



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# Enfriamiento del clima con respecto al presente deducido del último avance de los glaciares en el Nevado Sulcón (Andes Centrales de Perú)

Estibene Vásquez<sup>1</sup>, Jose Úbeda<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, Lima, Perú, [evasquez@ingemmet.gob.pe](mailto:evasquez@ingemmet.gob.pe)

<sup>2</sup> Grupo de investigación en Geografía Física de Alta Montaña, Universidad Complutense de Madrid, España, [joseubeda@ucm.es](mailto:joseubeda@ucm.es)

### 1. Introducción

Los glaciares tropicales son indicadores sensibles del cambio climático (Kaser y Osmaston, 2002). El parámetro que expresa mejor esa propiedad es la altitud de la línea de equilibrio (msnm), también conocida por el acrónimo anglosajón ELA (*Equilibrium Line Altitude*). La ELA es una línea teórica que separa dos sectores de un glaciar:

- Zona de acumulación: donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa (innivación, redistribución eólica de nieve y avalanchas).

- Zona de ablación: caracterizada por los fenómenos que provocan pérdida de masa (fusión y sublimación).

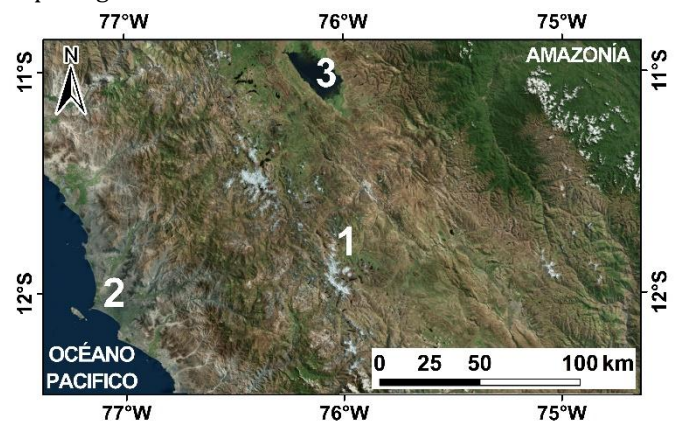
La ELA representa el nivel donde el balance de masa se equilibra ( $b=0$  mm), que puede estimarse mediante mediciones realizadas directamente en las zonas de acumulación y ablación de los glaciares, o a través de ecuaciones que relacionan matemáticamente las variables climáticas que influyen en el balance de masa.

La ELA también puede reconstruirse empleando métodos geomorfológicos, en cuyo caso es posible determinar el mismo parámetro para glaciares actuales y glaciares del pasado (paleoglaciares), que avanzaron en respuesta a climas favorables a un balance de masa positivo. Conocer cómo eran esos climas es una posible aplicación de la comparación de ELAs actuales y pasadas (paleoELAs). De ese modo podrían realizarse reconstrucciones climáticas de épocas remotas, para las que no están disponibles registros instrumentales. Para desarrollar esa herramienta, previamente es necesario probar y validar los mismos métodos en diferentes casos de estudio y comprobar la coherencia interna y externa de los resultados. El objetivo de este trabajo es contribuir a esa validación, ensayando procedimientos estadísticos para evaluar el enfriamiento del clima durante el último avance de los glaciares en la cordillera del Nevado Sulcón (figura 1). Con esa finalidad, se asume que la expansión glaciar

sucedió durante la Pequeña Edad del Hielo (PEH). Fue la última pulsación fría globalmente reconocida en la Tierra y los isótopos de oxígeno del Nevado Huascarán sugieren que en los Andes Centrales ocurrió durante el periodo 1500-1890 (Thompson et al., 1986). Para validar los métodos empleados, el enfriamiento del clima deducido de ELAs y paleoELAs se comparó con registros instrumentales del calentamiento global desde finales del siglo XIX (IPCC, 2013).

