

Tesis Premio Dr. Carlos Gordillo

# Sinopsis de los eventos glaciarios del Cuaternario en la Cordillera Oriental de Argentina

Mateo A. Martini

Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, CONICET, FCEFYN, UNC

Fecha de recepción del manuscrito: 23/08/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

**Resumen**— La Cordillera Oriental de Argentina (~22-26°S) se ubica inmediatamente al norte de la Diagonal Árida Sudamericana y sus precipitaciones están vinculadas con la actividad del Sistema Monzónico Sudamericano. Posee numerosas sierras que superan los 5000 m s.n.m., estando gran parte de su territorio bajo condiciones frías y secas. Actualmente no presenta verdaderos glaciares pero durante el Pleistoceno tardío, numerosos glaciares ocuparon los sectores más altos de sus serranías por encima de 3500 m. s.n.m. Las geoformas glaciarias muestran un mejor desarrollo en la vertiente oriental de las sierras, donde alcanzan cotas menores que en su contraparte occidental, lo que evidencia un patrón de precipitaciones de este a oeste, similar al actual. Cinco eventos glaciarios principales han sido reconocidos a los que se les ha asignado edades absolutas aplicando el método de datación de superficies de exposición con isótopos cosmogénicos. Durante el Holoceno no se han registrado nuevos avances glaciarios, lo que ha permitido la generación y preservación de numerosos glaciares de roca. Se inventariaron 635 glaciares de roca. La cota inferior que alcanzan los glaciares de roca activos (4500 m s.n.m.) presenta la particularidad de encontrarse ~400 m por debajo de la isoterma de 0° C, lo que sugiere que están en desequilibrio con el clima actual.

**Palabras clave**— Andes subtropicales, glaciaciones de altura, Último Máximo Glaciar, geomorfología, glaciares de roca.

**Abstract**— The Quaternary glacial events in the Cordillera Oriental of Argentina: a review. The Cordillera Oriental of Argentina (~22-26°S) is located immediately to the north of the Arid Diagonal and the rainfall is related with the South American Summer Monsoon. Numerous ranges reach 5000 m a.s.l. and are under cold and dry climatic conditions. There are not “true” glaciers present in the Cordillera Oriental, but during the Late Pleistocene many glaciers installed on the higher parts of the ranges above 3500 m a.s.l. The glacial geomorphology is better developed and reaches a lower altitude in the eastern side of the ranges than in the western side, indicating that the pattern of rainfall during glaciation was similar to the present (from east to west). Five glacial events were distinguished and an absolute chronology was established applying surface exposure dating with cosmogenic nuclides. During the Holocene no glacier advances were registered, allowing the development and preservation of many rock glaciers. A total of 635 rock glaciers were identified across the Cordillera Oriental, where the present lower limit of active rock glaciers (4500 m a.s.l.) is situated ~400 m below the altitude of the 0° C isotherm, which suggest that they are not in equilibrium with present-day climate.

**Keywords**— Subtropical Andes, high-altitude glaciations, Last Glacial Maximum, geomorphology, rock glaciers.

## INTRODUCCIÓN

El período Cuaternario abarca los últimos 2,58 Ma y está marcado por oscilaciones climáticas donde se alternan períodos fríos (glaciares) y períodos relativamente más cálidos (interglaciares), lo que además trae aparejado un cambio en el nivel del mar global (Pillans y Gibbard, 2012). Reconstrucciones paleoclimáticas basadas en la variación relativa de isótopos estables principalmente de O sobre testigos de fondo oceánico (en organismos carbonáticos en sedimentos marinos) y testigos de hielo polar muestran una alternancia entre períodos glaciares e interglaciares

(EPICA, 2004; Rasmussen et al., 2006) que ha sido adjudicada a variaciones orbitales de los denominados ciclos de Milankovitch (Wright, 2000). De esta forma se han definido los estadios isotópicos marinos (*marine isotopic stages*, MIS) para el Cuaternario. Los MIS se enumeran de más jóvenes a más viejos con números impares representando períodos interglaciares y los números pares, períodos glaciares, siendo el MIS 1 el período interglaciar actual y el MIS 2 el último período glaciario. De esta forma se conoce con cierta exactitud las oscilaciones climáticas del Cuaternario en los océanos y los casquetes polares, es decir, para altas latitudes.

