

La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago: Fundamentos y Primeros Resultados

ALEXANDER BRENNING¹

RESUMEN

Los glaciares de escombros (glaciares de roca, glaciares rocosos) de la Cordillera de Santiago constituyen un insospechado, pero importante recurso hídrico y juegan un papel clave en el sistema de transporte de sedimento de la alta montaña semiárida. Se señala la importancia de estos cuerpos de detrito y hielo en los sistemas geomorfológico e hidrológico tomando el Cajón de la Casa de Piedra como ejemplo. Esta subcuenca del río Yeso se ubica cerca del embalse El Yeso, que es de gran importancia para el abastecimiento de agua para Santiago. El permafrost insular del Cajón de la Casa de Piedra empieza a los 3000 m.s.n.m. en forma de glaciares de escombros activos. Entre los 3500 y 3800 m.s.n.m. los glaciares de escombros ocupan incluso el 16% del total de las superficies detríticas y constituyen la forma predominante del mesorrelieve. Por lo tanto, hay que suponer la existencia de permafrost discontinuo de montaña a partir de los 3500 m.s.n.m. En el área de estudio existen glaciares de escombros de talud, igual que glaciares de escombros morrénicos vinculados a grandes lenguas glaciarias muertas y a los depósitos morrénicos correspondientes. La transición hacia el piso nival se ubica alrededor de los 3800 m.s.n.m. y está vinculada a la línea de equilibrio reciente de los glaciares. Los glaciares de escombros activos del Cajón de la Casa de Piedra almacenan más agua que los glaciares propiamente dichos. Esta relación puede ser considerada como representativa para muchas cuencas pequeñas de la Cordillera de Santiago con altitudes menores a los 5000 m.

ABSTRACT

The rock glaciers of the Andes of Santiago de Chile are unsuspecting, but important water resources and play a key role within the debris transport system of this semiarid high mountain area. The significance of these bodies of debris and ice within the geomorphologic and hydrologic system is shown in the case of the Casa de Piedra valley. This subcatchment of the Yeso river is situated very close to the El Yeso reservoir, which is of outstanding importance for the drinking water supply to Santiago. In the Casa de Piedra valley, recent sporadic permafrost in the form of active rock

¹ Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, Alemania Correo electrónico: Alexander.Brenning@rz.hu-berlin.de

glaciers reaches down to 3000 m a.s.l. Between 3500 and 3800 m a.s.l., active rock glaciers occupy even 16% of the total debris-covered area and represent the predominant landform. Therefore discontinuous mountain permafrost has to be assumed above 3500 m a.s.l. In the study area, debris rock glaciers are observed as well as morrainic rock glaciers, the latter in lower altitudes in the neighborhood of dead ice bodies and the corresponding end moraines. The transition to the nival zone takes place around 3800 m a.s.l. at the recent equilibrium line of glaciers. In the Casa de Piedra valley, more frozen water is stored in active rock glaciers than in "true" glaciers. This situation may be assumed to be representative of many of the small catchments in the Andes of Santiago with elevations below approx. 5000 m a.s.l.

Palabras claves: Glaciares de escombros, permafrost, periglacial.

Keywords: Rubble's glaciers, permafrost, periglacial.

Los glaciares de escombros activos son procesos perennes de hielo subsuperficial en cuerpos de material no consolidado de las zonas frías de la Tierra. Estos cuerpos de detrito y hielo se mueven por la ladera, valle abajo formando lenguas

o lóbulos como expresión geomorfológica (BARSCH 1996). Este trabajo presenta un estudio de los glaciares de escombros del Cajón de la Casa de Piedra que corresponde a una subcuenca del río Yeso (Andes de Santiago; fig. 1).

FIGURA N° 1: LA CORDILLERA DE LOS ANDES AL ESTE DE SANTIAGO CON LA CUENCA DEL RÍO YESO Y SU SUBCUENCA, EL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA (33,5°S, 70°W).



En términos generales, el largo de los glaciares de escombros varía entre menos de 100 m y varios kilómetros, y su espesor, entre un par de metros y más de 100 m. En su superficie se desa-

rollan ondulaciones y lomos característicos producidos por el flujo; además es fácil reconocer un glaciar de escombros por su escarpe frontal convexo (fig. 2 y 3).

FIGURA N° 2: GLACIARES DE ESCOMBROS ACTIVOS AL OESTE DEL CERRO CATEDRAL (34° 12' S, 70° 05' W) POR SOBRE LOS 3500 M S.N.M.



FIGURA N° 3: ESTRUCTURAS DE FLUJO DE 2 M DE ALTURA EN LA SUPERFICIE DE UN GLACIAR DE ESCOMBROS ACTIVO A APROX. 3700 M S.N.M. EN EL LADO NORTE DEL CERRO CATEDRAL.



Según el origen del material hay dos tipos de glaciares de escombros con existencia de formas transicionales: a) Los *glaciares de escombros de talud* (*talus rock glaciers*) están formados principalmente por escombros de vertiente, mientras que: b) los *glaciares de escombros morrénicos* (*debris rock glaciers*) se alimentan de sedimentos glaciogénicos (BARSCH 1996).

Los glaciares de escombros activos contienen hielo subterráneo permanentemente congelado; por tanto, se trata de fenómenos del *permafrost* (discontinuo) de alta montaña. Para su formación, desarrollo y mejor conservación, deben mantener temperaturas inferiores a -1°C .

Los glaciares de escombros activos consisten de una mezcla de un 40 a 60% de material clástico y 60 a 40% de hielo (principalmente hielo intersticial y de segregación; HAEBERLI 1985, BARSCH 1996, ARENSON et al. 2002). Esta mezcla está cubierta de un manto de clastos, generalmente muy gruesos (bloques), que constituye la *capa activa* de descongelamiento estacional (BARSCH 1996). Este manto de 1 a 5 m de espesor sirve como capa aisladora e impide el descongelamiento del *permafrost* subyacente.

Los *glaciares de escombros inactivos* todavía conservan su contenido de hielo, pero han dejado de moverse. Ello puede deberse a causas climáticas, geomorfológicas o hidrológicas. Cuando el *permafrost* de un glaciar de escombros se derrite completamente, el resultado corresponde a un *glaciar de escombros fósil*.

