

# CRONOLOGÍAS GLACIALES DE LOS ANDES CENTRALES OCCIDENTALES DE PERÚ ESTIMADAS POR EL PROYECTO FONDECYT 144-2015

Jose Úbeda<sup>1,5</sup>, Javier de Marcos<sup>1</sup>, Estibene Vásquez<sup>2</sup>, Ronald Concha<sup>3</sup>, Régis Braucher<sup>4</sup>, Irene Schimmelpfennig<sup>4</sup>, Pablo Masías<sup>2</sup>, Mariette Bustamante<sup>5</sup>, Rossella Gómez<sup>5</sup>, Joshua Iparraguirre<sup>2</sup>, Ítalo Barrientos<sup>2</sup>, Gonzalo Luna<sup>2</sup>, Igor Astete<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geografía. Universidad Complutense de Madrid, España, [joseubeda@ucm.es](mailto:joseubeda@ucm.es)

<sup>2</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima, Perú, [evasquez@ingemmet.gob.pe](mailto:evasquez@ingemmet.gob.pe)

<sup>3</sup>Geomorfología, Ciencia e Ingeniería para el Desarrollo. Cuzco, Perú, [ronaldconcha1@gmail.com](mailto:ronaldconcha1@gmail.com)

<sup>4</sup>Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Envi (Aix, Francia), [braucher@cerege.fr](mailto:braucher@cerege.fr)

<sup>5</sup>Guías de Espeleología y Montaña, C. Mortero, Torremocha de Jarama, España, [ong.gem@gmail.com](mailto:ong.gem@gmail.com)

## Resumen

Este trabajo presenta edades de exposición a la radiación cósmica (berilio-10) de fases de avance y retroceso de glaciares en montañas de altitud decreciente, alineadas en un transecto norte-sur de la cordillera occidental de los Andes Centrales. Las muestras se recogieron en valles comprendidos por grandes morrenas de avances glaciares, al suroeste del Nevado Hualcán (región Ancash), al suroeste del Nevado Pariacaca (región Lima) y al sur del Nevado Chila (región Arequipa). Los resultados reflejan máximos avances glaciares (M5) hace 120-130 ka; 60-70 ka y 40-50 ka, anteriores al Last Glacial Maximum global (LGM; ~30-19 ka). También hay edades LGM (M4; 32-24 ka), 2 fases posteriores de reavances menores (M3-M2) y una última pulsación M1 de la Pequeña Edad del Hielo (PEH). Los avances glaciares parecen bastante bien correlacionados con transgresiones de los paleolagos en Bolivia y eventos fríos en el Hemisferio Norte. Ese hecho sugiere la existencia de una teleconexión enfriamiento boreal-humedad tropical a través de un desplazamiento hacia el Sur de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT).

## 1. Introducción

Los glaciares tropicales son indicadores sensibles de temperatura y precipitación (Kaser & Osmaston, 2002), los dos factores climáticos que controlan la cantidad y el estado del agua.

Es decir, la posibilidad de que existan glaciares: masas de hielo que se deslizan vertiente abajo impulsadas por su propio peso. Las edades glaciares son un proxy paleoclimático discontinuo, porque proporcionan dataciones absolutas de procesos geomorfológicos representativos de avances o retrocesos de las masas de hielo. Por lo tanto, proporcionan información discontinua sobre la temperatura y la precipitación en el pasado.



Figura 1: áreas de estudio

Las edades basadas en la acumulación de isótopos cosmogénicos en la superficie de las rocas permiten conocer cuando sucedieron los avances glaciares que depositaron morrenas laterales y frontales. Las muestras para conocer las edades de exposición se recogen en la superficie de bloques situados en la cresta de esas morrenas. Las edades cosmogénicas también permiten saber cuándo desapareció la masa de hielo, dejando expuesto a la radiación cósmica el lecho rocoso sobre el que anteriormente fluía. De esa superficie se recogen las muestras, que indicarán la edad de la deglaciación en esa posición. El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos por el proyecto CRYOPERU-FONDECYT 144-2015 en 3 áreas de estudio representativas de máximos avances glaciares en la cordillera occidental de los Andes Centrales: Hualcán, Pariacaca y Chila (figuras 1 y 2).

