



**Secretaría de Turismo,
Ambiente y Deportes**
Ministerio del Interior

**Subsecretaría
de Ambiente**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



I A N I G L A

**Informe del Inventario
Nacional de Glaciares
Andes Desérticos**


**INVENTARIO
NACIONAL
DE GLACIARES**

**MINISTERIO DEL INTERIOR
SECRETARÍA DE TURISMO, AMBIENTE Y DEPORTES
SUBSECRETARÍA DE AMBIENTE**

Autoridad Nacional de Aplicación – Ley 26.639 – Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial

Presidente de la Nación: Javier Milei

Ministro del Interior: Guillermo Francos

Secretario de Turismo, Ambiente y Deportes: Daniel Scioli

Subsecretaria de Ambiente: Ana María Vidal de Lamas

**INSTITUTO ARGENTINO DE NIVOLOGÍA, GLACIOLOGÍA Y
CIENCIAS AMBIENTALES (IANIGLA)
Inventario Nacional de Glaciares (ING)**

Director del IANIGLA: Fidel Roig

Coordinadora del ING: Laura Zalazar

Profesionales: Mariano Castro, Hernán Gargantini, Lidia Ferri Hidalgo

Colaboradores: Melisa Giménez, Ivanna Pecker Marcosig, Pierre Pitte, Leticia Saldi

Enero 2024

La presente publicación se ajusta a la representación oficial del territorio de la República Argentina establecida por el Poder Ejecutivo Nacional a través del Instituto Geográfico Nacional por Ley N° 22.963 y su impresión ha sido aprobada por Expte. N° EX-2023-154338535- -APNDNSG#IGN, de fecha 29 de diciembre de 2023

Agradecimientos

A la Subsecretaría de Ambiente de la Nación por el financiamiento provisto para la realización del inventario.

A Julieta Wul y Luciano Evers de la Subsecretaría de Ambiente de la Nación por sus valiosos aportes.

A Alejandro Soriano por brindarnos su hospitalidad y colaboración para la realización de los nuevos trabajos en los glaciares de escombros de la provincia de Salta.

A Jaime Soriano por su colaboración en la logística de campo.

A Ernesto Corvalán y Juan Pablo Scarpa por su participación en las campañas al glaciar de Agua Negra.

A Edgardo Castro por el diseño de los informes.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Conceptos básicos | 3 |
| 2.1. La criósfera | 3 |
| 2.2. ¿Qué es un glaciar? | 3 |
| 2.3. El ambiente periglacial de la alta montaña | 4 |
| 3. Organización geográfica del inventario nacional de glaciares..... | 6 |
| 4. Mapeo, fluctuaciones y monitoreo de los cuerpos de hielo | 8 |
| 4.1. Mapeo de cuerpos de hielo | 8 |
| 4.2. Variaciones recientes de los glaciares | 9 |
| 4.3. Estudios de detalle de cuerpos de hielo | 9 |
| 5. Principales características socio ambientales de la región Andes Desérticos | 11 |
| 5.1. Principales características ambientales..... | 11 |
| 5.2. Contexto socio-económico de la región | 12 |
| 6. Antecedentes..... | 15 |
| 7. Principales resultados de la actualización del ING en la región | 17 |
| 7.1. Variaciones recientes de los glaciares | 20 |
| 7.1.1. Cambios en el área y espesor de los glaciares seleccionados..... | 20 |
| 7.2. Cambio de masa y dinámica de cuerpos de hielo de referencia | 24 |
| 7.2.1. Glaciar de Agua Negra | 24 |
| 7.2.2. Glaciar de escombros Corral Negro..... | 26 |
| 7.3. Significancia hidrológica y volumen de hielo almacenado | 28 |
| 7.4. Impacto del cambio climático en los cuerpos de hielo | 29 |
| 8. Bibliografía | 31 |
| Anexo | 39 |
| 1. Materiales y métodos | 39 |
| 1.1. Mapeo de glaciares | 39 |
| 1.1.1. Selección de imágenes satelitales | 39 |
| 1.1.2. Digitalización manual | 43 |
| 1.1.3. Base de datos | 45 |
| 1.2. Fluctuaciones de cuerpos seleccionados | 51 |
| 1.3. Cambios de masa y dinámica de los cuerpos de hielo de referencia..... | 52 |

