

Observaciones geomorfológicas en glaciares de escombros de los Andes tropicales de Argentina

Ahumada, A. L.^{1,2}; Ibáñez Palacios, G. P.¹; Carilla, J.^{2,3}; Toledo, M. A.¹; Páez, S. V.¹

¹ Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo. Miguel Lillo 251, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina. anaa.gavri@gmail.com

² CONICET, Miguel Lillo 251, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina.

³ Instituto de Ecología Regional, Universidad Nacional de Tucumán, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina.

► **Resumen** — La degradación del permafrost es uno de los factores cruciales de los que depende la estabilidad de laderas en alta montaña y está fuertemente relacionada con las alteraciones y los cambios atmosféricos vinculados al cambio climático. La presencia de glaciares de escombros activos indica condiciones de permafrost de montaña. Constituyen reservorios hídricos congelados. Son capaces de desplazar grandes volúmenes de detritos y ante las actuales modificaciones climáticas el proceso puede acelerarse. Estos sedimentos potencialmente inestables, que se ubican en la zona de iniciación de flujos de detrito, requieren detección, mapeo como etapa preliminar y posterior seguimiento para la prevención de desastres naturales. En las cabeceras de la Alta cuenca del río Bermejo, sierra de Santa Victoria, entre 22°08' y los 23°00' de latitud Sur [trópico de Capricornio] y entre 65° y 65°30' de longitud Oeste, se inventariaron glaciares de escombros utilizando imágenes satelitales (Aster, Spot y CBERS2), inspección visual con Google Earth, con comprobación en terreno en 27 geoformas. En algunos glaciares de escombros se detectaron y describieron rasgos de degradación. Estos indicadores son objeto de atención especial en este trabajo. Esta región intertropical de los Andes Áridos es vulnerable al calentamiento global, por la fragilidad de los ecosistemas y la alta vulnerabilidad de la población. Los recursos hídricos y la estabilidad de las laderas son cruciales para la población local y sus economías. Se aporta al conocimiento y estado de la criósfera regional para promover la adaptación a los cambios que ocurrirán.

Palabras clave: Permafrost de montaña, glaciares de escombros, sierra de Santa Victoria, degradación, peligros naturales.

► **Abstract** — "Geomorphological observations on rock glaciers of the Tropical Andes of Argentina". Permafrost degradation is one of the crucial factors for the stability of slopes in high mountains and is strongly related to disturbances and atmospheric changes linked to climate change. The presence of active rock glaciers indicates mountain permafrost conditions. These landforms are frozen water reservoirs. They are able to move large volumes of debris. Current climatic changes can accelerate this process. These potentially unstable sediments, which are located in the initiation of debris flows, require detection, mapping and preliminary stage and monitoring for the prevention of natural hazards. In the headwaters of the Upper Bermejo river, Sierra de Santa Victoria, between 22°08' and 23°00' south (Tropic of Capricorn) and between 65° and 65°30' west, rock glaciers were inventoried using satellite imagery (Aster, Spot and CBERS2), visual inspection with Google Earth, field-tested in 27 landforms. In some rock glaciers features of degradation were detected and described. These indicators are subject of special attention in this paper. This intertropical Dry Andes region is particularly vulnerable to global warming, by the fragility of ecosystems and the high vulnerability of the population. Water resources and slope stability are crucial for local population and its economies. This work provides the knowledge and state of the cryosphere regional baseline information to promote adaptation to changes.

Keywords: Mountain permafrost, rock glaciers, Sierra de Santa Victoria, degradation, natural hazards.

1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes criosféricos de las altas montañas del mundo (Alpes, Andes, Himalaya) son susceptibles a las alteraciones y los cambios atmosféricos vinculados al cambio climático. El ritmo de los cambios no tiene precedentes históricos. La biodiversidad y las comunidades humanas que se han asentado en regiones de montaña desde tiempos inmemoriales actualmente han incrementado su exposición y vulnerabilidad a una amplia gama de peligros naturales provocados por el retroceso de glaciares y degradación del permafrost (IPCC, 2013).

La presencia de glaciares de escombros activos indica condiciones de permafrost de montaña. Los glaciares de escombros son geoformas criogénicas meso-escalares de alta montaña constituidos por una mezcla de hielo y materiales no consolidados moviéndose pendiente abajo. En la superficie muestran algún grado de selección, arrugas y surcos, productos de la deformación de la mezcla de hielo y detrito que son indicadores de mecanismos de flujo (Haeberli, 1985, Trombotto y Ahumada, 2005, entre otros). Estas geoformas son reservorios hídricos congelados, capaces de desplazar grandes volúmenes de detritos y ante las actuales modificaciones climáticas el proceso puede acelerarse. Estos sedimentos potencialmente inestables, que se ubican en la zona de iniciación de flujos de detrito, requieren detección y mapeo como etapa preliminar y posterior seguimiento para la prevención de desastres naturales.

Este trabajo describe evidencias geomorfológicas de degradación en glaciares de escombros detectadas en gabinete y en el control de campo del inventario de glaciares de escombros realizado en la cuenca Alta del río Bermejo (Ahumada *et al.*, 2014) que constituyen un factor de peligro natural a registrar en este marco geográfico-climático del territorio de los Andes del trópico de Argentina.

2. ÁREA DE TRABAJO

La sierra de Santa Victoria es la cadena montañosa más septentrional de la provincia geológica de la Cordillera Oriental y configura el límite interprovincial entre Jujuy y Salta. El área de estudio, Alta Cuenca del río Bermejo (Figura 1), se localiza en la ladera oriental de la sierra de Santa Victoria, desde los 3800-4000 m snm hasta los 5000 m snm o más, donde se desarrolla la red de avenamiento que contiene las nacientes de la Alta cuenca de río Bermejo con una topografía muy accidentada e inaccesible, y constituye geomorfológicamente el piso geocriogénico superior que contiene glaciares de escombros los que son indicadores de permafrost de montaña.

