

## EL PERMAFROST ANDINO, REDUCTO DE LA CRIÓSFERA EN EL BORDE ORIENTAL DE LA PUNA, NO DE ARGENTINA.

Ana Lía Ahumada<sup>1,2</sup>, Gloria Patricia Ibáñez Palacios<sup>1</sup> y Silvia Verónica Páez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas- Fundación Miguel Lillo.

<sup>2</sup> CONICET

Miguel Lillo 251- C/P 4000-San Miguel de Tucumán-Argentina.

[ana-ahumada@argentina.com](mailto:ana-ahumada@argentina.com)

### Resumen

La criósfera está representada en las altas montañas del NO argentino, borde oriental de la Puna, por la presencia de permafrost de montaña con glaciares de escombros. En la región se han determinado glaciares de escombros criogénicos y glaciogénicos.

Los glaciares de escombros activos se encuentran ubicados de S a N en alturas desde 4.000 a 4.850 m s.n.m., entre los 27° 22' y los 22° 07' Lat S.

El objetivo de esta presentación es determinar el número de cuencas hídricas superficiales que los contienen.

Los resultados obtenidos han permitido detectar la presencia de permafrost andino en las cabeceras de 4 cuencas hídricas superficiales. Estas son:

1-Cuenca del Salí Dulce:

- Nevados del Aconquija. Tucumán.
- Cumbres Calchaquíes. Tucumán.

2-Cuenca alta del Río Juramento:

- Nevados del Aconquija. Catamarca.
- Nevados de Catreal. Catamarca.
- Nevados de Cachi. Salta.

3-Cuenca del Río San Francisco:

- Nevados del Chañi. Cca alta del Río Perico  
Manantiales. Jujuy.

4-Cuenca del Bermejo Superior:

- Sierra de Santa Victoria. Jujuy.

Tres de estas cuencas están vinculadas a la generación de energía hidroeléctrica o distribución de riego y agua potable. La cuenca restante abastece la provisión permanente de agua en los valles productivos de altura.

Conclusiones: los cambios producidos por el calentamiento global se manifestarán como descongelamiento del permafrost. Esto incrementará la sedimentación y facilitará la erosión de las laderas y deslizamientos.

Este reconocimiento areal del permafrost de montaña permitirá evaluar los recursos hidrológicos vinculados al suelo congelado y sus posibles alteraciones por el cambio global, para generar mecanismos de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidad regional.

### Abstract

In the NW high mountains of Argentina, Puna oriental borderland, the cryosphere is represented by mountain permafrost. The active rock glaciers are situated in this region between 4000–4850 m s.n.m. The active front altitude increases from S to N. Cryogenic and glaciogenic rock glaciers are determined in this region.

The Andean permafrost presence are detected at the head to four superficial hydric basins. They are:

1- Salí-Dulce Basin:

- Nevados del Aconquija-Tucumán.
- Cumbres Calchaquíes- Tucumán.

2- Juramento High Basin River:

- Nevados del Aconquija. Catamarca.
- Nevados de Catreal. Catamarca.
- Nevados de Cachi. Salta.

3- San Francisco Basin River:

- Nevados del Chañi. Perico Manantiales High Basin River. Jujuy.

4- Bermejo Superior Basin:

- Sierra de Santa Victoria. Jujuy.

Three basins are vinculated to hydroelectric energy generation or irrigation and fresh water. The fourth basin supplies the permanent water resources in the high productive valleys.

The warming global changes can be provoke permafrost thawing. The melt of permafrost could cause increment of sedimentation, slope erosion as well as rock falls.

Potential negative impacts in the terrain stability and water resources must be considered in future sustainable managements for this region.

## Introducción

Los efectos del Cambio Climático Global afectan fuertemente los parámetros físicos que condicionan la estabilidad de la criósfera del planeta.

La criósfera es el sistema de la Tierra que permanece congelado por un año o estacionalmente. Está constituida por la cobertura de nieve, mares, lagos y ríos congelados, glaciares, calotas glaciales y suelos permanentemente congelados o permafrost.