Los glaciares de escombros activos se caracterizan por un escarpe frontal marcado (fig. 2), mientras que las formas inactivas presentan una transición convexa suave entre su superficie y la vertiente frontal. El relieve superficial de un glaciar de escombros inactivo todavía está bastante bien conservado. Los fenómenos fósiles, en contraste, ya están decaídos debido a la pérdida del contenido de hielo. Su superficie puede preservar elevaciones débiles remanentes de las estructuras de flujo.

Objetivo y métodos

Este trabajo tiene como objetivo señalar la importancia de los glaciares de escombros en los

sistemas geomorfológico e hidrológico de la Cordillera de Santiago y generar un mayor interés en estos elementos del paisaje andino. La atención se centra en el Cajón de la Casa de Piedra, ubicado a corta distancia del Embalse El Yeso (fig. 1). En marzo de 2002 se realizó un reconocimiento de glaciares de escombros en terreno con cartografía geomorfológica, según KNEISEL et al. (1998), en esta subcuenca del río Yeso. El Cajón de la Casa de Piedra comprende un área de 32 km² que se extiende de los 2580 m s.n.m., en la desembocadura al río Yeso, hasta la cumbre del Cerro Punta Negra (4655 m s.n.m.).

Además, se efectuó un análisis crítico de los datos del inventario de glaciares de la D.G.A. (Dirección General de Aguas; MARANGUNIC 1979). Con este fin se utilizaron fotografías aéreas y los resultados de los trabajos en terreno, junto a imágenes de los vuelos HYCON (1955) y GEOTEC (1997).

La clasificación de los glaciares de escombros, según observaciones en terreno y en fotos aéreas, sigue la pauta de BARSCH (1996). Adicionalmente, se determinaron parámetros morfométricos de los mismos.

Las áreas cubiertas de determinadas clases de formas geomorfológicas se comprobaron mediante un sistema de información geográfico. Un modelo digital de elevaciones (MDE) derivado de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (I.G.M.) escala 1:50.000, sirvió como base para una diferenciación según la altitud. El MDE también se utilizó para generar una ortofoto del Cajón de la Casa de Piedra que permitió complementar la cartografía hecha en terreno. Nótese que en este trabajo el término "área" siempre se refiere al equivalente planimétrico del área en la superficie de la Tierra.

Con el fin de estimar los rangos de los volúmenes de hielo contenidos en los glaciares de escombros, se procedió de la siguiente manera: El espesor medio del glaciar de escombros se aproximó como la mitad de la altura de su frente, asumiendo un espesor mínimo de 10 a 15 m necesario para la preservación del *permafrost*. De ello se restaron 3 a 5 m para obtener un rango para el espesor del interior rico en hielo, es decir 5 a 12 m. Como contenido de hielo, en este interior, se consideró un 60%. El cálculo de los

volúmenes de hielo de los glaciares propiamente dichos, está basado en la relación entre área y espesor utilizada por MARANGUNIC (1979). Se aceptó una densidad de hielo de $0,8 \text{ g/cm}^3$.

Glaciares de escombros, glaciares cubiertos, lenguas glaciarias muertas y morrenas

Un malentendido que a veces se observa, está vinculado a la diferenciación entre glaciares cubiertos, lenguas glaciarias muertas y glaciares de escombros (EVIN 1991, BARSCH 1996). Los glaciares cubiertos y las masas de hielo muerto no son ni glaciares de escombros ni formas de transición hacia aquéllos (BARSCH 1996).

Los glaciares cubiertos son glaciares de verdad, cuyo hielo se encuentra enterrado por una morrena superficial de gran espesor. Esta puede desarrollarse como consecuencia de un gran aporte de detrito o bien por un balance hidrológico negativo del glaciar.

En los Andes de Santiago, en exposición Sur, son frecuentes las lenguas glaciarias muertas cubiertas que ya no reciben una alimentación significativa debido a su ubicación, muy por debajo de la línea de equilibrio actual. Sobre esas lenguas de hielo muerto se desarrollan depresiones circulares, con lagunas de agua de fusión y otros fenómenos del termocarst (cf. CLAYTON 1964 y fig. 4). De esta manera, se produce un relieve irregular, pero igualmente característico. Un ejemplo de esta configuración será tratado en sección 3, en el caso del cuerpo de hielo ubicado en el Cajón de la Casa de Piedra.

FIGURA N° 4: UNA DEPRESIÓN Y LAGUNA DE FUSIÓN DE HIELO UBICADA SOBRE LA LENGUA GLACIARIA MUERTA DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA. LA CUBIERTA DE MATERIAL MORRÉNICO TIENE UN ESPESOR APROXIMADO DE 1 M (cf. fig. 7).



Finalmente, los glaciares de escombros (sobre todo las formas fósiles) son, a veces, confundidos con morrenas; ello se observa en varias

cartas topográficas 1:50.000 del I.G.M. Esta confusión puede evitarse en la mayoría de los casos al analizar por un lado las estructuras superficia-

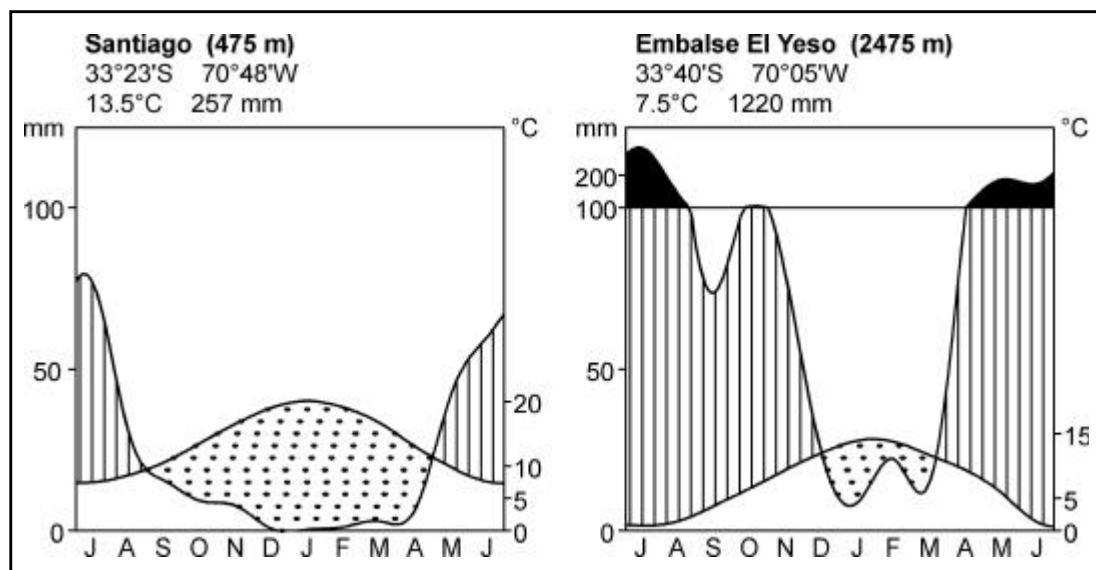
les de esas geoformas y por el otro lado, la existencia de una depresión relativa detrás de un arco morrénico, la cual está ausente en el caso de un glaciar de escombros (intacto o fósil) debido al mayor contenido de detrito.

