



# Inventario de glaciares de escombros intactos (activos e inactivos), pseudo-relictos y protalus ramparts. Cordones de La Ramada/Espinacito, Andes Centrales de San Juan, Argentina.

Forte Ana Paula <sup>a</sup>, Villarroel Cristian Daniel <sup>b</sup>, Tamburini Beliveau Guillermo <sup>c</sup>  
Morvillo Monica <sup>d</sup>, Navas Romina <sup>e</sup>, Ponce David <sup>f</sup>

<sup>a</sup> *Centro de Investigaciones de la Geosfera y Biosfera (CIGEOBIO), Centro de Ciencia y Técnica (CCT) San Juan, Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y CONICET, Argentina, anapau.forte@gmail.com.*

<sup>b</sup> *CIGEOBIO, CCT San Juan, UNSJ y CONICET, Argentina, cristiandv2001@yahoo.com.ar*  
<sup>c</sup> *Argentina, guillermo.tamburini@e-campus.uab.cat*

<sup>d</sup> *Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFy N), UNSJ, Argentina, mmorvillo@hotmail.com*

<sup>e</sup> *Departamento de Geología. FCEFy N, UNSJ, Argentina, navas.romina@gmail.com*

<sup>f</sup> *Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Centro de Investigaciones Científicas de la Provincia de Bueno Aires (CIC), CONICET, Argentina, david\_ponce736@hotmail.com*

**RESUMEN:** Los glaciares de roca intactos y protalus rampart, además de ser considerados importantes reservas de agua en estado sólido, brindan importante información sobre las características ambientales de las zonas en las que se desarrollan. Es por ello que conocer la distribución exacta de estos cuerpos y las características adecuadas donde se desarrollan y conservan son temas de especial relevancia, tanto en ámbitos científicos, como gubernamentales. En este trabajo se presenta un inventario de glaciares de escombros intactos, pseudo-relictos y protalus rampart en una región de los Andes Centrales de Argentina, cubriendo una superficie de estudio total de 2.085 km<sup>2</sup>. La metodología empleada se basa en la observación de imágenes satelitales ópticas, teniendo como fundamento criterios geomorfológicos. Además los glaciares de roca intactos fueron clasificados en activos e inactivos basado en criterios geomorfológicos y dinámicos basados en la confiable técnica de teledetección de Interferometría Diferencial en Radar de Apertura Sintética (DinSAR) sobre imágenes satelitales Sentinel-1. La zona de estudio se caracteriza por el desarrollo de permafrost y procesos criosféricos, tiene elevaciones muy importantes, incluyendo el cerro Mercedario (6.730 m s.n.m.). En la zona se han identificado 676 unidades de glaciares de escombros y protalus rampart, las cuales cubren un 3,83% del total de la superficie estudiada.

**PALABRAS CLAVE:** Glaciar de escombros intacto; Glaciar de escombros activo; Inventario de glaciares de escombros; DinSAR; Ambiente periglacial; Andes Centrales Argentinos

## 1 INTRODUCCIÓN

Los glaciares de escombros intactos (Barsch, 1996) (glaciares de escombros activos e inactivos) son considerados indicadores de permafrost de montaña (Barsch, 1996; Haeberli *et al.*, 2006) y también importantes reservas de agua en estado sólido (Azócar y Brenning, 2010; Jones *et al.*, 2018 y 2019). Lo mismo los protalus ramparts que también han sido considerados como expresiones de la reptación de permafrost (Barsch, 1996; Scapozza *et al.*, 2011). Mientras que los glaciares de escombros relictos son aquellos que han perdido en su totalidad el contenido de hielo, indicando condiciones desfavorables para el desarrollo de ambiente periglacial.

Como la zona de estudio muestra condiciones óptimas para la existencia de permafrost (Esper Angillieri, 2017; Villarroel *et al.*, 2018) y por la falta de información fiable para verificar la ausencia de permafrost y hielo en estas geofomas, es que se ha optado por llamar a estas geofomas como pseudo-relictas. Este término ha sido reconocido y definido como un tipo intermedio entre glaciares de roca relicto e inactivo, con parches de permafrost aislados localmente (Barsch, 1996; Colucci *et al.*, 2019).

