

Resultados de la primera actualización del inventario provincial de glaciares del Sistema Hídrico del Río San Juan, Argentina

*Gabriela Álvarez Parma¹, Silvio Pastore¹, Carla Tapia Baldis²

¹ Gabinete de Estudios de Geocriología, Glaciología, Nivología y Cambio Climático. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de la Roza 590 (O), Complejo Universitario "Islas Malvinas", Rivadavia, J5402DCS, Argentina.

galvarez@unsj.edu.ar, sapastore@gmail.com

² Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Centro Científico Tecnológico-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Dr. Adrián Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, M5500 Mendoza, Argentina.

ctapia@mendoza-conicet.gob.ar

* Autora de correspondencia: galvarez@unsj.edu.ar

RESUMEN. En Argentina y en la provincia de San Juan, los glaciares y geoformas periglaciales están protegidos por la Ley Nacional 26.639 y por la Ley Provincial 1.076-L, respectivamente. Vigentes desde el año 2010, ambas leyes establecen la protección de glaciares y geoformas del ambiente periglacial, considerándolos reservas hídricas estratégicas de agua en estado sólido. A nivel local, el gobierno provincial es responsable de elaborar y mantener actualizado el inventario provincial como herramienta de gestión. En este trabajo, se presentan los resultados de la primera actualización del inventario provincial de glaciares para el Sistema Hídrico del río San Juan para el período 2015-2020. Se reconocieron 685 geoformas glaciales (glaciares descubiertos, manchones de nieve-glaciaretos, glaciares cubiertos y glaciares cubiertos con glaciares de escombros) y 3.227 geoformas periglaciales (en su mayoría glaciares de escombros), las que combinadas ocupan un área de $471,58 \pm 48,22$ km² y representan el 1,24% del área total del Sistema Hídrico del río San Juan. Se estimó un volumen de agua equivalente de $6,204 \pm 0,29$ km³ para las geoformas glaciales y de $2,177 \pm 0,42$ km³ para las geoformas periglaciales. Al comparar los resultados de esta actualización con los obtenidos en el año 2017, se observa que la superficie ocupada por glaciares descubiertos disminuyó en un 18,74% y en un 65,15% para el caso de los manchones de nieve-glaciaretos. Respecto de la evaluación de la calidad del inventario, se aplicaron los lineamientos según la norma ISO 19.157 y se determinaron índices de omisiones, comisiones e incertidumbre durante el mapeo y la digitalización. El trabajo realizado contribuye, en primera instancia, al cumplimiento del marco regulatorio provincial, además de aportar al conocimiento del estado actual de la criósfera y su evolución en los últimos años.

Palabras clave: Inventario, Glaciares, San Juan, Andes Centrales, Argentina.

RESUMEN. Results of the first update of the Provincial Glacier Inventory for the San Juan River Hydrological System, Argentina. In Argentina, and specifically in the Province of San Juan, glaciers and periglacial landforms are protected under National Law No. 26,639 and Provincial Law No. 1,076-L, respectively. Both laws, in force since 2010, establish the protection of glaciers and periglacial environment landforms, recognizing them as strategic water reserves in solid state. At the local level, the provincial government is responsible for assembling and keeping the provincial inventory up to date as a management tool. This study presents the results of the first update of the Provincial Glacier Inventory for the San Juan River Hydrological System for the period 2015-2020. In this update, 685 glacial landforms (clean-ice glaciers, snow patches-glacierets, debris-covered glaciers, and debris-covered glaciers with rock glaciers) and 3,227 periglacial landforms (mostly rock glaciers) were identified, which collectively cover an area of 471.58 ± 48.22 km²

and represent 1.24% of the total area of the San Juan River Hydrological System. The estimated water equivalent volumes were $6.204 \pm 0.29 \text{ km}^3$ (stored in glacial landforms) and $2.177 \pm 0.42 \text{ km}^3$ (stored in periglacial landforms). By comparing these results with those obtained in 2017, it is observed that the area occupied by clean-ice glaciers decreased 18.74%, and the area covered by snow patches-glacierets decreased 65.15%. For the assessment of inventory quality, guidelines established by ISO Standard 19,157 were applied, with the omission, commission, and uncertainty indices determined during the mapping and digitization processes. This work primarily contributes to compliance with the provincial regulatory framework, enhancing our understanding of the current state of the cryosphere and its evolution in recent years.

Keywords: Inventory, Glaciers, San Juan, Central Andes, Argentina.

1. Introducción

En el año 2010, el Congreso Argentino aprobó el “Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial” (Ley Nacional 26.639), que da lugar a la implementación de diversas herramientas para la identificación, caracterización, protección, gestión y monitoreo de estas geoformas. El inventario nacional de glaciares (ING) es una de esas herramientas. A nivel nacional, el organismo encargado de este inventario es el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), cuyos primeros resultados fueron publicados oficialmente en el año 2018 con base en información satelital recopilada entre 2009 y 2010. Dicho inventario identificó y clasificó 16.078 glaciares y geoformas periglaciales a lo largo de toda la cordillera de los Andes en Argentina (Zalazar *et al.*, 2020).

A nivel local, en la provincia de San Juan, bajo la normativa de la “Ley Provincial de Protección de Glaciares” (Ley Provincial 1076-L), se desarrolló el primer inventario local considerando toda la extensión del territorio provincial. Esto se efectuó mediante un convenio entre la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y el Gobierno Provincial, finalizado en 2017. El inventario utilizó como base imágenes satelitales obtenidas entre los años 2013 y 2015. La actualización periódica de estos inventarios es clave para disponer de información detallada sobre la distribución de glaciares y geoformas periglaciales, evaluar el estado de la criósfera y abordar de manera integrada las problemáticas locales asociadas a los recursos hídricos (Zalazar *et al.*, 2020).

La provincia de San Juan se inserta en la Diagonal Árida Sudamericana, donde la mayoría de los sistemas fluviales dependen del aporte de la fusión nival, con máximos de descarga que se inician generalmente entre octubre y noviembre (Masiokas *et al.*, 2006; Lauro *et al.*, 2018). En las últimas décadas, la

combinación de precipitaciones deficitarias, el aumento de las temperaturas y las elevadas tasas de evaporación han agravado la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos (Rivera *et al.*, 2021). Esta tendencia se proyecta también para las próximas décadas, incluso bajo escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero (Blunden *et al.*, 2024).

La persistente falta de precipitación registrada entre 2010 y comienzos de 2024, conocida como “mega sequía” en la zona central de Chile y Argentina (Garreaud *et al.*, 2020; Rivera *et al.*, 2021), ha tenido impactos dramáticos en la hidrología de la provincia, evidenciados en la reducción de los caudales de los ríos y arroyos afluentes del río San Juan durante el período 2019-2023 (Mendoza *et al.*, 2024). Entre los factores asociados se destaca la disminución en la duración y extensión de los mantos de nieve estacionales, junto con el incremento de las temperaturas medias del aire (Malmros *et al.*, 2018; Saavedra *et al.*, 2018; Zazulie *et al.*, 2018; Masiokas *et al.*, 2020). En este contexto, numerosos estudios han documentado un patrón generalizado de retroceso y pérdida de masa glaciar en la zona durante las últimas décadas (Bown *et al.*, 2008; Malmros *et al.*, 2016; Barcaza *et al.*, 2017; Farías-Barahona *et al.*, 2020; Ferri *et al.*, 2020; Pitte *et al.*, 2022). En particular, se ha observado una respuesta diferencial según el tipo de glaciar, con pérdidas de masa más pronunciadas en glaciares descubiertos y parcialmente cubiertos, y valores menores o cercanos al equilibrio en glaciares con coberturas de escombros más desarrolladas (Bolch *et al.*, 2019).

Este escenario de escasez hídrica, intensificado por el cambio climático y la persistencia de condiciones de sequía, resalta la necesidad de cuantificar y caracterizar los aportes de los distintos componentes de la criósfera para una gestión integrada de los recursos hídricos. En este contexto, resulta fundamental contar con inventarios glaciares actualizados y consistentes, que permitan identificar y clasificar glaciares y

geoformas periglaciales, además de estimar su volumen de hielo y su contenido de agua equivalente. En consecuencia, en este trabajo se presentan los resultados de la primera actualización del inventario provincial de glaciares para el Sistema Hídrico del río San Juan (IPGSHRSJ2022) (Gobierno de la Provincia de San Juan *et al.*, 2022), finalizado en 2022, para el período 2015-2020, correspondiente a la actualización del inventario publicado en 2017 (IPGSHRSJ2017) (Gobierno de la Provincia de San Juan *et al.*, 2017). Esta actualización incorpora estimaciones de volúmenes de hielo y de contenidos de agua equivalente para las geoformas inventariadas, lo que aporta información clave y de utilidad para la evaluación del rol de estos componentes en un contexto de escasez hídrica.

2. Área de estudio

El área de interés considerada para la actualización del inventario corresponde a la denominada “área de aporte del río San Juan”. Esta se ubica dentro de los límites administrativos de la provincia homónima, entre las latitudes 30,3°-32,6° S y longitudes 69,4°-70,6° O.

La cuenca hidrográfica del río San Juan es la de mayor importancia en la provincia por su tamaño y uso. En efecto, el río San Juan drena el extenso frente cordillerano, que representa aproximadamente el 45% de la superficie total del territorio de la provincia, y su derrame promedio anual es de 1,8 km³ (período 1909-2022) en función de los valores de caudal derivados de las estaciones de medición ubicadas en su cauce (Departamento de Hidráulica, Gobierno de San Juan). Sobre dicho sistema hídrico se asienta un poco más del 92% de la población total de la provincia, según el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (INDEC, 2022), y se localizan también los oasis irrigados y productivos de los valles de Calingasta, Ullum, Zonda y Tulum. La cuenca hidrográfica del río San Juan se divide en cinco subcuencas, las cuales, consideradas de mayor a menor jerarquía en extensión, son las siguientes: Río Castaño, Río de Los Patos Inferior, Río Blanco, Río de Los Patos Superior y Río Calingasta (Fig. 1). Las cinco subcuencas cubren una superficie total de 21.673,65 km², lo que representa el 57,14% del área total del Sistema Hídrico del río San Juan (37.928,78 km²) (Recursos Hídricos, 2010).

