

Metodología de correlación de imágenes satelitales para estimar velocidades de flujo del hielo glaciar en la Cordillera Blanca

The methodology of correlation of satellite images to estimate the velocity fluxes of glacial ice in the Cordillera Blanca

Juvenal Tordocillo Puchuc ¹

Resumen

En el presente estudio se ha implementado y aplicado una metodología de correlación de imágenes satelitales para identificar patrones dinámicos de velocidad de flujo de hielo glaciar en nevados de la Cordillera Blanca del Perú. Se ha utilizado imágenes del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a bordo del satélite TERRA de Nivel L1A del 2002. Se calibró geométricamente la imagen geo-referenciada (imagen base) mediante el proceso de orto-rectificación con un modelo de elevación digital (DEM) que fue generada a partir de las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La técnica de correlación permitió el uso de la imagen geo-referenciada y la imagen sin geo-referenciar (imagen esclava). Todo el proceso se llevó a cabo mediante el paquete de software COSI-Corr (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation), diseñado para correlacionar imágenes de distintas fechas para encontrar cambios de desplazamiento de glaciares. El análisis de correlación generó vectores de desplazamiento y conociendo el intervalo temporal de las imágenes se obtuvo la velocidad del flujo glaciar de dos grupos de nevados de la Cordillera Blanca. Se obtuvieron velocidades de flujo de hielo glaciar a lo largo de transectos en los nevados de Qupap, Palcaraju y Tocllaraju, del orden de 0.5 m d⁻¹ con mayor velocidad en las partes bajas de las lenguas glaciares.

Palabras clave: COSI-Corr, correlación de imágenes, imágenes ASTER, dinámica glaciar, velocidad de hielo glaciar.

Abstract

In the present study, a satellite image correlation methodology has been implemented and applied to identify dynamic patterns of glacier ice flow velocity in snow-capped mountains of the Cordillera Blanca of Peru. Images of the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensor were used on board the TERRA satellite of Level L1A of 2002. The geo-referenced image (base image) was geometrically calibrated by means of the ortho-rectification process with a digital elevation model (DEM) that was generated from the level curves of the National Geographic Institute (IGN). The correlation technique allowed the use of the geo-referenced image and the image without geo-referencing (slave image). The entire process was carried out using the COSI-Corr software package (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation), designed to correlate images of different dates to find changes in glacier displacement. The correlation analysis generated displacement vectors and, knowing the time interval of the images, we obtained the glacial flow velocity of two groups of snow peaks of the Cordillera Blanca. Flow velocities of glacial ice were obtained along transects in the snow-covered of Qupap, Palcaraju and Tocllaraju, of the order of 0.5 m d⁻¹ with greater speed in the lower parts of the glacier tongue.

Keywords: COSI-Corr; correlation of images; images ASTER; glacial dynamics; glacier ice velocity.

¹Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Av. Juan Pablo II 306-308, Callao, Perú.

INTRODUCCIÓN

Estudiar las características cuantificables de los glaciares es de vital importancia y es un indicador de los cambios climáticos globales y locales. En los últimos años el cambio climático continúa causando diversos cambios físicos en la tierra siendo afectado los glaciares tropicales con mayor celeridad (Scherler et al., 2008). El calentamiento global es la causa de la reducción de las masas glaciares y esto tiene importantes consecuencias para la hidrología en general y poblaciones que requieren de gran demanda del líquido vital en la agricultura, la hidroenergía (Scherler et al., 2008; IPCC, 2007a).

Los Andes peruanos contienen el 71% de los glaciares tropicales de Sudamérica, los cuales están distribuidos en 19 cordilleras nevadas divididos en 3 sectores: Norte, Centro y Sur. La Cordillera Blanca es la cordillera montañosa cubierta de hielo tropical más extensa del mundo y tiene la mayor concentración de hielo en el Perú. Es parte de la Cordillera Occidental en dirección noroeste con unos 200 km entre latitud 8° 08' y 9° 58' S y longitud 77° 00' y 77° 52' O (Figura 1). Se hallan por encima de los 5,000 y 5500 msnm con lenguas glaciares que descienden a veces hasta por debajo de la línea de nieve (Ames, 1989). Según el inventario de glaciares del Perú, iniciado por INGEMMET en 1978 y concluido por Hidrandina S.A. en 1989, se contabilizó 3,004 glaciares agrupados en dieciocho cordilleras, con una cobertura glaciar de 2,041.85 km² con espesores que varían entre 13.90 m a 35.24 m, estimándose un volumen de 56,151 km³ de recurso hídrico congelado, siendo el de mayor extensión La Cordillera Blanca con 723.37 km² para 1970 (Ames, 1989) y para el año 2003 la superficie glaciar es 527.62 km², según ANA A-UGRH (2014) con una disminución del 27% en 33 años.

La cuantificación exitosa de los cambios hidrológicos y glaciológicos relacionados con el clima y su impacto en la sociedad exige retos, por lo que es necesario observar tanto a escala local y global los cambios de los glaciares para entender

sus características físicas. Por su ubicación los glaciares de la Cordillera Blanca se ubican en áreas de difícil acceso para mediciones in situ, especialmente en altitudes superiores a los 4000 msnm.

