



EVALUACIÓN DEL ENFRIAMIENTO DEL CLIMA DURANTE LA PEQUEÑA EDAD DEL HIELO EN LOS ANDES CENTRALES DEDUCIDO DE LA ALTITUD DE LA LÍNEA DE EQUILIBRIO DE GLACIARES ACTUALES Y PASADOS

Jose Úbeda^{1,2,3,5}, Néstor Campos³, Claudia Giráldez⁴, Eduardo García⁵, Tatiana Quirós⁵, David Palacios³

¹Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET (Perú). ²Autoridad Nacional del Agua-ANA (Perú).

³Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña-GFAM. Universidad Complutense de Madrid (España). ⁴Department of Geography, University of Zurich (Suiza). ⁵Guías de Espeleología y Montaña-GEM (España).

RESUMEN

La intención de este trabajo ha sido ensayar métodos para mejorar la comprensión de la información climática registrada por las fluctuaciones de los glaciares en el pasado. Con esa finalidad se han seleccionado tres áreas de estudio en la Cordillera Occidental de los Andes Centrales. Las tres áreas conservan glaciares actuales y morrenas depositadas por su máxima expansión, durante la Pequeña Edad del Hielo (PEH), que tuvo lugar entre mediados del siglo XVII y comienzos del XVIII. El registro glacial del clima durante esa fase se decodificó mediante la reconstrucción de las altitudes de la línea de equilibrio de las masas de hielo (paleoELAs) y se comparó con el mismo parámetro deducido de los glaciares actuales (ELAs). Los productos del desnivel entre ELAs y paleoELAs por los gradientes térmicos verticales (GTVs) proporcionaron una evaluación del enfriamiento durante la PEH, que se comparó con evidencias del calentamiento global hasta el presente. Los resultados fueron aceptables, sugiriendo que los métodos propuestos pueden servir para desarrollar nuevas investigaciones sobre el registro glacial del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: *Cambio climático, ELA, GTV, PEH.*

DATOS DEL AUTOR

José Úbeda Palenque es Doctor en geografía en la Universidad Complutense de Madrid, España, con la tesis "El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera Occidental de los Andes, Sur del Perú)". Es miembro fundador del Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña (UCM). Se ha especializado en geomorfología y cambio climático, trabaja en la actualización y publicación de los resultados alcanzados en su tesis doctoral, así como en la implementación de proyectos de cooperación científica entre instituciones españolas y peruanas para decodificar el registro glacial del cambio climático en los Andes y evaluar sus efectos en las reservas hídricas almacenadas en la criósfera (glaciares, glaciares rocosos, nieve y permafrost).

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los glaciares tropicales son indicadores clave del cambio climático (Hastenrath 1994; Kaser y Osmaston 2002; Lemke et al. 2007). Su investigación puede proporcionar información muy valiosa para completar las series de registros instrumentales disponibles, especialmente en aquellas regiones donde los observatorios han sido instalados recientemente o simplemente no existen. Además, en las regiones tropicales áridas, como el oeste de Perú, el análisis del actual proceso de deglaciación tiene un especial interés, debido a la importancia estratégica que tienen las masas de hielo como reservas hídricas para la población y sus actividades económicas. En ese contexto, la definición de procedimientos de investigación adecuados tiene gran importancia para proporcionar instrumentos de análisis a las autoridades políticas, responsables de planificar y ejecutar las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático que deberán emprenderse durante las próximas décadas. El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la altitud de la línea de equilibrio, conocida usualmente por el acrónimo de su denominación anglosajona Equilibrium Line Altitude (ELA). La ELA es una línea teórica que separa la zona de acumulación de un glaciar, donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa (innivación, redistribución eólica de la nieve o avalanchas) de la zona de ablación, donde prevalecen los fenómenos que provocan pérdida de masa (fusión y sublimación). Por lo tanto, 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. La ELA puede determinarse empleando diferentes métodos, a través de observaciones glaciológicas o hidrológicas realizadas sobre el terreno (Francou y Pouyaud 2004), análisis geomorfológicos (Benn et al. 2005) o ecuaciones matemáticas que relacionan los parámetros climáticos implicados (Oerlemans 1989; Oerlemans y Hoogendoorn 1989; Oerlemans 2005).

El objetivo de este trabajo ha sido ensayar procedimientos basados en las evidencias geomorfológicas para deducir, de los cambios de la ELA, el enfriamiento del clima cuando los glaciares avanzaron por última vez. Además se ha tratado de validar los métodos comparando los resultados con datos instrumentales del calentamiento global posterior, que se ha producido hasta el presente y es la causa principal del actual proceso de deglaciación.

ÁREAS DE ESTUDIO

MONTAÑAS SELECCIONADAS

Para alcanzar los objetivos previstos se han realizado reconstrucciones de las ELAs actuales y las paleoELAs correspondientes a la última fase de avance de los glaciares en tres áreas de estudio localizadas a lo largo de un transecto norte-sur de la cordillera occidental de los Andes Centrales (figura 1): el sector suroeste del Nevado Hualcán (9°S , 77°W ; 6122 m; Giráldez 2011); la vertiente meridional de la Cordillera Pariacaqa (12°S , 76°W ; 5658 m; Quirós 2013) y los cuadrantes noroeste, noreste, sureste y suroeste del Nevado Coropuna (16°S , 72°W ; 6377 m; García 2013; Úbeda 2011). En

todos los casos se trata de montañas que superan los 6000 m de altitud, sus áreas de cumbres están cubiertas por glaciares y existen morrenas bien conservadas, depositadas por los últimos avances muy cerca del frente actual de las masas de hielo.

CONTEXTO CLIMÁTICO

A causa de su localización en latitudes tropicales y su elevada altitud (5000-6000 m) la temperatura permanece constante a lo largo del año, con una amplitud térmica diaria de varias decenas de °C, mucho mayor que la amplitud térmica anual, que suele ser muy reducida, incluso de tan sólo 1-2°C. Por otra parte, debido a la influencia permanente del anticiclón del Pacífico, reforzado por la corriente marina fría de Humboldt, toda la precipitación que recibe actualmente la Cordillera de los Andes proviene de la cuenca del Amazonas y está vinculada con el ciclo anual de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT). Durante el verano austral (invierno boreal), el enfriamiento del Hemisferio Norte provoca un desplazamiento hacia el sur de la ZCIT sobre la parte septentrional de Suramérica, desencadenando la mayor parte de la precipitación que reciben la cuenca sur del Amazonas y los Andes Centrales de Perú. Por el contrario, durante el invierno austral (verano boreal), la ZCIT se desplaza al norte de la línea del Ecuador, recupera su circulación zonal y en las regiones antes mencionadas las precipitaciones descienden drásticamente, incluso por debajo de los

100 mm mensuales (Clapperton 1993). La influencia del mayor desplazamiento hacia el sur de la ZCIT se ha citado como una de las causas probables de la aparición de grandes lagos en las áreas actualmente más áridas del altiplano boliviano (Blard et al.

