

Distribución y caracterización de la geomorfología glaciar en la Cordillera Oriental de Argentina

Martini, M.¹; Strelin, J.^{1,2}; Astini, R.¹

¹ Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CONICET-UNC), Vélez Sársfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina. mmartini@efn.uncor.edu, mmartini@unc.edu.ar

² Convenio DNA - Universidad Nacional de Córdoba, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina.

► **Resumen** — La Cordillera Oriental de Argentina (COA) presenta una forma elongada norte-sur extendiéndose desde los 22° hasta los 26,3° LS. Actualmente debido a un efecto orográfico en las precipitaciones presenta una notable asimetría entre su vertiente oriental más húmeda y la occidental más seca. Durante el Pleistoceno tardío numerosos glaciares ocuparon los sectores más altos de las distintas serranías que la componen. En este trabajo se realizó un relevamiento de la distribución de la morfología glaciar, una caracterización de las principales geoformas glaciares reconocidas y se discutió acerca de su implicancia paleoclimática. Además, se eligieron dos sectores representativos dentro de la COA para ilustrar las principales características de su morfología glaciar. Las geoformas más abundantes corresponden acircos, valles, aristas y morenas, cuyas características y distribución permiten inferir que fueron generadas por glaciares de valle de base húmeda. La longitud máxima que alcanzaron los glaciares no superaba los 10 km. Las morenas se sitúan por encima de la cota de ~3500 m y altitudinalmente presentan una asimetría en sentido este-oeste, ya que en la vertiente oriental alcanzan cotas menores que en la vertiente occidental. Esta asimetría estaría marcando que durante las glaciaciones el patrón de precipitación habría sido similar al actual. De acuerdo a las características de las morenas marginales se interpretó que en el margen de los glaciares existía una evacuación reducida de los sedimentos hacia sectores proglaciares, lo que se asocia con una alta tasa de aporte de detritos desde las cabeceras de los glaciares y condiciones climáticas áridas a semi áridas.

Palabras clave: Noroeste Argentino, glaciaciones de altura, Pleistoceno tardío, morenas.

► **Abstract** — “Distribution and characterization of glacial geomorphology in the Cordillera Oriental, Argentina”. The Cordillera Oriental of Argentina (COA) is a north-south trend mountain range which extends from 22° to 26.3° SL in Northwestern Argentina. An orographic effect on the precipitations creates a sharp contrast between the wetter eastern side and the drier western side. Many glaciers occupied the highest parts of the COA during the Late Pleistocene. In this work we survey the distribution of the glacial geomorphology, characterize the main geomorphic features, and discuss about its paleoclimatic implications. Also, we choose two representative sectors to show the main characteristics of the glacial geomorphology of the COA. The main glacial landforms correspond to cirques, valleys, arêtes and moraines. The characteristics and distributions of these landforms suggest that they were formed by typical wet-based valley glaciers which maximum length was less than 10 km. The moraines are located above ~3500 m a.s.l. and show an east-west asymmetry, where they are best developed and reach lower altitudes in the eastern slope than in the western slope. This difference is attributed to the greater amount of precipitation on the eastern slope which indicates that the pattern of rainfall during the glaciations was similar to the present. The characteristics of the marginal moraines suggest a decoupling between the glacial and glacial-fluvial transport systems, which is associated with high rates of sediment supply to the glaciers and arid to semi-arid climate.

Keywords: Northwestern Argentina, high-altitude glaciations, Late Pleistocene, moraines.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los trabajos pioneros de Caldenius (1932), se ha avanzado bastante en el reconocimiento de los paisajes englazados de la Cordillera Patagónica y Tierra del Fuego, aunque siguen debatiéndose temas referidos a su cronología y conexión con los cambios climáticos regionales y globales (Mercer, 1976; Clapperton, 1983, 1993; Denton *et al.*, 1999; Strelin *et al.*, 2011; entre otros). Es, sin embargo, aún escaso el conocimiento que se tiene de los episodios glaciares que afectaron al resto de la Cordillera de los Andes en territorio argentino. En este contexto la Cordillera Oriental de Argentina (COA) constituye una de las regiones menos conocidas y más ricas en información referida al comportamiento glaciar durante el Cuaternario del país. Esta zona, con notable morfogénesis glaciar ha sido desatendida o postergada tanto por desconocimiento, como por las dificultades de acceso y problemas de origen técnico para la obtención de una cronología absoluta de los diversos sistemas glaciares allí presentes.

En este trabajo se realiza un relevamiento de la geomorfología glaciar de la COA conjuntamente con una caracterización sus principales geoformas. Asimismo, se discute acerca la distribución de los depósitos morénicos, las variaciones altitudinales que presentan y sus implicancias paleoclimáticas.

2. ANTECEDENTES

Varios autores mencionan la presencia de morenas, circos y valles glaciares dentro de la COA sin detenerse en un estudio detallado del origen y distribución de estas geoformas ya que, en su mayoría, se trata de trabajos regionales (Méndez, 1974; Turner y Mon, 1979; Igarzábal, 1999; Tchilinguirian y Pereyra, 2001; Malagnino, 2013) u Hojas Geológicas (Vilela, 1956; Turner, 1964a y 1964b; Blasco *et al.*, 1996; Hong, *et al.*, 1998; Rubiolo *et al.*, 2001; González *et al.*, 2004).

Geoformas de origen glaciar en el nevado de Chañi fueron descriptas por Schmei-

der (1923) a comienzos de siglo XX. Este autor interpretó las morenas laterales, centrales y terminales en el faldeo oriental del nevado de Chañi como producto de cinco fases glaciares, no observando la presencia de morenas en el faldeo occidental del nevado. Para la cuenca superior del río Juramento (sierras de Lampasillos, Pastos Grandes, nevados de Acay y Cachi) Igarzábal (1981) describe depósitos fluvioglaciares y glaciocustres, morenas, circos glaciares y glaciares de escombros, haciendo hincapié en la evolución de estos últimos.

Más recientemente, Zipprich *et al.* (2000) efectuaron un estudio de la geomorfología glaciar y sus depósitos asociados en la sierra de Santa Victoria, donde describen ocho generaciones de morenas. Basándose en dataciones radiocarbono e índices de meteorización en paleosuelos determinaron una edad relativa para los procesos glaciares y periglaciares de la región. Sin embargo, este trabajo carece de un mapa geomorfológico. Para este mismo sector de la COA, Kull *et al.* (2003) realizaron un modelado climático para el Último Máximo Glacial en la sierra de Santa Victoria concluyendo que, para dicho stadial de la Última Glaciación, la precipitación debió aumentar entre 400 y 1150 mm/año, la nubosidad entre 20-45% y la temperatura debió disminuir entre 4,5-8°C respecto a los valores actuales. También en la sierra de Santa Victoria, Zech *et al.* (2009) dataron diferentes morenas con el método de isótopos cosmogénicos obteniendo un gran variabilidad de edades que van desde el Estadío Isotópico 5 al Tardiglacial.

Por último, Martini (2014) realizó un estudio de la geomorfología glaciar en la COA y fechó con isótopos cosmogénicos (^{10}Be) parte de las morenas presentes en el nevado de Chañi encontrando avances glaciares correspondientes al Estadío Isotópico 3 hasta tardiglaciales. Tanto Martini (2014) como Zech *et al.* (2009) no encontraron depósitos morénicos generados durante el Holoceno, donde sí se desarrollaron numerosos glaciares de escombros que actualmente presentan distintos grados de actividad (Martini *et al.*, 2013; Falaschi *et al.*, 2014).

