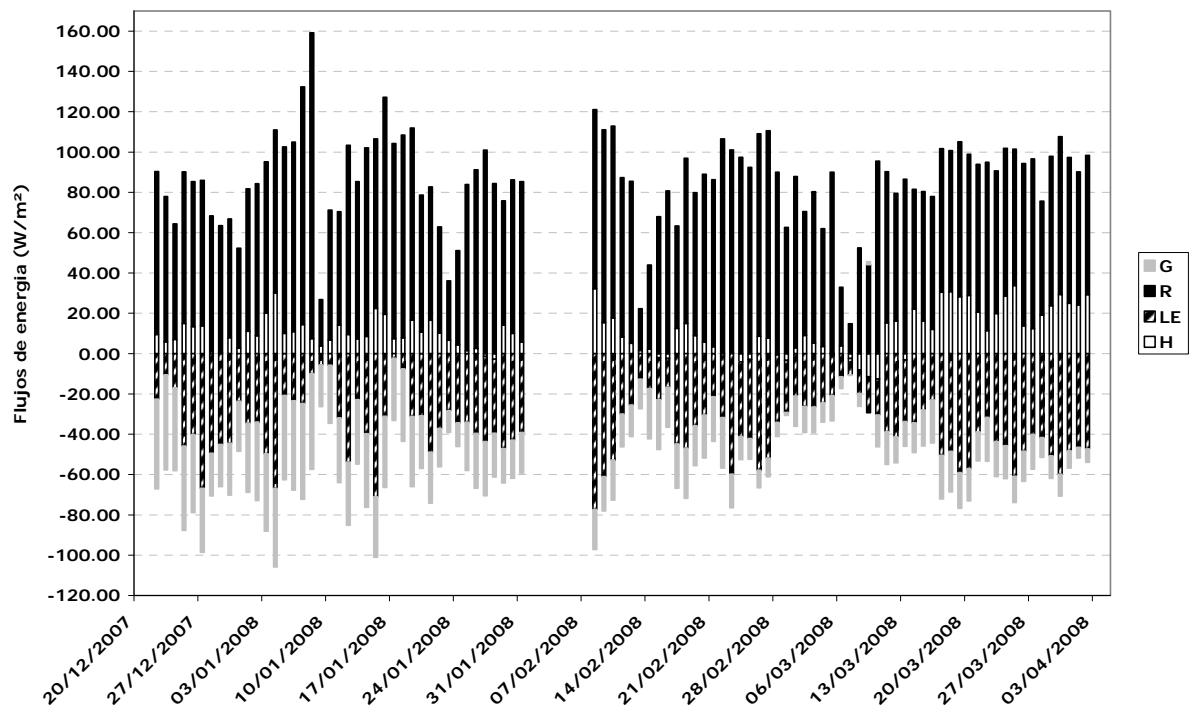


Figura 14: Promedios diarios de los diferentes términos de flujos de energía (Wm^{-2}) determinando el balance de energía para el sitio de la EM de Guanaco.

Para el glaciar Guanaco, la radiación R aporte la mayor parte de energía a la superficie del glaciar. Esta radiación es principalmente regida por la radiación de ondas cortas como lo muestran las Figura 15. La radiación neta es fuertemente anti-correlacionada con el albedo: los días durante los cuales el albedo estuvo fuerte corresponden a los días durante los cuales la radiación neta disminuyó. El albedo, de esta forma es responsable de la disponibilidad de la mayor cantidad de energía a la superficie de los glaciares (por lo menos, alrededor de la EM).

