



INFORME

MONITOREO DE TEMPERATURA DEL GLACIAR GUANACO EN EL ÁREA PASCUA LAMA

Preparado para:
Barrick Exploraciones Argentina S. A.
Francisco Villagra 531 Este, Rawson CP (5402)
San Juan
Argentina

DISTRIBUCIÓN DIGITAL:

Barrick Exploraciones Argentina S. A.

Golder Associates S. A.

Octubre, 2009

079 215 5019-IT 006

TABLA DE CONTENIDOS

<u>SECCIÓN</u>	<u>PÁGINA</u>
1.0 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura	4
2.0 MONITOREO DE TEMPERATURA DEL GLACIAR GUANACO	6
2.1 Descripción General del Glaciar Guanaco	6
2.2 Equipos de Monitoreo.....	6
2.3 Calibración y Ajuste de los Equipos	7
2.4 Instalación de Equipos	8
2.5 Limitaciones de la Instalación.....	9
2.6 Adquisición de Datos	9
3.0 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL GLACIAR GUANACO	10
3.1 Procesamiento de Datos	10
3.2 Comparación de Temperatura Ambiente del Glaciar Guanaco.....	10
3.3 Evolución Térmica del Glaciar Guanaco en el Tiempo	11
3.4 Evolución Térmica del Glaciar Guanaco con la Profundidad	12
4.0 CONCLUSIONES.....	15
5.0 RECOMENDACIONES	16
6.0 REFERENCIAS.....	17

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1 Información de los Termistores Instalados en el Glaciar Guanaco
Tabla 3.1 Variación Mensual de la Temperatura con respecto a la Profundidad al Interior del Glaciar Guanaco

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Ubicación del Área del Proyecto Binacional Pascua Lama
Figura 1.2 Ubicación de Termistores en el Glaciar Guanaco
Figura 1.3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura
Figura 3.1 Relación entre la Temperatura Superficial del Glaciar Guanaco y la Temperatura Ambiental
Figura 3.2 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Guanaco
Figura 3.3 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Guanaco

LISTA DE APÉNDICES

- Apéndice I Fotografías de la Instalación de los Termistores en el Glaciar Guanaco
Apéndice II Registro Original de Datos de Temperatura en el Glaciar Guanaco (Digital)
Apéndice III Registro de Datos de Temperatura Utilizados en el Análisis del Glaciar Guanaco (Digital)

1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Este informe presenta los datos de temperatura del glaciar Guanaco, el cual está ubicado en el área del proyecto binacional Pascua Lama, en la frontera entre Chile y Argentina (Figura 1.1). Así también, se entrega una caracterización de este cuerpo desde el punto de vista térmico.

Este trabajo está basado en los datos de temperaturas provenientes de la red de monitoreo, obtenida a través de la instalación de termistores, que Barrick Exploraciones Argentina S.A. (BEASA) tiene operativos en este cuerpo de hielo a partir del mes de abril de 2006.

La ubicación del glaciar Guanaco se presenta en la Figura 1.2.

En este documento y en términos simples, se considera como “glaciar” a aquellos extensos cuerpos conformados principalmente por capas de hielo, los cuales se deforman y se mueven lentamente como respuesta a la gravedad.

La información utilizada en este estudio corresponde a aquellos datos de temperaturas medidos por los termistores instalados en este cuerpo de hielo y que corresponden al periodo de lecturas comprendido entre el 29 de abril de 2006 y el 02 de mayo de 2007.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el conocer la dinámica térmica del glaciar Guanaco y así obtener un mejor entendimiento de su comportamiento. Para ello se plantean como objetivos parciales, el determinar las variaciones de temperatura con los cambios estacionales; las variaciones de temperatura en función de la profundidad; y en lo posible clasificarlo en relación al patrón de temperatura que se desarrolla en su superficie y en su base.