El área de estudio

Los Andes de Santiago, en sentido estricto, comprenden los 6600 km² de alta montaña situados dentro de la cuenca hidrográfica del río Maipo (incluyendo la subcuenca del río Mapocho). El área se extiende aproximadamente entre los 33° y 34° de latitud Sur y alcanza como altitud máxima los 6570 m s.n.m. en el Cerro Tupungato (fig. 1).

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de precipitaciones invernales en los subtropicos de alta insolación del hemisferio Sur y en la zona de transición entre el clima semiárido y semihúmedo. Las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo a agosto (fig. 5). En este tercio del año cae el 80% de las precipitaciones observadas en la Depresión Central de Santiago, las cuales alcanzan entre 250 y 350 mm., como promedio anual. Esta concentración es menos marcada en los pisos altos de la Cordillera: el 65% de las precipitaciones registradas en la estación Embalse El Yeso (2475 m.s.n.m.) ocurre desde mayo a agosto. Las precipitaciones sólidas de este lugar, representan, en promedio, alrededor del 60% del total de las precipitaciones anuales.

FIGURA N° 5: EL CLIMA DE LAS ESTACIONES SANTIAGO-PUDAHUEL Y EMBALSE EL YESO.



La línea de equilibrio de los glaciares observada en el glaciar Echaurren Norte se sitúa a los 3800 m.s.n.m. promedio de 1975 a 1992, y éste varía de un año a otro entre los 3600 m y 4000 m s.n.m. en dependencia de las precipitaciones (ESCOBAR et al. 1995). Este glaciar se encuentra a 8 km al Oeste del Cajón de la Casa de Piedra, en exposición Sureste.

El relieve de los Andes de Santiago da testimonio de extensas glaciaciones pleistocénicas. No obstante, los derrumbes y la intensa produc-

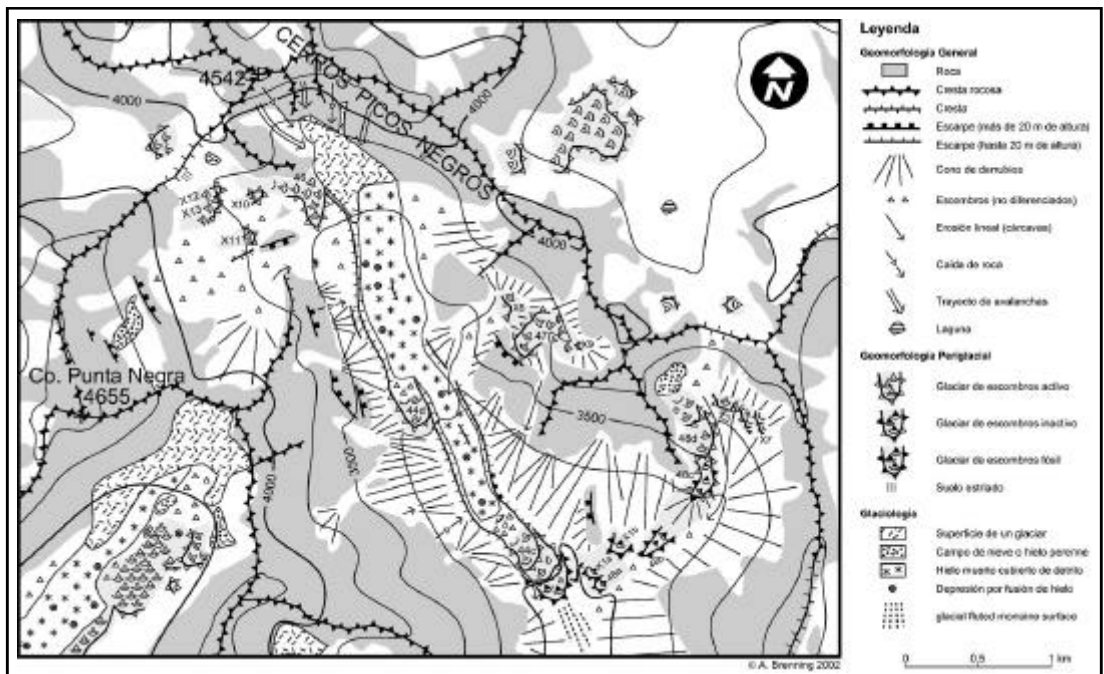
ción de derrubios durante el Holoceno han producido importantes cambios del paisaje. ABELE (1984) destacó el papel clave que han tenido los derrumbes de montaña. A modo de ejemplo, los depósitos que embalsan la Laguna Negra, en la cuenca del río Yeso, no son, como se pensó durante mucho tiempo, una morrena frontal enorme, sino que corresponden a depósitos de un tremendo derrumbe prehistórico originado en el Cerro Mesón Alto (5257 m s.n.m.). Durante este evento, se movieron aproximadamente 4,5 km³ de roca (ABELE 1984).

La cuenca del río Yeso se encuentra en plena cordillera, a unos 60 km al Este de Santiago. Esta cuenca tiene un área de 637 km² y alberga el Embalse El Yeso, que juega un rol fundamental en el abastecimiento de agua para la capital chilena.

Los glaciares de escombros como componentes del sistema geomorfológico

En el Cajón de la Casa de Piedra se observan glaciares de escombros activos a partir de los 3000 m s.n.m. (fig. 6, cuadro 1). A continuación se estudiará la génesis de esas formas, su distribución altitudinal e importancia geomorfológica.