| | |
|---|----|
| 1.3.1. Glaciares de hielo descubierto | 52 |
| 1.3.2. Glaciares de escombros | 54 |
| 2. Resultados adicionales..... | 56 |
| 3. Contexto socio-económico..... | 59 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Regiones a los fines del ING. | 6 |
| Figura 2. Paisaje de los Andes Desérticos en el sector de la Puna, provincia de Catamarca (Foto: J. P. Scarpa 2017). | 11 |
| Figura 3. Mapa de presentación de las principales características socio-ambientales de los Andes Desérticos. | 14 |
| Figura 4. Principales características de los cuerpos de hielo de los Andes Desérticos. | 18 |
| Figura 5. Mapa de localización de los tipos de cuerpos de hielo en los Andes Desérticos. | 19 |
| Figura 6. Monte Pissis y glaciar de los Argentinos visto desde el noreste (Foto: J. P. Scarpa 2017). | 20 |
| Figura 7. Mapa de ubicación del área aledaña al Monte Pissis. | 21 |
| Figura 8. Comparación fotográfica de los cuerpos de hielo en la Corona del Inca Pillo. | 22 |
| Figura 9. Cambios en los glaciares aledaños al Monte Pissis entre los años 1986 y 2020. | 23 |
| Figura 10. Mapa de ubicación del glaciar del Agua Negra. Provincia de San Juan. | 24 |
| Figura 11. Cambios en el glaciar del Agua Negra (2014-2022). | 25 |
| Figura 12. Balance de masa glaciológico del glaciar del Agua Negra (2014-2023). | 25 |
| Figura 13. Altura de la línea de equilibrio (2015-2023). | 26 |
| Figura 14. Mapa de ubicación del glaciar de escombros Corral Negro. Provincia de Salta. | 26 |
| Figura 15. Detalle de la superficie del glaciar de escombros Corral Negro con el valle del río Calchaquí al fondo (Foto: M. Castro 2023) | 27 |
| Figura 16. Monitoreo del glaciar del Agua Negra. | 28 |
| Figura A 1. Fuentes utilizadas en el mapeo de cuerpos de hielo. | 44 |
| Figura A 2. Balance de masa de invierno y anual del glaciar del Agua Negra para cada uno de los años analizados (2014-2022). | 54 |
| Figura A 3. Proceso de perforación e instrumentación a 4730 msnm en el glaciar de escombros Corral Negro. Provincia de Salta. (Foto: I. Pecker Marcosig, 2023). | 55 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Superficie cubierta por los diferentes cuerpos de hielo en los Andes Desérticos. | 17 |
| Tabla A 1. Imágenes de base, Sentinel 2 utilizadas en la actualización del ING de los Andes Desérticos | 40 |
| Tabla A 2. Imágenes de apoyo, Sentienel 1 utilizadas en la actualización del ING de los Andes Desérticos | 42 |
| Tabla A 3. Imágenes de base utilizadas para el análisis de variaciones de los cuerpos de hielo. | 52 |
| Tabla A 4. Cantidad y área cubierta por los diferentes tipos de cuerpos de hielo según subcuencas y cuencas en los Andes Desérticos..... | 56 |
| Tabla A 5. Cantidad y área cubierta por los diferentes tipos de geoformas por provincias en los Andes Desérticos. | 58 |

Lista de abreviaturas y siglas

A.E. Agua equivalente

AVNIR Advanced Visible and Near Infrared Radiometer

CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

ELA Elevación de la línea de equilibrio

ESA European Space Agency

ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus

GC Glaciar cubierto

GCGE Glaciar cubierto con glaciar de Escombros

GD Glaciar descubierta

GE Glaciar de escombros

GEA Glaciar de escombros activo

GEE Google Earth Engine

GEF Glaciar de escombros fósil

GEI Glaciar de escombros inactivo

GLIMS Global Land Ice Measurements from Space

GPR Ground Penetrating Radars

HRV High Resolution Visible

IANIGLA Instituto Argentino de Nivología, Glaciares y Ciencias Ambientales

IGN Instituto Geográfico Nacional

INAI Instituto Nacional de Asuntos Indígenas

ING Inventario Nacional de Glaciares

IPA International Permafrost Association

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

IRC Infrarrojo cercano

IRM Infrarrojo medio

ISO International Organization for Standardization

IW Inteferometric wide

MDE Modelo Digital de Elevación

MN Manchón de nieve

MSI Multi Spectral Instrument

MSNM Metros sobre el nivel del mar

ND No Detectable

NOA Noroeste Argentino

RGIK Rock Glacier Inventories and Kinematics

SSRH Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación

OLI Operational Land Imager

QGIS Quantum GIS Sistema de Información Geográfica

SAyDS Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación

SLD Single look complex

TM Thematic Mapper

UNEP United Nations Environment Programme

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

VIS Espectro visible

WGMS World Glacier Monitoring Service

1. Introducción

A partir de la promulgación de la Ley de presupuestos mínimos 26.639 Argentina cuenta por primera vez en su historia con un Inventario Nacional de Glaciares (ING), que constituye una herramienta esencial para la protección y manejo de los recursos hídricos en estado sólido de la República Argentina. Los resultados de este primer inventario fueron publicados en el año 2018 y toda la información relacionada (mapas, informes y archivos vectoriales) se encuentra disponible de forma libre y gratuita a través de la página web oficial www.glaciaresargentinos.gob.ar.