Las montañas son los ambientes más sensibles de nuestro globo y son tomadas como indicadores de Cambio climático. En el futuro, debido a su baja densidad poblacional y al uso turístico frecuente, serán objeto de observaciones de primera magnitud con respecto a la criósfera. Por un lado, por los costos para mantener grandes empresas turísticas de altura (pistas de esquí, por ejemplo). Pero por otro lado, y de mayor importancia, por aquel concepto desarrollado por Messerli e Ives (1997) que definieran a las montañas como las torres de agua del mundo. Las regiones de montaña conciertan muchos intereses humanos, pero en lo que respecta al uso de la criósfera, en particular el agua que contiene, su gestión está poco desarrollada debido a la falta de información de base, por su inaccesibilidad, como datos meteorológicos continuos, rasgos geomorfológicos, comportamiento geocológico, etc. Por ejemplo: la producción de energía hidroeléctrica con seguridad óptima no será posible a largo plazo con el descongelamiento de los glaciares, ya que se incrementarán los caudales y la sedimentación y habrá un aumento en la inestabilidad de las pendientes. Al disminuir la resistencia mecánica de las laderas por descompresión, se generarán desastres naturales como movimientos en masa o flujos de detritos. De igual manera el descongelamiento del permafrost facilitará la erosión de las laderas y deslizamientos. (De Jong, 2007). Estos sucesos generarán grandes cambios en las comunidades de montañas y próximas generando modificaciones en sus economías, por lo que se hace cada vez más necesario tener un conocimiento concreto de las regiones que podrán ser afectadas y generar mecanismos de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidad regional.

La criósfera se encuentra representada en las altas montañas del NW argentino, en el borde oriental de la Puna delimitado por el ambiente morfoestructural de Sierras Pampeanas y Cordillera Oriental por la presencia de permafrost de montaña, en las altas cumbres de los macizos de Nevados de Aconquija, Nevados de Catreal y Chuscha, Cumbres Calchaquíes, Nevados de Cachi, Nevados de Chañi y Sierras de Santa Victoria y Zenta, el que se manifiesta topo-climáticamente en el paisaje con glaciares de escombros y una asociación de geoformas menores generadas por el congelamiento permanente o estacional de los suelos. Su presencia es poco conocida y ello hace que no sean considerados en las evaluaciones de recursos hídricos tradicionales.

Los glaciares de escombros activos, indicadores de permafrost discontinuo, se encuentran ubicados de S a N en alturas desde 4000 a 4850 m s.n.m. en la región. Los glaciares de escombros son importantes por que producen un volumen de agua semejante al generado por glaciares de hielo; el agua que liberan tiene menos material suspendido que la de los glaciares y su núcleo de hielo se encuentra protegido, de manera que serían más resistentes en el tiempo a las modificaciones de temperatura de altura. En la región los glaciares de escombros existen simultáneamente con circos glaciales y eventualmente con campos de nieve permanente. La información de base meteorológica es muy escasa y el conocimiento de su comportamiento hidrológico es inexistente.

El objetivo de este trabajo es determinar el número de cuencas hídricas superficiales que los contienen.

#### **Desarrollo.Descripción y Estimación del permafrost de montaña.**

Los glaciares de escombros son geoformas criogénicas que constituyen el permafrost discontinuo o insular en las altas montañas del mundo. Son mesoformas sedimentarias formadas por rocas y detritos congelados, con hielo lenticular e intersticial que se mueven pendiente abajo muy suavemente, a bajas velocidades ( $0,1 - 1,0 \text{ m a}^{-1}$ ), por medio de deformación plástica y reptación del permafrost. Los glaciares de escombros están formados por una mezcla de un 40 a un 60% de material clástico y 60 a 40% de hielo (hielo de segregación, intersticial o en lentes (Haeberli, 1985, Barsch 1996)). Sobre esta masa se desarrolla una cobertura de escombros que constituyen la capa activa de descongelamiento estacional. Esa capa cumple una función aislante e impide el descongelamiento del permafrost que está debajo. En general se sostiene que para su formación, crecimiento y preservación deben mantener temperaturas menores de  $-1^{\circ}\text{C}$ .