FIGURA Nº 6: CARTA GEOMORFOLÓGICA DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA SUPERIOR. LA NUMERACIÓN DE LOS GLACIARES DE ESCOMBROS ESTÁ BASADA EN EL INVENTARIO DE GLACIARES (MARANGUNIC 1979); FORMAS NO REGISTRADAS EN ESE TRABAJO SE DENOMINAN DE LA FORMA "X..".



CUADRO N° 1: PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LOS GLACIARES DE ESCOMBROS DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA SUPERIOR (CF. FIG. 6). LOS NÚMEROS ENTRE PARÉNTESIS SON ESTIMACIONES BASADAS EN LA CARTA TOPOGRÁFICA; N.D. – NO DETERMINADO.

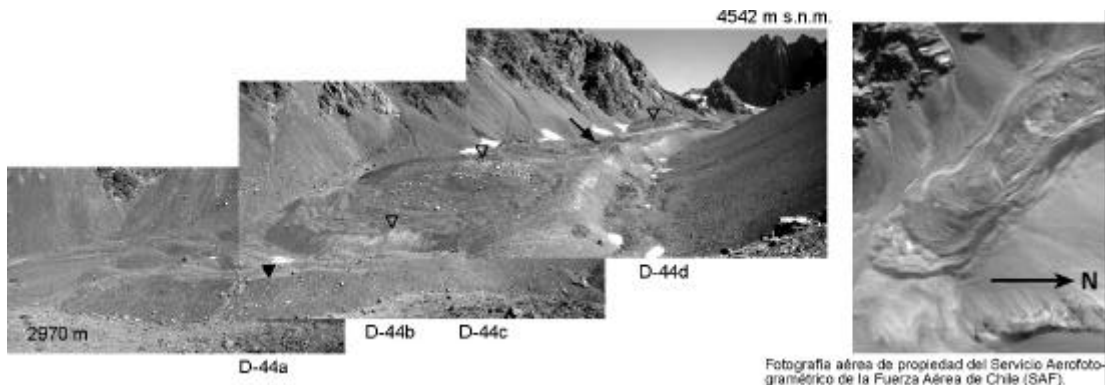
N°	Actividad	Tipo	Forma	Expos.	Altitud de la base [m s.n.m.]	Alto del frente [m]	Pendiente del frente [°]	Area [km ²]
44a	fósil	morrénico	lengua	SE	2970	12	30	0,04
44b	activo	morrénico	lengua	SE	3000	14	33	0,05
44c	activo	morrénico	lengua	SE	3030	24	36	0,05
44d	activo	morrénico	lengua	SE	3250	58	37	0,06
46	activo	de talud	lengua	S	3535	(20)	41	0,11
X02	fósil	de talud	lengua	SW	2980	(10)	n.d.	0,03
X01a	fósil	de talud	lengua	SW	3010	55	30	0,03
X01b	fósil	de talud	lengua	SW	3100	24	25	0,02
48a	fósil	de talud	lengua	SW	3070	(30)	n.d.	0,04
48b	fósil	de talud	lengua	SW	3130	28	26	0,04
48c	inactivo	de talud	lengua	SW	3200	157 (!)	34	0,1
48d	activo	de talud	lengua	S	3460	20	37	0,04
48e	activo	de talud	lengua	S	3580	(20)	n.d.	0,05
X03	activo	de talud	lóbulo	S	3585	(15)	n.d.	0,01
X04	activo	de talud	lóbulo	S	3575	25	39	0,02
X05	activo	de talud	lóbulo	SW	3520	33	32	0,001
X06	activo	de talud	lóbulo	SW	3570	33	37	0,01
X07	activo	de talud	lóbulo	SW	3560	18	36	0,003
47	activo	de talud	lóbulo	W	3650	(25)	n.d.	0,11
X08	activo	de talud	lóbulo	SW	3590	(30)	n.d.	0,03
X09	activo	de talud	lengua	W	3770	(10)	n.d.	0,003
X10	activo	de talud	lengua	E	3655	(15)	n.d.	0,02
X11	activo	de talud	lengua	E	3685	(15)	n.d.	0,03
X12	activo	de talud	lengua	E	3740	(10)	n.d.	0,01
X13	activo	de talud	lengua	E	3730	(20)	n.d.	0,04

Génesis y dinámica de los glaciares de escombros

Los glaciares de escombros se forman, dependiendo de su posición en el relieve, a partir de material no consolidado de origen criogénico-gravitacional o glacial. Los glaciares de es-

combros 44a a 44c del Cajón de la Casa de Piedra son representantes del tipo morrénico, alimentándose de una morrena frontal (fig. 7). Un aporte de sedimento desde las laderas del valle está impedido, debido a las depresiones longitudinales entre la ladera del valle, los glaciares de escombros y morrenas laterales.

FIGURA N° 7: GLACIARES DE ESCOMBROS MORRÉNICOS FÓSIL Y ACTIVOS DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA. LA FLECHA INDICA LA UBICACIÓN DE LA LAGUNA DE FUSIÓN DE HIELO MOSTRADA EN FIGURA 4. DETALLE DE ORTOFOTO: VUELO GEOTEC 1997.



La lengua glaciaria muerta, responsable de la acumulación de esas morrenas, se caracteriza por una superficie muy irregular debida a la fusión de hielo (termocarst). En esas depresiones de fusión de hielo se observan cortes de hielo laminar con bajo contenido de material clástico, lo que indica un origen glacial (fig. 4). El cuerpo de hielo está cubierto de una morrena superficial de un espesor aproximado de 1 m. La lengua glaciaria muerta termina en una morrena frontal que debe asignarse a un avance del Holoceno tardío. A partir de esta morrena, se desarrollaron primero el glaciar de escombros 44a que ya se encuentra fosilizado y luego, dos formas activas sobrepuestas (44b, c). Se trata de fenómenos periglaciales propiamente dichos que se alimentan del material de la morrena frontal y del agua de fusión del cuerpo de hielo muerto, sin estar directamente vinculados a éste.