Figura 1.1 Ubicación del Área del Proyecto Binacional Pascua Lama

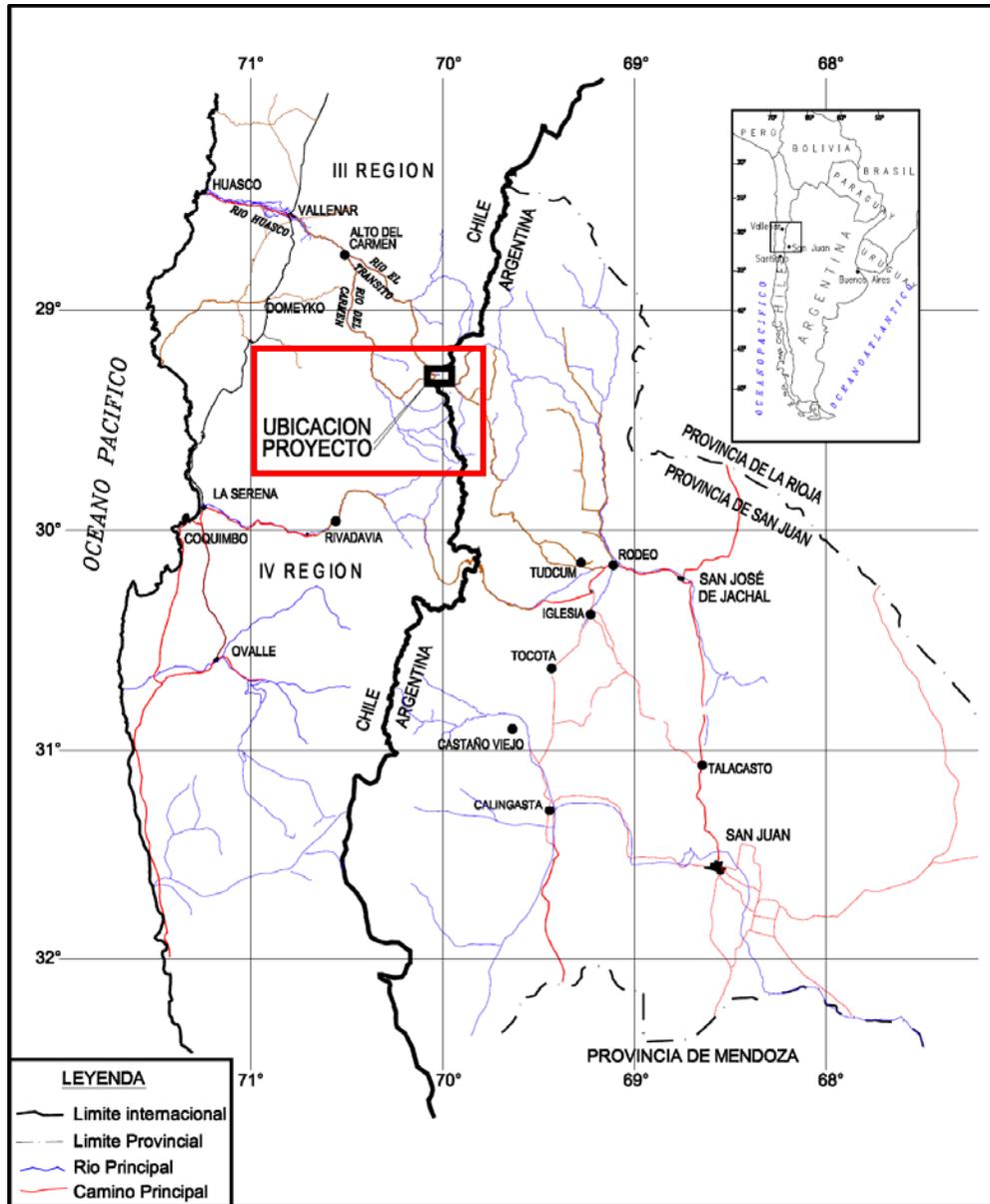
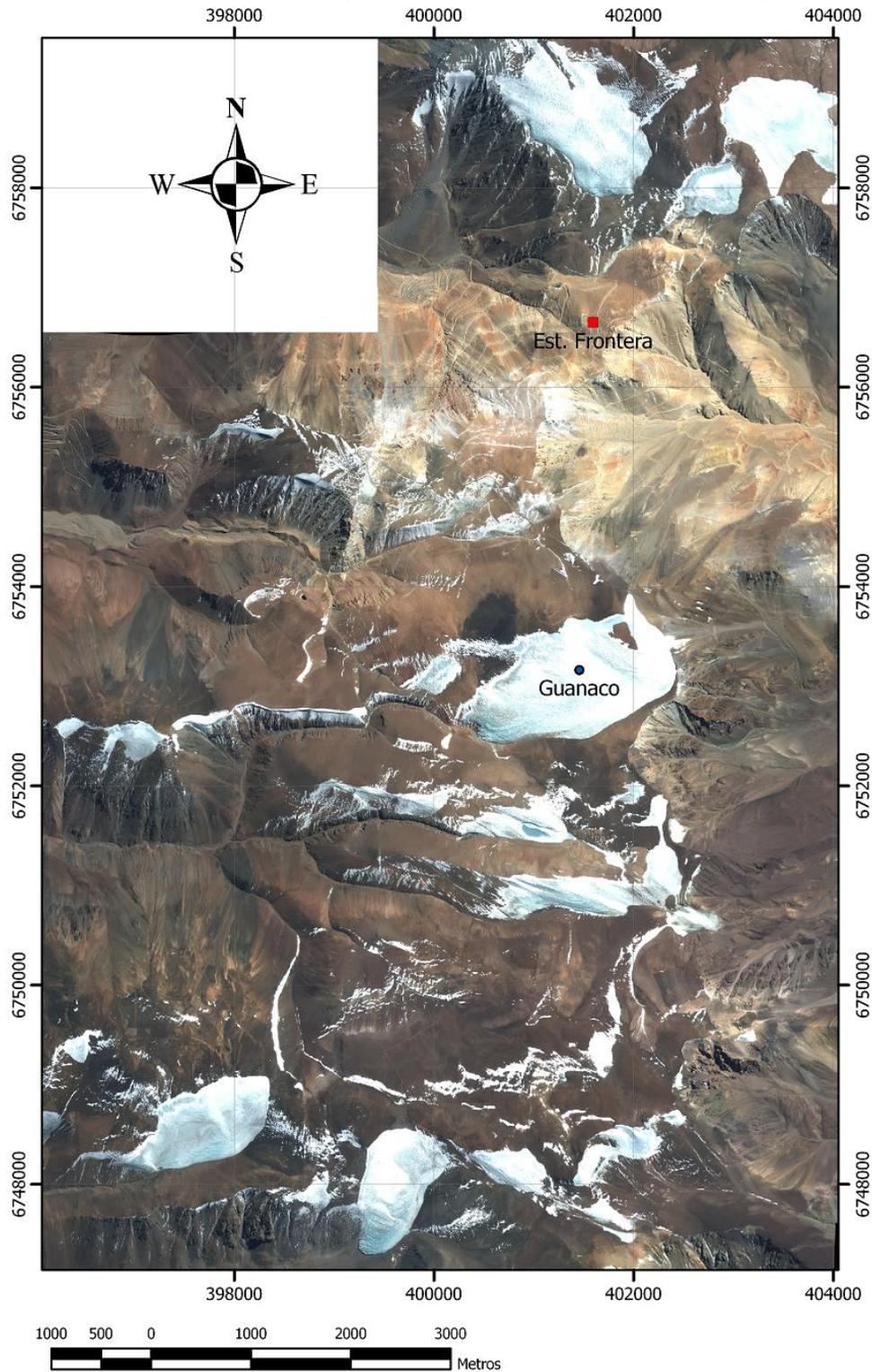