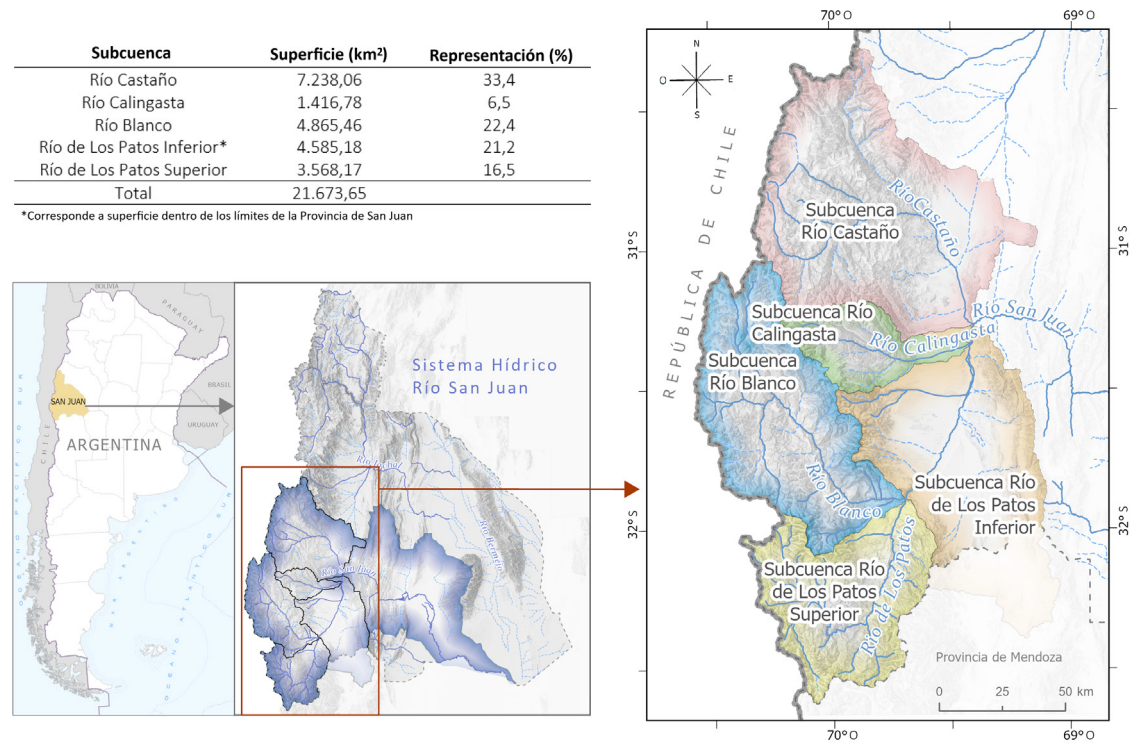


FIG. 1. Ubicación del Sistema Hídrico del río San Juan en la provincia homónima. Se incluye también la ubicación de las subcuencas en el área de aporte, así como sus superficies (km²) y porcentaje relativo (%).

Desde el punto de vista morfoclimático, el área de estudio pertenece al segmento sur de los Andes Centrales, donde la altitud media es del orden de los 3.500 m s.n.m., con varias cumbres que superan los 6.000 m s.n.m. (Lliboutry, 1998). El clima está caracterizado por un régimen estacional bien definido, con un marcado máximo de precipitaciones durante los meses fríos (abril a octubre) y escasas precipitaciones durante la estación cálida (noviembre a marzo). Esto es debido a la actividad del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) al oeste de la región. El APS cambia de posición entre los 35° S (durante el verano austral) y los 25° S (durante el invierno austral), controlando de esta manera la estacionalidad de las precipitaciones (Aceituno, 1988; Garreaud, 2009). Debido a lo prominente de la topografía del frente andino y a su marcada elongación norte-sur, una fracción menor de esta humedad alcanza las zonas más bajas hacia el este. A su vez, la influencia del APS es modulada por los patrones climáticos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), los cuales actúan a escalas interanuales y decadales, respectivamente (Garreaud, 2009). Ambos fenómenos incrementan la tasa de precipitación en los Andes Centrales durante su fase cálida (Aceituno, 1988; Montecinos y Aceituno, 2003).

En relación con el marco morfotectónico, el área de estudio se ubica dentro del segmento de subducción horizontal de la placa de Nazca, que va desde los 27° a los 33,5° S, caracterizado por la ausencia de volcanismo activo desde el Mioceno Tardío y por intensa actividad sísmica (*e.g.*, Jordan *et al.*, 1983). Esta última se encuentra expresada por importantes fallas activas y por el desarrollo de un frente tectónico que pliega los depósitos cuaternarios (Ramos, 1997). La región comprende dos grandes provincias geológicas: Cordillera Frontal y Cordillera Principal (Ramos, 1997).

3. Metodología

3.1. Nomenclatura

A solicitud del Gobierno de la Provincia, para la confección del inventario se consideraron los lineamientos generales y las definiciones operativas de IANIGLA para la identificación, clasificación y caracterización de glaciares y geoformas periglaciales (IANIGLA-CONICET, 2010, 2014), así como las pautas establecidas en el Plan de Actualización

(IANIGLA-CONICET, 2019). Las geoformas de interés consideradas fueron, en consecuencia, las siguientes:

- Glaciar descubierto (GD): cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recrystalización de la nieve y/o hielo, sin cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años y con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morrenas medias).
- Manchón de nieve-glaciarete (MN): cuerpo de hielo o nieve permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recrystalización de la nieve y/o hielo, sin cobertura detrítica significativa, que sea reconocible por períodos de al menos 2 años y que no presente evidencias de movimiento por gravedad.
- Glaciar cubierto (GC): cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recrystalización de la nieve y/o hielo, con cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años y con evidencias de movimiento por gravedad.
- Glaciar de escombros (GE): cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por gravedad y deformación plástica del permafrost, producto de procesos criogénicos asociados con suelo permanentemente congelado y hielo subsuperficial, o bien con hielo proveniente de glaciares descubiertos y cubiertos. Se incluyen dentro de esta categoría los protalus (rampart o lobe), ya que no es factible su diferenciación empleando únicamente imágenes satelitales. Se conocen también como glaciares de roca. Las unidades identificadas se digitalizaron considerando la huella restringida (sin incluir el talud frontal y lateral). Luego, en función de las características superficiales y pendientes estimadas de sus respectivos frentes, se clasificaron como activos e inactivos.
- Glaciar cubierto con glaciar de escombros (GCGE): dado que en los Andes Centrales es común que un sector de hielo cubierto por detritos se transforme gradualmente en un glaciar de escombros, IANIGLA-CONICET (2010, 2014) propusieron una categoría intermedia denominada glaciar cubierto con glaciar de escombros. Esta categoría incluye las porciones de hielo cubierto y los glaciares de escombros desarrollados a sus costados o en su porción terminal.

3.2. Datos utilizados

3.2.1. Imágenes satelitales

Como base para la digitalización de las geoformas de interés, se utilizaron, en primera instancia, imágenes satelitales obtenidas de los programas SPOT-6, SPOT-7 y Sentinel-2. La cobertura de imágenes SPOT fue provista por la Conae (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) para los meses de febrero a mayo del año 2018. Las imágenes fueron solicitadas bajo el nivel de procesamiento L2A con sus bandas fusionadas (imágenes ortorectificadas). Estas imágenes fueron utilizadas también como referencia general de georreferenciación, teniendo en cuenta su extensión, nivel de detalle y exactitud posicional. Dada la resolución espacial de las mismas (1,5 m) se utilizaron principalmente para la digitalización de los contornos de glaciares cubiertos (GC), glaciares de escombros (GE) y glaciares cubiertos con glaciares de escombros (GCGE). En tanto, para la digitalización de los contornos de los glaciares descubiertos (GD) y manchones de nieve-glaciaretos (MN), se utilizaron las imágenes Sentinel-2 (resolución espacial 10 m; nivel de procesamiento L1C) para el 24 de marzo del año 2020. Esta fecha se escogió debido a que la primera actualización del inventario se requería para el año 2020, sumado a que las geoformas GD y MN corresponden a aquellas de mayor variabilidad espacial. La interpretación de rasgos morfológicos particulares y de movimiento de las geoformas se realizó con el apoyo de los servicios Google Earth y SASPlanet. Los detalles técnicos de todas las imágenes utilizadas se especifican en el Apéndice (A1).

3.2.2. Modelo digital de elevación

Para el cálculo de los parámetros físicos de los glaciares y geoformas periglaciales, se utilizó como base el modelo digital de elevaciones MDE-Ar v2.0, elaborado y publicado por el Instituto Geográfico Nacional de Argentina (IGN, 2019). Este modelo está vinculado al Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (SRVN16), posee una resolución espacial de ~30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 m.

3.3. Criterios de identificación de geoformas

Las geoformas de interés para el inventario se digitalizaron a partir de la fotointerpretación de sus

contornos sobre las imágenes satelitales, considerando cada categoría como un polígono individual. Todas las tareas de digitalización y edición fueron realizadas bajo el entorno de un Sistema de Información Geográfico de libre distribución y código abierto (QGIS 3.10.1). En el inventario se consideraron todas las geoformas de áreas iguales o superiores a 0,01 km², el cual corresponde al umbral estándar para la mayoría de los inventarios de glaciares en el país (IANIGLA-CONICET, 2014, 2019). De manera particular, respecto de las geoformas GD y MN se consideraron también aquellas de áreas inferiores a 0,01 km², que en la versión original del inventario (IPGSHRSJ2017) no se habían considerado, a modo de continuar su observación y registro en el tiempo. Las geoformas GD y MN se digitalizaron sobre las imágenes Sentinel-2, mientras que las geoformas GC, GE y GCGE sobre las imágenes SPOT-6 y SPOT-7, ambas a partir de la interpretación visual de los rasgos morfológicos (IANIGLA-CONICET, 2014, 2019; Brardinoni *et al.*, 2019; RGIK, 2020).

3.4. Base de datos del inventario

La base de datos del inventario contempló los atributos que se indican en la tabla 1. Los mismos fueron considerados según los lineamientos nacionales (IANIGLA-CONICET, 2014) para cada polígono individual y a ellos se sumaron los correspondientes a las validaciones realizadas y el cálculo del volumen estimado de agua equivalente.

3.5. Evaluación de calidad

Para la estimación de la calidad de la primera actualización del inventario provincial de Glaciares del Sistema Hídrico del Río San Juan (IPGSHRSJ2022), se siguieron los lineamientos planteados por la norma ISO 19.157 de Calidad de Datos Espaciales, considerando los componentes de compleción (omisiones y comisiones) y exactitud temática (corrección de la clasificación según el tipo de geoforma y exactitud de las áreas) (Ariza-López, 2013; ISO, 2013; Álvarez Parma, 2021). Como datos de contraste para realizar la evaluación se contemplaron verificaciones realizadas en terreno, mapeos fotográficos aéreos y digitalizaciones realizadas por tres diferentes especialistas (geólogos capacitados en el manejo de herramientas GIS e identificación de crioformas).

TABLA 1. ATRIBUTOS CONSIDERADOS EN LA BASE DE DATOS DE LA PRIMERA ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO.

Parámetros generales	Clasificación	Parámetros físicos	Otros parámetros
Provincia	Clasificación primaria	Coordenadas***	Nombre sensor IB
Cuenca	Forma	Área	Fecha imagen IB
Subcuenca	Frente	Altitud máxima	Nombre sensor IA
Código cuenca	Perfil longitudinal	Altitud media	Fecha imagen IA
ID_local_2020	Fuente de alimentación	Altitud mínima	Tipo validación
ID_local_2017	Actividad de la lengua	Pendiente media	Fecha validación
Tipo de geoforma*	Cobertura de la Lengua	Orientación	Volumen estimado de agua equivalente (km ³)
ID_GLIMS	Origen GE		ID_Unidad
Nombre común	Actividad GE**		
	Forma GE		
	Estructura I		
	Estructura II		

*GD: glaciar descubierto; MN: manchón de nieve-glaciarete; GC: glaciar cubierto; GE: glaciar de escombros; GCGE: glaciar cubierto con glaciar de escombros.

**Actividad clasificada de acuerdo con su geomorfología.

***Coordenadas del centroide de cada polígono expresadas en latitud y longitud.

IB: imagen base; IA: imagen de apoyo.