La teledetección juega un rol importante y ofrece la posibilidad de cuantificar la velocidad del flujo glaciar. Es factible que la velocidad del glaciar se cuantifique directamente desde un glaciar con datos in situ con alta precisión, pero la desventaja es que sólo es medible en partes accesibles de un glaciar, en tales condiciones las nuevas tecnologías como la teledetección con imágenes ópticas y radares permite cuantificar tanto cambios espaciales y temporales de las masas glaciares (Durán-Alarcón et al., 2015; Racoviteanu et al., 2008; Wigmore y Mark, 2017). La World Glacier Monitoring Service (WGMS) y Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) son iniciativas mundiales para el seguimiento de los inventarios glaciares en todo el mundo complementadas a través de interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) que ha permitido caracterizar una amplia cobertura espacial de glaciares y validado con datos de campo que permitió el uso creciente de esta técnica satelital.

El uso de imágenes para estimar desplazamientos se inicia a finales de los años 80 del siglo XX, para determinar desplazamientos en glaciares antárticos utilizando imágenes del sensor TM (Thematic Mapper) a bordo del satélite LANDSAT. Tanto los manuales y técnicas de seguimiento permitieron reconocer elementos desplazados entre imágenes (Kääb et al., 2002).

A principios de los años 90 toma mayor importancia el uso de imágenes cuando se desarrollaron los primeros sistemas de cálculo automático, que se denominó imageodesy y se basó en varios niveles de interpolación y del cálculo del índice de correlación lineal. Esta técnica se aplicó al estudio de los desplazamientos debido al terremoto de Loma Prieta y a la dinámica de campos de dunas en EE.UU. usando imágenes del satélite Francés SPOT (Heid, 2011).

Posteriormente otras técnicas más avanzadas desarrollada por la National Snow and Ice Data Center (NSIDC), llamada IMCORR (Image Correlation) se aplicó el cálculo de correlaciones cruzadas para el estudio de la dinámica de glaciares y a partir de los años 90 (1996-1999) se adaptaron estas técnicas para las imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) con enfoque a estudios de glaciares (Heid, 2011).

En el 2007 se implementó un paquete informático de Software desarrollado por el "California Institute of Technology Tectonics Observatory" (CALTECH) llamada Co-Registration of Optically Sensed Image and Correlation (COSI-Corr), diseñado en un principio para la detección de deformaciones cosísmica por Leprince et al. (2007). Esta aplicación fue diseñada en el lenguaje IDL e incorporada a la plataforma ENVI como una extensión. En los últimos 10 años se utilizaron para estudiar la dinámica glaciaria de desplazamiento y velocidad (Leprince, 2008; Yépez et al., 2012; Taylor y Leprince, 2008).

El sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a bordo del vehículo espacial TERRA, fue construido por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y obtiene imágenes de alta resolución espacial (de 15 a 90 metros de pixel) de la tierra en 14 bandas (longitudes de onda diferente) del espectro electromagnético que comprende tres subsistemas ópticos separados: el visible y el infrarrojo cercano (VNIR) con 3 bandas de 15 m y una oblicua de 27.6° con respecto al sensor vertical; el radiómetro infrarrojo de onda corta (SWIR) con 6 bandas de 30 m; y el infrarrojo térmico (TIR) con 5 bandas de 90 m (Abrams et al., 2015).

El satélite TERRA tiene un ciclo de repetición de 16 días, un promedio de ciclo del 8% y una cobertura de 60 km. Las imágenes ASTER

pueden obtener un par estereoscópico cada 44 días aproximadamente (Abrams et al., 2015). Sin embargo, en casos urgentes, como desastres naturales, el periodo de repetición puede reducirse alrededor de 2 días, gracias a los $\pm 8.5^\circ$ de adquisición en paso cruzado del sensor, con una capacidad adicional de una vista a través del paso de $\pm 24^\circ$ solo en las bandas del VNIR (Abrams et al., 2015). Actualmente las imágenes ASTER, se encuentran disponible sin costo. A partir del 01 de abril de 2016 en el centro LPDAAC de la NASA distribuye imágenes ASTER Nivel (AST_L1T).

La correlación digital compara la información digital de dos imágenes (ventana patrón y área de búsqueda) de forma sucesiva de acuerdo con determinados grupos de puntos. Debido a que cada método de computación en correlación digital tiene sus imperfecciones, se utilizan de forma simultánea dos o más métodos con el propósito de comparar resultados y reducir errores en la definición de los puntos homólogos (Leprince, 2008).

El presente estudio tiene como objetivo implementar y aplicar la metodología COSI-Corr para identificar patrones dinámicos de velocidad de flujo de hielo glaciario para glaciares de la Cordillera Blanca en Perú utilizando imágenes del sensor ASTER a bordo del satélite TERRA. La técnica de correlación realiza estimaciones del desplazamiento de un punto de una imagen respecto a otra imagen de referencia. Se delimita el entorno del píxel bajo estudio por medio de una ventana rectangular, y a partir de un conocimiento aproximado del margen máximo de desplazamiento se delimita la región de búsqueda del píxel desplazado con la finalidad de identificar la nueva posición en la imagen de referencia con una ventana de la misma dimensión centrada en cada píxel de la región de búsqueda. La correlación tendrá un valor máximo en su nueva posición, obteniendo finalmente resultados de desplazamiento y para posteriormente encontrar la estimación de

velocidades del flujo de hielo superficial en el glaciar (Yépez et al., 2012; Taylor y Leprince, 2008).