La sierra de Santa Victoria se extiende entre los 22°08' y los 23°00' de latitud Sur (trópico de Capricornio) y entre 65° y 65°30' de longitud Oeste. Es un cordón longitudinal angosto orientado en dirección norte-sur en su tramo septentrional y en su sector austral posee una variación en su dirección pasando a ser nornordeste-sudsudoeste como consecuencia de sucesivos desplazamientos estructurales hacia el oeste. Con alturas superiores a 5000 m snm, sus alturas máximas son el Cerro Azul Casa (5009 m snm), el Cerro Fundición (5050 m snm), Cerro Negro (5029 m snm) y el Cerro Campanario (4730 m snm).

En su conformación geológica se destacan afloramientos del basamento representados por la Formación Puncoviscana (de edad precámbrica-eocámbrica), el Grupo Mesón (areniscas cámbricas), depósitos de lutitas y areniscas del Grupo Santa Victoria, (de edad ordovícica) a las que se superponen acumulaciones clásticas del Pleistoceno superior y Holoceno.

La tectónica Neógena en la Cordillera Oriental, confiere un estilo estructural marcado por fallamiento y plegamiento, caracterizando una comarca elevada que se desplaza hacia el este sobre Sierras Subandinas.

Los rasgos geomorfológicos más destacados corresponden a la actividad glaciaria y periglacial. En el pasado acontecieron ocho eventos glaciarios evidenciados por sus de-

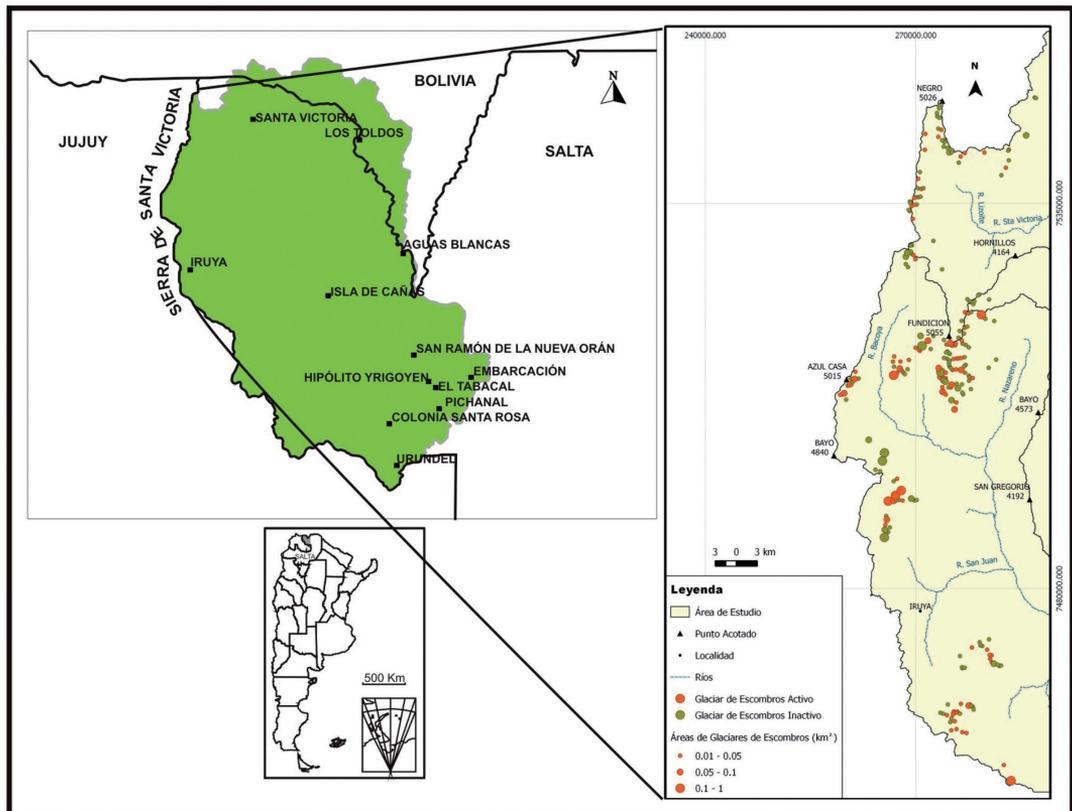


Figura 1. Mapa de la Alta Cuenca del río Bermejo, ladera Oriental de la sierra de Santa Victoria, Salta, Argentina. Se han representado los glaciares de escombros inventariados por Ahumada *et al.* (2014) como esferas proporcionales a su superficie en terreno.

pósitos morénicos (M1 a M8) y tres ciclos de generación de glaciares de escombros (RG1 a RG3) que fueron datados en base a determinaciones de ^{14}C en muestras de turba y en horizontes fósiles A y Ck. (Zipprich *et al.*, 2000): Las morenas más antiguas que se preservaron por su mayor desarrollo y extensión, son anteriores al último máximo glacial (M1 a M3). Los glaciares de escombros RG1 (relictos o fósiles actualmente) serían productos de eventos periglaciales posteriores al depósito de M3; las morenas M4 y M5 corresponden al Tardiglacial. La depositación de las morenas M6 aconteció durante el Holoceno temprano. La sedimentación de las morenas M7 ha sido datada con una edad máxima de 5280 ± 200 ^{14}C años A.P. Los glaciares de escombros inactivos RG2 estuvieron activos en este ciclo. Cambios en las

condiciones climáticas facilitaron posteriormente la acumulación de las morenas M8.

Las condiciones actuales del clima se establecieron alrededor del 1500 ^{14}C años A.P. con actividad de glaciares de escombros (RG3) en los circos. En el presente no existen glaciares o cuerpos de hielo descubierto debido a las características semi-áridas del clima. Su existencia pasada fue relacionada a modificaciones climáticas que implicaron mayores precipitaciones, producto de aumento en el flujo de humedad del NE, que se interpretó como una intensificación o traslación al Sur del sistema tropical de circulación atmosférica. (Zipprich *et al.*, 2000; Schäbitz *et al.*, 2001).

