

Fluctuaciones en la extensión de los glaciares del nevado Cololo (14°50' L.S. – 69°10' L.W.) a partir de datos de TM/LANDSAT-5

Sanches, A. M.^{1,2}; Velho, L. F.^{2,3}; Simões, J. C.^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS. ana.sanches@ufrgs.br

² Centro Polar e Climático, UFRGS.

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.

► **Resumen** — En este trabajo se presentan las fluctuaciones superficiales de los glaciares del Nevado Cololo, Bolivia, desde 1975 hasta 2011, deducidas a través de un algoritmo que utiliza las informaciones espectrales de las imágenes del sensor TM/L5. Se determinaron, particularmente, las variaciones de las superficies de los glaciares para los años 1989, 1997, 2008 y 2011. Con la aplicación de dos índices, NDSI e NDWI, se elaboró un algoritmo para la delimitación de los glaciares y la determinación de sus variaciones. A partir de un mapa topográfico, se tomaron cotas para la obtención de un MDE, que fue interpolado mediante el método geoestadístico de kriging ordinario. La información obtenida del algoritmo y del MDE fue analizada en un SIG. En 2011 existían solamente 48 de los 122 glaciares identificados en el año 1975. Los glaciares pequeños (<0.1 km²), localizados a bajas altitudes, son los que más han variado. No existen en la región glaciares por debajo de 4626 m snm. En el año 2011, los glaciares cubrían ~25 km², un 42.02% menos que en 1975. Esta pérdida de hielo ocurrió en todas las laderas del nevado, sin embargo, los glaciares de las caras Este fueron los más afectados. Incluso el mayor glaciar del nevado, de ~5.85 km², situado en la cara Sudeste, perdió un 21.6% de su superficie total. La reducción en el espesor del hielo se evidencia por la división de algunos glaciares y la observación de rocas de basamento dentro de algunas lenguas glaciarias.

Palabras clave: Glaciares tropicales, Bolivia, cambio climático, índice normal de diferencia de nieve, índice normal de diferencia de agua.

► **Abstract** — This paper presents surface fluctuations of glaciers in the Nevado Cololo, Bolivia, from 1975 to 2011, determined using TM/Landsat-5 images. The glacier areas were determined for the years 1989, 1997, 2008 and 2011. The application of NDSI (Normalized Difference Snow Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) indexes were the basis for the development of an algorithm for glacier identification. Elevation data from a topographic map allowed obtaining a DEM using ordinary kriging. In 2011 only 48 of the 122 glaciers identified in 1975 remained. The small glaciers (<0.1 km²) with low maximum altitude have been the ones most affected by this loss and, currently, there are no ice masses below 4,626 meters ASL. Nevado Cololo glaciers covered ~25 km² in 2011, an area loss of 42.02% when compared to 1975. This loss occurred in all slopes, regardless of their orientation, but glaciers of the east faces were the ones most affected. Even the largest glacier, face towards SW, lost 21.6% of its total area. The glacier division and rock outcroppings in their internal parts suggest ice thinning. The intensification of the ablation process is probably the cause of glacier loss in this region.

Keywords: Tropical glaciers, Bolivia, climate change, Normalized Difference Snow Index, Normalized Difference Water Index.

INTRODUCCIÓN

El retroceso de los glaciares de montaña, especialmente en los Andes tropicales, es una de las señales ambientales inducidas por la

variabilidad climática, sobre todo en los últimos cuarenta años (IPCC, 2013; Rabatel *et al.*, 2013; Vuille, 2013). Estos cambios se evidencian a través de variaciones en la geometría del glaciar y en el desplazamiento de la línea de equilibrio hacia altitudes más elevadas. La posición de la línea de equili-

brio es un indicador del balance de masa porque separa las zonas de acumulación y ablación. También se pueden deducir los cambios por la presencia de lagunas proglaciarias y morenas frontales que evidencian el retroceso de los frentes, y por las informaciones geoquímicas en testigos de hielo (Rabatel *et al.*, 2008; Jomelli *et al.*, 2011; Thompson *et al.*, 2011; Stansell *et al.*, 2013).