Según el artículo 4º de dicha ley, el Inventario Nacional de Glaciares deberá actualizarse con una periodicidad de cinco años, verificando los cambios en superficie de los cuerpos de hielo y del ambiente periglacial, su estado de avance o retroceso y otros factores que sean relevantes para su conservación.

Con el objetivo de dar cumplimiento a este requerimiento, se presentan aquí los resultados del proceso de actualización del ING para la región de los Andes Desérticos de Argentina. Este trabajo fue realizado siguiendo los lineamientos planteados en el Plan de Actualización del Inventario Nacional de Glaciares (IANIGLA-CONICET, 2019). La utilización de una metodología de trabajo consistente y avalada por organismos y lineamientos científicos internacionales presentados, implica que los datos obtenidos en esta actualización siguen teniendo un alto grado de confiabilidad y los hace comparables entre y dentro de las distintas regiones, provincias y sectores de la Cordillera de los Andes. Es importante aclarar que el trabajo del ING es una tarea continua y que en este documento se resumen los resultados obtenidos hasta el momento, desde la finalización del primer ING en el año 2018. Este proceso de actualización se vio, además, fuertemente afectado durante los años 2020 y 2021 por la pandemia de Covid-19. Sin embargo, se continúa trabajando en la búsqueda de respuestas a los interrogantes que se generan a partir de la situación actual de los glaciares.

De acuerdo al IPCC (2021) el aumento de las temperaturas a nivel global ha sido de +1.1°C desde 1850, lo cual ha impactado de manera directa en los glaciares, provocando su retroceso y pérdida de volumen generalizado. En las regiones que presentan menor cobertura glaciar, como es el caso de los Andes Desérticos, según el reporte especial del IPCC para áreas de alta montaña (Hock et al., 2019), los glaciares perderán más del 80% de su masa actual de aquí al año 2100. El ambiente periglacial a lo largo de las regiones de los Andes también se verá afectado por el impacto del cambio climático cuyos cambios se pueden evaluar a partir de la actualización y comparación de los inventarios de los glaciares de escombros (RGIK, 2022). Además, de su importancia climática y geomorfológica, los glaciares de escombros también pueden ser una fuente de desprendimientos de rocas y flujos de detritos, convirtiéndose en un potencial riesgo natural a escala local (Kääb et al., 2021).

Es por ello importante mantener los inventarios de glaciares actualizados, para conocer la situación y evolución en el tiempo de las reservas hídricas existentes en el territorio nacional, para su adecuada protección, control y monitoreo. Además esta información actualizada es un aporte muy valioso para aquellas instituciones como el *World Glacier Monitoring Service (WGMS)* o la *International Permafrost Association (IPA)* que se dedican a la recopilación, análisis y difusión de datos e información normalizados sobre la distribución y los cambios de los glaciares a nivel global.

2. Conceptos básicos

2.1. La criósfera

La criósfera comprende aquellas regiones de la tierra y los océanos en donde el agua se encuentra en forma sólida, incluyendo al hielo marino, el hielo presente en lagos y ríos y superficies con nieve, glaciares, casquetes de hielo y suelo congelado de forma permanente (permafrost) (IPCC, 2013). Todos sus componentes son sensibles al clima, es decir, a los cambios que se producen en la temperatura del aire y en la precipitación, ya sea en escalas temporales de horas o de miles de años.

Considerando superficie y volumen, los elementos más importantes de la criósfera son los glaciares, los casquetes de hielo y las barreras de hielo flotantes, que en conjunto representan cerca del 10% de la superficie de los continentes e islas del planeta. En total se estima que ocupan 15 millones de km² (SAyDS, 2019).

En Sudamérica existen unos 25.500 km² cubiertos por glaciares, de esta superficie el 15% se encuentra en Argentina, hecho que la ubica en el segundo lugar después de Chile en la región (Lliboutry, 1998; UNEP, 2007). Estos porcentajes colocan a la Argentina en una posición privilegiada respecto de otros países, y a la cordillera de los Andes (en su sector argentino-chileno) en un espacio de enorme relevancia para los glaciares.

2.2. ¿Qué es un glaciar?

Un glaciar es un cuerpo de hielo perenne, formado en la superficie terrestre por la acumulación, compactación y recristalización de la nieve, y que muestra señales de movimiento por acción de la gravedad (Cogley et al., 2011). Los factores topográficos y climáticos que permiten la acumulación de nieve para formar glaciares, se dan en regiones polares y en zonas montañosas, donde imperan las bajas temperaturas y existen nevadas suficientes como para no perderse completamente durante el verano (Cogley et al., 2011).

La orientación de las laderas de las montañas o las condiciones topográficas de los sitios pueden generar condiciones propicias para la formación de glaciares, a la sombra de las laderas protegidos de la radiación solar, o bien en sitios donde el viento o las pendientes acumulan mayor cantidad de nieve que en zonas de alrededor. Con el paso del tiempo, el peso de las capas de nieve acumuladas se va compactando y se va transformando, primero en una masa de nieve densa y de textura granular llamada neviza, firn o névé, y luego, en hielo (SAyDS, 2019).