Materiale y método

Área de estudio

El área de estudio corresponde a las lenguas glaciares de la región Ancash, Perú que abarca los siguientes dos grupos de nevados (Figura 1): i) el grupo de nevados Chiqllarahu, Hualcán y Copa (localizados entre las provincias de Carhuaz y Asunción) y las lagunas de Llanganuco, 69, 513 y auquiscocha, , ii) el grupo de nevados Palcaraju (ubicado en 9° 22' 19" S y 77° 20' 24" O), Tocllaraju (ubicado en 9° 21' 23" S y 77° 22' 55" O), Qupap (ubicado en 9° 17' 40" S y 77° 19' 54" O), Chinchey y Tullparaju (ubicados entre la provincia de Huaraz y Huari). Estos nevados forman parte del Parque Nacional Huascarán que, en 1977, la UNESCO lo reconoció como la Reserva de Biosfera y en 1985, lo declara Patrimonio Natural de la Humanidad.

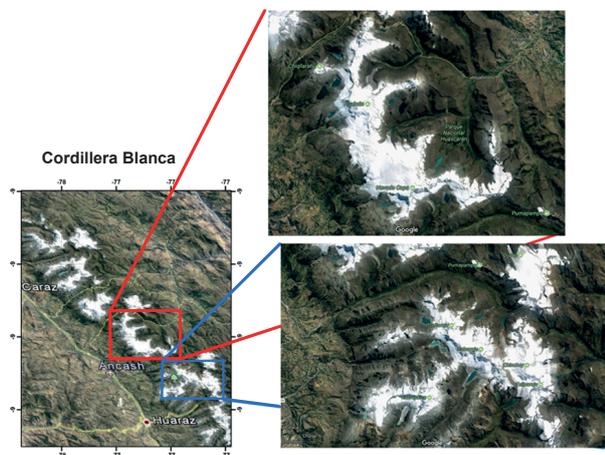


Figura 1. Dos grupos de nevados comprendidos en el estudio (enmarcados con rectángulos de color rojo y azul) de la Cordillera Blanca y glaciares más cercanos (ubicados en la Región Ancash, Perú).

Métodos y técnicas

Para la aplicación de la metodología se utilizó dos imágenes ASTER, que fueron adquiridas del servidor Earth data de la NASA. Las imágenes

consideradas tuvieron baja nubosidad verificándose la falta de precipitación durante la adquisición de la imagen y evitando la presencia de nieve temporal (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de imágenes ASTER adquirida durante la estación seca (mayo a setiembre).

Datos imagen	Fecha	Acimut solar	Elevación solar	Hora (UTM)
ASTER_L1A	17/06/2002	35.12906	50.08400	15:30:48
ASTER_L1A	04/08/2002	42.97859	53.79782	15:35:03

Así mismo, se adquirió las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN), a través del portal del MINEDU (2017), de cobertura espacial tipo shape (*.shp), obteniéndose los archivos de descarga 19h, 19i, 20h, 20i. Estos archivos han sido unidos mediante el software ArcGis 10.4, para luego transformarlos en archivo tipo (*.evf) para la posterior generación de un modelo de elevación digital (Digital Elevation Model, DEM), de 30 m de resolución espacial que cubre completamente los nevados en estudio.

El Software COSI-Corr del California Institute of Technology CALTECH (2017) fue diseñado en el lenguaje IDL e incorporado a la plataforma ENVI como una extensión. El diagrama de flujo de la Figura 2 muestra los pasos del proceso que fue implementado en COSI-Corr.

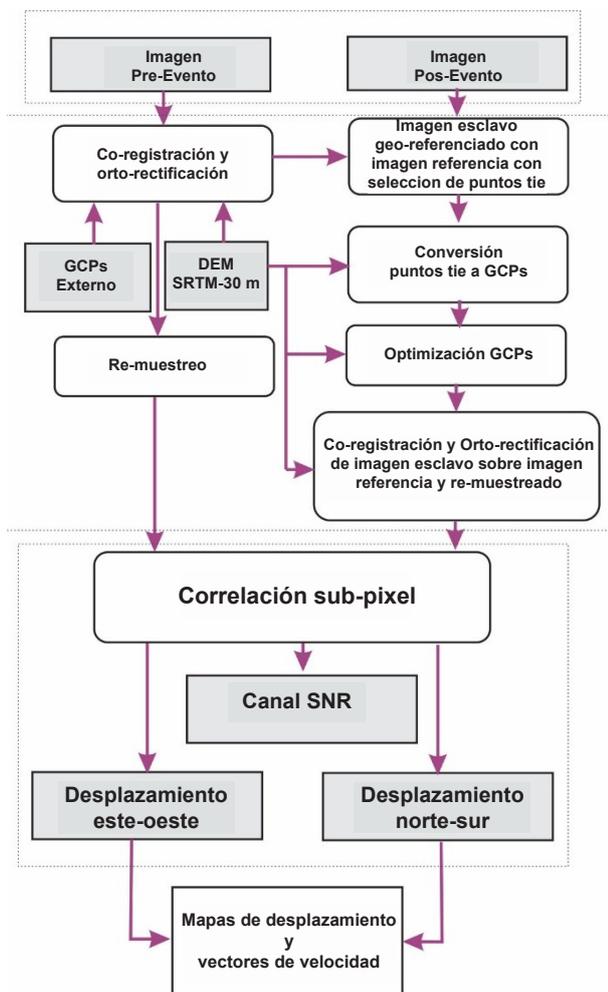


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología para correlación de imágenes mediante COSI-Corr.

