

EVIDENCIAS DE *PERMAFROST* EN EL EXTREMO SUR DE LOS ANDES (TIERRA DEL FUEGO) SEGÚN EL RÉGIMEN TÉRMICO DE LOS GLACIARES ROCOSOS DEL CERRO KRUND

Javier SANTOS GONZÁLEZ, Rosa Blanca GONZÁLEZ GUTIÉRREZ,
Amelia GÓMEZ VILLAR y José María REDONDO VEGA

Universidad de León

Resumen

Se presentan, por primera vez en Tierra del Fuego, los datos de temperatura del suelo y del aire de dos glaciares rocosos en el circo del Cerro Krund, en extremo sur de los Andes, a altitudes comprendidas entre 750 y 885 m durante los años 2009 y 2010. Los datos obtenidos, junto a las observaciones realizadas en la zona y la dinámica observada entre 2004 y 2010 evidencian que el más elevado es un glaciar rocoso activo, lo cual confirma la presencia de *permafrost*, para este sector de la Sierra de Alvear por encima de los 850 metros. Por debajo de esa cota, en la que se localiza el otro glaciar rocoso, no hay evidencias de *permafrost*, por lo cual lo consideramos relicto.

Palabras clave: *Permafrost*, régimen térmico, glaciares rocosos, Tierra del Fuego.

Abstract

We present air and ground thermal temperature data of some places located between 750 and 885 m.a.s.l. around two rock glaciers in the Cerro Krund cirque (Tierra del Fuego, Argentina) at altitudes between 750 and 885 m during the years 2009 and 2010. The data obtained, together with geomorphological observations and the dynamics observed between 2004 and 2010 show that the highest is an active rock glacier, which confirms the presence of *permafrost* for this sector of the Sierra de Alvear above 850 meters. Bellow this altitude, in the lower rock glacier, we could not find any *permafrost* evidences.

Keywords: *Permafrost*, thermal regime, rock glaciers, Tierra del Fuego.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de suelos permanentemente helados, *permafrost*, indica unos caracteres ambientales propios de los dominios periglaciares del planeta. Aunque generalmente se asocia a la existencia de hielo en profundidad, el *permafrost* se define como aquel sustrato (puede ser suelo, formación superficial o roca) que permanece a 0 °C, o por debajo de 0 °C, durante al menos dos años consecutivos (VAN EVERDINGUEN, 2005). Se trata, por tanto, de un estado térmico. En la actualidad se restringe, o bien a las altas latitudes, o bien a determinados ambientes de montaña (FRENCH, 2007). En estos últimos, su distribución está muy condicionada por la altitud, pero también por otros factores, como la pendiente, el tipo de sustrato, la cubierta nival o la orientación. A menudo, en las zonas de montaña se presenta a partir de una determinada cota altitudinal, primero de manera esporádica y sólo en ambientes con condiciones locales favorables, y progresivamente de forma más continua según se gana en altitud y las temperaturas medias son más bajas.

Su elevada fragilidad intrínseca, especialmente en aquellas zonas donde aparece de manera esporádica, como es su límite altitudinal inferior, lo hace especialmente valioso como indicador de fenómenos globales como el calentamiento, cuando desaparece de un enclave montañoso; o el enfriamiento, si aumenta el porcentaje de suelo subyacente permanentemente helado. Esos cambios, además, tienen trascendencia geomorfológica porque la dinámica periglacial propia de los suelos helados sucede frecuentemente, en el tiempo y en el espacio, a las formas glaciares cuando desaparecen los hielos.

En Sudamérica, el *permafrost* está extendido por buena parte de la Cordillera de los Andes, a altitudes más bajas cuanto más al S (CORTE, 1997), describiéndose recientemente en Patagonia formas y procesos ligados a la presencia de suelos permanentemente helados que indican dinámicas geomorfológicas tanto actuales como subactuales (TROMBOTTO, 2008). En Tierra del Fuego su estudio es aún incipiente. Así, aunque existe alguna escueta referencia sobre la presencia de suelos helados permanentes (VALCÁRCEL DÍAZ *et al.*, 2008), no se han realizado estudios detallados sobre su distribución.

La aparición de *permafrost* es condición indispensable (junto con otras como un abundante suministro de material procedente casi siempre de las paredes del circo) para el desarrollo de glaciares rocosos (BARSCH, 1996). Por eso, la existencia de este tipo de formas periglaciares, y su grado de conservación, no sólo demuestra si hay suelos helados o no, sino la condición de estos, su persistencia o su distribución altitudinal. Además, su naturaleza frágil e inestable los hace especialmente interesantes como indicadores del calentamiento global.

En los Andes Fueguinos existen varios glaciares rocosos presumiblemente activos, pero no se ha abordado en detalle el estudio de los mismos. En el año

2004 se describe uno de ellos, situado en la Sierra de Alvear, al pie del Cerro Krund (REDONDO VEGA, 2004). Aunque en ese momento no se disponían de datos térmicos de su interior para demostrar la existencia de suelos helados, la morfología del glaciar rocoso, con surcos y crestas transversales de manera arqueada en planta, la presencia de grietas en cizalla, profundas, sobre la pista de acceso y en sus flancos, y la aparición de otras formas funcionales de origen periglacial en su entorno, llevaron a este autor a interpretar que era un cuerpo activo.