Un glaciar se puede dividir en zonas de acuerdo al comportamiento que domina en cada una. La parte alta, donde predominan las nevadas, se denomina "zona de acumulación", mientras que la parte baja, donde predomina el derretimiento, se conoce como "zona de ablación". La transformación de la nieve en hielo puede durar

pocos años o varias décadas, dependiendo del clima de cada sitio, y generalmente, ocurre en la parte alta del glaciar. Una vez que el hielo alcanza cierto espesor en la zona de acumulación, la presión que ejerce su peso hace que la masa de hielo comience a deformarse y fluir lentamente hacia la parte baja o zona de ablación del glaciar. En ésta, el glaciar pierde masa por derretimiento y sublimación de nieve y hielo y también por desprendimientos de témpanos (calving) si el frente del glaciar termina en un lago o en el mar. Estas dos zonas están separadas por la denominada "línea de equilibrio" en la cual la diferencia entre acumulación y pérdida de masa es igual a cero. Un indicador del estado de salud de un glaciar es el "balance de masa", que es la diferencia entre la cantidad de nieve/ hielo almacenado en la zona de acumulación y la pérdida en la zona de ablación durante un período de tiempo determinado (normalmente se considera un año hidrológico, o sea, de otoño a otoño). Cuando se menciona que un glaciar tiene un balance negativo es porque los procesos de ablación son superiores a los procesos de acumulación; en consecuencia, el glaciar pierde masa. Por el contrario, en el caso de un balance de masa positivo, el glaciar tiene ganancia (Cogley et al., 2011).

De acuerdo a la cobertura detrítica que puedan tener sobre su superficie, los glaciares pueden ser de hielo descubierto, cubierto o una combinación de ambos. Estas categorías fueron consideradas en el primer ING como glaciar descubierto (sin cobertura) y glaciar cubierto (con cobertura de detritos) (IANIGLA-CONICET, 2010).

Dentro de esta definición de glaciar se incluye en el ING a los manchones o campos de nieve permanentes que, como no tienen evidencia de movimiento, en general no se consideran glaciares. Sin embargo, los manchones o campos de nieve permanentes son reservas significativas de agua en estado sólido (IANIGLA-CONICET, 2010).

2.3. El ambiente periglacial de la alta montaña

El ambiente periglacial se define como un sector de clima frío, que se ubica por encima del límite del bosque (si es que este existe), y se diferencia del ambiente glaciario. Los procesos principales que se desarrollan en el ambiente periglacial son: suelo congelado permanentemente (permafrost), ciclos de congelamiento y descongelamiento que afectan a las rocas y a la parte superior del suelo, presencia de solifluxión/gelifluxión y otros procesos criogénicos (crioclastía, selección, crioturbación, etc.) que originan una geomorfología específica. En la Cordillera de los Andes, el ambiente periglacial se desarrolla en la parte alta de la montaña, asociado principalmente a la disminución de la temperatura a medida que se asciende sobre la misma. Además, también está vinculado a la radiación solar y a la circulación de las masas de aire a una escala global (Trombotto Liudat et al., 2014).

Dentro del ambiente periglacial, se llama permafrost a la porción de suelo o roca que permanece a una temperatura menor a 0°C al menos por dos años consecutivos (Harris et al., 1988). El permafrost de montaña, en la Cordillera de los Andes, tiene una distribución discontinua debido a la gran variabilidad en las orientaciones, topografías y los efectos que la radiación solar produce, generando condiciones específicas para que este ocurra. En los casos donde el permafrost está saturado en hielo y existe una

pendiente moderada, este puede comenzar a deformarse y reptar lentamente pendiente abajo dando lugar a una geoforma periglacial característica denominada “glaciar de escombros”.