En el software COSI-Corr, se tomó una imagen ASTER y la elección de la banda VNIR-3N, según sugiere Leprince (2008), la imagen del 17 de junio del 2002 es la imagen base y la del 04 de agosto del 2002 es la imagen esclava (Tabla 1).

La descripción detallada del procedimiento presentado en el diagrama de flujo de la Figura 2 es como sigue:

- Imagen pre-evento y post-evento: Mediante el software ENVI, se abrió la imagen ASTER que corresponde a la banda VNIR-3N, del 17 de junio del 2002. Esta imagen es de 4100 x 4200 píxeles, con 15 m de resolución espacial; es orto-rectificada mediante el DEM de 30 m de resolución espacial, con datum WGS84 y de

proyección vertical EGM96, llamado en adelante imagen base (orto-rectificada).

La imagen ASTER que corresponde a la banda VNIR-3N, del 04 de agosto del 2002 es la imagen esclava sin geo-referenciar (Leprince, 2008; Leprince et al., 2007). En este paso se creó los archivos auxiliares, una reorganización de datos de una imagen de satélite en un formato de archivo común que será utilizado posteriormente en COSI-Corr, y contiene las posiciones, altitudes y direcciones de observación del satélite, datos de adquisición de la imagen, el número de líneas y co-lumnas, resolución de suelo nominal, acimut solar y elevación.

- Corregistración y orto-rectificación: Consistió en seleccionar los puntos de control (GCPs); está separada en dos procesos; el primero es una recopilación de puntos de “empate” que consiste en el emparejamiento de puntos similares entre dos imágenes, asociar un punto entre una imagen base y una imagen no geo-referenciada. El resultado es un archivo en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) que contiene los valores en pixel de X, tanto de la imagen orto-rectificada como de la imagen esclava. El segundo proceso para obtener los puntos de control de tierra fue una conversión del archivo anterior anexando un encabezado, así como las coordenadas de latitud, longitud, altitud, valor en pixel de X, valor en pixel de Y, todo con respecto a la imagen base (orto-rectificada). El proceso de orto-rectificación es de dos pasos: una construcción de matrices de mapeo entre la imagen bruta y orto-rectificada y un re-muestreo que consiste en una reconstrucción de la imagen con las matrices anteriormente creadas. Por lo general, estos dos pasos se procesan juntos uno después del otro (Leprince, 2008; Leprince et al, 2007).

- Correlación subpixel: La correlación que emplea COSI-Corr, se basa en un proceso que estima el plano de la fase en el dominio de Fourier. Este método se basa en el teorema del cambio de Fourier, tal que el movimiento relativo entre un par de imágenes con características

similares se recupera de la diferencia de fase de su transformada de Fourier.

Es decir, sean dos imágenes i_1 e i_2 con características que se diferencian solo por un movimiento espacial $(\Delta y, \Delta x)$ tal que:

$$i_2(x,y)=i_1(x-\Delta_x,y-\Delta_y) \quad (1)$$

Al denotar por i_1 e i_2 su transformada de Fourier, del teorema del cambio de Fourier, permite encontrar:

$$I_2(\omega_x, \omega_y)=I_1(\omega_x, \omega_y)e^{-j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (2)$$

Donde, ω_x y ω_y son las variables de frecuencia en columna y fila. La normalización de la función de densidad espectral cruzada de las imágenes (i_1 e i_2), está dado por:

$$C_{i_1, i_2} = \frac{I_1(\omega_x, \omega_y)I_2(\omega_x, \omega_y)^*}{|I_1(\omega_x, \omega_y)I_2(\omega_x, \omega_y)^*|} = e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (3)$$

donde * denota el complejo conjugado. Por lo tanto, el movimiento relativo de las imágenes se estima a partir de la pendiente 2-D de la fase de la función de densidad espectral cruzada (o espectro cruzado).

Al aplicar la transformada de Fourier inversa F^{-1} de (3), se tiene la función de correlación:

$$F^{-1}=\{e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)}\}=\delta(x+\Delta_x, y+\Delta_y) \quad (4)$$

El movimiento relativo de las imágenes se estima a partir de las coordenadas del pico de correlación obtenido a partir de la transformada de Fourier inversa. En el caso de los movimientos sub-píxel, este pico es una versión muestreada de un kernel de Dirichlet. Este análisis produce dos imágenes de correlación, cada una de ellas representando la componente de desplazamiento horizontal del terreno (este-oeste y norte-sur) y una imagen asociada a la relación de señal – ruido (SNR por sus siglas en inglés: Signal-Noise Ratio), como se muestra en la (Figura 3) (Leprince, 2008; Taylor y Leprince, 2008).

