



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Evolución de los glaciares desde la pequeña Edad de Hielo en la Cuenca Parón (Cordillera Blanca – Ancash)

Ronald Concha¹, Joshua Iparraguirre¹, José Úbeda^{1,2}, Gonzalo Luna¹, Pool Vásquez¹

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, Lima, Perú.

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

RESUMEN

La dinámica glacial, es un indicador muy sensible a los cambios climáticos. La cuenca Parón (~8°59'S, ~77°40'O) alberga glaciares actuales y evidencias geomorfológicas de avances glaciales en el pasado. Basado en el cartografiado de glaciares actuales (2016) y paleo-glaciares (1962-PEH), esta investigación muestra la variación espacio-temporal de sus áreas (km²), volúmenes (Mm³), paleo-temperaturas (°C) y Altitudes de la Línea de Equilibrio – ELA (m).

Palabras clave: Glaciares, Cambio Climático, ELA, Parón, PEH

ABSTRACT

Glacier dynamics, is a very sensitive indicator of climate change. Parón basin (~8°59'S, ~77°40'W) include glaciers and geomorphological evidence of glacial advances in the past. Based on the mapping of glaciers (2016) and paleo-glaciers (1962-LIA), this research shows the spatial-temporal variation of its areas (km²), volumes (Mm³), paleo-temperatures (°C) and Equilibrium Line Altitudes - ELA (m).

Keywords: Glacier, Climate Change, ELA, Parón, LIA

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El análisis geomorfológico del paisaje glacial, proporciona información valiosa para reconstruir

e interpretar la dinámica de los procesos glaciares a lo largo del tiempo. La cuenca Parón, ubicada en la Cordillera Blanca (~8°59'S, ~77°40'O), alberga extensas masas de hielo y morrenas muy bien conservadas cercanas al frente glacial actual, que permiten delimitar la máxima expansión cuando los glaciares avanzaron por última vez.

Dataciones liquenométricas en el área de estudio y otros valles cercanos (Jomelli et al., 2008; Solomina et al., 2007) permiten suponer que dichos avances ocurrieron en la Pequeña Edad del Hielo (PEH). La PEH, fue el último periodo frío globalmente reconocido. En los Andes Centrales, este periodo tuvo lugar entre los años ~1500 y 1850-1890, según indican los isótopos de oxígeno en testigos de hielo del glaciar Quelcaya (Thompson et al., 1986) y dataciones cosmogénicas ¹⁰Be en la cordillera Vilcabamba (Licciardi, 2009). Aunque un máximo avance inicial sucedió en el siglo XIV, en el siglo XVII fue sobrepasado por el máximo avance de la PEH, seguido de al menos tres avances menores durante los siglos XVII y XVIII (Jomelli et al., 2008).

El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la ELA (Equilibrium Line Altitude), que es la altitud de la línea que separa la zona de acumulación de un glaciar (donde predominan los procesos físicos que favorecen la ganancia de masa), de la zona de ablación (donde prevalecen los fenómenos que provocan pérdida de masa).

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 las condiciones climáticas requieran para fundir la masa de hielo restante. Este parámetro, es un concepto estadístico que puede referirse a diferentes escalas, en espacio y tiempo (Kaser & Osmaston, 2002). Se han establecido relaciones entre la precipitación y la temperatura con la ELA (Ahlmann, 1924, 1948, Loewe, 1971, Kotlyakov y Krenke, 1982, Braithwaite, 1985, 2008, Ohmura et al., 1992), lo que permite determinar uno de los dos parámetros siempre que se conozca el otro (normalmente la temperatura) (Pellitero et al., 2015). Por lo tanto, a través del cálculo de la ELA y paleo-ELA, se puede estimar los cambios en el clima.

Basado en un mapeo detallado de glaciares en los periodos; 2016, 1962 y PEH, este trabajo muestra los resultados de la estimación de volúmenes glaciares y el cálculo de la ELA en glaciares y paleo-glaciares de la cuenca Parón.

ÁREA DE ESTUDIO



Fig. 1: Localización de la cuenca Parón.

La Cuenca Parón, se ubica en la Cordillera Blanca en los Andes occidentales del norte de Perú, a ~ 60 km al norte de la ciudad de Huaráz (Fig.