Las tareas de verificación en terreno fueron realizadas para la versión original del inventario (IPGSHRSJ2017) y luego se ampliaron para los años 2018 a 2022. Las geoformas para validar fueron seleccionadas teniendo en cuenta la accesibilidad y la logística necesaria (según la complejidad del terreno, los recursos económicos disponibles y la seguridad del personal que participaría en las campañas). En paralelo, en abril de 2018 y 2019, se realizaron vuelos en helicóptero (con la colaboración de la Dirección Provincial de Aeronáutica a partir de gestiones realizadas por el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de la provincia de San Juan) con el objeto de obtener registros fotográficos de geoformas particulares y realizar trabajos de reconocimiento. Las fotografías permitieron efectuar evaluaciones referidas a la compleción y exactitud temática, aunque de manera acotada debido a las limitantes expuestas arriba.

La evaluación de la exactitud de la digitalización de las geoformas inventariadas se realizó siguiendo las recomendaciones de Paul *et al.* (2017), sumado a los lineamientos de la norma ISO 19.157 en cuanto a la selección de áreas de muestreo de manera aleatoria y estratificada. Esta última considera áreas para evaluar según la probabilidad de ocurrencia de los distintos tipos de geoformas en función de la altitud, las diferentes condiciones de localización y los diferentes rangos de áreas. La evaluación se extendió a un total

de 399 geoformas (GD: 28, MN: 92, GC: 5; GE: 259; GCGE: 15). Para evaluar la incertidumbre en las áreas determinadas, se compararon aquellas del inventario con las digitalizaciones realizadas por los diferentes especialistas, calculadas mediante desviaciones estándar y expresadas como porcentajes. Luego, se determinó una función de ajuste de área para cada tipo de geoforma (Paul *et al.*, 2017), con el objeto de aplicarla al resto de las geoformas del inventario y estimar, de esa manera, la incertidumbre total.

3.6. Estimación del volumen de hielo y agua equivalente

La estimación del volumen de hielo se basó en la fórmula propuesta por Chen y Ohmura (1990), la cual aproxima el espesor de cada glaciar en relación con su superficie (Tabla 2). Este espesor se multiplicó por el área determinada en la digitalización siguiendo la propuesta utilizada en el inventario IPGSHRSJ2017, ajustada al inventario público de glaciares de Chile (DGA, 2022). Para las geoformas GD, MN y GC, se asumió que están constituidas enteramente por hielo. Respecto de las geoformas GCGE, en cambio, se consideró un factor de 90% (es decir, el volumen equivalente de hielo es un 90% de su volumen calculado); mientras que para la geoforma GE el factor aplicado fue de un 60% para aquellos glaciares clasificados como activos, esto último en función de

TABLA 2. CRITERIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE HIELO Y DE AGUA EQUIVALENTE PARA CADA GEOFORMA.

Tipo de geoforma	Espesor (km)	Volumen (km ³)	Volumen de agua equivalente (km ³)
GD-MN-GC	$E=28,5 \times \text{Área}^{0,357}$	$V=E \times \text{Área}$	$\text{VolEq}=V \times 0,9$
GCGE			$\text{VolEq}=V \times 0,9 \times 0,9$
GE (activos)			$\text{VolEq}=V \times 0,9 \times 0,6$
GE (inactivos) - Protalus			$\text{VolEq}=V \times 0,9 \times 0,4$

Nota: Abreviaciones según tabla 1.

las escasas mediciones existentes en la región (Croce y Milana, 2002; Monnier y Kinnard, 2013; Hilbich et al., 2022; Mathys et al., 2022; Pastore et al., 2022). Dentro de la categoría GE, se consideró un factor de 40% para los glaciares de escombros inactivos y protalus. Finalmente, para el cálculo del volumen de agua equivalente se consideró una densidad promedio del hielo de 0,9 g/cm³ (Tabla 2). Las incertidumbres de los volúmenes se calcularon con base en las incertidumbres estimadas para las áreas.

4. Resultados

4.1. Inventario de geoformas

En este trabajo se inventariaron un total de 3.912 glaciares y geoformas periglaciales, las cuales en conjunto cubren una superficie de 471,58±48,22 km² (Figura 2; Tabla 3). Estas geoformas ocupan una proporción reducida del área total de las subcuencas analizadas. En la subcuenca del Río Castaño representan el 1,1%; en la del Río Calingasta, el 3,8%; en la del Río Blanco, el 3,6%; en la del Río de Los Patos Inferior, el 0,5%; y en la del Río de Los Patos Superior, el 3,9%. Las geoformas de tipo GD, MN, GC y GCGE representan el 43,5% del área total inventariada, mientras que las de tipo GE el 56,5% restante. Estas últimas son las geoformas más predominantes en el área de interés, tanto en cantidad como en área (Fig. 2; Tabla 3).

GD: Glaciar descubierto; MN: Manchón de nieve-glaciarete; GC: Glaciar cubierto; GE: Glaciar de escombros; GCGE: Glaciar cubierto con glaciar de escombros.

4.2. Áreas de las geoformas inventariadas

El área de las geoformas inventariadas varía individualmente entre 0,005 y 8,77 km², con un valor

medio de 0,12 km² (Tabla 4). Las geoformas GD presentan la mayor variabilidad de área inventariada y las MN, la menor. Las áreas medias son mayores para las geoformas GCGE, seguidas por las geoformas GD y GC.

Si se consideran rangos de áreas, la mayor cantidad de geoformas (2.072) tienen tamaños entre 0,01 y 0,05 km²; no obstante, el área acumulada es máxima para el intervalo de 0,10-0,50 km² (Fig. 2D) que representa Abreviaciones según tabla 1 el ~36% del área total mapeada. Las geoformas de áreas inferiores a 0,10 km² corresponden al 75,8% del total de geoformas inventariadas, sin embargo, la suma de sus áreas solo representa el 21,8% del área total inventariada (Fig. 2D).

Al desglosar el área total según tipo de geoforma y rango de área (Fig. 3), se observa que GE son las geoformas de mayor área acumulada entre 0,01 y 1 km². Entre 0,1 y 1 km², GCGE o GD es el segundo tipo de geoforma predominante; entre 1 y 5 km², GE se reduce drásticamente; y sobre 5 km², predominan las geoformas de tipo GD. Las áreas inventariadas menores a 0,01 km² corresponden mayormente a MN.

4.3. Altitudes y pendientes de las geoformas inventariadas

La altitud de las geoformas inventariadas varía entre 3.176 y 6.695 m s.n.m., con un valor medio de 4.256 m s.n.m. (Fig. 4; Tabla 5). Las geoformas GD se localizan, en su mayoría, por encima de los 4.500 m s.n.m, mientras que las MN lo hacen entre los 4.192 y los 6.384 m s.n.m., y predominan sobre los 4.800 m s.n.m. Las geoformas GC se ubican entre los 4.096 y los 5.087 m s.n.m., las GCGE entre los 3.545 y los 5.548 m s.n.m. y las GE mayormente por encima de los 3.800 m s.n.m., y desaparecen por encima de los 5.295 m s.n.m.

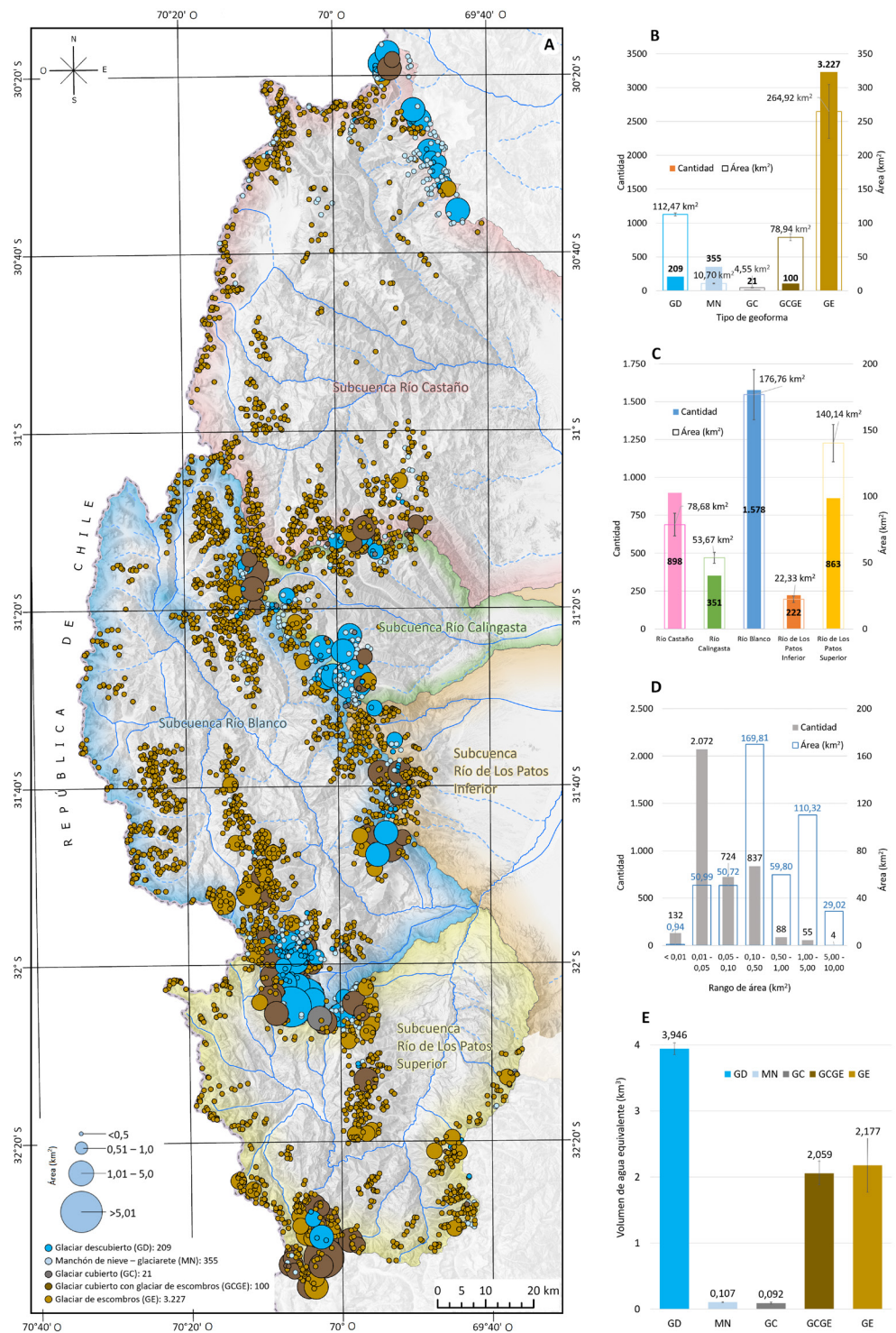


FIG. 2. A. Ubicación de las geoformas inventariadas, agrupadas por tipología y rango de área. B. Cantidad y área de geoformas inventariadas, individualizadas por geoforma. C. Cantidad y área de geoformas inventariadas, individualizadas por subcuenca. D. Cantidad y área de geoformas inventariadas, individualizadas según superficie. E. Volumen estimado de agua equivalente, individualizado por geoforma.

