

Precisión de altimetría satelital y uso de hipsometría para modelar cambios de espesor de hielo en glaciares de Argentina

Accuracy of satellite altimetry and use of hypsometry to model ice thickness changes in Argentine glaciers

Paulina Vacaflor¹, M Gabriela Lenzano¹, Esteban Lannutti¹, Silvana Moragues¹

Resumen El estudio del retroceso de los glaciares a nivel mundial ha aumentado progresivamente por su importancia en el entendimiento de la dinámica de los recursos hídricos, el aumento del nivel del mar y el cambio climático. La relevancia de estudiar dichos retrocesos y la dinámica de los glaciares reside en las posibles consecuencias, ya que estos representan una fuente valiosa de agua para consumo, producción de alimentos y energía. El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS), ubicado entre Argentina y Chile, ha aumentado su tasa de adelgazamiento y retracción frontal en los últimos años. Los datos y métodos de la teledetección y la geodesia satelital son cada vez más utilizados para el estudio de dinámica glaciaria debido a la complejidad y los costos de las mediciones “in situ”. En este sentido, el método de Balance de Masa Geodésico (BMG) consiste en la diferenciación multitemporal de modelos digitales de elevación (MDE) satelitales para obtener mapas de cambio de espesor. La precisión del BMG depende fundamentalmente, pero no de manera exclusiva, de la calidad de los MDE utilizados. En este estudio se analizan los errores de productos altimétricos para la obtención de mapas de cambio de espesor (ΔH). Además, se propone el método de interpolación hipsométrica local para rellenar zonas sin datos. Los datos empleados incluyen: los MDE SRTM (2000) y ALOS/PRISM (2006/2011); perfiles de elevación ICESat-2 (2018/19-2022); imágenes MODIS y el inventario GLIMS. Los MDE fueron evaluados a partir de su comparación con ICESat-2 y el análisis del comportamiento de sus diferencias. A partir de este análisis, se calcularon los ΔH en los glaciares Viedma y Upsala. El método de interpolación propuesto se aplicó para generar mapas completos de los glaciares. Los resultados evidencian mayores tasas de adelgazamiento en las zonas frontales y una disminución gradual hacia las zonas altas. La evaluación sobre suelo desnudo muestra una mejor concordancia entre los productos altimétricos ICESat-2 y SRTM, mientras que el modelo ALOS presenta un sesgo mayor respecto a ICESat-2. El modelo de ΔH 2000-2018/19 será utilizado de base para cálculos interanuales con ICESat-2, aportando nuevos antecedentes para los glaciares Viedma y Upsala y para la zona del CHPS.

Palabras clave Retroceso glaciario, teledetección, balance de masa, modelo de elevación digital, ICESat.

Abstract *The study of glacier retreat on a global scale has progressively increased due to its importance in understanding the dynamics of water resources, sea-level rise, and climate change. The relevance of studying these retreats and glacier dynamics lies in the potential consequences, as they represent a valuable source of water for consumption, food production, and energy. The S Patagonian Icefield (SPI), located between Argentina and Chile, has shown an increased rate of thinning and frontal retreat in recent years. Methods and data from remote sensing and satellite geodesy are increasingly used to study glacier dynamics because of the complexity and costs of “in situ” measurements. In this regard, the Geodetic Mass Balance (GMB) method involves the multitemporal differentiation of satellite digital elevation models (DEMs) to obtain thickness change maps. The accuracy of GMB depends primarily, but not exclusively, on the quality of the DEMs used. This study analyzes the errors of altimetry products to obtain thickness change (ΔH) maps. Additionally, the local hypsometric*

¹Laboratorio de Geomática Andina, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (CONICET CCT-Mendoza), Mendoza, Argentina. Email: pvacaflor@mendoza-conicet.gob.ar

interpolation method is proposed to fill data gaps. The data used includes the following: SRTM DEM (2000) and ALOS/PRISM (2006/2011); ICESat-2 elevation profiles (2018/19-2022); MODIS images, and the GLIMS inventory. The DEMs were evaluated by comparing them with ICESat-2 and analyzing the behavior of their differences. From this analysis, deltaH in the Viedma and Upsala glaciers was calculated. The proposed interpolation method was applied to generate complete glacier maps. The results show higher thinning rates in frontal areas and a gradual decrease towards higher elevations. The evaluation on bare ground shows better agreement between ICESat-2 and SRTM products, while the ALOS model presents a larger bias compared to ICESat-2. The deltaH model 2000-2018/19 will be used as a base for interannual calculations with ICESat-2, providing new insights for the Viedma and Upsala glaciers and the SPI area.