En los Andes tropicales existen glaciares gracias a la presencia de altas montañas (> 5000 m snm). La Cordillera de los Andes influye en los patrones de la circulación atmosférica en el Hemisferio Sur, puesto que rompe los flujos de aire generando dos grandes anticiclones permanentes, uno en el Océano Pacífico y otro en el Atlántico (Cerveny, 1998). El pasaje de la Zona de Convergencia Intertropical involucra precipitaciones en estas montañas conducidas por los vientos alisios. La humedad tiene su origen en las aguas del Atlántico, y por la evapotranspiración de la selva amazónica (Kaser y Osmaston, 2006; Vuille *et al.*, 2008). Por ello, el período de acumulación de los glaciares tropicales ocurre en el verano (Kaser y Osmaston, 2006). Estos glaciares tienen una gran dependencia con los patrones verticales de calentamiento de la tropósfera, lo que determina la pérdida de volumen y la retracción de sus frentes hacia cotas más elevadas (Vuille *et al.*, 2008).

En la actualidad existen hielos tropicales en las montañas de África, Oceanía y América del Sur. En Sudamérica, casi todos los glaciares tropicales están en Perú y Bolivia, 70% y 20% respectivamente (Kaser y Osmaston, 2006). Por ello, conocer estos glaciares, su evolución y su dinámica es algo muy importante para la comprensión de cambios climáticos pasados y sus repercusiones ambientales y sociales en el desarrollo de los pueblos andinos (Ramírez *et al.*, 2001; Vuille, 2013).

En Bolivia, los glaciares tropicales denominados externos (*outer-tropical glaciers*) son los que están en la Cordillera Oriental, que funciona como divisoria de aguas entre el altiplano y la Amazonia. Este cinturón de mon-

tañas esta subdividido en las Cordilleras Apolobamba, de Muñecas, Real, Tres Cruces y Nevado Santa Vera Cruz, donde se encuentran algunas de las fuentes hídricas más lejanas del río Amazonas. Los glaciares más conocidos se ubican en la Cordillera Real (Soruco *et al.*, 2009a; Soruco *et al.*, 2009b) y Tres Cruces (Ribeiro *et al.*, 2005; Ribeiro, 2007).

En este trabajo, se han investigado las fluctuaciones de las superficies de los glaciares del Nevado Cololo (14° L.S.), entre los años 1975 y 2011, en la Cordillera Apolobamba. Estos cambios se han analizado de acuerdo con la orientación de la montaña y las variaciones de altitud de los frentes de los glaciares utilizando datos topográficos e imágenes satelitales (Figura 1).

METODOLOGÍA

Utilizando datos del sensor *Thematic Mapper* del satélite Landsat-5 (TM/L5) se ha desarrollado un algoritmo para el monitoreo de las fluctuaciones de las áreas de los glaciares del Nevado Cololo. Fueron obtenidas 17 imágenes desde el año 1989 hasta el 2011, órbita 002, punto 070. Los glaciares, sin embargo, fueron delimitados solamente en las imágenes correspondientes a las siguientes fechas 14/08/1989, 05/09/1997, 03/09/2008 y 27/08/2011. Para la georreferenciación de las imágenes TM/L5 se utilizaron como información de base una carta topográfica 1:70.000 y una imagen *High Resolution Camera* del *China Brazilian Earth Resources Satellite* (HRC/CBERS-2B), órbita 179-A, punto 117-1, del día 22/05/2008 cuya resolución espacial es de 2.7 m. Las imágenes fueron seleccionadas para el período seco (mayo a octubre) en los bancos de datos del *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* – INPE/Brasil. El mapa fue elaborado utilizando informaciones de fotografías aéreas de los años 1950, de imágenes orbitales del año 1975 y de puntos de control tomados en el año 1984 (Jordan, 1990). A partir del índice normalizado de diferencia de nieve (*Normalized Difference Snow Index* = NDSI) (Ecuación 1), se elaboró un algoritmo basado en los valores digitales para la deter-