Una de las maneras más comunes para clasificar glaciares de roca intactos como activos e inactivos es utilizando criterios geomorfológicos (Haeberli *et al.*, 2006; Esper Angillieri, 2017). Los cuales han demostrado cierta subjetividad (Villarroel *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2019). Y otra manera más precisa es utilizando criterios dinámicos (Roer y Nyenhuis, 2007). Sin embargo, estos suelen ser costosos y laboriosos en terreno. Sin embargo, en los últimos años, la reciente disponibilidad de imágenes satelitales basadas en tecnología SAR y el desarrollo de la técnica de interferometría, han permitido identificar glaciares de roca activos de manera precisa y eficiente a menores escalas de trabajo (Liu *et al.*, 2013; Barboux *et al.*, 2015; Callegari *et al.*, 2015 Wang *et al.*, 2017; Villarroel *et al.*, 2018).

Para el presente trabajo se aplica la metodología de mapeo con criterio geomorfológico y para la clasificación de glaciares de escombros intactos se aplica la técnica DinSAR que se nutre de datos de radar de apertura sintética (SAR). Y permite detectar y monitorear deformaciones superficiales desde escalas milimétricas a métricas en ámbitos puntuales, locales o regionales de la geografía terrestre. Entre las ventajas que presenta esta técnica, cabe mencionar la facilidad de procesamiento de los datos y la cada vez más creciente disponibilidad de los mismos de manera libre y gratuita. El procesamiento y los resultados DinSAR han sido presentados en detalle en Villarroel *et al.*, (2018).

El presente trabajo expone un original inventario de glaciares de escombros activos, inactivos, pseudo-relictos y protalus Rampart en una zona de trabajo de muy difícil acceso y escasamente estudiada.

### 1.1 Zona de Estudio

La zona de estudio está situada entre las coordenadas geográficas 31°45' y 32°20' de latitud Sur, y entre 69°40' y 70°20' de longitud oeste. La zona cubre una superficie total de 2.085 km<sup>2</sup> en los Andes Centrales Argentinos, en la provincia de San Juan. Forma parte del sistema hidrológico del río San Juan, el cual posee un caudal promedio de 56 m<sup>3</sup>/s y es el principal proveedor de agua del Valle del Tulum, sitio donde se concentra más del 90% de la población de la provincia con 681.055 habitantes (INDEC, 2010) y gran parte de las actividades productivas y económicas regionales (Fig. 1).