El glaciar de escombros 44d ocupa un lugar comparable. La lengua glaciaria ubicada valle arriba, presenta formas del termocarst y se considera, en su mayor parte, muerta. Hacia arriba, se observa una transición hacia un glaciar cubierto (vivo) y finalmente, un glaciar descubierto. Esta lengua glaciaria parece corresponder a un avance posterior a la lengua antes mencionada.

Los glaciares de escombros de talud, en contraste, tienen su origen en depósitos de detrito gravitacional. Son buenos ejemplos de esta categoría los glaciares de escombros 46 y 47, ambos situados al pie de poderosas paredes rocosas (fig. 6 y 7). En cambio, los glaciares de escombros X03 a X07 se encuentran en la parte superior de un talud de escombros y por debajo de paredes relativamente bajas. En la fase inicial de la formación de un glaciar de escombros de talud, se desarrolla un abultamiento convexo en una zona de permafrost, el cual comienza a moverse lateralmente hacia abajo. En la superficie del glaciar de escombros aparece una parte más plana que funciona como zona de depositación para el desplazamiento gravitacional de detrito y avalanchas. Los glaciares de escombros de talud de mayor tamaño pueden, incluso, formar una base local de erosión para derrumbes de magnitud limitada. Esto se observó en el Cerro Catedral a los 3500 m. s.n.m.

Los derrubios depositados sobre un glaciar de escombros son incorporados a éste. Por eso dejan de estar disponibles para procesos de desplazamiento gravitacional rápidos y entran en una dinámica lenta de reptación. En los Andes de Santiago, CONTRERAS & ILLANES (1992) midieron velocidades de 1 a 3 m/a en diferentes puntos en la superficie de un glaciar de escombros; estos valores deben ser considerados como muy altos (véase p.ej. BARSCH 1996, KOKAREV et al. 1997).

Por lo general, la pendiente del frente de los glaciares de escombros activos alcanza valores de hasta 50° (BARSCH 1996). En el Cajón de la Casa de Piedra se midieron ángulos entre los 32° y 41° (cuadro 1). Sin embargo, en otros lugares en los alrededores de Santiago se registraron pendientes frontales más fuertes que llegaron hasta los 46,5°. Ello se observó al pie del Cerro La Parva del Inca (32° 44'S, 70° 9'W, cerca del paso a Mendoza) a los 3200 m.s.n.m., en la parte lateral del frente de un glaciar de escombros activo, siendo el alto del frente solamente de 5 m. Una pendiente tan fuerte en material no consolidado, sólo puede ser preservada a través de la presencia de permafrost y un desplazamiento rápido del glaciar de escombros.

Una zonificación altitudinal preliminar del Cajón de la Casa de Piedra

En el Cajón de la Casa de Piedra los glaciares de escombros activos están presentes a partir de los 3000 m.s.n.m. de manera local, y en mayor extensión por sobre los 3500 m.s.n.m., aproximadamente. Esas altitudes, en conjunto con la línea de equilibrio de los glaciares (de hielo), forman el marco de la zonificación altitudinal preliminar. (Refiérase a BARSCH 1986 para una discusión de los problemas de delimitación de los pisos altitudinales en montañas semiáridas.)

Los glaciares de escombros morrénicos activos 44b y 44c del valle principal pueden ser considerados fenómenos del permafrost insular, dado que las formas fósiles predominan alrededor de esta altitud. Esas formas activas se encuentran en exposición Sureste, en un sector poco insolado debido a la sombra de altas paredes rocosas.

Las lenguas glaciarias muertas con fenómenos de termocarst y los cordones de las morrenas laterales correspondientes también se sitúan por sobre los 3000 m.s.n.m. Se trata de testigos de una ubicación mucho más baja de la línea de equilibrio durante fases del Holoceno tardío.

A partir de la altitud del glaciar de escombros activo 48d, cuya base se encuentra a los 3460 m. s.n.m., dichas formas empiezan a predominar en el ambiente periglacial e indican, por lo tanto, la presencia de permafrost discontinuo. Las raíces

de los glaciares de escombros se extienden hasta los 3820 m.s.n.m., aproximadamente (n° 47, X09). Sin embargo, este límite superior se debe a la configuración del relieve: Las raíces de glaciares de escombros activos ubicados al Oeste del Cerro Punta Negra en exposición Suroeste sobrepasan los 4000 m.s.n.m. Por ello y debido a las fuertes oscilaciones de la línea de equilibrio de los glaciares (ESCOBAR et al. 1995), ésta no puede utilizarse para trazar un límite preciso entre los pisos periglacial y nival (cf. BARSCH 1986, TROMBOTTO 2000).

CUADRO N° 2: ZONIFICACIÓN ALTITUDINAL DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA.

Altitud (m s.n.m.)	Zona altitudinal reciente	Mesoformas y procesos geomorfológicos recientes
> 3800	piso nival	Zonas de alimentación de glaciares; campos de nevé; gelifracción, desplazamiento gravitacional
3500 – 3800	Piso del permafrost discontinuo	Predomina la formación de glaciares de escombros; desarrollo de taludes de escombros, erosión lineal; zonas de ablación de pequeños glaciares; lenguas glaciarias muertas con termocarst
3000 – 3500	Piso del permafrost insular	Glaciares de escombros inactivos y fósiles; ocurrencias aisladas de glaciares de escombros activos; desarrollo de taludes de escombros, erosión lineal; lenguas glaciarias muertas con termocarst
< 3000	Piso andino	Predominio de procesos fluviales y gravitacionales.

Gran parte de la zona sobre los 3800 m.s.n.m. está caracterizada por roca firme con intensa producción de detrito por crioclastía. Esta área alberga además las zonas de acumulación de los glaciares y los campos de nevé.

El cuadro 2 resume la zonificación altitudinal del Cajón de la Casa de Piedra. Se trata de una versión preliminar cuya representatividad para otros sectores de los Andes de Santiago debe ser verificada.

El desarrollo de pequeñas formas periglaciales en el área de estudio, como p.ej. los suelos estriados, está limitado a pocas zonas favorables con presencia de sustratos suficientemente finos.

