

Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú

Multi-temporal analysis between 1975 and 2015 on changes in glacier coverage in the snowy Allin Capac and Chichi Capac, Peru

Renny Daniel Díaz Aguilar^{1*}; Samanta Vanesa Sanchez Larico²; Efrain Lujano Laura³; Apolinario Lujano Laura⁴

¹Ministerio del Ambiente - Perú; ²Akut Perú S.A.C.; ³Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano de Puno-Perú; ⁴Autoridad Nacional del Agua - Perú. Autor para correspondencia Email: rennydaniel@gmail.com

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido 31-05-2017
Artículo aceptado 24-09-2017
On line: 27-09-2017

PALABRAS CLAVES:

Cambio climático,
cordillera del Carabaya,
NDSI,
retroceso glaciar.

ARTICLE INFO

Article received 31-05-2017
Article accepted 24-09-2017
Online: 27-09-2017

KEY WORDS:

Climate change,
cordillera of Carabaya,
NDSI,
glacier retreat.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue el análisis multi-temporal entre 1975 y 2015, sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. Se estimó el área cubierta por glaciares utilizando el método de clasificación supervisada para imagen Landsat 2 e índice de diferencia normalizada de nieve para imágenes Landsat 5 y Landsat 8. Los resultados del análisis, muestra una disminución drástica de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac. Es así que, en 1975 el área de cobertura glaciar fue de 52.3 km² y para el año 2015 se redujo a 16.9 km², perdiendo en total 35.6 km². En 1975 el 35% de la cobertura glaciar se encontraba debajo de la cota 5000 m.s.n.m., para el año 2015 solo representa el 9% del total de área glaciar. El mayor retroceso, se evidencia entre las tres últimas décadas del siglo XX, con una menor disminución durante las dos primeras décadas del siglo XXI. Se concluye que, en los últimos 40 años, la cobertura glaciar de los nevados Allin Capac y Chichi Capac presenta una reducción del 67%, equivalente a una disminución de 17% por década y una tasa promedio de 0.89 km²/año.

ABSTRACT

The objective of the study was the multi-temporal analysis between 1975 and 2015, on changes in glacier coverage in the snowy Allin Capac and Chichi Capac, Peru. The area covered by glaciers was estimated using the supervised classification method for Landsat 2 image and the normalized difference snow index for Landsat 5 and Landsat 8 images. The results of the analysis show a drastic decrease of the glacier cover in the snowy Allin Capac and Chichi Capac. Thus, in 1975 the area of glacier coverage was 52.3 km² and by 2015 was reduced to 16.9 km², losing a total of 35.6 km². In 1975, the 35% of the glacier coverage was below the 5000 m.a.s.l. and by the 2015 it represents only 9% of the total glacier area. The greatest setback is evident in the last three decades of the 20th century, with a smaller decline during the first two decades of the 21th century. It is concluded that in the last 40 years, the glacier cover of the snowy Allin Capac and Chichi Capac shows a reduction of 67%, equivalent to a decrease of 17% per decade and an average rate of 0.89 km²/year.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global de forma moderada se inició a mediados del siglo XIX y durante el siglo XX se reduce la extensión y volumen de los glaciares en zonas de montaña a nivel mundial debido al incremento de la temperatura (Oerlemans, 2005). La mayor aceleración del retroceso de los glaciares fue en las últimas décadas del siglo XX (Kaser & Georges, 1999; Vuille et al., 2008). Marzeion et al. (2014) menciona que desde finales de los años 70, el retroceso glaciar puede atribuirse a las influencias humanas en el clima global. Asimismo Marshall (2014) indica que a finales de los años 70, los glaciares parecen haber cruzado una línea invisible hacia un estado de declive que puede considerarse antinatural.