1). Los nevados Huandoy (6343m) y Chacaraju (6108m), son algunas de las montañas más altas de la Cuenca glaciar Parón, que alberga en sus vertientes grandes masas de hielo que abastecen de agua al río Santa, y morrenas bien conservadas, que ponen en evidencia antiguos avances glaciares.

METODOLOGÍA

Cartografiado de glaciares y paleo-glaciares

Sobre la base de una imagen del satélite PLEIADES (14/07/2016) y fotografías aéreas georeferenciadas (17/12/1962 y 23/05/1962), se realizó un mapa geomorfológico detallado de los glaciares en ambos escenarios. También se cartografiaron las morrenas, que permitieron delimitar los paleoglaciares en la PEH. La disponibilidad del mapa geomorfológico permitió estimar superficies, ELAs y volúmenes de los glaciares en las tres fases.

Estimación de volúmenes

Es necesario contar con Modelos de Elevación Digital (DEM) para cada escenario. Para el periodo 2016, se utilizó un DEM de 4m de resolución, obtenido a partir de la imagen PLEIADES. La metodología empleada fue GLABTOP (Linsbauer et al., 2012), cuyo principio, asume que la superficie actual del glaciar es reflejo de la topografía basal, para ello, se toma en consideración parámetros físicos que influyen sobre la dinámica glaciar como la fuerza de oposición al desplazamiento glaciar, la pendiente, densidad y gravedad. Para reconstruir los DEMs' en los periodos 1962 y PEH, se utilizó la herramienta GLARE (Pellitero et al., 2016), reconstruye los glaciares a partir de líneas de flujo, que simulan el recorrido glaciar en el pasado. Estas líneas, consideran los mismos parámetros físicos de la metodología GLABTOP, además de las alturas de las morrenas circundantes. Finalmente, con la obtención de un DEM para cada escenario y conociendo la topografía subglacial actual, se calcularon volúmenes para cada periodo a través de la sumatoria del producto del área de cada celda por sus respectivos espesores.

Cálculo de elas y paleo-ELAs

Las ELAs actuales y pasadas (paleoELAs) se reconstruyeron utilizando el método $\text{Area} \times \text{Altitud} \times \text{Balance Ratio}$, AABR (Osmaston, 2005) mediante la herramienta *ELA calculation* (Pellitero et al., 2015). La herramienta, requiere como elemento de entrada, los DEM obtenidos en el paso ante-

rior. El método requiere la hipsometría, forma del glaciar y la relación de equilibrio (BR).

El método AABR se basa en dos supuestos: (a) los gradientes de acumulación y ablación son aproximadamente lineales; b) la relación neta entre la ablación y la acumulación es conocida y permanece fija a través del tiempo (Benn y Lehmkuhl, 2000; Rea, 2009).

Este método reconoce que cualquier área de la superficie del glaciar que está altitudinalmente más lejos de la ELA (ya sea positiva o negativa) tiene una mayor contribución al balance general de masas que una unidad de área que se encuentra más cerca de la ELA.

El método AABR es el más adecuado para los glaciares “limpios”, es decir que no tengan una incidencia importante de masa provenientes de avalanchas, donde extensos glaciares cubiertos no ejerzan una fuerte influencia sobre el gradiente de ablación (Benn y Lehmkuhl, 2000, Osmaston, 2005) o donde la topografía no influya en el desarrollo climático del glaciar.

Estimación de la variación de la temperatura

La obtención de las ELAs y paleo-ELAs, permitió además, estimar la variación de la temperatura (ΔT) del pasado respecto al presente, registrada por la evolución de los glaciares, resolviendo la ecuación $\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$, (Porter, 2001; Sutherland, 1984). El GTV, el gradiente vertical de la temperatura del aire ($^{\circ}C/m$) y ΔELA el desnivel ELA-paleo-ELA (m). Para realizar el cálculo se utilizó el gradiente medio de la Tierra $GVT = 0.0065^{\circ}C/m$, que se considera apropiado para los trópicos (Kaser and Osmaston, 2002).

RESULTADOS

En el cuadro 1 y las figuras 2, 3 y 4, se muestran los resultados.

