



**SGP**  
FUNDADA 1924

## XVIII Congreso Peruano de Geología

# EVOLUCIÓN GLACIAL A FINALES DEL HOLOCENO EN GLACIARES DE LA CORDILLERA DE VILCABAMBA, CUSCO

Ronald Concha<sup>1\*</sup>, José Úbeda<sup>1,2</sup>, Igor Astete<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Lima, Perú.

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña (GFAM) de la Universidad Complutense, Madrid, España.

### 1. Introducción

El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la Altitud de la Línea de Equilibrio o *Equilibrium Line Altitude* (ELA). La ELA es una línea que separa la zona de acumulación de un glaciar (predominante por la ocurrencia de procesos físicos que favorecen la ganancia de masa), de la zona de ablación (donde prevalecen los fenómenos que provocan pérdida de masa).

El Balance de masa de un glaciar, es la sumatoria de ganancias (acumulación) y pérdidas (ablación) de masa. La ELA, es la altitud donde el balance de masa se equilibra ( $b = 0$  mm). Este parámetro, es un concepto estadístico que puede referirse a diferentes escalas, en espacio y tiempo (Kaser & Osmaston, 2002).

La ELA, puede estimarse a través de diferentes métodos, como mediciones glaciológicas directas en la superficie del glaciar (ELAm-monitoreo), empleando criterios geomorfológicos (ELAg-geomorfológica) y ecuaciones que relacionan matemáticamente las variables climáticas que influyen en el balance de masa (ELAc-climática). Cada método tiene ventajas e inconvenientes, de modo que son técnicas complementarias entre sí.

La presente investigación, ensaya el cálculo de la ELAg a través del método *Área x Altitud Balance Ratio* (AABR), propuesto por Osmaston (2005). Las ELAs actuales se obtuvieron a partir del cartografiado de glaciares actuales (2014) y las paleo-ELAs a partir de la reconstrucción de paleo-glaciares, por evidencias geomorfológicas.

Para este estudio se reconstruyeron paleo-glaciares de la Pequeña Edad de Hielo (PEH), que fue el último periodo frío globalmente reconocido.

En los Andes Centrales, este periodo tuvo lugar entre los años ~1500 y 1890, según indican los isótopos de oxígeno en testigos de hielo del glaciar Quelcaya (Thompson et al., 1986). En la zona de estudio, los registros de la PEH, fueron identificados a través de dataciones cosmogénicas <sup>10</sup>Be, en bloques morrénicos (Licciardi J. et al., 2009, Licciardi J. et al., 2014), las cuales en promedio asignan al año 1775±40, como la culminación de los avances glaciares.

Mediante el análisis de las ELAs y paleo-ELAs, se puede comparar la variación de este parámetro en dos o más periodos de tiempo y extrapolar su tendencia hacia el futuro. De esta manera se obtendría un eficaz instrumento de análisis del impacto del cambio climático en los glaciares.

La ELA actual calculada, se comparó con datos instrumentales de monitoreo de balance de masa (Autoridad Nacional del Agua, 2009). Adicionalmente, se estimó la variación de la temperatura desde la PEH, utilizando la fórmula propuesta por Úbeda (2011), que relaciona el gradiente térmico vertical con la variación de las ELAs. Este resultado se comparó, con el calentamiento del clima desde finales del siglo XIX, deducido de datos instrumentales (IPCC, 2013).

### 2. Área de Estudio

La Cordillera de Vilcabamba, se ubica en los Andes orientales del sur de Perú, a ~ 60 km al noroeste de la ciudad del Cusco (Fig. 1), en dirección E-O a lo largo de 100 km. Las masas de hielo que se forman en sus laderas, abastecen de agua a los ríos Urubamba y Apurímac que son tributarios de la red fluvial del río Amazonas. Los nevados Salcantay (6271m), Tucarhuay (5910m), Huamantay (5473m) y Sacsarayoc (5881), son algunas de las montañas más altas de la zona.

En los valles adyacentes a los mencionados nevados, se

emplazan morrenas bien conservadas, depositadas durante el último avance de las masas glaciares (PEH).