El retroceso glaciar es una evidencia del cambio climático antropogénico, sin embargo, los tiempos de respuesta de los glaciares son típicamente de décadas o más, lo que implica que el retroceso actual de los glaciares es una respuesta mixta a la variabilidad del clima natural y al forzamiento antropogénico actual (Marzeion et al., 2014). Otro proceso común asociado con el retroceso de los glaciares es la aparición de nuevos lagos en cuencas excesivamente excavadas y un aumento de los niveles de agua en los lagos existentes (López-Moreno et al., 2017).

Los glaciares tropicales son la principal fuente de agua dulce para algunas de las ciudades más grandes de Sudamérica (López-Moreno et al., 2014). Los Andes, son el hogar de más del 99% de los glaciares tropicales (Kaser, 1999) y el Perú contiene aproximadamente el 70% de ellos (Vuille et al., 2008). Durante los últimos 40 años los glaciares de los andes peruanos se ha reducido en un 42.6% (Autoridad Nacional del Agua, 2014). El retroceso de los glaciares en los Andes Peruanos es acelerado durante los años de El Niño, sin embargo, en los años de La Niña tienden a ser estables o a incrementar su cobertura (López-Moreno et al., 2017). Los glaciares de la cordillera del Carabaya, tenían una extensión de

104.23 km² en 1970 y representaban el 5% de los glaciares en el Perú, sin embargo para el 2010 su extensión se redujo a 34.6 km² equivalente a una pérdida del 67% en los últimos 40 años, representando para el 2010 el 3% de los glaciares en el Perú (Autoridad Nacional del Agua, 2014).

Los glaciares tropicales, son sensibles al cambio climático a una escala espacio-temporal y son fuente importante de recursos hidrológicos (Mark, 2008). Estos cambios están alterando significativamente la disponibilidad de agua en la región y plantean riesgos críticos a las poblaciones locales que son altamente dependientes de estos recursos para los medios de subsistencia (Bury et al., 2011). A medida que los glaciares retrocedan, más afloramientos y formaciones ricas en sulfuros serán expuestos, más metales traza y elementos potencialmente tóxicos pueden ser liberados e ingresar en las aguas y arroyos (López-Moreno et al., 2017).

Bajo estas consideraciones expuestas, se ha planteado la presente investigación que consistió en el análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac de la cordillera del Carabaya, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los nevados Allin Capac y Chichi Capac, se encuentran ubicados en la cordillera del Carabaya localizado en los andes del continente sudamericano al sur de Perú (Figura 1), comprendidos entre las coordenadas geográficas de 13°22'48,96" - 14°26'11,80" latitud sur y 69°37'16,10" - 71°25'51,15" longitud oeste; siendo el nevado Allin Capac el más alto de la cordillera del Carabaya con una altitud de 5804 msnm.

Los nevados forman parte de la región hidrográfica del Amazonas (RHA), sus aguas fluyen hacia las unidades hidrográficas San Gabán (sur-oeste) y Esquilaya (nor-este). Las tasas de precipitación según

el registro histórico de la estación Macusani, varían entre 466 y 804 mm por año. La temporada de avenidas en los Andes se presentan entre los meses de diciembre a marzo, con un marcado periodo de estiaje

entre abril y noviembre. Dentro del periodo de estiaje se presenta una temporada de bajas temperaturas (heladas) entre junio y agosto, registrando temperaturas por debajo de los 0°C.