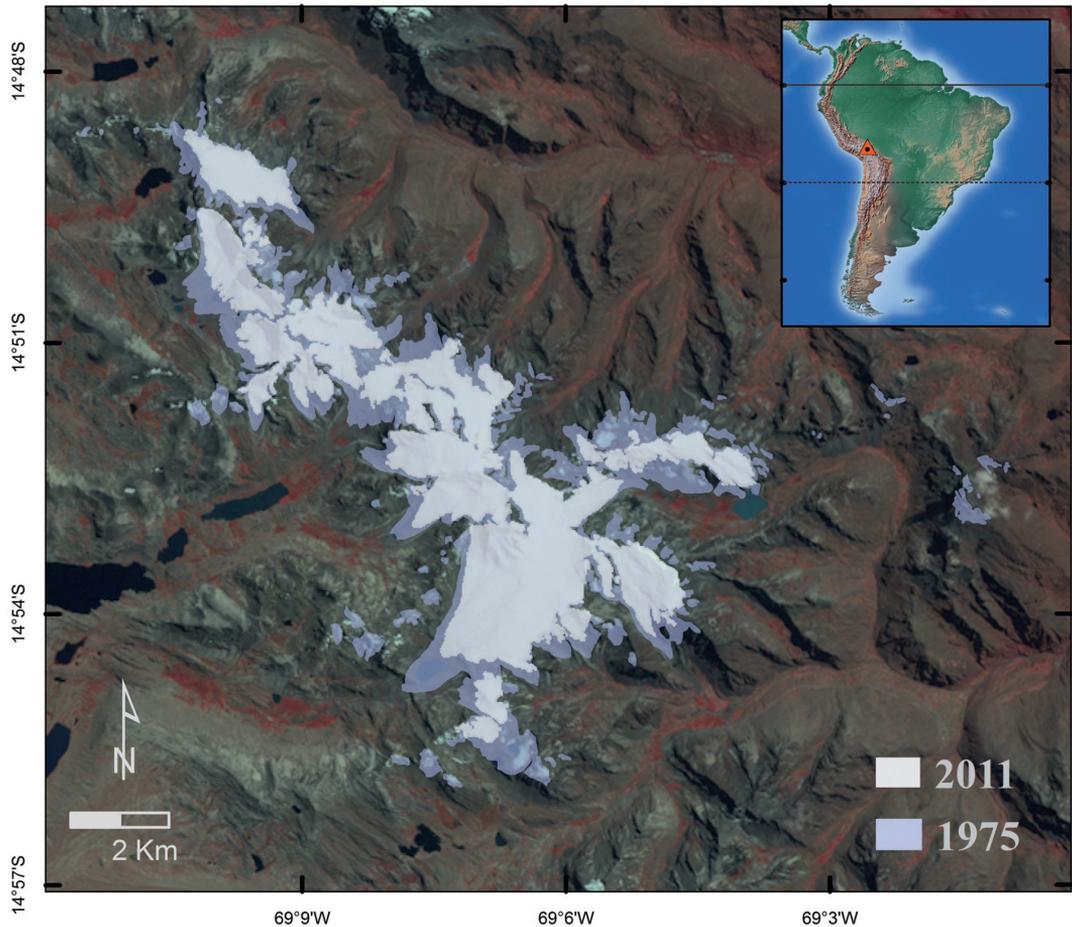


Figura 1. Ubicación del Nevado Cololo y las áreas cubiertas por glaciares en 1975 (gris) y 2011 (blanco).

minación de las superficies de los glaciares. El NDSI fue desarrollado para el mapeo de nieve utilizando la diferencia normalizada entre dos bandas espectrales, una en el visible y otra en el infrarrojo cercano (Hall y Riggs, 2010; Paul y Hendriks, 2010).

El índice NDSI, para el sensor TM, es la relación entre la diferencia entre las bandas 2 ($0.52-0.60 \mu\text{m}$) y 5 ($1.55-1.75 \mu\text{m}$) con respecto a la suma de ambas. En la banda 2, nieve y hielo son representados por píxeles con valores digitales cercanos al valor de 255, mientras que en la banda 5, que es la del infrarrojo, son más próximos a 0.

$$NDSI = \frac{(TM2 - TM5)}{(TM2 + TM5)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

De los valores de este índice se obtienen imágenes cuya información permite la delimitación de los glaciares. Aunque el NDSI sea una herramienta conocida por sus buenos resultados en el monitoreo de nieve y hielo (Hall y Riggs, 2010), ocurre que los cuerpos de agua son frecuentemente identificados como cobertura de hielo, generando errores en las imágenes resultantes.

Por esta razón, se utiliza también en este trabajo otro índice: índice normalizado de diferencia de agua (*Normalized Difference Water Index* = NDWI):

$$NDWI = \frac{(TM2 - TM4)}{(TM2 + TM4)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Este índice NDWI sirvió para que los cuerpos de agua no fuesen clasificados como hielo, ya que su respuesta espectral, especialmente si los lagos tienen sedimento, en los rangos de la banda 2 (0.52-0.60 μm), son próximos a los valores del mismo. Esto es muy común en lagos proglaciares. De esta manera, fue necesaria también la inclusión de la banda 4 (0.76-0.90 μm), pues en ella los rangos espectrales de los sedimentos tienen muy poca interferencia con los valores analizados para el hielo.