Keywords *Glacier retreat, remote sensing, mass balance, digital elevation model, ICESat.*

INTRODUCCIÓN

Existe un creciente interés mundial por estudiar el retroceso de los glaciares, debido a su importancia para el entendimiento actual de la dinámica de los recursos hídricos, del aumento del nivel medio del mar y del cambio climático. El retroceso a nivel mundial de los glaciares tiene importantes consecuencias sobre la comunidad, debido a que estos constituyen una fuente valiosa de agua para consumo y para producción de alimentos y energía. La región del Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) ha aumentado su tasa de adelgazamiento y retracción frontal en los últimos años. El CHPS se encuentra en América del Sur, entre los territorios de Argentina y Chile, ocupa una superficie de 13.000 km², aproximadamente. En la actualidad, los tres mayores reservorios de agua continental en orden de importancia son la Antártida, Groenlandia y la Patagonia, donde el CHPS tiene más del 60% de la superficie glacial.

Debido a la complejidad y costos que presentan las mediciones "in situ" para el estudio de glaciares, cada vez es más frecuente el uso de métodos de la teledetección y productos de la geodesia satelital. En las últimas décadas, el balance de masa geodésico (BMG) se ha utilizado ampliamente para estimar los cambios volumétricos de los glaciares. El método geodésico consiste en la diferenciación multitemporal de modelos digitales de elevación (MDE) satelitales (Cogley et al., 2011) para obtener mapas de cambio de espesor. Esta ha demostrado ser una técnica eficaz para su aplicación en zonas glaciares de todo el mundo. El impacto en la precisión del BMG y otros productos generados está relacionado, por ejemplo, con la calidad de los MDE utilizados y con las diferencias de resolución espacial (Paul et al., 2017). La incertidumbre del BMG, además, presenta una fuerte dependencia respecto a la interpolación en los MDE utilizados (Magnússon et al., 2016). Para maximizar el valor de los registros geodésicos de balance de masas, es necesario evaluar las incertidumbres involucradas (Magnússon et al., 2016) así como determinar el grado de incertidumbre en la estimación de los cambios en el volumen de hielo (Lenzano, 2013). Es por esto que en el presente trabajo se propone estudiar la precisión de productos altimétricos para la obtención de mapas de cambio de espesor (deltaH). A su vez, para estos mapas del glaciar completo, es necesario utilizar algún método de interpolación que complete las zonas sin datos. Aquí se propone el uso del método de interpolación hipsométrica local.

DATOS

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a los MDE SRTM (2000) y ALOS (2006/2011), perfiles de elevación ICESat-2 (2018/19), imágenes procesadas MODIS (2001) y el inventario de glaciares del GLIMS. Todos ellos son productos de cobertura global y disponibilidad abierta al público. A continuación, se describe cada uno de ellos junto con su rol en esta investigación.

SRTM El MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) fue resultante de un proyecto conjunto entre las agencias de EEUU, Alemania e Italia cuyo vehículo fue lanzado el 11 de febrero de 2000 (Farr et al., 2007). Diferentes versiones del modelo de elevación de cobertura global SRTM están actualmente disponibles a través de USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). En este estudio se utilizó un mosaico basado en cuatro archivos SRTM Global Versión 3 con una resolución de 1 arco-segundo (número de Identificador de Objeto Digital (DOI): 10.5066/F7PR7TFT). Este MDE de origen radar se utilizó para el cálculo de deltaH en el periodo 2000-2019. El objetivo es calcular el delta H y aplicar el método de interpolación para modelar el adelgazamiento sobre la superficie completa de los glaciares en estudio.

ALOS/PRISM AW3D30 es un MDE global con una resolución de 30 m. Se generó a partir de fotogrametría con imágenes ópticas del sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*). Este sensor pancromático operó a bordo del satélite ALOS “DAICHI” de la Agencia Aeroespacial Japonesa (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) entre los años 2006 y 2011.