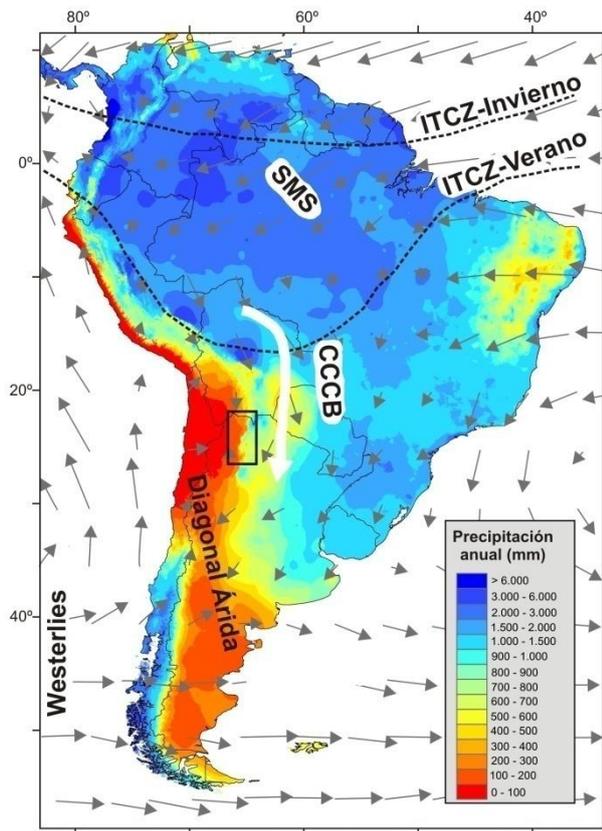
En cambio, es aún escaso el conocimiento que se tiene sobre las variaciones climáticas ocurridas en el Cuaternario en regiones tropicales y subtropicales de Sudamérica y su potencial relación con los cambios climáticos registrados en altas latitudes (Placzek et al., 2013; Baker y Fritz, 2015).

Dirección de contacto:

Mateo A. Martini, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 30223, mmartini@unc.edu.ar

Particularmente, en los sectores más elevados de las cordilleras, los cambios climáticos (enfriamientos y calentamientos) producen fluctuaciones de la altura de la isoterma de 0° C, provocando grandes modificaciones sobre la geomorfología de alta montaña. Es así como un enfriamiento puede hacer disminuir la altura de la isoterma de 0° C cientos de metros, ocasionando el descenso del límite inferior del permafrost de montaña y/o generando una expansión en los glaciares, dependiendo también de la precipitación recibida. Por el contrario, un calentamiento genera el efecto opuesto.

La distribución caracterización y cronología de los eventos glaciarios y periglaciarios aporta información muy valiosa a la hora de realizar reconstrucciones paleoclimáticas. Al estar ubicada inmediatamente al norte de la zona morfoclimática glaciar Atlántica, la Cordillera Oriental de Argentina (COA) es una zona sumamente sensible a los cambios climáticos tanto locales como regionales y globales (Fig. 1). Por este motivo, se presenta como una región clave para entender el comportamiento del clima en el pasado, y las posibles conexiones entre hemisferios y con otros sectores al sur de la Diagonal Árida.



**Fig. 1.** Precipitación media anual de Sudamérica en base a los datos procesados por Hijmans et al. (2005) con una resolución de celda 10°. Las flechas indican la dirección predominante de los vientos de capa baja a 925 hPa durante el mes de Enero (~1000 m s.n.m.; modificado de Garreaud et al., 2009). La posición de la ITCZ en el invierno y el verano del hemisferio sur se observa como líneas de punto. La flecha blanca resalta la dirección de la CCCB. El recuadro negro indica la localización de la Fig. 2.

El objetivo del presente trabajo es realizar una sinopsis de los aspectos más destacados de la Tesis Doctoral titulada “Los eventos glaciarios del Cuaternario en Cordillera

Oriental” (Martini, 2014) recientemente galardonada con el premio Dr. Carlos Gordillo a la mejor Tesis Doctoral del bienio 2013-2014 por parte del Doctorado en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (UNC).

**UBICACIÓN Y MARCO REGIONAL**

La COA posee una forma elongada en sentido norte-sur que se extiende desde los 26,3° S hasta los 22° S cubriendo una superficie de ~48.730 km<sup>2</sup> (Fig. 2). Limita hacia el oeste con la provincia geológica de Puna, al norte de los 22° S continúa en territorio boliviano y peruano hasta la frontera con Ecuador (~4° S), hacia el noreste limita con las Sierras Subandinas, al sureste con el sistema de Santa Bárbara y hacia el sur con las Sierras Pampeanas. La COA posee un perfil asimétrico en sentido este-oeste con un flanco abrupto oriental y uno más tendido, y con menor relieve, occidental. Son numerosas las sierras que superan los 5000 m s.n.m. destacándose el Cerro Libertador San Martín (6380 m s.n.m.) ubicado en el nevado de Cachi como el pico más alto de la región.