También se incluyó un umbral de la banda 5 para la evaluación del NDSI y del NDWI, ya que éste corresponde a la diferenciación de nubes, hielos y cuerpos de agua. La determinación de los umbrales mencionados se basó en la estadística de los píxeles que abarcan las áreas de interés y que corresponden a distintos glaciares, y zonas próximas a los mismos, en 17 imágenes del sensor TM/L5, entre los años 1989 y 2011.

Posteriormente, fueron elaborados polígonos en dichas áreas, de los cuales se tomó la estadística de los píxeles contenidos en las imágenes generadas por los índices NDSI y NDWI y el umbral de la banda 5. Los polígonos fueron hechos utilizando la información de la carta topográfica, de la imagen de alta resolución y de las diferentes bandas utilizadas con el sensor TM. Así, todos los píxeles que tenían valores mayores a 0.59, por las imágenes de los índices NDSI, y con valores mayores a 0.27, por las imágenes de los índices NDWI, fueron relacionados con superficies de hielo. Además, se utilizó un umbral de la banda 5, ya que los valores digitales mayores a 90 probablemente contenían nubes.

En la etapa final se eliminaron agrupamientos menores de 111 píxeles que significaban superficies muy pequeñas ($\sim 0.1 \text{ km}^2$) y para finalizar, los productos generados fueron convertidos del formato *raster* a formato vectorial.

También se han cuantificado los errores de los productos del algoritmo, ya que la información contenida en el contador digital es la media de las respuestas espectrales de los materiales insertados en el píxel, que in-

cluso están mezclados. Lógicamente, la obtención de informaciones geométricas de imágenes es una estimación de la verdadera dimensión del cuerpo investigado. No fue posible conocer los errores que se desprenden de correlacionar las cartas topográficas con imágenes orbitales. En el área que abarca los frentes de hielo se puede suponer que sus bordes están en algún punto en las extremidades o dentro del píxel (Williams *et al.*, 1997). El error lineal horizontal, definido por Hall *et al.* (2003), se refiere al error resultante de relaciones entre la resolución espacial de la imagen y del RMS. Los RMS para las imágenes fueron 0.77, para 1989, 0.32, para 1997, 0.38, para 2008 y, 0.39, para 2011.

$$\text{Error} = \sqrt{30^2 + 30^2} = 42,42 \text{ m} + \text{RMS} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Así, los errores lineales para los años analizados son: $\pm 65 \text{ m}$ para 1989, $\pm 52 \text{ m}$ para 1997, $\pm 54 \text{ m}$ para 2008, $\pm 54 \text{ m}$ para 2011.

Las incertidumbres en cuanto a los análisis de área (ecuación 4) fueron también basadas en Hall *et al.* (2003).

$$a = A \cdot (2d/x) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde a es el error, $A = x^2$, siendo x una medida lineal correspondiente al valor del píxel de la imagen y d es el error lineal. Los errores superficiales para los años de observación fueron: $\pm 0.0039 \text{ km}^2$ para 1989, $\pm 0.0031 \text{ km}^2$ para 1997, $\pm 0.0032 \text{ km}^2$ para 2008, $\pm 0.0032 \text{ km}^2$ para 2011. Los vectores resultantes fueron acoplados a un modelo digital de elevación (MDE) en un sistema de información geográfica. Este último resultó utilizando la interpolación de cotas de un mapa topográfico de acuerdo a Jordan (1990).

Por otro lado, se utilizó el método de «kriging ordinario», una técnica geoestadística de interpolación de datos para obtener un MDE optimizado, en donde se utilizaron los puntos de elevación del mapa mencionado. Los glaciares identificados en las imágenes satelitales fueron representados sobre el

MDE, utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Del SIG se obtuvo información sobre las fluctuaciones de los frentes de los glaciares del Nevado Cololo. Estas fluctuaciones se relacionaron con las orientaciones de las laderas y sus ángulos de pendiente. El MDE fue generado por la interpolación de 830 puntos de elevación del mapa utilizando los programas SGeMS (Remy *et al.*, 2012) y GSLIB (Deutsch y Schnetzler, 2009).

La geoestadística ofreció una serie de herramientas que permitieron describir fenómenos naturales haciendo hincapié en la continuidad espacial de sus atributos (Goovaerts, 1997; Isaaks y Srivastava, 1989). Estos atributos, como altitudes y orientaciones de cordones montañosos, presentan alta correlación espacial entre sí, debido a su origen, y pueden ser utilizados con la geoestadística a partir de puntos de control.