Figura 1.2 **Ubicación de Termistores en el Glaciar Guanaco**
(Círculo azul: Termistores en el glaciar Guanaco; Cuadrado rojo: Estación Meteorológica Frontera)



Fuente: Imagen satelital IKONOS UTM WGS 84 2008 proporcionada por BEASA

1.3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura

La temperatura de un glaciar es un factor fundamental a considerar para el estudio de las tasas de fusión, erosión y depositación, por estar directamente relacionadas a las características termales del glaciar, especialmente en su base.

Existen diferentes definiciones para la clasificación de glaciares con respecto a su temperatura. Para el propósito de este informe, se decidió utilizar la definición presentada por Cogley (2005), dependiendo de si los glaciares están en o bajo de su punto de congelación T_f . De esta forma, fueron establecidas las siguientes tres categorías:

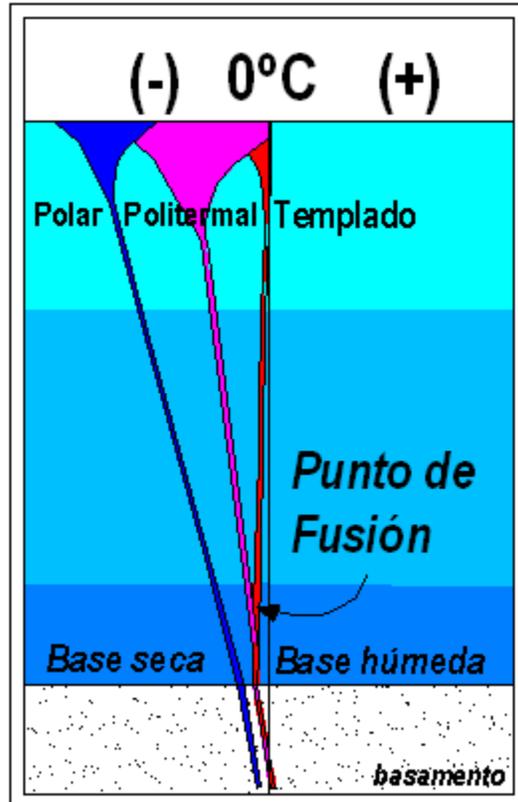
- Glaciar Polar o Frío: son aquellos en los que la temperatura T está por debajo de T_f excepto posiblemente en una capa superficial, hasta 10-15m de espesor, durante el verano.
- Glaciar Templado: son aquellos en que todo el cuerpo de hielo posee $T = T_f$, excepto en la capa superficial durante el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

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

La temperatura del punto de congelación en ausencia de impurezas disminuye desde 0°C en la superficie a una tasa de $0,67^\circ\text{C}/\text{km}$.

La clasificación anterior es presentada en la Figura 1.3 de la siguiente página.

Figura 1.3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura



Fuente: Modificado de Locke (1999)

2.0 MONITOREO DE TEMPERATURA DEL GLACIAR GUANACO

En esta sección se presenta una descripción general de las actividades realizadas para el desarrollo del monitoreo de la temperatura del glaciar Guanaco. Los principales contenidos incluidos en este capítulo son los siguientes:

- Descripción general del glaciar Guanaco;
- Equipos de monitoreo;
- Calibración y ajuste de los equipos de medición; y
- Limitaciones de la instalación

2.1 Descripción General del Glaciar Guanaco

La descripción del glaciar Guanaco se basa en diversos estudios previos y en campañas de terreno destinadas a determinar la profundidad o espesor del cuerpo de hielo. La profundidad reportada corresponde a la máxima observada en los perfiles GPR (*ground penetrating radar*) y está referida a mediciones verticales desde la superficie del cuerpo de hielo (ver Tabla 2.1). Este espesor fue utilizado como referencia para la perforación con taladro de vapor Huecke y posterior instalación de termistores.