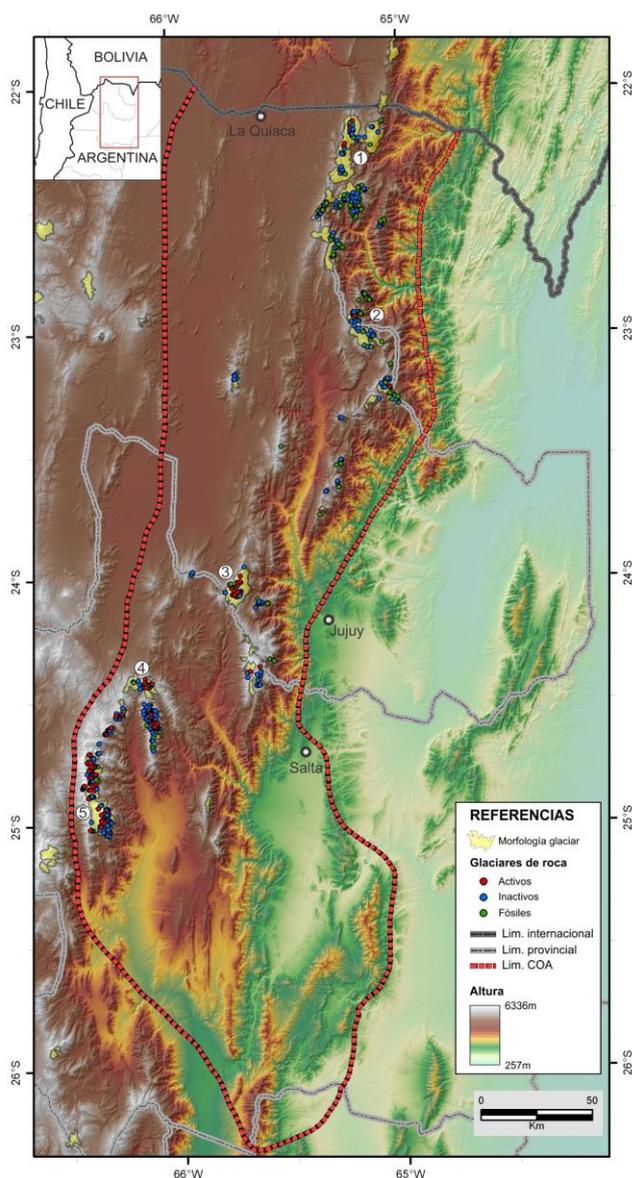
Ubicada inmediatamente al norte de la Diagonal Árida Sudamericana, que separa los dominios morfoclimáticos atlántico y pacífico, la COA recibe la mayor parte de las precipitaciones (>75%) durante los meses más cálidos (diciembre a marzo) relacionadas al Sistema Monzónico Sudamericano (SMS). Durante el verano austral la Zona de Convergencia Intertropical se mueve hacia el sur llegando hasta los ~15° S (Fig. 1), lo que produce la activación del SMS. Los vientos del este (*esterlies*) transportan parte del vapor de la cuenca de Amazona hacia el sur-suroeste a través de la Corriente de Chorro de Capas Bajas (CCCB) llegando hasta la región pampeana de Argentina (Vera et al., 2006; Garreaud et al., 2009). En su trayectoria hacia el suroeste, las masas de aire cargadas de humedad se encuentran con COA produciendo un ascenso de tipo orográfico de las mismas (Bianchi y Yañez, 1992). Esto genera un marcado contraste de precipitaciones entre el flanco oriental más húmedo y el flanco occidental más seco (Fig. 1). Además, este fenómeno ascendente genera un marcado gradiente vertical de las precipitaciones que son escasas (<400 mm/año) por encima de 3500 m s.n.m.

De acuerdo a los datos meteorológicos disponibles, la altura de la isoterma de 0° C para la COA se encuentra a 4916 m s.n.m. (Martini et al., 2013). A pesar de que numerosas sierras superan ampliamente este valor, las escasas precipitaciones imperantes en la alta montaña inhiben el desarrollo de “verdaderos” glaciares. Sobre el faldeo oriental del nevado de Cachi se han identificado cuatro cuerpos de hielo o nieve perene cuya área en planta no supera los 0,3 km<sup>2</sup>. De acuerdo a su posición topográfica, altura y condiciones climáticas se clasifican como “glaciares reservorio” (cf. Llibouty, 1965).

**GEOMORFOLOGÍA GLACIAR**

La geomorfología glaciar está muy bien preservada en la COA por encima de la cota de 3500 m y se desarrolla desde su extremo septentrional en el límite con Bolivia (~22°S) hasta los ~25°S (Fig. 2) (Martini et al., 2015). Sólo las sierras cuya altura máxima supera los ~5000 m s.n.m.

presentan morfología glaciaria aguas abajo. Las geoformas glaciares más comunes son los circos, valles, aristas y morenas. Los depósitos glaciálfuviales se encuentran tanto como planicies pedemontanas en las vertientes occidentales, como restringidos al fondo de valles (*valley train*) en las vertientes orientales, donde estos últimos presentan escasa extensión areal y espesor en comparación con las morenas a las que se vinculan.



**Fig. 2.** Modelo digital de Elevación de la COA donde se marcan los sectores con evidencias de actividad glaciaria durante el Pleistoceno tardío y la presencia de glaciares de roca activos, inactivos y fósiles (modificado de Martini et al., 2013 y 2015). Nótese como ambos registros se superponen. Los números indican la ubicación de las sierras mencionadas en el texto: 1) sierra de Santa Victoria, 2) sierra de Zenta, 3) nevado de Chañi, 4) nevado de Acay, 5) nevado de Cachi.

De acuerdo a las geoformas reconocidas y su disposición, los glaciares que se instalaron en la COA corresponden a glaciares de valle de base húmeda con una geometría relativamente sencilla cuya longitud no superaba los 10 km. Las morenas centrales son poco comunes debido a la inexistencia de confluencias glaciares. Una excepción a estos glaciares de valle típicos se da en el sector noreste de la sierra de Santa Victoria, que corresponde al lugar que

más precipitación recibe actualmente en la COA (Fig. 1). En este sector los glaciares compartieron la zona de acumulación, conformando un pequeño campo de hielo a partir del cual algunos glaciares de descarga fluían hacia el este y otros hacia el oeste.