2011). También se ha relacionado con avances glaciares en el casquete glaciar Quelccaya (Kelly et al. 2012) y el Nevado Coropuna (Úbeda 2013), en las cordilleras oriental y occidental de los Andes Centrales del sur de Perú, respectivamente.

La configuración media del clima de los Andes Centrales que resulta de los factores antes mencionados, es alterada periódicamente por el fenómeno ENSO (El Niño- Oscilación del Sur). Aunque la variabilidad de las precipitaciones se ha descrito en muchos estudios en escalas de tiempo interanuales, no hay un acuerdo general sobre los efectos del fenómeno ENSO. En la escala de un país como Perú las consecuencias de esos eventos pueden variar considerablemente entre las regiones de la costa y el altiplano.

Trabajos recientes han señalado que la intensidad y permanencia de épocas excepcionalmente secas en la región de la sierra del Sur de Perú, con una duración de hasta 6 años y periodos de retorno de 60 años, podrían encontrarse en relación con los eventos ENSO (Paredes y Espinoza 2005). Otros investigadores (Francou y Pizarro 1985; Aceituno 1988) concluyeron que esos episodios podrían estar relacionados con periodos de sequía que regularmente afectan a los Andes del Sur de Perú y el Oeste de Bolivia. Esas hipótesis son coherentes con las observaciones del balance de masa realizadas en algunos glaciares, donde la nieve acumulada se redujo considerablemente coincidiendo con episodios ENSO (Francou y Sémiond 1997). También son compatibles con la interpretación de la acumulación registrada entre 1964 y 1983 en los testigos de hielo del Nevado Quelccaya (13°55'S, 70°50'O), en los que se detectó una reducción de un 30% en las precipitaciones coincidente con cinco eventos ENSO (Thompson et al. 1984).

FIGURA 1.

Localización de las áreas de estudio de este trabajo, Nevado Hualcán (Cordillera Blanca), Cordillera Pariacaca y Nevado Coropuna (estratovolcán cuaternario). También se indican los lugares donde otros investigadores encontraron los proxies paleoclimáticos mencionados en las figuras 5 y 6. Las ciudades Huaraz, Lima y Arequipa se muestran como referencia espacial



METODOLOGÍA

RECONSTRUCCIÓN DE LAS ELAS ACTUALES Y LAS PALEOELAS

En primer lugar, se elaboraron mapas geomorfológicos delimitando los glaciares actuales y las morrenas depositadas por sus últimos avances, que sirvieron para cartografiar la extensión de los paleoglaciares. A continuación, se reconstruyeron las ELAs y paleoELAs empleando el método *AreaxAltitude Balance Ratio* (AABR) propuesto por (Osmaston 2005). Ese hecho representa una novedad con respecto a anteriores trabajos sobre ELAs y paleoELAs, recopiladas por Mark et al. (2005), por dos motivos fundamentales. En primer lugar, a pesar de ser la técnica de reconstrucción

de ELAs que mejores resultados ofrece (Benn et al. 2005), el método AABR apenas había sido empleado en los Andes Centrales. Además, los anteriores trabajos no emplearon el mismo procedimiento para reconstruir las ELAs actuales y las paleoELAs, restando consistencia al procedimiento.

El método AABR fue ampliamente descrito por Osmaston (2005), incluyendo instrucciones para programar las operaciones necesarias para su estimación en hojas de cálculo. Como el método *AreaxAtitude* (Kurowski 1891), conocido con el acrónimo AA, el método AABR se basa en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan muy por encima o por debajo de la ELA en mayor medida que en las áreas que se encuentran inmediatamente por encima o por debajo de ese nivel. Sin embargo el método AABR redefine el resultado mediante el establecimiento de diferentes pendientes lineales del perfil del balance de masa por encima y por debajo de la ELA. Osmaston (2005) señaló que muchos glaciares y paleoglaciares se ajustan a esas características. Por ese motivo indicó que se trata del método de reconstrucción de la ELA que ofrece mejores garantías.

La versión original del método se ensayó en glaciares actuales y paleoglaciares del macizo del Rwenzori, en Uganda, y en el Kilimanjaro, en Tanzania (Osmaston 1965, Osmaston 1975, Osmaston 1989, Osmaston 1989, Kaser y Osmaston 2002). Otros investigadores (Benn y Gemmell 1997) desarrollaron métodos semejantes, que también utilizaban el valor del Balance Ratio para ponderar los cálculos y fueron ensayados y ajustados en glaciares actuales de Alaska de los que existían buenas estimaciones de la ELA deducidas de observaciones glaciológicas de campo. Esos autores denominaron al método BR y programaron las operaciones necesarias para reconstruir la ELA en hojas de cálculo. Sin embargo el entorno operativo era complejo y su uso no se generalizó (Osmaston 2005). Más recientemente se publicaron nuevos trabajos que emplearon el valor del Balance Ratio para estimar las paleoELAs de masas de hielo del Plioceno medio-reciente en los McMurdo Dry Valleys de la Antártida (Krusic et al. 2009). En la misma publicación también se reconstruyeron las ELAs de glaciares actuales y se compararon con ELAs glaciológicas basadas en observaciones del balance de masa efectuadas por otros investigadores a los largo de sucesivas campañas de trabajo de campo (Chinn 1979, Chinn 1980, Chinn 1981, Chinn 1983, Chinn y Cumming

1983, Chinn y Maze 1983, Chinn y Woods 1984, Chinn y Oliver 1985). La nueva versión del método AABR propuesta por Osmaston (2005) permite realizar tantas reconstrucciones de la ELA como valores de BR se considere oportuno emplear, utilizando criterios estadísticos para seleccionar los resultados más probables. De ese modo se elimina la subjetividad que introducen en otros métodos las decisiones que deben adoptar los investigadores, Ese es uno de los problemas que presentan, por ejemplo, los métodos Terminus Headwall Altitude Ratio (Porter 1981, Meierding 1982) y AAR, *Accumulation Area Ratio* (Brückner 1886, Brückner 1887, Brückner 1906). Para aplicar dichos procedimientos es necesario definir un valor para los ratios THAR y AAR, cuya elección nunca está suficientemente justificada.