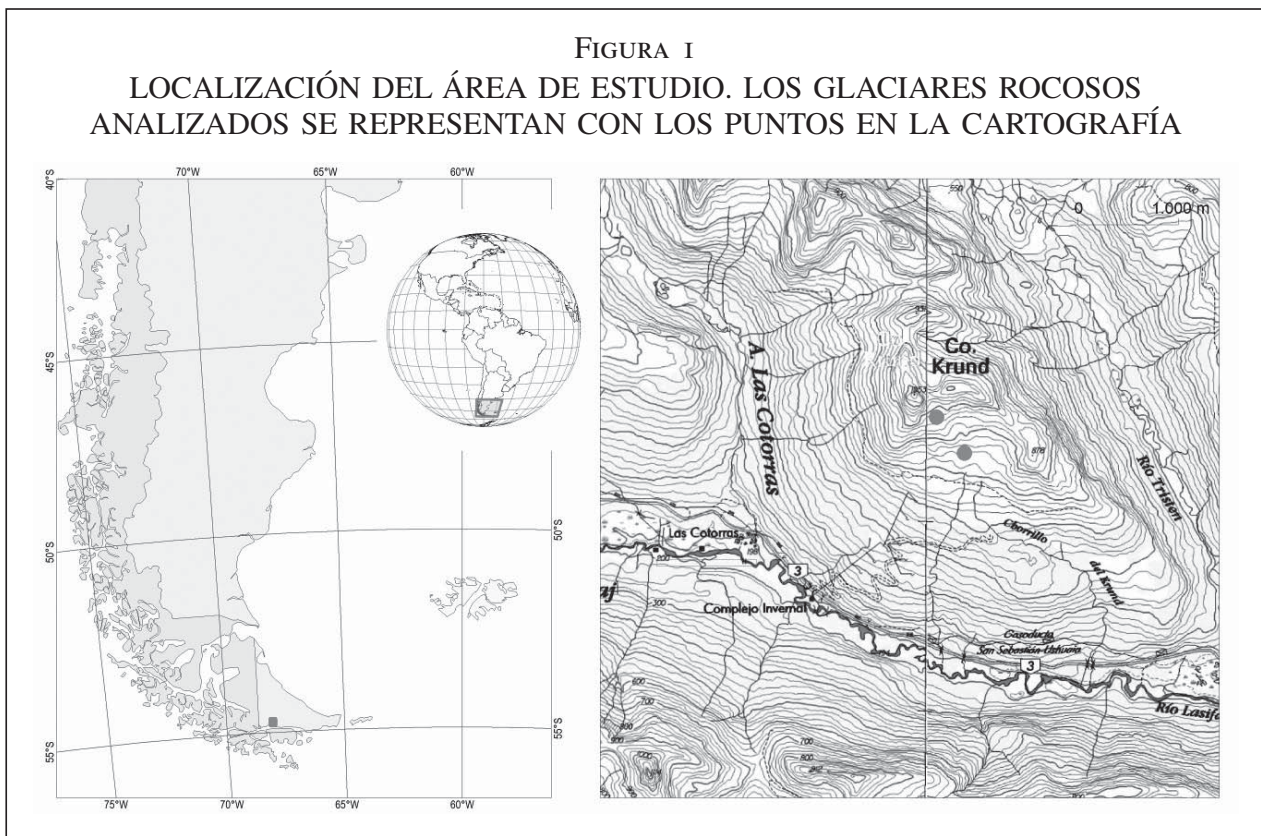
Con esos precedentes, y dado el interés por establecer con cierta aproximación el límite altitudinal a partir del cual el permafrost está presente en Tierra del Fuego, se ha llevado a cabo un estudio sobre el régimen térmico de dos glaciares rocosos situados en el Cerro Krund, a distintas altitudes, con el objetivo de confirmar si están o no en zonas con *permafrost*, y estimar a partir de que altitud este puede aparecer. Por otra parte, se presentan también registros de temperatura del aire de casi dos años, que son de gran interés, puesto que sirven para aproximarse a las condiciones térmicas de una zona dónde no hay estaciones meteorológicas.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Cerro Krund ($54^{\circ} 42' S - 68^{\circ} 0' O$) está situado en la Sierra de Alvear, que a su vez forma parte del extremo S de la Cordillera de los Andes, en el sector denominado Andes Fueguinos, en la parte argentina de la isla Grande de Tierra del Fuego. La Sierra de Alvear es un conjunto montañoso alargado de O a E que se encuentra entre el Lago Fagnano, al N, y el valle (probablemente adaptado a una línea de falla) por el que discurren el Arroyo Grande y el río Larsifarshaj, al S. En esta Sierra se localizan algunas de las montañas más elevadas (varias de ellas aún sin nombrar) de la parte oriental de Tierra del Fuego, como son el Cerro Alvear (1.406 m) y el Cornú o Palpotén (1.375 m).

Desde el eje axial de la Sierra, varios valles de corto recorrido discurren en dirección NE-SO hacia el río Larsifarshaj o bien, con la dirección opuesta, hacia el Lago Fagnano. En el sector meridional de la Sierra, entre los valles de Las Cotorras y Tristen se localiza el cordal montañoso del Cerro Krund (1.004 m) (Fig. 1), que se eleva sobre el valle del río Larsifarshaj, el cual discurre en ese tramo a sólo 180 m de altitud. Por eso, aunque las cotas que alcanzan los relieves no son muy elevadas, la proximidad del nivel del mar hace que las fuertes pendientes y los relieves enérgicos, a veces escarpados, dominen el paisaje y lo caractericen como de alta montaña.

En la vertiente S del Cerro Krund, bajo una pared de unos 100 metros de desnivel en la que son frecuentes las caídas de rocas y los desprendimientos, se



Fuente: República Argentina, Ministerio de la Producción, Dpto. de Sistemas de Información Geográfica, Año 2003. Carta Topográfica. Hojas 5569-17-2 y 5569-18-1.

localiza un glaciar rocoso. Tiene 240 m de largo por 100 m de ancho y muestra signos de permanecer activo actualmente (REDONDO VEGA, 2004). En el mismo circo, y por debajo de un resaltado umbral glaciar, se localiza otro glaciar rocoso de unos 150 m de largo y 60 m de ancho, con la raíz a 790 m y el frente a sólo 740 m, estando afectado por movimientos de tierra derivados de la adecuación de las pistas de esquí. En el circo donde se ubican no hay glaciares y únicamente se pueden encontrar pequeños neveros que, ocasionalmente, pueden perdurar durante todo el año. Desde el punto de vista geológico el circo está labrado sobre las series volcánicas y volcano-clásticas de la Formación Lemaire, del período Jurásico superior (KRANK, 1932). Estos materiales, intensamente tectonizados y afectados por procesos de crioclastia, constituyen el área fuente de los glaciares rocosos. El superior se abastece de las caídas de estos materiales desde la pared vertical del Cerro Krund, mientras que el inferior lo hace principalmente de un umbral glaciar. Ambas masas de derrubios están compuestas por cantos y, sobre todo, bloques de vulcanitas y de pizarras, que en ocasiones sobrepasan los 6 metros de eje mayor y que tienen un aspecto caótico, destacando la presencia de numerosos surcos y crestas bien definidos, especialmente en la parte central del glaciar rocoso superior. En el inferior, las crestas y los surcos están peor definidos.