TABLA 3. CANTIDAD Y ÁREA (KM²) DE GEOFORMAS INVENTARIADAS SEGÚN CUENCA Y TIPO DE GEOFORMA.

Subcuenca		Tipo de geoforma					Total
		GD	MN	GC	GCGE	GE	
Río Castaño	Cantidad	30	113	0	11	744	898
	Área (km²)	19,53±0,38	4,22±0,22	0	6,45±0,44	48,48±7,53	78,68±8,57
Río Calingasta	Cantidad	38	74	4	14	221	351
	Área (km²)	23,59±0,43	1,89±0,12	0,40±0,08	8,57±0,59	19,22±2,88	53,67±4,10
Río Blanco	Cantidad	73	89	5	29	1.382	1.578
	Área (km²)	44,06±0,81	2,51±0,15	1,59±0,20	19,28±1,31	109,32±16,49	176,76±18,96
Río de Los Patos Inferior	Cantidad	19	20	4	6	173	222
	Área (km²)	5,34±0,15	0,44±0,03	0,31±0,06	2,85±0,20	13,39±2,05	22,33±2,49
Río de Los Patos Superior	Cantidad	49	59	8	40	707	863
	Área (km²)	19,95±0,42	1,64±0,10	2,25±0,28	41,79±2,63	74,51±10,67	140,14±14,10
Total	Cantidad	209	355	21	100	3.227	3.912
	Área (km²)	112,47±2,19	10,70±0,62	4,55±0,62	78,94±5,17	264,92±39,62	471,58±48,22

TABLA 4. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS ÁREAS DE CADA TIPO DE GEOFORMA INVENTARIADA.

Parámetro*	Tipo de geoforma				
	GD	MN	GC	GCGE	GE
Mínimo	0,01	0,005	0,01	0,02	0,01
Máximo	8,77	0,45	1,30	6,05	1,82
Media	0,54	0,03	0,22	0,79	0,08
Mediana	0,10	0,01	0,08	0,49	0,04
Desviación estándar	1,20	0,05	0,31	0,87	0,12

*Valores en km².

Las distribuciones de las áreas mapeadas agrupadas por rangos de altitud muestran valores de áreas muy bajos para elevaciones <3.500 y >6.400 m s.n.m. (Fig. 4). Estos valores varían en función del tipo de geoforma (Fig. 4). La máxima superficie cubierta por geoformas del ambiente glacial se ubica entre los 5.400 y 5.500 m s.n.m., mientras que entre los 4.100 y 4.200 m s.n.m. se ubica el máximo cubierto por geoformas del ambiente periglacial. Con respecto al análisis de pendientes, los valores extremos se registraron para las geoformas GD y MN, mientras que el promedio más bajo se calculó para la geoforma GCGE (Fig. 5).

4.4. Orientaciones de las geoformas inventariadas

Las orientaciones medias de las geoformas inventariadas se distribuyen de la siguiente manera: sureste (23%), sur (23%), este (14%), suroeste (12%), noreste (10%), oeste (7%), norte (6%) y noroeste (5%) (Fig. 6A). Al analizar la distribución del área inventariada según la orientación media asignada a cada geoforma, se observa que el 22% se orienta hacia el sureste, 18% al este, 17% al sur, 13% al noreste, 12% al suroeste, 7% al oeste, 6% al norte y 5% al noroeste (Fig. 6B). Si se desglosan las orientaciones por tipo de geoforma, los GD y MN se orientan

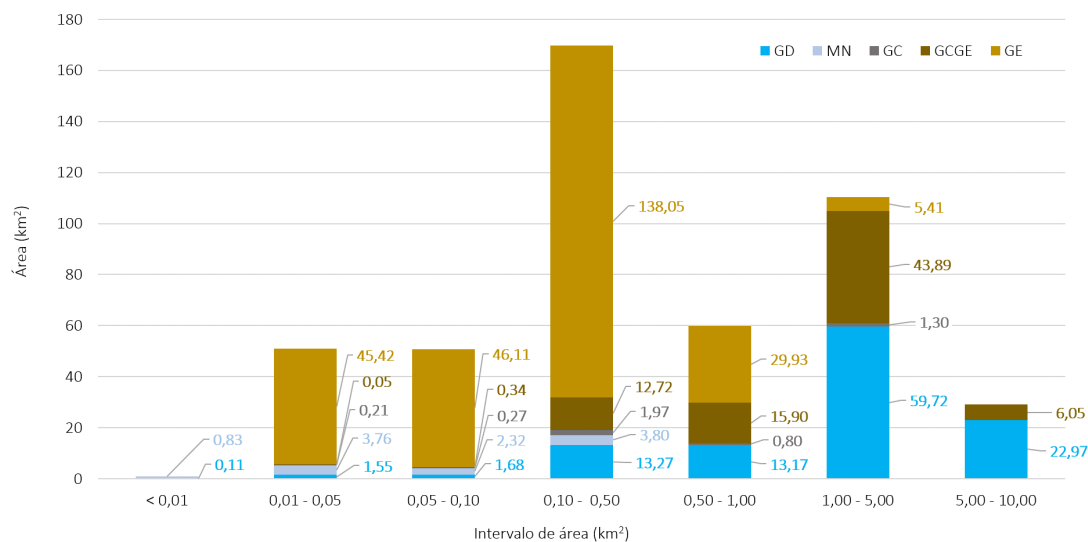


FIG. 3. Área acumulada de geoformas inventariadas discriminadas por intervalo de área y tipo de geoforma. Abreviaciones según figura 2.

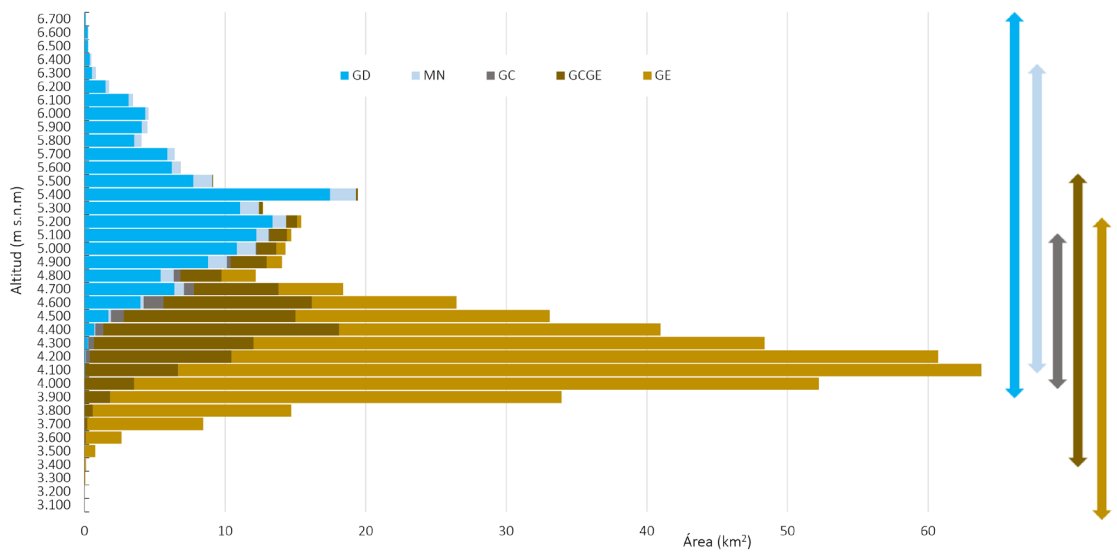


FIG. 4. Hipsometría de geoformas inventariadas, individualizadas según tipo.

TABLA 5. ALTITUDES DE GEOFORMAS INVENTARIADAS.

Altitud*	Tipo de geoforma					General
	GD	MN	GC	GCGE	GE	
Mínima	4.036	4.192	4.096	3.545	3.176	3.176
Máxima	6.695	6.384	5.087	5.548	5.295	6.695
Media	5.139	5.153	4.594	4.450	4.091	4.256

*Valores en m s.n.m.

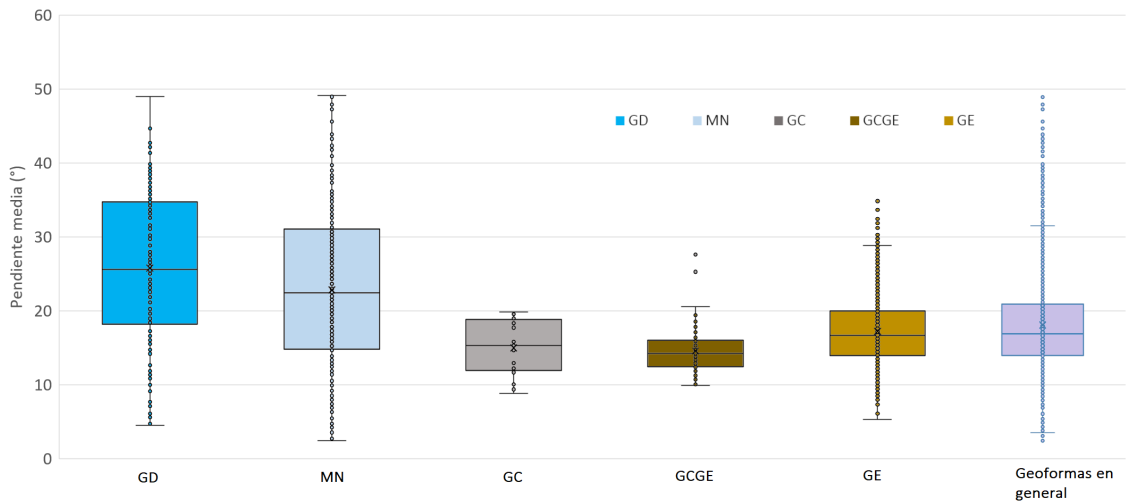


FIG. 5. Diagramas de caja y bigotes para las pendientes medias de las geoformas inventariadas y para el total de geoformas.

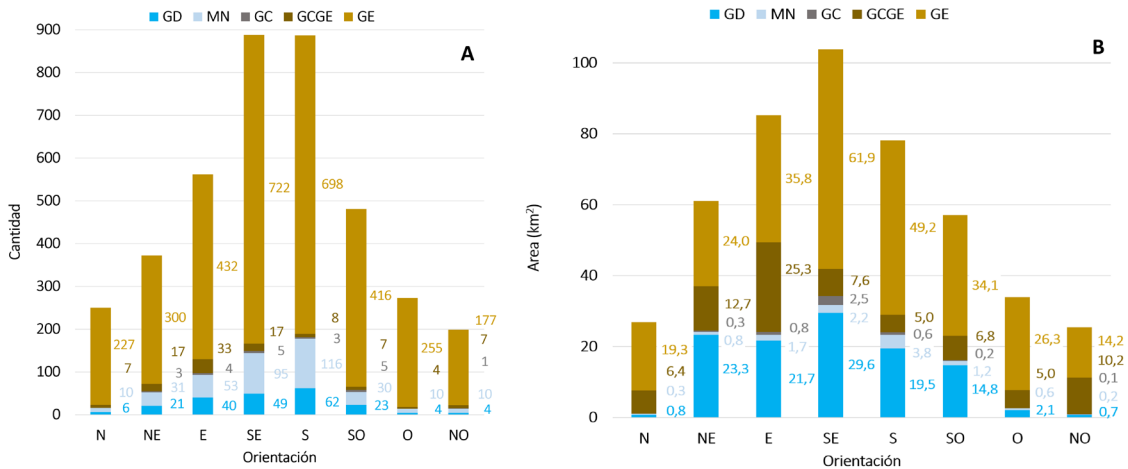


FIG. 6. Orientación de geoformas con respecto a ocho cuadrantes. A. Por cantidad. B. Por área.

predominantemente hacia el sur y sureste, los GC hacia el sureste y suroeste, los GCGE hacia el este y los GE hacia el sur y sureste (Fig. 6).