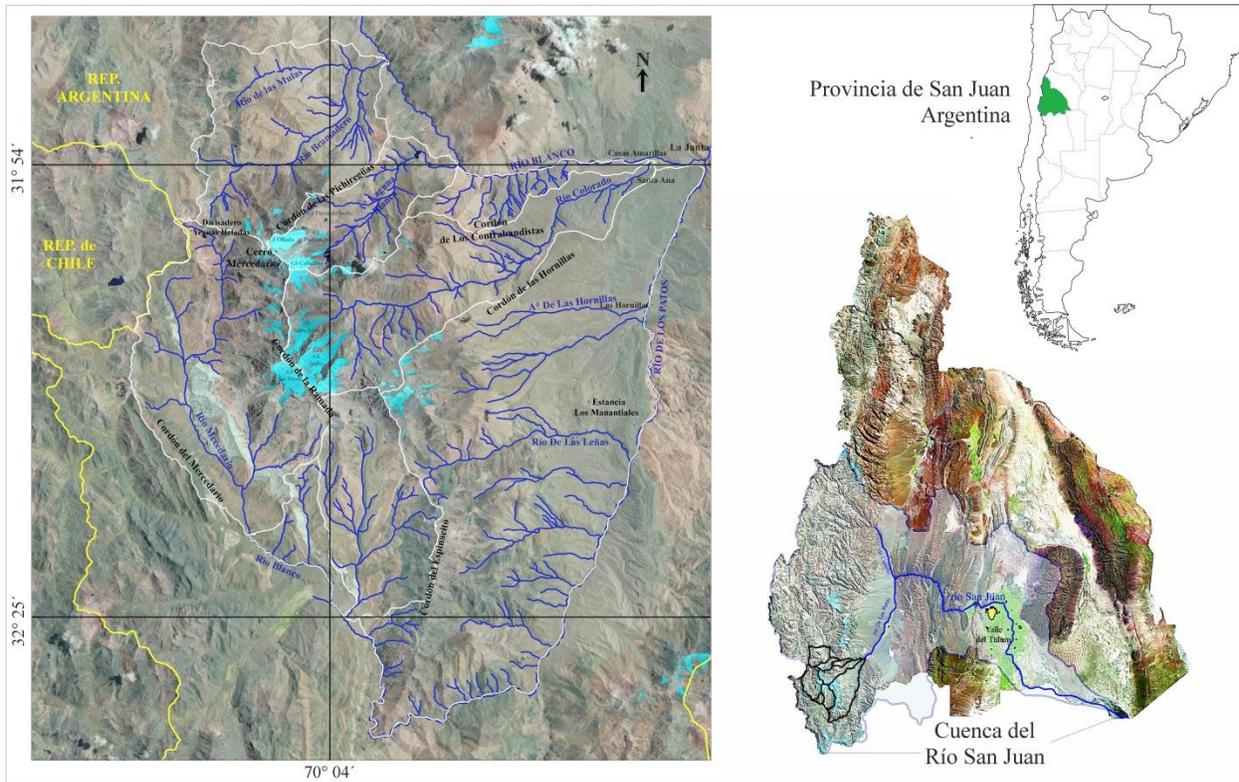


Figura 1. Área de estudio. En color celeste se resaltan los cuerpos de hielo, imagen LANDSAT 5.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Preparación de imágenes satelitales ópticas.

Las imágenes satelitales ópticas multi-espectrales utilizadas para la elaboración del inventario se detallan en la Tabla 1. Se trabajó en plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica) utilizando el sistema de proyección UTM y el software Quantum-GIS. Todas las imágenes fueron elegidas teniendo en cuenta su baja cobertura nival y nubosidad. También se utilizó como soporte visual Google Earth.

Tabla 1. Imágenes satelitales ópticas utilizadas

Satelite	Sensor	Fecha
Landsat 5	Thematic Mapper	28/03/96
Landsat 5	Thematic Mapper	23/02/07
Landsat 5	Thematic Mapper	07/03/11
Landsat 8	OLI	02/08/15
SPOT 5	HRG1	17/02/15
SPOT 5	HRG2	17/05/15
SPOT 7	BUNDLE	12/04/18

## 2.2 *Inventario de glaciares de escombros y protalus rampart* Título, autor y afiliación

Las geoformas fueron digitalizadas manualmente en plataforma SIG. Complementado con observaciones de campo en las cuencas del arroyo Laguna Blanca y del río Bramadero, ambas representan el 18 % del total de la superficie estudiada (2.085 km<sup>2</sup>).

Para los glaciares de roca intactos y pseudo-relictos, en general se reconocieron sin dificultad en el campo y en imágenes satelitales. Para cada geoforma se consideró como límite inferior, la parte más baja del talud frontal y lateral; y como límite superior se consideró la zona donde ocurre un cambio de pendiente entre la raíz y superficie de la geoforma (Roer y Neynhuis, 2007).

Los protalus rampart tienen un talud frontal y lateral bien definido; su eje longitudinal es perpendicular a la pendiente de los valles, es decir que generalmente se desarrollan en laderas. Su eje transversal es generalmente igual o mayor al eje longitudinal, por lo que en planta tienen formas más anchas que los glaciares de roca. No muestran desarrollo de crestas y surcos en su superficie. En varias ocasiones se encuentran superpuestos y muestran una inclinación del eje longitudinal hacia la pendiente del valle principal, en tal caso se lo ha considerado como glaciar de roca.

Para clasificar glaciares de escombros intactos se ha utilizado un inventario de glaciares de roca activos basado en la combinación de la técnica DinSAR sobre imágenes Sentinel-1 y en observaciones con imágenes ópticas SPOT de alta resolución espacial (Villarroel *et al.*, 2018).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 *Inventario de glaciares de escombros y protalus rampart*

En la zona se han identificado 676 unidades de glaciares de escombros y protalus rampart, las cuales cubren un 3,83% del total de la superficie estudiada (Fig. 2).

Los glaciares de escombros activos (n= 255) ocupan una superficie total de 56,19 km<sup>2</sup>. Mientras que los glaciares de escombros inactivos (n= 101) ocupan una superficie total de 13,45 km<sup>2</sup>. Los glaciares de escombros considerados pseudo-relictos ocupan una superficie total de 1,8 km<sup>2</sup> y se han identificado una cantidad n=15 de estas unidades. Y los protalus rampart son los más numerosos, con una cantidad n= 305 y cubren una superficie total de 8,54 km<sup>2</sup>.