- Mapas de desplazamiento y velocidad de flujo glaciar: A partir de los desplazamientos horizontales (EW y NS) se puede generar los vectores de desplazamiento, revelando de esta manera los patrones de flujo del hielo y la nieve en la parte superficial del glaciar. Además, es posible conocer el gradiente de la velocidad, los desplazamientos netos utilizando la norma euclídeana (Yépez et al., 2012).

$$D = \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2} \quad (5)$$

Donde: Dx: Desplazamiento este-oeste
Dy: Desplazamiento norte-sur

La diferencia temporal del par de imágenes (es necesario diferente cobertura temporal), primero son convertidos en desplazamientos netos utilizando la norma euclídeana de la expresión anterior y todos los datos en intervalos de tiempo se normalizan en días, obteniendo mapas de desplazamiento que finalmente se trazan transectas los dos grupos de nevados integrantes de la Cordillera Blanca (Figura 4 a y b).

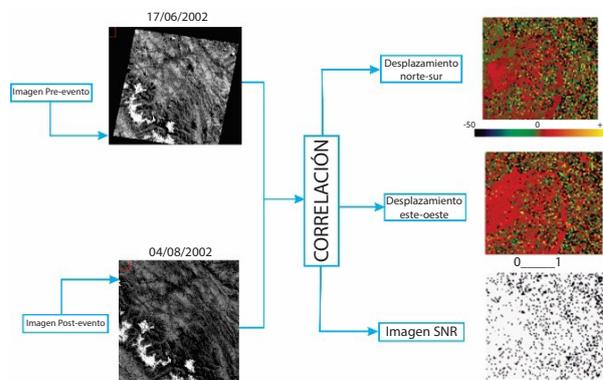
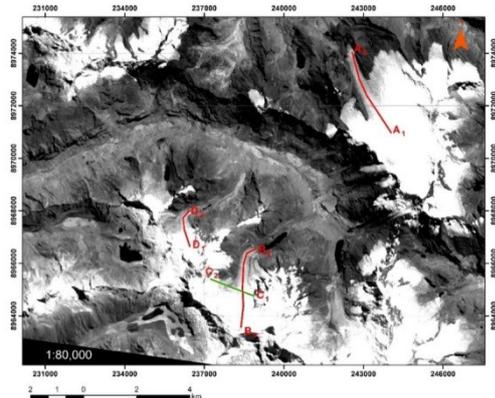
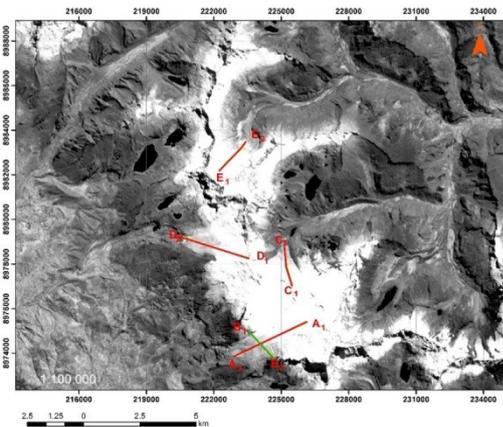


Figura 3. Proceso de correlación entre dos imágenes ASTER con una diferencia en tiempo de 48 días. 3 imágenes son generada en el análisis: imágenes Norte-Sur, Este – Oeste y de señal-ruido (SNR).



a



b

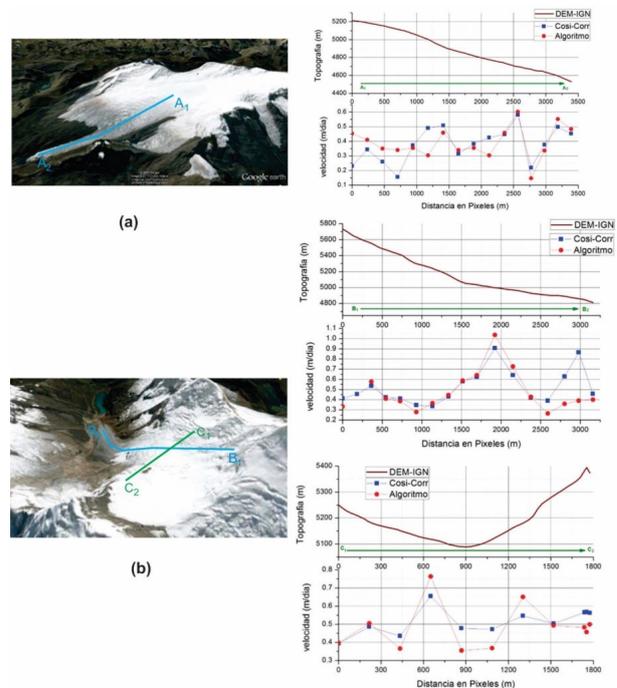
Figura 4. Transectos en las lenguas de los glaciares. (a) Primer grupo de nevados: Hualcan, Copa y Chiqllaraju. (b) Segundo grupo de nevados Qupap, Chinchey, Tullparaju, Palcaraju y Toclaraju.