3. MARCO REGIONAL

3.1 UBICACIÓN

La Cordillera Oriental se encuentra ubicada en el borde este de la Cordillera de los Andes entre los países de Argentina, Bolivia y Perú. Dentro del Noroeste Argentino (NOA) es considerada una Provincia Geológica (Ra-

mos, 2000) que posee una forma elongada en sentido norte-sur, extendiéndose desde los 26,3° S en el sur hasta los 22° S en el norte y cubriendo una superficie de ~48.730 km² (Figura 1A). 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°

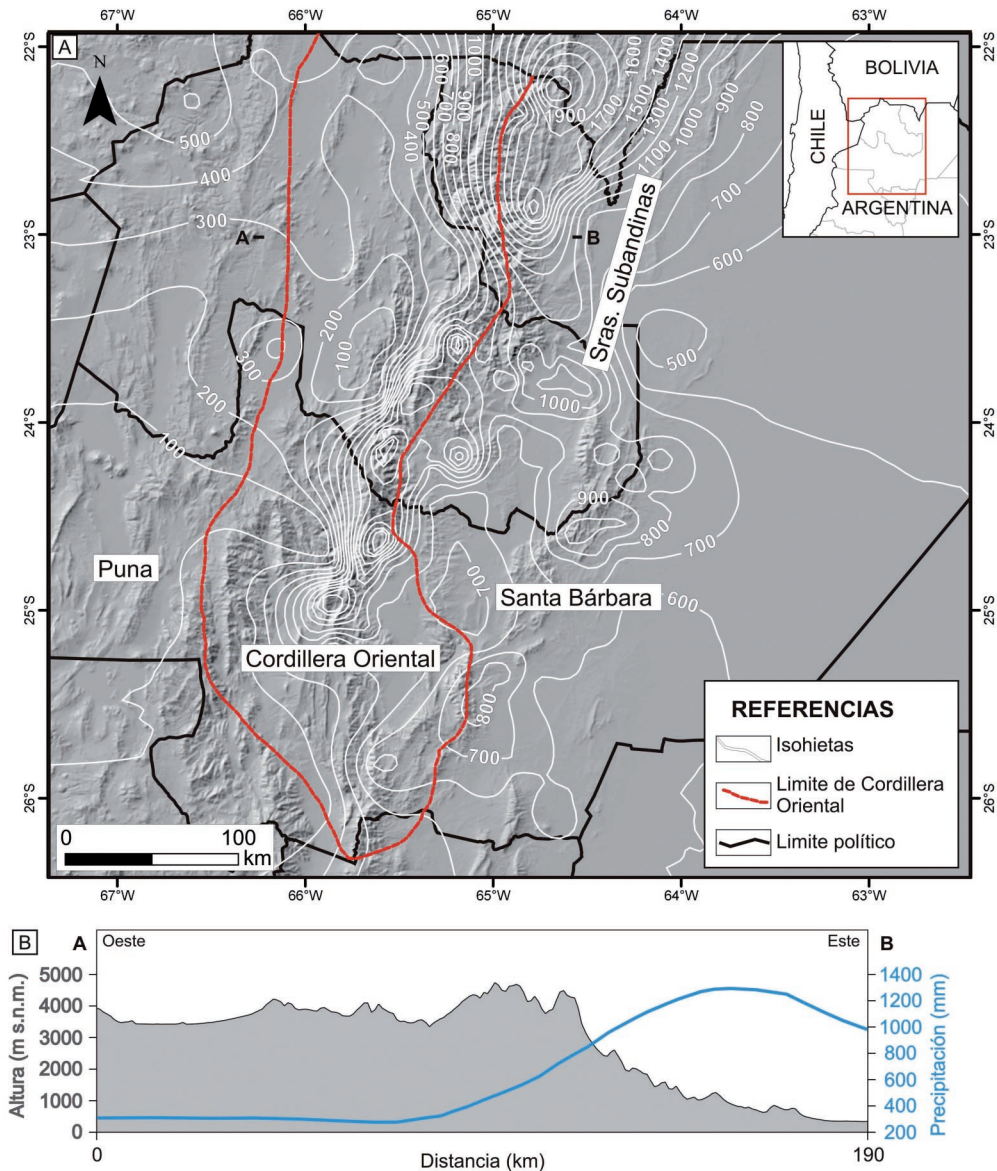


Figura 1. A) Mapa de sombreado del Noroeste Argentino con isohietas (equidistancia 100 mm; extraídas de Bianchi, 2005) mostrando el límite de la Cordillera Oriental según Ramos (2000). B) Perfil topográfico y de precipitaciones a los ~23° LS. Notar como las precipitaciones disminuyen al aumentar la altura.

Figura 2 [pág. opuesta]. Sectores que presentan morfología glaciar en la COA y zonas adyacentes. Los números indican las diferentes serranías mencionadas en la Tabla 1: 1) sierra de Santa Victoria (C° Fundición, 5055 m s.n.m.); 2) sierra de Zenta (C° Colorado de Casapalá, 5116 m s.n.m.); 3) sierra de Aguilar (5120 m s.n.m.); 4) sierra de Tilcara (C° Zucho, 4995 m s.n.m.); 5) sierra Alta (5205 m s.n.m.); 6) C° Rosario (-5043 m s.n.m.); 7) nevado de Chañi (5940 m s.n.m.); 8) nevado del Castillo (C° General Güemes, 5565 m s.n.m.); 9) nevado de Acay (5716 m s.n.m.); 10) sierra de Lampasillos (C° San Miguel, 5750 m s.n.m.); 11) sierra de Pastos Grandes (C° Incamayo, 5502 m s.n.m.); 12) nevado de Cachi (C° Libertador San Martín, 6380 m s.n.m.); 13) cumbres de Zamaca y Cerro Malcante (5088 m s.n.m.). Los cuadrados con letras indican la posición de la localidades mencionadas en el texto que presentan erosión de sus depósitos glaciogénicos: A) paleocañón de Tuc-Tuca; B) afloramientos de depósitos glaciogénicos en la sierra de Zenta (véase Figura 4F); C) vertiente oriental del nevado de Chañi.

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 (Figura 1A).

3.2 GEOMORFOLOGÍA

La COA posee un perfil asimétrico en sentido este-oeste (Figura 1B) con un flanco abrupto oriental y uno más tendido, y de menor relieve, occidental. En sentido norte-sur las cotas más altas de la COA se concentran entre los 24° y 25° S (e.g., nevado de Cachi, 6380 m s.n.m.; nevado de Chañi, 5940 m s.n.m.), mientras que entre los 24-22° S las alturas máximas apenas superan la cota de 5000 m. Al sur de los 25° S existe un descenso brusco de las altitudes por debajo del ambiente periglacial (Figura 2; Ahumada, 2002; Martini *et al.*, 2013). El C° Libertador San Martín ubicado en el nevado de Cachi es el pico más alto de la COA con 6380 m s.n.m.