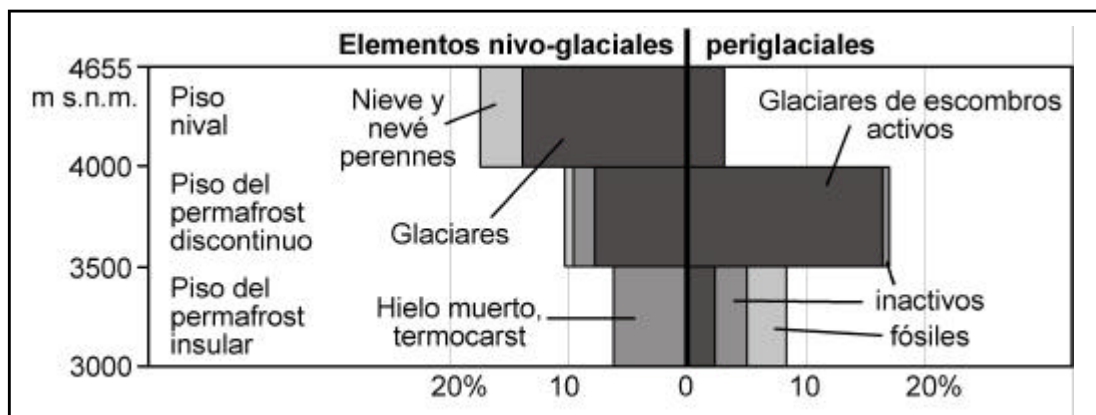
La importancia de los glaciares de escombros activos en el sistema de transporte de sedimento

A continuación se aplica la cuantificación areal de los glaciares de escombros para mostrar la importancia de esas formas en el sistema de transporte de sedimento del Cajón de la Casa de Piedra (comparar BOLCH & SCHRÖDER 2001). Para el cálculo de proporciones de áreas se utiliza como superficie de referencia sólo aquellas áreas que no están caracterizadas por la presencia superficial de roca firme, es decir, el área de referencia comprende las superficies de roca no consolidada, hielo y nieve.

Existe un total de 33 glaciares de escombros (20 activos, 2 inactivos y 11 fósiles) en el Cajón de la Casa de Piedra. Estos comprenden la décima parte (10%) del área de referencia por sobre los 2900 m s.n.m., de la cual más de la mitad (6% del total) está ocupada por las formas activas. Los glaciares (de hielo), en contraste, cubren

sólo un 4% del área de referencia, los cuerpos de hielo muerto otro 4%. Los campos de nieve perenne y nevé ocupan sólo un 0,5%. Las superficies restantes (82%) corresponden, en su mayor parte, a taludes de detrito. La Figura 8 resume las relaciones areales por zona altitudinal.

FIGURA Nº 8: PORCIONES DE SUPERFICIE DE MATERIAL NO CONSOLIDADO OCUPADAS POR ELEMENTOS NIVO-GLACIALES Y PERIGLACIALES EN EL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA.



La importancia de los glaciares de escombros llega a ser aún más evidente si uno considera los trayectos del movimiento de detrito: Casi un tercio (31%) de la superficie total (incluyendo áreas rocosas) sobre los 3000 m.s.n.m., o está cubierto de un glaciar de escombros activo o forma parte de la cuenca geomorfológica de un glaciar de escombros activo. Por lo tanto, los procesos de desplazamiento rápidos del detrito criogénico producido en estas áreas, están limitados hacia abajo por la presencia de glaciares de escombros, con la excepción de eventos circunstanciales de tamaño catastrófico.

Las experiencias hechas en el monitoreo del permafrost de montaña indican que éste se extiende también a zonas cercanas a los glaciares de escombros activos (comparar p.ej. BUCHENAUER 1990 y TROMBOTTO et al. 1999). Por ello, las observaciones del Cajón de la Casa de Piedra sugieren que el permafrost da seguridad a gran parte de las superficies detríticas de los Andes de Santiago ubicadas por sobre los 3500 m.s.n.m. frente a los procesos de desplazamiento rápidos. En cambio, sólo una pequeña parte de las áreas entre los 3000 y 3500 m.s.n.m. se encuentra estabilizada por el permafrost. Su rol estabilizador tiene como consecuencia la necesidad práctica para investigar y monitorear en detalle la variabilidad espacial y temporal del permafrost de alta montaña y de los glaciares de escombros.

Los glaciares de escombros como componentes del sistema hidrológico

Glaciares de escombros como reservorios de agua a largo plazo

Los glaciares de escombros de los Andes de Santiago cumplen en el sistema hidrológico en primer lugar una función como reservorios de agua dulce (cf. CORTE 1976, 1978, SCHROTT 1998). Aun cuando no llegan a ser tan grandes como los poderosos glaciares de las cumbres principales de la región, estos glaciares de escombros contienen, por su mayor número y más amplia distribución, una cantidad considerable de agua. El cuadro 3 presenta algunos datos relacionados.

El inventario de glaciares de la D.G.A. (MARANGUNIC 1979) lamentablemente no distingue entre los glaciares de escombros, cuerpos de hielo muerto y glaciares cubiertos, lo que dificulta la interpretación. Los trabajos efectuados en el Cajón de la Casa de Piedra dan una imagen más clara de la importancia del permafrost frente a otros tipos de recursos hídricos (cuadro 4). Los glaciares de escombros del Cajón de la Casa de Piedra no sólo sobrepasan los glaciares propiamente dichos y cuerpos de hielo muerto, respecto de su número y superficie. Los cálculos propios demuestran además que la cantidad de agua almacenada en estos cuerpos de hielo y escombros es superior a la cantidad de agua de los glaciares recientes y por lo menos igual a aquella de las grandes lenguas de hielo muerto. La menor importancia de los glaciares se debe al reducido tamaño de las superficies por sobre la línea de equilibrio glacial. Sin embargo, ello no es representativo para las cuencas más altas de los Andes de Santiago, pero sí para un gran número de cuencas menores.

CUADRO N° 3: INDICADORES DEL CONSUMO DE AGUA DE SANTIAGO Y DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE SUS CUENCAS DE ALIMENTACIÓN. FUENTES: D.G.A., AGUAS ANDINAS.