### 2. Área de estudio

El Nevado Sulcón ( $11^{\circ}54'S$ ,  $73^{\circ}03'W$ , 5646 msnm) está en los Andes Centrales occidentales, ~120 km al este de la ciudad de Lima. Es la cumbre más alta de una cordillera de 10 km de largo (de norte a sur) y 5 km de ancho (de este a oeste). La cordillera forma parte de la divisoria de las cuencas de los ríos Rímac (vertiente del Pacífico) y Mantaro (vertiente atlántica). Sus montañas más altas están cubiertas por glaciares actuales y en sus vertientes hay morrenas depositadas por la última fase de avance de los paleoglaciares.



**Figura 1:** localización de la cordillera del Nevado Sulcón (1), la ciudad de Lima (2) y el lago Junín (3).

### 3. Metodología

#### 3.1. Análisis geomorfológico

Sobre una imagen de satélite registrada el día 16-09-2010, se elaboró un mapa geomorfológico, cartografiando glaciares actuales y paleoglaciares, que fueron delimitados sobre la base de las morrenas que depositaron durante su último avance.

#### 3.2. Estimación de las ELAs y paleoELAs

A continuación, se reconstruyeron las ELAs y paleoELAs empleando el método *Area x Altitude Balance Ratio* (AABR). Fue propuesto por Osmaston (2005) y es el procedimiento que permite obtener mejores resultados (Benn et al., 2005). El método consta de cuatro pasos (a-d):

- Delimitación y medida de la superficie de los glaciares, los paleoglaciares y sus bandas altitudinales. Para elaborar las bandas altitudinales de los glaciares actuales se empleó el mapa topográfico nacional de Perú, con 50 m de equidistancia entre curvas de nivel. Para generar las bandas altitudinales de los paleoglaciares, previamente se reconstruyó la paleotopografía, representando los valles llenos de hielo, tal y como estarían durante la PEH.
- Estimación de la ELA por el método *Area x Altitude* (AA). El procedimiento consistió en resolver la ecuación propuesta por Sissons (1974, 1980):  $ELA = \Sigma(Z \cdot S) / \Sigma S$ . Z: altitud media (m) y S: superficie ( $m^2$ ) de las bandas altitudinales del glaciar o el paleoglaciar.
- Reconstrucción de la ELA por el método AABR. Las operaciones se realizaron automáticamente, empleando una hoja de cálculo programada por Osmaston (2005). La herramienta pondera los cálculos con diferentes valores de Balance Ratio, un parámetro que relaciona los gradientes verticales de ablación y acumulación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar.
- Tabulación de los resultados de las ELAs, en series vinculadas con los valores de BR utilizados en su estimación. Cálculo del promedio y la desviación típica de cada serie ( $\sigma$ ).
- Selección del valor de la ELA vinculado con el menor valor  $\sigma$ , por tratarse del resultado más probable de la ELA o la paleoELA (Osmaston, 2005).

#### 3.3. Evaluación del enfriamiento del clima

El enfriamiento del clima durante el avance de los paleoglaciares se evaluó resolviendo la ecuación propuesta por Úbeda (2011):  $\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$ .

$\Delta T$ : enfriamiento del clima durante la culminación de la expansión glacial ( $^{\circ}C$ ). GTV: Gradiente Térmico Vertical de la Tierra ( $0,0065^{\circ}C/m$ ), que Kaser y Osmaston (2002) consideraron válido para los trópicos.  $\Delta ELA$ : desnivel ELA actual-paleoELA (m), que las publicaciones anglosajonas denominan *ELA depression*.

#### 3.4. Validación

Para comprobar la validez de los métodos, el enfriamiento del clima durante la PEH, deducido de la evolución de los

glaciares, se comparó con dos estimaciones del calentamiento global de la Tierra, aproximadamente desde el final del mismo periodo, indicado por registros instrumentales del IPCC (2013):

- Diferencia entre los promedios de los años 1880-2012.
- Diferencia entre los promedios de las series 1850-1900/2003-2012.