En general, el glaciar Guanaco posee una amplia superficie plana (Fotografía 1, Apéndice I), con penitentes pequeños, de alturas inferiores a 0,5m y terrazas de hielo re-congelado. Las mediciones GPR muestran una profundidad o espesor aproximado de 100 metros medidos en la estaca 4G-3.

2.2 Equipos de Monitoreo

La instrumentación utilizada consistió en cables con 4 termistores con cubierta protectora, conectados a un *datalogger* descargable con capacidad para almacenar hasta un año de mediciones. Los cables con los termistores se congelan dentro del glaciar, mientras el datalogger permanece en la superficie donde se graba la temperatura, en este caso, a intervalos de una hora. Los instrumentos utilizados fueron suministrados por Onset Systems, los que han probado ser de una calidad adecuada a un costo razonablemente bajo.

La instrumentalización utilizada en el monitoreo del glaciar Guanaco se detalla a continuación.

- Data Logger HOBO® U12 4 de canal externo Outdoor/Industrial, con cubierta protectora. El *datalogger* es descargable a través de una comunicación por puerto USB conectada a un computador portátil, con una capacidad de memoria para 43.000 mediciones y un rango operativo nominal de: -20°C a 70°C (-4°F a 158°F).
- Cuatro sensores termistores a prueba de agua (TMCx-HD) conectados a un canal separado, de acuerdo a las especificaciones técnicas, con cables sensores con las siguientes longitudes: 1,83m, 6,10m y 15,24m.

El *datalogger* fue preparado con baterías y desecante nuevos antes de su instalación en terreno. La programación del *datalogger* fue realizada utilizando la aplicación del software Hoboware, antes de cada instalación para captura de datos y utilizando la hora estándar local.

2.3 Calibración y Ajuste de los Equipos

La temperatura de la subsuperficie fue sistemáticamente obtenida mediante la instalación de termistores y a través del monitoreo de la resistencia de éstos a través del tiempo.

Los termistores modernos son fabricados para que sean no sólo lineales (resistencia versus temperatura) sino para que además tengan una curva de calibración consistente para un modelo de termistor dado. No obstante, esta calibración es fácilmente comprobable utilizando un medio a temperatura constante para comprobar exactitud, o una prueba colectiva con un rango de temperaturas para comprobar precisión. Para este estudio, pruebas de calibración de termistores fueron llevadas a cabo por personal de Golder en Santiago entre el 7 y el 10 de Abril de 2006 utilizando los siguientes equipos:

- Ocho Dataloggers U12.
- Cables sensores de termistores: ocho de 1,83m, ocho de 15,24m y dieciséis de 6,10m.

Cada uno de los 32 cables fue conectado a los *dataloggers* y recopilaron datos de manera continua por 50 horas, a intervalos de lectura de 30 minutos, en ambientes termales entre +30°C y -18°C. Cada termistor fue periódicamente controlado con un termómetro patrón de mercurio. Las diferencias máximas entre los termistores y el termómetro de mercurio fueron del orden de 1,5°C a 2°C. Una mejor concordancia fue observada cuando la temperatura fue cercana a 0°C, con precisiones dentro de los 0,25°C.

Previo a la instalación en el glaciar Guanaco, en el campamento Barriales del proyecto Pascua Lama, cada *datalogger* fue conectado a los cables del termistor y probado nuevamente para comprobar su correcto funcionamiento. La programación final fue realizada en el campamento, estableciendo que la temperatura de cada termistor fuera grabada cada hora.

2.4 Instalación de Equipos

Para la instalación de los termistores se contempló cumplir con el método estándar establecido en la publicación Handbook on Periglacial Field Methods (2004) por la International Permafrost Association (IPA).

Para la instalación de los termistores se perforaron sondajes verticales con un taladro de vapor Huecke perteneciente a Barrick Exploraciones Argentina S.A. (BEASA), a profundidades de hasta 15 metros. Una vez que se decidió el espaciamiento óptimo de los termistores, sus cables fueron conjuntamente asegurados *in situ*, siendo unidos a una tubería de PVC de 1,5" de diámetro para proporcionar el soporte estructural a lo largo de la perforación y para prevenir el aplastamiento o atrapamiento de ellos.

Para la confección de la base de datos se estableció, como convención, que el Canal 1 siempre estuviese conectado al termistor más superficial y el Canal 4 al termistor más cercano al fondo de la perforación. Los Canales 2 y 3 se ubicaron a profundidades intermedias, típicamente alrededor de los 2m y 5m respecto de la superficie del hielo, respectivamente.