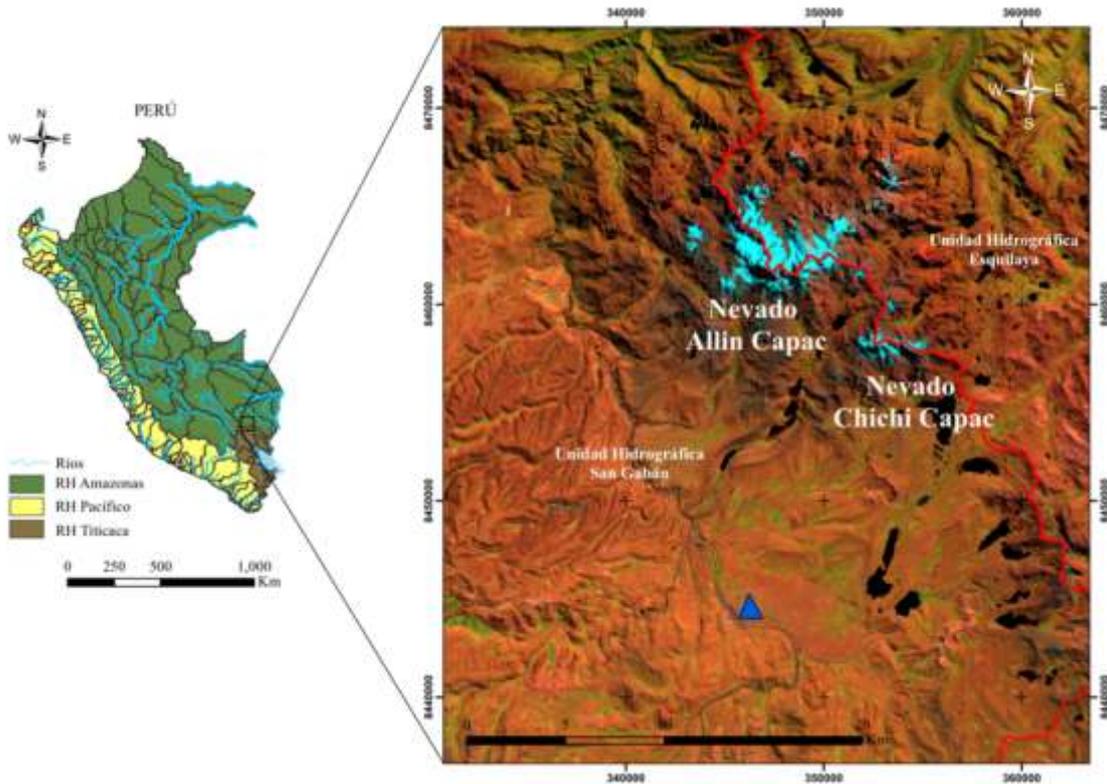


Figura 1. Ubicación del área de estudio de los nevados Allin Capac y Chichi Capac, la estación meteorológica de Macusani en triángulo azul (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de figura, el lector se refiere a la versión web de este artículo)

Base de datos para estimar la cubierta glaciar

La información utilizada se basa en imágenes de satélite Landsat 2 MSS (Multispectral Scanner), Landsat 5 TM (Thematic Mapper) y Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imagery/ Thermal Infrared Sensor), con resolución espacial de 60 m., 30 m. y 30 m. respectivamente, comprendidos entre los periodos 1975-2015 con proyección de mapa UTM, datum WGS84, zona 19 sur en formato Geotiff y cobertura geográfica (path 002, 003 y row 070), disponible en el portal (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del USGS (United States Geological Survey).

El satélite Landsat 2 MSS está compuesto por cuatro bandas espectrales, dos en visible y dos en infrarrojo

cercano. Landsat 5 TM, opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en visible, una en el infrarrojo medio, dos en el infrarrojo cercano y una banda termal (Chander, Markham, & Helder, 2009). Landsat 8 está compuesto por nueve bandas espectrales en el sensor OLI (Operational Land Imager) y dos bandas en el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor).