Los glaciares rocosos se encuentran dentro del centro invernal Cerro Castor, el mayor de la zona, con 28 pistas y 30 kilómetros esquiables que ocupan un total de 600 ha. Las obras de la estación de esquí han afectado a ambas masas de derrubios debido tanto a los movimientos de tierra realizados en la zona, como a la construcción de los remontes que dan acceso a las cotas más altas (Fig. 2). De hecho, una pista atraviesa la parte más elevada del glaciar rocoso superior, habiendo removilizado buena parte de los cantos y bloques que lo componen.

Durante el Último Máximo Glaciar la zona estuvo totalmente glaciada, con glaciares de valle que eran tributarios de los grandes lóbulos de hielo que ocuparon el Canal Beagle y el Lago Fagnano (RABASSA *et al.*, 2000). Con la retirada de los grandes glaciares de valle el hielo fue quedando acantonado en los circos

FIGURA 2

VISTA DEL GLACIAR ROCOSO INFERIOR DE CERRO KRUND. CONSERVA SU FORMA EN LENGUA AUNQUE LOS SURCOS Y CRESTAS DE SU SUPERFICIE APENAS SE PUEDEN IDENTIFICAR, COMO SUELE SER HABITUAL EN LOS GLACIARES ROCOSOS RELICTOS. SU FRENTE (PARTE CENTRAL E IZQUIERDA DE LA IMAGEN) HA SIDO ALTERADO POR EL ACONDICIONAMIENTO DE LAS PISTAS DE ESQUÍ. A LA DERECHA SE OBSERVA UNO DE LOS REMONTES DE LA ESTACIÓN INVERNAL



Fuente: Archivo fotográfico de Javier Santos y J. M.^a Redondo.

de los pequeños valles afluentes (CORONATO, 1995). Hoy en día aún se conservan algunos glaciares de circo orientados al S o al E, descendiendo en algunos casos hasta por debajo de los 800 m. Algunos tienen lenguas incipientes, como el Ojo del Albino o el Alvear Este. Además, también se encuentran varios glaciares rocosos, orientados al S, especialmente asociados a los afloramientos de pizarras.

El clima de la zona es mal conocido (TUHKANEN, 1992) y sólo hay datos de precipitación de Ushuaia, ciudad costera situada a 26 km de distancia, que recibe en torno a 500 mm anuales. Sin embargo, la precipitación en el Cerro Krund debe ser sensiblemente superior. En cuanto a las temperaturas, según los datos presentados en este trabajo, la isoterma de 0 °C puede estar en torno a 850 m actualmente.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Con objeto de conocer el régimen térmico del suelo, se instalaron cuatro sensores de temperatura de suelo (HOBO Pro V2) realizando un transecto a lo largo de los dos glaciares rocosos, a altitudes de 750, 760 (glaciar rocoso inferior), 860 y 885 m (glaciar rocoso superior). Los sensores se colocaron dentro de la estructura de bloques a profundidades variables, si bien la estructura interna abierta del depósito garantiza el flujo de aire entre los bloques.

A 800 m se instaló otro sensor aprovechando una repisa de un bloque de grande dimensiones (cinco metros de longitud de eje mayor) que recogió temperatura del aire. Los *dataloggers* almacenaron los datos de forma horaria durante el período de casi dos años comprendido entre el 19-2-09 y el 16-12-10 con una precisión de $\pm 0,2$ °C.

El funcionamiento de los sensores fue correcto en general, si bien uno de ellos quedó dañado por acción de la fauna silvestre. En los dos más altos, la extracción de los sensores fue compleja debido a que los cables quedaron trabados por el hielo creado durante el período de toma de datos.

Además, con objeto de analizar la estructura interna del glaciar rocoso superior, y dado que con anterioridad se habían detectado numerosos cantos y bloques con el eje mayor orientado en el sentido de la pendiente, buzando a contrapendiente e imbricados (REDONDO VEGA, 2004), lo que se aviene la existencia de movimiento del glaciar rocoso, se realizaron macro-fábricas superficiales para demostrar la existencia de flujos compresivos en los derrubios que lo componen.

Para ello, y siguiendo la misma metodología empleada en el estudio de los glaciares rocosos relictos de Cordillera Cantábrica en España (REDONDO VEGA *et al.*, 2010), se midieron 30 cantos dentro de una cresta y otros 30 en un surco, anotando su dirección, su inclinación y sus dimensiones. Los datos obtenidos se han analizado y representado mediante el programa Stereo32 (RÖLLER & TREPMANN, 2003).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. El régimen térmico de los glaciares rocosos de Cerro Krund

La temperatura del aire durante los 21 meses analizados mostró las condiciones de un clima de montaña oceánico, con escasa oscilación térmica diaria y anual (7,9° entre la media del mes más frío y el más cálido), con medias negativas entre los meses de mayo y noviembre y heladas probables durante todo el año (Cuadro 1).

Las temperaturas obtenidas indican que la isoterma de 0°C, al menos durante ese período, estuvo situada en torno a los 850 m. Según los datos obtenidos por VALCÁRCEL *et al.* (2006) durante un año a 1.050 m de altitud, esa isoterma podría estar algo más baja, en torno a los 775-800 m. En todo caso, se necesitarían más datos durante un período de tiempo más largo para poder establecer la posición actual de la isoterma anual de los 0°C. Por otra parte, algunos autores han señalado un fuerte calentamiento térmico en la zona, que se ha traducido en el retroceso de los glaciares, y que podría conllevar igualmente la fusión del *permafrost* de montaña en su límite de distribución (RABASSA, 2007).