### 4. Resultados

En el mapa geomorfológico (figura 2) se identificaron 66 glaciares actuales, con una superficie total de  $11,0 \text{ km}^2$ , y 29 paleoglaciares ( $45,8 \text{ km}^2$ ). La reconstrucción de la ELA estadísticamente representativa de los 66 glaciares actuales indicó como resultado 5246 m y la de la paleoELA 5106 m. El producto de la depresión de la ELA (140 m) por el GTV ( $0,0065^{\circ}C/m$ ) sugirió un enfriamiento PEH  $\Delta T = 0,91^{\circ}C$ .

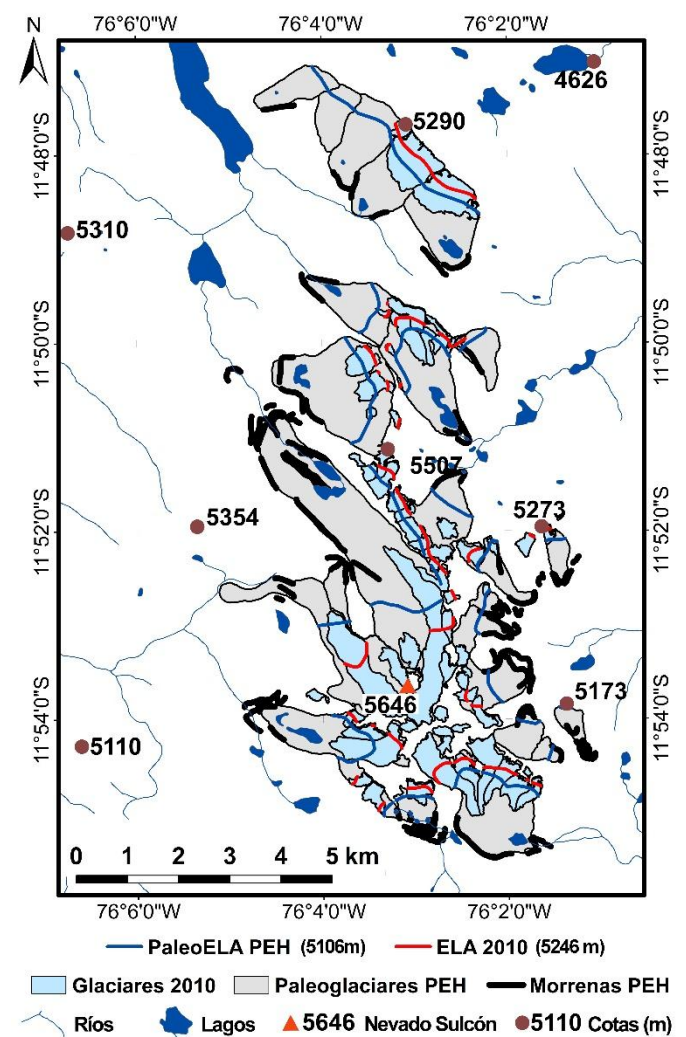


Figura 2: mapa geomorfológico

### 5. Discusión

#### 5.1. Contexto regional

Las ELAs y paleoELAs de montañas de diferentes regiones de los Andes Centrales reflejan la tendencia de la aridez del clima a aumentar de norte a sur y de este a oeste de los Andes Centrales, a medida que se alejan la cuenca del Amazonas (área fuente de las precipitaciones) y se acerca