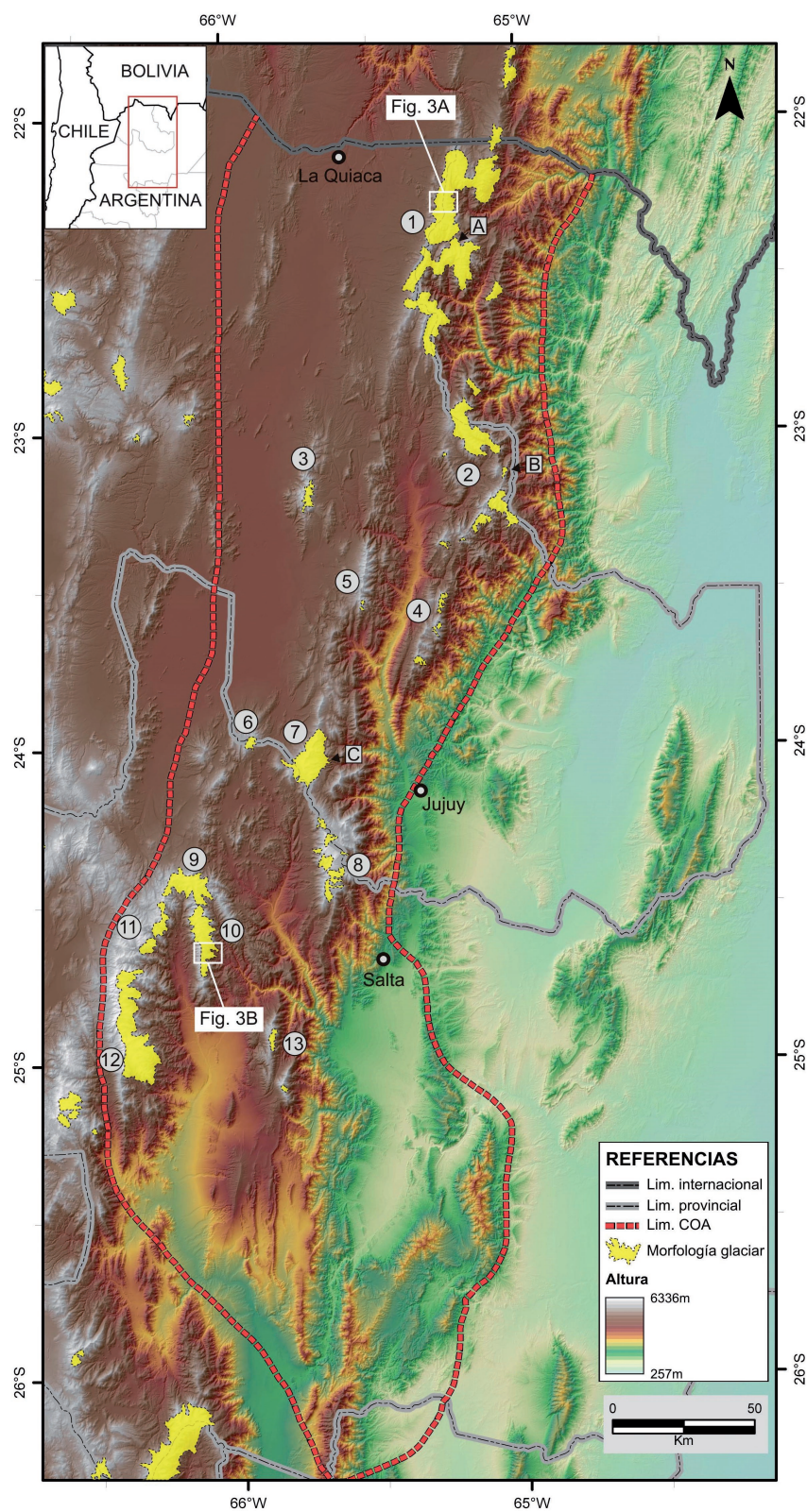
La ladera oriental de la COA presenta un paisaje fluvial fuertemente inciso con agudos interfluvios hasta los ~3500 m s.n.m. como cota máxima. Superando dicha cota el relieve se hace menos abrupto observándose un claro control glaciar en el modelado del paisaje, particularmente en las zonas más altas de las serranías. Además de la impronta que ejerció la acción de los glaciares, otros procesos aún activos como el periglacial y la remoción en masa, principalmente, actúan en los sectores cuspidales de las serranías. Al oeste de la divisoria de aguas, la COA exhibe un descenso gradual de su altura y el paisaje adquiere una

notable estabilidad, estando dominado por extensas bajadas en parte aterrazadas, antiguos depósitos pedemontanos y en los sectores más altos depósitos glaciogénicos (Rubiolo *et al.*, 2001; González *et al.*, 2004).

3.3 GEOLOGÍA

La columna estratigráfica de la región presenta una gran variedad de rocas. Su basamento está compuesto por metamorfitas de bajo grado de edad precámbrica-cámbrica inferior correspondientes a la Formación Puncoviscana, ampliamente distribuida en la COA, y en menor medida por intrusivos graníticos de edad paleozoica inferior (Turner y Mon, 1979). Mediante diferentes discordancias se depositaron sedimentitas del Cámbrico y Ordovícico (Grupos Mesón y Santa Victoria) y, del Silúrico y Devónico, principalmente (Astini, 2008). Posteriormente, entre el Cretácico y el Eoceno, y en discordancia sobre las rocas más antiguas se depositaron las distintas unidades de *rift* del Grupo Salta. Por último, depósitos sin orogénicos andinos del Terciario coronan la estratigrafía de la región (Hernández *et al.*, 1999).

El alzamiento generalizado de la región se produjo principalmente entre el Mioceno y el Plioceno (DeCelles *et al.*, 2011). Estructuralmente se caracteriza por láminas de corrimiento norte-sur con vergencia este, cuyo nivel de despegue se encuentra en la Formación Puncoviscana (Ramos, 2000), lo que da como resultado cordones montañosos con una orientación predominantemente norte-sur.



3.4 CLIMA

La mayor parte de la precipitación del NOA se registra durante los meses más cálidos (diciembre a marzo) debido a la intensificación del Sistema Monzónico Sudamericano (Zhou and Lau, 1998). En su trayectoria hacia el suroeste, las masas de aire cargadas de humedad se encuentran con la COA lo que produce un ascenso de tipo orográfico de las mismas. Esto determina que la mayor parte de la humedad que contienen sea descargada sobre la ladera oriental de la COA, produciendo una marcada aridez en su ladera occidental y en la Puna (Figura 1; Bianchi y Yáñez, 1992). También existe un gradiente altitudinal de las precipitaciones que son escasas (<500 mm/año) por encima de 3500 m s.n.m. En los sectores más altos de las serranías la precipitación generalmente se presenta en forma de granizo o nieve (Igarzábal, 1981).

La altura de la isoterma de 0°C actual se sitúa a ~4916 m s.n.m. (Martini *et al.*, 2013). A pesar de que numerosas sierras de la COA superan ampliamente esta altura (Figura 2) no existen verdaderos glaciares en ella. Martini *et al.* (2013) identificaron 4 cuerpos de hielo o nieve perenne en las inmediaciones del Nevado de Cachi por encima de la cota de 5600 m cuya área en planta no supera el 1 km². Teniendo en cuenta la posición topográfica, altura y condiciones climáticas en que estos pequeños cuerpos se sitúan, corresponderían a lo que Lliboutry (1965) denominó «glaciares reservorio». Este tipo de glaciares se desarrollan en clima áridos y presentan algunas particularidades que los diferencian del resto de los glaciares, como ser: no poseen un flujo considerable, se encuentran por encima de la isoterma de 0° C y el balance de masa anual es prácticamente igual en cualquier sector del glaciar,