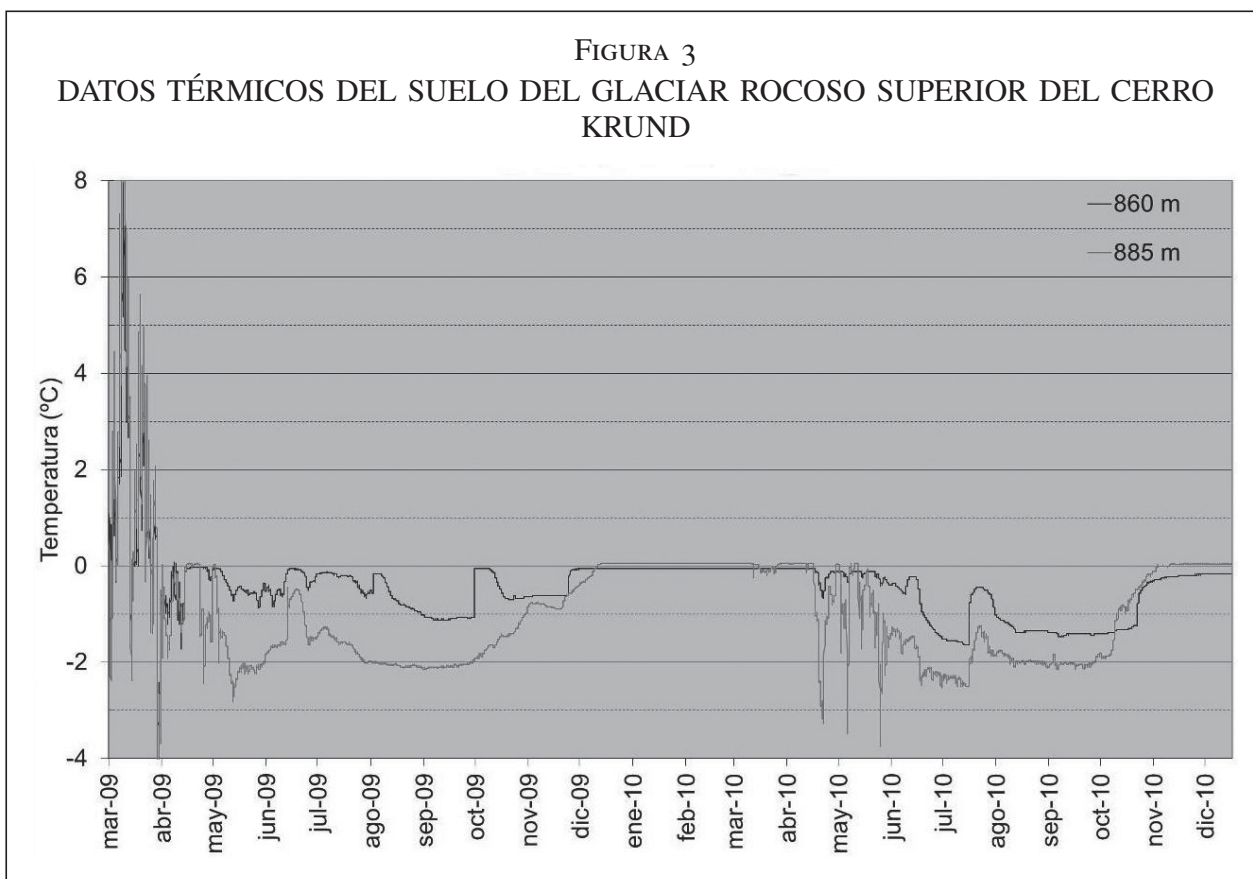
CUADRO 1						
TEMPERATURAS DEL AIRE DEL CERRO KRUND A 800 M DE ALTITUD DURANTE EL PERÍODO DEL 19-2-2009 AL 16-12-2010						
Meses	T. med	Med. máx	Med. mín	Max. Abs	Mín. abs	OT med
Enero	4,2	9,2	1,1	16,6	-2,8	8,1
Febrero	2,6	6,7	-0,1	14,1	-2,5	6,7
Marzo	3,0	6,1	0,3	16,2	-4,4	5,8
Abril	0,5	2,8	-1,5	10,3	-6,4	4,3
Mayo	-1,9	-0,1	-4,0	6,9	-9,7	3,8
Junio	-3,1	-1,4	-5,0	4,9	-9,0	3,5
Julio	-3,6	-1,8	-5,4	8,4	-9,7	3,6
Agosto	-3,0	-1,3	-4,6	4,2	-8,4	3,3
Septiembre	-1,4	1,5	-4,0	8,1	-8,6	5,5
Octubre	0,4	5,3	-3,0	23,4	-7,5	8,3
Noviembre	1,1	7,0	-2,4	21,2	-7,9	9,4
Diciembre	4,3	10,3	0,7	20,0	-4,9	9,6
AÑO	0,3	3,7	-2,3	23,4	-9,7	6,0

Fuente: Elaboración propia.

HUMLUM (1998) observó que los glaciares rocosos activos se localizaban en zonas con -2°C o menos, aunque también los hay en áreas de carácter oceánico con medias próximas a los 0°C , por lo que los datos de aire obtenidos son compatibles con la presencia de *permafrost* en torno a los 800 m, más aún si tenemos en cuenta el más que probable ascenso térmico en los últimos años, que puede hacer que el *permafrost* no se encuentre en equilibrio con las condiciones térmicas actuales. De hecho, RABASSA (2007) estima un ascenso de la línea de equilibrio glaciar de en torno a 200 m en los últimos 20 años.

Las temperaturas del suelo fueron analizadas con dos sensores en el glaciar rocoso superior y otros dos en el inferior, mostrando dinámicas diferentes en ambos casos.