Consumo de agua potable en 2000	
Consumo de agua potable en Gran Santiago	aprox. 550 millones de m ³ /a
Aporte promedio Embalse El Yeso	aprox. 79 millones de m ³ /a
Aporte Embalse El Yeso en mayo de 2000	aprox. 60%
Recursos hídricos de la cuenca del río Yeso	
Agua del Embalse El Yeso	aprox. 193 millones de m ³
Agua de los glaciares de escombros, cuerpos de hielo muerto y glaciares cubiertos	aprox. 210 millones de m ³
Agua de los glaciares descubiertos	aprox. 1980 millones de m ³
Recursos hídricos de la cuenca del río Maipo	
Agua de los glaciares de escombros, cuerpos de hielo muerto y glaciares cubiertos	aprox. 2,7 mil millones de m ³
Agua de los glaciares descubiertos	aprox. 28 mil millones de m ³

CUADRO 4: LOS GLACIARES DE ESCOMBROS Y GLACIARES DEL CAJÓN DE LA CASA DE PIEDRA (32 KM²) SEGÚN LA D.G.A. (MARANGUNIC 1979) Y LOS PROPIOS CÁLCULOS. (VALORES REDONDEADOS; LOS CÁLCULOS ESTÁN BASADOS EN UN ESPESOR DE HIELO DE 0,8 G/CM³ Y, EN LOS CASOS MARCADOS POR (*), UN CONTENIDO DE HIELO DE 60%. VÉASE EXPLICACIONES EN SECCIÓN 1.2.)

	Propios cálculos			Según D.G.A.	
	Glaciares de escombros activos (*)	Cuerpos de hielo muerto	Glaciares	Gl. de escombros, hielo muerto, gl. cubiertos (*)	Glaciares descubiertos
Número	20	1	4	7	8
Área [km ²]	1,0	0,6	0,6	2,05	0,68
Volumen [km ³]	0,02 – 0,03	0,013	0,011	0,087	0,012
Equivalente de agua [millones de m ³]	10 – 14	10,4	8,8	41,9	9,2
Equivalente de precipitaciones [mm]	300 – 450	325	275	1305	300
Cantidad de material detrítico [mill. m ³]	8 – 12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Porción del área por sobre los 3000 m s.n.m.	10%	4%	4%	n.d.	n.d.

Las diferencias significativas de los propios resultados respecto de aquéllos de MARANGUNIC (1979) radican en diferencias en la clasificación y en el método de estimación volumétrica. En el caso del inventario de glaciares, ese método está basado en una relación empírica entre superficie y espesor. Sin embargo, la aplicación de esta relación a los glaciares de escombros y las lenguas glaciarias muertas de ya reducido espesor, no es apropiada. La falta de diferenciación entre glaciares de escombros, cuerpos de hielo muerto y glaciares activos puede agregar importantes errores a la estimación volumétrica. A modo de ejemplo, según el inventario de glaciares, el “glaciar de roca” n° 44, el cual se extiende, en figura 6, del glaciar de escombros n° 44b hasta el glaciar de los Cerros Picos Negros, presenta una superficie superior a 1 km², lo cual lleva a la estimación errónea de un espesor promedio de 65 m (!). Según las observaciones en terreno, el espesor promedio del cuerpo de hielo muerto debe estar del orden de los 20 m, y el pequeño glaciar actual también tiene un espesor menor al valor asumido en el inventario.

Respecto de la cantidad total de agua almacenada en los glaciares de escombros de los Andes de Santiago, surge la pregunta si la relación cuantitativa entre los valores presentados por el autor y aquellos del inventario de glaciares es representativa para toda la zona. Esta relación es de 1:4 a 1:3 en el caso de los volúmenes de agua

almacenados por los glaciares de escombros del Cajón de la Casa de Piedra (cuadro 4). La relación de 1:4 puede asumirse como límite inferior para todos los Andes de Santiago teniendo en cuenta que los cuerpos de hielo muerto y lenguas glaciarias mayores se sitúan casi todos en exposición Sur, limitando la distribución de los glaciares de escombros tal como fue observado en el Cajón de la Casa de Piedra. Aceptando esta suposición, se llega a un equivalente de agua líquida superior a los 0,67 km³ la cual está almacenada en los glaciares de escombros de los Andes de Santiago, todo un sistema montañoso de aprox. 6600 km² de superficie, es decir, 0,1 km³ por 1000 km². Este es un valor muy alto comparado con los Alpes suizos, por ejemplo: Allí, los 0,8 km³ de agua almacenada en glaciares de escombros están distribuidos por un área de alta montaña del orden de 24.000 km² de superficie (0,03 km³ por 1000 km²; BARSCH 1988).

La importancia relativa de los glaciares de escombros aumenta al Norte de Santiago y en el lado argentino de los Andes debido a la mayor altitud de la línea de equilibrio de los glaciares.

La mayor parte del agua almacenada dentro de un glaciar de escombros no se derrite, sino por un recalentamiento climático. En tal caso, un glaciar de escombros activo o inactivo se convierte en una forma fósil. El hielo de un glaciar de escombros se encuentra eliminado del ciclo

hidrológico más rápido del agua líquida durante un largo tiempo, probablemente milenios. Como consecuencia, los glaciares de escombros activos pueden ser considerados básicamente como sumideros de agua en el sistema hidrológico.

La cantidad de agua almacenada en los Andes de Chile Central en el permafrost, aparte de los glaciares de escombros, está completamente desconocida. Una indicación del permafrost discontinuo mediante el límite inferior de la distribución de los glaciares de escombros, sólo puede ser un primer paso; por tanto, se debe continuar con un monitoreo geofísico de contenidos y espesores del hielo del permafrost andino (cf. p.ej. TROMBOTTO et al. 1997).

Los glaciares de escombros y el almacenamiento de agua a corto plazo

Los glaciares de escombros tienen, aparte de su función como reservorios de agua a largo plazo, un papel como reservorio a corto plazo, el cual es importante para el régimen fluvial de las cuencas andinas. En invierno temprano, cuando el frente de las heladas del suelo asciende, el cuerpo del permafrost crece y retiene agua adicional en forma de hielo subterráneo. Se trata principalmente de agua infiltrada de la fusión diurna, que proviene de campos de nieve o nevé, avalanchas y las precipitaciones (casi exclusivamente sólidas). El hielo subterráneo formado en la capa activa se descongela en el verano siguiente, y el cuerpo de hielo se retira hasta la superficie del permafrost. De esta manera vuelve a incorporarse el hielo subterráneo estacional al ciclo del agua líquida. Además existe un importante ritmo diario de congelamiento y descongelamiento.