ICESat-2 Las misiones ICESat (*Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite*) se dividen a su vez en dos misiones satelitales llamadas ICESat-1 y ICESat-2. Estas poseen altímetros láser a bordo con el objetivo de tomar datos de: elevación en zonas de hielo, altura de nubes y aerosoles y características de la topografía y vegetación (<https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/>). Los productos aquí utilizados que se desprenden de estas misiones consisten en perfiles de elevación. Estos perfiles son líneas recorridas por el satélite las cuales contienen puntos con datos de elevación. En el caso de la misión ICESat-2, es la segunda generación de misiones de altimetría láser ICESat (<https://icesat.gsfc.nasa.gov/>). El satélite de ICESat-2 fue lanzado el 15 de septiembre de 2018 y aún se encuentra operativo. A bordo de este satélite se encuentra el instrumento ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*) el cual emite 10.000 pulsos por segundo para la determinación de las alturas (<https://icesat2.gsfc.nasa.gov>). Esto permite tomar mediciones cada ~70 cm a lo largo del camino recorrido por el satélite (<https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/space-lasers>). Además, el sensor ATLAS contiene un elemento óptico difractivo que divide cada pulso láser generando seis haces individuales dispuestos en pares (izquierdo -L- y derecho -R-). Esto quiere decir que, por cada línea barrida por el satélite, se derivan 6 perfiles con datos, lo cual posibilita una mayor y mejor cobertura que su antecesor ICESat-1 sobre la zona de los glaciares estudiados.

MODIS El sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) es un instrumento que obtiene información global cada uno o dos días, para treinta y seis bandas espectrales (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>). Este instrumento viaja a bordo de los satélites Terra y Aqua. A su vez, estos satélites forman parte del EOS (*Earth Observing System*) de la NASA. A partir de la información adquirida por este sensor, se generan múltiples productos con distintos niveles de procesamiento que pueden ser obtenidos de la web <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>. Entre estos, el producto MCD12Q1 provee cinco mapas de clasificaciones científicas del suelo de 500 m de resolución espacial. En este trabajo la información utilizada fue la correspondiente a la clasificación del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). Estas imágenes fueron utilizadas para agrupar los deltaH en zonas fuera de los glaciares, clasificadas por el valor 16 como “barren” o suelo desnudo.

GLIMS El proyecto internacional GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) es una iniciativa que busca monitorear los glaciares del mundo. Este tiene como objetivo crear un inventario global de hielo terrestre, que incluye mediciones de área, geometría, velocidad de superficie y línea de nieve de los glaciares. De este inventario internacional de libre acceso (<http://www.glims.org/maps/glims>) se descargaron las capas vectoriales correspondientes a las áreas englazadas. Se seleccionaron únicamente los contornos cuyas fechas corresponden al año 2000. Estos datos fueron utilizados para

agrupar los deltaH que pertenecían a zonas de hielo por un lado y a zonas off-glacier por otro lado.

METODOLOGÍA

La metodología consistió en evaluar los productos altimétricos radar y óptico, mediante la comparación con ICESat-2. Para esto se calcularon los deltaH en zonas fuera de los glaciares y se observó su comportamiento. A partir de estos resultados, se calcularon los deltaH entre las dos fuentes radar consideradas, es decir ICESat y SRTM en las zonas de los glaciares Viedma y Upsala, por ser estos los de mejor cobertura espacial. Luego, los deltaH obtenidos presentaban una distribución incompleta de los glaciares, debido a que los datos ICESat-2 son perfiles de elevación con cobertura lineal. Es por esto que se aplicó un método de interpolación. En el campo de la glaciología, los métodos comúnmente utilizados para el rellenado de huecos pueden clasificarse en: métodos constantes, espaciales e hipsométricos (McNabb et al., 2019). Estos métodos pueden usarse para rellenar los huecos de un MDE o bien, el mapa de cambios de elevación deltaH (McNabb et al., 2019). El método empleado en este trabajo es el hipsométrico local y pertenece a la tercera categoría de los mencionados, su descripción se detalla a continuación.