Las escenas fueron seleccionadas considerando imágenes libres de nubosidad, correspondientes a los meses de estación seca o de estiaje, invierno austral (junio, julio y agosto). Los datos de altitud, fueron obtenidos del ASTER GDEM (Modelo de Elevación Digital Global de ASTER), desarrollado por la NASA (National Aeronautics and Space

Administration) y el METI (Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry), el cual tiene una resolución espacial de 30x30m. La descarga del

producto se puede realizar a través del portal (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat utilizadas para estimar los cambios en la cubierta glaciar

Path	Row	Fecha	Hora	Angulo de elevación solar	Azimut solar	Producto	Plataforma
002	070	29/07/1975	14:02:41	37.5704457	51.8577776	MSS L1T	Landsat 2
003	070	25/06/1985	14:16:52	39.2849592	48.8516989	TM L1T	Landsat 5
003	070	07/09/1995	13:49:21	42.6689654	67.2302825	TM L1T	Landsat 5
003	070	16/07/2005	14:34:47	41.3499927	43.4490178	TM L1T	Landsat 5
003	070	14/09/2015	14:46:57	57.0536135	59.3499609	OLI/TIRS	Landsat 8

Análisis de datos para estimar la cubierta glaciar

Corrección geométrica

En esta etapa se procedió a trasladar los píxeles de ND a sus posiciones georreferenciadas sin modificar los valores de la imagen Landsat MSS, de forma que coincidan de manera precisa con la imagen Landsat OLI. La imagen MSS capturada por Landsat 2 se procedió a corregir mediante el método empírico de puntos de control, tomado como base la imagen Landsat 8 OLI/TIRS. Para esta metodología, fue necesario establecer puntos de control, transformación de coordenadas mediante una función polinomial y la utilización del método de convolución cúbica para la transformación de niveles de gris.

Calibración o corrección radiométrica

Las imágenes obtenidas, fueron pasadas de niveles digitales (ND) a radiancia. Chander & Markham (2003) indican que el cálculo de la radiación es el paso fundamental para poner los datos de imagen de múltiples sensores y plataformas en una escala radiométrica común. Durante la calibración radiométrica, los valores de píxel a partir de datos de imágenes en bruto, sin procesar se convierten en unidades de radiancia absoluta utilizando cálculos de punto flotante de 32 bits. Los valores de radiancia son entonces escalados a valores de 8 bits, que representan números digitales calibrados.

Corrección atmosférica

En este proceso se convierte los valores de radiancia a valores de reflectancia, mediante la herramienta FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis

of Hypercubes) de ENVI 5.3 (Monsef & Smith, 2017), siendo necesario la elevación media de la zona en kilómetros, fecha de toma de imágenes de satélite, ángulo de elevación solar, azimut solar, tipo de sensor y altura del sensor, mostrados en la Tabla 1.

Estimación de áreas cubiertas por glaciar

Para estimar la cobertura glaciar en la zona de estudio a partir de imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS, se utilizó el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) (Dozier, 1989; Hall, Riggs, & Salomonson, 1995; Medina & Mejía, 2014; Silverio & Jaquet, 2005). El NDSI es calculado usando la Ec. (1) y Ec. (2) para imágenes Landsat 5 y Landsat 8 respectivamente.

Las imágenes Landsat MSS no tiene la misma radiometría que Landsat TM y OLI, por tanto, no se aplicó el NDSI para asignar límites del glaciar en la imagen de 1975. Para ese año, la superficie glaciar se estimó mediante una clasificación supervisada.

$$NDSI_{L5} = \frac{B_2 - B_5}{B_2 + B_5} \quad [1]$$

$$NDSI_{L8} = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6} \quad [2]$$

Donde, B2, B3, B5 y B6 son las bandas 2, 3, 5 y 6 respectivamente. Para la identificación de nieve (Dozier, 1989; Hall et al., 1995; Shimamura, Izumi, & Matsuyama, 2006) indican que el $NDSI > 0.4$. La interferencia de sombras y nubes se eliminaron manualmente, según el procedimiento realizado por

López-Moreno et al. (2014). Así mismo se realizaron salidas de campo a diferentes puntos de la cordillera a fin de identificar, verificar in situ y validar los resultados obtenidos a partir de imágenes satelitales.