Las cotas o altitudes se insertaron en el programa SGeMS para obtener el resumen estadístico de los datos, la determinación de la continuidad espacial, los variogramas y la interpolación del kriging ordinario. Se definió la malla cuadrículada para la interpolación, de acuerdo con las características espaciales de las imágenes TM/L5 y también se determinaron los ejes de anisotropía necesarios para la evaluación y elección del modelo del variograma teórico. El modelo fue validado por correlación cruzada, para esto se utilizó la herramienta KT3D del GSLIB. El coeficiente de correlación presentado entre las cotas y sus respectivos homólogos fue 0.93 y se observó un error de ± 5.2 m. Este error debe acercarse siempre a cero para que el modelo no sea tendencioso. La verificación se realizó a través de la relación lineal entre los valores estimados y los resultados de la diferencia entre éstos y los valores de la muestra. El producto generado fue convertido en el formato raster utilizado el programa Erdas Imagine 9.2.

Finalmente, los datos generados por el algoritmo y el MDE fueron incorporados a un programa SIG Arcgis 10.1, de donde fueron tomadas informaciones de las áreas, orientaciones, declives y altitudes de los frentes glaciares.

RESULTADOS

A través de la metodología mencionada anteriormente fueron determinados en el Nevado Cololo los glaciares y sus áreas para los años 1975, 1989, 1997, 2008 y 2011. Así mismo, se determinaron las fluctuaciones observadas con respecto a la pendiente y a su orientación.

Durante el período de 1975-2011 hubo una pérdida glaciaria de 42.02%, es decir una reducción de 17.95 ± 0.0032 km² (Figura 1). En 14 años, desde 1975 a 1989, hubo una reducción total de 7.28 km². Entre 1989 y 1997, en ocho años de diferencia, menos de ~ 4.04 km² y en los 11 años siguientes (1997-2008), una pérdida de ~ 5.89 km². En el intervalo más corto, 2008-2011, la tendencia de retroceso de los frentes de los glaciares se mantuvo, con una pérdida de ~ 0.74 km² en sólo tres años. La pérdida superficial de 1.17% a⁻¹ es similar a la tendencia de las últimas décadas en otros glaciares tropicales de América del Sur y África (Racoviteanu *et al.*, 2008).

En el período analizado también se observó la desaparición y fragmentación de glaciares en la Cordillera de Apolobamba. En el año 2011 se reconocieron solamente 48 glaciares de los 122 identificados en 1975 por Jordan (1990) (Figura 2).

Los glaciares ubicados a menor altitud son los más afectados. La reducción en el número de glaciares y su fragmentación hacen suponer paralelamente pérdida de espesor de los mismos y la elevación de la línea de equilibrio entre la zona de acumulación y la zona de ablación, de esta forma algunos no tendrían más zona de acumulación.

La reducción en el número de glaciares ocurrió en todas las laderas aunque fue más significativa en la orientación Este. Entre los años 1975 y 2011 las caras Este tuvieron una pérdida de ~ 11.04 km² y 48 glaciares desaparecieron. Por otro lado, los glaciares en las caras Oeste, se redujeron ~ 6.91 km² con una pérdida de 26 glaciares. La cara Suroeste del Cerro Cololo presentaba hasta el año 2011, una mayor cobertura de hielo debido a la presencia del glaciar Cololo, con 5.85