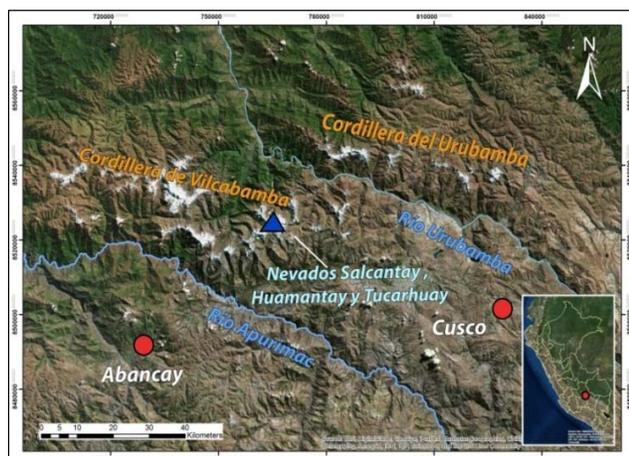


Fig. 1: Localización del área de estudio.

### 3. Metodología

#### 3.1. Reconstrucción de ELAs actuales y pasadas por el método AABR

En primer lugar, se elaboraron mapas de la geomorfología glacial, delimitando glaciares actuales (2014) y reconstruyendo paleo-glaciares a partir de un mapeo de morrenas formadas durante el último avance los glaciares (PEH) (Fig. 2). A continuación, se calcularon las ELAs y paleo-ELAs, empleando el método *Área x Altitud Balance Ratio* (AABR) propuesto por (Osmaston, 2005), que es considerado el mejor procedimiento (Benn et al., 2005).

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

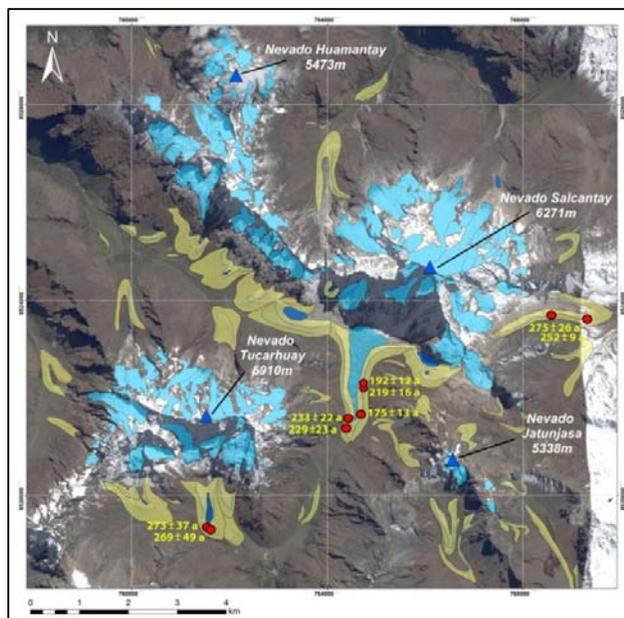


Fig. 2: Mapa de la geomorfología glacial, mostrando en color celeste, la extensión de los glaciares en 2014, en color amarillo las morrenas atribuidas a la PEH y con puntos rojos las dataciones  $^{10}\text{Be}$  realizadas por (Licciardi, 2009).

- Delimitación y medida de la superficie de los glaciares y paleo-glaciares y sus bandas altitudinales, reconstruyendo la paleo-topografía de los valles para representar cuando estos se encontraban llenos de hielo durante la PEH.
- Estimación de la ELA por el método *Area x Atitude* (Kurowski, 1891), resolviendo la ecuación propuesta por (Sissons, 1974, 1980) para simplificar los cálculos:

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

Dónde:

$\sum (Z \cdot S)$  - sumatoria de los productos de la altitud media de las bandas altitudinales (m) por su superficie ( $\text{m}^2$ ).

$\sum S$  - sumatoria de las superficies de todas las bandas altitudinales ( $\text{m}^2$ ).

- 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.
- Tabulación de los resultados de las ELAs y paleo-ELAs en series vinculadas con los valores de BR empleados para su estimación.
- Selección del resultado de la ELA y paleo-ELA, vinculada con una menor desviación estándar ( $\sigma$ ), la cual se considera como el valor más probable (Osmaston, 2005).