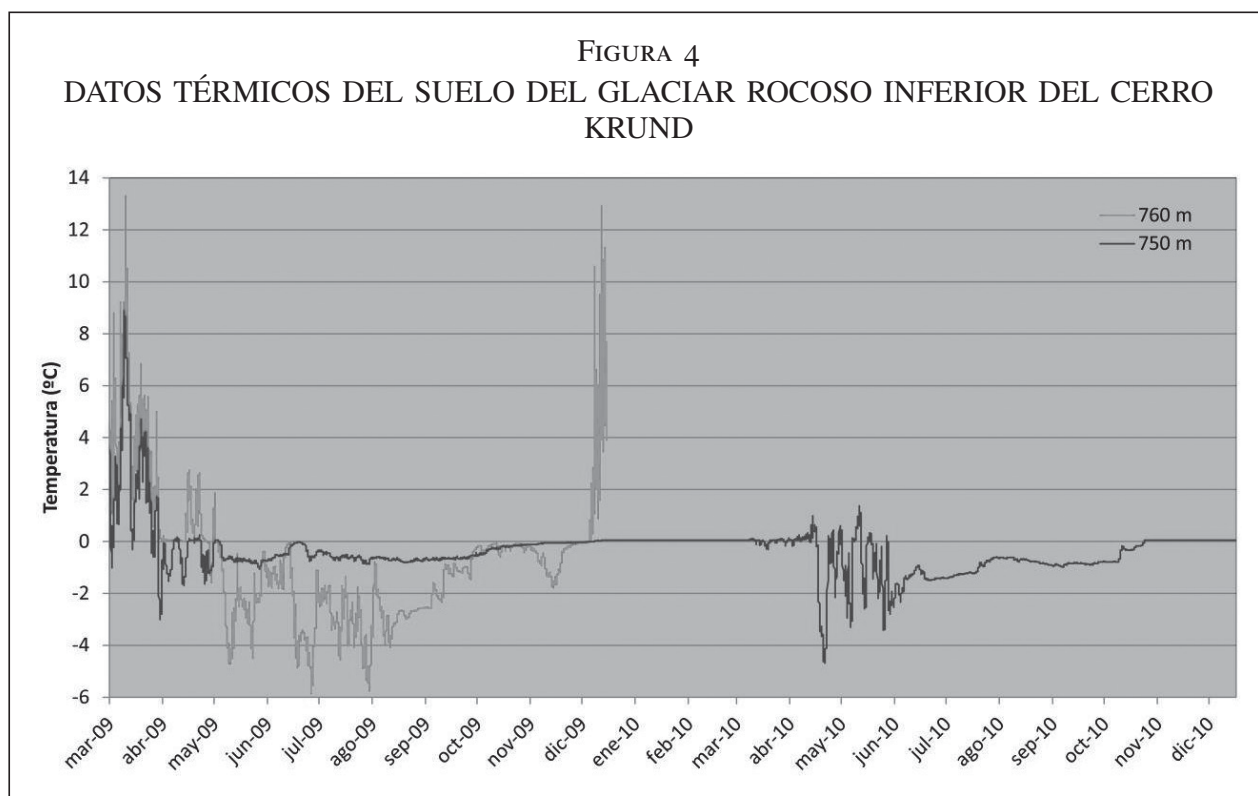
El sensor situado en la cota 860 m, en un profundo surco del glaciar rocoso superior, se mantuvo por debajo de 0° (permaneció a $-0,1^{\circ}\text{C}$ a lo largo del verano) desde el 29-3-2009 hasta el final de la toma de datos, el 16-2-2011 (Fig. 3). Sin embargo, la recogida del sensor se produjo el 2-3-2011 y este se encontraba envuelto en una capa de hielo que permitió recuperar la parte de almacenaje de datos pero obligó a romper el cable con el sensor de temperatura. La capa de hielo existente indica que permanecía aún congelado y, por tanto, se cumple prácticamente el período mínimo de 2 años a partir del cual se considera que hay *permafrost*.



Durante el período de agosto a octubre (en el que, debido a la cubierta nival, la temperatura no depende del exterior) los valores se mantuvieron estables en torno a -1°C el primer año y a $-1,5^{\circ}\text{C}$ el segundo.

Las condiciones térmicas del sensor superior, en la cota 885 m, son muy similares, ya que durante el mismo período de tiempo permaneció por debajo de 0° , si bien durante el período estival en este caso se mantuvo a $0,1^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3). El hielo también dificultó la recuperación del sensor de temperatura, indicando que el suelo permanecía congelado. En este caso, además, entre los meses de agosto a octubre, la temperatura se mantuvo ligeramente por debajo de los -2°C , un valor que entra dentro de la categoría de *permafrost* probable (HOELZLE *et al.*, 1999).

El glaciar rocoso inferior (740-790 m) ha sido estudiado a partir de los datos suministrados por otros dos *dataloggers*. Los resultados obtenidos en este caso son netamente diferentes. Así, en el emplazamiento inferior (750 m) la fusión del suelo se produjo a comienzos de abril de 2010, congelándose de nuevo de forma continua a primeros de junio (Fig. 4). Por otra parte, la evolución de las temperaturas una vez que la nieve aísla el terreno de la influencia exterior es diferente a la de los sensores superiores, sin un descenso acusado a finales del invierno, como es típico en ambientes con *permafrost* y manteniéndose estable en torno a -1°C durante los meses de primavera.



A 760 m otro sensor instalado en una pequeña zona de finos funcionó correctamente sólo hasta primeros de diciembre de 2009, indicando cambios de temperatura más bruscos, propios de una zona con escasa acumulación de nieve, por lo que la oscilación térmica fue más acusada, y las temperaturas mínimas más bajas (Fig. 4).

Por tanto, desde el análisis de las temperaturas de suelo registradas, se puede afirmar la existencia de *permafrost* (al menos entendido este como un estado térmico, 2 años con temperaturas negativas) en el glaciar rocoso superior, dónde también es probable la existencia de núcleos de hielo en el suelo de forma permanente a mayor profundidad de la estudiada. Por el contrario, prácticamente se puede descartar la existencia de *permafrost* en el glaciar rocoso inferior. En cualquier caso, se trataría de *permafrost* templado y probablemente en proceso de degradación, dadas las temperaturas de aire obtenidas.

4.2. Otros caracteres morfológicos de los glaciares rocosos y de su entorno

4.2.1. La orientación de los bloques y los datos de fábrica

Los glaciares rocosos activos se caracterizan por presentar formas “frescas”, con surcos y crestas bien definidos (Fig. 5), pendientes laterales y frontales acusadas y, en ocasiones, mostrar hielo. Esas características son visibles en el glaciar rocoso superior del Cerro Krund. De hecho, la observación de grietas de tracción (REDONDO VEGA, 2004) en la pista que atraviesa su parte alta (cota 865 m), así como su morfología y las pendientes laterales y frontales (34-36° de pendiente media), llevaron a definirlo ya en ese momento como un glaciar rocoso activo. Además, la observación de hielo en el fondo de algunos surcos en los veranos de 2005 y 2011 indica la presencia de suelos congelados.

Por otra parte, llevamos a cabo una fábrica superficial en una de las crestas y un surco de la parte superior del mismo, que tienen orientación S. La fábrica realizada en la cresta indica una fuerte concentración de los clastos orientados hacia el N (grado de concentración en torno al vector de 354° de 0,65) (Fig. 6) debido al movimiento compresivo derivado de la deformación del hielo interno, que explica el desplazamiento de los glaciares rocosos (BARSCH, 1996). La orientación de los cantos en el surco es mucho menos evidente, con un predominio de los clastos orientados NE-SO o bien buzando hacia el N, lo que indica la posibilidad de cantos caídos por gravedad y removilizados. Los datos son similares a los encontrados en glaciares rocosos relictos de la Cordillera Cantábrica (REDONDO VEGA *et al.*, 2010).