### 3.2 *Comparación inventario de glaciares de escombros activos con método geomorfológico y dinámico*

Aprovechando que se cuenta con dos inventarios de glaciares de roca activos; se realizó una estimación de la incertidumbre que posee realizar un mapeo de glaciares de escombros activos basado únicamente en criterios geomorfológicos (Tabla 2).

Tabla 2. Imágenes satelitales ópticas utilizadas

G.E.A.	Cantidad	Superficie
Criterio Geomorfológico	208	44,48
Criterio Dinámico	255	56,05
Promedio	231,5	50,26
Varianza	552,25	33,47
Desviación Estandar	23,5	5,78

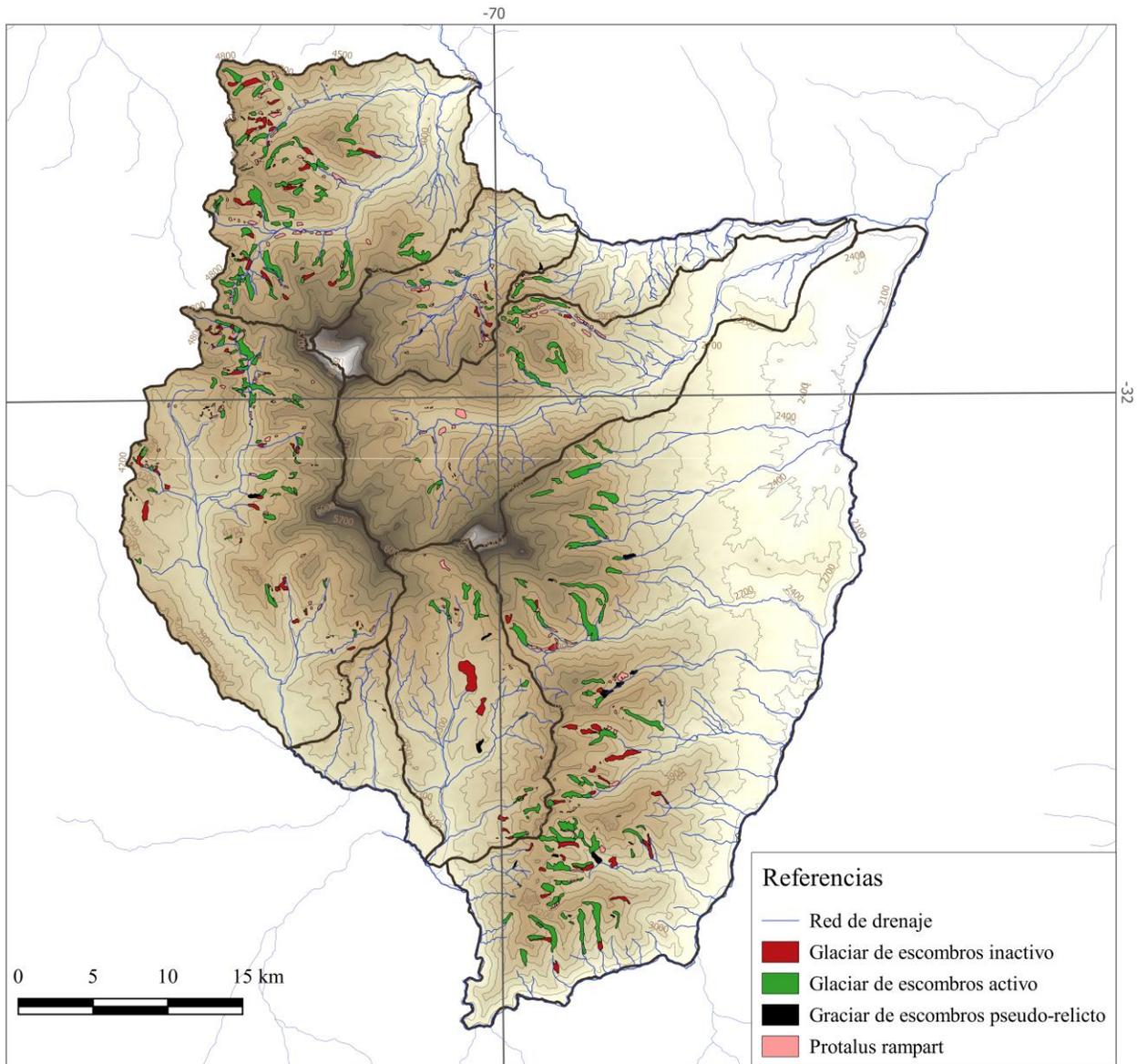


Figura 2. Inventario de glaciares de escombros activos, inactivos, pseudo-relictos y protalus Rampart en la zona de estudio.