Los *datalogger* fueron unidos a estacas, aproximadamente de 1m de altura por sobre la superficie del hielo, y luego cubiertos con bolsas plásticas para permitir una recuperación más fácil en la época primaveral. Los cables de los termistores también fueron asegurados apropiadamente para prevenir que éstos fuesen afectados por el viento.

Una vez que todas las instalaciones fueron completadas y antes de abandonar el terreno, se descargaron los datos de los *dataloggers* para asegurar su adecuado funcionamiento.

Las descargas durante el periodo de monitoreo fueron realizadas entre 1 y 10 meses, siendo necesario el reemplazo de las baterías cada 2 a 6 meses.

La Tabla 2.1 muestra la ubicación, información instrumental y profundidades de los termistores instalados en el glaciar Guanaco, mientras que en la Figura 1.2 se presenta gráficamente la ubicación de éstos. En el Apéndice I se incluyen las fotografías ilustrativas referentes a la instalación de los termistores dentro del glaciar Guanaco .

Tabla 2.1 Información de los Termistores Instalados en el Glaciar Guanaco

Estaca ID GOLDER 2006	Estaca ID CEAZA 2008	Coordenadas aproximadas de Pozos con Termistores			Espesor (m)	Número Serial Datalogger	Fecha de Instalación	Profundidades de Instalación (m)				Altura Datalogger sobre la Superficie (m)
		Este (m)	Norte (m)	Elevación (m s.n.m.)				Canales/Termistores				
								1	2	3	4	
4G-3	6G-3	401.455	6.753.159	5.220	100	949206	29-04-2006	0,1	2,0	5,0	14,0	0,8

Coordenadas UTM WGS84

2.5 Limitaciones de la Instalación

Durante las actividades de perforación se encontraron las siguientes limitaciones:

- La profundidad máxima que se pudo obtener fue de 15m con el sistema Huecke.
- Las profundidades señaladas en la Tabla 2.1 son referentes a las obtenidas en la instalación de los termistores. Con la ablación y la depositación de nieve, la distancia (profundidad) obviamente varía, pero para propósitos de este estudio, estos valores no fueron ajustados.

2.6 Adquisición de Datos

La descarga de los datos se realizó principalmente entre abril de 2006 y mayo de 2007, de acuerdo a la metodología anteriormente descrita.

3.0 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL GLACIAR GUANACO

3.1 Procesamiento de Datos

Con el objetivo de proporcionar una interpretación de las variaciones de las temperaturas que se registraron en el período de tiempo definido y a diferentes profundidades del glaciar Guanaco, Golder utilizó la base de datos proporcionada por Beasa (Apéndice II) y en base a ésta, sólo se consideraron aquellos datos que fueron estimados correctos desde el punto de vista del correcto funcionamiento de los termistores; para la interpretación se descartaron todos los valores de temperatura con mediciones erráticas y aquellos con valores de temperaturas que se encontraron fuera del rango de detección del instrumental, es decir, temperaturas inferiores a -20°C y superiores a $+30^{\circ}\text{C}$. En la mayoría de los casos, estos registros erróneos se produjeron por el agotamiento de las baterías de los equipos.

Es de importancia mencionar que si bien existen algunos intervalos específicos de tiempo que son descartados por las razones explicadas, en términos generales, las mediciones de temperatura son de largo plazo y pueden ser válidamente utilizadas para indicar tendencias de la condición termal del hielo.

3.2 Comparación de Temperatura Ambiente del Glaciar Guanaco

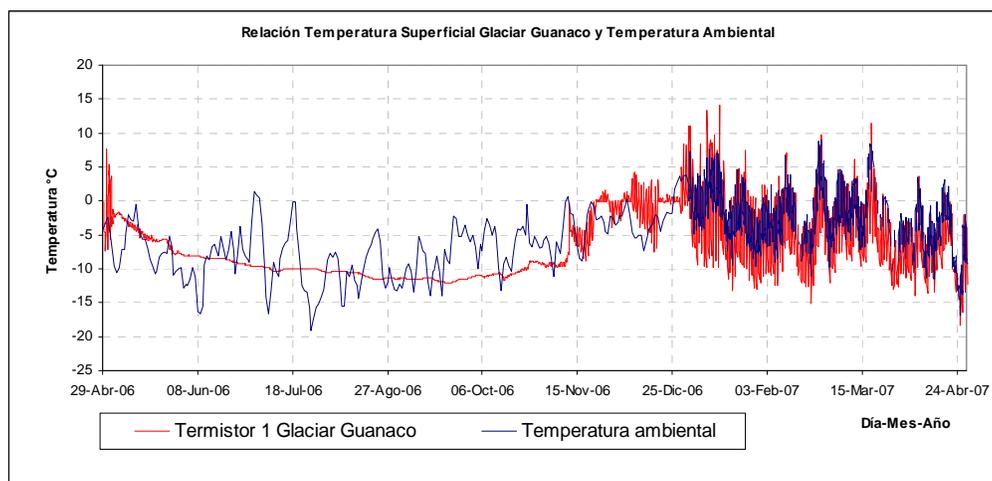
Para observar las posibles interacciones térmicas entre la superficie de los cuerpos de hielo y la atmósfera, se realizó una comparación entre la temperatura del termistor más somero del cuerpo de hielo (instalado a 0,1 m de profundidad en el hielo) y la temperatura ambiente medida en la estación meteorológica Frontera. La ubicación de esta estación se presenta en la Figura 1.2 y la comparación de ambas temperaturas, en la Figura 3.1.