La región pertenece al dominio fitogeográfico Andino-patagónico representado por las provincias Puneña y Altoandina. La pro-

vincia Altoandina, entre 4000 a 4800 m snm, contiene pastizales altoandinos puros, con arbustos y vegas de altura como unidades azonales, entre pedregales y roquedales (Ruthsatz y Movia, 1975).

Los habitantes de estas regiones suelen vivir en pequeñas comunidades o caseríos («rodeos») y en puestos dispersos por los cerros en sitios escabrosos y alejados. La actividad productiva de la región se basa en la ganadería (llamas, alpacas, cabras y ovejas) y la agricultura (papas, maíz, quinoa, por ejemplo) tratándose de una economía de subsistencia. Toda la zona posee una tradición antigua con valiosas expresiones culturales mestizas e indígenas de los grupos denominados «collas». Su condición de habitabilidad hace que los indicadores sociales muestren valores de desventajas para este grupo socio-cultural que por otro lado cumple un

papel fundamental en la ocupación y utilización del territorio.

La población relevada por el último censo (2010) en los departamentos Santa Victoria e Iruya (región de trabajo), provincia de Salta, está constituida por un total de 16.307 personas.

Es de hacer notar que los glaciares de escombros, las lagunas estacionales sostenidas por estos, los sistemas de vegas de origen glacial ubicados en los fondos de valles glaciarios y las vegas establecidas al borde de los glaciares de escombros proveen servicios ecosistémicos que permiten el establecimiento y permanencia de la biodiversidad en este piso geoeológico de altura, la vida cotidiana y la realización de las faenas de campo de los habitantes de esta región representando una fuente de aprovisionamiento hídrico básico. (Figura 2).



Figura 2. Práctica de la agricultura en la región. Plantación de papas andinas y red de riego por acequias, altura aproximada 3600 m snm.

La Alta cuenca del río Bermejo es una cuenca de importancia binacional (Argentina-Bolivia) que viene siendo evaluada, estudiada y proyectada para la generación de energía hidroeléctrica (COBINABE, 2010).

La energía hidroeléctrica es un importante sector energético en países andinos ya que es eficiente y económica en virtud del contexto topográfico y tiene una escasa huella de carbono (Vergara *et al.*, 2007). Es por ello que en los países de esta región andina se planean un gran número de proyectos en los próximos 20 años para aumentar la generación de energía. Otro punto a desarrollar en estas regiones es el manejo y distribución de estos recursos hídricos con la menor conflictividad y la mayor equidad. Estos desarrollos están asociados a la creciente preocupación de que en el futuro, la escasez del agua intensificaría la lucha por el poder para obtener su acceso y que el resultado final sea el desplazamiento de la población local y de prácticas centenarias relacionadas con el uso del agua. (Carey, 2012).

En la Alta cuenca del río Bermejo en territorio salteño, las condiciones topográficas y geológico-geomorfológicas asociados al clima favorecen los procesos de remoción en masa que son además uno de los principales aportes de sedimentos de la cuenca y constituyen amenazas naturales que incrementan los riesgos ambientales para las poblaciones locales y su biodiversidad. La región de trabajo contiene a tres subcuencas entre otras, que alojan glaciares de escombros: río Condado, río Iruya y Los Toldos–Lipeo. Estas tres cuencas constituyen las cabeceras orientales de mayor altura de la Alta Cuenca del río Bermejo.

La cuenca del río Iruya tiene una elevada tasa de producción de sedimentos (10000 tn/km²/año) aportando el 40% de los sedimentos a la Cuenca del río Bermejo que a su vez, contribuye el mayor porcentaje de sedimentos (75%) a la Cuenca del Plata. Esta cualidad significa una fuerte restricción para el aprovechamiento de recursos hídricos por lo que COBINABE estableció una red de información sedimentológica e instrumentó medidas estructurales y no estructurales para el

control de sedimentos cuyos resultados fueron publicados en 2010 (COBINABE, 2010). En este informe no se menciona la presencia de glaciares de escombros en las cabeceras, probablemente por la escala de trabajo del estudio.

Los posibles eventos provocados por el deterioro del paisaje y las geoformas de la criósfera en este piso alto-andino por efecto del cambio climático global (alteraciones en los regímenes de temperatura: aumento más acelerado en las regiones de altura, cambios en el patrón de lluvias con extensión de los períodos estacionales secos) y las perturbaciones por la degradación de glaciares de escombros y los humedales, lo que modificaría la calidad del agua (mayor incorporación de detritos y sedimentos al sistema y cambios en la composición) o la estacionalidad del caudal de los ríos, junto con el incremento de eventos de inundaciones rápidas después de largos inviernos (IPCC 2013) conducen a analizar los cambios a producirse y los desafíos por delante para abordar posibles soluciones para que el uso del agua sea más equitativo y sostenible y la población adquiera educación ambiental para su resguardo y protección.

Recientemente se difundió el informe Modelos Climáticos, Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (S.A.yD.S., 2015). Según este informe, en la mayor parte de la Argentina no patagónica hubo un aumento de temperatura de hasta medio grado, asimismo aumentaron considerablemente las olas de calor en el norte y el este, y para la Región Andina se espera una prolongación del período seco invernal, con precipitaciones extremas más intensas en el norte y coincide en líneas generales, con resultados de estudios regionales locales informados por Minetti (2014).

3. EL CLIMA ACTUAL DE LA REGION

Durante la estación estival, los vientos alisios procedentes del Atlántico, descargan

su humedad en las Sierras Subandinas y la Cordillera Oriental de la provincia de Salta con los mayores niveles de precipitación, unos 1200 mm en promedio, en alturas inferiores a los 3000 m snm correspondientes a la cuenca baja. Estos vientos al ascender a la región de trabajo, llegan poco cargados de humedad, con alrededor de 390 mm (Kull *et al.*, 2003). En contraste, el invierno es la estación seca debido a la instauración del anticiclón del Atlántico Sur en la región chaco-salteña, como consecuencia de las bajas temperaturas reinantes. En la zona de trabajo, los vientos son considerablemente fuertes.