Contrastando con los indicios de actividad del glaciar rocoso superior, el inferior muestra unos signos evidentes de desintegración, con una forma menos

FIGURA 5

VISTA PARCIAL DE LA SUPERFICIE DEL GLACIAR ROCOSO SUPERIOR. SE APRECIA LA MARCADA HETEROMETRÍA DE LOS DERRUBIOS Y EL CONTRASTE DE COLOR DE LAS ROCAS: MÁS CLARAS EN LOS SURCOS, POR LA NULA PRESENCIA DE LÍQUENES DEBIDO A LA PERSISTENCIA DE LA NIEVE, Y MÁS OSCURA EN LOS BLOQUES QUE CORONAN LAS CRESTAS DEBIDO A LA COLONIZACIÓN LIQUÉNICA

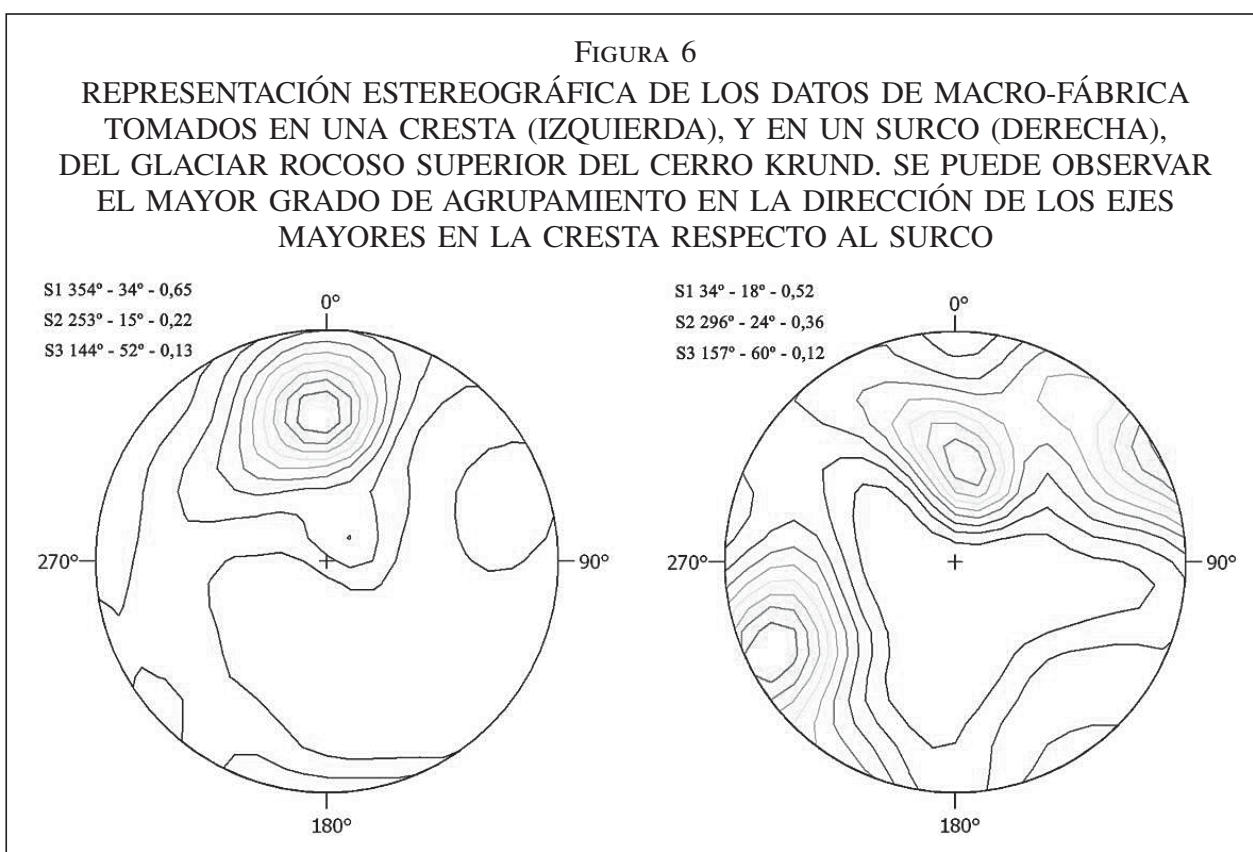


Fuente: Archivo fotográfico de Javier Santos y J. M.^a Redondo.

abultada que el superior, surcos y crestas mucho menos marcados y pendientes laterales y frontales menores, además de un régimen térmico, como ya se ha expuesto, netamente diferente al superior. Todo ello es congruente con la inexistencia de *permafrost* y la ausencia de movimiento de la forma, es decir, con un glaciar rocoso relicto (BARSCH, 1996) o, al menos, inactivo.

4.2.2. Otras formas periglaciares del entorno de los glaciares rocosos

Al igual que en otros sectores de la Sierra de Alvear (VALCÁRCEL DÍAZ *et al.*, 2006), en el circo del Cerro Krund existen otras formas relacionadas con la dinámica periglacial como los bloques aradores (*ploughing blocks*), o diferentes tipos (estriados, poligonales) de suelos ordenados funcionales (*pattern ground*).



Así, en el entorno del glaciar rocoso, se observan también suelos poligonales, en laderas de hasta 10° de pendiente. En realidad, sólo se mantienen en algunos sectores no afectados por los movimientos de tierras, ya que la adecuación del terreno para la práctica del esquí ha supuesto la destrucción de gran cantidad de estas formas de naturaleza frágil. Se trata de pequeños polígonos hexagonales integrados por grava o cantos de pequeño tamaño que, en algunos casos, presentan sólo formas incipientes.

Asimismo, también se observan suelos estriados que presentan 25-30 cm de espesor de finos sobre el *bedrock* (Fig. 7). En superficie, las bandas de finos tienen una anchura media de 15 cm, y alternan con bandas de gravas y cantos de 6-8 cm de anchura. La dirección predominante en las zonas analizadas es de 130° (SE). La pendiente de la ladera varía entre 15 y 20° , siempre superior a la que tiene cuando se forman los suelos poligonales.