El registro glaciario presenta una fuerte asimetría entre la vertiente oriental y occidental de las diferentes serranías que componen la COA (Fig. 2). Los depósitos morénicos alcanzan cotas más bajas en la vertiente oriental que en su contraparte occidental. Esta asimetría indica que la altura de la línea de equilibrio (ELA) era más baja en los glaciares que drenaban hacia el este (Martini et al 2011), que dichos glaciares eran arealmente más extensos y sus frentes alcanzaban cotas menores que los expuestos hacia el oeste. Algunas serranías incluso no presentan morenas en sus vertientes occidentales como es el caso del nevado de Cachi (Fig. 2). Debido a que los glaciares entre ambas vertientes estaban separados por una estrecha divisoria, la asimetría no puede ser explicada por una diferencia de temperatura pero sí de precipitación. Esto sugiere que las masas de aire que proveían de humedad a los glaciares tenían una dirección este-oeste predominante, donde los glaciares de la vertiente oriental recibían una cantidad relativa de precipitación mucho mayor que su contraparte occidental. De este análisis se desprende además, que el patrón de circulación atmosférica y precipitaciones en el que se desarrollaron las glaciaciones de la COA fue similar al actual, donde los vientos procedentes del este (origen Atlántico) descargaban la mayor parte de la humedad en el flanco oriental de las sierras, generando un marcado contraste de precipitación. Este comportamiento, a su vez, ha sido sugerido por otros autores en base a análisis de registros glaciarios del Cuaternario al norte y al sur de la COA (e.g. Klein et al., 1999; Haselton et al., 2002).

## CRONOLOGÍA DE LOS EVENTOS GLACIARIOS

El nevado de Chañi (5940 m s.n.m.) ubicado en la parte central de la COA (Fig. 2), presenta excelentes registros glaciarios con un muy buen grado de preservación, por lo que se lo eligió para la realización de estudios de geocronológicos tendientes a establecer una cronología absoluta de los eventos glaciarios reconocidos. Se utilizó el método de datación de superficies de exposición a partir isótopo cosmogénico  $^{10}\text{Be}$  producido en cuarzo. El método consiste en tomar muestras de los primeros 2-3 cm de la superficie de bloques erráticos depositados en crestas morénicas para conocer el tiempo que dicha superficie estuvo expuesta a la radiación cósmica, lo que equivale a su edad de depositación (Fig. 3) (Dunai, 2010). La cronología que se describe a continuación se generó a partir del análisis de 42 muestras. Las edades expresadas en el texto fueron calculadas a aplicando la tasa de producción de  $^{10}\text{Be}$  obtenida por Kelly et al. (2015) y el esquema de escala de Lal (1991) con las modificaciones de Stone (2000), que incorpora variaciones en el campo magnético.

En base al análisis de su geomorfología en el nevado de Chañi se distinguieron cinco grupos de morenas principales que representan cinco eventos glaciarios diferentes. De más viejas a más nuevas se fueron depositando aguas arriba y se denominan MG I, MG II, MG III, MG IV y MG V. Los fechados con  $^{10}\text{Be}$  arrojaron edades para los dos eventos

más antiguos (MG I y II) que varían entre ~39 y ~52 ka. Para el evento MG III las edades varían entre ~22 y ~25 ka, con un promedio de  $23,3 \pm 1,5$  ka. Por último, los eventos MG IV y MG V presentan edades de  $15,0 \pm 0,4$  ka y  $12,1 \pm 0,5$  ka (Fig. 3), respectivamente. Durante el Holoceno no se han registrado actividad glaciario en el nevado de Chañi ni sobre la sierra de Santa Victoria (Zech et al., 2009).



**Fig. 3.** Fotografías de campo de depósitos glaciogénicos en nevado de Chañi. A) Bloque errático de granito utilizado para su fechamiento con isótopos cosmogénicos. B) Evento glaciario más joven registrado en el nevado de Chañi (~12 ka). La línea de puntos resalta el cierre morénico de dicho evento.

### **Análisis paleoclimático**

De acuerdo a la cronología glaciario obtenida los eventos glaciarios más expandidos en el nevado de Chañi se produjeron durante el MIS 3 entre ~39 y ~52 ka. Debido a la dispersión de las edades y al no poder establecer una edad precisa para estos eventos no es posible realizar una caracterización paleoclimática adecuada. A nivel inter-regional se pueden realizar algunas correlaciones de carácter tentativo. La cronología de los avances MG I y II se correlacionan con períodos de mayor precipitación registrados en el noreste ( $10^\circ$  S) y sur ( $27^\circ$  S) de Brasil en base al análisis de isótopos de O en espeleotemas (Wang et al., 2004 y 2007). A su vez, dichos avances glaciarios coinciden con etapas donde la insolación local para enero a los  $24^\circ$  S (nevado de Chañi) es moderada a alta (Berger y Loutre, 1991). Los registros de las cavernas de Brasil

muestran un comportamiento similar (a escala milenaria) a la radiación solar recibida, estando en fase los períodos húmedos con períodos de mayor insolación para los meses de verano (Wang et al., 2004 y 2007).