		Nevado Coropuna								
		Hualcán <sup>1</sup>	Pariaqaqa <sup>2</sup>	Sulcón <sup>3</sup>	NW <sup>4</sup>	NE <sup>5</sup>	SE <sup>5</sup>	SW <sup>6</sup>	Promedios	
Latitud/Longitud	Año imágenes de satélite	9°S/77°W	12°S/76°W		16°S/72°W					
GTV (°C/m)		2003	2010	2010	2007					
		0,0065			0,0065					
PRESENTE	ELA (m)	5124	5138	5246	6034	5968	5862	5992	5964	
	BR	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,8	
	$\sigma$	90	132	133	36	73	136	80	81	
Pequeña Edad del Hielo (PEH)	paleoELA (m)	4994	4998	5106	5936	5886	5776	5823	5855	
	BR	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,5	
	$\sigma$	124	161	91	61	93	166	39	90	
Enfriamiento del clima deducido de $\Delta$ ELA	$\Delta$ ELA (m)	130	140	140	98	82	86	169	109	
	$\Delta T$ (°C)	0,85	0,91	0,91	0,64	0,53	0,56	1,10	0,71	
Diferencia entre el calentamiento global y el enfriamiento deducido de $\Delta$ ELA	Promedios anuales 1880 y 2012	$\Delta T$ (°C)=0,85	0,01	-0,06	-0,06	0,21	0,32	0,29	-0,25	0,14
	Promedios series 1850-1900 y 2003-2012	$\Delta T$ (°C)=0,78	-0,06	-0,13	-0,13	0,14	0,25	0,22	-0,32	0,07

**Tabla 1:** a) Tabla resumen de ELAs y paleoELAs obtenidas por <sup>1</sup>Giráldez (2011); <sup>2</sup>Quirós (2013); <sup>3</sup>Este trabajo; <sup>4</sup>García (2013); <sup>5</sup>Úbeda (2011) y <sup>6</sup>Campos. B) Enfriamiento del clima deducido de  $\Delta$ ELA y c) Comparación del enfriamiento deducido con el calentamiento global sugerido por registros instrumentales (IPCC, 2013): diferencia entre promedios de los años 1880 y 2012 ( $\Delta T=0,85^\circ\text{C}$ ) y promedios de las series 1850-1900 y 2003-2012 ( $\Delta T=0,78^\circ\text{C}$ ).

el origen de la corriente de Humboldt. Esa corriente marina transporta agua desde la Antártida, enfría la base de la troposfera y es la principal causa del bloqueo de las precipitaciones oceánicas que convierte a la costa de Perú y el norte de Chile en la región más árida de la Tierra. Desde el punto de vista glaciológico, una de las principales consecuencias de la aridez es la elevación de la ELA, un hecho observado en los Andes Centrales por Clapperton, (1993), tanto en las ELAs actuales como en las paleoELAs correspondientes a grandes fases de expansión glacial que sucedieron en el pasado. Los resultados para la cordillera del Nevado Sulcón (ELAs, paleoELAs,  $\Delta$ ELA y  $\Delta T$ ), se compararon con datos de otras montañas de los Andes Centrales publicados previamente (tabla 1), que fueron obtenidos mediante la aplicación de los mismos métodos de investigación. El interés de dicha comparación reside en la posición central que ocupa el Sulcón con respecto a las demás áreas de estudio.

### 5.2. Cordillera Pariaqaqa

Entre 4 y 14 km al sur de Sulcón está la cordillera Pariaqaqa, en cuya vertiente sur (Quirós, 2013) obtuvo como resultados ELA=5138 m y paleoELA PEH=4998 m. En ambos casos los valores son 108 m más bajos que la ELA y la paleoELA del Nevado Sulcón. Esa circunstancia puede atribuirse a que las estimaciones de la cordillera Pariaqaqa se realizaron exclusivamente en la vertiente sur, donde la insolación es menor y por lo tanto también debe serlo la ablación que afecta a los glaciares. Mayor interés tiene la sorprendente consistencia interna de los resultados obtenidos para la depresión de la ELA y el enfriamiento del clima, en Sulcón y en Pariaqaqa, porque son exactamente iguales (140 m y  $0,91^\circ\text{C}$ ).

