



Calentamiento global y la desglaciación al Suroeste del Nevado Yerupajá, Perú

Global warming and the Southwest slope of Nevado Yerupaja, Peru

F. Inocente¹, J. Gonzales¹, E. Mendoza-Nieto² , T. Méndez-Izquierdo^{1,3} 

DOI: <https://doi.org/10.51431/par.v2i2.645>

Resumen

Objetivos: Analizar el efecto del calentamiento global en el retroceso glaciar de la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá, entre dos momentos, la Pequeña Edad de Hielo (PEH) y el año 2016. **Metodología:** Se emplearon imágenes satelitales del Google Earth, las cuales se cartografiaron y luego se delimitaron los glaciares actuales y los paleo-glaciares; se determinó la altitud de línea de equilibrio (ALE) glaciar y paleo-glaciar mediante el método Área x Altitud Balance Ratio (AABR). La variación de la temperatura del aire registrada por la evolución de los glaciares entre los dos momentos, se calculó mediante el producto ALE paleo-ALE por gradiente térmico vertical medio de la Tierra. **Resultados:** Se han identificado 25 glaciares actuales, con una superficie de 6,3 km², y 19 paleo glaciares con 14 km², reportando una pérdida de 7,7 km²; se obtuvo una ALE de 5246 m y la reconstrucción de la ALE-paleo glaciar de 5106 m, lo que implicó una variación de 140 m desde la PEH hasta el 2016; en ese mismo periodo la variación de temperatura hallada fue de 1,34 °C. **Conclusiones:** El calentamiento global ha provocado la reducción de más de la mitad de la superficie glaciar de la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá, así como un desnivel de los ALE por un incremento de la temperatura.

Palabras clave: Calentamiento global, desglaciación, altitud de línea de equilibrio glaciar, gradiente térmico vertical

Abstract

Objectives: To analyze the effect of global warming on the glacial retreat of the Southwest slope of the snow-capped Yerupajá, between two moments, the Little Ice Age (LIA) and the year 2016. **Methodology:** Google earth satellite images were used, which were mapped and delimited current glaciers and paleo-glaciers, the Altitude of the glacial and paleo-glacial Line of Equilibrium is determined using the Area by Altitude by Equilibrium Ratio (AAR) method. Finally, the variation of the air temperature registered by the evolution of the glaciers between the two moments, was calculated by means of the ELA-paleo ELA product by mean Vertical Thermal Gradient of the Earth. **Results:** Twenty-five current glaciers have been identified, with a surface area of 6.3 km², and 19 paleo glaciers with 14 km², reporting a loss of 7.7 km²; an ALE of 5246 m and the reconstruction of the paleo-glacier ELA of 5106 m were obtained, which implied a variation of 140 m from the LIA to 2016; In the same period, the variation in temperature found was 1.34 °C. **Conclusions:** Global warming has caused the reduction of more than half of the glacial surface of the Southwest slope of the Yerupajá snow-capped mountain, as well as a slope of the ELA due to an increase in temperature.

Keywords: Global warming, deglaciation, glacial equilibrium line altitude, extreme vertical gradient

¹Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional José Faustino Sánchez, Huacho, Lima, Perú.

²Departamento de Agronomía. Universidad Nacional José Faustino Sánchez, Huacho, Lima, Perú.

³Autor para correspondencia: tmendez@unjfsc.edu.pe

Introducción

El calentamiento global es inequívoco causado por actividades humanas y que cada uno de los últimos decenios el planeta tierra ha sido más cálido que cualquier decenio anterior. Según estimaciones del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático (2013) desde 1850 hasta el 2013 presenta un incremento total de temperatura de 0,78 °C.

Los glaciares de montaña del mundo están en proceso de desaparición como consecuencia del incremento de la temperatura y es probable que algunas de las cadenas de montañas pierdan la mayoría, sino la totalidad, de sus glaciares (Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático, 2013). Los glaciares han experimentado en las últimas décadas un retroceso, pero cabe mencionar si se regresa varios siglos atrás y se reconstruye el proceso de desglaciación desde la Pequeña Edad de Hielo (PEH) y el último glaciar que se produjo entre los siglos XVII y XVIII, el retroceso de los glaciares andinos comenzó alrededor de 1730–1750 D.C. (Francou, 2013).