El método AABR consta de cinco fases (a-e), que se desarrollaron en un entorno operativo ARCGIS-EXCEL:

- a) Delimitación y medida de la superficie de los glaciares o paleoglaciares y sus bandas altitudinales, empleando la equidistancia entre curvas de nivel del mapa topográfico nacional de Perú (50 m) y reconstruyendo la paleotopografía de los valles que estuvieron llenos de hielo durante la PEH.

- b) Estimación de la ELA por el método AA, resolviendo la ecuación propuesta por Sissons (1974; 1980) para simplificar los cálculos:

$$ELA = \Sigma(Z \cdot S) / \Sigma S$$

Donde: $\Sigma(Z \cdot S)$ - sumatorio de los productos de la altitud media de las bandas altitudinales (m) por su superficie (m²). ΣS - sumatorio de las superficies de todas las bandas altitudinales (m²).

- c) Ponderación de los resultados con diferentes valores de Balance Ratio (BR), un parámetro que expresa la relación entre los gradientes de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar.
- d) Tabulación de los resultados de las ELAs y paleoELAs en series vinculadas con los valores de BR empleados para su estimación y cálculo de los promedios y desviaciones típicas de cada serie.
- e) Selección del valor de la ELA o paleoELA vinculado con una menor desviación típica (σ), que puede considerarse el resultado más probable (Osmaston 2005).

ESTIMACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO VERTICAL

El gradiente térmico vertical (GTV) es inversamente proporcional al contenido en humedad de la columna de aire y su valor no se mantiene constante en la troposfera. Excepto durante inversiones térmicas temporales está limitado por estrictas leyes físicas, quedando comprendido entre un máximo adiabático seco de 9,8°C/km y un mínimo adiabático saturado húmedo. En los trópicos dicho valor mínimo oscila entre 3,0°C/km en el nivel del mar (con una temperatura de 40°C) y 7,0°C/km en la altitud de la isoterma de 0°C de la temperatura del aire (Kaser y Osmaston 2002). No obstante el procedimiento más extendido consiste en utilizar el valor medio de la Tierra (6,5°C/km). Aunque puede presentar considerables variaciones con respecto al valor real del gradiente, ese valor medio suele considerarse válido para los trópicos (Kaser y Osmaston, 2002) y se ha utilizado en este trabajo para el Nevado Hualcán y la Cordillera Pariaqaqa, donde no hay datos disponibles. Para el caso del Nevado Coropuna, sin embargo, se empleó un GTV=8,4°C/km, basado en sensores de alta resolución instalados sobre el terreno desde 2007 (Úbeda 2011). Dicho gradiente se aproxima al límite superior del gradiente adiabático seco, porque la región del Nevado Coropuna es más árida que las demás áreas de estudio.

DETERMINACIÓN DEL ENFRIAMIENTO DURANTE LA CULMINACIÓN DEL AVANCE GLACIAR

Para evaluar el enfriamiento del clima durante el último avance de los glaciares se aplicó la ecuación propuesta por Úbeda (2011):

$$\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$$

Donde: ΔT - enfriamiento del clima durante la culminación del avance glaciar (°C). GTV - gradiente térmico vertical (°C/m). ΔELA - desnivel de la paleoELA con respecto a la ELA actual (m).

Comparación con el calentamiento global desde la Pequeña Edad del Hielo

Los resultados de la evaluación del enfriamiento del clima durante el último avance glaciar, se compararon con evidencias del calentamiento global basadas en observaciones instrumentales publicadas en el 5º informe del Grupo 1 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático

(IPCC 2013). Por una parte, con el incremento de la temperatura global del aire durante el periodo 1880-2012, deducido de manera independiente de varios conjuntos de datos: $0,85^{\circ}\text{C}$, con un rango de resultados entre $0,65$ y $1,06^{\circ}\text{C}$. También se contrastaron con el incremento entre los promedios de la temperatura global del aire de los periodos 1850-1900 y 2003-2012: $0,78^{\circ}\text{C}$, con un rango de resultados entre $0,72$ y $0,85^{\circ}\text{C}$.

RESULTADOS

Las reconstrucciones de ELAs y paleoELAs para cada área de estudio se indican en los mapas representados en las figuras 2-4. En la tabla 1 se muestran los mismos datos, conjuntamente con los valores de BR correspondientes; la menor desviación típica (σ), empleada como criterio para la selección de los resultados más probables; y las estimaciones del enfriamiento durante los avances glaciares y sus diferencias, en valores absolutos, con respecto a los incrementos de la temperatura global deducidos de las series 1880-2012 y 1850/1900-2003/2012.

FIGURA 2.

Resultados obtenidos en la vertiente suroeste del Nevado Hualcán para la ELA 2003 (5124 m) y la paleoELA PEH (4994 m). Base: Google Earth