En base a extensos trabajos geofísicos y geomorfológicos en la investigación del fenómeno de glaciares de escombros en los Alpes Suizos, Haeberli (1975) estableció reglas mínimas para predecir la ocurrencia de permafrost en alta montaña en base a valores topo-climáticos. Posteriormente formuló el modelo climático (Haeberli, 1985) que representa la actividad de los glaciares de escombros: el límite superior de precipitación anual para la formación de glaciares de escombros es de 2500 mm anuales y  $-2^{\circ}\text{C}$  de temperatura y el inferior, 400 mm anuales y  $-15^{\circ}\text{C}$  de temperatura.

El rol de los glaciares de escombros en el sistema hidrológico de los ambientes de alta montaña del mundo ha sido muy estudiado debido a su importancia como reservorio de agua dulce a largo plazo (Corte, 1976, 1978, Haeberli, 1985, Giardino et al., 1992, Clow et al., 2003; Brenning, 2005). La descarga de glaciares de escombros activos está caracterizada por variaciones anuales estacionales. Se sostiene que el

régimen de agua proveniente de hielo subterráneo es más uniforme que el de los glaciares y ventisqueros (Trombotto et al., 1999).

Las regiones de montaña del NW argentino presentan grandes dificultades de acceso, lo que implica altos costos de exploración. La región es extensa y no se encuentran accesibles los mismos medios en los distintos cordones montañosos en revisión. Se implementaron métodos tradicionales en este tipo de exploración de orden regional, en dos fases:

1- En gabinete: - se obtuvieron datos climáticos regionales de los cordones montañosos estudiados (Bianchi y Yáñez, 1981 y Minetti, 2005) para establecer condiciones de precipitación y temperatura estimadas estadísticamente en base a datos existentes de distinta proveniencia.

- Se realizó la identificación y determinación de la distribución de glaciares de escombros y formas asociadas mediante la interpretación de fotografías aéreas de la región, las que fueron realizadas en la década del 60-70 a escala 1:50.000 en los Nevados de Aconquija, Nevados de Catreal, Cumbres Calchaquíes y Nevados de Chañi .

- Se realizó el control con imágenes satelitales recientes (Landsat TM y en algunos casos las imágenes IKONOS disponibles en Google Earth). Los Nevados de Cachi fueron observados por el grupo de trabajo sólo por estos medios ya que fueron inventariados por Igarzábal (1983) mediante fotografías aéreas.

2- En terreno: - control de campo. La verificación de campo es necesaria para controlar la información obtenida por imágenes. La elevación, pendientes y otros aspectos geomorfológicos relacionados son verificados en el trabajo de campo. Estas tareas se realizaron especialmente en Sierra de Aconquija, donde los accesos a estas alturas son sólo posibles a lomo de mula y en Sierra de Santa Victoria y de Zenta donde algunas zonas tienen un acceso sencillo, sólo con dificultades por cuestiones climáticas (peligro de deslizamientos, etc.) en determinadas épocas del año.

Resultados alcanzados.

La información climática de precipitación y temperaturas obtenidas de Bianchi y Yáñez (1981) y de Minetti (2005) han permitido obtener los datos que se muestran a continuación para la región topo-climática de alta montaña (ubicada por arriba de los 4000 m s.n.m.) de los cordones estudiados:

**Tabla1. Información climática de precipitación y temperaturas obtenidas de Bianchi y Yáñez (1981) y de Minetti (2005).**

Localidad	N. de Catreal y Chuscha	N. de Cachi	N. de Aconquija	Cumbres Calchaquíes	Sa. de Santa Victoria y Zenta	N. de Chani
T. media anual °C (Minetti, 2005)	12	8	8	12	8	8
T. mínima anual °C (Minetti, 2005)	0	-4	4	8	-2	-2
T. máxima anual °C (Minetti, 2005)	16	16	16	24	18	16
P. media anual mm (Minetti, 2005)	200	200	300-400	200	200-400	300
(Bianchi y Yáñez, 1981)	200-400	200-400	300-400	300	300-400	300