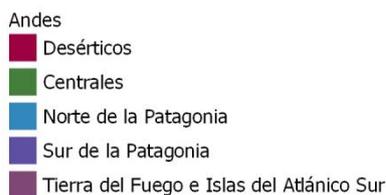
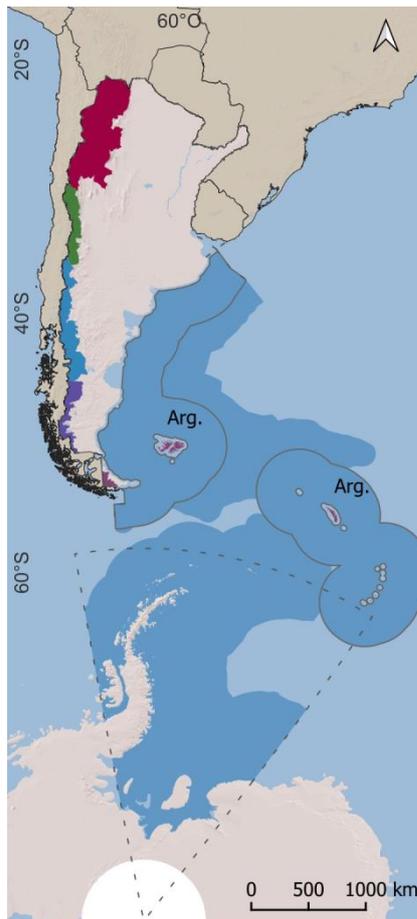
Se estima que los glaciares de escombros tienen aproximadamente, del volumen total, entre un 40% y un 60% de hielo en su interior (Azócar & Brenning, 2010; Barsch, 1996; Jones et al., 2018) por lo tanto constituyen reservas de agua en estado sólido dentro del ambiente periglacial de montaña. Se definen como un cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost. Los glaciares de escombros se distinguen por tener forma de lengua, que se asemeja a una colada de lava. Estas geoformas se originan por el aporte proveniente de las canaletas de nieve y detritos (origen criogénico) que conforman el valle, o a partir de antiguo hielo glacial en zonas donde hubo glaciares, o donde terminan lenguas actuales (origen glaciogénico). A su vez, también se lo puede clasificar de acuerdo a su dinámica (consecuencia del contenido de hielo y el movimiento del cuerpo de hielo) en tres clases: “activo”, “inactivo” y “fósil” (Trombotto Liaudat et al., 2014).

Los glaciares de escombros son denominados activos cuando, por su gran contenido de hielo, presentan movimiento que se expresa en su superficie como arrugas perpendiculares y paralelas al flujo de la crioforma, las primeras son llamadas arcos y las segundas crestas, ambas separadas mediante depresiones o surcos, en general poseen una pendiente frontal mayor a 35° y no poseen vegetación. Los glaciares de escombros inactivos, no presentan movimiento actual pero poseen evidencias de movimiento pasado. Todavía contienen hielo en su interior, motivo por el cual, tienen una pendiente frontal más suave (menor a 30°) y pueden presentar cobertura vegetal. Finalmente, los glaciares de escombros fósiles, no presentan movimiento y no tienen hielo en su interior (Trombotto Liaudat et al., 2014); por lo que, a diferencia de los anteriores, no son considerados como reservas hídricas y por este motivo no son incluidos en el ING.

Por lo tanto, para la actualización del ING, al igual que el primer inventario, las reservas hídricas estratégicas en estado sólido se agruparon en dos grandes grupos: glaciares (de hielo descubierto y cubierto) y glaciares de escombros. Estos grandes grupos contienen, tanto en volumen como en superficie cubierta, las mayores reservas hídricas en estado sólido de la cordillera. Además, debido a sus características físicas, pueden ser identificados y delimitados en forma precisa en base a imágenes satelitales (IANIGLA-CONICET, 2010).

3. Organización geográfica del inventario nacional de glaciares

Debido a la extensión del área a inventariar, y a la gran diversidad de ambientes existentes a lo largo del país, el ING fue organizado en grandes regiones que agrupan cuerpos de hielo con características morfológicas y medioambientales relativamente similares (IANIGLA-CONICET, 2010).



Esta división regional fue tomada de un trabajo de Lliboutry, (1998), que dividió los Andes de Sudamérica en Andes Áridos, en el sector norte, y Andes Húmedos en el sur. A su vez, subdividió los Andes Áridos en Andes Desérticos y Centrales y los Andes Húmedos en Andes del norte de la Patagonia o Andes de la región de los lagos y Andes del Sur de la Patagonia o Andes Patagónicos. Esta regionalización fue tomada como base en el ING, a la cual se agregó la región de los Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur, por tener características ambientales diferentes al resto del país (IANIGLA-CONICET, 2010; Zalazar et al., 2017) (Figura 1).

De este modo se delimitaron las siguientes regiones:

1. Andes Desérticos (22° S - 31° S). Incluye todo el Noroeste Argentino y el sector norte de la Provincia de San Juan, incorporando la cuenca del río Jáchal.
2. Andes Centrales (31° S - 35° S). Se extiende desde la cuenca del río San Juan en la provincia del mismo nombre, hasta la cuenca del río Colorado en el norte de la provincia del Neuquén.
3. Andes del Norte de la Patagonia (35° S - 45° S). Incluye desde la cuenca del río Neuquén hasta las cuencas de los ríos Simpson, Senguerr y Chico en la provincia de Santa Cruz.

Figura 1. Regiones a los fines del ING.

4. Andes del Sur de la Patagonia (45° S - 53° S). Abarca desde las cuencas del río Deseado y los lagos Buenos Aires y Pueyrredón, hasta las cuencas de los ríos Gallegos y Chico en la Provincia de Santa Cruz.

5. Andes de Tierra del Fuego e islas del Atlántico Sur (53° S a 55° S). Comprende el sector argentino de la Isla de Tierra del Fuego y las Islas Malvinas, Georgias y Sandwich del Sur.