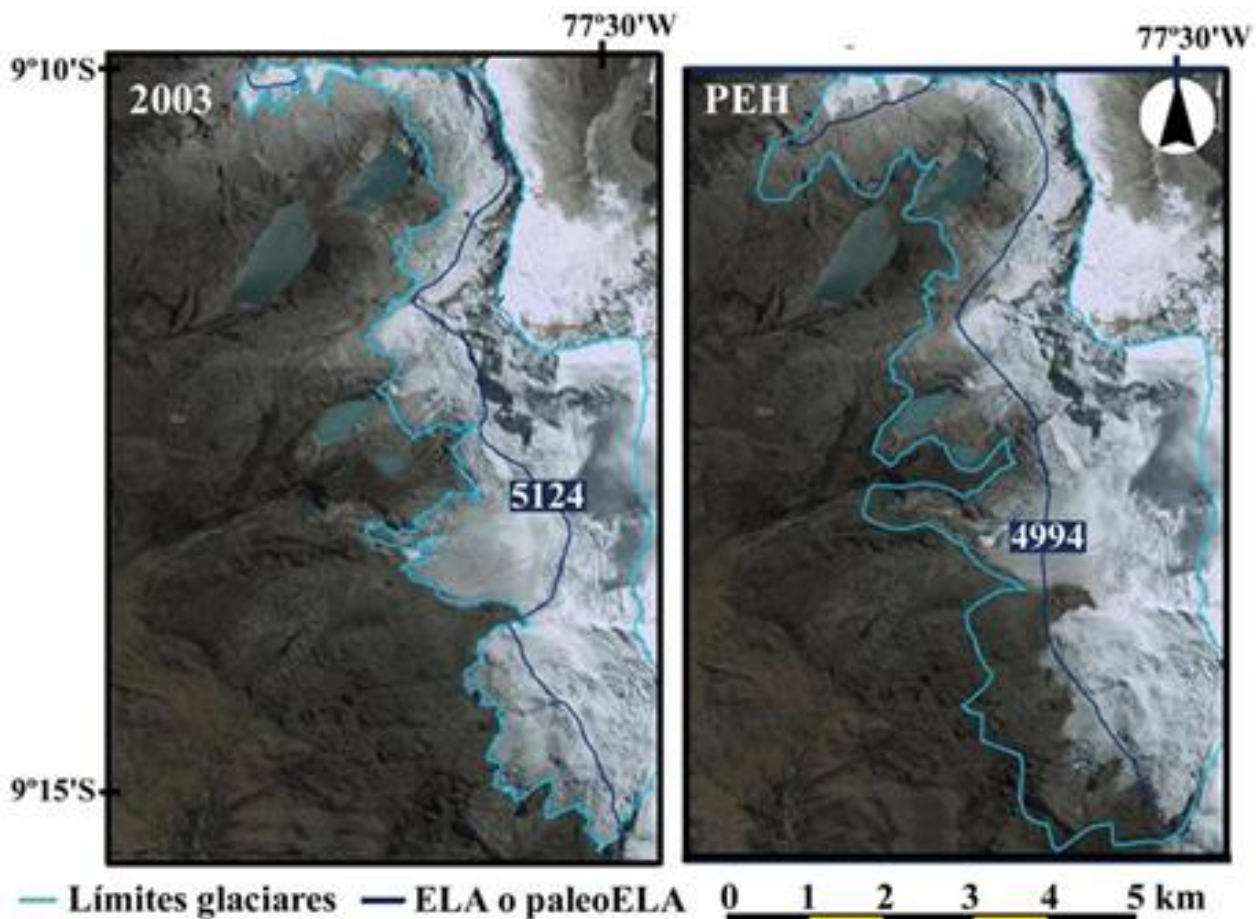


FIGURA 3.

Resultados obtenidos en la vertiente meridional de la cordillera Pariacaqa para la ELAs 2010 (5138 m) y la paleoELA PEH (4998 m). Base: Google Earth

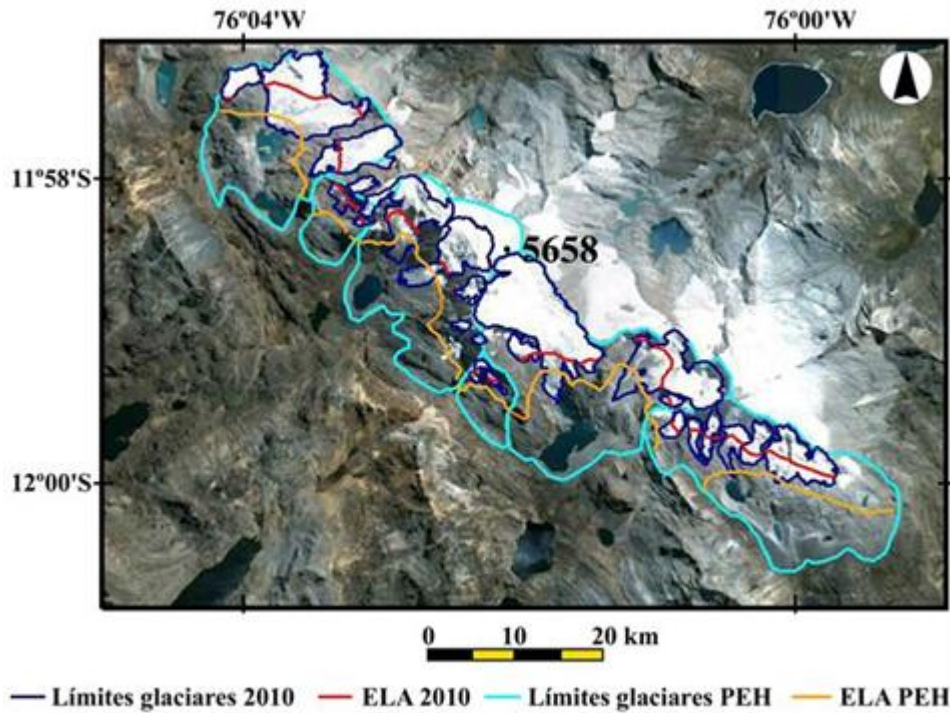


FIGURA 4.

Resultados para las ELAs 2007 y PEH obtenidos en los cuadrantes noroeste (6034 y 5936 m), noreste (5968 y 5886 m), sureste (5862 y 5776 m) y suroeste (5992 y 5823 m) del Nevado Coropuna. Base: Google Earth