(Minetti, 2005) Aires: Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 2009

ISBN 978-987-25291-1-6. 200-400 de 200-400. 300-400. 300. 300-400. 300

(Bianchi y Yáñez, 1981)

**De la observación de los datos de precipitación y temperatura de las regiones montañosas estudiadas es posible deducir que el ambiente de actividad de los glaciares de escombros no se encuentra dentro del marco de las condiciones de preservación establecidas por el modelo de Haeberli (1985). Las condiciones geocológicas de estas macroformas son resilientes y se encuentran en desequilibrio con el clima actual.**

La determinación de áreas con glaciares de escombros activos mediante la fotointerpretación y la observación de imágenes satelitales nos han permitido:

**1- Determinar glaciares de escombros activos, inactivos, relícticos, de origen glacial o secundarios y morenas.**

2- Contrastar nuestros mapas de cuencas de altura con el mapa digital de las Cuencas y Regiones Hídricas superficiales de la República Argentina (Giraut et al., 2007.) publicado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, lo que nos permitió detectar la presencia de permafrost andino en las cabeceras de 4 cuencas hídricas superficiales. Estas son:

a-Cuenca del Salí Dulce:

- Nevados del Aconquija. Tucumán: en la ladera Oriental de Aconquija se han detectado e inventariado 7 cabeceras de cuencas con glaciares de escombros activos desde los 4.000 m s.n.m. El área de observación por imágenes en toda la sierra cubre 600 km<sup>2</sup>.

- Cumbres Calchaqués. Tucumán: en las cabeceras de cuenca que exponen al Este se han detectado glaciares de escombros activos pequeños pero significativos debido a las condiciones topo-climáticas en las que se encuentran, desde 4.260 m s.n.m. El área de observación por imágenes cubre 128 km<sup>2</sup>.

b-Cuenca alta del Río Juramento:

- Nevados del Aconquija. Catamarca: en la ladera Occidental de Aconquija se han detectado e inventariado 8 cabeceras de cuencas con glaciares de escombros activos desde los 4200 m s.n.m. El área de observación por imágenes en toda la Sierra cubre 600 km<sup>2</sup>. (Ahumada et al., en preparación).

- Nevados de Catreal. Catamarca: se determinaron glaciares de escombros de talud o activos, indicadores de permafrost discontinuo Altitudinalmente se encuentran desde 4.254 m s.n.m. aproximadamente. El área de observación por imágenes cubre aproximadamente 400 km<sup>2</sup>.(Ahumada et al., 2008b).

- Nevados de Cachi. Salta.: se observó la presencia de glaciares de escombros activos a partir de 4400 m s.n.m. El área de observación por imágenes cubre alrededor de 1440 km<sup>2</sup>.

c-Cuenca del Río San Francisco:

- Nevados del Chañi. Cca alta del Río Perico Manantiales. Jujuy: se ha detectado la presencia de glaciares de escombros activos a partir de 4100 m s.n.m. El área de observación por imágenes cubre 952 km<sup>2</sup>.

d-Cuenca del Bermejo Superior:

- Sierra de Santa Victoria-Zenta Jujuy-Salta: se reconocieron a campo glaciares de escombros activos, de talud desde los 4300-4200 m s.n.m. El área de observación por imágenes cubre una extensa región de aproximadamente 2000 km<sup>2</sup>.

Tres de estas cuencas están vinculadas a la generación de energía hidroeléctrica o distribución de riego y agua potable. La cuenca restante abastece la provisión permanente de agua en los valles productivos de altura.

Conclusiones.

El rol de los glaciares de escombros en el sistema hidrológico de los ambientes de alta montaña del mundo ha sido muy estudiado debido a su importancia como reservorio de agua dulce a largo plazo. La descarga de glaciares de escombros activos está caracterizada por variaciones anuales estacionales. Se sostiene que el régimen de agua proveniente de hielo subterráneo es más uniforme que el de los glaciares y ventisqueros.