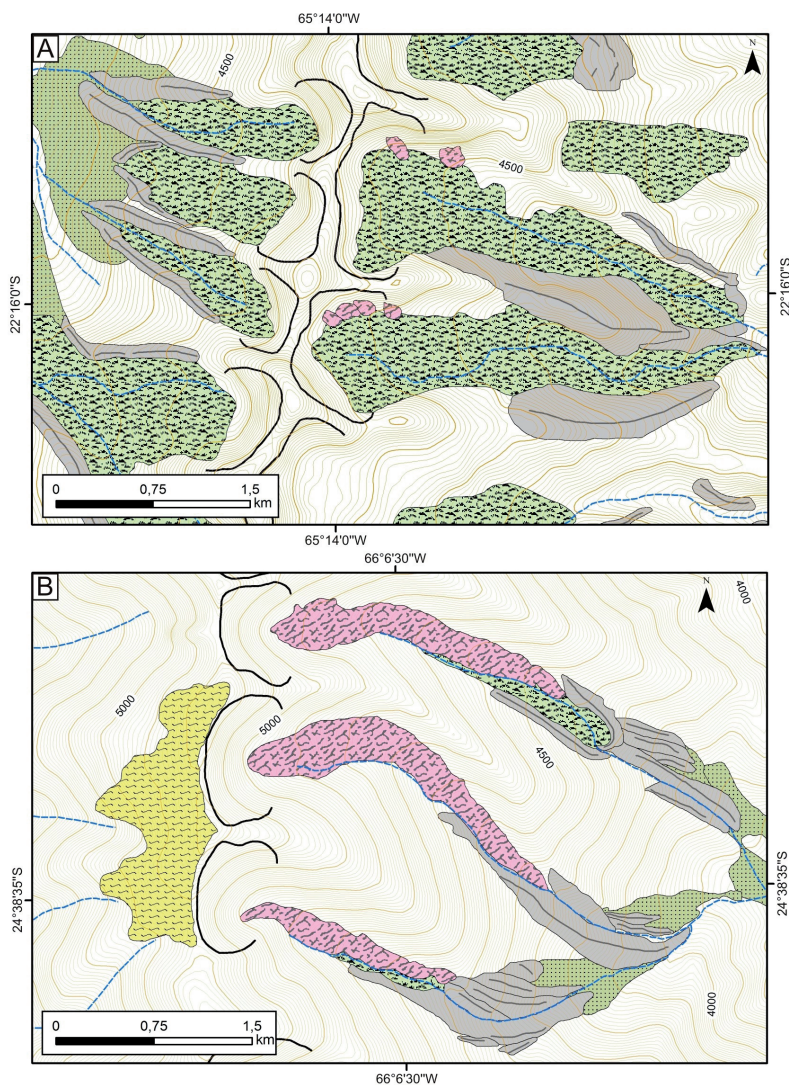
Tabla 1. Cota inferior que alcanzan las morenas en la vertiente oriental y occidental de las distintas serranías de la COA. Para su ubicación referirse a la Figura 2. Las distintas serranías se ordenan de norte a sur desde arriba hacia debajo de la tabla.

^a No se encontraron morenas pero sí se distinguen rasgos de erosión glaciar.

^b Sobre el Cerro Zucho, en la sierra de Tilcara, existen dos valles que drenan hacia el oeste donde las morenas alcanzan la cota de 4437 m. Estos valles no pertenecen a la vertiente occidental de la sierra sino que localmente poseen una orientación hacia el oeste.

^c Se encuentran parcialmente erosionadas, por lo que dicha cota debe ser aún menor.

Cordón montañoso o Cerro	Altitud del cordón montañoso o Cerro (m s.n.m.)	Cota inferior de las morenas (m s.n.m.)	
		Vertiente oeste	Vertiente este
Sierra de Santa Victoria	5055	4239	3446
Sierra de Zenta	5116	4226	3905
Sierra del Aguilar	5120	- ^a	4265
Sierra de Tilcara	4995	- ^b	3870
Sierra Alta	5205	-	4129
C° Rosario	5043	-	4255
Nevado de Chañi	5940	4151	3790 ^c
Castillo	5565	4272	3938
Nevado de Acay	5716	4395	4263
Sierra de Lampasillos	5750	4107	3888
Sierra de Pastos Grandes – nevado de Cachi	6380	-	3930
Cumbres de Zamaca y C° Malcante	5088	-	3782



REFERENCIAS

-  Morenas de fondo
-  Morenas laterales o frontales
-  Glaciares de escombros
-  Sedimentos glacifluviales
-  Lóbulos de gelifluxión
-  Circos
-  Crestas morénicas
-  Drenaje
-  Curvas de nivel (eq. 10m)

Figura 3. Mapa de geomorfología glaciar y periglacial de dos sectores representativos de la COA, escogidos a modo de ejemplo. A) Sierra de Santa Victoria; B) sector austral de la sierra de Lampasillos. Para conocer la ubicación de los mapas ver Figura 2.

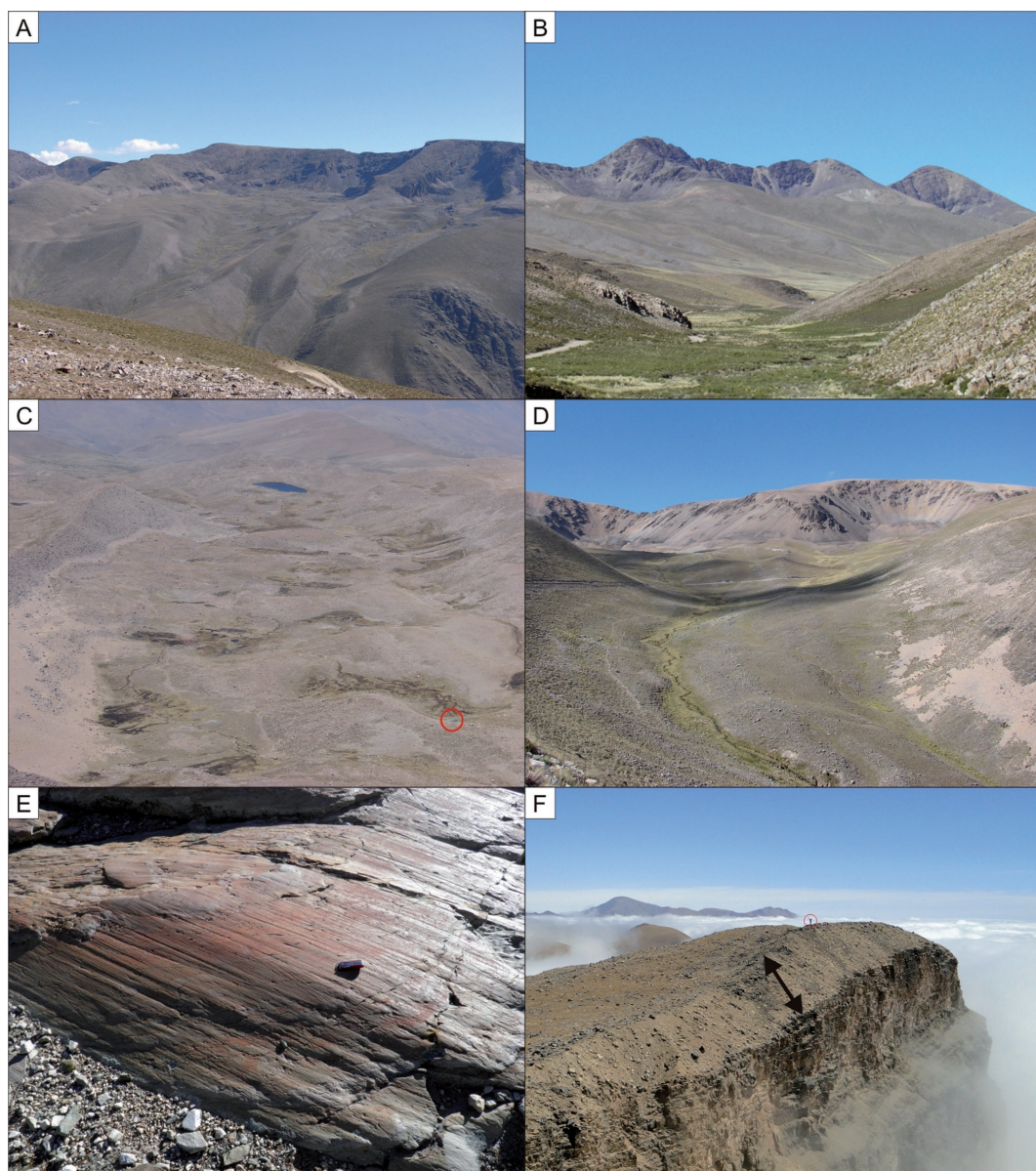


Figura 4. Fotografías de campo de: A) y B) circos y morenas laterales; C) morenas de fondo [vista aguas abajo, el círculo indica al refugio del Chañi como escala]; D) valle glaciar y circos donde en su base se desarrollan glaciares de escombros; E) afloramiento pulido y estriado; F) vista hacia el norte de la vertiente oriental de la sierra de Zenta que ha quedado expuesta por erosión. Las flechas indican los sedimentos glaciogénicos de ~16 m de espesor que yacen sobre el basamento Ordovícico. El círculo rojo encierra a una persona como escala.