Posteriormente, en el nevado de Chañi los glaciares avanzaron a los ~23 ka. Este avance se produjo durante el máximo enfriamiento registrado en la última glaciación (MIS 2) conocido como Último Máximo Glaciario (26,5-19 ka; Clark et al., 2009), período en el cual ha registrado una expansión generalizada de los glaciares a nivel global. Posteriormente, durante la transición glaciario-interglaciario se produjeron dos nuevas expansiones de los glaciares, a los ~15 y ~12,1 ka. Estos dos últimos avances glaciarios se solapan con dos períodos fríos registrados en el Hemisferio Norte, el Estadial Heinrich 1 (18 y 14,6 ka AP) y el Estadial Younger Dryas (~12,9-11,7 ka AP) (Rasmussen et al., 2006), y con períodos cálidos registrados en Antártida y Patagonia (EPICA, 2005). A su vez, coinciden con períodos húmedos registrados en los Andes Centrales (Placzek et al., 2006; Quade et al., 2008; Blard et al., 2011) y noreste y sur de Brasil (Wang et al., 2004 y 2007).

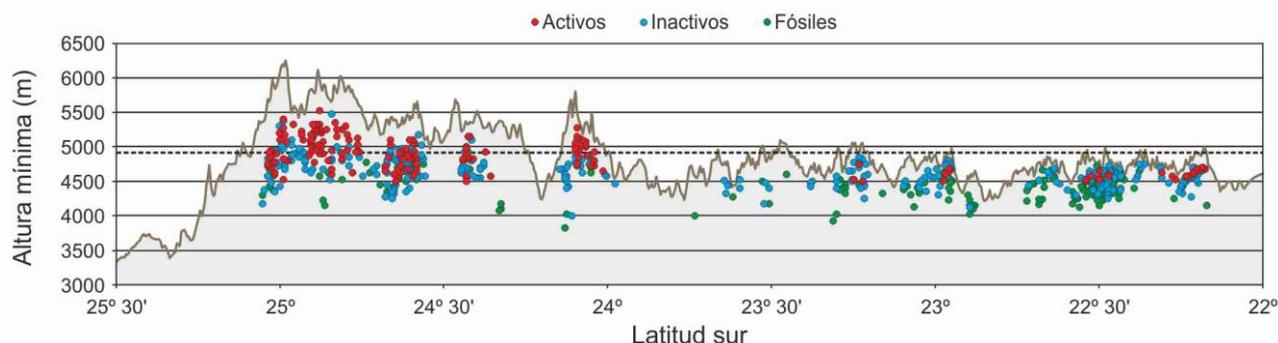
Los cambios climáticos ocurridos en ambos Hemisferios durante el fin del MIS 2 se produjeron de manera diacrónica, existiendo un desajuste entre los registros de los casquetes polares de Groenlandia y Antártida, lo que permitió proponer que existe un desfase bipolar (*bipolar seesaw*) entre ambos Hemisferios (Barker et al., 2009). Hipótesis recientes apuntan a que los enfriamientos registrados durante los estadales Heinrich 1 y Younger Dryas habrían generado un enfriamiento de las aguas del Atlántico Norte lo que habría cortado la circulación oceánica termohalina (Denton et al., 2010). Esto, a su vez, generaría un corrimiento hacia el sur de la ZCI durante dichos períodos con la consecuente intensificación del SMS y de la CCCB en latitudes subtropicales (Wang et al., 2007). Por lo tanto, este mecanismo explicaría el origen y la fuente de la precipitación durante los eventos glaciarios registrados en el nevado de Chañi donde actualmente la CCCB desempeña un papel central en la variabilidad y distribución de las precipitaciones (Garreaud et al., 2009).

### **LA DEGLACIACIÓN Y LOS GLACIARES DE ROCA**

Dentro de la COA los glaciares de roca constituyen geofomas abundantes. La realización de un inventario arrojó un total de 635 glaciares de roca (Fig. 2), los cuales fueron clasificados en base a criterios morfológicos de actividad en activos (27,5%), inactivos (47,5%) y fósiles (25%) (Martini et al., 2013). Cubren un área de  $48,45 \text{ km}^2$  y, en general, se trata de cuerpos de pequeñas dimensiones ( $<0,1 \text{ km}^2$ ). Los glaciares de roca activos se encuentran por encima de la cota de 4500 m, los inactivos por encima de 4200 m y los fósiles por encima de 3800 m (Fig. 4). Cerca de la mitad de los glaciares de roca, tanto en número (45% del total) como en superficie (53% del total), se concentran en el sector sur de la COA entre los  $24^\circ 23'$  y  $25^\circ 3'S$ , donde existe un aumento considerable de la altura de las sierras (Fig. 2 y 4). Al sur de los  $25^\circ 3'S$  existe una notable disminución altitudinal que no ha permitido la generación de glaciares de roca. La cota del límite inferior de los glaciares de roca activos presenta temperaturas positivas,

como ocurre en otros sectores de los Andes Centrales (e.g. Trombotto et al, 1999; Azócar y Brenning, 2010). Para el

caso de la COA, los glaciares de roca activos se presentan ~400 m por debajo de la isoterma de 0 °C (Fig. 4).