**Las condiciones geocológicas de estas macroformas criogénicas en el NW de Argentina son resilientes y se encuentran en desequilibrio con el clima presente. El “escenario” actual es un excelente modelo natural de campo para estudiar el comportamiento de las variables físicas que condicionan su permanencia ante las modificaciones de temperatura generadas por el Calentamiento Global sin el uso de simulaciones.**

**Mediante el uso de metodologías tradicionales y control de campo, los glaciares de escombros activos se encuentran en el NW de Argentina en las cabeceras de 4 cuencas hídricas superficiales catalogadas de acuerdo con el reciente Mapa Digital de Cuencas Hídricas Superficiales de la República Argentina.**

Este reconocimiento formal de la ubicación geográfica del permafrost de montaña en las cabeceras de cuencas hídricas del NW de Argentina, su condición de reservorio de agua dulce y posteriores estudios del comportamiento de los procesos relacionados para su mejor conservación, permitirá evaluar los recursos hidrológicos vinculados al suelo congelado y sus posibles alteraciones por el calentamiento global, para generar mecanismos de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidad regional.

### **Bibliografía**

- Ahumada, A. L.; Ibáñez Palacios, G. P. y Páez, S. V. 2005. High Mountain permafrost in the argentine subtropic. 19th Colloquium on Latin American Geosciences. Potsdam. Terra Nostra, 05/1: 9. Berlin
- Ahumada, A. L.; Ibáñez Palacios, G. P. y Páez, S. V. 2008a. Geoindicadores de calentamiento global en Cumbres Calchaquíes. Primeras Jornadas Universitarias del Norte Grande sobre Medioambiente - JUNGrA 2008. San Miguel de Tucumán: 56.
- Ahumada, A. L.; Ibáñez Palacios, G. P. y Páez, S. 2008b. Reconocimiento de *permafrost andino* en las Nacientes del Río Santa María, Catamarca. IV Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida. 5º Congreso de Ambiente y Calidad de Vida. Catamarca 24 al 26 de setiembre de 2008: 345.
- Barsch, D. 1996. Rockglaciers. Springer, Berlín: 331 pp.
- Bianchi A. R., Yañez C.E. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino 2<sup>da</sup> Ed. INTA EEA Salta.
- Brenning, A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33°-35°S). Permafrost and Periglacial Processes 16:231-240.
- Clow, D.W., Schrott, L., Webb, R., Campbell, D.H., Torizzon, A., y Dornblaser, M. 2003. Ground Water occurrence and contributions to streamflow in an alpine catchment, Colorado Front Range. Ground Water 41: 937-950.
- Corte, A. E. 1976. Rock Glaciers. Biuletyn Periglacialny, 26:157-197
- De Jong, C. 2007. Cryosphere- a CRY for our SPHERE?. Geophysical Research Abstracts, 9: 10760.
- Giardino, J. R., Vitek, J.D., Demorett, J. L. 1992. A model of water movement in rock glaciers and associated water characteristics. En: J.C. Dixon, A.D. Abrahams (eds.). Periglacial Geomorphology. Wiley, Chichester :159-184

- Giraut M., Ludueña, S., Postiglioni, C., Dente, M. y Sol I. 2000. Cartografía hídrica digital de la República Argentina. X Congreso Nacional de Cartografía y VII Semana Nacional de Cartografía. Buenos Aires. Argentina.
- Haerberli, W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Nr. 77: 142 pp.
- Igarzábal, A. 1983. El sistema glaciolítico de la Cuenca Superior del Río Juramento, Provincia de Salta. VIII Congreso Geológico Argentino, Actas IV: 167-183.**
- Messerli, B. and Ives, J.D. (eds.) 1997: Mountains of the World. A Global Priority. Parthenon, New York and London: 495 pp.
- Minetti J. L. 2005. El clima del Noroeste Argentino. Ed. Magna. Tucumán. 450pp.**
- Trombotto, D., Buk, E. & Hernández, J. 1999. "Rock glaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°-34° S), Mendoza, Argentina: a review". Bamberger Geographische Schriften 19: 145-173.