

# ANÁLISIS DE PRECISIÓN Y DESEMPEÑO DE MÉTODOS DE CO-REGISTRO PARA EL CÁLCULO DE BALANES DE MASA GEODÉSICO EN GLACIARES DEL CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR

P. Vacaflor <sup>1</sup>, M.G. Lenzano <sup>1</sup>, E. Lannutti <sup>1</sup> y L.E. Lenzano <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Geomática Andina. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, CONICET CCT-Mendoza.

<sup>2</sup> International Center for Earth Sciences (ICES). Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza  
[pvacaflor@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:pvacaflor@mendoza-conicet.gob.ar) - Instagram: @pauvacaflor

## RESUMEN

El proceso de co-registro de Modelos Digitales de Elevación (MDE) consiste en acoplar dos superficies entre sí a fin de reducir las diferencias altimétricas entre las mismas. Estos sesgos tienen el potencial de propagarse y afectar los análisis posteriores como ser los cambios de volumen y tasas de retroceso en glaciares, por lo tanto, conforman un error sistemático que debe ser calculado y corregido antes de realizar la diferenciación. De no realizarse el co-registro, los sesgos introducidos pueden llegar a ser del orden de la señal de cambio a detectar y desencadenar en posteriores interpretaciones erróneas. El Balance de Masa Geodésico (BMG) de un glaciar se calcula primeramente a través de la diferenciación de dos MDE. Es por esto que el proceso de co-registro constituye un paso previo al cálculo de BMG y de suma importancia para evitar la propagación de errores en productos derivados.

El co-registro se realiza a través de la estimación de parámetros de transformación que ajustan el MDE *slave* o móvil al MDE fijo o *master*. Una vez calculados los parámetros de transformación, estos son aplicados al MDE móvil que entonces queda "co-registrado" o acoplado al MDE fijo. Existen algunas pocas alternativas para la realización de este procedimiento. Podemos clasificar a los métodos de co-registro en: (A) aquellos que requieren Puntos Comunes (PC) o (B) aquellos que no requieren PC. Aclarando que con PC nos referimos a puntos de unívoca correspondencia tridimensional entre ambas superficies a acoplar. Entonces, existen métodos del grupo (A) como los de Berthier et al. (2007) y Nuth & Kääb (2011) que presentan soluciones basadas en desplazamientos planimétricos. Estos utilizan Puntos de Co-Registro (PCR) para realizar el acople pero que no son necesariamente PC. Por otro lado, métodos del grupo (B) como el de Li et al. (2017) solucionan el co-registro a través de la estimación parámetros de transformación entre los sistemas de referencia de cada MDE. Para el cálculo de estos parámetros los PCR necesariamente deben ser PC identificados en ambos MDE. Esto constituye una dificultad ya que implica la detección de características o rasgos comunes a dos MDE.

En el campo de la glaciología son más comúnmente utilizados los métodos del grupo (A). Esto se debe a su mayor sencillez y disponibilidad de códigos para su uso. Sin embargo, existen muy pocas aplicaciones del grupo (B). Más aún, el co-registro mediante estos métodos suele requerir programaciones que son cerradas e incluidas en el proceso de la diferenciación de los MDE. Sin embargo el detalle metodológico presentado en Li et al. (2017) permitió su adaptación y reproducción para aplicaciones glaciológicas en este estudio. Es por esto que el objetivo del presente estudio es el diseño, aplicación y evaluación de manera cruzada dos métodos: Método 1 (M1) y Método 2 (M2), pertenecientes a los grupos (A) y (B), siendo el M1 basado en Nuth & Kääb (2011) y el M2 basado en Li et al. (2017). A partir de esto, se contribuye a un mejor conocimiento estadístico al utilizar diferentes métodos de co-registro. Para el desarrollo, los métodos M1 y M2 fueron aplicados sobre dos MDE: el modelo de elevaciones óptico KH9<sub>1979</sub> considerado fijo, obtenido fotogramétricamente a través de imágenes KH-9 Hexagon correspondientes al año 1979 y el modelo global de elevaciones radar SRTM<sub>2000</sub> considerado móvil, correspondiente a febrero del año 2000. Además, se utilizaron perfiles de elevación ICESat en la etapa de análisis de precisión y otras fuentes de datos accesorias como ser capas vectoriales de contorno glaciar y de información litológica para la etapa de elección de los PCR.