4.5. Distribución de las geoformas inventariadas según latitud, altitud y área

Al considerar la altitud media de cada geoforma, se observan valores que fluctúan entre los 3.534 y 6.662 m s.n.m. (Fig. 7). Las geoformas GD y MN se ubican por encima de los 4.492 y 4.207 m s.n.m., respectivamente, mientras que el resto de las geoformas predomina a altitudes más bajas.

Las geoformas de mayores dimensiones ubicadas a mayor altitud corresponden a las de tipo GD, hacia la zona sur de la subcuenca del río Blanco y la zona norte de la subcuenca del río de Los Patos Superior, en torno a los 32° S. Le siguen en importancia aquellas ubicadas al norte de la subcuenca del río Castaño y aquellas al sur de la subcuenca del río Calingasta (Fig. 7).

Las geoformas GC se presentan en el sector centro-sur del área de estudio al sur de los 31,2° S, con una tendencia de mayor área y menor altitud a mayor latitud. Las geoformas GCGE se localizan mayormente al sur de la subcuenca del río de Los Patos Superior, mientras que las GE muestran una distribución más continua. Entre los 30,6° y los 31,0° S se observan únicamente geoformas GE (Fig. 7).

4.6. Resultados de la evaluación de calidad del inventario

A partir de los trabajos de verificación realizados en 2018, 2021 y 2022, sumados a los ya ejecutados para la primera versión del inventario, la cantidad de geoformas validadas in situ para esta actualización involucró el ~7% (272) del total de la base de datos (3.912). Considerando las situaciones identificadas con respecto a la compleción (omisiones o comisiones) y corrección de la clasificación (exactitud temática), las omisiones se estimaron en un 0,4%, acotando los errores a las geoformas GE (en el 98% de los casos se trató de protalus de pequeñas dimensiones), y las comisiones en torno al 2%. La corrección en la clasificación se estimó sobre el 95%, con la mayor cantidad de confusiones entre las geoformas GCGE/GE y GCGE/GC.

A partir del registro fotográfico aéreo, fue factible extender de manera considerable la evaluación a zonas inaccesibles por vía terrestre, validando 621 geoformas (~16% del total) con áreas superiores a 1 ha. El porcentaje de omisiones se estimó en un 6%, donde el 95% de los errores se registraron en geoformas de tipo MN de dimensiones menores, mientras que para las comisiones el error fue del orden del 2,7%. La corrección en la clasificación se efectuó para el 97% de las geoformas, donde las principales confusiones se dieron entre GD/MN y entre GCGE/GE y GC/GCGE.

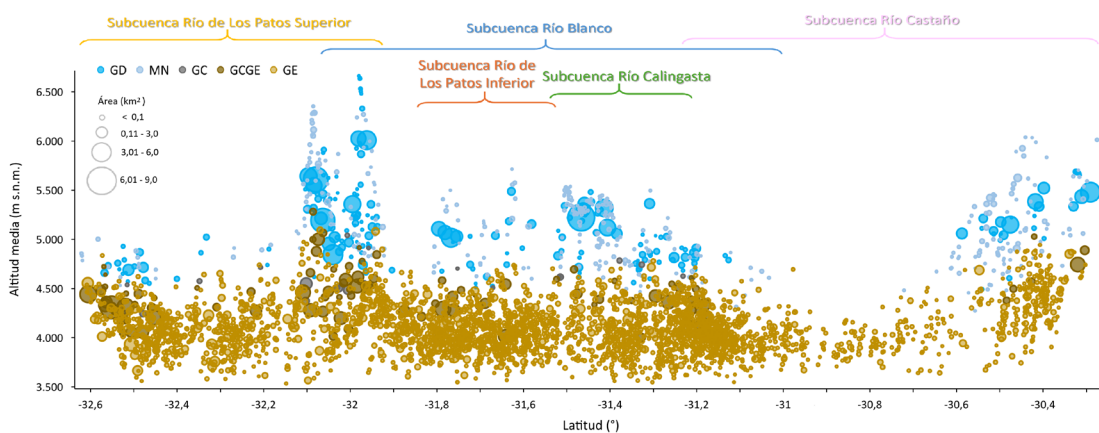


FIG. 7. Relación entre la latitud, altitud media y área de las geoformas inventariadas según tipo.

La estimación de la incertidumbre en la determinación de las áreas de las geoformas inventariadas se evaluó comparando las áreas digitalizadas de 399 geoformas (10,2% del total). Las diferencias tienen su origen en la subjetividad del intérprete para la delimitación de cada geoforma, especialmente en las de tipo GC, GCGE y GE, y mayormente hacia los sectores superiores de las geoformas mapeadas (Brardinoni *et al.*, 2019). Otras diferencias se observaron hacia sectores ensombrecidos o que presentaran alguna cobertura de nieve estival hacia sus bordes. Para el caso de los GD y MN, las mayores diferencias se identificaron en los sectores cubiertos de detritos o bien en las zonas de transición hacia geoformas de tipo GC.

Se verificó que las diferencias de área observadas disminuyen a medida que aumenta el área de las geoformas. Las incertidumbres más bajas (<0,2%) se determinaron para geoformas GD de áreas mayores a 2,5 km², mientras que las más altas (~80%) se registraron para geoformas GE de áreas menores a 0,1 km². A partir de esta relación, se estableció una función de ajuste según el tipo de geoforma, la cual permitió estimar la incertidumbre de cada geoforma mapeada. En función de ello, la incertidumbre estimada para toda el área inventariada resultó de un 10,2% (48,22 km²). Desglosadas por tipo de geoforma y ordenadas de menor a mayor, las incertidumbres fueron de un 2,0% para las geoformas

GD (2,2 km²), 5,6% para MN (0,6 km²), 6,6% para GCGE (5,17 km²), 13,2% para GC (0,6 km²) y 15,0% para GE (39,62 km²). Estos valores son coherentes al compararlos con aquellos reportados para inventarios similares al realizado en este trabajo (Paul *et al.*, 2017; Mölg *et al.*, 2018; Brardinoni *et al.*, 2019; Zalazar *et al.*, 2020; Baumann *et al.*, 2021).

Finalmente, si se clasifican las incertidumbres determinadas según tipo de geoforma e intervalo de área, se observa que el intervalo 0,1-0,5 km² (el cual corresponde al de mayor área mapeada, ver figura 3) contiene la mayor incertidumbre (21,32 km²) y representa el ~44% de la incertidumbre total estimada (Fig. 8). En el rango entre 0,01 y 1 km², la incertidumbre total está controlada por la incertidumbre de los GE y en segunda instancia de los GCGE. Las incertidumbres de las geoformas GCGE dominan la incertidumbre total para áreas mayores a 1 km².

4.7. Estimación de volumen de hielo y agua equivalente

Para las geoformas inventariadas en el Sistema Hídrico del Río San Juan, se estimó un volumen total de agua equivalente de 8,381±0,71 km³, del cual el 74% (6,204±0,29 km³) corresponde a geoformas del ambiente glacial (GD, MN, GC, GCGE) y el 26% restante (2,177±0,42 km³) a geoformas del ambiente periglacial (GE) (Tabla 6).

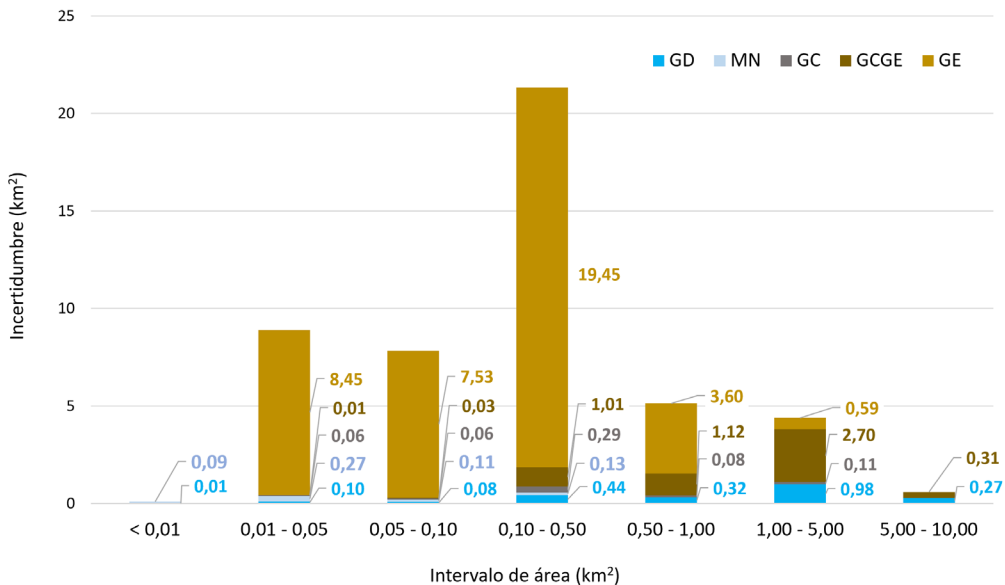


FIG. 8. Distribución de incertidumbre de área según tipo y tamaño de las geoformas.

TABLA 6. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA EQUIVALENTE PARA CADA GEOFORMA INVENTARIADA.

Ambiente	Tipo de geoforma	Cantidad	Volumen de agua equivalente*
GLACIAL	GD	209	3,946±0,09
	MN	355	0,107±0,01
	GC	21	0,092±0,01
	GCGE	100	2,059±0,18
	SUBTOTAL	685	6,204±0,29
PERIGLACIAL	GE	3.227	2,177±0,42
	SUBTOTAL	3.227	2,177±0,42
TOTAL		3.912	8,381±0,71

*Valores en km³.

Al considerar el tipo de geoforma junto con el área cubierta y el volumen de agua equivalente, se observa que las geoformas de tipo GD, si bien corresponden solamente al 5% de las geoformas inventariadas en cantidad, en área representan el 24%, y en volumen de agua equivalen a un 47% del total. En segundo lugar, están las geoformas GE y GCGE, que contribuyen respectivamente con un 26% y un 25% del volumen de agua equivalente, donde las primeras corresponden al 82% de las geoformas inventariadas y cubren el 56% del área mapeada. Las geoformas de tipo MN y GC, en tanto, involucran cada una el 1% del volumen total.