La Estación Meteorológica La Quiaca S.M.N. (3459 m snm) se ubica a la sombra occidental de la sierra de Santa Victoria, recibe solo 322 mm/año de precipitación y registra una temperatura media anual del aire de 9,4°C (promedio periodo 1908–1990, Bianchi y Yañez, 1992). La Quiaca, registra poca variación climática estacional pero con una amplitud térmica diaria muy marcada. Los días son cálidos con temperaturas máxima media anual de 19 a 20°C y las noches son frías con temperaturas mínima media anual de 0 a -2°C (Minetti, 2005). Teniendo en cuenta el gradiente altitudinal de 0,8°C/100 m (ajustado por Kull *et al.*, 2003) y en base a los datos de la Estación Meteorológica La Quiaca, calculamos por extrapolación, la temperatura media anual del aire para una altura promedio de 4400 m snm, que resultó de unos 1,9°C aproximadamente y para los 4600 m snm de 0,3°C aproximadamente.

Estas condiciones meteorológicas generan fenómenos de congelamiento y descongelamiento diario y estacional. Estos procesos favorecen la conformación de paisajes periglaciales e imponen severas limitaciones al desarrollo de la vida vegetal, y por ende a los cultivos. La orografía juega un rol primordial en el clima para esta región de altura. A su vez, el clima y la exposición de las laderas, son decisivos en la evolución morfocriogénica del sector.

La radiación solar incidente en la región es elevada, lo que es común a todas las re-

giones andinas de altura, acompañada por sublimación durante el invierno y evaporación, especialmente, en el verano. Minetti (2005) calcula una radiación global para la región de 140 Kcal/cm². Esta radiación influye notablemente en la distribución y permanencia de las geoformas y procesos criogénicos que allí se generan, como también en las características de los sistemas hídricos (Schrott, 1994).

4. METODOLOGÍA

Para la realización del inventario de glaciares de escombros en la zona de trabajo se siguió la metodología estandarizada por el grupo del IANIGLA (Castro *et al.*, 2012). En la región no existen glaciares descubiertos ni manchones de nieve, solo existen glaciares de escombros. Los mismos sólo pueden ser mapeados por digitalización manual, (Stokes *et al.*, 2007) y se utilizó software de código abierto o libre.

La delimitación de cuencas hidrográficas se efectuó con el objetivo de extraer la red de drenaje y sus respectivas cuencas para poder separar las áreas clasificadas como glaciares de escombros en cuerpos independientes. Este es un paso fundamental para la realización de un inventario de glaciares en montañas (Castro *et al.* 2012). Se utilizó el software Quantum GIS-GRASS (<http://qgis.org/>) para el procesamiento del Modelo Digital de Elevación GDEM2, con una resolución espacial de 30m (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>).

Las herramientas de GRASS están ordenadas en una serie de pasos sucesivos a seguir, a través de instrucciones y reglas bien definidas, determinadas en una lista de Módulos. Finalizado el proceso se obtuvieron mapas de cuencas, de segmentos de corriente y de dirección de drenaje. Con el Módulo «r.to.vect.area» se procedió a vectorizar los mapas obtenidos y con el Módulo «v.out.ogr» fueron convertidos al formato shape (.shp). La capa de cuencas fue corregida luego por digitalización manual con el software libre KOSMO (<http://www.openSIG.es/>), dado que no siempre hay coincidencia entre el lí-

mite de una cuenca obtenida de un MDE y el límite de la misma cuenca en una imagen satelital, cuando se superponen ambas capas y se realiza una observación directa.

Para realizar el inventario de glaciares de la cuenca río Bermejo se usaron las imágenes Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) del satélite TERRA (obtenidas por el convenio IANIGLA-GLIMS), China Brazil Earth Resource Satellite (CBERS) 2B (sensor High Resolution Panchromatic Camera – HRC-) LANDSAT Thematic Mapper (TM) y Google Earth como herramienta complementaria, útil dada la alta resolución espacial de sus imágenes, y la posibilidad de observar con distintos ángulos e inclinaciones los rasgos superficiales de las geoformas a inventariar, basados en la experiencia de Bajracharya y Shrestha (2011), en el inventario de glaciares del Himalaya.

Las imágenes LANDSAT 5 TM, fueron provistas del sitio USGS (United States Geological Survey), aceptadas con base de referencia (Tucker *et al.*, 2004).

La base de datos del inventario de glaciares y ambiente periglacial de la cuenca del río Bermejo incluye la identificación de cada uno de los glaciares, su clasificación morfológica, y parámetros de índole física tales como área, altura máxima, media, mínima, orientación, pendiente, largo total, etc. Estas bases de datos fueron armadas mediante el software KOSMO.

Para clasificar los glaciares se usaron las normativas internacionales en uso (principalmente del WGMS, 2008, Racoviteanu *et al.*, 2009 y GLIMS, <http://www.glims.org/>), con adaptaciones debido a las particularidades de las geoformas de los Andes del NOA. El estado de actividad de los glaciares de escombros ha sido validado en terreno en función de sus atributos geomorfológicos. En este sentido las condiciones de actividad de estas geoformas en la región, hasta tanto se realicen estudios de determinación de estructura interna y de movimiento, tienen características transicionales entre los tres tipos de actividad conocidos. Se han observado sistemas complejos de glaciares de escom-

bro con sectores activos, inactivos y relícticos. Se incluyeron geoformas con áreas mayores a 0.01 km². (Ahumada *et al.* 2014).

Cabe destacar, que en algunos casos las geoformas periglaciales que detectamos pueden estar compuestas por secciones de glaciares de escombros activos e inactivos formando parte de una sola unidad glaciar.