El Perú cuenta con el 70% de los glaciares tropicales del mundo, con una extensión de casi aproximadamente de 2000 km² (Seehaus et al., 2018). Los glaciares tropicales son indicadores clave del cambio climático (Kaser & Osmaston, 2002). La evaluación del efecto del calentamiento global en los glaciares cobra gran importancia no solo por su valor como elemento individual en vías de extinción, sino también por su importante función de indicadores a las variaciones del clima (Unidad Glaciología de Recursos Hídricos, 2014).

En las últimas décadas los Andes Tropicales se han retirado, lo que ha provocado un aumento temporal de agua en la estación seca de río abajo. Sin embargo, esta disminución de los glaciares conducirá a largo plazo a una disminución del agua de los ríos en la estación seca (Vuille et al., 2018).

El período de La Pequeña Edad de Hielo (PEH) comprende entre el siglo XIV y mediados del XIX y se caracteriza por un recrudecimiento climático con variaciones de alta frecuencia y de relativa baja magnitud (González et al., 2007).

El análisis de la evolución y la pérdida de los glaciares en diferentes épocas se mide a través de la Altitud de la Línea de Equilibrio (ALE) y es la que mejor caracteriza la evolución de un glaciar y es medida en metros sobre el nivel del mar (msnm) (Porter, 1975). Esta isolínea es la que divide la zona de acumulación y la zona de ablación (Campos, 2012). La reconstrucción de las ALEs en diferentes periodos permite definir sus tendencias, cuya extrapolación sirve para elaborar pronósticos sobre la evolución futura de los glaciares. Puede tratarse de la ALE representativa de un glaciar, de un conjunto de glaciares, una montaña, una cordillera o una región (Kaser & Osmaston 2002).

El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto del calentamiento global en la evolución de los glaciares al suroeste del Nevado Yerupajá desde la Pequeña Edad de Hielo hasta el 2016.

Metodología

Los glaciares considerados en el estudio se encuentran ubicados en el Suroeste del Nevado Yerupajá, en la cordillera Huayhuash entre los departamentos de Ancash, Huánuco y Lima, con una longitud aproximada de 26 km entre las Coordenadas Este 291339.00 m y Sur 8864136.00 m (Figura 1). Este nevado forma parte de la cordillera de los Andes, que recorre el margen occidental de Sudamérica a lo largo de 7500 km (Claperton, 2012).

Obtención y procesamiento de imágenes

Mediante el software Google Earth, se realizó el análisis geomorfológico en el que se delimitaron los glaciares actuales y las morrenas generadas por sus avances pasados. Se contornea las masas glaciares y paleo-glaciares en el Google Earth, para luego ser exportados y procesados con un software Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcGIS en su entorno ArcMap.

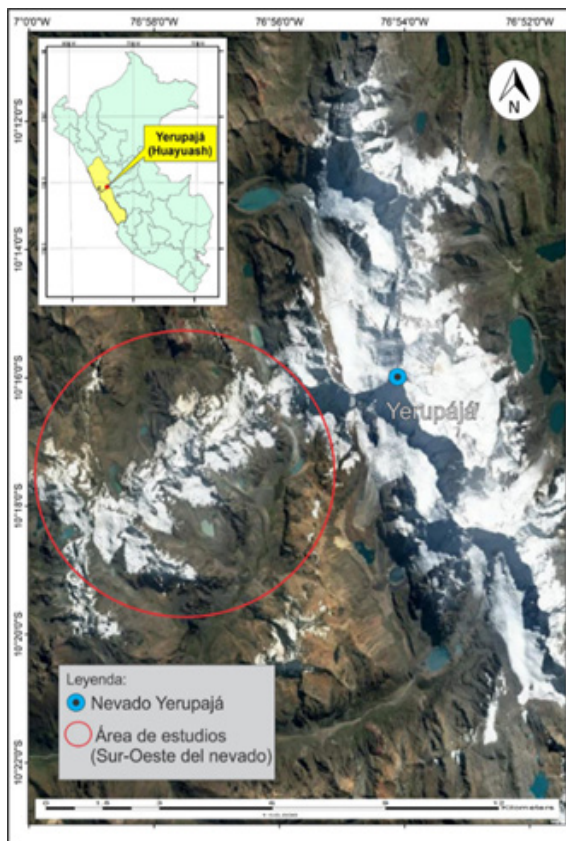
La delimitación de los glaciares actuales se realizó sobre una imagen satelital del 30/05/2016, y los glaciares del pasado o paleo glaciares (morrenas depositadas por su último avance al Suroeste del nevado Yerupajá) sobre una imagen satelital tomada el 23/07/2010 (Figura 2).