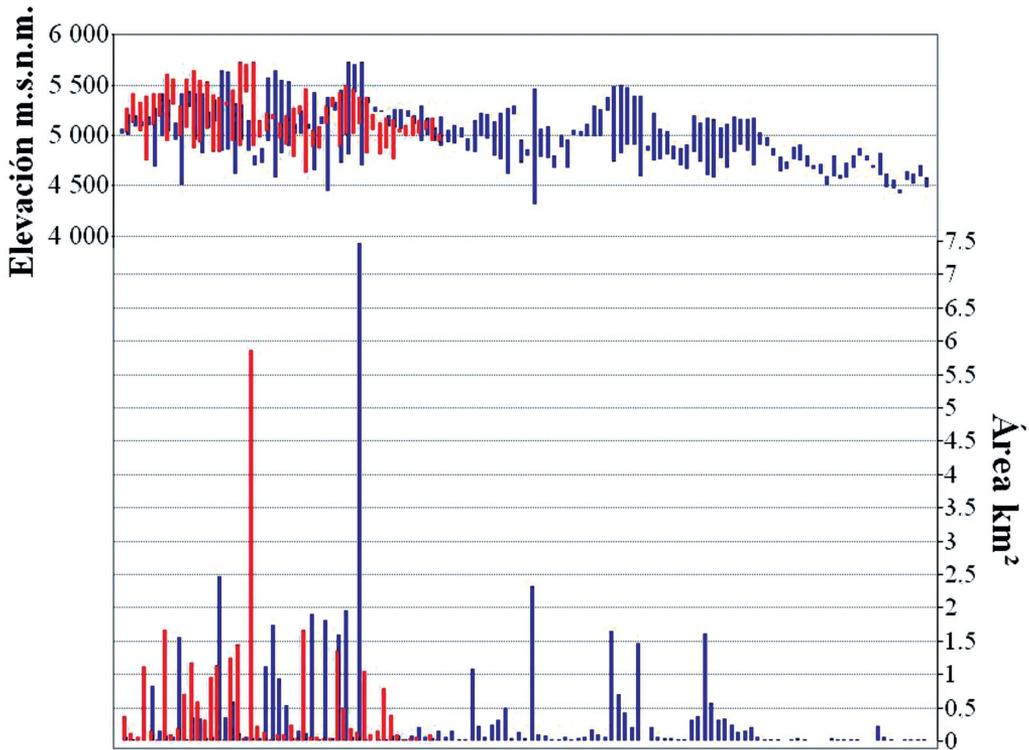


Figura 2. Variaciones en las extensiones longitudinales y de las áreas de los glaciares del Nevado Cololo en los años 1975 (azul) y 2011 (rojo).

$\pm 0,0032 \text{ km}^2$. Además de estar éste en la cara menos expuesta a la radiación solar, ocurre que el albedo de su gran superficie ayuda a mantener las bajas temperaturas.

En 1975 las lenguas glaciarias alcanzaban la altura mínima de 4317 m snm, pero en el año 2011 ascendieron 309 m. En el Nevado Cololo no hay glaciares en niveles inferiores a 4626 m snm. En 1975 los frentes de los glaciares, al Este y al Oeste, llegaron a la altura mínima de 4831 y 4837 m snm, respectivamente. Después de la primera década de este siglo, las cotas de los frentes en la cara Este superaron los 5000 m de altitud y en el Oeste se elevaron 97 m.

Con respecto a su frente, el glaciar Cololo se ha retirado $292.7 \pm 65 \text{ m}$ en el período 1975-1989; $105 \pm 52 \text{ m}$, de 1989 hasta 1997; $549 \pm 54 \text{ m}$, en 1997-2008 y más de $133.54 \pm 54 \text{ m}$, hasta 2011. Como resultado de esta rápida pérdida entre 1997 y 2008, se formó un lago proglaciario.

DISCUSIÓN

Todos los glaciares tropicales presentan pérdidas de área y de volumen de manera acelerada desde los años 1970 (IPCC, 2013). En el Nevado Cololo fue posible observar este comportamiento general a través de la variación de la superficie glaciaria. En el 2011, de los 48 glaciares que quedaron inventariados en este trabajo, 17 se ubicaban por encima de los 5400 m snm. Al igual que en otros cordones montañosos de los Andes tropicales, los glaciares pequeños, cuyas zonas de acumulación estaban ubicadas a una altura por debajo de los 5400 m, fueron los más afectados.

Rabatel *et al.* (2013) analizaron series de tiempo de balance de masa de los glaciares tropicales Yanamarey (Cordillera Blanca, Perú) y Zongo (Cordillera Real, Bolivia) entre los años 1971 y 2009 y fijaron a 5400 m snm la altura de la línea de equilibrio en

años de balance de masa negativo. Coincidiendo con estos autores, se observa que el 64% de los glaciares del Nevado Cololo ya no tienen zona de acumulación y que la altura mencionada es delimitante. La reducción de la cobertura englazada y del número de glaciares del Nevado Cololo seguirían la misma tendencia que otros glaciares de los Andes tropicales, es decir de retracción hasta alturas más elevadas, proceso que pudo haber comenzado después de la Pequeña Edad del Hielo, pero que se ha acelerado a finales del siglo XX como piensan Vuille *et al.* (2008).

Algunos expertos creen que las variaciones en los patrones de precipitación no explican la reducción de los glaciares tropicales (Rabatel *et al.*, 2013; Salzmann *et al.*, 2013), sino que las causas más probables están asociadas a la elevación de la temperatura atmosférica y la mayor frecuencia y variabilidad espacio-temporal del evento «El Niño» (Vuille, 2013). Lo que hemos observado es que los glaciares de las caras Este son los que más se han retraído, lo que puede significar que este fenómeno es indicador del balance de energía negativo.