**Fig. 4.** Perfil de barrido norte-sur con las alturas máximas de la COA y cota inferior de cada uno de los glaciares de roca mapeados teniendo en cuenta su actividad (círculos de colores). El área utilizada en el perfil de barrido es la que encierra la línea de puntos roja de la Fig. 2 y que establece el límite de la COA. La línea punteada horizontal indica la altura de la isoterma de 0 °C. Extraída de Martini et al. (2013).

La distribución de los glaciares de roca está directamente vinculada a la morfología glaciaria incisa en el relieve modelada durante el Pleistoceno tardío la que, a su vez y como vimos anteriormente, estuvo controlada por la circulación atmosférica. El 91% de los glaciares de roca se encuentran dentro de un paisaje modelado por la acción glaciaria y valle arriba de morenas laterales y/o frontales, es decir, que son posteriores al último evento glaciario (~12,1 ka). Para el restante 9% la morfología glaciaria o presencia de morenas no es tan clara debido a procesos de degradación actuales o recientes, principalmente remoción en masa, que han borrado geoformas glaciogénicas más antiguas. Pero, teniendo en cuenta la altura en que se encuentran, es muy probable que esta zona también haya estado cubierta por glaciares durante el Pleistoceno. Una vez retirados los glaciares, el abrupto relieve dejado por la modelación glaciaria y el rápido desarrollo de un ambiente periglaciario ha proporcionado condiciones favorables para la generación de glaciares de roca. Actualmente, las empinadas laderas de los valles y circos glaciares aportan gran cantidad de material hacia sectores topográficamente más bajos generando importantes carpetas de detritos que, próximos al fondo del valle, pueden dar lugar a glaciares de roca.

Los glaciares de roca tienen un importante valor hidrológico en las cuencas de altura lo cual se ve amplificado en la COA debido a que actualmente sólo presenta escasos cuerpos de hielo o nieve permanente (área total <0,8 km<sup>2</sup>). Un cálculo estimativo del agua equivalente almacenada en los glaciares de roca intactos arrojó un valor de 0,46 km<sup>3</sup>.

### **El glaciar de roca Varas**

Sobre el glaciar de roca Varas ubicado en la sierra de Zenta (Fig. 2), se inició un monitoreo dinámico y climático con el objetivo de establecer sus características morfoclimáticas. El glaciar de roca Varas presenta claros signos de actividad como: irregularidades en su superficie en forma de crestas y surcos longitudinales, un talud frontal con una pendiente media de 35° que se

diferencia del resto del cuerpo del glaciar de roca por presentar sedimentos de granulometría fina (tamaño arena y menores), y un área de aporte muy empinada sin vegetación donde es común observar la caída de bloques por gravedad (Martini et al., 2014). En contacto hacia el sureste se encuentra otro glaciar de roca que en base a criterios morfológicos ha sido clasificado como inactivo, ya que se encuentra vegetado por líquenes y yaretas, no presenta crestas y surcos en superficie, y su talud frontal posee un ángulo de inclinación promedio de 31°. Unos 50 m por encima del glaciar de roca activo Varas a ~4700 m s.n.m., se encuentra un incipiente lóbulo de proglacial de reducidas dimensiones (Fig. 5).

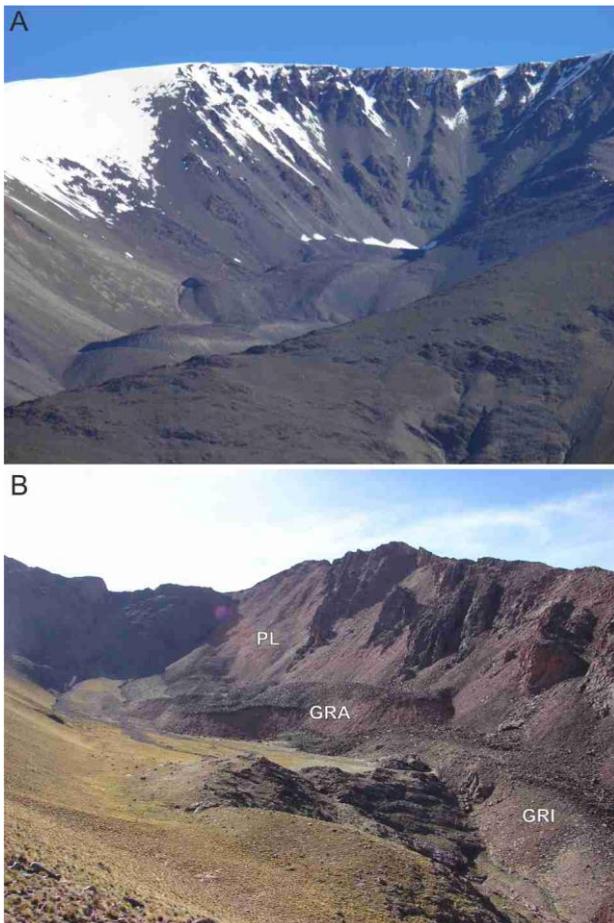
Desde el año 2012 se viene realizando un monitoreo anual con GPS diferencial con el objetivo de cuantificar su flujo superficial. Se comprobó que el glaciar de roca activo Varas presenta un flujo anual que varía entre unos pocos cm a más de un metro. En cambio, sobre el glaciar de roca inactivo se ratificó que no posee movimiento. Esto permitió corroborar la clasificación de actividad realizada previamente (Martini *et al.*, 2013) en el inventario de los glaciares de roca de la COA que se basaba solamente en a criterios morfológicos.