#### 3.2. Estimación de la variación de la temperatura desde la PEH

Para estimar la variación de la temperatura, se aplicó la ecuación propuesta por (Úbeda, 2011):

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

Dónde:

$\Delta T$  - variación de la temperatura desde la PEH ( $^{\circ}\text{C}$ ).

GTV - Gradiente Térmico Vertical ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ).

$\Delta ELA$  - desnivel de la paleo-ELA con respecto a la ELA actual (m).

El gradiente térmico vertical (GTV), es la variación de la temperatura del suelo o del aire, respecto a la altitud. Para la presente investigación se utilizó el valor medio de la Tierra ( $0,0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ), que (Kaser & Osmaston, 2002) consideraron válido para los trópicos y, comprobaron que ofrecía buenos resultados en la cordillera Occidental de los Andes Centrales. Para validar este procedimiento, los resultados se compararon con datos instrumentales del calentamiento global (IPCC, 2013).

### 4. Resultados

Se cartografiaron 161 glaciares actuales, y se reconstruyeron 98 paleo-glaciares, que suman superficies de 17.81 y 37.94  $\text{km}^2$  respectivamente, mostrando una reducción del 53.06% de la superficie glacial entre la PEH y el 2014 (Fig. 3).

Empleando el método AABR, se obtuvo resultados promedio ELAg=5115m., y paleo-ELAg= 4900m., que muestran un desnivel de 215m entre ambos periodos. Estos resultados, son estadísticamente representativos para glaciares de los nevados Salcantay, Tucurhuay, Huamantay y Sacsarayoc.

A través de la ecuación propuesta por (Úbeda, 2011), para estimar la variación de la temperatura, se obtuvo un incremento de 1.40°C. desde la culminación de la PEH (año 1775±40).

## 5. Discusión

La ELAg (AABR), obtenida de los glaciares de la vertiente sur del nevado Salcantay fue de 4956m. Este resultado, difiere en 23m. del cálculo de la ELAm 4979m en el glaciar Incachiriasca ubicado también en la vertiente sur del nevado Salcantay (Autoridad Nacional del Agua, 2009). Esta diferencia se debe a que el método AABR, empleado en este trabajo, promedia la ELA de un conjunto de varios glaciares a diferencia de la ELAm que analiza una única masa glaciar.

A través del mismo método empleado en la presente investigación, el INGEMMET viene realizando estudios en glaciares de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, en donde las ELAs son relativamente más altas (tabla 1). Esto puede atribuirse al incremento de la aridez en la cordillera Occidental y la mayor precipitación en la Cordillera Oriental, como consecuencia de la distancia respecto a la Amazonía (área fuente de las precipitaciones) y demás a las diferencias de latitud.

El incremento de la temperatura desde la culminación de la PEH, calculado en este trabajo (1.40°C), se comparó con el registro instrumental global del periodo 1880 - 2012 (IPCC, 2013), que fue de 0.85°C, lo que muestra una buena consistencia en los resultados obtenidos.

ÁREA DE ESTUDIO	LATITUD	ELA 2014 PROMEDIO (m)	ELA PEH PROMEDIO (m)
Cordillera Vilcabamba	13°20' S	5115	4900
Cordillera Pariaqaga	11°54' S	5187	5082.5
Cordillera Blanca	8°58' S	5264	5122

**Tabla 1:** Comparación de la ELA de la presente investigación, con las ELAs promedio de otras áreas de estudio (INGEMMET, 2016).