En los Andes Desérticos las condiciones son netamente subtropicales y con precipitaciones predominantemente del Atlántico, mientras que en los Andes Centrales los glaciares y crioformas se nutren de precipitaciones principalmente del Pacífico. Los Andes del norte de la Patagonia se caracterizan por condiciones más templadas y precipitaciones predominantemente invernales y del Pacífico, mientras que los Andes Patagónicos del Sur y Tierra del Fuego poseen condiciones subantárticas con precipitaciones muy abundantes y distribuidas a lo largo de todo el año.

Desde el punto operativo y de organización del trabajo, las regiones fueron subdivididas, siguiendo mayormente un criterio hidrográfico, en 69 cuencas, subcuencas y/o sectores de trabajo. Estas subdivisiones se basaron en la delimitación de cuencas realizada para todo el país por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. En los sectores limítrofes se adoptó el límite cartográfico oficial obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN). De las 69 subcuencas identificadas se observó, en el primer ING, que cinco no tienen glaciares: dos cuencas se encuentran en los Andes Desérticos (Laguna de Pozuelos y Salina de Jama), una en los Andes del Norte de la Patagonia (río Simpson), otra en los Andes del Sur de la Patagonia (río Gallegos) y una en los Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur (Islas Malvinas) (IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, 2018; Zalazar et al., 2017).

4. Mapeo, fluctuaciones y monitoreo de los cuerpos de hielo

La comprensión integral de la situación actual de los cuerpos de hielo requiere su abordaje en diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el mapa de todos los cuerpos de hielo, pasando por el estudio de fluctuaciones recientes, hasta el análisis de detalle focalizado en pocos glaciares y crioformas mediante un monitoreo continuo. En esta sección se describe de manera resumida los principales pasos metodológicos seguidos para la obtención de los resultados, para más detalle ver Anexo 1.

4.1. Mapeo de cuerpos de hielo

A nivel mundial, las definiciones de los cuerpos de hielo y los lineamientos generales para la realización de inventarios de glaciares se basan en estándares de organismos científicos de referencia como el WGMS y la IPA (Harris et al., 1988; UNESCO-IASH, 1970; WGMS, 2017). Estos estándares fueron la base del primer ING, tienen vigencia en la actualidad, y por lo tanto serán utilizados en el presente proceso de actualización. Estas definiciones y lineamientos permiten además identificar cuerpos de hielo que cumplen con la condición de ser reservas estratégicas de agua en estado sólido, característica principal que debe tener toda unidad para ser incluida en el ING según el Artículo 3 de la Ley 26639.

El trabajo de inventario de las reservas hídricas en estado sólido se realiza mediante un proceso cartográfico de identificación y delimitación espacial de los glaciares y glaciares de escombros sobre la base de imágenes satelitales ópticas. Las mismas son cuidadosamente seleccionadas para evitar la presencia de nieve estacional o nubes, que confunden o impiden la identificación de los glaciares. En el primer inventario se utilizaron métodos de detección automática para identificar los glaciares descubiertos y manchones de nieve, ya que estos se diferencian claramente del entorno que existe alrededor. Luego se realizó una edición manual sobre estos resultados. Para el caso de los glaciares cubiertos y los glaciares de escombros, en donde estos no son muy diferentes al terreno que los rodea, se realizó el trabajo íntegramente a través de digitalización manual, a partir de la interpretación visual de imágenes de alta resolución espacial (Zalazar et al., 2020). En la actualización del ING se realizó una revisión detallada de todos los glaciares y glaciares de escombros, y toda la edición se hizo de forma manual en base a las imágenes satelitales recientes. El trabajo cartográfico fue completado con la actualización de la base de datos en aquellos casos que fuera necesario modificar algún parámetro como el área, largo, elevación, etc. (ver Anexo 1.1).

4.2. Variaciones recientes de los glaciares

El conocimiento de la situación actual de los glaciares en nuestro país requiere además desarrollar un análisis que incluya información detallada de sus variaciones recientes. Para ello se seleccionaron macizos montañosos o sectores con glaciares y/o crioformas representativas en cada una de las regiones cuyas fluctuaciones se analizaron a partir de imágenes satelitales en un rango temporal que abarca aproximadamente las últimas cuatro décadas. Así mismo, en algunos casos para conocer los cambios recientes en el espesor de los cuerpos seleccionados se realizaron comparaciones entre Modelos Digitales de Elevación (MDE) de libre disponibilidad de distintas fechas, siguiendo la metodología utilizada en estudios recientes en los Andes (Dussailant et al., 2019; Hugonnet et al., 2021; Pitte et al., 2016; Willis et al., 2012). Más detalles sobre aspectos metodológicos se pueden consultar en el Anexo 1.2.

4.3. Estudios de detalle de cuerpos de hielo

La estrategia de actualización del ING comprende un desarrollo transversal en los estudios de las masas de hielo, mejorando así el conocimiento sobre el estado actual de los glaciares de la República Argentina. En este sentido se desarrollan estudios de detalle para lo cual se obtienen datos de monitoreo in situ, tanto para glaciares de hielo descubierto como para glaciares de escombros.