que gana o pierde masa en toda su superficie sin existir una relación entre el balance de masa y la altura (Milana, 2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un mapeo geomorfológico sobre la base de imágenes satelitales de alta resolución extraídas del programa *Google*

Earth y fotografías aéreas escala $\sim 1:65.000$ (del nevado de Chañi y parte de la sierra de Santa Victoria) para caracterizar y determinar la distribución espacial de geoformas glaciogénicas. Se realizaron controles de campo del mapeo geomorfológico en diferentes sectores la COA. Asimismo, se seleccionaron sectores específicos representativos que sirven, a modo de ejemplo, para ilustrar las principales características de las geoformas glaciares encontradas (Figura 3). Para realizar una comparación altitudinal de los depósitos glaciarios de las principales serranías de la COA (Tabla 1) se obtuvo la cota inferior que alcanzan las morenas sobre sus vertientes este y oeste. Dicha cota se tomó sobre la cresta de cada morena. Como base topográfica se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de ~ 90 m de resolución obtenido a través del *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI, versión 4.1). El mapeo geomorfológico fue realizado utilizando el sistema de información geográfica ArcMap 10.

5. GEOMORFOLOGÍA GLACIAR EN LA COA

5.1 DISTRIBUCIÓN Y PRINCIPALES GEOFORMAS

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 ($\sim 22^\circ$ S) hasta los $\sim 25^\circ$ S (Figura 2). Son numerosas las sierras que en sus sectores más elevados poseen evidencias morfológicas de la existencia de glaciares en el pasado (Tabla 1). La distribución de las geoformas de origen glaciar de la COA, tanto erosivas como depositacionales, y la cota inferior que alcanzan puede verse en la Tabla 1 y Figura 2.

Las geoformas glaciares más comunes son los circos, valles, aristas y morenas. Las morenas son las geoformas depositacionales más ampliamente distribuidas. Entre las morenas marginales, las laterales son las que más abundan, seguidas por las frontales (Figura 4). Las morenas laterales se destacan

por su mayor extensión areal y espesor, éste último supera muchas veces los 100 m. Es común observar que las morenas laterales se encuentran casi paralelas, con solo una leve tendencia a un cierre (morenas frontales), cerca del frente del antiguo glaciar (Figura 3). El centro de los valles suele estar tapizado por morenas de fondo que en algunos sitios de mayor altura relativa son interrumpidas por rocas aborregadas y pavimentos estriados (Figura 4E). Estas morenas de fondo poseen un relieve en domos y cuencas (tipo *hummocky*, Figura 4C) siendo también comunes las formas aflautadas (*fluted moraines*). En las proximidades a las cabeceras de los valles es común encontrar sobre las morenas de fondo crestas morénicas frontales de poco relieve (< 10 m) que se disponen paralelas entre sí y corresponden a depósitos recesivos. Estas morenas en algunos casos se reconstruyen a partir de bloques erráticos alineados en el fondo del valle.

Los depósitos glaciales 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. Rubiolo *et al.* (2001) reconoce además depósitos glaciales de mayor extensión areal formando parte de antiguos piedemontes plio-pleistocenos sobre las vertientes occidentales y que, en algunos casos, no presentan conexión con depósitos glaciarios estando parcialmente disectados y aterrazados.

Los circos glaciares son abundantes y han quedado muy bien preservados debido a que los procesos que degradan el paisaje son menos eficientes en los sectores cuspidales de las sierras donde las precipitaciones son escasas (< 400 -300 mm/año) (Figura 4). Sin embargo, los procesos gravitacionales (principalmente la reptación y la caída de bloques) promovidos por el crioclastismo actúan sobre ellos. Generalmente, cuando el aporte de detritos desde las cabeceras es alto, se desarrollan taludes que dan lugar a glaciares de escombros en el pie de los circos (especialmente en los orientados hacia el sur

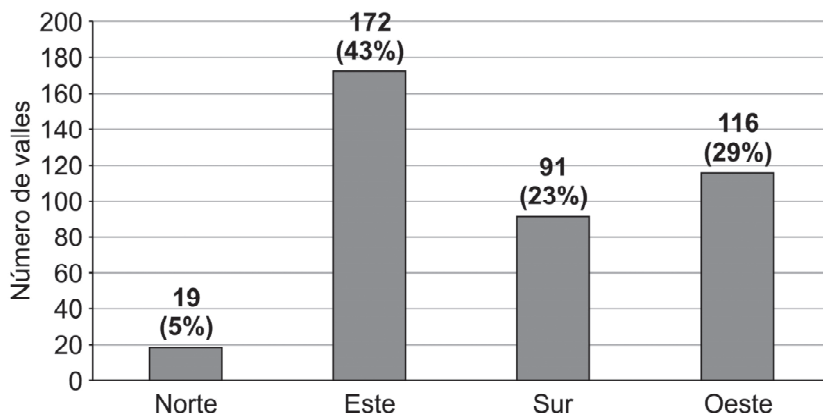


Figura 5. Orientación de los principales valles glaciares de la COA.

y el este), que pueden ser tanto lobulados como lenguados (Martini *et al.*, 2013) (Figura 3 y 4D). Existen sectores en el extremo noreste de la sierra de Santa Victoria, donde los circos coalescen presentando pequeñas abras o cols entre sus cabeceras.

Los valles glaciares poseen perfil en «U» aunque en muchos casos procesos posteriores a su formación han modificado su morfología (Figura 4). En estos casos, los flancos de los valles glaciares expuestos hacia el sur son más abruptos y en general aportan una mayor cantidad de material detrítico hacia el fondo de los valles, en comparación con los flancos expuestos hacia el norte. A su vez, las laderas expuestas al sur albergan mayor cantidad de glaciares de escombros que aquellas expuestas hacia el norte (Martini *et al.*, 2013). La desigual insolación que reciben ambas laderas (norte y sur) es lo que ha generado la fuerte asimetría entre los laterales de los valles. La orientación longitudinal predominante de los valles es hacia el este (43%), seguida por la orientación hacia el oeste (29%) y sur (23%), mientras que muy pocos se orientan hacia el norte (5%) (Figura 5). Cuando los valles glaciares se encuentran muy próximos entre sí, el interfluvio exhibe forma de arista y presenta distintos grados de continuidad.

5.2. GEOMORFOLOGÍA DE LOS SECTORES REPRESENTATIVOS

Sector abra de Lizoite.— La Figura 3A muestra la morfología glaciar del área comprendida entre el abra de Lizoite al norte y el Cerro Soyono (4950 m s.n.m.) al sur, dentro de la sierra de Santa Victoria (Figura 2). Este sector coincide con la divisoria de aguas entre la vertiente este (cuenca del río Bermejo) y oeste (cuenca del río Pilcomayo) en este sector de la COA. Entre estas dos vertientes se observa una fuerte asimetría en el registro glaciar.

Sobre la vertiente oriental, se observan dos valles principales en el centro del mapa. Las laderas expuestas hacia el sur de estos valles presentan una pendiente media de 27°, mientras que en las expuestas hacia el norte la pendiente es de 23°. Las morenas laterales y frontales de estos valles se extienden sin presentar signos erosivos marcados hasta la cota 4070 m. Ya fuera del área de mapeo, unos 2,8 km hacia el este pueden alcanzar la cota de 3650 m encontrándose de forma discontinua, parcialmente erosionadas. Dentro de esta vertiente se destacan dos morenas por su espesor. La ubicada más al sur (lateral) posee un espesor de ~90 m, mientras que la que se sitúa entre los dos valles principales (central) alcanza un espesor de ~200 m. Las morenas de fondo son las que poseen mayor distribución areal (3 km² dentro de los dos valles principales).