Los resultados obtenidos son muestras de la metodología empleada, para lo cual, la velocidad de flujo del hielo glaciar en la Cordillera Blanca (con imágenes ASTER con diferencia en tiempo de 48 días) corresponde a junio y agosto del 2002 respectivamente, en estación seca. Se ha tomado 24 puntos de control de correspondencia de imagen base a imagen esclava, con un RMSE de 0.81. La elección con el mejor resultado para este caso, se utilizó la correlación de frecuencia con tamaño de ventana de 32 a 16 píxeles y un paso de cambio con tamaño de 2 píxeles, obteniendo imágenes de desplazamiento horizontal compuesta en tres componentes: este-oeste, norte-sur, y señal de ruido (SNR). Las consideraciones para los valores atípicos fueron

tomados de acuerdo a Redpath et al. (2013), que sugiere el rango de ± 20 m, y además se descartaron y los valores restantes se eliminaron utilizando filtros no locales en área de búsqueda de 21x 21 píxeles y tamaño de las celdas de 5x5 píxeles junto con el filtro mediana de tamaño de la ventana de 3x3, basado según las referencias (Taylor y Leprince, 2008; Leprince, 2008; Heid y Käab, 2012). Para el análisis cuantitativo se trazaron perfiles de velocidad según se recorre en el transecto en las lenguas glaciares, y los datos procesados han sido exportados en archivo ASCII, para luego ser graficada en ORIGIN 8.3.

Resultados

En la (Figura 5) se presentan los resultados de la topografía y velocidades de flujo del hielo glaciar de los nevados de Qupap (ubicado en $9^{\circ} 17' 40''$ S y $77^{\circ} 19' 54''$ O), Palcaraju (ubicado en $9^{\circ} 22' 19''$ S y $77^{\circ} 20' 24''$ O), y Toclaraju (ubicado en $9^{\circ} 21' 23''$ S y $77^{\circ} 22' 55''$ O) para cada una de los nevados y las velocidades de flujo glaciar según los transectos longitudinales.



(a)

(b)

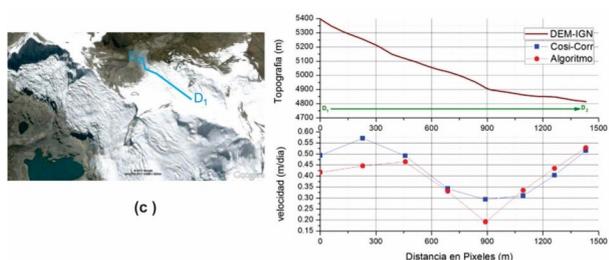


Figura 5. Transectos en lenguas glaciares. (a) nevado Qupap hacia el norte ($A_1 \rightarrow A_2$), (b) nevado Palcaraju hacia el norte ($B_1 \rightarrow B_2$) y ($C_1 \rightarrow C_2$), (c) nevado Toclaraju hacia el norte ($D_1 \rightarrow D_2$).

En los desplazamientos absolutos a lo largo del perfil longitudinal ($A_1 \rightarrow A_2$) de 3.4 km (figura 5 a) de la lengua glaciar Qupap con perfil hacia el norte, se encontró una velocidad superficial en promedio 0.37 m dia^{-1} .

La lengua glaciar cercano al nevado Palcaraju (figura 5b), con perfil hacia el norte, transectos con perfil longitudinal ($B_1 \rightarrow B_2$) de 3.2 km con una velocidad promedio 0.52 m dia^{-1} y el transecto transversal con perfil longitudinal ($C_1 \rightarrow C_2$) de 1.78 km, con velocidad promedio 0.51 m dia^{-1} .

Finalmente, la lengua glaciar Taclaraju (figura 5 c) con perfil hacia el norte y perfil longitudinal ($D_1 \rightarrow D_2$) de 1.43 km, con una velocidad promedio de 0.43 m dia^{-1} .

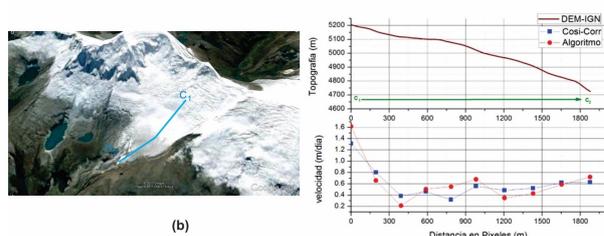
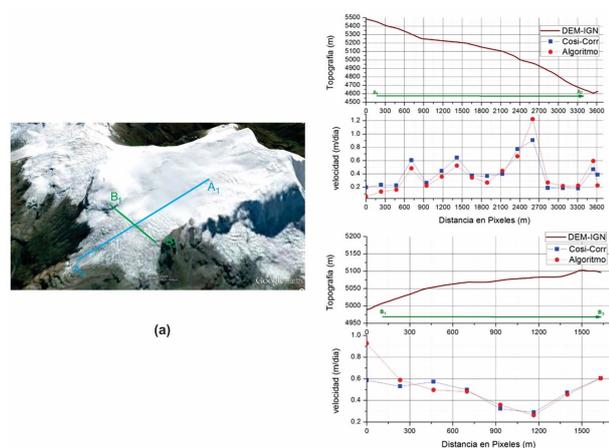


Figura 6. Transectos de lenguas glaciares del nevado Copa. (a) perfil longitudinal (hacia el oeste $A_1 \rightarrow A_2$) y ($B_1 \rightarrow B_2$), (b) perfil longitudinal (hacia el norte $C_1 \rightarrow C_2$).

En la Figura 6, a y b, los transectos en la lengua glaciar del nevado Copa, el primer perfil ($A_1 \rightarrow A_2$) de 3.6 km con velocidad promedio 0.40 m dia^{-1} y el trazo transversal con perfil ($B_1 \rightarrow B_2$) de 1.63 km con velocidad promedio 0.48 m dia^{-1} . En las cercanías del mismo nevado hacia el norte el perfil ($C_1 \rightarrow C_2$) de 1.88 km con velocidad promedio de 0.60 m dia^{-1} .