## 2. Áreas de estudio

### 2.1. Hualcán (9°S; 77°W; 6122 m)

El Nevado Hualcán está 36 km al norte de la ciudad de Huaraz (región Ancash), 13 km al sureste del Nevado Huascarán (9°S; 77°W; 6746 m), la montaña más alta de la Cordillera Blanca y los Andes peruanos. Al suroeste del Hualcán, los glaciares descienden hasta 4900-4500 de altitud, donde el deshielo ha generado tres lagunas. Inmediatamente delante de las lagunas más bajas, 513 (4440 m) y Rajupakina (4120 m), hay una generación de morrenas M1. Vertiente abajo, el lecho glaciar se encajona entre empinadas paredes de 400-500 m de altura, enlazando con una amplia llanura denominada Pampa Sonquil, donde hemos identificado 3 generaciones de morrenas (M2-M4). Además, la morrena M4-norte corta un grupo de morrenas más antiguas (M5) que la profundización del valle glaciar ha dejado colgadas topográficamente, a unos 300 m de desnivel con respecto a la Pampa de Sonquil (figura 2). Las morrenas M5, por tanto, registran avances glaciares anteriores a la excavación del valle donde están las morrenas M1-M4.

### 2.2. Pariacaca (~12°S; ~76°W; 5758 m)

El Nevado Pariacaca está 120 km al este de la ciudad de Lima (Ancash) y da nombre a la Cordillera Pariacaca, que junto con el Macizo Sullcón y el Nevado Tunshu, reúnen el conjunto de glaciares más importante de los Andes occidentales, entre la Cordillera Blanca y el

Nevado Coropuna (región Arequipa). Al sur de la cumbre de Pariacaca, debajo de los glaciares actuales, hay 5 lagunas alineadas con dirección norte-sur, a lo largo del valle glaciar Piticocha. Esas lagunas rellenan otras tantas cubetas de sobre-excavación, que están separadas entre sí por umbrales rocosos pulidos. De la parte alta a la parte baja del valle hemos diferenciado 5 grupos de morrenas: M1-M3 entre la laguna más alta (Chuspi) y la siguiente laguna, que a su vez limita con el grupo de morrenas M4. Valle abajo de ese lugar, las tres lagunas restantes están comprendidas por grandes morrenas laterales M5.

### 2.1. Ticlio Ticlio (~12°S; ~72°W; 5450 m)

El Nevado Chila (5655 m) está 120 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y 50 km al este del Nevado Coropuna (6377 m), la tercera montaña más alta de Perú después del Nevado Huascarán y el Nevado Yerupaja (6617 m). En la actualidad, solo se conserva una lengua de hielo de 0.7 km de longitud, al suroeste del Nevado Chila. 2 km hacia el sur está el Cerro Ticlio Ticlio, donde no haya glaciares hoy en día. Sin embargo, valle abajo de esa cumbre hay lechos rocosos pulidos y varias generaciones de morrenas, que revelan las fluctuaciones de los paleoglaciares. En todos los valles hay glaciares rocosos, como resultado de la generalización de los procesos periglaciares después de la deglaciación.

## 3. Metodología

### 3.1. Muestreo de las superficies de roca

Con amoladora, martillo y cincel, se recolectaron muestras en las superficies de bloques situados en la cresta morrenas y lechos rocosos con pulimento glaciar, representativas de fases de avance y retroceso glaciar, respectivamente.

### 3.2. Preparación mecánica y física

#### 3.2.1. Preparación mecánica

La preparación mecánica inicial se realizó en el laboratorio del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en Lima (Perú). Las rocas fueron trituradas y tamizadas para seleccionar 200-300 g de muestra del intervalo granulométrico 1-0.250 mm. Para evitar contaminación, entre muestra y muestra los tamices se limpiaron con aire comprimido.

### 3.2.1. Preparación física

Después de moler y tamizar, las muestras se pasaron por un separador magnético Frantz LB-1, para descartar los minerales magnéticos y seleccionar los minerales no magnéticos (cuarzos y feldespatos).

### 3.3. Preparación química

Para conocer las edades de exposición a la radiación cósmica, se midió la acumulación de  $^{10}\text{Be}$  en las superficies muestreadas. Ese isótopo cosmogénico fue seleccionado porque conlleva el procedimiento más sencillo y recomendable para rocas con cuarzo (Dunai, 2010). La preparación química se realizó en el *Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques (LN2C)* del *Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE)*, en Aix-en-Provence (Francia).