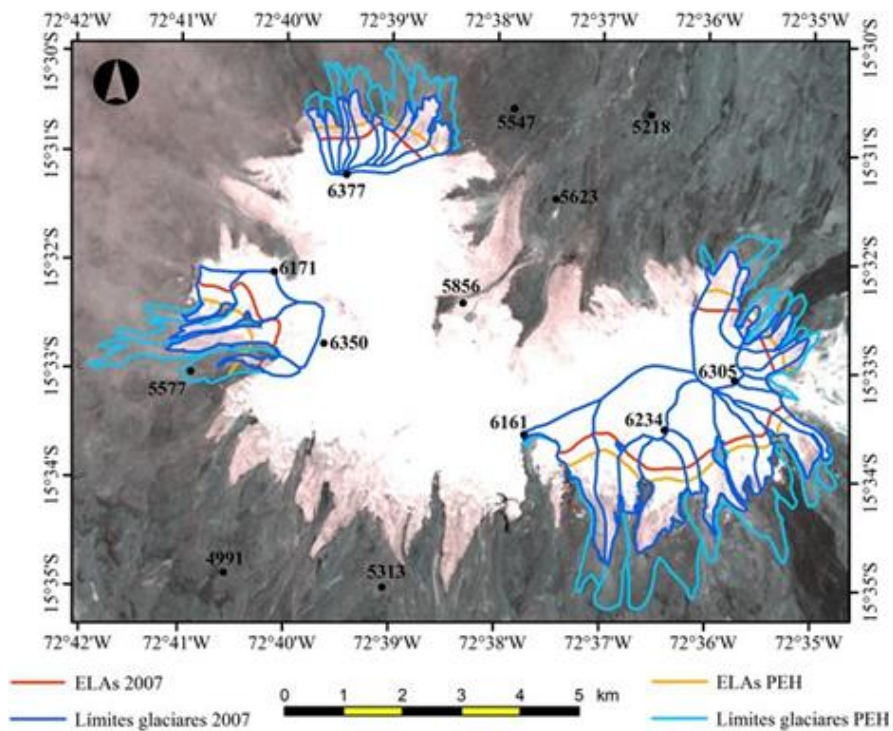


TABLA 1.

Estimaciones de ELAs y paleoELAs, enfriamiento atribuido a la PEH y comparación con el calentamiento global deducido de series de datos instrumentales

	NEVADO HUALCÁN ¹	CORDILLERA PARIQAQA ²	NEVADO COROPUNA			
			NW ³	NE ⁴	SE ⁴	SO ⁵
Latitud	9°S	12°S	16°S			
GTV (°C/km)	6,5	6,5	8,4			

Año bases geográficas (imágenes de satélite)		2003	2010	2007	2007	2007	2007	
PRESENTE	ELA (m)	5124	5138	6034	5968	5862	5992	
	BR	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	2,0	
	σ	90	132	36	73	136	80	
PEQUEÑA EDAD DEL HIELO	ELA (m)	4994	4998	5936	5886	5776	5823	
	BR	1,0	3,0	3,0	1,0	1,0	1,0	
	σ	124	161	61	93	166	39	
Diferencias con las series de ΔT	ΔELA (m)	130	140	98	82	86	169	
	ΔT (°C)	-0,85	-0,91	-0,82	-0,69	-0,72	-1,42	Media
	$\Delta T=0,85^{\circ}\text{C}$ (1880-2012)	0,01	0,06	0,03	0,16	0,13	0,57	0,05
	$\Delta T=0,78^{\circ}\text{C}$ (1850/1900-2003/2012)	0,06	0,13	0,04	0,09	0,06	0,64	0,12

ELAs y paleoELAs: ¹Giráldez (2003); ²Quirós (2013); ³García (2013); ⁴Úbeda (2011); ⁵Este trabajo Tendencias del calentamiento 1880-2012 y 1850/1900-2003/2012: IPCC (2013).

DISCUSIÓN

CRONOLOGÍAS MÁS PROBABLES DE LOS AVANCES

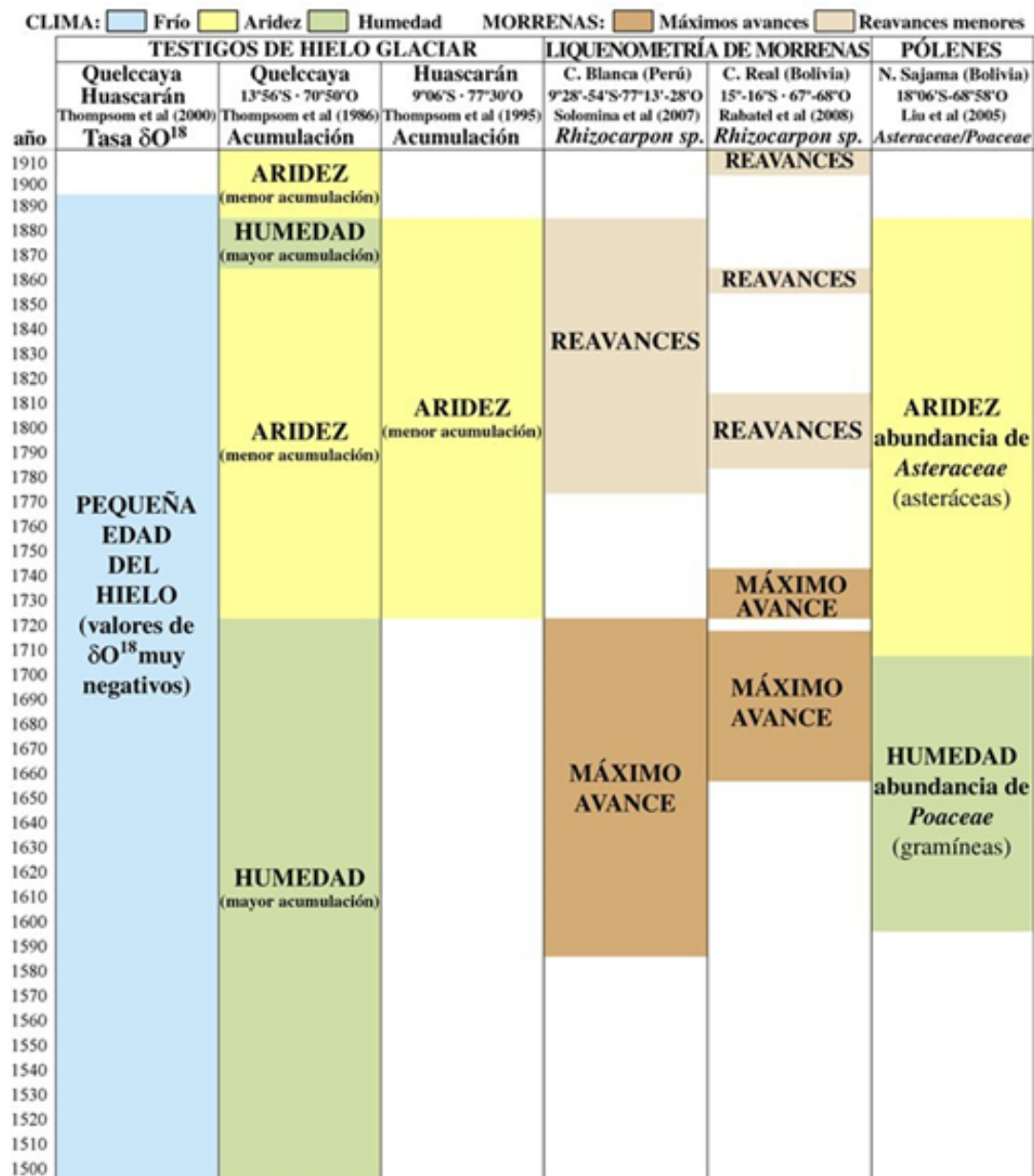
Aunque en ninguna de las tres áreas se han realizado dataciones absolutas que sustenten esa posibilidad, los datos procedentes de otras áreas de los Andes Centrales permiten suponer con bastante certeza que los avances glaciares sucedieron durante la Pequeña Edad del Hielo (PEH). Esa denominación fue utilizada por primera vez por Matthes (1939) para referirse al periodo entre los siglos XVI y XVII durante el que ocurrieron avances glaciares en las montañas de las latitudes medias. Aunque esas fases de expansión han sido bien documentadas en el Hemisferio Norte, todavía permanecen insuficientemente conocidas en los trópicos y existen muchas incertidumbres sobre la cronología y el contexto paleoclimático en el que sucedieron (Rabatel et al. 2008).