Sobre la superficie del glaciar de roca activo Varas a 4566 m s.n.m se instaló una estación meteorológica que registra, entre otras variables, la temperatura del aire y suelo (a 5 y 50 cm de profundidad) con un intervalo de registro de 1 h. Los resultados del monitoreo térmico arrojaron temperaturas medias anuales positivas: entre 2,6-3,5°C para el aire; entre 4,7-6,1°C para el suelo a 5 cm y entre 4,7-5,0°C para el suelo a 50 cm. Estos valores son anormalmente altos para este tipo de ambiente, por lo que es probable que los glaciares de roca activos de la COA estén en desequilibrio con las condiciones climáticas actuales.

### **CONSIDERACIONES FINALES**

La COA registra una prolongada actividad glaciaria y periglaciaria durante el Cuaternario. Evidencias de la actividad glaciaria han quedado muy bien representadas por encima de 3500 m s.n.m. Cinco eventos glaciarios

principales han ocurrido durante el Pleistoceno tardío. De su análisis y comparación con otros indicadores paleoclimáticos se desprende que los eventos glaciarios de la COA se correlacionan con períodos fríos y húmedos (relacionado al SMS) en los Andes Centrales, con períodos fríos en el Atlántico Norte y períodos más cálidos en Patagonia y Antártida. Una vez que la actividad glaciaria cesó (post ~12 ka) numerosos glaciares de roca se desarrollaron en la COA. Se han inventariado 635 glaciares de roca, donde el límite inferior de los glaciares de roca activos se encuentra ~400 m por debajo de la altura de la isoterma de 0°C, por lo que es posible que se encuentren en desequilibrio con las condiciones climáticas actuales.



**Fig. 5.** Fotografía de glaciares de roca. A) Glaciar de roca activo El Tarón, ubicado al noreste del nevado de Acay. B) Glaciar de roca Varas ubicado en la sierra de Zenta. GRA: glaciar de roca activo. GRI: glaciar de roca inactivo. PL: incipiente lóbulo de proglacis.

Futuros trabajos tendientes a desentrañar la historia glaciaria de la región deberán enfocarse en establecer una cronología más precisa de los eventos glaciarios previos al Último Máximo Glaciar. Un monitoreo de glaciares de roca más extenso en el tiempo y el estudio de su estructura interna brindará información muy valiosa para interpretar los factores y procesos que gobiernan a estas geoformas en este tipo de ambientes donde las precipitaciones son muy escasas.

## AGRADECIMIENTOS

A CONICET, SECYT, FONCYT y CICTERRA por el financiamiento recibido para la realización de mi Doctorado. A mis directores, Jorge Strelin y Ricardo Astini, por haber afrontado el desafío que representaba la realización de una Tesis Doctoral. A Mike Kaplan por la ayuda recibida que ayudó a mejorar notablemente la Tesis. Al Estado Argentino por haberme dado la posibilidad de estudiar en una Universidad gratuita y al Doctorado en Ciencias Geológicas (UNC) por el premio recibido.

## REFERENCIAS

- [1] Azócar, G.F. y Brenning, A. (2010), "Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S)" *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 42-53.
- [2] Barker, S., Diz, P., Vautravers, M.J., Pike, J., Knorr, G., Hall, I. R. y Broecker, W. S. (2009), "Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation" *Nature* 457: 1097-1102.
- [3] Berger, A. y Loutre, M.F. (1991), "Insolation values for the climate of the last 10 million years" *Quaternary Science Reviews*, 10: 297-318.
- [4] Bianchi A.R. y Yañez, C.E. (1992), "Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino: Salta, Argentina". En: INTA Estación Experimental Agropecuaria, 393 pp.
- [5] Blard, P.-H., Sylvestre, F., Tripati, A.K., Claude, C., Causse, C., Coudrain, A., Condom, T., Seidel, J.-L., Vimeux, F., Moreau, C., Dumoulin, J.-P. y Lavé J. (2011), "Lake highstands on the Altiplano (Tropical Andes) contemporaneous with Heinrich 1 and the Younger Dryas: new insights from <sup>14</sup>C, U-Th dating and δ<sup>18</sup>O of carbonates", *Quaternary Science Reviews*, 30: 3973-3989.
- [6] Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W. y McCabe, A.M. (2009), "The Last Glacial Maximum", *Science*, 325: 710-4.
- [7] Denton, G.H., Anderson, R.F., Toggweiler, J.R., Edwards, R.L., Schaefer, J. M. y Putnam, A.E. (2010), "The Last Glacial Termination", *Science*, 328: 1652-1656.
- [8] Dunai, J.T. (2010), "Cosmogenic Nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences". Cambridge, Cambridge University, 199 pp.
- [9] EPICA (2004), "Eight glacial cycles from an Antarctic ice core", *Nature*, 429: 623-628.
- [10] Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. (2009), "Present-day South American climate", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281: 190-195.
- [11] Haselton, K., Hilley G. y Strecker M.R. (2002), "Average Pleistocene climatic patterns in the Southern Central Andes: controls on mountain glaciation and palaeoclimate implications", *Journal of Geology*, 110: 211-26.
- [12] Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. y Jarvis A. (2005), "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas", *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
- [13] Kelly, M.A., Lowell, T., Applegate, P.J., Phillips, F.M., Schaefer, J.M., Smith, C.A., Kim, H., Leonard K.C. y Hudson A.M. (2015), "A locally calibrated, late glacial <sup>10</sup>Be production rate from a low-latitude, high-altitude site in the Peruvian Andes", *Quaternary Geochronology*, 26: 70-85.
- [14] Klein, A.G., Seltzer, G.O. e Isacks, B.L. (1999), "Modern and last local glacial maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and northern Chile", *Quaternary Science Reviews*, 18: 63-84.
- [15] Lal, D. (1991), "Cosmic-ray labeling of erosion surfaces in-situ nuclide production rates and erosion models", *Earth Planetary Science Letters*, 104: 424-439.