El monitoreo en los glaciares de hielo descubierto se realiza a través del balance de masa, que constituye un indicador del “estado de salud de los glaciares” y permite conocer la relación con las principales variables atmosféricas (precipitación, temperatura, etc.). Como parte del monitoreo se realizan mediciones estacionales (verano e invierno) que permiten estimar las pérdidas y ganancias de masa (hielo y nieve) del glaciar. Para ello, se utiliza el método glaciológico, basado en la instalación de balizas y en la realización de sondeos y calicatas de nieve (Anexo 1.3). Los relevamientos de balance de masa son acompañados de la medición de variables hidrometeorológicas in situ.

Estos estudios se realizan en sitios específicos a lo largo de los Andes y constituyen la base para interpretar los cambios de forma (largo y área), volumen y dinámica de glaciares obtenidos a partir de datos de sensores remotos. Estos sitios son de norte a sur:

- Glaciar del Agua Negra: $-30,1650^{\circ}$ S, $-69,8095^{\circ}$ O, cuenca del río Jáchal, provincia de San Juan.
- Glaciar del Azufre: $-35,2895^{\circ}$ S, $-70,5595^{\circ}$ O, cuenca del río Colorado, provincia de Mendoza.
- Glaciar del Alerce: $-41,1667^{\circ}$ S, $-71,8256^{\circ}$ O, cuenca del río Manso y lago Puelo, provincia de Río Negro.
- Glaciar de los Tres: $-49,2736^{\circ}$ S, $-73,0057^{\circ}$ O, cuenca del río Santa Cruz, provincia de Santa Cruz.

En el caso de los estudios referidos a los glaciares de escombros, estos se realizan utilizando metodologías específicas para este tipo de geoformas. Estos cuerpos de hielo tienen velocidades de desplazamiento, variaciones de área y cambios de volumen de menor escala que los glaciares y responden a dinámicas relacionadas con las del ambiente periglacial (Anexo 1.3.2).

En el marco de los monitoreos llevados a cabo por el ING, se han seleccionado dos sitios de estudio en el país para la representatividad de estas geoformas, uno en los Andes Desérticos y otro en los Andes Centrales, puesto que son las regiones con mayor presencia de este tipo de cuerpos de hielo:

- Corral Negro: $-24,6024^{\circ}$ S, $-66,2996^{\circ}$ O, Alta cuenca del río Juramento, provincia de Salta.
- Portillo Argentino: $-33,6144^{\circ}$ S, $-69,6029^{\circ}$ O, cuenca del río Mendoza, provincia de Mendoza.

5. Principales características socio ambientales de la región Andes Desérticos

La región de los Andes Desérticos se extiende desde aproximadamente los 22°S hasta los 31°S e incluye el sector alto de cuencas del noroeste argentino desde la del río Pilcomayo en el norte hasta la del río Jáchal en el sur. Desde el punto de vista político-administrativo la región incluye sectores de las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan (Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Paisaje de los Andes Desérticos en el sector de la Puna, provincia de Catamarca (Foto: J. P. Scarpa 2017).

5.1. Principales características ambientales

El sector norte de esta región se caracteriza por la presencia de tres ambientes, la Cordillera Occidental al oeste, la Puna en el centro y la Cordillera Oriental al este. Mientras que hacia el sur se identifican la Cordillera Frontal al oeste y las Sierras Pampeanas hacia el este (Ramos, 2017). La Cordillera Occidental se extiende a lo largo del límite entre Argentina y Chile, en ella es posible encontrar volcanes, en algunos casos activos. La Puna es una continuación del altiplano boliviano y se destaca por la existencia de mesetas elevadas (que se ubican por encima de los 3700 msnm), lagunas de desagüe de cuencas endorreicas y salares. Las mesetas están surcadas por cordones

montañosos y volcanes con alturas máximas que superan los 6000 msnm y que llegan a los 6739 msnm en el volcán Lullillaco y a 6409 msnm en el volcán de Antofalla (Caminos, 1999). La Cordillera Oriental, por su parte, es una prolongación de sistemas montañosos que se desarrollan en Perú y Bolivia y alcanza alturas máximas que rondan los 6400 msnm. El cerro más alto es el Libertador General San Martín (6380 msnm.) ubicado en los Nevados de Cachi. Las Sierras Pampeanas están compuestas principalmente por la Sierra del Aconquija y las Cumbres Calchaquíes (Ramos, 2017). En el sector suroeste, se localizan los puntos más elevados de los Andes Desérticos, el monte Pisis (6882 msnm) y el cerro Ojos del Salado (6879 msnm).