Los resultados obtenidos según la metodología descrita, fueron validados en campañas llevadas a cabo en sectores accesibles de la cuenca, en las cuales se realizó el reconocimiento y examen de los glaciares de escombros, con el fin de comprobar su localización, estado actual y clasificación primaria, mediante mediciones en campo con instrumental apropiado y relevamiento de atributos descritos en extenso por Ahumada *et al.* (2014). Estos controles de campo también permitieron validar en terreno los rasgos geomorfológicos de degradación identificados en glaciares de escombros que definen inestabilidad y peligro, que son objeto principal de esta presentación.

5. IDENTIFICACIÓN DEL PERMAFROST DEGRADADO

El permafrost es definido «*como suelo o roca (incluyendo hielo y materia orgánica) que permanece con temperaturas a 0°C o por debajo de 0°C por lo menos dos años consecutivos en condiciones naturales*» (van Everdingen, 2005). Esta relación directa con la temperatura es la que lo hace elevadamente susceptible a los cambios climáticos. Por lo general los efectos del permafrost o permafrost degradado y su participación en deslizamientos o flujos de detritos son subestimados o desconocidos. Su posición fisiográfica en alta montaña y las características morfológicas de sus geoformas más representativas (el frente de los glaciares de escombros supera el ángulo de estabilidad de los taludes) junto con el descongelamiento de las paredes abruptas de roca que lo contienen han generado eventos peligrosos en otras regiones de alta montaña (Haerberli, 1992, Haerberli, 2013, entre otros autores).

Los glaciares de escombros son capaces de desplazar grandes volúmenes de detritos y ante las actuales modificaciones climáticas el proceso puede acelerarse (Delaloye *et al.*, 2008). Recientemente se informó que el cambio de temperatura global de la superficie terrestre para el final del siglo 21 es «probable» que exceda 1,5°C con respecto a los calculados previamente para 1950/2000 en la mayoría de los escenarios planteados por el IPCC (IPCC, 2013). La aceleración de los procesos del cambio climático (aumento de temperaturas medias anuales y cambios en los regímenes estacionales de precipitación) induce la degradación del permafrost de montaña ya que el aumento de temperatura promueve mayor fluencia interna de agua no congelada y favorece una mayor capacidad de deformación de hielo.

Los glaciares de escombros actúan además, como reservorios de sedimentos potencialmente inestables ya que se ubican en la zona de iniciación de los flujos de detrito. Su detección y mapeo constituyen la etapa preliminar para la prevención de desastres naturales (Roer *et al.*, 2008).

Los autores realizaron en primera instancia la detección, determinación y distribución de los glaciares de escombros en la cuenca Alta del río Bermejo. En tres de sus subcuencas: ríos Iruya, Condado y Los Toldos-Lipeo, se encuentran glaciares de escombros, geoformas periglaciales, que fueron inventariados y cubren una superficie de 9,12 km². En total se inventariaron 253 geoformas (más 33 geoformas < 0,01 km², protalus rampart, que suman 0.1km²). De las 253 geoformas inventariadas, 13 unidades están formadas por más de 1 polígono, correspondientes a un glaciar de escombros activo asociado con otro inactivo, cuyos límites están poco definidos, formando en total 238 unidades mapeadas. De las 238 unidades inventariadas, 97 (4.64 km²) se identificaron como glaciares de escombros activos y 141 (4.48 km²) como glaciares de escombros inactivos. Los glaciares de escombros se localizan en un rango de altura que va desde los 4010 a 4896 m snm los inactivos y entre 4128 a 4861 m snm los activos,

presentando la mayor concentración areal (2.35 km²) de geoformas alrededor de los 4600 m snm (Ahumada *et al.*, 2014).

Se han observado y se describen diferentes estados de degradación en algunos glaciares de escombros y sus formas asociadas presentes en la zona de estudio:

A) Cuando el frente de los glaciares de escombros se encuentra en el borde superior de pendientes abruptas o en cimas, los procesos internos de descongelamiento acelerado pueden aumentar la expulsión de escombros cuesta abajo. Cuando la frecuencia de estas caídas se incrementa pueden ocasionar flujos de detrito y posibles deslizamientos en cascada (Figura 3).

B) Cicatrices de deslizamiento de capa activa en los frentes de glaciares de escombros. Los frentes de los glaciares de escombros son abruptos superando la estabilidad de los taludes y están constituidos por mezclas de bloques, gravas y finos. Los bloques y rocas de mayor tamaño que han sido transportados al tope ruedan pendiente abajo del frente y se acumulan al pie o más lejos. En terreno e imágenes observamos que se producen deslizamientos en el sector superior. Estamos en presencia de fases de deterioro de la capa activa que además, incrementan el ingreso del calor en el núcleo del glaciar de escombros afectado. Ya fueron descritos y considerados por Barsch (1996) y Schrott (1994) como señales de degradación.

Generalmente se observan cicatrices conoides que si se encuentran asociadas llegan a definir una estructura semejante a una media caña (Figura 4).