Para efectos de este análisis se incorporó la serie de datos correspondiente al termistor somero, que por razones climáticas, se consideró como medida fuera del hielo. El registro en la estación Frontera posee mayor frecuencia de medición a partir de enero de 2007.

De la Figura 3.1 es posible observar que el termistor somero instalado en el glaciar Guanaco se mantuvo ubicado en el cuerpo de hielo entre inicio de mayo e inicio noviembre de 2006. Esta situación se desprende del hecho que el registro térmico, durante este periodo, presenta una muy baja oscilación térmica, es decir, las temperaturas se mantienen mayormente constantes en comparación con el patrón de alta oscilación térmica que presenta la estación Frontera. De todas formas se puede observar que durante este periodo la tendencia general de la temperatura del termistor es similar a la temperatura media ambiental medida en la estación Frontera.

El patrón térmico del termistor somero del glaciar Guanaco para el periodo de noviembre 2006 a abril 2007 (Figura 3.1), es similar y se correlaciona bastante bien con el patrón térmico de los datos de la estación Frontera. Esta situación indicaría que el termistor a partir de esa fecha no permaneció en la ubicación en que fue instalado, quedando expuesto a la superficie y registrando las oscilaciones propias del ambiente.

Figura 3.1 Relación entre la Temperatura Superficial del Glaciar Guanaco y la Temperatura Ambiental

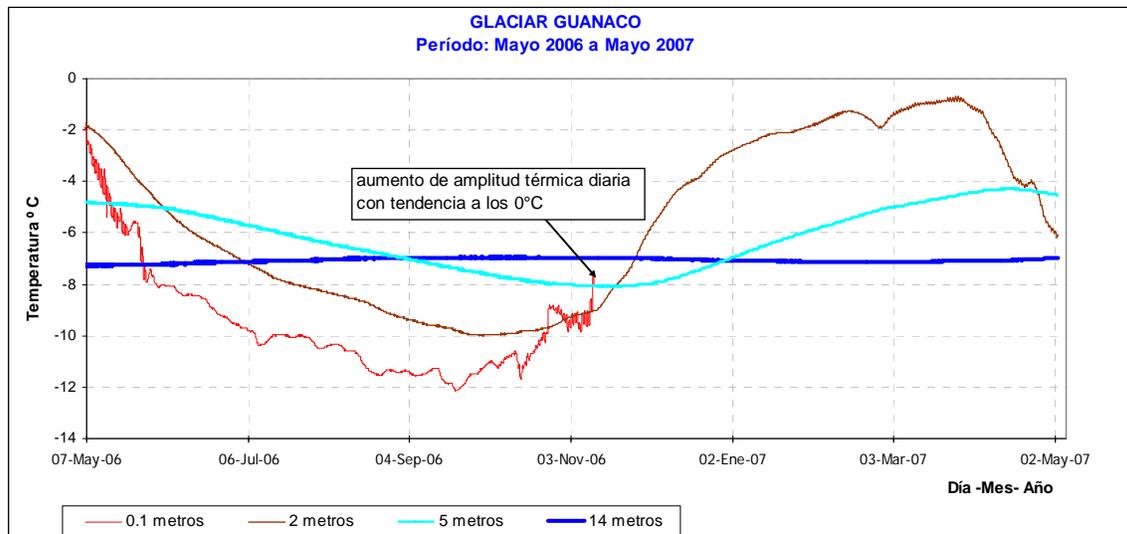


3.3 Evolución Térmica del Glaciar Guanaco en el Tiempo

La Figura 3.2 presenta los registros de temperaturas que fueron medidos a distintas profundidades en el glaciar Guanaco, en el periodo comprendido entre mayo de 2006 y mayo de 2007. Esta figura fue producida de acuerdo a los criterios descritos de selección de datos representativos para la interpretación de la información. Es importante mencionar que para este análisis no se incorporaron aquellos datos del termistor somero que se consideraron medidos fuera del hielo.

Los termistores fueron instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 14,0 metros de profundidad. En general, es posible observar que el termistor más profundo prácticamente no muestra variaciones significativas de temperatura, en tanto que los tres termistores restantes y más superficiales muestran tendencias de variación (ascensos y descensos) similares entre ellos y en concordancia con su relación térmica ambiental en función de su ubicación.