La metodología para el rellenado de pixeles vacíos con interpolación hipsométrica local se muestra en la Figura 1. Primero se calculan curvas de nivel tomando un MDE de referencia. En nuestro caso, el MDE utilizado para este fin fue el SRTM. Luego, a partir de estas líneas, el área englazada queda dividida en franjas o "bins" de elevación y se calcula para cada franja un valor de cambio de elevación representativo (Nilsson et al., 2015). Estas franjas suelen establecerse cada 50 m (e.g., Papasodoro et al. (2015); Falaschi et al. (2017)) o, en otros casos, cada 100 m (e.g., Braun et al. (2019); Dussailant et al. (2019)). A continuación, a partir de los datos contenidos en cada bin, se calcula para cada franja altitudinal la media (e.g., Nilsson et al. (2015); Malz et al. (2018)) o la mediana (e.g., Johnson et al. (2013); Kronenberg et al. (2016)). Así, cada dato faltante es sustituido por la media o la mediana de la franja a la que pertenece. Los métodos hipsométricos a su vez, se clasifican como locales o globales. Esto es según si los datos utilizados para interpolar corresponden a un glaciar determinado (hipsométrico local) o a grandes áreas (hipsométrico global) (McNabb et al., 2019). En el caso de este trabajo, se aplicó el método hipsométrico local individualmente para los glaciares Viedma y Upsala para modelar los deltaH en las zonas sin dato en los glaciares y así obtener un mapa completo de cada uno para el período 2000-2018/19.

RESULTADOS

En la Figura 2A a la izquierda se presenta la distribución de los deltaH de las elevaciones ICESat-2 contra las del modelo SRTM, en tanto que, a la derecha, los histogramas corresponden a los deltaH de ICESat-2 contra el modelo ALOS. Se observa que, en el caso del modelo SRTM en los intervalos (-10,0) para los años 2020 y 2021 y (-20,0) para el año 2022, se concentra la mayor cantidad de resultados deltaH. No obstante, se debe notar que también existe una gran cantidad de deltaH en los intervalos positivos (0,10) y (0,20). En tanto que, en la comparación de alturas ICESat-2 versus ALOS, la mayor concentración de valores se da en los intervalos (10,20) para los años 2020 y 2021 y (0,20) para el año 2022. Luego, a la izquierda de la Figura 2B) se muestra la cobertura espacial de los perfiles ICESat-2 (líneas rojas) sobre los glaciares Viedma y Upsala, es decir, la zona con datos a partir de la cual se realizó la interpolación hipsométrica. Los mapas modelados de cambio de espesor anual deltaH, para el período 2000-2018/19, se presentan en la Figura 2B) del lado derecho. Las tonalidades rojas representan las mayores tasas de adelgazamiento de hielo, que corresponden a las zonas frontales de ambos glaciares. En estas zonas, el glaciar Viedma alcanza adelgazamiento de 9 m/a mientras que el Upsala de 11 m/a. Glaciar arriba, las tasas de adelgazamiento anual disminuyen gradualmente hasta alcanzar las zonas altas, las cuales muestran un pequeño adelgazamiento relativo (tonalidades amarillas) del orden de 2 m/a.