- [16] Lliboutry, L. (1965), "Traité de glaciologie, tome 2: Glaciers, variations du climat, sols gelés", Paris, Masson et Cie, 612 pp.
- [17] Martini, M.A., Strelin, J.A. y Astini, R.A. (2011), "Altura de paleolíneas de equilibrio glaciar en el Nevado de Chañi, noroeste argentino: comparación entre diferentes métodos de estimación" en *Actas XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Argentina*.
- [18] Martini, M.A., Strelin, J.A. y Astini, R.A. (2013), "Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30: 569-581.
- [19] Martini, M.A., Strelin, J.A. y Astini, R.A. (2014), "Monitoreo térmico y medición del flujo superficial del glaciar de escombros Varas, Sierra de Zenta, Cordillera Oriental (noroeste argentino)", en *Actas XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, Argentina*.
- [20] Martini, M.A., Strelin, J.A. y Astini, R.A. (2015), "Distribución y caracterización de la geomorfología glaciar en la Cordillera Oriental de Argentina", *Acta geológica lilloana*, 27 (2): 105-120.
- [21] Pillans, B. y Gibbard, P. (2012), "The Quaternary Period" en *The Geologic Time Scale*, Boston, Elsevier Ed., pp. 979-1010.
- [22] Placzek, J.C. Quade, J. y Patchett, P.J. (2006), "Geochronology and stratigraphy of late Pleistocene lakes cycles on the southern Bolivian Altiplano: implications for causes of tropical climate change", *GSA Bulletin*, 118: 515-532.
- [23] Placzek, C.J., Quade, J. y Patchett, P.J. (2013), "A 130 ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano", *Earth and Planetary Science Letters*, 363: 97-108.
- [24] Quade, J., Rech, J.A., Betancourt, J.L., Latorre, C., Quade, B., Rylander, K.A. y Fisher, T. (2008), "Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile", *Quaternary Research*, 69: 343-360.
- [25] Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Svensson, A.M., Steffensen, J.P., Vinther, B.M., Clausen, H.B., Siggaard-Andersen, M.L., Johnsen, S. J., Larsen, B.L., Dahl-Jensen, D., Bigler, M., Röthlisberger, M., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M.E. y Ruth, U. (2006), "A new Greenland ice core chronology for the last glacial Termination", *Journal of Geophysical Research*, 111: 1984-2012.
- [26] Stone, J.O. (2000), "Air pressure and cosmogenic isotope production", *Journal Geophysical Research*, 105: 23753-23759.
- [27] Trombotto D., Buk E. y Hernández, J. (1999), "Rockglaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°-34°S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina", *Bamberger Geographische Schriften*, 19: 145-173.
- [28] Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmainer, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Nogues-Paegle, J., Silva Dias, P.L. y Zhang, C. (2006), "Toward a unified view of the American Monsoon System", *Journal of Climate*, 19: 4977-5000.
- [29] Wang, X., Auler, A.S., Edwards, R.L., Cheng, H., Cristalli, P.S., Smart, P.L., Richards, D.A. y Shen, C.-C. (2004), "Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies", *Nature*, 432: 740-743.
- [30] Wang, X., Auler, A.S., Edwards, R.L., Cheng, H., Ito, E., Wang, Y., Kong, X. y Solheid, M. (2007), "Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years", *Geophysical Research Letters*, 34: L23701.
- [31] Wright, J. D. (2000), "Global Climate Change in Marine Stable Isotope Records, in Quaternary Geochronology: Methods and Applications", en (eds J. S. Noller, J. M. Sowers and W. R. Lettis), American Geophysical Union, Washington, D. C. doi: 10.1029/RF004p0427
- [32] Zech, J., Zech, R., Kubik, P.W. y Veit, H. (2009), "Glacier and climate reconstruction at Tres Lagunas, NW Argentina, based on <sup>10</sup>Be surface exposure dating and lake sediment analyses" *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284: 180-190.