La elección de los PCR es un paso fundamental para el co-registro que requiere la selección de puntos en zonas que hayan permanecido invariantes entre las fechas de los MDE a acoplar. Tanto el M1 como el M2 utilizados en este trabajo emplearon PCR elegidos dentro de áreas demarcadas como estables. No obstante, el mecanismo de selección de estos puntos fue distinto según cada método. En el caso del M1, se realizó una búsqueda aleatoria restringida sobre una capa de litología y por fuera de los límites glaciares según el RGI6.0 (Randolf Glacier Inventory versión 6.0). Luego, se calcularon las diferencias de elevación contra SRTM<sub>2000</sub> y se filtraron los PCR<sub>m1</sub> en base a estas diferencias en base a un intervalo de mediana  $\pm 3$  desviaciones absolutas de la mediana. Por otro lado, el M2 utiliza centroides de subcuencas y estas subcuencas fueron trazadas dentro de las áreas continuas –sin hacer uso de la capa de litología– demarcadas como estables. En este caso los PCR<sub>m2</sub> fueron seleccionados internamente en el proceso de *matching*. Siendo este proceso una etapa perteneciente al M2 en la que se determina la correspondencia unívoca entre una subcuenca del MDE *slave* con una del MDE *master* y en consecuencia de sus respectivos centroides. Una vez obtenidos los PCR<sub>m1</sub> y PCR<sub>m2</sub> se estimaron los parámetros de transformación, quedando el SRTM<sub>2000</sub> co-registrado a KH9<sub>1979</sub> mediante M1 y M2 respectivamente.

El desempeño de los métodos fue evaluado de manera absoluta para el caso de M1 y para el caso de M2 de manera cruzada contra M1. En el caso del M1 la evaluación se realizó co-registrando los perfiles de elevación ICESat a los modelos SRTM<sub>2000</sub> y KH9<sub>1979</sub> obteniendo así dos vectores ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) adicionales de co-registro. De esta manera, la suma teórica de los tres vectores de traslación obtenidos debería dar cero. Sin embargo, en la práctica esto no ocurre y la suma de esas diferencias es considerada un estimador de la precisión del co-registro. La evaluación de la precisión del M2 fue llevada a cabo mediante una evaluación cruzada respecto del M1. Para esto, utilizamos el SRTM<sub>2000</sub> co-registrado al KH9<sub>1979</sub> mediante el M2. Luego, se trazaron perfiles transversales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) incluyendo zonas estables y se calcularon los promedios de las diferencias de elevación entre SRTM<sub>2000</sub> y KH9<sub>1979</sub>. La comparación del antes y después del co-registro con M1 y M2 nos permitió evaluar sus comportamientos de manera cruzada.

Los resultados de la evaluación del M1 a partir de la triangulación con datos ICESat arrojó un valor (23.7 m) menor al tamaño del pixel. Sin embargo, este valor es un tanto mayor a los resultados que suelen obtenerse cuando se realiza el proceso de triangulación mediante M1 con otros MDE en lugar de ICESat. Esto se debe a la menor cantidad de datos disponibles y pobre distribución espacial de los perfiles ICESat respecto de los modelos digitales. Respecto a la comparación en comportamiento entre M1 y M2, los resultados nos muestran que las diferencias de elevación en zonas estables disminuyen tanto con el M1 como con el M2. Por ejemplo, las diferencias de altura en zonas estables disminuyen desde un 37% (M2, Upsala 3-3 profile) hasta un 64% (M1, Viedma 4-4 profile). Aun así, estas diferencias en zona estable siguen siendo distintas de cero. Esto puede explicarse por los distintos orígenes (radar versus óptico) en la comparación de los MDE SRTM<sub>2000</sub> y KH9<sub>1979</sub>. A esto se le suma las diferencias en calidad y definición de la superficie, siendo el SRTM<sub>2000</sub> un modelo de mayor precisión y continuidad que el KH9<sub>1979</sub>. Por otro lado, las últimas columnas (ice zone) permiten evaluar el impacto que tiene sobre el cálculo de cambio de espesor de hielo, aplicar o no un método de co-registro de manera previa. En este sentido, observamos que en zonas englazadas las diferencias de altura son inicialmente del orden de 100 a 150 m. Luego del co-registro estas diferencias disminuyeron un 17% en el caso mínimo (M1, Upsala 1-1 profile) y en un 56% en el caso máximo (M2, Viedma 3-3 profile).