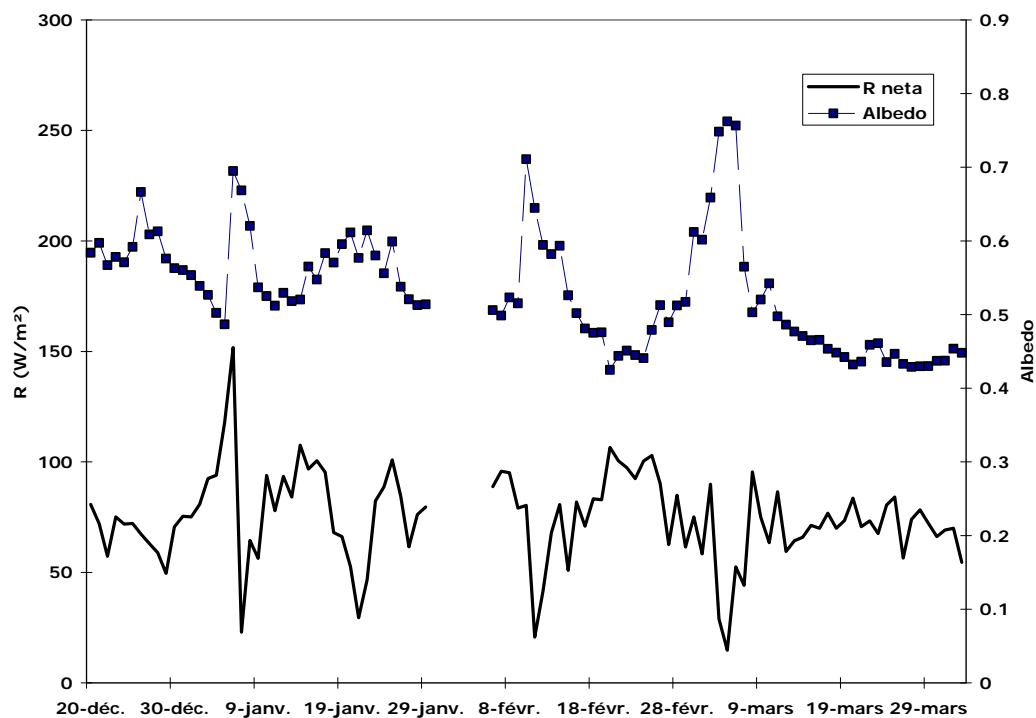


Figura 15: Promedios diarios de la radiación neta y del albedo (promedio entre las 8 y las 18h) medidos por la EM de Guanaco.

La Tabla 11 presenta los promedios mensuales de pérdida de masa durante el periodo de medición del verano 2007-2008. La Tabla 12 da los mismos resultados en pérdida de masa por día. Para el glaciar Guanaco, los procesos de fusión controlan la ablación total (87,33%). Sin embargo, el modelo sigue en desarrollo, y hay que considerar estos resultados como preliminares y no definitivos.

Guanaco			
	Sublimación	Fusión	Ablación total
20-31 Diciembre 2007	13.2	20.5	33.7
Enero 2008	29.2	221.3	250.5
06-29 Febrero 2008	26.5	204.0	230.5
Marzo 2008	35.0	263.7	298.7
Total sobre el periodo de medición	105.6 12.7%	729.0 87.3%	834.7 100%

Tabla 11: Promedios mensuales de pérdida de masa en milímetros equivalente de agua (mm eq.a.).

Guanaco			
	Sublimación	Fusión	Ablación total
20-31 Diciembre 2007	0.1	0.2	0.4
Enero 2008	0.3	2.3	2.6
06-29 Febrero 2008	0.3	2.1	2.4
Marzo 2008	0.4	2.7	3.1
Total sobre el periodo de medición	1.1	7.4	8.5

Tabla 12: Promedios mensuales de pérdida de masa en milímetros equivalente de agua por día (mm eq.a/día.).

Para los periodos de medición, este cálculo a partir de las mediciones locales de las EM da una pérdida de masa por metro cuadrado de **834.7** mm a. eq. para el glaciar Guanaco. Este valor está sobre estimado con respecto a los valores de ablación medidas durante el verano 2007-2008 (ver sección 4).

Si consideramos los valores de ablación para las estacas cercanas a la estación meteorológica, es decir, de las estacas 4G-2 y 6G-2 (ver figura 5), la medición de ablación da una pérdida de masa de 510 mm a. eq. para glaciar Guanaco. La versión definitiva del modelo de balance de energía nos permitirá de discutir y concluir sobre las diferencias entre medición y modelación.

7.1.- Balance combinado de glaciar Guanaco

El balance combinado de un glaciar corresponde a la comparación de los balances de hielo (normalmente descrito como balance de masa), de energía (calórico), e hídrico. El balance combinado de un glaciar realizado sobre el ciclo anual, permitirá estimar las variaciones de masa y explicitar éstas en términos de flujos de energía. Las mediciones permitirán ofrecer información intra-anual, tal como la ganancia de masa durante el invierno y la pérdida de la misma durante el verano. Sin embargo, en esta etapa, con el fin de calcular el balance combinado se necesita más datos. En concreto es necesario (1) Aumentar la disponibilidad de los datos de escorrentía glaciar; (2) Realizar estudios más completos de validación del modelo de la balance de energía utilizada; (3) Extrapolar el modelo de balance de energía a la escala de un glaciar y la sub-cuenca (4) Formular un modelo de acumulación de nieve a la escala del glaciar y la sub-cuenca.

Referencias

F. Obleitner y J. de Wolde (1999), One intercomparison of instruments used within the Vatnajökull glacio-meteorological experiment, *Boundary Layer Meteorol.*, **92**, 27-37.