En los últimos años se han publicado cronologías de los avances glaciares más recientes basadas en las tasas de crecimiento de líquenes del género *Rhizocarpon*. Dichos trabajos, cuyos resultados se han sintetizado en un cronograma (figura 5), se realizaron en la Cordillera Blanca, 9-10°S/77-78°O

(Solomina et al. 2007) y la Cordillera Real de Bolivia, 15-16°S/68-69°O (Rabatel et al. 2008). Las dataciones liquenométricas sugieren que una fase de máxima expansión ocurrió en los siglos XVII y XVIII y fue seguida de reavances de menor magnitud durante el siglo XVIII y la primera década del XIX, confirmando que la PEH también ocurrió en los Andes Centrales y se desarrolló en dos fases principales. Las dataciones liquenométricas son coherentes con los valores negativos de isótopos de O18 en testigos de hielo del Nevado Huascarán (9°S/77°O) y el casquete glaciar Quelccaya (14°S/71°O), que también sugieren una fase de expansión de las masas de hielo entre 1500 y 1890 (Thompson et al. 2000).

FIGURA 5.

Síntesis cronológica de los proxies paleoclimáticos mencionados en el texto para la Pequeña Edad del Hielo en los Andes Centrales.

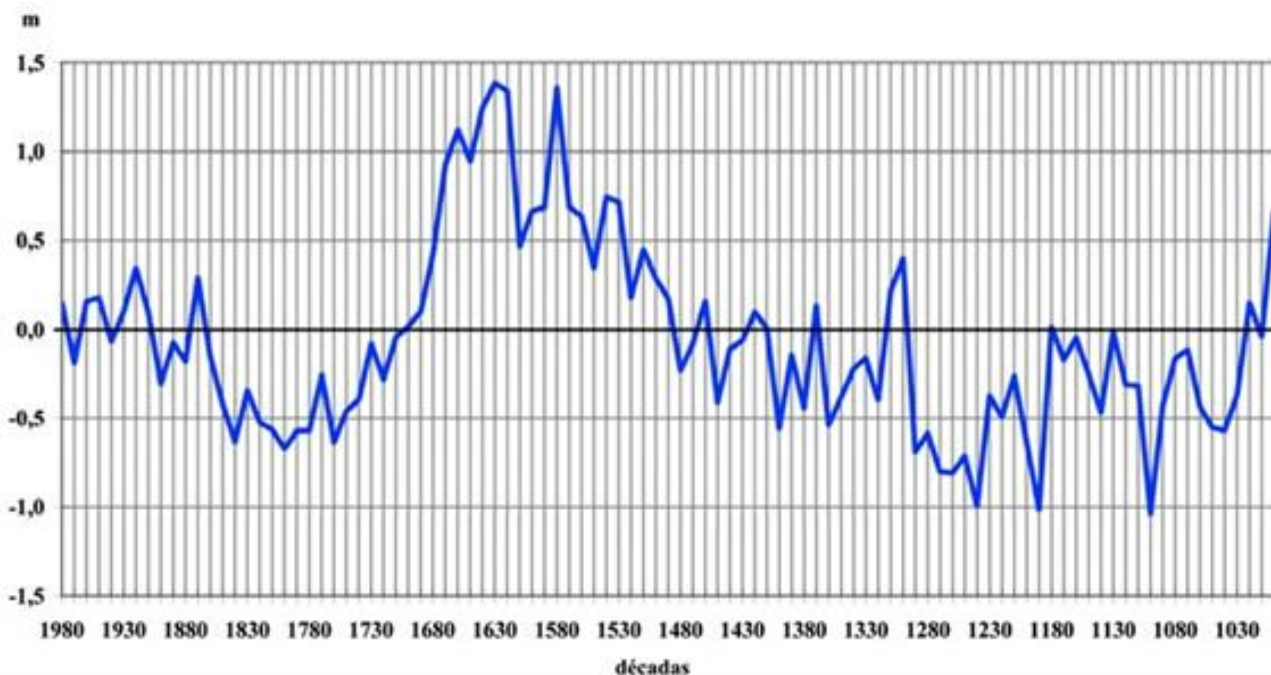


Fuente: Úbeda 2011.

Otros trabajos han proporcionado información sobre el contexto paleoclimático de los últimos avances glaciares (figura 5), deducida de datos indirectos (*proxies*). Los pólenes de gramíneas (familia *Poaceae*) atrapados en un testigo de hielo del Nevado Sajama (18°S/69°O) muestran un periodo húmedo durante el siglo XVII (Liu et al. 2005), contemporáneo a los máximos avances datados por liquenometría en la Cordillera Real y la Cordillera Blanca. Los pólenes también reflejan un periodo más seco durante los siglos XVIII y XIX, sugerido por una mayor abundancia de asteráceas (familia *Asteraceae*). Por otra parte, la acumulación registrada en los testigos de hielo del casquete glaciar Quelccaya (Thompson et al. 1986) sugiere un periodo húmedo entre 1500 y 1720, coherente con los avances observados en la Cordillera Blanca y la Cordillera Real de Bolivia, así como por la abundancia de gramíneas en los testigos de hielo del Nevado Sajama. La figura 6 es un gráfico que muestra la evolución de la acumulación neta (m de altura de la lámina de agua equivalente) recibida por el casquete glaciar Quelccaya durante el último milenio, representando las desviaciones de las medias para cada década con respecto al promedio del periodo comprendido entre 470 y 1980. La curva muestra claramente un periodo más húmedo entre 1490 y 1700, durante el que las desviaciones experimentan los valores más positivos de toda la serie).