#### 4 CONCLUSIONES

Se concluye que el uso de herramientas de teledetección facilitan la realización de inventarios de geformas del ambiente periglacial. La comparación de los criterios de mapeo dinámicos y morfológicos muestra que existe un importante grado de subjetividad y error en los mapeos geomorfológicos. En este caso, muchos de los glaciares determinados como activos por la técnica Din-SAR, habían sido considerados como inactivos por sus características geomorfológicas. Los glaciares de escombros activos son los que mayor superficie ocupan, es decir que en la zona existen características ambientales propicias para el desarrollo y conservación de ambiente periglacial y permafrost.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones abordadas han sido financiadas por el proyecto CICITCA 18/19 Código 21/E1115 de la UNSJ. Se agradece a CONAE por el suministro de imágenes SPOT.

## 6 REFERENCIAS

Azócar, G.F., Brenning, A., 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafr. Periglac. Process.* 21 (1), 42–53.

Barboux, C.; Strozzi, T.; Delaloye, R.; Wegmuller, U.; Collet, C., 2015. Mapping slope movements in alpine environments using Terrasar-X interferometric methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2015, 109, 178–192.

Barsch, D. (1996). *Rockglaciers. Indicators for the present and former geocology in High Mountain Environments.* Heidelberg: Springer Verlag

Callegari, M.; Cantone, A.; Cuzzo, G.; Defilippi, M.; Notarnicola, C.; Pasquali, P.; Riccardi, P.; Seppi, R.; Seppi, S.; Zucca, F. Combining Radarsat-2 and Cosmo-Skymed data for alpine permafrost deformation monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 26–31 July 2015*; pp. 5260–5263

Colucci R., Forte E., Žebec M., Maset E., Zanettini C., Guglielmin M., 2019. Is that a relict rock glacier? *Geomorphology*. Volume 330, Pag 177-189.

Esper Angillieri, M. Y., 2017. Permafrost distribution map of San Juan Dry Andes (Argentina) based on rock glacier sites; Pergamon-Elsevier Science Ltd; *Journal of South American Earth Sciences*; 73; 1-2017; 42-49

Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S., Vonder Muhll, D., 2006. Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes* 17, 575 189–214.

INDEC, 2010. Censo Nacional. Página Web: <https://www.indec.gov.ar/>

Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K., Selley, H.L., Wood, J.L., Betts, R.A., 2018. The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Glob. Planet. Chang.* 160 (Suppl. C), 123–142.

Jones et al., 2019: Rock glaciers and mountain hydrology: A review. March 2019 *Earth-Science Reviews* 193:66-90 DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.001

Liu, L.; Millar, C.I.; Westfall, R.D.; Zebker, H.A. 2013. Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: Inventory and a case study using InSAR. *Cryosphere* 2013, 7, 1109

Roer, I., Nyenhuis, M. 2007. Rockglacier activity studies on a regional scale: comparison of geomorphological mapping and photogrammetric monitoring. *Earth Surface Processes. Landforms* 32, 1747-1758.

Scapozza, C., C. Lambiel, L. Baron, L. Marescot, E. Reynard 2011. Internal structure and permafrost distribution in two alpine periglacial talus slopes, Valais, Swiss Alps. *Geomorphology* 132 (3–4), 208–221.

Villarroel, C.D.; Tamburini Beliveau, G.; Forte, A.P.; Monserrat, O.; Morvillo, M. DInSAR for a Regional Inventory of Active Rock Glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with Sentinel-1 Data. *Remote Sens.* 2018, 10, 1588.

Wang, X.; Liu, L.; Zhao, L.; Wu, T.; Li, Z.; Liu, G. Mapping and inventorying active rock glaciers in the northern Tien Shan of China using satellite SAR interferometry. *Cryosphere* 2017, 11, 997–1014.