En términos de aporte por subcuenca, la del río Blanco concentra el 36% (2,980 km³) del total, seguida por la del río de Los Patos Superior con un 32% (2,669 km³), la del río Calingasta con un 15% (1,281 km³), la del río Castaño con un 14% (1,189 km³) y la del río de Los Patos Inferior con un 3% (0,272 km³) (Fig. 9). Si se discriminan estos volúmenes según tipo de geoforma, se observa que la mayor contribución de las geoformas GD es para la subcuenca del río Blanco con 1,597 km³, que la mayor contribución de GCGE y GC se encuentra en la subcuenca del río de Los Patos Superior, y que la mayor contribución de MN es para la subcuenca del río Castaño (Fig. 9). Finalmente, el volumen de agua equivalente en la subcuenca del río Blanco es mayor que el volumen de agua de las subcuencas de los ríos Castaño, Calingasta y de Los Patos Inferior combinados.

5. Discusiones

5.1. Comparación con inventarios anteriores

El inventario nacional de glaciares (IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, 2018a-f), el Inventario provincial de glaciares (Gobierno de la Provincia de San Juan *et al.*, 2017) y la presente actualización cubren para el área de estudio un poco más de una década (2009 a 2020). En primera instancia, estas tres versiones pueden considerarse como similares o bien con un elevado grado de concordancia e incertidumbre equivalente por cuanto fueron ejecutadas con lineamientos, datos y metodologías similares. Estos tres inventarios se compararon cuantitativamente con respecto al número de geoformas y áreas inventariadas. En este ejercicio no se incluyeron las geoformas de áreas menores a 1 ha, las que sí fueron contempladas en la versión de 2017, mientras que los protilus de dicha versión se clasificaron en este trabajo como GE (Tablas 7 y 8). En el Apéndice (A2) se provee una comparación gráfica que ilustra las diferencias observadas para los distintos sectores a modo de ejemplo.

En cuanto a la cantidad de geoformas inventariadas, el ING registra la mayor cantidad de geoformas de tipo GD, lo que difiere en un 34% con respecto al inventario de 2017 y en un 3% con respecto al inventario de 2022. En lo que se refiere a las geoformas MN, se observa que el inventario de 2017 tiene casi un 10% más de geoformas que el ING, pero el inventario de 2022 un 48% menos con

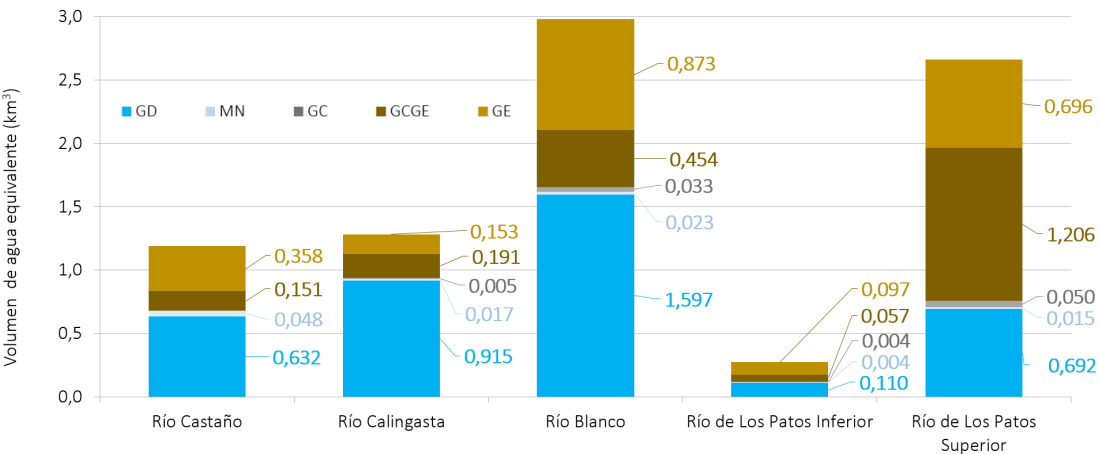


FIG. 9. Volumen de agua equivalente (km³), desglosado según tipo de geoforma y subcuenca.

TABLA 7. CANTIDAD DE GEOFORMAS SEGÚN EL INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES (2018), INVENTARIO PROVINCIAL DE GLACIARES (2017) E INVENTARIO PROVINCIAL DE GLACIARES (2022).

Tipo de geoforma	Cantidad			Diferencia IPG2017 - ING		Diferencia IPG2022 - IPG2017	
	ING ¹	IPG2017 ²	IPG2022 ³	Cantidad	%	Cantidad	%
GD	215	142	209	-73	-34	67	47
MN	621	681	355	60	10	-326	-48
GC	53	22	21	-31	-59	-1	-5
GCGE	81	76	100	-5	-6	24	32
GE	3.166	2.981	3.227	-185	-6	246	8
Total	4.136	3.902	3.912	-234	-6	10	~0
GD+MN	836	823	564	-13	-2	-259	-32
GC+GCGE+GE	3.300	3.079	3.348	-221	-7	269	9

¹ING: inventario nacional de glaciares. Imágenes años 2009-2010.

²IPG2017: inventario provincial de glaciares 2017. Imágenes años 2013-2015.

³IPG2022: inventario provincial de glaciares 2022. Imágenes años 2018-2020.

respecto al de 2017. Al comparar de manera conjunta la cantidad de geoformas libres de detritos (GD+MN), se observa una reducción de un 2% entre el ING y el inventario de 2017 y una reducción de un 32% entre los inventarios de 2017 y 2022.

Con respecto a las áreas inventariadas según el tipo de geoforma (Tabla 8), se observa que, entre los inventarios de 2017 e ING, solo las geoformas de tipo GD y GC tuvieron diferencias de áreas mayores a las incertidumbres estimadas, mientras que entre

los inventarios de 2022 y 2017 solo GE varió en un porcentaje inferior al de su incertidumbre. Para el caso de las geoformas libres de detritos (GD+MN), su área disminuyó alrededor de un 4% al comparar los inventarios ING y 2017 y un 27% al comparar los inventarios 2017 y 2022. Con respecto a este último inventario, la disminución en el área de las geoformas de tipo GD fue de un ~19% al compararlas con las del año 2017, mientras que las geoformas de tipo MN disminuyeron su área total en un ~65%.

TABLA 8. ÁREAS DE GEOFORMAS (EN KM²) SEGÚN EL INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES (2018), INVENTARIO PROVINCIAL DE GLACIARES (2017) E INVENTARIO PROVINCIAL DE GLACIARES (2022).

Tipo de geoforma	Área (km ²)			Diferencia IPG2017 - ING		Diferencia IPG2022 - IPG2017	
	ING ¹	IPG2017 ²	IPG2022 ³	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
GD	146,56	138,40	112,47	-8,16	-6	-25,93	-19
MN	30,32	30,70	10,70	0,38	1	-20,00	-65
GC	7,16	5,30	4,55	-1,86	-26	-0,75	-14
GCGE	56,75	60,04	78,94	3,29	6	18,9	32
GE	268,70	249,08	264,92	-19,62	-7	15,84	6
Total	509,49	483,52	471,58	-25,97	-5	-11,94	-3
GD+MN	176,88	169,10	123,17	-7,78	-4	-45,93	-27
GC+GCGE+GE	332,61	314,42	348,41	-18,19	-6	33,99	11

¹ING: inventario nacional de glaciares. Imágenes años 2009-2010.

²IPG2017: inventario provincial de glaciares 2017. Imágenes años 2013-2015.

³IPG2022: inventario provincial de glaciares 2022. Imágenes años 2018-2020.

5.2. Estimación de agua equivalente

Para cada geoforma, el volumen de agua equivalente se calculó asumiendo un espesor proporcional al área y un factor de corrección según tipología (Tabla 2). Esta estimación, no obstante, es una simplificación (Brenning, 2005; Springman *et al.*, 2012; Jones *et al.*, 2018, 2019), por lo que los valores obtenidos requieren ser contrastados con validaciones u observaciones de campo (e.g., Hilbich *et al.*, 2022). Al respecto, Pastore *et al.* (2022) estimaron el contenido de agua equivalente para un glaciar de escombros (ID: G7042780317488S_IPGSHRSJ2017) a partir de información sobre su espesor y sobre su contenido y distribución de hielo, recopilados mediante campañas geofísicas y de perforaciones, obteniendo valores entre 2,4 y $2,9 \times 10^{-4}$ km³. Para esa misma geoforma, se obtuvo en el presente estudio un volumen de agua equivalente entre 2,9 y $4,6 \times 10^{-4}$ km³ al considerar las incertidumbres en la determinación de su área. Tomando este ejemplo como base, el valor mínimo estimado empíricamente resulta ser parecido al valor de referencia determinado a partir de datos geofísicos y de perforaciones.

Numerosos autores han reconocido para los glaciares de escombros contenidos heterogéneos

de hielo y agua y cambios interanuales en el almacenamiento y liberación de agua (Liaudat *et al.*, 2020; Sileo *et al.*, 2020; Halla *et al.*, 2021; Hilbich *et al.*, 2022; Mathys *et al.*, 2022), además de que este contenido volumétrico de hielo no se puede estimar de variaciones en el caudal de los ríos cercanos (Schaffer *et al.*, 2019; Arenson *et al.*, 2022). Estas limitantes reconocen la necesidad de realizar mayores investigaciones referidas a la conexión entre el almacenamiento de hielo subterráneo y la hidrología en las cuencas de los Andes desérticos (Shaffer *et al.*, 2019; Navarro *et al.*, 2023).

A pesar de las limitantes expuestas en los párrafos anteriores, resulta de particular interés analizar la relación entre la cantidad y tipo de geoformas, su área y el volumen estimado de agua equivalente. Los glaciares descubiertos, por ejemplo, corresponden a no más del 5% de las geoformas inventariadas, cubren un 24% del área mapeada y contribuyen con un 47% del volumen estimado de agua equivalente estimado para todo el Sistema Hídrico del Río San Juan. Los glaciares de escombros, por su parte, representan el 82% de las geoformas inventariadas, el 56% del área total y el 26% del volumen estimado de agua equivalente (Fig. 10).

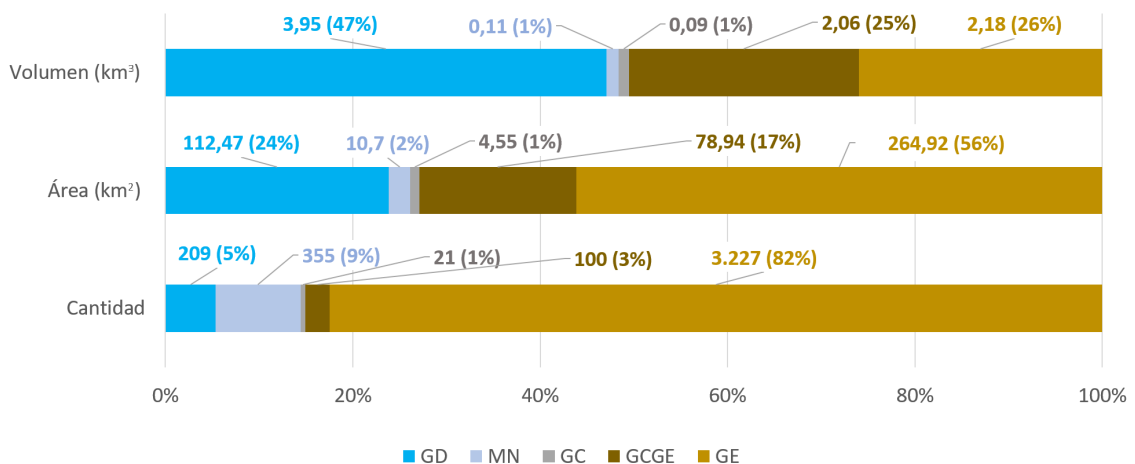


FIG. 10. Comparación entre la cantidad de geoformas mapeadas, su área (km²) y su volumen estimado de agua equivalente (km³).