Análisis de datos climáticos

Se utilizaron datos de temperatura media mensual del aire en grados centígrados (°C) y precipitación total mensual en milímetros (mm) de la estación Macusani. Los datos provienen del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, con un registro consistente de 1993 a 2015 e información no consistente respecto a los años anteriores, por lo que se optó en utilizar datos adicionales de temperatura media mensual de Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2 (MERRA-2) modelo M2SMNXSLV, con una resolución espacial de 0.5°x0.625°.

MERRA-2 es un reanálisis atmosférico de la NASA que comienza en 1980 y reemplaza el reanálisis original de MERRA (Rienecker et al., 2011). Los datos de reanálisis son válidos y representan de manera adecuada el comportamiento temporal de la temperatura media mensual del aire, mostrando una correlación lineal de 0.89 (temperatura MERRA-2 versus temperatura estación Macusani). Los datos MERRA-2 para la zona de estudio, fueron sometidos a un análisis de tendencia mediante pruebas estadísticas no paramétricas de Mann-Kendall, Spearman's Rho y la prueba paramétrica de regresión lineal.

Por otro lado, periodos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) fueron identificados mediante el Índice Oceánico del Niño (ONI), estándar utilizado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el cual se estima como el promedio de tres meses sucesivos de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región 3.4 (5°N -5°S, 120° -170°W) del pacífico tropical (Smith, Reynolds, Peterson, & Lawrimore, 2008).

Las estimaciones de temperatura superficial del mar (TSM) realizado por el Centro de Pronóstico

Climático (CPC), se reflejan en el uso de Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Versión 4 (ERSSTv4), estudiado por Huang et al. (2015). El umbral se subdivide en débil (anomalía 0.5°C a 0.9°C), moderado (1.0°C a 1.4°C), fuerte (1.5°C a 1.9°C) y muy fuerte ($\geq 2.0^\circ\text{C}$), un evento se define como la presencia de 5 meses consecutivos por encima de la anomalía +0.5°C (El Niño) y por debajo de la -0.5°C (La Niña) (Figura 4d).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios en la cubierta glaciar

La Figura 4a muestra la variación temporal de la superficie glaciar estimada a partir de imágenes de satélite Landsat, con dos extremos que evidencian la disminución drástica de la cubierta glaciar. En la cordillera del Carabaya la superficie glaciar del Allin Capac y Chichi Capac en 1975 era de 52.3 km², este se redujo a 33.5 km² en 1985, a 24.9 km² en 1995, a 20.1 km² en el 2005 y a 16.9 km² para el año 2015, perdiendo en total 35.6 km² de área cubierta por glaciar, equivalente a una pérdida del 67% en 40 años (17% por década). A partir de esta información se estimó una tasa de pérdida de glaciar de 0.89 km²/año aproximadamente.

El 35% de extensión glaciar se encontraba por debajo de la cota 5000 msnm. en 1975, para el año 2015 se redujo a un 9%. En 1975 los frentes glaciares se extendían hasta las cotas 4676 y 4849 msnm en promedio, tanto para la unidad hidrográfica Esquilaya (lado este) y San Gabán (lado oeste) respectivamente (Figura 1), sin embargo para el 2015 los frentes retrocedieron hasta las cotas 4763 y 4970 msnm., para ambas regiones respectivamente, el retroceso de los frentes fue mayor en la unidad hidrográfica San Gabán (lado oeste) con 121 metros de diferencia entre las cotas de 1975 y 2015 a diferencia de la unidad hidrográfica Esquilaya (lado este) que presentó una diferencia de cotas de 86 metros entre 1975 y 2015. El frente con mayor diferencia de cotas es la vista frontal del Allin Capac con 145 metros (Figura 2 y 3e) y el frente con menor diferencia, es el frente cascada del

Allin Capac con 15 metros (Figura 2 y 3a). En la Figura 3 se aprecia las diferentes formas topográficas que caracterizan la cordillera del Carabaya.