Cartografía y medida de la superficie de los glaciares y paleo-glaciares

Se elaboraron mapas geomorfológicos de ambos periodos, permitiendo medir la superficie (km²) de los glaciares y paleo glaciares (glaciares de la PEH).

Figura 1

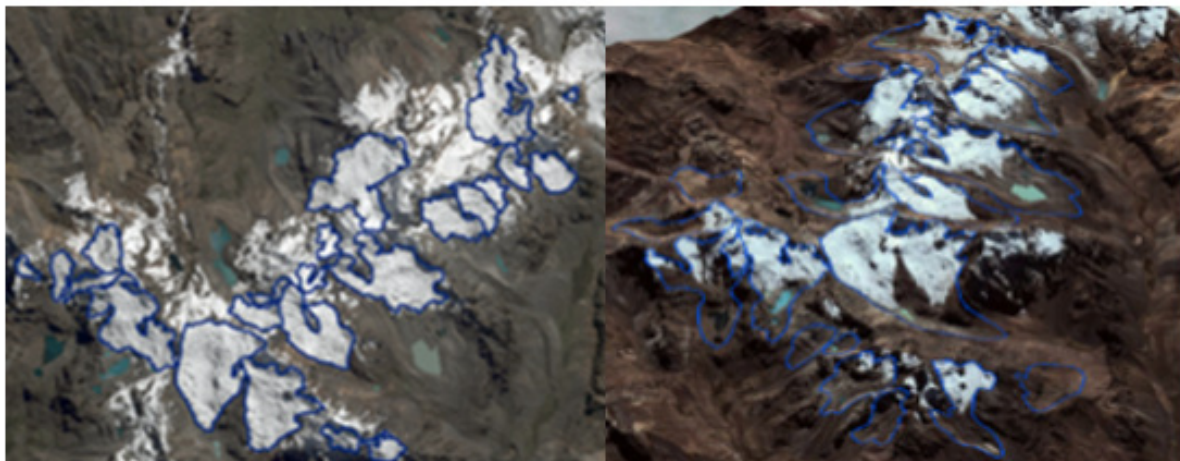
Ubicación del área de estudio mostrando la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá-Huayhuash



Fuente: Google Earth (2016).

Figura 2

Vista aérea de la delimitación de zona de glaciares (izquierda) en el 2010 y paleo-glaciares (derecha) en el 2016



Fuente: Google Earth (2016).

Cálculo de la altitud de la línea de equilibrio – ALE y paleo ALE

Se aplicó el método Área x Altitud de Balance Ratio (AABR), basado en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan muy por encima o por debajo de la ALE (Osmaston, 2005).

La ecuación usada para reconstruir la ALE de los glaciares fue:

Área x Altitud de Balance Ratio (AABR)

El método relaciona la Altitud y Área (AA) con el Balance Ratio (BR), su aplicación se desarrolla mediante la siguiente ecuación propuesta por Sissons (1974).

$$ALE = \Sigma (Z * S) / \Sigma S$$

Donde:

ALE = altitud de línea de equilibrio glaciar

Z = altitud media (m)

S = superficie (m²)

Estimación de la variación de la temperatura

Para relacionar el valor del enfriamiento con el gradiente térmico vertical de la temperatura del aire (valor global medio de la Tierra GTV=6,5°C/km), se utilizó la ecuación fue propuesta por Úbeda (2011).

$$\Delta T = GTV * \Delta ALE$$

Dónde:

ΔT : variación de la temperatura

ΔALE : variación de la altitud de línea de equilibrio glaciar (A LE o paleo-ALE)

GTV: valor global medio de la Tierra.