#### 3.3.1. Separación del cuarzo

Los minerales de cuarzo fueron separados disolviendo la fracción no magnética de las muestras en una mezcla de HCl (ácido clorhídrico concentrado) y  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  (ácido hexafluorosilícico), mediante 3 ataques sucesivos de 24 h de duración. Las impurezas restantes se disolvieron durante la descontaminación del  $^{10}\text{Be}$  meteórico, que consiste en 3 ataques sucesivos de 48 h, con HF (ácido fluorhídrico). De esta manera se obtuvieron muestras de 10-30 g de cuarzo puro.

#### 3.3.2. Extracción de óxido de berilio

Con una micropipeta, se añadió a cada muestra una solución de 100  $\mu\text{L}$  de  $^9\text{Be}$ , fabricada a partir de un cristal de fenaquita ( $3025 \pm 9 \mu\text{g/g}$ ). Cada muestra enriquecida con  $^9\text{Be}$  fue disuelta en HF. Más tarde, cada disolución fue evaporada y, seguidamente, primero se recuperó en una solución de HCl y después se precipitó con  $\text{NH}_3$  (amoníaco). Siguiendo con el protocolo de Merchel & Herpers (1999) para separar el Be de otros elementos, cada muestra fue eluida a través de una columna de intercambio aniónico Dowex 1x8, para eliminar el Fe (hierro) y luego en una columna de intercambio catiónico Dowex 50Wx8, para descartar el boro (B). A continuación, el Be fue precipitado con  $\text{NH}_3$  a  $\text{Be}(\text{OH})_2$ , y después oxidado a BeO en un horno a  $700^\circ\text{C}$ .

### 3.4. Recuento de átomos

El BeO objetivo se midió en el *Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques (ASTER)* del CEREGE (Arnold et al., 2010), para poder estimar la relación  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ . Dichas mediciones fueron calibradas con el estándar interno STD-11, utilizando un ratio asignado  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  de  $1.191 (\pm 0.013) \times 10^{-11}$  (Braucher et al., 2015). Las incertidumbres analíticas 1 sigma incluyeron la indeterminación en las estadísticas de conteo AMS, en la relación estándar  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ , y un error AMS externo de 0.5%. En la medición química se usó un blanco de  $^{10}\text{Be}$ , con una vida media de  $1.387 (\pm 0.01) \times 10^6$  años (Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010). Las edades de  $^{10}\text{Be}$  se estimaron en la calculadora online CRONUS, versión 2.0 (Balco et al., 2008), basada en modelo de escala Lm (Lal, 1991), dependiente del tiempo. Se emplearon la tasa de producción de Huancané-Quelccaya ( $6.74 \pm 0.34$  at/g/año; (Phillips et al., 2016), una densidad de roca  $2.65 \text{ g/cm}^3$  y presión atmosférica estándar para todas las muestras.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Hualcán

21 edades glaciales y su contexto geomorfológico correlacionan bien con eventos fríos del Hemisferio Norte y transgresiones de paleolagos en el altiplano boliviano (Placzek et al., 2013; Blard et al 2011), sugiriendo una teleconexión enfriamiento boreal y humedad tropical a través de la ZCIT. M5: 4 edades registran avances glaciares entre 131-61 ka antes del presente, al comienzo y a mediados del último ciclo glacial y demuestran que la excavación del valle de Pampa Sonquil es posterior a 60 ka. M4: 3 edades reflejan el máximo avance en Pampa Sonquil hace 32-24 ka, coincidiendo con el LGM (Clark et al 2009). M3: 4 edades revelan primer reavance glacial post-LGM hace 17-15 ka, coincidente con el evento Heinrich 1 (H1) y la transgresión del paleolago Tauca. M2: 4 edades muestran segundo reavance glacial post-LGM, hace 12-10 ka, contemporáneo con el evento Younger Dryas (YD) y paleolago Coipasa. 2 edades de lechos rocosos pulidos muestran la deglaciación, hasta más arriba del frente actual de las lenguas de hielo, hace 1-2 ka. M1: 4 edades confirman que las morrenas que cierran los lagos corresponden a la PEH, que en la

Cordillera Blanca sucedió entre los siglos XIV-XIX (Jomelli et al 2008).