Además de estas formas de detalle, existe un lóbulo de piedras activo al este del glaciar rocoso superior, con un frente a unos 870 m. Se trata de una forma fresca, aunque de sólo unos 30 metros de largo por 15 de ancho, con un talud inestable y que se asocia también a la existencia de suelos helados. Formas similares han sido citadas en el entorno del glaciar Alvear (VALCÁRCEL DÍAZ *et al.*, 2006) y se pueden considerar glaciares rocosos incipientes o embrionarios.

FIGURA 7
DETALLE DE LOS SUELOS ESTRIADOS EN EL CIRCO DEL CERRO KRUND,
A UNOS 710 M DE ALTITUD. SE PUEDE OBSERVAR COMO LAS FILAS
DE CANTOS DESCANSAN SOBRE UNA MATRIZ FINA. LA PENDIENTE ES DE 20°
HACIA EL OBSERVADOR



Fuente: Archivo fotográfico de Javier Santos y J. M.^a Redondo.

Por último, en febrero de 2005, durante las obras de construcción de una nueva pista en la parte alta de la ladera, a unos 900 m de altitud, pudimos observar hielo intersticial en el corte del talud, lo que nos indica que el *permafrost* debe estar extendido también en zonas de derrubios finos y no sólo en el glaciar rocoso.

4.2.3. *La comparación con otros glaciares rocosos fueguinos*

En el sector argentino de Tierra del Fuego, tanto en la Sierra de Alvear como en la Sierra de Valdivielso, existen otros glaciares rocosos que muestran signos de actividad reciente (Cuadro 2). En general, están orientados al S, aunque en el mismo Cerro Krund, hay un pequeño glaciar rocoso lobulado orientado al N, con el frente a 915 m, si bien no está clara su actividad actual.

En algunos casos, como los de Cerro Esfinge (Fig. 8) o Beban, presentan signos de permanecer activos a pesar de tener frentes a cotas similares al glaciar rocoso inferior del Cerro Krund, lo que puede ser debido a condiciones más favo-

CUADRO 2
DATOS ALTITUDINALES DE GLACIARES ROCOSOS CON SIGNOS DE
ACTIVIDAD DE TIERRA DEL FUEGO

<i>Glaciar rocoso</i>	<i>Altitud cumbre</i>	<i>Altitud raíz</i>	<i>Altitud frente</i>
Alvear	1.015	820	720
Beban	1.320	840	735
Esfinge	1.190	900	755
Francisco Seguí	1.196	950	855
Cerro Abismo	1.032	961	865
Portillo	1.041	950	875

FIGURA 8

VISTA DEL CERRO ESFINGE (1.190 M) Y DE SU GLACIAR ROCOSO DE LENGUA,
 DE UNOS 400 M DE LONGITUD, CON EL FRENTE SITUADO A 755 M DE ALTITUD.
 AL FONDO EL CANAL BEAGLE JUNTO A LA CIUDAD DE USHUAIA



Fuente: Archivo fotográfico de Javier Santos y J. M.^a Redondo.

rables para la preservación del hielo al ser glaciares rocosos de mayores dimensiones, con más aportes de derrubios y una topografía muy favorable para la conservación de las condiciones térmicas frías del suelo al estar enmarcados por elevadas paredes muy escarpadas que forman el antiguo circo glaciar y ahora el área fuente del glaciar rocoso.

Por tanto, aunque en el Cerro Krund creemos que el *permafrost* está restringido a alturas superiores a los 850 m, la presencia de glaciares rocosos en varios circos de Tierra del Fuego, con frentes inestables y activos, parece indicar la existencia de *permafrost* desde cotas de 750-850 m de altitud en determinados enclaves con orientación S y con condiciones topográficas especialmente favorables.

5. CONCLUSIONES

En el glaciar rocoso superior del Cerro Krund la temperatura del suelo registrada en los años 2009 y 2010 fue negativa durante casi dos años, completándose ese período si pensamos que los dos sensores instalados estaban cubiertos de hielo cuando fueron desinstalados. Por tanto, teniendo en cuenta que el *permafrost* se considera un estado térmico, se ha comprobado la presencia de suelos helados en este lugar.

Estos datos vienen a corroborar las observaciones previas que indicaban la actividad del glaciar rocoso (REDONDO VEGA, 2004), como son la presencia de grietas de tracción en una pista que lo recorre y los taludes laterales y frontales inestables que presenta. Pero es que, además, otros datos indican que la dinámica periglacial es muy activa en la zona. Así, existe un glaciar rocoso incipiente y se ha observado hielo intersticial en el talud de una de las pistas de esquí. Por otra parte, los suelos poligonales y estriados son relativamente frecuentes en los lugares no alterados por los movimientos de tierra.

Por el contrario, el glaciar rocoso inferior, situado por debajo de un escarpe de origen glaciar y a menor altitud, no presenta la misma dinámica y el régimen térmico no demuestra la existencia de *permafrost*. Tampoco su morfología, más aplanada, con taludes que muestran un valor angular mucho más reducido y surcos y crestas menos evidentes, indican algún tipo de actividad en el mismo.

Por todo ello, consideramos que estamos ante dos glaciares rocosos con diferente dinámica. Uno, el superior, aún activo, con un régimen térmico que muestra un período de congelación que puede alargarse durante más de dos años, y un flujo que se evidencia en la existencia de grietas de tracción, hielo intersticial y pendientes laterales pronunciadas. El glaciar rocoso inferior, por el contrario, muestra una dinámica térmica disímil, sin que se observe influencia del *permafrost*, y con una topografía más propia de un glaciar rocoso relicto.

Por otra parte, las temperaturas del aire registradas durante casi dos años muestran que en ese período la isoterma de 0°C se situó sobre los 850 m, cota que separa los dos glaciares rocosos, el activo y el relicto. Esta altitud (850 m) es algo más elevada que la apuntada por VALCÁRCEL DÍAZ *et al.* (2008), que la sitúan a 775-800 m, en la misma Sierra de Alvear.