C) Actividad de canaletas de avalancha nivodetríticas. La actividad en estas canaletas es provocada por la intensificación de la inestabilidad en las zonas de aporte detrítico del glaciar de escombros, generada por variaciones de las temperaturas y descompresión de laderas. Estas condiciones también afectan el delicado equilibrio térmico de los glaciares de escombros, incrementando los procesos de descongelamiento dado el proceso erosivo ejercido en la capa activa. Generan surcos que atraviesan longitudinalmente

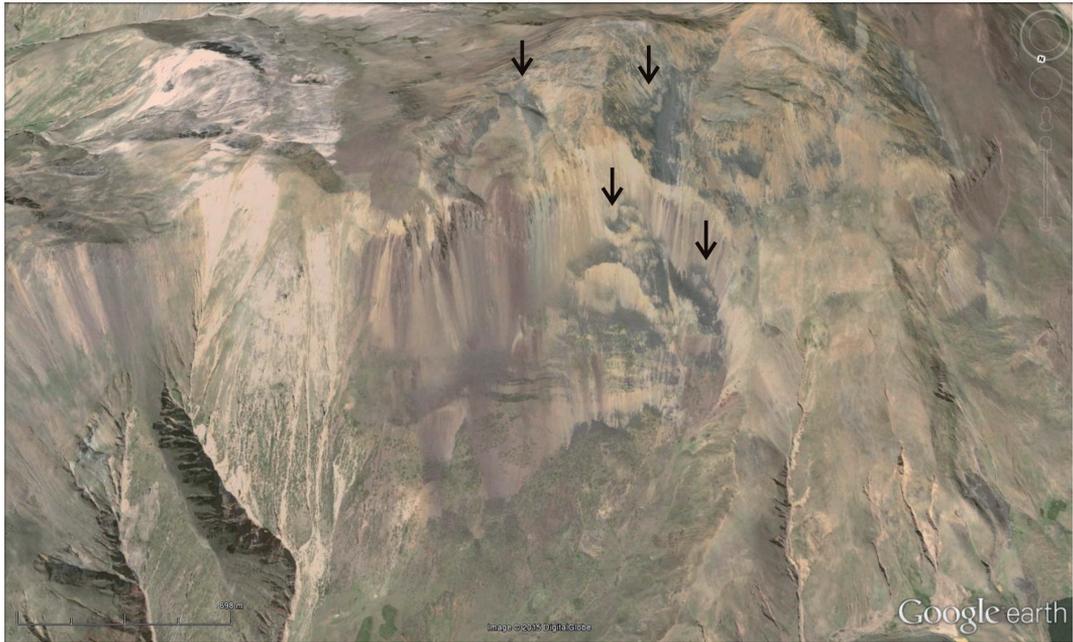


Figura 3. Cuenca con diferencias de altura extremas (entre 4600 y 3900 m snm) a 22° 23' S, que presenta glaciares de escombros y protalus en situaciones topográficas en las que el transporte se realiza en laderas abruptas y en la cima.



Figura 4. En la imagen de Google se observa claramente la cicatriz dejada por el desprendimiento de la capa activa en un prótalus rampart o glaciar de escombros embrionario (4460 m snm, 22°31' S).

en el sentido de la pendiente la lengua del glaciar de escombros.

En la zona de trabajo a veces es posible observar en la superficie superior de los glaciares de escombros, cercanas a su frente, fracturas transversales provocadas por aceleración de su flujo por efectos de degradación interna, según Roer *et al.* (2008).

En la Figura 5 se puede observar las huellas de deterioro de superficie de los glaciares de escombros por el surcado a lo largo de la superficie superior provocado por caídas de detritos desde las canaletas de avalancha. También es posible reconocer las fracturas transversales en el sector del frente de la lengua de glaciares de escombros que indican procesos de aceleración de flujo por descongelamiento. En el caso del ejemplo, son previas al surcado perpendicular provocado por el detrito desprendido de la cima.

D) Lagunas pro-glaciares de escombros (lagunas periglaciales). Con notable frecuencia se ha observado en la región de trabajo

el desarrollo de lagunas estacionales en el frente de los glaciares de escombros, que en muchos casos están vinculadas a otras lagunas conectadas entre sí pendiente abajo, como las típicas lagunas en rosario. Estas lagunas (Ahumada *et al.* 2012) son indicadores de degradación, evidenciando procesos de descongelamiento interno asociado a los cambios térmicos estacionales (Schrott y Götze, 2013) (Figura 6). Al igual que los lagos de termokarst (fenómenos de degradación intra-glaciar de escombros), estas lagunas pro-glaciares de escombros son rasgos geomorfológicos que denotan el deterioro del complejo sistema térmico que sostiene la presencia de permafrost de montaña en estas latitudes.

E) La interacción fenómenos paraglaciales y permafrost. En la región la descompresión de laderas provocada por la desinstalación de las masas de hielo glaciar en el pasado presenta señales geomorfológicas muy evidentes que contribuyen como es sabido, a



Figura 5. Lenguas de glaciares de escombros donde se observan:

— — — a) Canaletas de avalancha.

— — — b) Surcos en la superficie superior provocados por las caídas de detrito.

..... c) Fracturas transversales. (Altura de las geofomas: alrededor de 4440 m snm, 22°32' S).

la desestabilización de taludes. Además son acompañadas por glaciares de escombros que se encuentran alojados en localizaciones aptas para su permanencia en situaciones de elevado desequilibrio topográfico acrecentados por los fenómenos climáticos actuales (Figura 7). Por lo general la selección de lugares de asentamiento de los habitantes de estas montañas se encuentra en sectores de cercanía a la provisión de agua como es natural para la subsistencia en regiones de condiciones de habitabilidad extrema. De tal suerte que los procesos de degradación descritos previamente y los procesos post-glaciales aún activos, confluyen en un estado de probable peligro para la ocupación humana ante la aceleración de aumento de temperaturas informados por el IPCC (2013). En la imagen de la Figura 7 podemos ver la instalación de un rodeo en la base de la línea de escape de posibles flujos de detrito o deslizamientos en masa. Recientemente en el nivel inferior se han registrado deslizamientos provocados por las intensas precipitaciones concentradas del verano que

produjeron la pérdida de vidas en 2009 por ejemplo, (Diario La Gaceta, 06/03/2009) y cortes frecuentes en los caminos en la temporada estival por deslizamientos.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Trombotto *et al.* (1999) determinan para los Andes de Mendoza la presencia de permafrost de montaña en las cercanías de la isoterma de 0°C y también en ubicaciones con temperaturas positivas. Brenning (2005) ajusta el límite de permafrost en la isoterma de 0.5°C y una altura de 3500 m snm, coincidente con la mayor concentración de glaciares de escombros en los Andes Centrales chilenos y reconoce la ocurrencia de glaciares de escombros intactos (en el sentido de Barsch, 1996: activos e inactivos contienen hielo) a 3000 m snm donde se instala la isoterma actual de 4°C. En los Andes intratropicales, Bodin *et al.* (2010) informa para Caquella, glaciar de escombros tropical (21.5° S) con 20 años de monitoreo, localizado a 5250 m snm, coincidente aproximadamente