## 4.2. Pariacaca

En la parte baja del valle Piticocha, 12 edades M5 datan una fase de máxima expansión temprana de los glaciares hace 48-32 ka, previa y mayor que el LGM (26-19 ka), como en otras montañas del mundo (Hugues et la 2013). La deglaciación posterior hacia la parte alta del valle está registrada en 3 edades de lechos rocosos pulidos en 38-15 ka, que revelan pérdida de espesor y longitud del hielo glaciar. Además, 2 edades sugieren avances 11-7 ka en las morrenas M3-M2 y 4 edades confirman que las morrenas que cierran el lago más alto del valle fueron depositadas en la PEH. Todavía queda pendiente datar las fases M4 y M3, que deberían correlacionar con paleolagos Tauca-Coipasa y eventos H1-YD.

## 4.3. Cerro Ticlo Ticlo

2 muestras sugieren edades 19-14 ka para un grupo de morrenas M3, y 8 muestras edades 15-10 ka para otro grupo de morrenas M2. Por su edad y contexto geomorfológico, esas fases correlacionan bien con los paleolagos Tauca y Coipasa y los eventos H1-YD, como se ha encontrado en Hualcán y suponemos confirmarán futuras investigaciones en Pariacaca. Debieron ser avances poco duraderos, porque las cronologías de 3 lechos rocosos con pulimento glaciar indican la retirada de los glaciares de altitudes 4880-4980 m hace 11-10 ka. Probablemente porque la altitud regional de la línea de equilibrio de los glaciares (ELA) era >5450 m, altitud del pico Ticlo Ticlo. La hipótesis de la deglaciación hace 11-10 ka es coherente con edades del Nevado Coropuna (Úbeda et al 2012), 20 km hacia el oeste, con similares altitud, contexto geomorfológico y orientación. Aunque es una evidencia consistente, se encuentra en aparente conflicto con otras interpretaciones, que muestran una deglaciación más temprana del Nevado Coropuna (Bromley et al 2016). Por otra parte, 15 edades inesperadas reflejan erosión de morrenas y exhumación de bloques muestreados hace 9-5 ka. Seguramente esos procesos se encuentren en relación con una reducción de la fitoestabilización como consecuencia de la disminución de la humedad en la misma época, demostrando la tendencia del clima hacia la aridez actual.

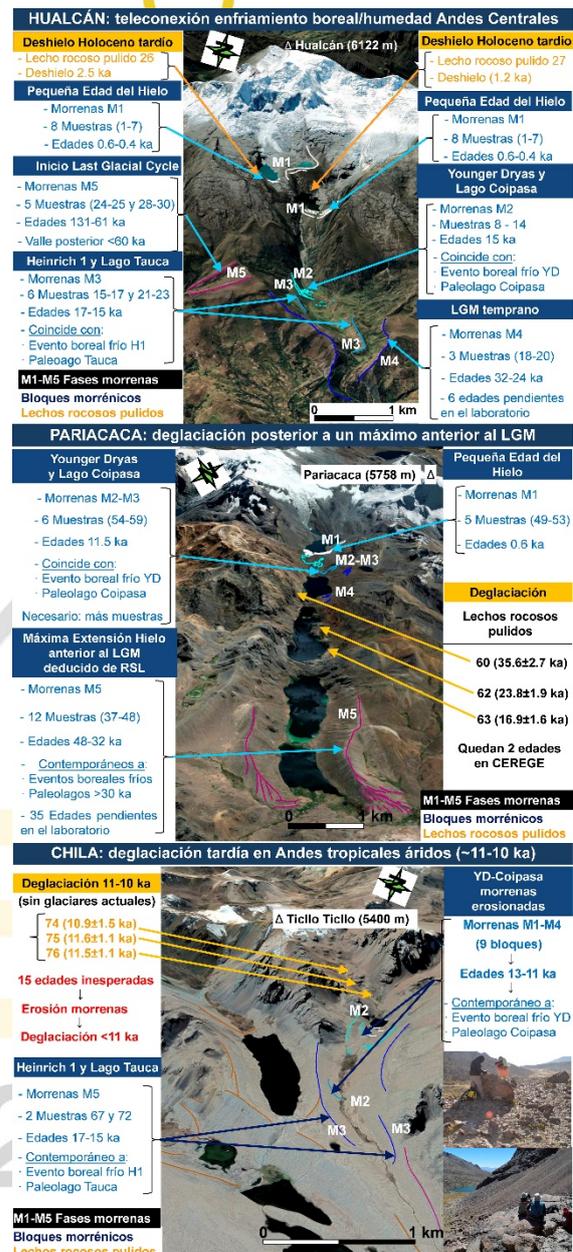


Figura 2: edades glaciales, contexto geomorfológico e interpretación paleoclimática de las 3 áreas de estudio

## Conclusiones y recomendaciones

Se han encontrado 62 edades glaciales en Hualcán (21), Pariacaca (20) y Ticlo Ticlo (21). Las cronologías muestran grandes fases de avance glaciar previas al LGM global y una correlación entre avances glaciares, transgresiones de paleolagos en el altiplano boliviano y eventos fríos en el Hemisferio Norte. Las migraciones hacia el sur de la ZCIT, activadas por el enfriamiento boreal, podrían explicar esa teleconexión.