Normalmente los glaciares rocosos se dan en ambientes con temperaturas medias anuales de al menos -2°C, pero dado el calentamiento que ha sufrido Tierra del Fuego en los últimos años, y que amenaza a corto plazo a la mayoría de los pequeños glaciares de montaña (RABASSA, 2007; 2008), es probable que el *permafrost* continúe en unas condiciones térmicas que ya no le son propicias, refugiado en enclaves topográficamente favorables y de sustrato grosero, como son los glaciares rocosos, que muestran una dinámica más lenta que los glaciares y que conservan hielo gracias a la cubierta de derrubios que los protege. Aunque en el Cerro Krund la cota de 850 m parece separar los ambientes con *permafrost* y sin él, lo cierto es que la presencia de glaciares rocosos con frentes inestables en otras partes de Tierra del Fuego a cotas inferiores, indica que localmente ese límite altitudinal puede estar más bajo, y alcanzar los 750 m de altitud, ligado a glaciares rocosos de grandes dimensiones dónde el *permafrost* puede mantenerse a pesar de estar actualmente bajo condiciones térmicas poco adecuadas.

En cualquier caso, al igual que otras zonas del planeta, los glaciares rocosos no son formas muy abundantes y sobre todo están asociadas a condiciones micro-topográficas favorables (HUMLUM, 1998), con aportes de derrubios frecuentes, al pie de paredes verticales y dónde la acumulación de nieve es insuficiente para la generación de glaciares.

De continuar la actual tendencia térmica, es más que previsible la progresiva fusión del *permafrost* y el tránsito sucesivo de glaciares rocosos activos (con flujos lentos derivados de la presencia de hielo intersticial) a inactivos (con *permafrost* pero sin movimiento) y a relictos (sin hielo) tal y como se ha observado en otros sistemas montañosos como Los Alpes (IKEDA & MATSUOKA, 2002). En estos últimos, la desaparición del *permafrost* supone la pérdida de las caracteres morfológicos originales de los glaciares rocosos, que se traducen en una intensa reducción de su espesor y la aparición de zonas con la superficie colapsada (REDONDO VEGA *et al.*, 2010), o el hundimiento de la parte central respecto a los márgenes (IKEDA & MATSUOKA, 2002). Son los glaciares rocosos relictos, los cuales aún pueden contener hielo estacional, pero en los que predominan mecanismos como la solifluxión, que degradan constantemente los taludes del borde hasta hacerlos desaparecer como forma de relieve.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias al proyecto “Estudio de las condiciones ambientales y de la dinámica de los glaciares rocosos relictos de la Cordillera Cantábrica y de las formas equivalentes funcionales de Tierra del Fuego: similitudes y diferencias” (ULE2010-5), financiado por la Universidad de León.

BIBLIOGRAFÍA

- BARSCHE, D. (1996): *Rockglaciers. Indicators for the present & former geocology in high mountain environments*. Springer Verlag, Berlin.
- CORONATO, A. (1995): “The last Pleistocene Glaciation in tributary valleys of the Beagle Channel, Southernmost South America”. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 9, pp. 173-182.
- CORTE, A. (1997): *Geocriología. El Frío en la Tierra*. Ediciones Culturales de Mendoza, Mendoza.
- FRENCH, H. M. (2007): *The periglacial environment*. Wiley & Sons, Chichester (U.K.).
- HOELZLE, M., WEGMANN, M. & KRUMMENACHER, B. (1999): “Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps”. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10 (2), pp. 113-124.
- HUMLUM, O. (1998): “The climatic significance of rock glaciers”. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9 (4), pp. 375-395.
- IKEDA, A. & MATSUOKA, N. (2002): “Degradation of Talus-Derived Rock Glaciers in the Upper Engadin, Swiss Alps”. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13, pp. 145-161.
- KRANK, E. H. (1932): “Geological investigation in the Cordillera of Tierra del Fuego”. *Acta Geographica*, 4 (2), pp. 1-231.
- RABASSA, J. (2007): “El impacto del cambio climático en los glaciares patagónicos y fueguinos”. *Revista Ciencia Hoy*, 17 (97), pp. 50-57.
- (2008): “Late Cenozoic Glaciations in Patagonia and Tierra del Fuego”. En: RABASSA, J. (Ed.): *The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego*. Elsevier, Amsterdam, pp. 151-204.
- RABASSA, J., CORONATO, A., BUJALESKY, G., SALEME, M., ROIG, C., MEGLIOLI, A., HEUSSER, C., GORDILLO, S., ROIG, F., BORROMEI, A. & QUATTROCHIO, M. (2000): “Quaternary of Tierra del Fuego, Southernmost South America: an updated review”. *Quaternary International*, 68-71, pp. 217-240.
- REDONDO VEGA, J. M.^a (2004): “El glaciar rocoso de Cerro Krund, Tierra del Fuego, Argentina”. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 30, pp. 169-180.
- REDONDO VEGA, J. M.^a, GÓMEZ VILLAR, A., GONZÁLEZ GUTIÉRREZ, R. B. & SANTOS GONZÁLEZ, J. (2010): *Los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica*. Universidad de León, León.

- RÖLLER, K. & TREPMANN, C. A. (2003): *Stereo 32. Version: 1.0.3*. Institut für Geologie, Mineralogie & Geophysik, Bochum.
- TROMBOTTO, D. (2008): "Geocriology of Southern South America". *En: RABASSA, J. (Ed.): The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego*. Elsevier, Amsterdam, pp. 255-265.
- TUHKANEN, S. (1992): "The climate of Tierra del Fuego from vegetation geographical point of view and its ecoclimatic counterparts elsewhere". *Acta Bot. Fennica*, 145, pp. 1-64.
- VALCÁRCEL DÍAZ, M., CARRERA GÓMEZ, P., CORONATO, A., CASTILLO RODRÍGUEZ, F., RABASSA, J. & PÉREZ ALBERTI, A. (2006): "Cryogenic Landforms in the Sierras de Alvear, Fuegian Andes, Subantarctic Argentina". *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, pp. 371-376.
- VALCÁRCEL DÍAZ, M., CARRERA GÓMEZ, P., BLANCO CHAO, R. & PÉREZ ALBERTI, A. (2008): "Permafrost occurrence in southernmost South America (Sierras de Alvear, Tierra del Fuego, Argentina)". *Ninth International Conference on Permafrost*, pp. 1799-1802.
- VAN EVERDINGEN, R. O. (2005): "*Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*". Digital Edition, The Arctic Institute of North America, The University of Calgary, Calgary.