6. Conclusiones

En el presente trabajo se reconocieron, para el Sistema Hídrico del Río San Juan, un total de 3.912 glaciares y geoformas periglaciales las que, combinadas, cubren una superficie total de $471,58 \pm 48,22$ km². El 17,5% de las geoformas identificadas corresponden a glaciares descubiertos, manchones de nieve-glaciaretos, glaciares cubiertos y glaciares cubiertos con glaciares de escombros, mientras que el 82,5% restante a glaciares de escombros. Sin embargo, al considerar las áreas cubiertas, el 44% corresponde a geoformas del ambiente glacial y el 56% a geoformas del ambiente periglacial. El volumen total de agua equivalente contenido en las geoformas inventariadas es de $8,381 \pm 0,71$ km³. De este volumen, el 74% pertenece a geoformas del ambiente glacial y el 26% a geoformas del ambiente periglacial.

A partir de las verificaciones en terreno se validó el ~7% de las geoformas inventariadas, el cual aumentó a un ~16% al incluir el registro fotográfico aéreo. Se estimó un índice de corrección de la clasificación del orden del 97%, donde las mayores confusiones ocurrieron para geoformas morfológicamente similares, como glaciares cubiertos, glaciares de escombros y glaciares cubiertos de glaciares de escombros. Mediante la comparación de las geoformas digitalizadas por varios especialistas, se pudo estimar un valor de incertidumbre del área mapeada en función del tipo y área de cada geoforma. Los resultados obtenidos

son coherentes con los estimados en inventarios de naturaleza similar, tanto a nivel nacional como internacional.

Al comparar el inventario del año 2022 (descrito en este trabajo) con aquel publicado el año 2017, se reconoce lo siguiente:

1. Una mayor cantidad de glaciares descubiertos (47%), debido a la fragmentación de algunos de estos, a una menor cobertura areal (-19%).
2. Una reducción importante en la cantidad y área cubierta por geoformas de tipo manchones de nieve-glaciaretos (-48% y -65%, respectivamente), relacionadas con variaciones de la cobertura nival, fragmentación de estas geoformas y con posibles aumentos de temperatura.
3. Diferencias menores tanto en cantidad (-5%) como en cobertura areal (-14%) para los glaciares cubiertos, relacionadas con variaciones en la interpretación de los contornos de estas geoformas.
4. En el caso de los glaciares cubiertos por glaciares de escombros, se observó un aumento en la cantidad (32%) y en el área (32%) inventariada, relacionada también con diferencias en la interpretación de los contornos de estas geoformas y probables confusiones de clasificación con glaciares cubiertos y/o glaciares de escombros, y con una posible menor cobertura de nieve o hielo expuesto en geoformas colindantes. Las diferencias en cantidad observadas no corresponden mayoritariamente a nuevas geoformas digitalizadas sino a la subdivisión de algunas ya inventariadas.

5. En el caso de los glaciares de escombros, su número aumentó en un 8% y su área mapeada en un 6%. Al igual que en el caso de las geoformas cubiertas de detritos, estas diferencias son menores a la incertidumbre determinada durante la digitalización.

Agradecimientos

La ejecución de la primera actualización del inventario provincial de glaciares para el Sistema Hídrico del Río San Juan fue realizada por el Gabinete de Geociología, Glaciología, Nivología y Cambio Climático (GGNyCC), perteneciente al Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Juan. Se efectuó dentro del alcance del Acta Complementaria de fecha 27 de septiembre del 2019, ratificada por Decreto Provincial 301-SEAyDS-2019 el 26 de febrero del 2020, en virtud del convenio de colaboración entre el Gobierno de la Provincia de San Juan y la Universidad Nacional de San Juan. El equipo de trabajo estuvo integrado por S. Pastore, G. Álvarez Parma, J. García, G. Pezzani, S. Graffigna, S. Cofone, E. Herrera, E. De Paula, y H. Puigdomenech. Agradecemos también a los revisores C. Bravo y H. Fernández, cuyas críticas constructivas y revisiones detalladas permitieron mejorar esta contribución, y al editor de la revista D. Bertin por todo su apoyo durante este proceso. Las imágenes SPOT fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (Conae).

Referencias

Aceituno, P. 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review* 116 (3): 505-524. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116%3C0505:OTFOTS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116%3C0505:OTFOTS%3E2.0.CO;2)

Álvarez Parma G. 2021. Evaluación de calidad de la base de datos geográfica del Inventario Provincial de Glaciares del Sistema Hídrico del Río San Juan a partir de la aplicación de la norma ISO 19.157. Tesis de Maestría (Inédito), Universidad Nacional de San Juan: 360 p.

Arenson, L.U.; Harrington, J.S.; Koenig, C.E.M.; Wainstein, P.A. 2022. Mountain Permafrost Hydrology-A Practical Review Following Studies from the Andes. *Geosciences* 12 (2): 48. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020048>

Ariza-López, F.J. 2013. Introducción a la calidad en la Información Geográfica. In *Fundamentos de evaluación de la calidad de la Información Geográfica* (Ariza-López, F.J.; editor). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Jaén: 1-61.

Barcaza, G.; Nussbaumer, S.U.; Tapia, G.; Valdés, J.; García, J.-L.; Videla, Y.; Albormoz, A.; Arias, V. 2017. Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology* 58: 166-180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>

Baumann, S.; Anderson, B.; Chinn, T.; Mackintosh, A.; Collier, C.; Lorrey, A.M.; Rack, W.; Purdie, H.; Eaves, S. 2021. Updated inventory of glacier ice in New Zealand based on 2016 satellite imagery. *Journal of Glaciology* 67 (261): 13-26. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.78>

Blunden, J.; Boyer, T. (editors). 2024. State of the Climate in 2023. Chapter 7: Regional Climates. *Bulletin of the American Meteorological Society* 105 (8): S1-S484. <https://doi.org/10.1175/2024BAMSStateoftheClimate.1>

Bolch, T.; Ohrbach, N.; Kutuzov, S.; Robson, B.A.; Osmonov, A. 2019. Occurrence, evolution and ice content of ice-debris complexes in the Ak-Shiirak, Central Tien Shan revealed by geophysical and remotely-sensed investigations. *Earth Surface Processes and Landforms* 44 (1): 129-143. <https://doi.org/10.1002/esp.4487>

Bown, F.; Rivera, A.; Acuña, C. 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology* 48: 43-48. <https://doi.org/10.3189/172756408784700572>

Brardinoni, F.; Scotti, R.; Sailer, R.; Mair, V. 2019. Evaluating sources of uncertainty and variability in rock glacier inventories. *Earth Surface Processes and Landforms* 44 (12): 2450-2466. <https://doi.org/10.1002/esp.4674>

Brenning, A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes* 16 (3): 231-240. <https://doi.org/10.1002/ppp.528>

Chen, J.; Ohmura, A. 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. In *Hydrology in Mountainous Regions, I - Hydrological Measurements, the Water Cycle*. IAHS Publication No. 193: 127-135.

Croce, F.A.; Milana, J.P. 2002. Internal structure and behaviour of a rock glacier in the Arid Andes of Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes* 13 (4): 289-299. <https://doi.org/10.1002/ppp.431>

Departamentos de Hidráulica de San Juan. 2022. Registro de caudales diarios de la Estación km 101 (1909-2022). Base de datos de aforos. Ministerio de Infraestructura, Agua y Energía, Departamento de Hidráulica, Gobierno de la Provincia de San Juan, Argentina. <https://hidraulica.sanjuan.gob.ar/datos%20y%20estadisticas/aforos.php>

DGA. 2022. Metodología del Inventario Público de Glaciares (Serie Documentos Técnicos, S.D.T. N° 447;

- Minuta Técnica MOP-DGA-UGN N° 7). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas: 45 p.
- Farías-Barahona, D.; Ayala, Á.; Bravo, C.; Vivero, S.; Seehaus, T.; Vijay, S.; Schaefer, M.; Buglio, F.; Casassa, G.; Braun, M.H. 2020. 60 Years of Glacier Elevation and Mass Changes in the Maipo River Basin, Central Andes of Chile. *Remote Sensing* 12 (10): 1658. <https://doi.org/10.3390/rs12101658>
- Ferri, L.; Dussailant, I.; Zalazar, L.; Masiokas, M.H.; Ruiz, L.; Pitte, P.; Gargantini, H.; Castro, M.; Berthier, E.; Villalba, R. 2020. Ice Mass Loss in the Central Andes of Argentina Between 2000 and 2018 Derived From a New Glacier Inventory and Satellite Stereo-Imagery. *Frontiers in Earth Science* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.530997>
- Garreaud, R.D. 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences* 22: 3-11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Garreaud, R.D.; Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H.H.; Veloso-Aguila, D. 2020. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal Climatology* 40 (1): 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gobierno de la Provincia de San Juan. 2012. Informe general Primera Actualización Inventario Provincial de glaciares, Sistema Hídrico Río San Juan. Gobierno de la Provincia de San Juan, Concejo Provincial de Coordinación para la Protección de Glaciares y Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Geología: 173 p. San Juan.
- Gobierno de la Provincia de San Juan, Concejo Provincial de Coordinación para la Protección de Glaciares y Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Geología. 2017. Informe Inventario Provincial de Glaciares, Sistema Hídrico Río San Juan.
- Gobierno de la Provincia de San Juan. 2017. Informe general Inventario Provincial de glaciares, Sistema Hídrico Río San Juan. Gobierno de la Provincia de San Juan, Concejo Provincial de Coordinación para la Protección de Glaciares y Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Geología, Tomo 1: 172 p. San Juan.
- Halla, C.; Blöthe, J.H.; Tapia Baldis, C.; Trombotto Liaudat, D.; Hilbich, C.; Hauck, C.; Schrott, L. 2021. Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina. *The Cryosphere* 15: 1187-1213. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1187-2021>
- Hilbich, C.; Hauck, C.; Mollaret, C.; Wainstein, P.; Arenson, L.U. 2022. Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes. Part 1: Geophysics-based estimates from three different regions. *Cryosphere* 16 (5): 1845-1872. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1845-2022>
- IANIGLA-CONICET. 2010. Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: fundamentos cronograma de ejecución. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/fundamentos_cronograma_ejecucion.pdf (última visita 12/12/2025)
- IANIGLA-CONICET. 2014. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/manual_ING_2014.pdf (última visita 12/12/2025)
- IANIGLA-CONICET. 2018. Inventario Nacional de Glaciares, Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/resultados_finales/informe_resumen_ejecutivo_APN_11-05-2018.pdf (última visita 12/12/2025).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. 2018a. Informe de la subcuenca del río Castaño. Cuenca del río San Juan. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Argentina): 61 p. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/San_Juan/docs/informes/informe_final_casta%C3%B1o_APN_23-04-2018.pdf (última visita 12/12/2025).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. 2018b. Informe de la subcuenca del río Calingasta. Cuenca del río San Juan. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Argentina): 62 p. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/San_Juan/docs/informes/informe_final_calingasta_APN_23-04-2018.pdf (última visita 12/12/2025).