Los dos circos ubicados sobre esta vertiente oriental presentan formas diferentes lo que se ve reflejado en su relación largo/ancho (L/A). El circo ubicado al norte posee un relación L/A de 0,45 y el ubicado al sur de 0,62; mientras que su amplitud (diferencia entre su altura máxima y mínima) es de 300 y 280 m, respectivamente. Al pie de estos circos, por encima de 4500 m s.n.m., se desarrollan 6 pequeños glaciares de escombros con orientación sur y este cuya área en planta no supera los 0,03 km².

Sobre la vertiente occidental, se presentan tres valles con morenas laterales y frontales de menor espesor (30-40 m) respecto a las de la vertiente oriental. Las morenas se extienden hasta la cota de 4270 m, es decir, 200 m por encima de las de su contraparte oriental. También aquí las morenas de fondo son las que poseen mayor extensión areal (1,4 km²). En contacto con las morenas marginales se presentan depósitos glacifluviales. Los circos son de menor tamaño, su amplitud varía entre 270 y 190 m y su relación L/A entre 0,55 y 0,68.

Sector sur de la sierra de Lampasillos.— Este sector se encuentra 15 km al noreste de la localidad de La Poma, sobre la sierra de Lampasillos. A diferencia del abra de Lizoitte, sobre la vertiente occidental no se observa morfología glaciar. Sobre dicha vertiente, por encima de la cota de 4900 m, se destaca una extensa superficie (1,1 km²) cubierta por lóbulos de geliflucción (Figura 3B).

Sobre su vertiente oriental se presentan tres valles glaciares de los cuales el más largo (4,4 km) se ubica al norte. Las laderas de estos valles expuestas hacia el sur presentan una pendiente media de 30°, mientras que en las expuestas hacia el norte la pendiente media es de 25°. El fondo de los valles se encuentra mayormente cubierto por glaciares de escombros que ocupan un área de 1,5 km², estando subordinadas las morenas de fondo (0,3 km²). Las morenas laterales se encuentran mayoritariamente sobre el lateral norte del valle, y presentan desniveles de hasta 60 m entre el fondo del valle y la cresta. Depósitos glacifluviales se encuen-

tran restringidos al fondo de los valles formando valles de sandur. Los circos poseen una amplitud entre 300 y 330 m y su relación L/A varía entre 0,58 y 0,68.

5.3. EROSIÓN DE LOS DEPÓSITOS GLACIGÉNICOS

La baja erosión fluvial que existe por encima de 3500 m s.n.m., coincidente con la cota en la cual comienza a prevalecer el antiguo paisaje glaciar, ha posibilitado la preservación de los rasgos geomorfológicos de más de una glaciación (Zech *et al.*, 2009; Martini, 2014). Sin embargo, existen algunas excepciones en las partes altas de las vertientes orientales de la sierra de Santa Victoria, sierra de Zenta y del nevado de Chañi (Figura 2), donde se observan profundos cortes verticales, que exponen los depósitos glaciares y se describen a continuación.

En la vertiente oriental de la sierra de Zenta y a ~3,5 km al norte del abra homónima (Figura 2), la erosión fluvial conjuntamente con la remoción en masa han generado un abrupto paredón de >1000 m de desnivel (23° 8' 24,8" S; 65° 2' 16,3" O). La incisión del paisaje se ha generado sobre sedimentitas del Grupo Santa Victoria (Ordovícico) y en la parte superior afecta a un depósito de ~16 m de espesor de sedimentos glacigénicos (Figura 4F). Tanto los bloques incorporados en el till como los asomos de afloramientos de rocas del basamento presentan estrías que evidencian un origen glaciar. En planta, los depósitos glaciares corresponden a morenas de fondo, laterales y frontales, parcialmente retrabajadas, cuya cota inferior se encuentra a 4264 m. De acuerdo a la dirección de las estrías y la disposición de los depósitos glacigénicos, estas morenas han sido depositadas por un glaciar que fluía hacia el oeste. La mayor parte del área de acumulación del antiguo glaciar que depositó las morenas ha sido erosionada, quedando el valle «decapitado» (Figura 4F).

Otro caso donde los depósitos glaciares han sido erosionados y han quedado expuestos se observa en la localidad de Tuc-Tuca (22° 24' 1" S; 65° 11' 3" O) sobre la ruta que

une Humahuaca con Nazareno. En este caso, ocurre algo similar a lo descripto anteriormente para la sierra de Zenta donde la cabecera del valle por donde fluía el glaciar ha sido removida por erosión fluvial retrocedente y remoción en masa. Producto de la erosión ha quedado aflorando una sucesión de ~450 m compuesta de sedimentitas psefíticas de edad miocena (Astini y Martini, 2012) sobre la que se apoyan en discordancia hasta 30 m de diamictitas glaciares correspondientes a morenas laterales y de fondo. Sobre la vertiente oriental del nevado de Chañi la erosión fluvial retrocedente también ha llegado a erosionar depósitos morénicos dejando parches aislados de morenas entre cursos fluviales incisos en el basamento.

5.4. VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LOS DEPÓSITOS GLACIGÉNICOS

En la Tabla 1 se observa que existe un aumento generalizado de la cota que alcanzan los depósitos morénicos en sentido este-oeste (e.g. Figura 3A). Además, algunas serranías como el caso de la sierra de Tilcara, las Cumbres de Zamaca y C° Malcante, la sierra Alta, el C° Rosario y la sierra de Pastos Grandes-nevado de Cachi no presentan morenas en sus vertientes occidentales. La sierra de Lampasillos contiene morenas en su vertiente occidental sólo en su extremo norte (Figura 3B). En sentido norte-sur, tanto en las vertientes orientales como occidentales no se observa una tendencia de aumento o disminución en las cotas que alcanzan las morenas, sino que se mantiene más o menos constante (Tabla 1).

6. DISCUSIÓN

6.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS GLACIARES DEL PLEISTOCENO TARDÍO

De acuerdo a las geoformas reconocidas y su disposición, los glaciares del Pleistoceno tardío de 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 los gla-

ciars 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, donde 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.

Sólo las sierras cuya altura máxima supera los ~5000 m s.n.m. alojaron glaciares durante el Pleistoceno tardío, por lo que la altura constituyó un factor limitante para su desarrollo. Al sur del nevado de Cachi (~25° S) un descenso brusco de las alturas (Figura 2) de los cordones montañosos de la COA, no ha permitido el desarrollo de glaciares durante el Pleistoceno tardío, ni la presencia de ambiente periglacial actualmente (Martini *et al.*, 2013).

6.2. EFECTO OROGRÁFICO DE LA PRECIPITACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS GLACIARES

La asimetría en el registro glaciar entre ambas vertientes (este y oeste) de la COA indica que los glaciares que drenaban hacia el este eran arealmente más extensos y alcanzaban cotas menores que los expuestos hacia el oeste (Tabla 1, Figura 3A). Esta asimetría entre glaciares cuyas cabeceras se situaban a escasos km unos de otros (<4 km, Figura 2 y 3) pudo ser producto de una desigualdad en la cantidad de precipitación recibida. Como ha sido sugerido por otros autores en base al análisis del registro glaciar (Zipprich *et al.*, 2000; Haselton *et al.*, 2002) el patrón de circulación atmosférico actual, que hace que la vertiente oriental de la COA sea mucho más húmeda que la occidental (Figura 1), debió ser similar durante el Pleistoceno tardío cuando existían estos glaciares. Esto habría posibilitado que los glaciares ubicados al este tengan una línea de equilibrio más baja y alcancen cotas menores. Por lo tanto, la abundancia de valles glaciares expuestos hacia el este (Figura 3) se debe a una combinación entre la trayectoria de la humedad atmosférica y el rumbo general norte-sur de las sierras, que están a su vez controlados por los corrimientos que

las levantaron. Una vez que los glaciares se retiraron, este patrón de distribución del registro glaciario con circos y valles glaciares mejor desarrollados en la vertiente oriental, también ejerció un control fundamental en la distribución y tipo de los glaciares de escombros de la COA (Figura 3; Martini et al., 2013).