El porcentaje máximo de pérdida, se produjo durante los años 1985 y 1995, el cual es congruente con una mayor presencia de eventos El Niño moderado (1986-1987, 1987-1988, 1991-1992), muy fuerte (1982-1983, 1997-1998), debido a que las anomalías de temperatura superficial del mar en la región del pacifico central, muestran condiciones cálidas con anomalías positivas (Figura 4d). Estas

manifestaciones del retroceso rápido de los nevados durante los años ochenta y noventa, concuerdan con estudios realizados por (López-Moreno et al., 2014, 2017; Vuille et al., 2008). El retroceso de los glaciares es equilibrado durante los años 2005 y 2015 (dos primeras décadas del siglo XXI) y es coherente con la menor presencia de eventos El Niño moderado (2002-2003, 2009-2010) y muy fuerte (2015-2016). Los años El Niño son característicos por presentar altas temperaturas y déficit de lluvias en los andes, mientras que un patrón opuesto se caracteriza para los años de La Niña (Vuille et al., 2008).

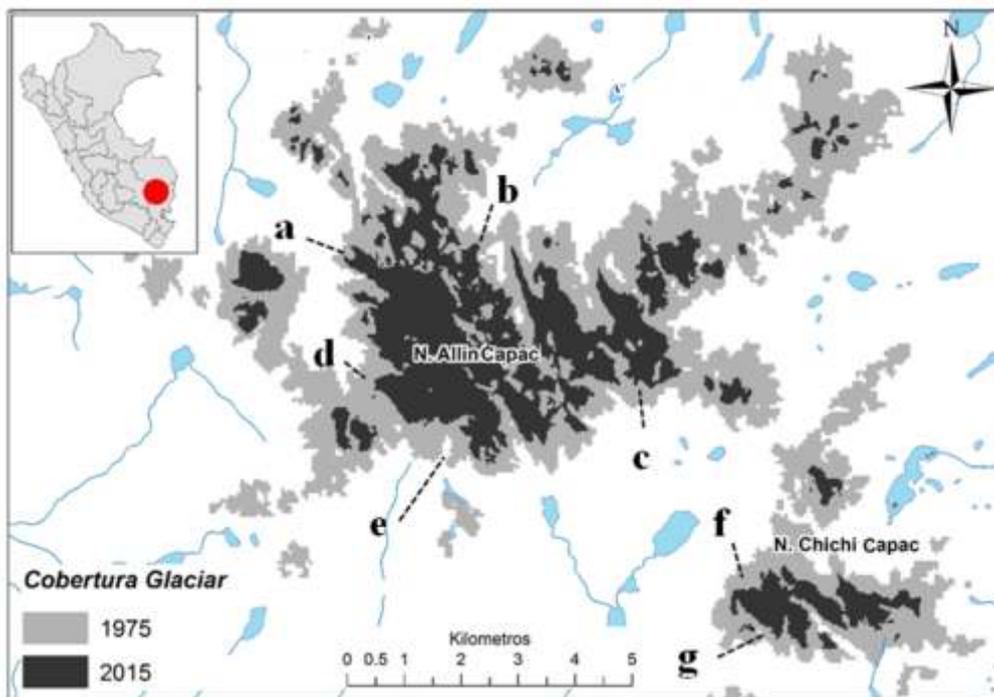


Figura 2.- Variación de la cobertura glaciar de los nevados Allin Capac y Chichi Capac