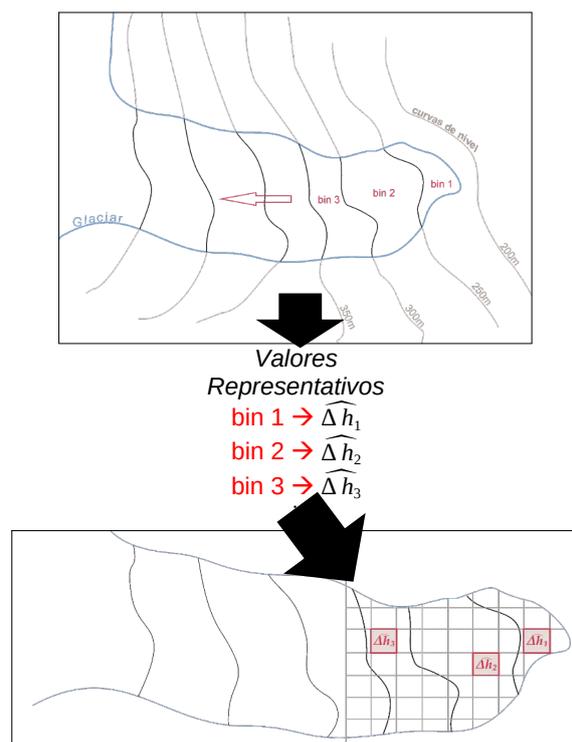


Figura 1. Esquema de trabajo del método de interpolación hipsométrica. A partir de las curvas de nivel y el contorno del glaciar, quedan delimitados los bins 1, 2, 3, y así sucesivamente. Luego, los valores de referencia son calculados a partir de los datos dentro de cada franja.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la evaluación sobre suelo desnudo muestran una adecuada concordancia entre las elevaciones ICESat-2 y SRTM dado que la distribución alrededor del valor 0 es similar tanto para Δh negativos como positivos. Además, las menores discrepancias entre SRTM y ICESat-2 en comparación con los Δh ALOS vs ICESat-2 puede estar relacionado con que, en el primer caso, son fuentes de datos del tipo radar y láser consideradas de mayor precisión. En cuanto a los Δh ALOS vs ICESat-2, los resultados indican un sesgo de 10 a 20 metros de la superficie representada por el modelo ALOS respecto de las elevaciones ICESat-2. Esto quiere decir que el modelo ALOS está por debajo de los perfiles ICESat-2 ya que los Δh se concentran solo del lado positivo respecto al $\Delta h=0$. Para este tipo de estudios también destacamos la utilidad, por la sencillez de su aplicación, que brinda el producto MODIS utilizado en la diferenciación de los tipos de suelo. La mayor cobertura espacial de ICESat-2 junto con la interpolación hipsométrica local posibilitaron el modelado de los cambios de espesor para los glaciares estudiados. El modelo estimado para el Δh 2000-2018/19 a su vez sirve de base para cálculos interanuales en conjunto con los perfiles ICESat-2 de los años 2020, 2021, 2022 y subsiguientes, recordando que este sensor sigue activo. Estos resultados obtenidos con ICESat-2, constituyen antecedentes nuevos para los glaciares Viedma y Upsala y para la zona del CHPS en general.

Agradecimientos Agradecemos al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), al Laboratorio de Geomática Andina (LAGEAN) y al Instituto Argentino de Glaciología, Nevología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) por sus especial reuniónistas, el espacio y el financiamiento brindados.

REFERENCIAS

Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. C. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>