### 5.3. Cordillera Blanca

Por otra parte, Giráldez (2011) realizó sus investigaciones en la vertiente suroeste del Nevado Hualcán ( $9^\circ\text{S}/77^\circ\text{O}$ , 6122 msnm), ~340 km al noroeste del Nevado Sulcón. En esa montaña de la Cordillera Blanca, los resultados fueron ELA=5124 m y paleoELA PEH= 4994 m, 122 m y 112 m más bajas que en el Nevado Sulcón, respectivamente. Las diferencias son coherentes con las tendencias de las ELAs

y las paleoELAs a incrementarse hacia el sur los Andes Centrales. No obstante, el desnivel ELA-paleoELA fue muy semejante: 130 m en Hualcán y 140 m en Sulcón. La diferencia (10 m) es despreciable. Puede atribuirse a las distintas fechas de las imágenes de satélite empleadas en ambos lugares (2003 y 2010) y sugiere que la depresión de la ELA ( $\Delta$ ELA) puede ser un excelente indicador de los cambios climáticos a escala regional.

### 5.4. Nevado Coropuna

Campos (2015); García (2013) y Úbeda (2011) reconstruyeron las ELAs y paleoELAs PEH en los sectores suroeste, noroeste, noreste y sureste del complejo volcánico Nevado Coropuna, ~530 km al sureste del Nevado Sulcón. Los resultados varían en función de las orientaciones, con ELAs=6034-5862 m, paleoELAs PEH=5936-5776 m, desniveles ELA-paleoELA=169-82 m y estimaciones de un clima durante la PEH entre  $1,10$  y  $0,53^\circ\text{C}$  más frío que el actual. En este caso tiene mayor sentido analizar todas las orientaciones del Coropuna, como se hizo en el Nevado Sulcón. De ese modo, promediando los resultados se obtienen: ELA=5964 m, paleoELA PEH=5855 m,  $\Delta$ ELA=109 m y  $\Delta T=0,71^\circ\text{C}$ . Por lo tanto, las ELAs y las paleoELAs PEH son considerablemente más elevadas en el Nevado Coropuna que en el Nevado Sulcón (746 y 717 m), mostrando los efectos del incremento de la aridez hacia el sur de los Andes Centrales. Sin embargo, también en este caso la depresión de la ELA muestra menores diferencias con respecto a las demás áreas de estudio, siendo 29 y 39 m menor que en los nevados Hualcán y Sulcón, respectivamente. En consecuencia, el resultado de la evaluación del enfriamiento del clima también es inferior en el Nevado Coropuna,  $0,14^\circ\text{C}$  y  $0,20^\circ\text{C}$  menor que en Hualcán y Sulcón.

Los resultados obtenidos en el Nevado Coropuna deben interpretarse con cautela, porque las evidencias indican que la evolución de los glaciares, además de por el clima, puede estar fuertemente influida por la actividad endógena del volcán (Masías et al, 2016). Sólo de ese modo podría explicarse la coexistencia de áreas más altas (~6000 m) donde el suelo nunca se congela (Úbeda, 2011)

cerca de otras más bajas (~4900 m) donde se ha detectado permafrost (Úbeda et al., 2015).

## 6. Conclusiones

El enfriamiento del clima durante la PEH, deducido mediante el producto de la depresión de la ELA por el GTV de la Tierra, ha obtenido resultados dispares, pero coherentes con su localización en tres áreas de estudio situadas en un transecto de norte a sur de los Andes Centrales:

- Donde los glaciares están bajo la influencia directa de la cuenca del Amazonas, en el Nevado Hualcán (~9°S, Cordillera Blanca), el enfriamiento deducido (0,85°C) es prácticamente el mismo que el calentamiento global 1890-2012, con una diferencia despreciable (-0,01°C). La diferencia es algo mayor (0,06°C) con respecto al calentamiento sugerido por las series 1850-1900/2003-2012 (0,78°C), porque la ELA del Hualcán fue estimada sobre una imagen de satélite registrada al comienzo de la segunda serie de referencia (2003).

- Donde el altiplano se interpone entre la Amazonía y los glaciares, como en las montañas de Pariaqaqa y Sulcón, los resultados son menos precisos. Las diferencias son pequeñas con respecto a los promedios 1890 y 2012 (-0,06°C) y algo mayores (-0,13°C) con relación a las series 1850-1900/2003-2012. Tal vez esas diferencias reflejen la necesidad de incluir en los análisis la variable precipitación, cuestión que constituye a corto plazo el principal reto de las investigaciones.