El producto $GTV * \Delta ALE$ permite deducir el enfriamiento del clima durante la PEH y el calentamiento global hasta el año 2016, con el cual fue posible determinar la influencia del calentamiento global en la desglaciación al Suroeste del Nevado Yerupajá

Resultados

Estimación de la desglaciación de la superficie glaciar

La delimitación realizada sobre la superficie de los paleo-glaciares en la PEH de la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá agrupó cinco nevados (Rasac, Auxilio, Diablo Mudo, Clavelcocha y Jullutahuarco) e identificó 19 glaciares, con una superficie total de glaciar de 13,95 km². Con respecto a la delimitación los glaciares del año 2016 agruparon cinco nevados (Rasac, Auxilio, Diablo Mudo, Clavelcocha y Jullutahuarco) e identificó 25 glaciares, con una superficie glaciar de 6,19 km². Esto significa una reducción de 7,76 Km² lo que indica que la vertiente perdió el 55,6% de su área total

existente en la PEH.

La Figura 3 muestra la distribución porcentual de glaciares perdidos en la PEH y el 2016, cada nevado muestra una clara disminución de su superficie glaciar. Entre los nevados que perdieron más superficie glaciar se encuentran Diablo Mudo y Jullutahuarco con una pérdida del 62% y 86% en comparación a los otros nevados.

Estimación de la ALE de los paleo-glaciares y glaciares

La estimación de la ALE durante el período PEH fue de 4955 m y en 2016 de 5161 m, observándose un desnivel de 206 m. Analizando el desplazamiento vertical que sufre la ALE entre dos o más periodos de tiempo, es posible conocer los cambios experimentados por las masas de los glaciares a lo largo de su evolución. La variación obtenida indica que existió una modificación de las condiciones climáticas y de temperatura entre ambos escenarios.

Con relación a las cotas alcanzadas, durante el PEH la altitud mínima fue de 4606 m y en el 2016 de 4880 m. Esto indica que, si en PEH se hallaba masa glaciar a partir de los 4606 m, en la actualidad es necesario estar a los 4880 metros de altitud para hallarlo. La isolínea de la ALE de los glaciares y la ALE de los paleo glaciares se muestra en la Figura 4.

Figura 3

Proporción del área de masa glaciar perdido de cada nevado respecto a sí mismo desde la PEH al 2016