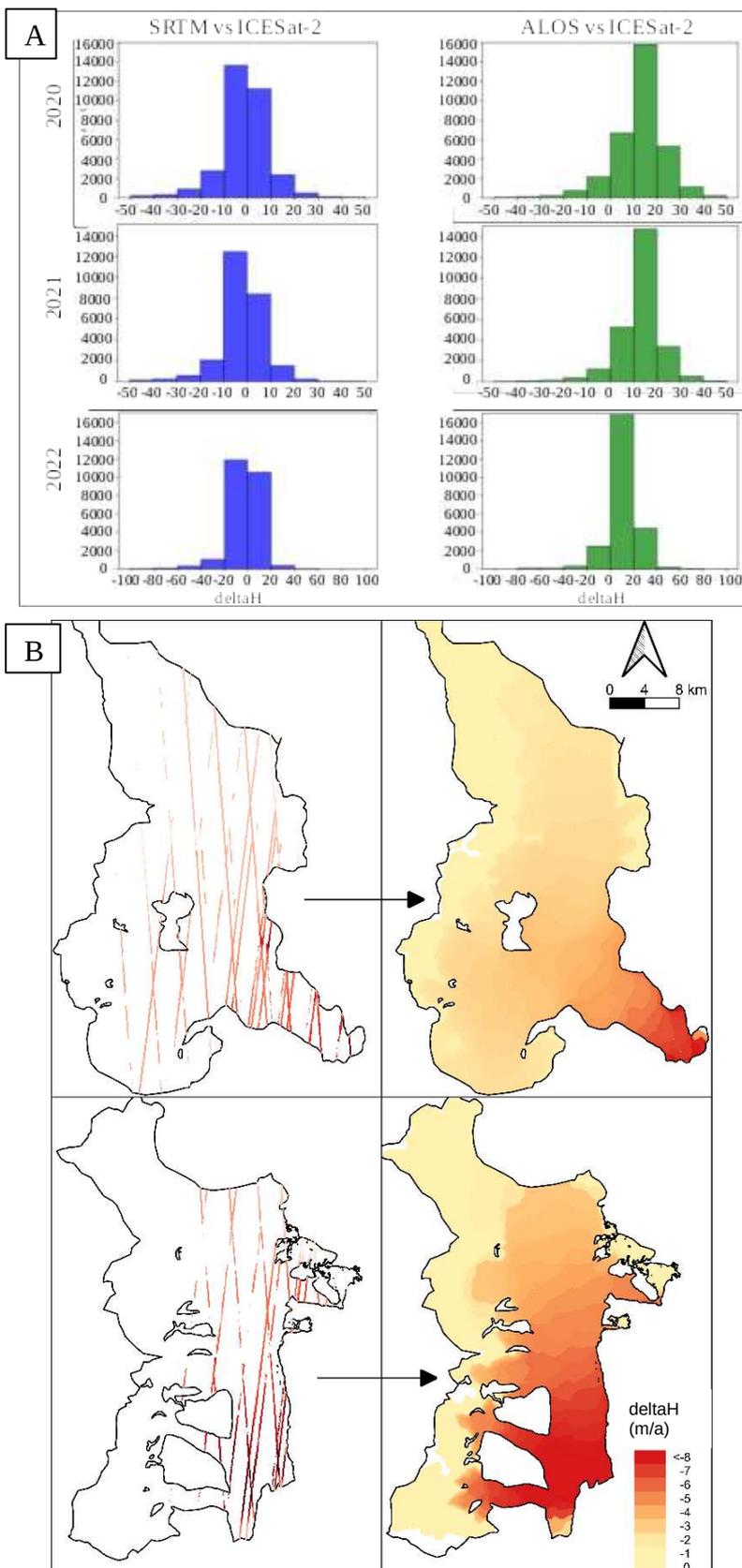


Figura 2. A) Histogramas resultantes de agrupar los deltaH de ICESat-2 contra SRTM a la izquierda, y contra ALOS a la derecha. B) A la izquierda, cobertura de datos ICESat-2 y a la derecha, mapas de cambio de espesor modelados para el periodo 2000-2019 sobre los glaciares Viedma y Upsala.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kasser, G., Möller, M., Nicholson, L., & Zemp, M. (2011). Glossary of glacier mass balance and related terms. Reporte Técnico IHP-VII Technical Documents in Hydrology 86; IACS Contribution No. 2, Paris.

Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two

- decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Falaschi, D., Bolch, T., Rastner, P., Lenzano, M. G., Lenzano, L., Lo Vecchio, A., & Moragues, S.** (2017). Mass changes of alpine glaciers at the eastern margin of the Northern and Southern Patagonian icefields between 2000 and 2012. *Journal of Glaciology*, 63(238), Article 238. <https://doi.org/10.1017/jog.2016.136>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D.** (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), Article 2. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Johnson, A. J., Larsen, C. F., Murphy, N., Arendt, A. A., & Zirnheld, S. L.** (2013). Mass balance in the Glacier Bay area of Alaska, USA, and British Columbia, Canada, 1995–2011, using airborne laser altimetry. *Journal of Glaciology*, 59(216), 632–648. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J101>
- Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle, M., Huss, M., Farinotti, D., Azisov, E., Usabaliev, R., Gafurov, A., Petrakov, D., & Käab, A.** (2016). Mass-balance reconstruction for glacier no. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*, 57(71), Article 71. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A032>
- Lenzano, M. G.** (2013). Assessment of using ASTER-derived dtm for glaciological applications in the Central Andes, Mt. Aconcagua, Argentina. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2013(3), Article 3. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2013/0170>
- Magnússon, E., Muñoz-Cobo Belart, J., Pálsson, F., Ágústsson, H., & Crochet, P.** (2016). Geodetic mass balance record with rigorous uncertainty estimates deduced from aerial photographs and lidar data – case study from Drangajökull ice cap, NW Iceland. *The Cryosphere*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.5194/tc-10-159-2016>
- Malz, P., Meier, W., Casassa, G., Jaña, R., Skvarca, P., & Braun, M. H.** (2018). Elevation and mass changes of the Southern Patagonia Icefield derived from TanDEM-X and SRTM data. *Remote Sensing*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs10020188>
- McNabb, R., Nuth, C., Käab, A., & Girod, L.** (2019). Sensitivity of glacier volume change estimation to dem void interpolation. *The Cryosphere*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.5194/tc-13-895-2019>
- Nilsson, J., Sandberg Sørensen, L., Barletta, V. R., & Forsberg, R.** (2015). Mass changes in arctic ice caps and glaciers: Implications of regionalizing elevation changes. *The Cryosphere*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.5194/tc-9-139-2015>
- Papasodoro, C., Berthier, E., Royer, A., Zdanowicz, C., & Langlois, A.** (2015). Area, elevation and mass changes of the two southernmost ice caps of the Canadian Arctic Archipelago between 1952 and 2014. *The Cryosphere*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1535-2015>
- Paul, F., Bolch, T., Briggs, K., Käab, A., McMillan, M., McNabb, R., Nagler, T., Nuth, C., Rastner, P., Strozzi, T., & Wuite, J.** (2017). Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the GLACIERS_CCI project. *Remote Sensing of Environment*, 203, 256–275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>