Las precipitaciones actuales no están compensando las pérdidas de hielo por fusión (Vuille *et al.*, 2013). Por otro lado, se calcula un aumento de la temperatura de 0,1° C por década en los Andes Tropicales y en los últimos 70 años (Rabatel *et al.*, 2013), este aumento parece estar inducido el efecto invernadero (IPCC, 2013).

Dado que la Cordillera Apolobamba es de difícil acceso, el algoritmo utilizado en este trabajo permitió identificar los glaciares del Nevado Cololo utilizando imágenes orbitales TM/L5. Posteriormente las informaciones de las áreas para distintas fechas fueron sobrepuestas con los datos de un MDE para después obtener parámetros morfométricos en un SIG de características simples y utilizando software libres. En el futuro, para validar mejor los resultados, se deberán contraponer estos resultados obtenidos en el gabinete con la información del terreno.

La ventaja de la metodología de kriging ordinario utilizada es que incluye la orienta-

ción de los puntos de muestreo para hacer la estimación y su implementación con el SGE-MS y el GSLIB, y de esta forma es posible manejar el variograma, lo cual no es común en los SIGs comerciales. Es probable que en el futuro, con la información obtenida, se pueda usar un kriging multivariado para hacer más precisas las cartas topográficas.

CONCLUSIÓN

Como lamentablemente no existen datos climáticos de la Cordillera Apolobamba, como tampoco un monitoreo de balance de masa de sus glaciares, este trabajo buscó hacer un aporte al conocimiento de su sistema criosférico a partir de los cambios de superficie de los glaciares del Nevado Cololo.

El Nevado Cololo tuvo una pérdida de glaciares muy significativa y tiene hoy menos de la mitad del área englazada que tenía en el año 1975. También se ha observado que los glaciares están más elevados y que solo 17 cuerpos tienen su zona de acumulación por arriba de la línea de equilibrio que estaría hoy a 5400 m snm aproximadamente. Aunque el MDE presentado en este trabajo está basado en información topográfica no actualizada, se puede afirmar que estos cambios han ocurrido realmente y que todos los glaciares muestran sus frentes en cotas más elevadas desde el año 1975. Lo que ocurre en este Nevado simboliza la pérdida de los hielos de toda la Cordillera Apolobamba.

La implementación del algoritmo que usa el trabajo sirvió para delimitar los glaciares durante tres décadas. La información obtenida de los satélites Landsat, especialmente del número 5 de la serie, permitió ver la evolución de los glaciares de la Cordillera Apolobamba desde los años 1970 hasta la fecha, sin embargo, la resolución espacial no fue óptima para los glaciares pequeños.

Los resultados obtenidos por teledetección son muy valiosos para la implementación de medidas de adaptación de las poblaciones andinas puesto que informaciones de balance de masa y de variables climáticas son escasas en la región tropical. La ampliación de los conocimientos criosféricos de esta región es

imprescindible para que se conozca mejor lo que está ocurriendo climáticamente hoy en los ecosistemas altoandinos tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pudo ser realizado gracias al apoyo del *Programa de Pós-Graduação em Geociências* de la *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* y del *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)*, mediante el proyecto n° 404002/2013-7. Agradecemos la corrección y las sugerencias hechas para el texto en castellano de Victoria Alonso, Estefanía Bottegal y Dario Trombotto.