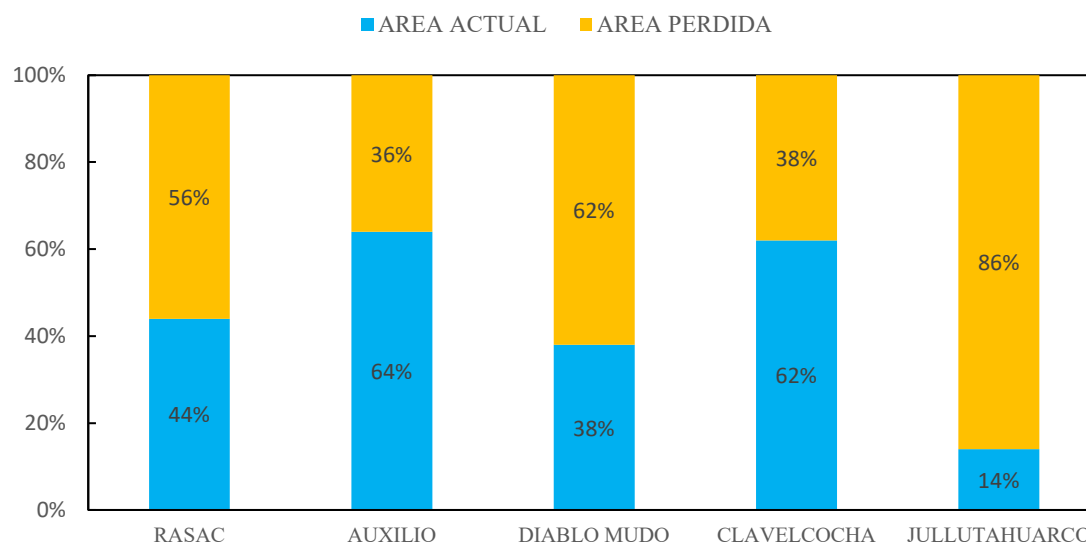
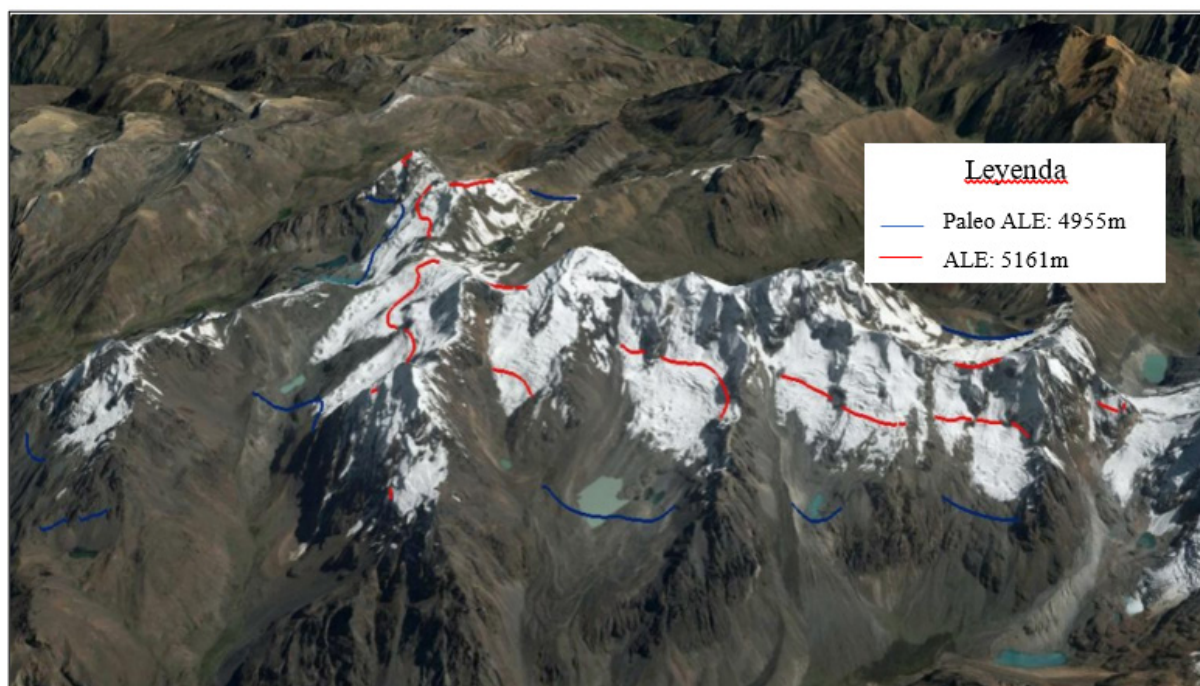


Figura 4

Isolínea de color rojo muestra la ALE de los glaciares y la isolínea de color azul muestra ALE de los paleo glaciares en la vertiente suroeste del Nevado Yerupajá



Fuente: Google Earth (2016).

Estimación de la variación temperatura registradas por la evolución glaciar

Los resultados obtenidos respecto a las ALEs (glaciares actuales), paleo-ALEs (glaciares del pasado) con sus respectivas desviaciones típicas y valor de BR (Balance de Ratio) para cada Nevado se muestran en la Tabla 1, así mismo muestran los resultados de sus respectivas variaciones de temperatura.