FIGURA 6.

Acumulación registrada en los testigos de hielo del casquete glaciar Quelccaya. Curva elaborada con datos de Thompson (1992), representando sólo el periodo 1000-1980



Fuente: Úbeda 2011

Por lo tanto, a falta de dataciones absolutas que confirmen esa hipótesis, los datos procedentes de otras montañas permiten suponer que los últimos avances glaciares en las áreas de estudio de este trabajo debieron ocurrir en los siglos XVI-XVII, la primera parte de la cronología atribuida a la PEH por los datos de O18 de Thompson et al. (2000). El final de esa serie (1890) tiene una sincronía bastante aceptable con el comienzo de las series del calentamiento global publicadas por el IPCC (2013), que marcan el comienzo de la actual fase de deglaciación. Las divergencias con respecto a las edades reales de las morrenas podrían ser una de las causas de las diferencias observadas entre el

enfriamiento regional estimado en las áreas de estudio y el calentamiento global. Es posible que esas diferencias disminuyeran si se realizasen dataciones absolutas de las morrenas de los últimos avances en las áreas de estudio. El conjunto de datos sugiere que los avances glaciares estuvieron relacionados con un incremento en la humedad del clima. El aumento de las precipitaciones pudo estar relacionado con un mayor desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) debido al descenso de la temperatura en el Hemisferio Norte. Es decir, con un reforzamiento del mecanismo actualmente responsable de las precipitaciones que reciben los Andes Centrales, durante el verano austral (invierno boreal).

VARIACIONES REGIONALES Y AJUSTE DE LOS RESULTADOS

De acuerdo con el principio general indicado por Benn et al (2005), las ELAs y paleoELAs se elevan hacia el oeste y el sur de los Andes Centrales, como consecuencia de la tendencia de la aridez a incrementarse en el mismo sentido, tal y como señaló Clapperton (1993). Aunque los resultados obtenidos en las áreas de estudio para las ELAs actuales son coherentes con ese hecho, la diferencia entre las paleoELAs es considerablemente menor, un dato que podría reflejar que la humedad regional tal vez fuera más homogénea durante la PEH.

Por otro lado, las diferencias entre las estimaciones del enfriamiento regional durante dicho periodo y el calentamiento global hasta el presente son muy pequeñas. Están comprendidas dentro de los rangos de las series (0,65-1,06°C y 0,72-0,85°C); tienen promedios reducidos (-0,05°C y -0,12°C) y, con excepción del suroeste del Coropuna (~0,6°C), son inferiores a 0,2°C. Los resultados obtenidos permiten validar provisionalmente la ecuación empleada, en espera de realizar más ensayos. Los trabajos futuros podrían realizarse con datos de temperatura obtenidos sobre el terreno con sensores instalados en las montañas analizadas en el presente trabajo y/o en nuevas áreas de estudio.

CONCLUSIONES

El producto del gradiente térmico vertical por la depresión de la paleoELA ha permitido evaluar el enfriamiento del clima durante el último avance de los glaciares en tres áreas de montañas representativas de la cordillera occidental de los Andes Centrales. Los resultados muestran diferencias muy pequeñas con respecto al calentamiento global hasta el presente, reflejado por diferentes conjuntos de datos desde el final de la PEH. Los métodos empleados pueden intentar ajustarse realizando dataciones absolutas de las morrenas utilizadas como referencia para reconstruir las paleoELAs. Los últimos avances glaciares debieron suceder en los siglos XVI-XVII, en relación con un mayor desplazamiento hacia el sur de la ZCIT.

AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones que se recogen en este trabajo han sido realizadas en el marco de los proyectos CRYOCRISIS-GFAM (Proyecto referencia CGL2012-35858 del Plan Nacional I+D del Gobierno de España), CRYOPERU (ANA, INGEMMET, GFAM, UNESCO, GEM) y GA51 (Geomorfología y cambio climático-INGEMMET), con la colaboración de Canal de Isabel II Gestión (Madrid-España).

REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1988). "On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: Surface climate". *Monthly Weather Review* 116, 505-524.
- Benn, D.I. y Gemmell, A.M.D. (1997). "Calculating equilibrium line altitudes of former glaciers by the balance ratio method: a new computer spreadsheet". *Glacial Geology and Geomorphology*. <http://ggg.qub.ac.uk/papers/full/1997/tn011997/tn01.pdf>.
- 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 (2005), 8-21.
- Blard, P.-H., Sylvestre, F., Tripathi, A.K., Claude, C., Causse, C., Coudraing, A., Condom, T., Seidel, J.-L., Vimeux, F., Moreau, C., Dumoulin, J.-P. y Lavé, J. (2011). "Lake highstands on the Altiplano (Tropical Andes) contemporaneous with Heinrich and the Younger Dryas: new insights from ^{14}C , $U-Th$ dating and O of carbonates". *Quaternary Science Research* 30, 3973-3989.
- Brückner, E. (1886). "Die Höheren Tauern und ihre Eisbedeckung". *Zeitschrift des Deutsch-Österreichische Alpenvereins* 17, 163-187.
- Brückner, E. (1887). "Die Höheren der Schneelinie und ihre Bestimmung". *Meteorologische Zeitschrift* 4, 31-32.
- Brückner, E. (1906). "Die Höhe der Firnlinie im allgemeinen", *Vierteljahrsschrift d. Naturf. Ges. Zürich*, 50-54.
- Clapperton, C. (1993). *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam (Holanda).
- Chinn, T.J. (1979). *Hydrological research report, Dry Valleys, Antarctica 1974-75*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J. (1980). *Hydrological research report, Dry Valleys, Antarctica 1970-71*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J. (1981). *Hydrological research report, Dry Valleys, Antarctica 1974-75*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J. (1983). *Hydrology and glaciology, Dry Valleys, Antarctica annual report for 1976-77 and 1977-78*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J.H. y Cumming, R. (1983). *Hydrology and glaciology, Dry Valleys, Antarctica: annual report for 1978-1979*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J.H. y Maze, I. (1983). *Hydrology and glaciology, Dry Valleys, Antarctica: annual report for 1980-1981*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).