Por lo tanto, se estima que el régimen fluvial de las cuencas andinas a la latitud de Santiago se caracteriza por una fuerte influencia periglacial. Consecuentemente, se sugiere hablar de un régimen nival-glacial-periglacial.

En términos generales, el aporte de agua proveniente del hielo subterráneo es más uniforme que aquélla de los glaciares y neveros (TROMBOTTO et al. 1999). Ello se debe por una

parte a la fusión estacional más lenta del hielo subterráneo; por la otra, este líquido fluye principalmente como agua subterránea a través de sedimentos cuaternarios, mientras que el agua de fusión de origen superficial corre por pequeños arroyos torrenciales. El Cajón de la Casa de Piedra representa un buen ejemplo: Una pequeña depresión a los 2890 m.s.n.m. valle abajo del glaciar de escombros 44a constituye la base local de erosión que ni siquiera es alcanzada por un arroyo episódico. Más aun, un arroyo de agua de fusión que baja por la ladera oriental del Cerro Punta Negra, desaparece en el subsuelo al llegar al valle principal y aporta a la formación de agua y hielo subterráneos, dependiente de la época del año.

Conclusiones

En los Andes de Santiago, los glaciares de escombros constituyen la forma de mesorrelieve periglacial más importante, tanto por su ocurrencia en extensión como por su papel desacelerador en el transporte de sedimentos. Ello fue comprobado por métodos cuantitativos en el caso del Cajón de la Casa de Piedra.

La presencia de los glaciares de escombros en gran extensión, corrobora la existencia de permafrost por sobre los 3500 m.s.n.m. Aisladas geoformas indican la presencia de permafrost insular a los 3000 m.s.n.m. Se supone que esas ocurrencias se deben a condiciones climáticas locales relacionadas con el relieve.

En cuanto a las subcuencas moderadamente englazadas como el Cajón de la Casa de Piedra, la importancia de los glaciares de escombros activos como recursos hídricos sobrepasa a la de los glaciares recientes.

En comparación con los Alpes suizos, la cantidad de agua almacenada en los glaciares de escombros activos de la Cordillera de Santiago alcanza valores más altos que en Europa.

Agradecimientos

El autor les agradece al Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la D.G.A. por su amable cooperación, y al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por financiar la estadía en Chile. Además quiere expresar sus agradecimientos a M. C. Cabrera y su familia por su hospitalidad, y a los estudiantes M. García, E. Sagredo y C. Vásquez por su colaboración en el trabajo de campo. Finalmente, muchas gracias a T. Bolch, H. Schröder y D. Trombotto por revisar el manuscrito.

Bibliografía

ABELE, G. Derrumbes de montaña y morrenas en los Andes chilenos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 1984, N° 11, pp 17–30.

ARENSON, L., HOELZLE M. y SPRINGMAN, S. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, n° 13, pp 117-135.

BARSCHE, D. Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. *Proc. Third Intl. Conf. on Permafrost*, 1978, Vol. 1, pp 349–353.

BARSCHE, D. Probleme der Abgrenzung der periglazialen Höhenstufe in semi-ariden Hochgebirgen am Beispiel der Mendozinischen Anden. *Argentinien: Geoökodynamik*, 1986, n° 7, pp 215–228.

BARSCHE, D. Rockglaciers. IN CLARK, M. *Advances in Periglacial Geomorphology*. John Wiley & Sons, 1988, pp. 69–90.

BARSCHE, D. *Rockglaciers*. Springer, Berlin: 1996, 331 p.

BOLCH, T. y SCHRÖDER, H. Geomorphologische Kartierung und Diversitätsbestimmung der Periglazialformen am Cerro Sillajhuay (Chile/Bolivien). *Erlanger Geogr. Arbeiten*, 2001, Sonderband 28.

BUCHENAUER, H. W. Gletscher- und Blockgletschergeschichte der westlichen Schobergruppe (Osttirol). *Marburger Geogr. Schriften*, 1990, 117, 376 pp.

CLAYTON, L. Karst topography on stagnant glaciers. *J. Glaciology*, 1964, N° 5, pp. 107–112.

CONTRERAS, A. y ILLANES, J. L. Depósito de lastre glaciar Infiernillo Sur Mina Los Bronces. *43a Convención del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile*. La Serena, octubre, 1992, 18 pp.

CORTE, A. E. The hydrological significance of rock glaciers. *J. Glaciology*, 1976, N° 17, pp. 157-158.

CORTE, A. E. Rock glaciers as permafrost bodies with a debris cover a an active layer. A hydrological approach. Andes of Mendoza, Argentine. *Third Intl. Conf. on Permafrost, NRC*. Ottawa: 1978, pp. 262–269.

ESCOBAR, F. et al. *Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte 1975 a 1992: resultados preliminares*. Santiago: Informe técnico, D.G.A., 1995.

EVIN, M. Glaciers et glaciers rocheux sur le versant nord-est du Viso (Alpes Cottiennes, Italie). *Rev. Géomorph. Dynamique*: 1991, N° 40, pp. 131–147.

HAEBERLI, W. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 1985, N° 77, 142 pp.

KNEISEL, C. Et al. Legende für geomorphologische Kartierungen in Hochgebirgen (GMK Hochgebirge). *Trierer Geogr. Studien*: 1998, N° 18.

KOKAREV, A. Et al. Die Blockgletscher im Sailijskij Alatau des Tienschan (Kasachstan). *Hallesches Jahrb. Geowiss*: 1997, N° 19, pp. 81–94.

MARANGUNIC, C. *Inventario de glaciares, hoyo del río Maipo*. Santiago: D.G.A.. 1979.

SCHROTT, L. The hydrological significance of high mountain permafrost and its relation to solar radiation. A case study in the high Andes of San Juan, Argentina. *Bamberger Geogr. Schriften*, 1998, N° 15, pp. 71-84.

TROMBOTTO, D. et al. Monitoring of mountain permafrost in the Central Andes, Cordon del Plata. *Permafrost and Periglacial Processes.*, 1997, N° 8, pp. 123-129.

TROMBOTTO, D., Et al. Rock glaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°-34°S), Cordillera Frontal. *Bamberger Geogr. Schriften.*, 1999, N° 19, pp. 145-173.

TROMBOTTO, D. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. *Rev. do Instituto Geológico*, São Paulo: 2000, N° 21 (1/2), pp. 33-55.