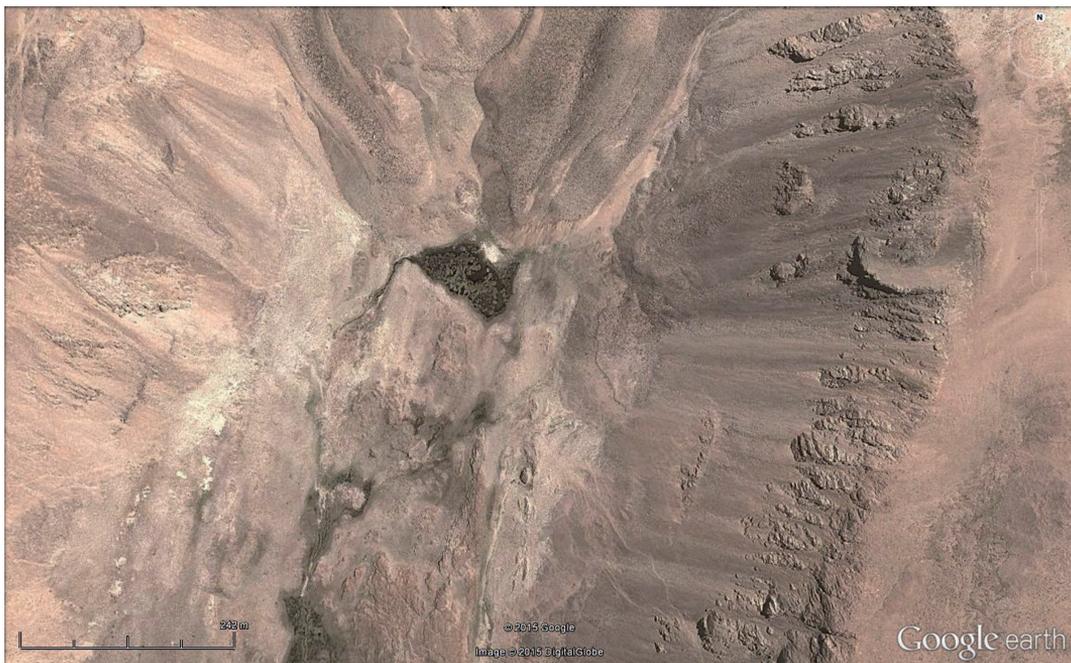


Figura 6. Laguna estacional conectada al frente de glaciares de escombros (4566 m snm, 22°11' S).

con la isoterma de 0°C, un estado de degradación potencial del permafrost con la presencia de permafrost cálido.

La isoterma de 0,3°C de temperatura media anual del aire se encuentra a 4600 m snm en la región de trabajo. La distribución hipsométrica muestra la mayor concentración

de áreas (2.35 km²) de glaciares de escombros a los 4600 m snm, en concordancia con los valores calculados de temperatura media anual del aire, lo que podemos estimar el límite inferior del permafrost a una altura de 4600 m snm (Ahumada *et al.* 2014).

Los glaciares de escombros ubicados por



Figura 7. Glaciares de escombros en la cima (1) y en laderas angostas (2), talus (3), laderas abruptas (4), en la base del valle instalación de un rodeo (5) y subiendo, casas de productores locales aisladas (6₁ y 6₂). En el valle principal se observan desprendimientos de ladera.

debajo de los 4600 m snm hasta los 4010 m snm, se encuentran en el marco de temperaturas medias anuales del aire positivas: 5.1°C es la temperatura media anual del aire extrapolada para 4000 m snm. Esto indicaría que este grupo de glaciares de escombros activos e inactivos (4.57 km²), aproximadamente 50% del área total inventariada estarían en desequilibrio con las condiciones climáticas presentes, con permafrost de tipo cálido o azonal, con altas probabilidades de degradación.

Se identificaron y se describieron indicadores geomorfológicos de degradación de los glaciares de escombros en la cuenca Alta del río Bermejo, ladera Oriental de la sierra de Santa Victoria, que aportan al conocimiento de los procesos geomorfológicos en este piso geo-ecológico de la cuenca Alta del río Bermejo. Estos rasgos de degradación pueden ser incrementados por los efectos del cambio climático (el aumento y aceleración de temperaturas anunciados para esta región).

Es necesario recomendar seguimientos regulares en sectores estratégicos a los fines de obtener información básica para un mejor manejo de los escasos recursos hídricos de la zona e informar, concientizar e incluir a las comunidades locales quienes seguramente, aportarán sus saberes ancestrales para la conservación del hábitat y sus recursos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Fundación Miguel Lillo quien proveyó los fondos y el apoyo logístico e instrumental para realizar todas las campañas a la región de trabajo. Al organizador del Simposio de Ciencias de la Criósfera en el XIX Congreso Geológico Argentino de Córdoba Dr. Trombotto y sus colaboradores que nos estimularon para la publicación en extenso de este trabajo. A los árbitros de esta presentación Dr. Schrott y Lic. Pecker Marcos por sus acertados comentarios.

A nuestro técnico de campo Sr. Ricardo Brizuela por su pericia conductiva y su paciencia. A la Srta. Natalia González Díaz por su colaboración en gabinete.