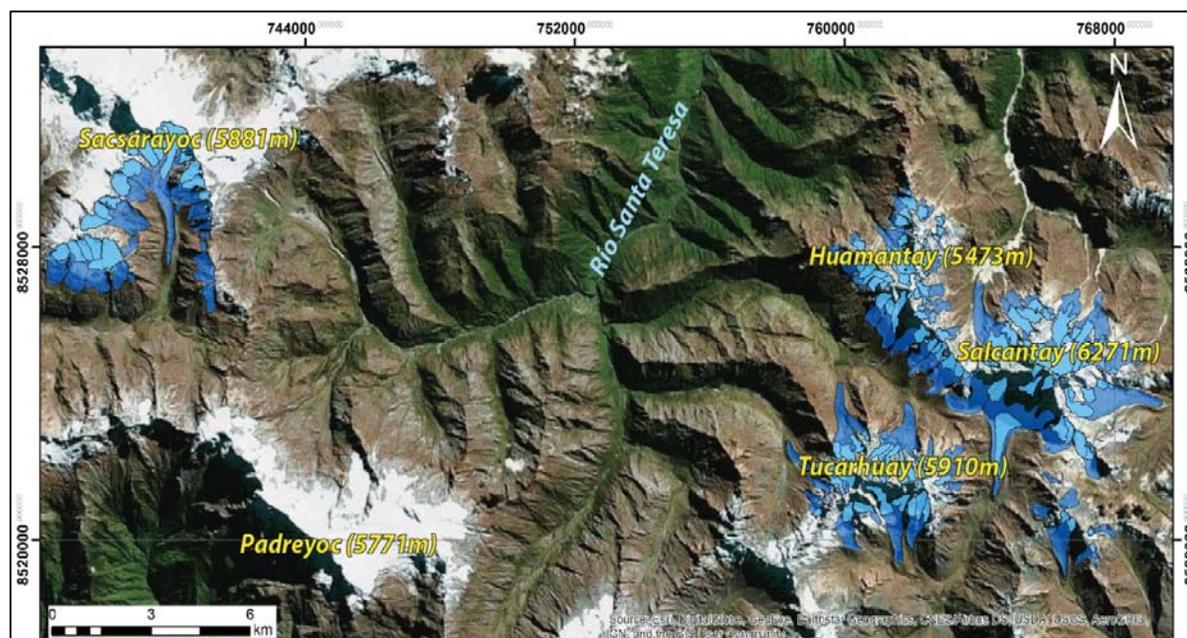
## 6. Conclusiones

Los resultados de la presente investigación, son consistentes respecto a mediciones glaciológicas directas (ELAm), y también a los resultados de investigaciones en otras latitudes de los Andes Centrales. Por lo que nos permite, validar provisionalmente las ecuaciones empleadas, en espera de realizar más estudios en nuevas áreas de la cordillera Oriental en los Andes Centrales.

La elevación de la ELA por encima del límite superior de un glaciar extendería la zona de ablación a toda la masa de hielo, haciendo desaparecer la zona de acumulación y condenando al glaciar a desaparecer en el plazo de tiempo que el clima necesitase para fundir la masa de hielo restante. Estas investigaciones, podrían servir para elaborar pronósticos y de esta manera proporcionar un nuevo enfoque sobre el impacto del cambio climático en los glaciares.

## Agradecimientos

Al proyecto de investigación básica de CIENCIACTIVA, realizada mediante el convenio 144-2015 (INGEMMET - FONDECYT).



**Fig. 3:** Mapa de glaciares (celestes) y paleo-glaciares (azul), en la Cordillera de Vilcabamba.

**Referencias**

- Autoridad Nacional del Agua 2009. Monitoreo del glaciar Incachiriasca, nevado del Salcantay cordillera de Vilcabamba.
- Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston, H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C., and Mark, B. G., 2005, Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers: *Quaternary International*, v. 138-139 (2005), p. 8-21.
- Concha R., 2015. Evolución Glaciar a Finales del Holoceno en los nevados Salcantay y Huamantay, y su impacto frente al Cambio Climático (Cusco – Perú). Tesis de Ingeniería: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 107 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., and Osmaston, H., 2002, *Tropical Glaciers*, Cambridge (U.K.), Cambridge University Press, International Hydrology Series, 207 p.:
- Kurowski, L., 1891, Die Höhe der Schneegrenze: *Geogr. Abh.*, v. 5 I (124), p. 119-160.
- Licciardi, J. M., Schaefer, J. M., Taggart, J. R., and Lund, C. D., 2009, Holocene glacier fluctuations in the Peruvian Andes indicate northern climate linkages: *Science*, v. 325, p. 1677–1679.
- 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.
- 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.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. E., Dansgaard, W., and 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., 2011, El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú): Universidad Complutense de Madrid, 558 p.