Al tener una diferencia altitudinal de 206 m

Tabla 1

Estimaciones de ALEs y paleo-ALEs con sus respectivos valores de desviación típica, BR y variación de temperatura

NEVADO	ALEs	σ	BR	Paleo-ALEs	σ	BR	Δ ALE (m)	GTV ($^{\circ}$ C/m)	Δ T (m)
Rasac	5159	68,2	3	5042	53	1	117	0,0065	0,76
Auxilio	5309	104,2	2,5	5141	108,2	1	168	0,0065	1,09
Diablo Mudo	5098	58,1	2	4972	51,1	1	126	0,0065	0,82
Clavelcocha	5155	8,5	1	4933	105,7	3	222	0,0065	1,44
Jullutahuarco	5138	33,2	3	4915	44,3	3	223	0,0065	1,45
Global	5161	97,2	3	4955	1111	3	206	0,0065	1,34

entre PEH y el año 2016, el producto de esta con el GTV da como resultado una variación de 1,34 $^{\circ}$ C en la vertiente. La mayor variación de temperatura se registró en el nevado Jullutahuarco (Tabla 1).

Discusión

Variación de la superficie de la masa glaciar

Hasta el 2016, la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá perdió 7,76 km² (55,6%) de superficie glaciar, con respecto a la PEH.

Ese valor es menor, en comparación con las pérdidas de superficie glaciaria obtenidas en otros estudios realizados, como Giráldez (2011) quien determinó una pérdida de 11,18 km² (38%) en el Nevado Hualcan desde la PEH al 2003 y por Úbeda (2011) quien calculó para el Nevado Coropuna del 1995 al 2007 una reducción de 9,56 km² (17%). Mientras que Bravo (2019) reporta una pérdida en el Nevado Tunshu de 7,11 km² (66%) desde la PEH al 2016 un valor muy cercano al área de estudio. Sin embargo, un estudio en Suroeste del Nevado Coropuna realizado por Campos (2015), muestra una pérdida de superficie glaciaria de 20,3 km² (22%), un valor mucho menor al del presente estudio.

Tendencias regionales de ALEs y paleo-ALEs

El cálculo de las ALE y Paleo ALE en el Nevado Yerupajá mostraron un cambio de altitud de 206 m entre la PEH y el 2016. La investigación de Bravo (2019) muestra una variación ALE de 212 m del Nevado Tunshu, similar al resultado obtenido en este estudio. Sin embargo, otros estudios como el realizado por Úbeda (2011) muestran la variación de la ALE del Nevado Coropuna de 112 m, así como Giráldez (2011) muestra para el nevado Hualcan una variación de la ALE de 130 m. Por otro lado, Campos (2015) realizó un estudio en el Suroeste del Nevado Coropuna con un resultado de variación de ALE de 71 m de 1995 hasta 2007, un valor menor al obtenido en el presente estudio.

Alcalá et al. (2011) mediante imágenes satelitales de 1995 y el 2008 por el método de (Área x altitud) estimó una ALE para Avance glaciario I (relacionado con Pequeña Edad de Hielo) de 5240 m y una ALE de 5900 m para el 2008 del valle de Huayuray, lo que significa una diferencia de 660 m.

Los nevados ubicados más al sur y más al oeste de los Andes Centrales, presentan cambios más significativos en sus paleo-ALEs respecto a sus ALEs actuales. Es posible que ello se deba a las tendencias regionales de la aridez, de acuerdo con el principio general indicado por Benn et al. (2005), las ALEs y paleo-ALEs se elevan hacia el oeste y el sur de los Andes Centrales.

Tendencias de la temperatura registradas por la evolución glaciaria

El resultado obtenido de cambio de temperatura promedio desde la PEH hasta el 2016 fue de 1,34 °C, este resultado se asemeja al obtenido por Bravo (2019) con una variación de temperatura promedio de 1,35 °C en el Nevado Tunshu; Úbeda (2011) muestra una variación de temperatura promedio de 0,71 °C en el Nevado Coropuna y un estudio del Nevado Hualcan muestra una variación promedio de temperatura de 0,85 °C (Giráldez, 2011).

Es posible que los resultados de las variaciones de temperatura estimadas en los estudios presentados tengan cierta discordancia debido al marcado contraste termo-pluviométrico a un lado y a otro de la cordillera (Úbeda & Palacios, 2008), considerando que, algunas áreas de estudio como en el caso de la vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá, predominan características del lado occidental de la cordillera al no estar muy influenciada por el Amazonas.