Figura 3.2 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Guanaco



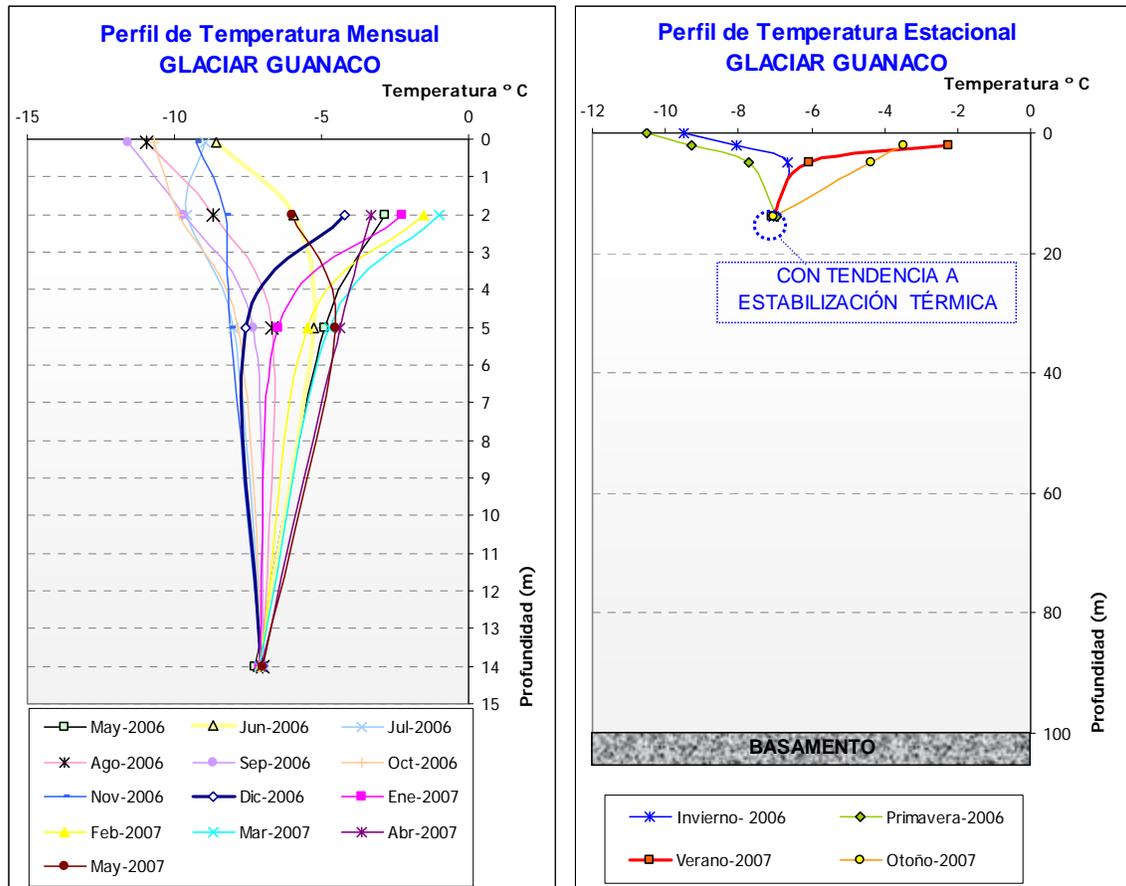
3.4 Evolución Térmica del Glaciar Guanaco con la Profundidad

En esta sección se presenta el resultado del monitoreo térmico efectuado al interior del glaciar Guanaco, de manera tal de establecer patrones de comportamiento con la profundidad, tendencias a la estabilización de temperaturas y eventuales gradientes termales.

Para este análisis se graficó la temperatura promedio mensual y estacional para las profundidades monitoreadas del glaciar Guanaco (ver Figura 3.3; gráficos a y b).

A modo de establecer una relación espacial entre el espesor del cuerpo monitoreado y el espesor total del cuerpo, en la Figura 3.3 se indica también la ubicación del basamento o sustrato sobre el cual descansa el cuerpo de hielo. La profundidad aproximada de este basamento se determinó en base a GPR tal cual se muestra en la Tabla 2.1.

Figura 3.3 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Guanaco



En la Tabla 3.1 se resumen los datos máximos y mínimos de temperaturas para la capa superficial y para la capa más profunda.

Tabla 3.1 Variación Mensual de la Temperatura con respecto a la Profundidad al Interior del Glaciar Guanaco

Cuerpo de Hielo		Elevación (m s.n.m.)	Termistor Superficial			Termistor Profundo		
			Prof. Termistor (mbs)	Temp. Máx Mensual (°C)	Temp. Min Mensual (°C)	Prof. Term (mbs)	Temp. Máx Mensual (°C)	Temp. Min Mensual (°C)
Glaciar	Guanaco	5.220	0,10	-8,59	-11,59	14,00	-6,96	-7,25

De la Figura 3.3 y la Tabla 3.1 se observa lo siguiente:

- Para profundidades menores o iguales a 14 metros no hay una única tendencia de aumento o disminución de la temperatura con la profundidad, puesto que los datos están influenciados por los cambios estacionales. Dado que los perfiles de temperatura presentados sólo representan el comportamiento en las capas altas de los cuerpos, tal como se muestra en las Figuras 1.3 y 3.3(b), no es posible predecir la tendencia de la temperatura con la profundidad.
- Se observa que las temperaturas más bajas se presentan en primavera e invierno (septiembre), aumentando levemente hacia el otoño y alcanzando el máximo en el verano (febrero - marzo). Esto es especialmente aplicable a los tres termistores más superficiales.
- La zona más superficial del cuerpo analizado presenta una tendencia a aumentar su temperatura, por sobre el punto de fusión, en ciertos periodos de verano. Esta situación correspondería a la interacción entre esta capa superficial y la atmósfera, dónde se observa un aumento de la temperatura ambiente en verano.
- Para la masa global del cuerpo de hielo, las temperaturas son muy inferiores a la temperatura del punto de congelación, por lo cual el glaciar Guanaco podría ser clasificado como Polar o Politermal, es decir, no correspondería al tipo Templado.
- Se observa además que la tendencia de la temperatura para profundidades mayores a 14 metros tiende a mantenerse estable para todas las estaciones (y muy inferior a la temperatura del punto de congelación). A pesar de esto, no es posible definir con certeza un gradiente termal que permita extrapolar los datos hacia mayores profundidades, es decir, no es posible, con la información disponible, indicar la temperatura que alcanzaría el hielo en contacto con el basamento.

4.0 CONCLUSIONES

- En relación a las variaciones de temperatura del glaciar Guanaco con respecto a la profundidad, en términos generales y de acuerdo a la cantidad y calidad de los datos analizados, se puede concluir que con la información disponible se representa en forma bastante satisfactoria sólo el comportamiento de las capas superiores de este cuerpo de hielo.
- Del mismo modo, se concluye que el comportamiento termal del hielo en superficie está influenciado por los cambios estacionales, es decir, para la mayoría de los casos analizados, las temperaturas al interior de los cuerpos de hielo aumentan hacia el verano y disminuyen hacia el invierno, a lo menos, hasta su punto de convergencia o estabilización, el que estaría ubicado preliminarmente alrededor de los 14 metros de profundidad.
- Dado que las temperaturas medidas en profundidad son muy inferiores al punto de congelación, es posible clasificar el glaciar Guanaco como Polar o Politermal.
- Si bien se puede concluir que en algunos casos las temperaturas tienden hacia una muy baja variación con el aumento de la profundidad, se concluye que mediante los datos disponibles no es posible definir un gradiente termal que permita extrapolar los datos a profundidades mayores.

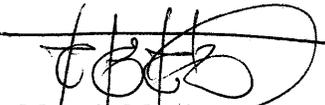
5.0 RECOMENDACIONES

- Considerando que el glaciar Guanaco permite caracterizar una temperatura relativamente homogénea a partir de los 14 metros de profundidad, se recomienda en futuras investigaciones, la instalación de termistores a partir de dicha profundidad e idealmente, intentar llegar hasta la base del glaciar. Esto requerirá del desarrollo de una metodología de instalación alternativa y posiblemente de equipos adicionales o especiales.
- Con respecto al programa de monitoreo, se recomienda modificar la frecuencia en la obtención de datos a intervalos más espaciados que los hasta ahora empleados, con el objeto de contar con bases de datos que sean igualmente representativas de las temperaturas pero más fáciles de manejar por tener registros más cortos.
- Finalmente, también se sugiere la elaboración de un modelo que permita predecir el gradiente termal entre los datos medidos y la base del cuerpo de hielo.

6.0 REFERENCIAS

- Barrick. (2008). Plan de Monitoreo de Glaciares Pascua Lama, Enero de 2008.
- BGC Engineering Inc. (2008). Review of Pascua Lama Geothermal Monitoring Data. Memorandum.
- Cogley (2005). Mass and Energy Balances of Glaciers and Ice Sheets. Encyclopedia of Hydrological Sciences
- A Handbook on Periglacial Field Methods. (2004). The Working Group on Periglacial Processes and Environments, Co-chairs: Ole Humlum and Norikazu Matsuoka. The University Centre in Svalbard, Noruega.
- Locke, W. (1999). <http://www.homepage.montana.edu/~geol445/hyperglac/morphology1>.
- Paterson, W. (1994). The Physics of Glaciers. 3rd. ed. Pergamon Press, Oxford,UK, 480 p.
- Payne, T. (1995). Limit Cycles in the Basal Thermal Regime of Ice Sheets. Journal of Geophysical Research 100B3: 4249-4263.

GOLDER ASSOCIATES S. A.



Marcelo Martínez
Office Manager
Golder Associates Argentina S.A.



David Maarse
P. Eng.
Asociado

APÉNDICES

APÉNDICE I

FOTOGRAFÍAS DE LA INSTALACIÓN DE LOS TERMISTORES EN EL GLACIAR GUANACO

Foto 1: Instalación de Termistores – Glaciar Guanaco, Abril 2006



Foto 2: Instalación de Termistores – Glaciar Guanaco, Abril 2006



APÉNDICE II

REGISTRO ORIGINAL DE DATOS DE TEMPERATURA EN EL GLACIAR GUANACO (DIGITAL)

APÉNDICE III

REGISTRO DE DATOS DE TEMPERATURA UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DEL GLACIAR GUANACO (DIGITAL)