En este trabajo presentamos por primera vez una metodología de co-registro alternativa perteneciente al grupo B (M2) adaptada y calibrada para su uso en una zona englazada. Su aplicación no se resuelve de manera sencilla ya que requiere la configuración de muchos parámetros hidrográficos y conocimientos de programación. Además, no es aplicable para co-registrar perfiles de elevación como ICESat ya que necesita superficies continuas como MDE para la obtención de los PCR<sub>M2</sub> y como consecuencia no es posible calcular su precisión. Descontando las dificultades mencionadas, en base a las estadísticas en zonas estables podemos decir que M1 y M2 presentan un comportamiento similar pero ligeramente a favor de M1. Todo esto más la factibilidad y mayor sencillez del M1 sugieren una preferencia por este método frente a M2.

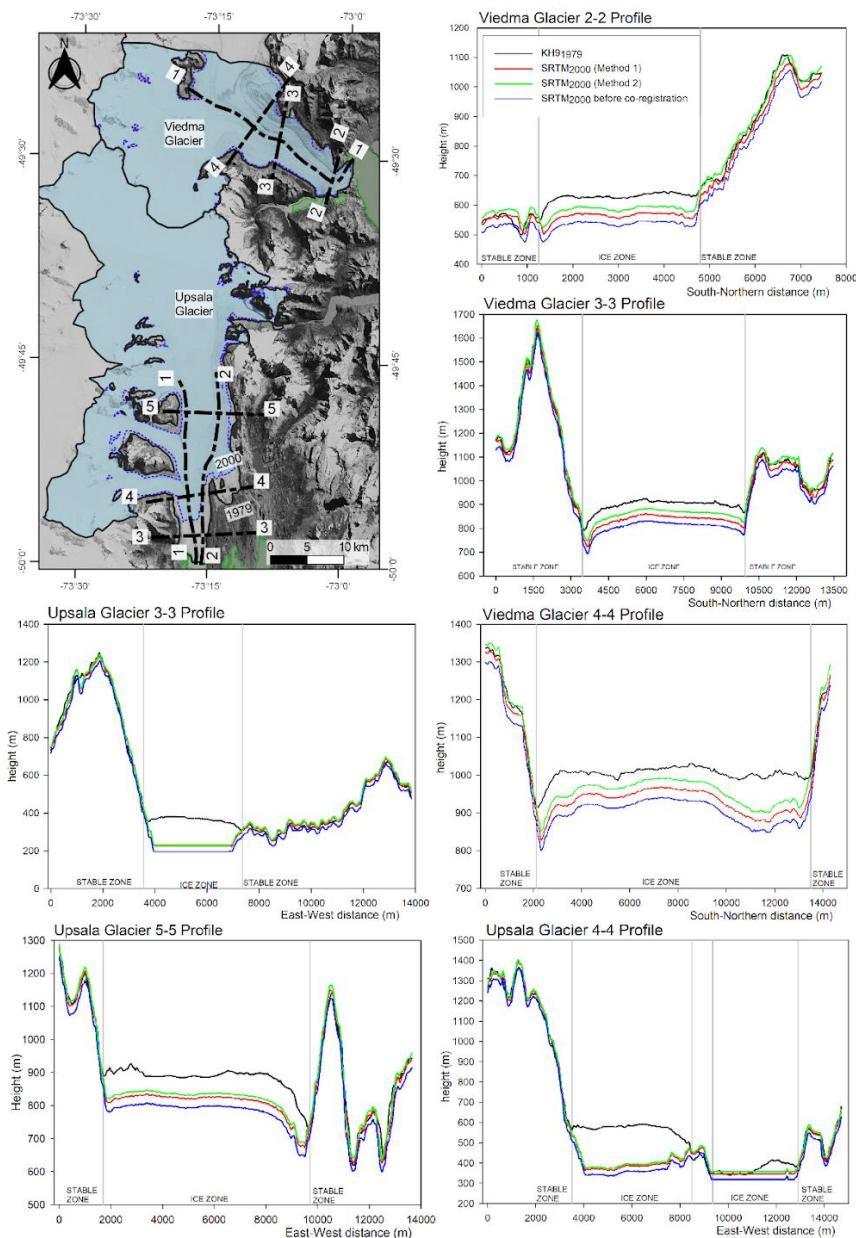


Figura 1. Perfiles transversales de los glaciares Viedma y Upsala antes y después de los co-registros M1 y M2

## REFERENCIAS

- Berthier, E., Arnaud, Y., Kumar, R., Ahmad, S., Wagnon, P., & Chevallier, P. (2007). Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 327-338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.017>
- Li, H., Deng, Q., & Wang, L. (2017). Automatic Co-Registration of Digital Elevation Models Based on Centroids of Subwatersheds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11), 6639-6650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2731048>
- Nuth, C., & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1), 271-290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>