Este efecto en la precipitación también determinó que en algunas sierras no se desarrollen glaciares en su vertiente occidental (Tabla 1). Tal es el caso de las sierras ubicadas más hacia el oeste (e.g. sierra Alta, C° Rosario, sierra de Pastos Grandes- nevado de Cachi). A la latitud 24° S, por ejemplo, el nevado de Chañi posee depósitos glaciares en ambas vertientes (con morenas que alcanzan cotas menores en la vertiente oriental), mientras que el C° Rosario, ubicado 22 km hacia el oeste sólo presenta morenas en su vertiente oriental. Se descarta que sobre la vertiente occidental se hayan depositado morenas y luego hayan sido removidas, debido a que no se han observado sobre dicha vertiente signos de procesos erosivos capaces de eliminar completamente estos depósitos, lo que se debe principalmente a la escasa precipitación que reciben los faldeos occidentales (Figura 1). Además, sobre la vertiente occidental se preservan numerosos depósitos de piedemonte del Plioceno-Pleistoceno lo que indica un alto grado de conservación del paisaje (Rubiolo et al., 2001; González et al., 2004).

Si se comparan las cotas que alcanzan las morenas en las vertientes orientales y occidentales en sentido norte-sur no se observa una tendencia generalizada (Tabla 1). Esto puede deberse a la variación que presenta el ancho de la COA (Figura 2), que determina que los vientos cargados de humedad tengan que recorrer distintas distancias y atravesar diferentes elevaciones para alcanzar los sectores más altos de las sierras (> 3500 m s.n.m.), lo que gradualmente va produciendo cambios en su contenido de humedad. Actualmente, junto con la altura, la precipitación también está controlada por los rasgos topográficos de los cordones montañosos (Figura 1). En tal sentido, la orien-

tación de las grandes quebradas desempeña un rol importante en la cantidad de precipitación que reciben las distintas franjas transversales de la COA. Por ejemplo, la Quebrada del Toro presenta un rumbo noroeste-sureste, transversal a la trayectoria de los vientos predominantes, por lo que las precipitaciones descienden más de 700 mm en 10 km de ancho (Bianchi y Yáñez, 1992). Por otro lado, quebradas con orientación este-oeste y con un pronunciado gradiente altitudinal, como la del río León que nace en el nevado de Chañi (Figura 2), permiten que las masas de aire húmedo penetren mayores distancias aguas arriba recibiendo mayor cantidad de precipitación (Bianchi y Yáñez, 1992). Esta particularidad también debe ser tenida en cuenta a la hora de evaluar el desarrollo y distribución altitudinal de los depósitos asociados a los glaciares del Pleistoceno tardío, lo que hace más dificultosa su comparación en sentido norte-sur.

6.3. LA PRECIPITACIÓN COMO UN FACTOR LIMITANTE EN EL DESARROLLO DE GLACIARES

Como se mencionó anteriormente, dentro de la COA existen cordones serranos que superan ampliamente la altura de la isoterma de 0°C (~4916 m s.n.m.) y, sin embargo, no presentan glaciares o bien éstos no se encuentran bien desarrollados. El área total por encima de la isoterma de 0°C en la COA es de ~700 km² estando en ocasiones más de 1000 m por debajo de los picos más altos. A pesar de estas condiciones frías en la actualidad, la escasa precipitación impide la formación de glaciares bien desarrollados. De acuerdo a lo modelado por Kull et al. (2003), durante el Último Máximo Glacial la precipitación aumentó entre 2 y 4 veces, mientras que la temperatura disminuyó entre 4,5 y 8° C (ambas con respecto a los valores actuales) en la sierra de Santa Victoria. Según estos resultados para producir un avance de los glaciares en la COA sería necesario, además de una disminución de la temperatura, un aumento de la precipitación ya que actualmente es un factor importante que condiciona su formación.

6.4. PARTICULARIDADES DE LAS MORENAS DE LA COA

Como se mencionó, una característica de las morenas de la COA es el gran volumen (espesor y desarrollo areal) que presentan las morenas laterales y, en menor medida, las frontales (Figura 3). Este tipo de morenas son típicas de glaciares donde el transporte glacifluvial no es eficiente, lo que favorece la acumulación de una importante cantidad de detritos en torno a los glaciares (*decoupled ice margin*; Benn *et al.*, 2005). Esto se da en ambientes donde los glaciares poseen una alta tasa de aporte de detritos desde cabeceras y la precipitación (principalmente nival) es reducida (clima árido-semi árido) (Benn *et al.*, 2005). Bajo estas condiciones, los glaciares de la COA tuvieron una evacuación reducida de los sedimentos depositados en su frente, ya que la escasa agua de fusión glaciaria no fue suficiente para retransportarlos y depositarlos aguas abajo en el ambiente proglaciar. Si bien, como se explicó en el apartado anterior (6.3), la precipitación debió aumentar en la COA durante los períodos glaciares, ésta continuó siendo relativamente baja.

7. CONCLUSIONES

La geomorfología glaciar en la COA está ampliamente desarrollada en las zonas más altas de sus distintas serranías, extendiéndose desde los $\sim 25^\circ$ hasta los $\sim 22^\circ$ S. Las geoformas glaciares más comunes son los circos, valles, aristas y morenas. Los depósitos glaciares en forma de morenas, principalmente laterales, se presentan por encima de la cota de ~ 3500 m. El análisis de las geoformas y su distribución permitió inferir que los glaciares desarrollados en la COA durante el Pleistoceno tardío corresponden a glaciares de valle de base húmeda cuya longitud no superaba los 10 km. El marcado contraste climático que presenta actualmente la COA sobre sus flancos este y oeste también se ve reflejado en la distribución de las geoformas glaciarias. En este sentido, la vertiente oriental presenta una morfología mejor desarrollada y sus morenas alcanzan co-

tas menores que en su contraparte occidental, indicando un patrón de precipitación similar al actual para la COA durante los períodos glaciares. Las morenas laterales y, en menor medida frontales, poseen gran desarrollo areal y espesor. Esto pudo deberse a la existencia de una alta tasa de aporte de detritos en las cabeceras de los glaciares sumada a condiciones climáticas áridas a semi áridas, lo que produjo una evacuación reducida de los sedimentos depositados en los márgenes de los glaciares por parte del agua de fusión glaciaria.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por SECYT (UNC). M. Martini agradece a CONICET y CICTERRA por el financiamiento recibido para la realización del Doctorado, del cual forman parte los resultados mostrados en este trabajo. A Pablo Heredia Barión, Lucas Oliva, Marcelo Vesco, Jorge Caprano e Ignacio Scalerandi por la ayuda brindada en los trabajos de campo. A la familia Liquin (El Angosto), Flores (El Moreno) y a Valeriano Fernández (León) por la hospitalidad recibida durante las tareas de campo. A Darío Trombotto, Editor de este volumen especial, y a dos revisores anónimos por los comentarios sobre el trabajo.