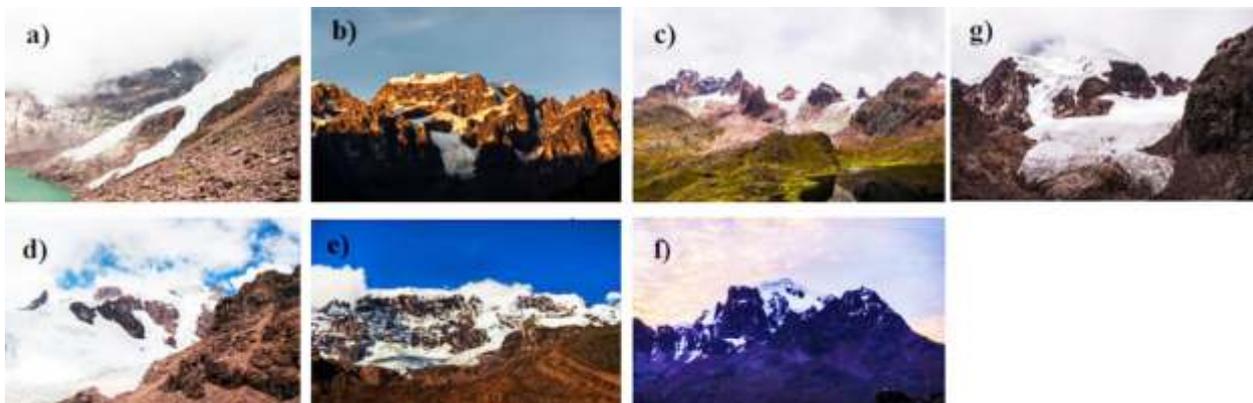


Figura 3.- Formas topográficas originadas: a) frente cascada del Allin Capac, b) vista posterior del Allin Capac, c) circo y cascada glaciar fragmentado del Allin Capac, d) circo glaciar del Allin Capac, e) vista frontal del Allin Capac, f) Horn Chichi Capac, g) Circo Chichi Capac

Tendencia en la temperatura y precipitación

Las pruebas estadísticas de tendencia Mann-Kendall, Spearman's Rho y regresión lineal, indican, que los datos de temperatura del aire durante los años con mayor presencia de eventos El Niño (periodo 1980 a 1999), muestran una tendencia estadísticamente significativa ($\alpha < 0.05$) (Figura 4b), durante este periodo, se observa una acelerada disminución de cobertura glaciar, lo cual estaría relacionado con el incremento de la temperatura del aire a finales siglo XX. La mayor aceleración del retroceso glaciar, fue en las últimas décadas del siglo XX (Kaser & Georges, 1999; Marzeion et al., 2014; Vuille et al., 2008).

Por otro lado, el incremento de la temperatura del aire, no es evidente durante las dos primeras décadas del siglo XXI (2000 a 2015), de donde las tres pruebas estadísticas indican que no existe tendencia significativa ($\alpha = 0.10$) y ello, concuerda con la menor presencia de eventos El Niño y por consiguiente una menor pérdida de área cubierta por glaciar (Figura 4a, 4b y 4d). El retroceso de los glaciares, es equilibrado con el menor incremento de la temperatura y es acelerado con el aumento de la temperatura del aire. Los resultados coinciden con estudios realizados en los andes de Perú (López-Moreno et al., 2014, 2017; Polk et al., 2017).

La Figura 4c, muestra la serie temporal de la precipitación total mensual para el periodo 1993-2015, de donde se deduce que existe una clara evidencia de incremento a partir del siglo XXI (2000 a 2015) y ello explicaría la menor disminución de los glaciares. El incremento de lluvias, se atribuye a una menor presencia de eventos El Niño durante este periodo. Los glaciares del Carabaya son una fuente importante de recurso hídrico, por ello es necesario plantear estrategias de adaptación, conservación y planificación de los nevados a fin de asegurar la disponibilidad del recurso hídrico en el futuro.

