

# ENSAYO DE MÉTODOS PARA ANALIZAR EL REGISTRO GLACIAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ANDES CENTRALES

J. Úbeda<sup>1,2,4</sup>, R. Concha<sup>1</sup>, P. Vásquez<sup>1</sup>, N. Campos<sup>2</sup>, C. Giráldez<sup>3</sup>, E. García<sup>4</sup>, T. Quirós<sup>4</sup>, D. Palacios<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Perú); <sup>2</sup> Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña. Universidad Complutense de Madrid (España); <sup>3</sup> Department of Geography, University of Zurich (Suiza); <sup>4</sup> Guías de Espeleología y Montaña (España), joseubeda@ucm.es

## 1. INTRODUCCIÓN

El retroceso de los glaciares de los Andes Centrales es uno de los principales riesgos climáticos que afectarán a Perú durante las próximas décadas, debido a la importancia que tienen los glaciares como reserva hídrica estratégica para la costa del Pacífico, donde la mayor parte de la población del país se concentra en una de las regiones más áridas de la Tierra. Por esa causa, Perú se ha considerado uno de los países más sensibles a los efectos del cambio climático (IPCC, 2013) y el INGEMMET está realizando investigaciones para comprender el ritmo y la distribución territorial del proceso de deglaciación.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de los ensayos realizados para deducir de las evidencias geomorfológicas el enfriamiento del clima cuando las masas de hielo avanzaron por última vez. En sucesivas etapas de la investigación, el reconocimiento de la evolución reciente de los glaciares deberá servir para extrapolar hacia el futuro las tendencias pasadas. De ese modo se espera poder realizar pronósticos que permitan a las autoridades políticas diseñar y priorizar las estrategias de adaptación al cambio climático que deberán emprenderse a lo largo del siglo XXI. Para validar los procedimientos empleados, el enfriamiento del clima durante el último avance de los glaciares se comparó con datos instrumentales sobre el calentamiento global de la Tierra desde la última pulsación fría globalmente reconocida en todo el planeta. A dicho periodo se le denomina Pequeña Edad del Hielo (PEH) y los isótopos de oxígeno de los testigos de hielo del Nevado Huascarán (Thompson et al, 2000) sugieren que en los Andes Centrales ocurrió durante el periodo 1500-1890.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Áreas de estudio

Debido a la influencia permanente del anticiclón del Pacífico, reforzado por la corriente marina fría de Humboldt, procedente de la Antártida, toda la precipitación que reciben los Andes Centrales procede de la Amazonía y está relacionada con los ciclos esta-

cionales de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (Úbeda, 2011). Por ese motivo la aridez del clima se incrementa hacia el oeste y hacia el sur de la cordillera, a medida que se aleja el área fuente de las precipitaciones y se acerca el área fuente de la corriente de Humboldt. Para comprender la influencia del clima en la evolución de los glaciares es preciso analizar montañas regularmente distribuidas a lo largo y ancho de los Andes de Perú (figura 1). Hasta el momento se han realizado ensayos en cuatro áreas de estudio localizadas a lo largo de un transecto norte-sur de la cordillera occidental: el sector suroeste del Nevado Hualcán (9°S, 77°W; 6122 m); la vertiente meridional de la Cordillera Pariaraqqa (12°S, 76°W; 5658 m); el macizó Sullcón (12°S, 76°W; 5646 m) y los cuadrantes noroeste, noreste, sureste y suroeste del Nevado Coropuna (16°S, 72°W; 6377 m). Los mismos métodos también se han ensayado en el Nevado Salcantay (13°S, 72°W; 6127 m), en los Andes Centrales orientales.

En todos los casos de estudio se trata de montañas que superan los 5600 m de altitud, sus áreas de cumbres están cubiertas por glaciares y existen morrenas bien conservadas depositadas por los últimos avances, muy cerca de la frente actual de las masas de hielo. En 2015 y 2016 está prevista la realización de nuevos ensayos en las cordilleras Huaytapallana (12°S, 75°W; 5557 m) y Apolobamba (15°S, 69°W; 5829 m), con el fin de completar para la cordillera oriental un transecto norte-sur como el que actualmente está siendo analizado en los Andes Centrales occidentales.