Periodo	Nro. de glaciares	Área (km ²)	Volumen Hielo (Mm ³)	Volumen Agua (Mm ³)	ELA (m)
2016	44	17.66	639.3	575.3	5164
1962	35	22.36	773.8	696.4	5114
PEH	22	30.89	1054.5	949.1	5058

- Reducción de la superficie glaciar: periodo 1962-2016 (21.0%), periodo PEH-2016 (42.8%).

- Desnivel de la ELA: periodo 1962-2016 (50m), periodo PEH-2016 (106m).

- $\Delta T_{1962-2016} = 0.33^{\circ}C$, $\Delta T_{PEH-2016} = 0.69^{\circ}C$.

- La temperatura media anual ($1.89^{\circ}C$), que se muestra en la Fig. 3, se obtuvo de la estación Meteorológica instalada por el proyecto CRYOPERÚ, sobre el glaciar Artesonraju.

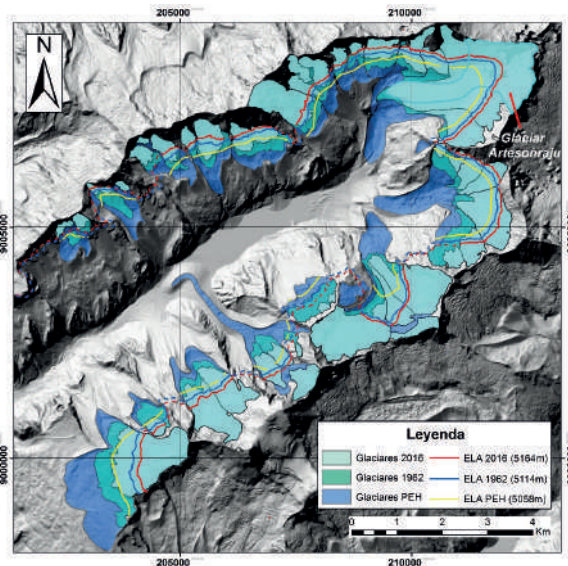


Fig. 2: Mapa de glaciares y paleo-glaciares en la Cuenca Parón, en líneas el cálculo de ELAs.

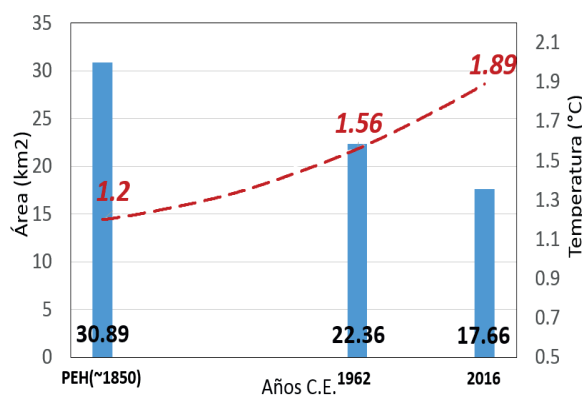


Fig. 3: Variación del área vs la variación de la temperatura

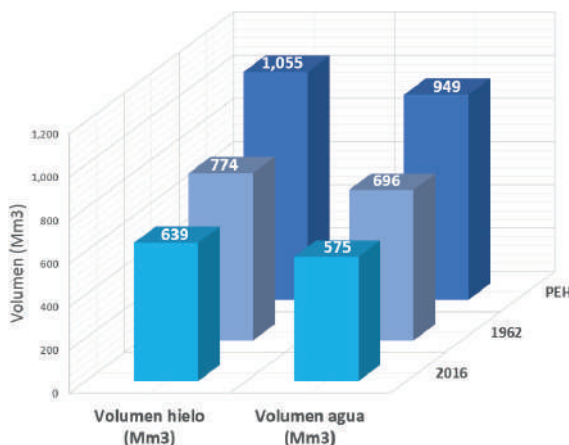


Fig. 4: Variación volumétrica de hielo y su equivalencia en agua.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La ELA obtenida por mediciones directas en el glaciar Artesonraju (cuenca Parón) hechas por la Unidad de Glaciología de la Autoridad Nacional del Agua (UGRH-ANA) en el periodo 2013-2014 es de 5049m, 115m por debajo de la ELA₂₀₁₆ de este trabajo. Esa diferencia se debe a que la ELA AABR presentada en este trabajo es un valor estadísticamente representativo de los 44 glaciares identificados en 2016 y la ELA medida directamente, se refiere exclusivamente al glaciar Artesonraju, más grande, con mayor alimentación y considerablemente más bajo que los demás aparatos de la cuenca.