- En el Nevado Coropuna, las diferencias son mayores cuando se analiza cada cuadrante por separado (NW, NE, SE, SW), pero disminuyen considerablemente si se toman como referencia los promedios de los cuatro cuadrantes. En ese caso la diferencia es -0,14°C con los promedios 1890 y 2012 y 0,07°C con las series 1850-1900/2003-2012.

Los resultados obtenidos son razonablemente buenos y sustentan el interés en continuar con la misma línea de investigación, con los siguientes objetivos: reducir las diferencias entre el enfriamiento deducido y el calentamiento medido; incorporar la precipitación como variable de análisis y realizar ensayos para épocas más remotas, como *el Last Glacial Maximum*, sustituyendo los registros instrumentales por datos indirectos o proxies paleoclimáticos.

## Agradecimientos

Investigación realizada en el marco del proyecto CIENCIACTIVA 144-2015 (<http://cryoperu.pe/>).

## Referencias [apellidos en minúsculas]

Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston, H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C., Mark, B. G., 2005, Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers: *Quaternary International*, v. 138-139 (2005), p. 8-21.

Campos, N. (2015). Equilibrium Line Altitude Fluctuation on the South West Slope of Nevado Coropuna since The

Last Glacial Maximum (Cordillera Ampato, Perú). *Pirineos*, 170(0): e015 doi: 10.3989/Pirineos.2015.170008

Clapperton, C., 1993, *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*, Amsterdam (Holanda), Elsevier, 769 p.

García, E., 2013, Evolución glaciaria del cuadrante noroeste del Nevado Coropuna. Tesis de Fin de Master. Universidad Complutense de Madrid, 50 p.

Giráldez, C., 2011, Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru). Tesis de Fin de Master. Universidad Complutense de Madrid, 125 p.

IPCC, 2013, *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Kaser, G., Osmaston, H., 2002, *Tropical Glaciers*, Cambridge (U.K.), Cambridge University Press, International Hydrology Series, 207 p.

Licciardi, J. M., Schaefer, J. M., Taggart, J. R., Lund, C. D., 2009, Holocene glacier fluctuations in the Peruvian Andes indicate northern climate linkages: *Science*, v. 325, p. 1677-1679.

Masías, P., Úbeda, J., Apaza, F., Yoshikawa, K., 2016, Evidencias de actividad endógena reciente en el complejo volcánico Nevado Coropuna (Región Arequipa, Perú), en *Sociedad Geológica del Perú*, ed., XVIII Congreso Peruano de Geología: Lima (Perú).

Osmaston, H., 2005, Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area x Altitude, the Area x Altitude Balance Ratio and the Area x Altitude Balance Index methods and their validation: *Quaternary International*, v. 22-31, p. 138-139.

Quirós, T., 2013, Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa (Perú). Tesis de Fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid, 51 p.

Sissons, J. B., 1974, A late glacial Ice Cap in the central Grampians, Scotland: *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 62, p. 95-114.

Sissons, J. B., 1980, The Loch Lomond advance in the Lake District, northern England: *Transactions Royal Society Edinburgh. Earth Sciences.*, v. 71, p. 13-27.

Thompson, L., 1992, Quelccaya Ice Core Database, IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-008. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program. Boulder (EEUU).

Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. E., Dansgaard, W., Grootes, P. M., 1986, The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap: *Science*, v. 234, p. 361-364.

Úbeda, J., Yoshikawa, K., Pari, W., Palacios, D., Masías, P., Apaza, F., Ccallata, B., Miranda, R., Concha, R., Vásquez, P., Cruz, R., 2015, Geophysical surveys on permafrost in Coropuna and Chachani volcanoes (southern Peru): *Geophysical Research Abstracts*, v. 17, p. EGU2015-12592-12592.

Úbeda, J., 2011, El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 558 p.