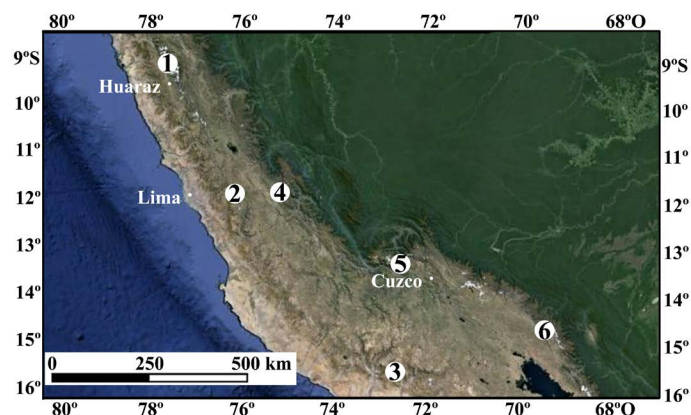


Figura 1: Localización de las áreas de estudio Hualcán (1), Pariaraqqa-Sullcón (2), Coropuna (3), Huaytapallana (4), Salcantay (5) y Apolobamba (6).

## 2.2. Análisis geomorfológico y reconstrucción de ELAg y paleoELAg (m)

El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la altitud de la línea de equilibrio, denominada por el acrónimo de su denominación anglosajona Equilibrium Line Altitude (ELA). La ELA es una línea teórica que separa dos partes de los glaciares: la zona de acumulación, donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa (innivación, redistribución eólica de la nieve o avalanchas) y la zona de ablación, donde predominan los fenómenos que provocan pérdida de masa (fusión y sublimación). El balance de pérdidas y ganancias, que se expresa en mm de agua equivalente a la fusión de la masa de hielo, se equilibra en el nivel de la ELA ( $b=0$  mm) y es positivo ( $b>0$  mm) o negativo ( $b<0$  mm) por encima o por debajo de dicha altitud.

La ELA es un concepto estadístico que puede referirse a diferentes escalas, en el espacio y en el tiempo. Puede tratarse de la ELA representativa de un glaciar, un conjunto de glaciares, una montaña, una cordillera o una región (Kaser y Osmaston 2002) y puede analizarse para un mes determinado, un año o una época, en escalas de siglos o miles de años. Existen diferentes métodos para estimar las ELAs, pero en el presente trabajo se dedujeron empleando criterios geomorfológicos. Por tanto se trata de ELAs geomorfológicas (ELAg), que se reconstruyeron según se explica a continuación.

En primer lugar se realizaron mapas geomorfológicos delimitando los glaciares actuales, las morrenas depositadas por sus avances pasados y la extensión de los glaciares durante su último avance (deducida de la interpretación de las morrenas). A continuación ELAg y paleoELAg fueron reconstruidas empleando el método Area x Altitude Balance Ratio o AABR (Osmaston 2005), que fue seleccionado por ser el procedimiento que ofrece mejores resultados (Benn et al. 2005). Posteriormente, la reconstrucción de las ELAs y paleoELAs se realizó aplicando consecutivamente los siguientes pasos:

Medición de la superficie de los glaciares o paleoglaciares y sus bandas altitudinales, definidas por las curvas  $e=50$  m del mapa topográfico nacional de Perú. Reconstrucción de la ELAg por el método Area x Altitude o AA (Kurowski, 1891), resolviendo la ecuación propuesta por Sissons (1980) para simplificar los cálculos:

$$ELAg = S(Z \cdot S) / SS \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

ELAg-ELA o paleoELA (m). Z-altitud media de cada intervalo de altitud (m). S-superficie de cada intervalo de altitud del glaciar ( $m^2$ ).

Ponderación de las ELAs y paleoELAs AA con diferentes valores de Balance Ratio (BR), el parámetro que expresa la relación entre los gradientes de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar.

Tabulación de las ELAs y paleoELAs en series vinculadas con los valores de BR utilizados para su estimación.

Cálculo de los promedios y desviaciones típicas de cada serie.

Selección del promedio vinculado con la menor desviación típica, por tratarse del valor más probable de la ELA o la paleoELA (Osmaston, 2005).

## 2.3. Evaluación del enfriamiento del clima durante la expansión glaciar ( $^{\circ}C$ )

La disponibilidad de ELAg y paleoELAg permitió estimar la depresión de la paleotemperatura durante el avance de los paleoglaciares, mediante el cálculo del producto:

$$DT = GTV \cdot \Delta ELAg \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

DT-enfriamiento del clima durante la culminación del avance glaciar ( $^{\circ}C$ ). GTV-gradiente térmico vertical ( $^{\circ}C/m$ ).  $\Delta ELAg$ -desnivel ELA actual-paleoELA (m).