REFERENCIAS

- Ahumada, A.L. 2002. Periglacial phenomena in the high mountains of northwestern Argentina. *South African Journal of Science* 98: 166-170.
- Astini, R. A. 2008. Sedimentación, facies, discordancias y evolución paleoambiental durante el cambro-ordovícico. En: Coira, B. y Zappettini, E. O. (eds.); *Relatorio del XVII Congreso Geológico Argentino*: 50-73. Jujuy.
- Astini, R.A. y Martini, M.A. 2012. El paleocañón de Tuc Tuc (noroeste argentino): ejemplo fósil de una zona de transferencia fluvial entre el borde de Cordillera Oriental-Puna y los mega-abanicos del antepaís andino. 13^a Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 13-14. Salta.
- Benn, D. I., Kirkbride, M. P., Owen, L. A. y Brazier, V. 2005. *Glaciated Valley Landsystems*. En: Evans, D. J. A. (Ed), *Glacial Landsystems*. Edward Arnold, New York.

- Bianchi A. R. 2005. Mapa de isohietas anuales sobre mosaico de imágenes SAC-C publicado en formato póster (60 x 90 cm). INTA, Estación Experimental Agropecuaria Salta.
- Bianchi A. R. y Yañez, C. E. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino: Salta, Argentina. INTA Estación Experimental Agropecuaria, 393 pp.
- Blasco, G., Zappettini, E. y Hongn, F. 1996. Hoja Geológica 2566-I, San Antonio de los Cobres, escala 1:250.000: Buenos Aires, Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Boletín N° 217, 2 mapas con texto, 126 pp.
- Caldenius, C. 1932. Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego. Ministerio de Agricultura, Buenos Aires, Dirección General de Minas y Geología 95, 150 pp.
- Clapperton, C. M. 1983. The glaciation of the Andes. *Quaternary Science Reviews* 2: 83-155.
- Clapperton, C. M. 1993. *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Amsterdam, Elsevier, 779 pp.
- DeCelles, P. G., Carrapa, B., Horton, B. K. y Gehrels, G. E. 2011. Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina: Implications for Andean geodynamics and modes of deformation. *Tectonics*, 30, TC6013, doi: 10.1029/2011TC002948.
- Denton, G. H., Lowell, T. V., Heusser, C. J., Schlüchter, C., Andersen, B.G., Heusser, L. E., Moreno, P.I. y Marchant, D.R. 1999. Geomorphology, stratigraphy, and radiocarbon chronology of Llanquihue drift in the area of the southern Lake District, Seno Reloncavi, and Isla Grande de Chiloé, Chile. *Geografiska Annaler* 81(A) : 167–229.
- Falaschi, D., Castro, M., Masiokas, M., Tadono, T. y Ahumada, A. L. 2014. Rock Glacier Inventory of the Valles Calchaquies Region (~ 25°S), Salta, Argentina, Derived from ALOS Data. *Permafrost Periglacial Processes*, 25: 69-75.
- Fernández, J., Markgraf, V., Panarello, H. O., Alberio, M., Angiolini, F. E., Valencio, S. y Arriaga, M. 1991. Late pleistocene/early holocene environments and climates, fauna, and human occupation in the argentine altiplano. *Geoarchaeology*, 6: 251-272.
- González, M. A., Tchilingirian, P., Pereyra, F., Ramallo, E. y González, O. E. 2004. Hoja Geológica 2366-IV Ciudad de Libertador General San Martín, provincias de Jujuy y Salta, escala 1:250.000. Buenos Aires, Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR: Boletín 274, 1 mapa con texto, 114 pp.
- 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.
- Hernández, R. M., Galli, C. I. y Reynolds, J. H. 1999. Estratigrafía del terciario en el noroeste Argentino. En: *Relatorio del XIV Congreso Geológico Argentino*, Salta, Tomo I, 316-328 p.
- Hong, F., Monaldi, C., Alonso, R., González, R. y Seggiaro, R. 1998. Hoja Geológica 2566-III, Cachi, Provincias de Salta y Catamarca. Segemar, Boletín 248, 121 p. Buenos Aires.
- Igarzábal, A. P. 1981. El sistema glaciolítico de la Cuenca Superior del Río Juramento, Provincia de Salta. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 167-183. San Luis.
- Igarzábal, A. P. 1999. Cuaternario de la Puna. En: Caminos, R. Ed., *Geología Argentina*, Anales 29 (23): 683- 687. Buenos Aires.
- 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 (1): 3-11.
- Lliboutry, L. 1965. *Traité de glaciologie*, tome 2: Glaciers, variations du climat, sols gelés. Paris, Masson et Cie, 612 p.
- Malagnino, E. C. 2013. Mapa Geomorfológico del Plan de Aprovechamiento Múltiple de los Recursos Hídricos en la Alta Cuenca del Río Bermejo en la República Argentina. Inédito. Halcrow.
- Martini, M. A. 2014. Los eventos glaciares del Cuaternario en Cordillera Oriental. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 210 p. Córdoba.
- 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 (3): 569-581.
- Méndez, V. 1974. Geología de la Comarca de Mina Aguilar y alrededores, departamento de Humahuaca (Provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28: 319-330.
- Mercer, J. H. 1976. Glacial history of southernmost South America. *Quaternary Research* 6: 125-166.
- Milana, J. P. 2012. El Continuum del ambiente glaciar y la importancia del contenido sedimentario. XIII Reunión Argentina de Sedimentología. Resúmenes, p. 140-141.
- Ramos, V. A. 2000. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: *Geología Argentina*. Buenos Aires, SEGEMAR. Anales Nro.29; Cap.3:42-96.
- Rubiolo D., Seggiaro R., Gallardo E., Disalvo A, Sanchez M., Turel A., Ramallo E., Sandruss A. y Godeas, M. 2001. Hoja Geológica 2366-II / 2166-IV, La Quiaca. Geología y Provincias de Jujuy y Salta. Instituto de Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 246, pp. Buenos Aires.

- Schäbitz, F., Lupo, L., Kulenmeyer, J. A. y Kulenmeyer, J. J. 2001. Variaciones en la vegetación, clima y la presencia humana en los últimos 15000 años en el borde oriental de la Puna, provincias de Jujuy y Salta, noroeste argentino. Publicación especial Asociación Paleontológica Argentina: 155-162.
- Schmieder, O. 1923. Contribución al conocimiento del Nevado del Chañi y la Alta Cordillera de Jujuy. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, Tomo 27: 135-166.
- Strelin, J. A., Denton, G. H., Vandergoes, M. J., Ninnemann, U. S. y Putnam, A. E. 2011. Radiocarbon chronology of the late-glacial Puerto Bandera moraines, Southern Patagonian Icefield, Argentina. *Quaternary Science Reviews* 30: 2551-2569.
- Tchilingurian, P. y Pereyra, F. X. 2001. Geomorfología del sector Salinas Grandes – Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 3-15.
- Turner, J. C. M. 1964a. Descripción Geológica de la Hoja 2c - Santa Victoria (Provincias de Salta y Jujuy). Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín n° 104. Buenos Aires.
- Turner, J. C. M. 1964b. Descripción Geológica de la Hoja 7c - Nevado de Cachi (Provincia de Salta). Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín n° 99. Buenos Aires.
- Turner, J. C. M. y Mon, R. 1979. Cordillera Oriental. En: Segundo Simposio de Geología Regional Argentina: Córdoba. Academia Nacional de Ciencias 1: 57-94.
- Vilela, C. 1956. Descripción Geológica de la Hoja 7d - Rosario de Lerma (Provincia de Salta). Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín n° 84. Buenos Aires.
- Zech, J., Zech, R., Kubik, P. W. y Veit, H. 2009. Glacier and climate reconstruction at Tres Lagunas, NW Argentina, based on ^{10}Be surface exposure dating and lake sediment analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*: 284, 180-190.
- Zhou, J. y Lau, K. M. 1998. Does a Monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate* 11: 1020-1040.
- Zipprich, M., Reizner B., Zech W., Stingl H. y Veit H. 2000. Upper Quaternary landscape and climate evolution in the Sierra de Santa Victoria (north-western Argentina) deduced from geomorphologic and pedogenic evidence. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 7 (8) 997-1011.