- IANIGLA - Inventario Nacional de Glaciares. 2018c. Informe de la subcuenca del río Blanco. Cuenca del río San Juan. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Argentina): 62 p. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/San_Juan/docs/informes/informe_final_blanco_APN_23-04-2018.pdf (última visita 12/12/2025).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. 2018d. Informe de la subcuenca de la cordillera Ansilta. Cuenca del río San Juan. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Argentina): 58 p. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/San_Juan/docs/informes/informe_final_ansilta_APN_23-04-2018.pdf (última visita 12/12/2025).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. 2018e. Informe de la subcuenca del río de los Patos. Cuenca del río San Juan. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Argentina): 67 p. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/San_Juan/docs/informes/informe_final_los_patos_APN_23-04-2018.pdf (última visita 12/12/2025).
- IANIGLA-CONICET. 2019. Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Plan de actualización (Informe N.º IF-2020-84549271-APN-DCP#CONICET). Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales: 38 p. Mendoza, Argentina. https://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/plan_de_actualizacion_ING_2019_gde.pdf (última visita 12/12/2025).
- IGN. 2019. Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina, versión 2.0. Instituto Geográfico Nacional. https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.0_30m.pdf (última visita 20/08/2022).
- INDEC. 2022. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: resultados definitivos. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-165> (última visita 12/12/2025).
- International Organization for Standardization. 2013. Geographic information-Data quality (ISO Standard No. 19157:2013). International Organization for Standardization: 92 pp.
- Jones, D.B.; Harrison, S.; Anderson, K.; Betts, R.A. 2018. Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports* 8: 2834. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>
- Jones, D.B.; Harrison, S.; Anderson, K. 2019. Mountain glacier-to-rock glacier transition. *Global and Planetary Change* 181: 102999. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102999>
- Jordan, T.E.; Isacks, B.L.; Allmendinger, R.W.; Brewer, J.A.; Ramos, V.A.; Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America, Bulletin* 94 (3): 341-361. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94%3C341:ATRTGO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C341:ATRTGO%3E2.0.CO;2)
- Lauro, C.; Vich, A.I.J.; Moreiras, S.M. 2018. Regional flood frequency analysis in the central-western river basins of Argentina. *River Research and Applications* 34 (7): 721-733. <https://doi.org/10.1002/rra.3319>
- Liaudat, D.T.; Sileo, N.; Dapeña, C. 2020. Periglacial water paths within a rock glacier-dominated catchment in the Stepanek area, Central Andes, Mendoza, Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes* 31 (2): 311-323. <https://doi.org/10.1002/ppp.2044>
- Lliboutry, L. 1998. Glaciers of Wet Andes. *In* *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World* (Ferrigno, W.M.J.; editor). US Government Printing Office: 109-206. Washington DC.
- Malmros, J.K.; Mernild, S.H.; Wilson, R.; Tagesson, T.; Fensholt, R. 2018. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000-2016). *Remote Sensing Environment* 209: 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>
- Masiokas, M.H.; Villalba, R.; Luckman, B.H.; Le Quesne, C.; Aravena, J.C. 2006. Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate* 19 (24): 6334-6352. <https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>
- Masiokas, M.H.; Rabatel, A.; Rivera, A.; Ruiz, L.; Pitte, P.; Ceballos, J.L.; Barcaza, G.; Soruco, A.; Bown, F.; Berthier, E.; Dussailant, I.; MacDonell, S. 2020. A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mathys, T.; Hilbich, C.; Arenson, L.U.; Wainstein, P.A.; Hauck, C. 2022. Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes. Part 2:

- An upscaling strategy of geophysical measurements to the catchment scale at two study sites. *The Cryosphere* 16 (6): 2595-2615. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2595-2022>
- Mendoza, M.; Tapia Baldis, C.; Trombotto Liaudat, D.; Sileo, N. 2024. The effects of the “Mega-drought” in small periglacial mountain streamlets (Dry-Central Andes of Argentina). *In* Proceedings of the International Conference on Permafrost, No. 12. International Permafrost Association (IPA): 282-289. <https://doi.org/10.52381/ICOP2024.133.1>
- Mölg, N.; Bolch, T.; Rastner, P.; Strozzi, T.; Paul, F. 2018. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: distribution of debris cover and mapping challenges. *Earth System Science Data* 10 (4): 1807-1827. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1807-2018>
- Monnier, S.; Kinnard, C. 2013. Internal structure and composition of a rock glacier in the Andes (upper Choapa valley, Chile) using borehole information and ground-penetrating radar. *Annals of Glaciology* 54 (64): 61-72. <https://doi.org/10.3189/2013AoG64A107>
- Montecinos, A.; Aceituno, P. 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate* 16 (2): 281-296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C0281:SOTERR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C0281:SOTERR%3E2.0.CO;2)
- Navarro, G.; MacDonell, S.; Valois, R. 2023. A conceptual hydrological model of semiarid Andean headwater systems in Chile. *Progress in Physical Geography* 47 (5): 668-686. <https://doi.org/10.1177/03091333221147649>
- Pastore, S.; Álvarez Parma, G.; García, J. 2022. Cálculo del contenido de hielo y su contribución hídrica, en un glaciar de escombros en los andes centrales de la república argentina. *In* Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, No. 8. Asociación Argentina de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 50-51. San Juan. <https://aacg.ar/wp-content/uploads/2023/06/Libro-de-Actas-VIII-CACyG-San-Juan-2022.pdf>
- Paul, F.; Bolch, T.; Briggs, K.; Kääb, 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/10.5167/uzh-145441>
- Pitte, P.; Masiokas, M.; Gargantini, H.; Ruiz, L.; Berthier, E.; Ferri Hidalgo, L.; Zalazar, L.; Dussaillant, I.; Viale, M.; Zorzut, V.; Corvalán, E.; Scarpa, J.P.; Costa, G.; Villalba, R. 2022. Recent mass-balance changes of Agua Negra glacier (30° S) in the Desert Andes of Argentina. *Journal Glaciology* 68 (272): 1197-1209. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.22>
- Ramos, V.A. 1997. El segmento de subducción sub-horizontal de los Andes argentino-chilenos. *Acta Geológica Hispánica* 32 (7): 5-16.
- RGIK. 2020. Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers: Baseline concepts (Version 4.0; 13 p.). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics. https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Geomorphology/Pub/Website/IPA/Guidelines/V4/200117_Baseline_Concepts_Inventorying_Rock_Glaciers_V4.pdf (última visita 20/08/2022).
- Subsecretaría de Recursos Hídricos. 2010. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina [CD-ROM]. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.
- Rivera, J.A.; Otta, S.; Lauro, C.; Zazulie, N. 2021. A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water* 3: 640544. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>
- Saavedra, F.A.; Kampf, S.K.; Fassnacht, S.R.; Sibold, J.S. 2018. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *The Cryosphere* 12 (3): 1027-1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>
- Schaffer, N.; MacDonell, S.; Réveillet, M.; Yáñez, E.; Valois, R. 2019. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change* 19 (5): 1263-1279. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>
- Sileo, N.R.; Dapeña, C.; Trombotto Liaudat, D. 2020. Isotopic composition and hydrogeochemistry of a periglacial Andean catchment and its relevance in the knowledge of water resources in mountainous areas. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 56 (5-6): 480-494. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1814278>
- Springman, S.M.; Arenson, L.U.; Yamamoto, Y.; Maurer, H.; Kos, A.; Buchli, T.; Derungs, G. 2012. Multidisciplinary investigations on three rock glaciers in the Swiss Alps: Legacies and future perspectives. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94 (2): 215-243. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00464.x>
- Van Loon, A.F. 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water* 2 (4): 359-392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Zalazar, L.; Ferri, L.; Castro, M.; Gargantini, H.; Giménez, M.; Pitte, P.; Ruiz, L.; Masiokas, M.; Costa, G.; Villalba, R. 2020. Spatial distribution and characteristics of Andean ice masses in Argentina: results from the first National

- Glacier Inventory. *Journal of Glaciology* 66 (260): 938-949. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.55>
- Zazulie, N.; Rusticucci, M.; Raga, G.B. 2018. Regional climate of the Subtropical Central Andes using high-resolution CMIP5 models. Part II: future projections for the twenty-first century. *Climate Dynamics* 51: 2913-2925. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4056-4>

Manuscrito recibido: diciembre 19, 2024; revisado/aceptado: marzo 03, 2026; disponible en línea: marzo 09, 2026.

APÉNDICE

A1. Detalles técnicos de las imágenes satelitales empleadas.

Imágenes Sentinel-2: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

Sensor	Fecha	Nivel de procesamiento	Resolución espacial	Uso	ID imagen (SCENE_ID)
Sentinel-2	24-marzo-2020	L1C	10 m	Digitalización de contornos de glaciares descubiertos (GD) y manchones de nieve-glaciaretos (MN)	S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19HCD
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19HDE
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19JCF
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19JCG
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19JDF
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19JDG
					S2A_MSIL1C_20200324T143721_N0209_R096_T19HCE

Imágenes SPOT-6 y SPOT-7 (provistas por Comisión Nacional de Actividades Espaciales): <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SPOT-6-7-imagery-user-guide.pdf>

Sensor	Fecha	Nivel de procesamiento	Resolución espacial	Uso	ID imagen (SCENE_ID)
SPOT-6	14-mayo-2018	L2A	1,5 m	Digitalización de contornos de glaciares cubiertos (GC), glaciares cubiertos con glaciares de escombros (GCGE) y glaciares de escombros (GE)	SPOT6_20180514_1435359_BUNDLE_W070S30_L2A_16GT_081x114_32719
	14-mayo-2018				SPOT6_20180514_1436001_BUNDLE_W070S30_L2A_16GT_074x175_32719
	13-abril-2018				SPOT6_20180413_1423124_BUNDLE_W070S29_L2A_16JR_068x251_32719
	13-abril-2018				SPOT6_20180413_1424076_BUNDLE_W070S31_L2A_16JR_063x096_32719
	13-abril-2018				SPOT6_20180413_1425136_BUNDLE_W070S32_L2A_16JR_066x078_32719
	20-febrero-2018				SPOT6_20180220_1425037_BUNDLE_W070S32_L2A_16JR_060x118_32719
SPOT-7	25-marzo-2018	L2A	1,5 m		SPOT6_20180325_1420174_PMS_W070S31_L2A_16JR_035x029_32719
	12-abril-2018				SPOT7_20180412_1432597_BUNDLE_W070S31_L2A_16JR_023x103_32719
	22-mayo-2018				SPOT7_20180522_1424306_PMS_W070S31_L2A_16JR_034x029_32719
	12-abril-2018				SPOT7_20180412_1431162_BUNDLE_W070S31_L2A
	26-febrero-2018				SPOT7_20180226_1427144_PMS_W070S31_L2A_16JR_035x029_32719_16JR_072x274_32719
	12-abril-2018				SPOT7_20180412_1432354_BUNDLE_W070S32_L2A_16JR_078x119_32719

A2. Comparación gráfica de los diferentes sectores analizados.

En este apartado se presenta una comparación gráfica de diferentes sectores del área de estudio para cada uno de los inventarios analizados.