En la figura 7 c y d, en las cercanías del nevado Hualcan los transectos con perfil (hacia el sur, $D_1 \rightarrow D_2$) de 3.2 km y el segundo con perfil (hacia el norte, $E_1 \rightarrow E_2$) de 1.73 km hacia el norte con velocidades 0.55 y 0.6 m dia^{-1} , respectivamente.

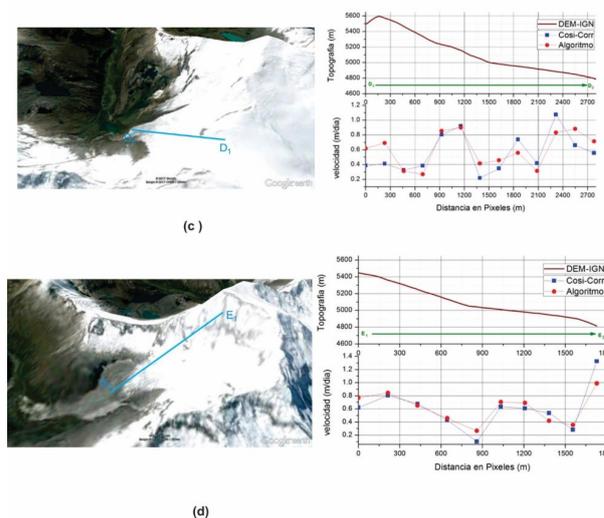


Figura 7. Transectos de lenguas glaciares del nevado Hualcan. (c) perfil longitudinal (hacia el sur $D_1 \rightarrow D_2$), (d) perfil longitudinal (hacia el norte $E_1 \rightarrow E_2$).

La geo-referenciación absoluta de las imágenes es limitada por la precisión en el momento de la

geo-referenciación con el uso de DEM. La correlación de dos las imágenes tomadas antes y después de un evento producen compensaciones que representa principalmente los desplazamientos horizontales de tierra. Algunos los artefactos (outliers) es frecuente cuando se usa DEM de satélite como ASTER GDEM, SRTM o ALOS PALSAR, pero pueden ser corregido en el post-procesamiento para obtener mayor precisión en los cálculos cuantitativos de velocidad.

Los resultados que se muestran en las figuras 5,6 y7 en todos los casos indican que las diferencias entre las velocidades medidas no son de magnitud significativa. La velocidad es mayor en los bordes de los glaciares y hay coherencia con los parámetros climáticos que se explica porque a altitudes bajas del glaciar disminuye el espesor de glaciar y a su vez está expuesto a una mayor temperatura del aire circundante que permite su fusión y adquiere mayor velocidad la masa glaciar. Además, si se observa y compara los promedios de la velocidad del perfil de los transectos (tabla 2), presentan tendencia casi constante.

Tabla 2. Velocidad promedio de las transectos de los nevados en estudio.

Transectos	m d ⁻¹	m a ⁻¹	Transectos	m d ⁻¹	m a ⁻¹
A ₁ →A ₂	0.3786	138.2	A ₁ →A ₂	0.4021	146.8
B ₁ →B ₂	0.5209	190.1	B ₁ →B ₂	0.4838	176.6
C ₁ →C ₂	0.5148	187.9	C ₁ →C ₂	0.6067	221.5
D ₁ →D ₂	0.4276	156.1	D ₁ →D ₂	0.5566	203.2
			E ₁ →E ₂	0.6010	219.4

Redpath et al. (2013) en el glaciar Tasman en Nueva Zelanda encontraron velocidades coincidentes con otros estudios realizados con imágenes y software COSI-Corr del mismo glaciar. Herman et al. (2011) derivaron campos de velocidad de flujo (16 días de diferencia) encontrando velocidades menores a 182 m a⁻¹ sin

cambios significativos en la velocidad y lo clasificó como una respuesta dinámica de categoría "glaciar de respuesta lenta". Nobakht et al. (2014) en los glaciares Kyrgyzstan en el Asia central, con imágenes landsat y ASTER en regiones de la parte alta del glaciar obtuvieron velocidades hasta de 0.5 m d⁻¹. Los estudios más cercanos a la región, realizados por Yopez et al. (2012), mediante el uso de COSI-Corr para imágenes SPOT, en el glaciar Buenos Aires, Argentina, en el mapa de despla-zamiento se observa que la velocidad mínima y máxima se ubican entre los rangos 0 a 2139 cm d⁻¹ respectivamente, mientras que la velocidad media en la escena es de 185 cm d⁻¹, encontrándose similitud en comportamiento de la dinámica glaciar en los nevados estudiados.

Discusión

La metodología con información satelital, representa un gran paso en estudios de la dinámica de glaciar y balances de masa, con énfasis en zonas remotas, donde mediciones con técnicas tradicionales resultan complicadas y muy costosas.

La metodología empleada con el software COSI-Corr demostró que el análisis de correlación es consistente con los proce-sos dinámicos en la superficie del glaciar. Sin embargo, es necesario desarrollar controles de calibración de los datos, que permitan evaluar la calidad de los resultados usando modelos independientes o datos in situ.