El proyecto de investigación está instalando sensores de temperatura en las áreas de estudio, con el fin de conocer los gradientes térmicos verticales locales. Sin embargo, en los ensayos preliminares que se presentan en este trabajo se utilizó el valor medio de la Tierra ( $GTV=0,0065^{\circ}C/m$ ) que Kaser y Osmaston (2002) consideraron válido para los trópicos.

		Hualcán <sup>1</sup>	Pariaqaqa <sup>2</sup>	Sullcón <sup>3</sup>	Nevado Coropuna				Salcantay <sup>7</sup>		
					NO <sup>4</sup>	NE <sup>5</sup>	SE <sup>6</sup>	SO <sup>6</sup>			
Latitud/Longitud		9°S/77°O	12°S/76°O		16°S/72°O				13°S/72°O		
Año imágenes de satélite		2003	2010	2010	2007				2014		
GTV (°C/m)		0,0065							Promedios		
PRESENTE	ELA (m)	5124	5138	5246	6034	5968	5862	5992	5143	5563	
	BR	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,4	
	σ	90	132	133	36	73	136	80	289	121	
PEH	paleoELA (m)	4994	4998	5106	5936	5886	5776	5823	4847	5421	
	BR	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	
	σ	124	161	91	61	93	166	39	167	113	
Enfriamiento local del clima	ΔELA (m)	130	140	140	98	82	86	169	296	143	
	ΔT(°C)	0,85	0,91	0,91	0,64	0,53	0,56	1,10	1,92	0,93	
	Promedios anuales 1880-2012	ΔT(°C)=0,85	0,01	-0,06	-0,06	0,21	0,32	0,29	-0,25	-1,07	-0,08
Diferencia calentamiento global-enfriamiento local	Series 1850-1900/2003-2012	ΔT(°C)=0,78	-0,06	-0,13	-0,13	0,14	0,25	0,22	-0,32	-1,14	-0,15

ELAs y paleoELAs: <sup>1</sup>Giráldez (2003); <sup>2</sup>Quiros (2013); <sup>3</sup>Vásquez (2015); <sup>4</sup>García (2013); <sup>5</sup>Úbeda (2011); <sup>6</sup>Campos; <sup>7</sup>Concha (2015) | Tendencias del calentamiento global deducidas de datos instrumentales para el periodo 1880-2012 y los promedios de las series 1850/1900-2003/2012: IPCC (2013)

Tabla 1: Resumen de los resultados.

### 3. RESULTADOS

Los resultados se han resumido en la tabla 1, indicando consecutivamente los siguientes datos: área de estudio; año de la imagen de satélite empleada para delimitar los glaciares actuales; GTV aplicado en la ecuación 2; resultados para el presente (ELA, Balance Ratio y desviación típica); datos para la PEH (paleoELA, Balance Ratio y desviación típica); depresión de la paleoELA (ELA actual-paleoELA); enfriamiento local del clima sugerido por la ecuación 2 y diferencias entre el enfriamiento local del clima y el calentamiento global deducido de los promedios anuales 1880-2012 (0,85°C) y los promedios de las series 1850-1900/2003-2012 (0,78°C).

### 4. DISCUSIÓN

Las estimaciones de las ELAs y paleoELAs (tabla 1) se elevan hacia el sur y hacia el oeste de los Andes Centrales: en la cordillera occidental se observa que los resultados pasan de 5124 y 4994 m en el Nevado Hualcán (9°S) a 6034-5862 y 5936-5776 m en el Nevado Coropuna (16°S). De la misma manera, las ELAs y paleoELAs se incrementan desde la cordillera oriental hacia la cordillera occidental, pasando de 5143 y 4867 m en el Nevado Salcantay (72°O) a 5246-5138 y 5106-4998 m en la cordillera Pariaqaqa y el macizo Sullcón (76°O). Las variaciones espaciales de las ELAs y paleoELAs son coherentes con las tendencias señaladas por Clapperton (1992), debido a que la ELA se eleva por efecto de la aridez Benn et al (2005) y la humedad del clima disminuye hacia el sur y hacia el oeste de los Andes Centrales. No obstante, teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, los resultados que tienen mayor interés son las estimaciones del enfriamiento local del clima en cada área de estudio y su comparación con el calentamiento global de la Tierra deducido de datos instrumentales. Tomando en consideración los valores absolutos,

es decir, obviando su signo positivo o negativo, las diferencias son muy pequeñas, >0,3°C en todos los casos. La excepción es el Nevado Salcantay (1,1°C), donde la mayor diferencia enfriamiento local-calentamiento global puede atribuirse a dos circunstancias:

- Las distorsiones que puede causar el contexto geomorfológico de la vertiente sur del Salcantay, donde los glaciares se desarrollan en una pared tan vertical que su extensión no está controlada por el clima, sino que se precipitan al vacío generando avalanchas. Ese es un factor que deberá tenerse en cuenta en investigaciones futuras, discriminando los glaciares del Salcantay en función de ese fenómeno y realizando nuevos ensayos en otras áreas de la cordillera oriental donde no se detecte el mismo problema.

- La mayor proximidad del Salcantay al área fuente de las precipitaciones (su vertiente norte enlaza con la cuenca amazónica). Ese hecho indica la necesidad de realizar estimaciones de la ELA deducidas de datos climáticos (ELA climática o ELAc) y compararlas con reconstrucciones de las ELAs geomorfológicas (ELAg) como las que se presentan en este trabajo.

A pesar de todo, los resultados preliminares de las investigaciones sugieren que la utilización del producto  $GTV \cdot \Delta ELA$  puede ser un buen indicador del enfriamiento del clima durante las fases de avance glaciario, una cuestión que tiene un enorme interés para poder desarrollar modelos que permitan elaborar pronósticos sobre la evolución de las reservas de agua sólida en las próximas décadas. En ese sentido puede ser crucial el ensayo de modelos que tengan en consideración conjuntamente ELAc y ELAg, porque el segundo parámetro permite incorporar en los pronósticos las previsiones del calentamiento global basadas en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, que periódicamente publica el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

## 5. CONCLUSIONES

Se han ensayado métodos para evaluar el enfriamiento del clima registrado por la evolución reciente de los glaciares de la cordillera de los Andes Centrales. Los procedimientos se basan en reconstrucciones de las ELAs deducidas de evidencias geomorfológicas y pueden ser útiles para desarrollar modelos para pronosticar como será el impacto del cambio climático durante las próximas décadas en las reservas de agua almacenadas en los glaciares. Los resultados preliminares sugieren que los métodos pueden considerarse fiables, pero es necesario ampliar los ensayos a nuevas áreas de estudio que mejoren la representatividad territorial de las investigaciones. Además es conveniente incorporar en los análisis la variable precipitación, mediante la estimación de ELAs deducidas de datos climáticos.

## REFERENCIAS

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

Campos, N. (2012). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Perú). Tesis de maestría. Universidad Complutense de Madrid, 55 pp.

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

Concha R. (2015). Evaluación del Impacto del Cambio Climático a finales del Holoceno, en los glaciares de los nevados Salcantay Y Huamantay (Cusco - Perú). Tesis de ingeniería. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. 96 pp.

García, E. (2013). Evolución glacial del cuadrante noroeste del Nevado Coropuna. Tesis de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid (España), p. 50. <http://eprints.ucm.es/23671/>

Giráldez, C. (2011). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru). Universidad Complutense de Madrid (España), p. 125. <http://eprints.ucm.es/14013/>

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*. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos), 1535 pp.

Kaser, G. y Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido). 207 pp.

Kurowski, L. (1891). Die Höhe der Schneegrenze. *Geogr. Abh.* 5 I (124), 119-160.

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* 22-31, 138-139.

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

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

Thompson, L.G. y Mosley-Thompson, E., A. (2000). Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science* 15 (4), 377-394.

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 (España), p. 558. <http://eprints.ucm.es/12076/>

Vásquez, P. (2015). El registro glacial del cambio climático en el Macizo Sullcón (sector septentrional de la Cordillera Pariaqaqa). Tesis de ingeniería. Universidad Nacional del Altiplano (Puno). 92 pp.

Investigaciones realizadas en el marco de los proyectos INGEMMET-GA51 y [www.cryoperu.pe](http://www.cryoperu.pe).