- Chinn, T.J.H., Oliver, A.K.C. (1985). *Hydrology and glaciology, Dry Valleys, Antarctica: annual report for 1982-1983*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Chinn, T.J.H. y Woods, A.D.H. (1984). *Hydrology and glaciology, Dry Valleys, Antarctica: annual report for 1981-1982*. New Zealand Ministry of Works and Development, Water and Soil Division, Christchurch (Nueva Zelanda).
- Francou, B. y Pizarro, L. (1985). "El Niño y la Sequía en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia)". Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos 14, 1-18.
- Francou, B. y Pouyaud, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales*. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1. Great Ice, Institut de Reserche pour le Développement (IRD) p. 238. Francia
- Francou, B. y Sémiond, H. (1997). *Estado de la red de monitoreo existente e impacto de los eventos ENSO sobre el balance de masa de los glaciares en Bolivia y en el Perú*, en: Galárraga, R., Ibarra, B. (Eds.), Seminario Montañas, Glaciares y Cambios Climáticos. Escuela Politécnica Nacional. EPN - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. ORSTOM - FUNDACYT, 1997, Quito (Ecuador), pp. 43-51.
- García, E. (2013). *Evolución glaciar 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/>
- Hastenrath, S. (1994). "Recession of tropical glaciers". Science 265, 1790-1791.
- 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).
- Kelly, M.A., Lowell, T.V., Applegate, P.J., Smith, C.A., Phillips, F.M. y Hudson, M.A., (2012). "Late glacial fluctuations of Quelccaya Ice Cap, southeastern Peru". Geology 40 (11), 991-994.
- Krusic, A.G., Prentice, M.L., Licciardi, J.M. (2009). "Climatic implications of reconstructed early-mid Pliocene equilibrium-line altitudes in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica". Annals of Glaciology 50, 31-36.
- Kurowski, L. (1891). "Die Höhe der Schneegrenze". Geogr. Abh. 5 I (124), 119-160.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. y Zhang, T. (2007). *Observations: Changes in snow, ice and frozen ground*, en: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. y Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos), USA, pp. 337-383.
- Liu, K., Reese, C.A. y Thompson, L.G. (2005). "Ice core pollen record of climatic changes in the central Andes during the last 400 years". Quaternary Research 64, 272-278.

- Mark, B.G., Harrison, S.P., Spessa, A., Newe, M., Evans, D.J.A. y Helmsing, K.F. (2005). *"Tropical snowline changes at the last glacial maximum: A global assessment"*. Quaternary International 138-139, 168-201.
- Matthes, F. (1939). *"Report of committee on glaciers"*. Transactions American Geophysical Union 20, 518-535.
- Meierding, T.C. (1982). *"Late Pleistocene glacial equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: A comparison of methods"*. Quaternary Research 18, 289-310.
- Oerlemans, J. (1989). *On the response of valley glaciers to climatic change*, en: Oerlemans, J. (Ed.), Proceedings of the Symposium on Glacier Fluctuations and Climatic Change. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 353-371.
- Oerlemans, J. (2005). *"Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records"*. Science 308, 675-677.
- Oerlemans, J., Hoogendoorn, N.C. (1989). *"Mass-balance gradients and climatic change"*. Journal of Glaciology 35, 399-404.
- Osmaston, H. (1965). *"The Past and Present Climate and vegetation of Rwenzori Glaciers"*. Uganda Journal 25, 99-104.
- Osmaston, H. (1975). *Models for the estimation of firnlines of present and pleistocene glaciers*, en: Peel, R.F., Chisholm, M.D.I. y Hagget, P. (Eds.), Processes in Physical and Human Geography. Bristol Essays, Bristol (Reino Unido), pp. 218-245.
- Osmaston, H. (1989a). *Glaciers, glaciations and equilibrium line altitudes on Kilimanjaro*, en: Mahaney, W.C. (Ed.), Quaternary and Environmental Research on East African Mountains. Brookfield, Balkema, Rotterdam (Holanda), pp. 31-104.
- 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.
- Osmaston, H.A. (1989b). *"Glaciers, Glaciations and Equilibrium Line Altitudes on the Ruwenzori"*. Brookfield, Balkema, Rotterdam (Holanda), pp. 31-104.
- Paredes, M.A. y Espinoza, E.J. (2005). *Las relaciones entre la variabilidad de la precipitación en la sierra del Sur del Perú y El Niño/Oscilación del Sur, The El Niño phenomenon and its global impact*. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) y European Geosciences Union (EGU), Guayaquil (Ecuador).
- Porter, S.C. (1981). *"Pleistocene glaciaton in the Southern Lake District of Chile"*. Quaternary Research 16, 263-292.
- Quirós, T. (2013). *Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepuco y Pariaqqa (Perú)*. Tesis de fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid (España). 51 p.
- Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P. y Grancher, D. (2008). *"A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16°S) and its implications for climate reconstruction"*. Quaternary Research 70, 198-212.
- Sissons, J.B. (1974). *"A late glacial Ice Cap in the central Grampians, Scotland"*. Transactions of the Institute of British Geographers 62, 95-114.

- Sissons, J.B. (1980). *"The Loch Lomond advance in the Lake District, northern England"*. Transactions Royal Society Edinburgh Earth Sciences. 71, 13-27.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B. y Pouyaud, B. (2007). *"Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: Little Ice Age" moraine chronology"*. Global and Planetary Change 59, 225-235.
- 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 (Estados Unidos).
- <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data>
- 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.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E.E., Dansgaard, W. y Grootes, P.M. (1986). *"The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap"*. Science 234, 361-364.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, H. y Morales Amao, B. (1984). *"El Niño- Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap"*. Science 22, 50-53.
- 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/>
- Úbeda, J. (2013). *"La investigación del registro glacial del cambio climático en el complejo volcánico Nevado Coropuna (Arequipa, Perú)"*, Foro Internacional de Peligros Geológicos, Arequipa (Perú). 5 p.