## Agradecimientos

Investigación CRYOPERU (<http://cryoperu.pe>) financiada por los proyectos INGEMMET-GA51 y FONDECYT 144-2015 (Perú), en cooperación con el Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña de la Universidad Complutense de Madrid, la ONG Guías de Espeleología y Montaña y la empresa pública Canal de Isabel II. Las investigaciones no habrían sido posibles sin el apoyo de Lionel Fidel Smol, Jose Macharé Ordoñez, Óscar Vernuy Álvarez y Susana Vilca Achata.

## Referencias

- Arnold. M, Merchel. S, Bourles. D, et al., 2010, The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: Improved performance and developments, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 268(2), p. 1954-1959.
- Balco. G, Stone. J, Lifton. N, Dunai. T, 2008, A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  measurements, *Quaternary Geochronology*, v. 3(3), p. 174 – 195.
- Blard. P, Sylvestre. F, Tripathi. A, et al., 2011, Lake highstands on the Altiplano (Tropical Andes) contemporaneous with Heinrich 1 and the Younger Dryas: new insights from  $^{14}\text{C}$ , U-Th dating and  $\delta^{18}\text{O}$  of carbonates, *Quaternary Reviews*, v. 30(27-28), p. 3973 – 3989.
- Braucher. R, Guillou. V, Bourles. D, et al., 2015, Preparation of ASTER in-house  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  standard solutions, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 361, p. 335-340.
- Bromley. G, Schaefer. J, Hall. B, et al., 2016, A cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  chronology for the local last glacial maximum and termination in the Cordillera Oriental, southern Peruvian Andes: Implications for the tropical role in global climate, *Quaternary Science Reviews*, v. 148, p. 54–67.
- Chmeleff. J, Von Blanckenburg. F, Kossert. K, Jakob. D, 2010, Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 268(2), p. 192-199.
- Clark. P, Dyke. A, Shakun. J, et al., 2009, The Last Glacial Maximum, *Science*, v. 325(5941), p. 710–714.
- Dunai. T, 2010, *Cosmogenic Nuclides. Principles, concepts and applications in the Earth Surface Sciences*, Cambridge University Press, 199 pp.
- Hugues. P, Gibbard. P, Ehlers. J, 2013, Timing of glaciation during the last glacial cycle: evaluating the concept of a global ‘Last Glacial Maximum’ (LGM), *Earth-Science Reviews*, v. 125, p. 171–198.
- Jomelli. V, Grancher. D, Brunstein. D, Solomina. O, 2008, Recalibration of the yellow Rhizocarpon growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology, *Geomorphology*, v. 93(3-4), p. 201-212.
- Kaser. G, Osmaston. H, 2002, *Tropical Glaciers*, Cambridge University Press, 207 pp.
- Korschinek. G, Bergmaier. A, Faestermann. T, et al., 2010, A new value for the half-life of  $^{10}\text{Be}$  by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 268(2), p. 187-191.
- Lal. D, 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 140(2-4), p. 424-439.
- Merchel. S, Hergers. U, 1999, An update on radiochemical separation techniques for the determination of long-lived radionuclides via accelerator mass spectrometry, *Radiochimica Acta*, v. 84(4), p. 215-219.
- Philips. F, Kelly. M, Hudson. A, et al., 2016, CRONUS-Earth calibration samples from the Huanacané II moraines, Quelccaya Ice Cap, Peru, *Quaternary Geochronology*, v. 31, p. 220-236.
- Placzek. C, Quade. J, Patchett. P, 2013, A 130 ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 363, p. 97-108.
- Úbeda. J, Palacios. D, Vásquez-Selem. L, 2012, La evolución glaciocvolcánica del Nevado Coropuna desde la transición del Pleistoceno al Holoceno, XVI Congreso Peruano de Geología, 5 pp.