La validación de los resultados obtenidos respecto a la temperatura, se compararon con evidencias del calentamiento global basada en observaciones instrumentales publicadas en el V Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Por una parte, con los promedios anuales del incremento de la temperatura global del aire durante el periodo entre 1880 – 2012, y por otra con el incremento entre los promedios de la temperatura global del aire en series para los periodos 1890-1900 y 2003-2012.

Se muestra una diferencia de 0,489 °C y 0,559 °C respecto al calentamiento observado en estaciones meteorológicas (recopiladas por IPCC), es posible que las diferencias se deban a que los valores del IPCC son promedios globales de datos instrumentales de observatorios en diferentes partes del mundo, casi todos esos datos vienen de países de Europa y Norteamérica. Los datos hallados, en cambio, son locales de la zona tropical de la tierra (Andes Centrales), en donde no hubo estaciones meteorológicas hasta después del siglo XIX.

Conclusiones

La reconstrucción de las fases de los glaciares del Nevado del Suroeste de Yerupajá entre la PEH y el año 2016 determinaron una pérdida

de 76 km² equivalente al 55,6% de la superficie glaciar, como consecuencia del incremento de la temperatura del aire en 1,34 °C.

Referencias

- Alcalá, J., Palacios, D., Zamorano, J. J. & Vázquez-Selem, L. (2011). Last glacial maximum and deglaciation of Ampato volcanic complex, Southern Peru. *Cuaternario & Geomorfología*, 25 (1-2), 121-136. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3682507>
- Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C. & Mark, B. (2005). Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. *Quaternary International*, 138-139, 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.02.003>
- Bravo, K. C. (2019). *Análisis del registro glaciar del cambio climático desde la pequeña Edad de Hielo en el Nevado Tunshu (11° S), cordillera occidental de los Andes Centrales* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/11576?show=full>
- 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, e015. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170008>
- Campos, N. (2012). *Glacier evolution in the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Perú)* [tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/19889/>
- Clapperton, C. (1993). *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier Science.
- Francou, B. (2013). El rápido retroceso de los glaciares en los Andes Tropicales: Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña. *Ecología en Bolivia*, 48 (2), 69-71. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282013000200001&lng=es&tlng=es
- Giraldez, C. (2011). *Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú)* [tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/14013/>
- González, J. J., Martín, R. & Serrano, E. (2005). El glaciario de la Pequeña Edad de Hielo en las Montañas Ibéricas. Síntesis y estado actual de conocimiento. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 21(1-2), 57-86. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/2675>
- Google Earth. (2016). [Suroeste del nevado Yerupajá – Huayhuash]. https://earth.google.com/web/@-10.29908756,-76.95289034,5054.01249796a,12388.18284403d,35y,359.63739941h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2013). Quinto informe. *Cambio climático 2013. Bases físicas*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Kaser, G. & Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. University Press. Cambridge. <https://onggem.files.wordpress.com/2011/02/kaser-osmaston-2002-tropical-glaciers1.pdf>
- Porter, S. C. (1975). Altitudes de la línea de equilibrio de los glaciares del Cuaternario tardío en los Alpes del Sur, Nueva Zelanda. *Investigación cuaternaria*, 5(1), 27-47. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(75\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0033-5894(75)90047-2)
- 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*, 138 - 139, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.02.004>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, (13), 2537-2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Sissons, J. B. (1974). A late glacial Ice Cap in the central Grampians, Scotland. *Transactions of the Institute of British Geographers*, (62), 95-114. <https://doi.org/10.2307/621517>
- Úbeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales)* [tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio de la UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/12076/>
- Úbeda, J. & Palacios, D. (2008). El clima de la vertiente del Pacífico de los Andes Centrales y sus implicaciones geomorfológicas. *Espacio y Desarrollo*, (20), 31-56. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espaciodydesarrollo/article/view/5438>
- Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. (2014). *Inventario de glaciares del Perú (2.a actualización)*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3646>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis,

M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the Tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>