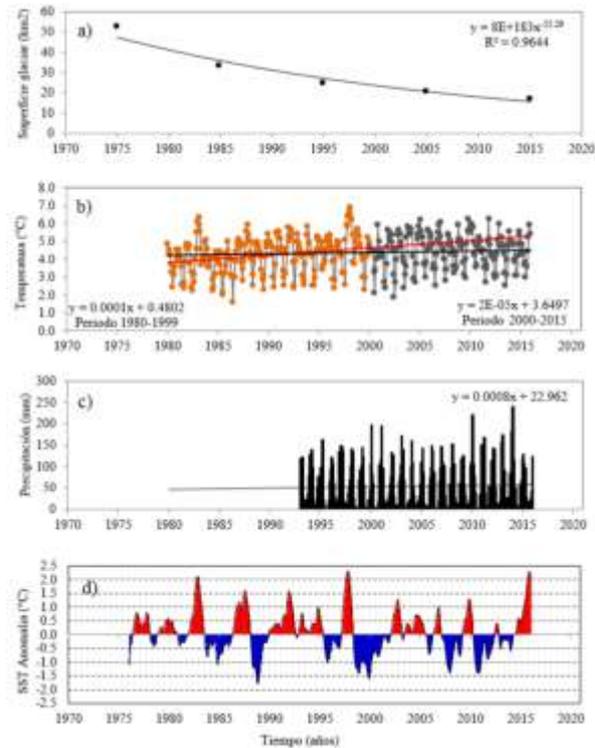


Figura 4.- a) Variación temporal de la superficie glaciar Allin Capac y Chichi Capac, b) Variación temporal de la temperatura media mensual MERRA-2 y c) Variación temporal de la precipitación total mensual y d) Índice oceánico de El Niño región 3.4 promedio de 3 meses, en azul anomalías negativas y en rojo anomalías positivas de la TSM (Para la interpretación de las referencias del color en esta leyenda de figura, el lector se refiere a la versión web de este artículo).

CONCLUSIONES

El análisis multi-temporal sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac de la cordillera del Carabaya, muestra una pérdida de 67% de área cubierta por glaciar en los últimos 40 años, la mayor superficie estimada es de 52.3 km² y corresponde al año de 1975, mientras que para el 2015, la superficie ha disminuido a 16.9 km². Se estima una disminución aproximada de 17% por década y una tasa promedio de 0.89 km²/año.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) por facilitar la información hidrometeorológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional del Agua. (2014). Inventario nacional de glaciares y lagunas. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares.pdf>
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., ... Gómez López, R. J. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1), 179206. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1>
- Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised landsat-5 tm radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 26742677. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>
- Chander, G., Markham, B., & Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* (Vol. 113). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 922. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Huang, B., Banzon, V. F., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, T. C., ... Zhang, H. M. (2015). Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, 28(3), 911930. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00006.1>
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(14), 93103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)
- Kaser, G., & Georges, C. (1999). On the Mass Balance of Low Latitude Glaciers with Particular Consideration of the Peruvian Cordillera Blanca. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 81(4), 643651. <https://doi.org/10.1111/1468-0459.00092>
- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., ... Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 111. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., ... Alejo-Cochachin, J. (2017). Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of The Total Environment*, 579, 272282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- Mark, B. G. (2008). Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications. *Global and Planetary Change*, 60(12), 101114. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.032>
- Marshall, S. (2014). Glacier retreat crosses a line. *Science*, 345(6199), 872872. <https://doi.org/10.1126/science.1258584>

- Marzeion, B., Jarosch, A. H., & Gregory, J. M. (2014). Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change. *Cryosphere*, 8(1), 5971. <https://doi.org/10.5194/tc-8-59-2014>
- Medina, G., & Mejía, A. (2014). Análisis multitemporal y multifractal de la deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecología Aplicada*, 13(1), 3542. Retrieved from http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162014000100004&script=sci_arttext
- Monsef, H. A.-E., & Smith, S. E. (2017). A new approach for estimating mangrove canopy cover using Landsat 8 imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 135, 183194. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.007>
- Oerlemans, J. (2005). Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records. *Science*, 308(5722), 675677. <https://doi.org/10.1126/science.1107046>
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Perus Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., ... Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 36243648. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>
- Shimamura, Y., Izumi, T., & Matsuyama, H. (2006). Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), 48674884. <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>
- Silverio, W., & Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987/1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342350. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Peterson, T. C., & Lawrimore, J. (2008). Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21(10), 22832296. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2100.1>
- 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, 7996. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>