La Cordillera Blanca presentan baja dinámica y se podría clasificar dentro de los glaciares “no activos.” Sin embargo, debido a los cambios de parámetros climatológicos que se están dando en la región podría aumentar la velocidad y el flujo glaciar con consecuencias como las ocurridas en el callejón de Huaylas en 1970.

Con relación al aumento de velocidades por la presencia de pendientes pronunciadas en el perfil topográfico y en algunos segmentos los

resultados son no coherentes (pendiente ascendente con un aumento de velocidad). Esto podría ser producto de un efecto inercial de la masa en movimiento o de pequeñas depresiones, usuales en los glaciares tropicales como los nevados en toda la Cordillera Blanca.

Es importante continuar el análisis de correlación con imágenes para otros años de tal forma que se establezca criterios cuantitativos y para documentar el comportamiento de la dinámica glaciar.

Agradecimientos

Agradecimiento al centro LP DAAC de la NASA y el Ministerio japonés de Economía, Comercio e Industria (METI) por proporcionar las imágenes ASTER y a California Institute Technology (CALTECH) por brindar el software COSI-Corr.

Referencias Bibliograficas

1. Abrams, M.; Tsu, H.; Hulley, G.; Iwao, K.; Pieri, D.; Cudahy, T.; Kargel J. 2015. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 38: 292–301.
2. Ames, A. 1989. Inventario de glaciares del Perú. Hidrandina S.A. Unidad de Glaciológica e hidrología. Huaraz. Perú. 105 pp.
3. Ana-Ugrh. 2014. Inventario de glaciares del Perú. NINAGRI. Unidad de Glaciología y Recursos Hidricos, Huaraz. Disponible : <http://www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares.pdf>.
4. CALTECH. 2017. Measuring ground deformation using optical satellite and aerial images. Tectonic Observatory. Disponible en http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/download_software.html
5. Durán-Alarcón, C.; Gevaert, C. M.; Mattar, C.; Jimenez-Muñoz, J. C.; Pasapera-Gonzales, J. Sobrino, J. A.; Silvia-Vidal, J.; Fashe-Raymundo O., Chavez-Espiritu T. W.; Santillan-Portilla, N. 2015. Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*. 59 :19-26.
7. Heid, T. 2011. Deriving glacier surface velocities from repeat optical images. ISSN 1501-7710. Thesis. Disponible en: http://www.kiss.caltech.edu/papers/surface/papers/1156_Heid_materie.pdf.
8. Herman, F.; Anderson, B.; Leprince, S. 2011. Mountain glacier velocity variation during a retreat/advance cycle quantified using sub-pixel analysis of ASTER images. *J. Glaciol.* 57: 197–207.
9. IPCC. 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge: Cambridge University Press.
10. Käab, A.; Huggel, C.; Paul, F.; Wessels, R.; Raup, B.; Kieffer, H.; Kargel, J. 2002. Glaciar monitoring from Aster imagery: Accuracy and Applications. *Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Bern, March 11 – 13, pp. 43-53.
11. Minedu 2017. Descarga de Información espacial del MED. Aplicativo para la descarga de instituciones educativas, centros poblados y cartografía base-Version 2.0. Disponible: <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>.
12. Nobakht, M.; Motagh, M.; Hans-Ulrich, W.; Roessner, S.; Kaufmann H. 2014. The Inylchek Glacier in Kyrgyzstan, Central Asia: Insight on Surface Kinematics from

- Optical Remote Sensing Imagery. *Remote Sens.* 2014, 6, 841-856; doi:10.3390/rs6010841
- 13 Leprince, S. 2008. Monitoring Earth Surface Dynamics With Optical Imagery. California Institute of Technology, Pasadena, California. Thesis of grade. *d i s p o n i b l e e n :* ftp://ftp.gps.caltech.edu/pub/leprincs/SIAM_08/SIAM_IS_2008.pdf
- 14 Leprince, S.; Ayoub, F.; Avouac, J. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45 (6), 1529 – 1558.
- 15 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, *J. Glaciol.*, 54(186), 499–510, doi:10.3189/002214308785836922.
- 16 Redpath, T.A.N. ; Sirguey, P.; Fitzsimons, S. J.; Käab A. 2013. Accuracy assessment for mapping glacier flow velocity and detecting flow dynamics from ASTER satellite imagery: Tasman Glacier, New Zealand. *Remote Sensing of Environment*, vol. 133, pp. 90-101
- 17 Scherler, D.; Leprince, S.; Strecker, M.R. 2008. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery-Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment* 112: 3806–3819.
- 18 Taylor, M.; Leprince, S. 2008. Detecting coseismic displacements in glaciated regions: An example from the great November 2002 Denali earthquake using SPOT horizontal offsets, *Earth and Planetary Science Letters* 270 (2008) 209–220.
- 19 Wigmore, O.; Mark, B. 2017. Monitoring Tropical Debris Covered Glacier Dynamics from High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere Discuss.*, doi:10.5194/tc-2017-31.
- 20 Yépez, S.; Torres, W. ; Rebolledo, R. 2012. Methodology for flow estimation in the 'Buenos Aires' glacier, hope bay, Antarctic Peninsula. *Interciencia.* 37. 492-497.

Correo electrónico: jtordocillo@unac.pe