Al personal de Radio Nacional La Quiaca que estableció una red de alerta ante el robo de dos equipos controladores de temperaturas de suelo que habíamos instalado en puntos estratégicos de la región en 2012. Su sustracción en 2013 nos impidió aportar datos climáticos concretos sobre el comportamiento de las temperaturas en subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, A.L., Ibáñez Palacios, G. P., Toledo, M. A., Carilla, J. y Páez, S.V. 2012. El permafrost de montaña en las cabeceras del Río Bermejo. Actas de Resúmenes de la XXVI Reunión Científica (AAGG2012) y Primer Taller Internacional de Geomática en las Ciencias de la Tierra. Versión digital.
- Ahumada, A.L., Ibáñez Palacios, G. P., Toledo, M. A., Carilla, J. y Páez, S.V. 2014. El permafrost reptante, inventario y verificación en las cabeceras del Río Bermejo. GEOACTA 39, 1: 1-15.
- Barsch, D. 1996. Rockglaciers. Springer, Berlin, 331 pp.
- Bajracharya S.R. y Shrestha, B. 2011. The status of glaciers in the Hindu Kush Himalayan region. ICIMOD, Kathmandú, 130 pp.
- Bianchi, A.R. y Yañez, C.E. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. Segunda edición. INTA, Salta, Argentina.
- Bodin X., Francou B., Arnaud Y. y Fabre D. 2010. «State and dynamics of a tropical rock glacier on the Altiplano (Bolivia, 21.5°S) during the last two decades». Ice and Climate Change: A View from the South (VICC 2010), Valdivia (Chile): 62.
- Brenning A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33°-35°). Permafrost Periglacial Processes 16: 231-240.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. y Haeberli, W. 2012. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. Climatic Change 112, 3: 733-767.
- Castro, M.; Delgado, S.; Ferri Hidalgo, L.; Salazar, L.; Falaschi, D.; Lenzano, G.; Masiokas, M.; Pitté, P. y Ruiz, L. 2012. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial. IANIGLA-CONICET. Inédito, 139 pp.
- COBINABE 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. 1a Edición - Buenos Aires, 230 pp.
- Delaloye, R., Perrouchoud, E., Avian, M., Kaufmann V., Bodin X., Hausmann H., Ikeda, A., Kaab, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Lambiel, C.,

- Mihajlovic, D., Staub, B., Roer I., Thibert E. 2008. Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 1: 343-348.
- Haeberli, W. 1992. Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 111-124.
- Haeberli, W. 2013. Mountain permafrost – research frontiers and a special long-term challenge. *Cold Regions Science and Technology*, 96: 71 – 76.
- IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Kull, C., Hanni, F., Grosjean, M., y Veit, H. 2003. Evidence of an LGM cooling in NW Argentina (22° S) derived from a glacier climate model. *Quaternary International*, 108: 3-11.
- Minetti, J.L. 2005. El clima del Noroeste Argentino. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C. von Cullen, Tucumán, 350 pp.
- Minetti, J.L. 2014. Impacto del calentamiento global en los sistemas convectivos de gran escala, el caso NOA. Conferencia. VIII Encuentro Regional de Cambio Climático NOA. 28 de agosto de 2014. San Miguel de Tucumán.
- Racoviteanu, A.E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S.J.S. and Armstrong, R. 2009. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space, results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 53: 53-69.
- Roer, I., Haeberli, W., Avian, M., Kaufman V., Delaloye R., Lambiel C. and Kaab A. 2008. Observations and considerations on destabilizing active rockglaciers in the European Alps. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska 1: 1505-1510.
- Ruthsatz, B. y Movia, C. 1975. Relevamiento de las estepas altoandinas del noroeste de la provincia de Jujuy, República Argentina. Fundación Educación, Ciencia, Cultura. Buenos aires, 127 pp.
- SAyDS 2015. Modelos Climáticos. «Jornada Difusión de Resultados» del Proyecto Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (TNC) a la Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Buenos Aires, Abril 2015. <http://www.ambiente.gov.ar/>
- Schäbitz, F.; Lupo, L., Kulenmeyer, J.A: y Kulenmeyer,J.J, 2001. Variaciones en la vegetación, el clima y la presencia humana en los últimos 15.000 años en el borde oriental de la Puna, provincias de Jujuy y Salta, noroeste argentino. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación especial 8, XI Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología: 155-162.
- Schrott, L. 1994. Die Solarstrahlung als steuernder Factor im Geosystem der subtropischen semiariden Hochanden, Agua Negra, San Juan, Argentinien. *Heidelberger Geographische Arbeiten*, 94, 199 pp.
- Schrott, L. and Götze, J. 2013. The periglacial environment in the semiarid an arid Andes of Argentina –hydrological significances and research frontiers. *Forschen im gebirge*, editor A. Borsdorf, (Hg). IGF- Forschungsberichte, Band 5. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: 53-62.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D. y Shahgedanova, M. 2007. Recent glacier retreat in Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46: 95-213.
- Trombotto, D., Buk, E. y Hernández J. 1999. Rock glaciers in the Southern Central Andes (appr. 33° S.L.), Mendoza, Argentina: a review. *Bamberger Geographische Schriften* 19: 145-173.
- Trombotto, D. T. y Ahumada, A. L. 2005. Los fenómenos periglaciales. Identificación, determinación y aplicación. *Opera Lilloana* 45, 131pp.
- Tucker, C.J., Grant, D.M., Dykstra J.D. 2004. NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 3: 313-322.
- Van Everdingen, R.O. 2005. Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World data Center for Glaciology, 90 pp.
- Vergara, W., Deeb, A.M., Valencia, A.M., Bradley R. S., Francou, B., Zarzar, A. Grünwaldt, A. y Haeussling, S.M. 2007. Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *EOS* 88, 25: 261–264.
- WGMS 2008. Fluctuations of glaciers 2000-2005, ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. Vol. IX. Zurich, 285 pp.
- Zipprich M., Reizner, B., Veit, H., Zech, W. y Stingl, H. 2000. Upper Quaternary landscape and climate evolution in the Sierra de Santa Victoria (northwestern Argentina) deduced from geomorphologic and pedologic evidence. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 7/8: 997-1012.