BIBLIOGRAFÍA

- Cervený, R.S. 1998. Present climates of South America. En: Hobbs, J.; Lindsay, J.; Bridgman (Ed.), *Climates of the southern continents: present, past and future*: 05-62. Wiley, Chichester.
- Deutsch, C.; Schnetzler, M. 2009. Geostatistical Software Library [webpage]. [<http://www.gslib.com/>, consulta: 25 marzo 2014].
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York, 483 pp.
- Hall, D.K.; Riggs, G.A. 2010. Normalized-Difference Snow Index (NDSI). Nasa Technical Reports Server [webpage]. [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100031195_2010033115.pdf, consulta en 29 febrero de 2012].
- Hall, D. K.; Bayr, Klaus J.; Schöner, W.; Bindschadler, R.A.; Chien, J. Y. L. 2003. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment* 86: 568-577.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. En: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.M.B.; Allen, S., K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (Ed.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 33 pp.
- Isaaks, E.H.; Srivastava, R. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 pp.
- Jomelli, V.; Khodri, M.; Favier, V.; Brunstein, D.; Ledru, M.-R.; Wagnon, P.; Blard, P.-H.; Sicart, J.-E.; Braucher, R.; Grancher, D.; Bournès, D. L.; Braconnot, P.; Vuille, M. 2011. Irregular tropical glacier retreat over the Holocene epoch driven by progressive warming. *Nature Letter Research* 474: 196-199.
- Jordan, E. 1990. Verbreitung Von Gletschern und neuzzeitlichen Möranen in der Cordillera Apolobamba/Cololo Region (Ostkordillere). Karte 5. En: Jordan, E. *Die Gletscher der boliviaschen Anden*. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Franz Steiner, Stuttgart, 23 kartes.
- Kaser, G.; Osmaston, H. 2006. *Tropical glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge, 207 pp.
- Paul, F.; Hendriks, J. 2010. Detection and visualization of glacier area changes. En: Pellika, P.; Rees, W.G. (Eds.), *Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers*: 231-243. CRC Press, Londres.
- Rabatel, A.; Francou, B.; Jomelli, V.; Naveau, P.; 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.
- Rabatel, A.; Francou, B.; Soruco, A.; Gomez, J.; Cáceres, B.; Ceballos, J. L.; Basantes, R.; Vuille, M.; Sicart, J.-E.; Huggel, C.; Scheel, M.; Lejeune, Y.; Arnaud, Y.; Collet, M.; Condom, T.; Consoli, G.; Favier, V.; Jomelli, V.; Galarraga, R.; Ginot, P.; Maisincho, L.; Mendoza, J.; Ménégou, M.; Ramirez, E.; Ribstein, P.; Suarez, W.; Villacis, M.; Wagnon, P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7: 81-102.
- Racoviteanu, A.E.; Arnaud, Y.; Williams, M.W.; Ordoñez, J. 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology* 54 (186): 499-510.
- Ramirez, E.; Francou, B.; Ribstein, P.; Decloîtres, M.; Guérin, R.; Mendoza, J.; Gallaire, R.; Pouyaud, B.; Jordan, E. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glacier Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology* 47 (157): 187-194.
- Remy, N.; Boucher, A.; Wu, J. 2012. SGeMS – Stanford Geostatistical Modeling Software [webpage]. [<http://sgems.sourceforge.net/?q=node/20>, consulta: 25 noviembre 2014].
- Ribeiro, R.R. 2007. Determinação das variações das geleiras da Cordilheira Tres Cruces (Bolivia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos. Tesis de Maestría del Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 106 p. Porto Alegre.
- Ribeiro, R.R.; Simões, J.C.; Bremer, U.F. 2005. Application of remote sensing in the estimate of the retraction of the Bolivian glaciers. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Acta 2005: 669-671, Goiânia.

- Salzmann, N.; Huggel, C.; Rohrer, M.; Silverio, W.; Mark, B.G.; Burns, P.; Portocarrero, C. 2013. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, Southern Peruvian Andes. *The Cryosphere* 7: 103-118.
- Schauwecker, S.; Rohrer, M.; Acuña, D.; Cochachin, A.; Dávila, L.; Frey, H.; Giráldez, C.; Gómez, J.; Huggel, C.; Jacques-Coper, M.; Loarte, E.; Salzmann, N.; Vuille. 2014. Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change* 119: 85-97.
- Soruco, A.; Vicent, C.; Francou, B.; Gonzalez, J. F. 2009a. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters* 36 (L03502): 1-6.
- Soruco, A.; Vicent, C.; Francou, B.; Ribstein, P.; Berger, T.; Sicart, J.E.; Wagnon, P.; Arnaud, Y.; Favier, V.; Lejeune, Y. 2009b. Mass balance of Glacier Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology* 50: 1-8.
- Stansell, N. D.; Rodbell, D. T.; Abbott, M. B.; Mark, B. G. 2013. Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western Cordillera of Peru. *Quaternary Science Reviews* 70: 1-14.
- Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Davis, M. E.; Brecher, H. H. 2011. Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology* 52 (59): 23-34.
- Vuille, M. 2013. El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales. IDB Technical Note 517. Banco Interamericano de Desarrollo, 29 pp.
- 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.
- Williams, R. S.; Hall, D. K.; Sigurdsson, O.; Chien, J. Y. L. 1997. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-92. *Annals of Glaciology* 24: 72-80.