La variación del clima $\Delta T_{PEH-2016} = 0.69^\circ\text{C}$, sólo es ligeramente inferior al calentamiento deducido de registros instrumentales (IPCC, 2013), tanto entre los años 1880 y 2012 (0.85°C), como entre las series 1850-1900/2003-2012 (0.78°C). Los resultados arrojan cierta consistencia con los datos instrumentales, además que si se considera que durante los últimos 50-60 años la temperatura se ha incrementado $0.1^\circ\text{C}/\text{década}$ (Vuille et al., 2008). A la espera de incorporar variables de acumulación, los autores de este trabajo están realizando nuevos ensayos para avanzar en esa línea de investigación.

Los resultados de este trabajo, son consistentes con las mediciones directas de ELAs y temperaturas y además, coinciden con los estudios emprendidos por el INGEMMET en otras zonas glaciares de los Andes peruanos, en donde se utilizan los mismos métodos. Esto nos permite, validar provisionalmente las ecuaciones empleadas, a la espera de realizar más estudios en nuevas áreas de los Andes Centrales.

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).

REFERENCIAS

Ahlmann, H.W., 1924. Le niveau de glaciation comme fonction de l'accumulation d'humidité sous forme solide. *Geogr. Ann.* 6, 223–272.

Ahlmann, H.W., 1948. Glaciological research on the north Atlantic coasts. *Royal Geographical Society Research Series* 1, 83.

Benn, D.I., Lehmkuhl, F., 2000. Mass balance and equilibrium line altitudes of glaciers in high mountain environments. *Quat. Int.* 65/66, 15–29.

Benn, D.I., Ballantyne, C.K., 2005. Paleo-climatic reconstruction from Loch Lomond Readvance glaciers in the West Drumochter Hills, Scotland. *J. Quat. Sci.* 20, 577–592.

Braithwaite, R. J., 1985. Calculation of degree-days for glacier-climate research. *Z. Gletsch. Glazialgeol.* 20, 1–8.

Braithwaite, R.J., 2008. Temperature and precipitation climate at the equilibrium line altitude of glaciers expressed by the degree-day factor for melting snow. *J. Glaciol.* 54 (186), 437–444.

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.*

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* 93, 201–212.

Kaser, G., Osmaston, H., 2002. *Tropical Glaciers.* Cambridge University Press, Cambridge (U.K.).

Kotlyakov, V.M., Krenke, A.N., 1982. Investigation of the hydrological conditions of alpine regions by glaciological methods. In: Glen, J.W. (Ed.), *Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas*, vol. 138. IAHS Publication, pp. 31–42.

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.

Linsbauer, A., Paul, F., Haeberli, W., 2012. Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research* 117, 17.

Ohmura, A., Kasser, P., Funk, M., 1992. Climate at the equilibrium line of glaciers. *J. Glaciol.*

38(130),397–411.

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.

Pellitero, R., Rea, B.R., Spagnolo, M., Bakke, J., Hughes, P., Ivy-Ochs, S., Lukas, S., Ribolini, A., 2015. A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes. *Computers & Geosciences* 82, 55–62.

Pellitero, R., Rea, B.R., Spagnolo, M., Bakke, J., Ivy-Ochs, S., Frew, C.R., Hughes, P., Ribolini, A., Lukas, S., Renssen, H., 2016. GlaRe, a GIS tool to reconstruct the 3D surface of palaeoglaci-ers. *Computers & Geosciences* 94, 77-85.

Porter, S.C., 2001. Snowline depression in the tropics during the last glaciation. *Quaternary Science Reviews* 20, 1067-1091.

Rea, B.R., 2009. Defining modern day area-altitude balance ratios (AABRs) and their use in glacier-climate reconstructions. *Quat. Sci. Rev.* 28(3–4), 237–248.

Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B., Pouyaud, B., 2007. Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: “Little Ice Age” moraine chronology. *Global and Planetary Change* 59, 225-235.

Sutherland, D.G., 1984. Modern glaciers characteristics as a basis for inferring former climates with particular reference to the Loch Lomond Stadal. *Quaternary Science Review* 3, 291-309.

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.

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G., Bradley, R.S., 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89, 79–96.