En los Andes Desérticos, la elevación media (4500 msnm) separa el clima extremadamente árido del oeste del clima lluvioso hacia el este. El descenso permanente del viento seco desde las zonas altas hacia las zonas bajas asociado con el anticiclón sudeste del pacífico subtropical, aísla la ladera oeste del altiplano de las lluvias y la humedad. En contraste, el aire cálido y húmedo transportado hacia las laderas este de los Andes prevalece sobre el piedemonte oriental del altiplano (Viale et al., 2019). Las precipitaciones en la región provienen mayormente del Atlántico y están concentradas especialmente en los meses de verano (noviembre a marzo). En consecuencia, el gradiente de humedad disminuye de este a oeste, con precipitaciones promedio que rondan los 300 mm anuales. Sin embargo, en algunos lugares pueden llegar a valores inferiores a los 50 mm anuales, mientras que en los cordones montañosos del este, se registran cifras cercanas a los 400 mm anuales (Paoli, 2003). El clima de la región es frío y seco, con importantes amplitudes térmicas diarias, heladas permanentes, alta irradiación solar y vientos intensos.

Las precipitaciones son tan bajas que no alcanzan para mantener cuerpos de hielo de importancia, aun cuando las temperaturas sean propicias para que esto ocurra. En consecuencia, los glaciares son pequeños y se distribuyen en general de una manera dispersa con muy baja densidad. Existen pocos glaciares descubiertos y recién es posible encontrarlos al sur de los 25° de latitud sur. En cambio, al norte de los 24° solo se desarrollan glaciares de escombros (Zalazar et al., 2017). Los cuerpos de hielo y nieve de la región ubicada entre los 23° y 30° de latitud sur, fueron inicialmente estudiados por Lliboutry quien describió a estos glaciares como de tipo reservorio, es decir, todo el cuerpo de hielo se encuentra en balance positivo (acumulación) o negativo (ablación) dependiendo de la época del año. Estos son formados por nieve recongelada, no presentan línea de equilibrio, se ubican en los picos mayores a 6000 msnm, en pequeños circos o nichos de nivación, y unos pocos presentan grietas o signos de movimiento (Lliboutry et al., 1957).

5.2. Contexto socio-económico de la región

En la región de los Andes Desérticos de Argentina nacen ríos importantes como el Bermejo, Juramento, Salí Dulce, Salado, Vinchina-Bermejo y Jáchal. El primero de ellos permite la agricultura y la producción de las provincias de Jujuy, Salta y Formosa, el segundo es clave para la producción de la provincia de Salta y Santiago del Estero. Por su parte, el río Salí Dulce, el cual nace al sur de la provincia de Salta, es clave para la vida y producción de Tucumán y Santiago del Estero bajo la denominación de río Dulce.

El río Salado contribuye al desarrollo de la provincia de Salta y Santiago del Estero y norte de Santa Fe desembocando en el río Paraná. Por su parte, el río Vinchina ocupa un sector occidental de la provincia de La Rioja con un recorrido que atraviesa parte de las provincias de San Juan y sectores menores de las provincias de Catamarca y San Luis bajo la denominación de río Bermejo. Por último, el río Jáchal es uno de los ríos más importantes de San Juan siendo clave para la producción agrícola-ganadera local. Cada uno de estos ríos es clave en términos económicos, sociales, culturales y ambientales de cada una de las localidades, poblados y ciudades que atraviesan llegando a encontrarse alrededor 3.000.000 de habitantes distribuidos en unas 400 localidades (INDEC, 2010) (Figura 3). Debido a la extensión de la región, son múltiples las instituciones y actores sociales que de una u otra manera se relacionan o intervienen en la gestión de estas cuencas como ser municipios, estados provinciales y nacional, organizaciones de riego, pueblos y comunidades campesino-indígena (asociadas a las identidades étnicas Atacama, Kolla, Kolla Atacameño, Quechua, Omaguaca, Lule, Lule Videla, Diaguita) (INAI, 2022), productores privados agrícolas, agropecuarios, sectores relacionados con la minería en diversas escalas. De algún modo u otro, los glaciares, en sus diversas formas y tipos, vinculados con estas cuencas, están relacionados con este complejo entramado social, político, económico y cultural.

En este sentido, los pobladores que viven en las localidades andinas y con quienes personal del ING pudo conversar (Anexo 3), tienen una directa relación con este ambiente y sus flujos hídricos, los cuales son clave para su subsistencia (consumo humano, agricultura, cuidado de animales y del ambiente en general) y tienen un conocimiento acabado del recorrido del agua, de su estado, de la nieve (cantidad y duración) y de la formación de hielo en alta montaña. También, notan los cambios en el estado de ríos, arroyos y vertientes, en la flora presente en el lugar distinguiendo su variedad, magnitud y forma, como por ejemplo humedales, y de plantas nativas (muchas de ellas de uso medicinal local). Además, de reconocer los cambios, los pobladores pueden ponderar las causas de los mismos y diferenciar si son parte de ciclos naturales, o si se deben a procesos mayores asociados al calentamiento global o a proyectos económicos gestionados en la zona.

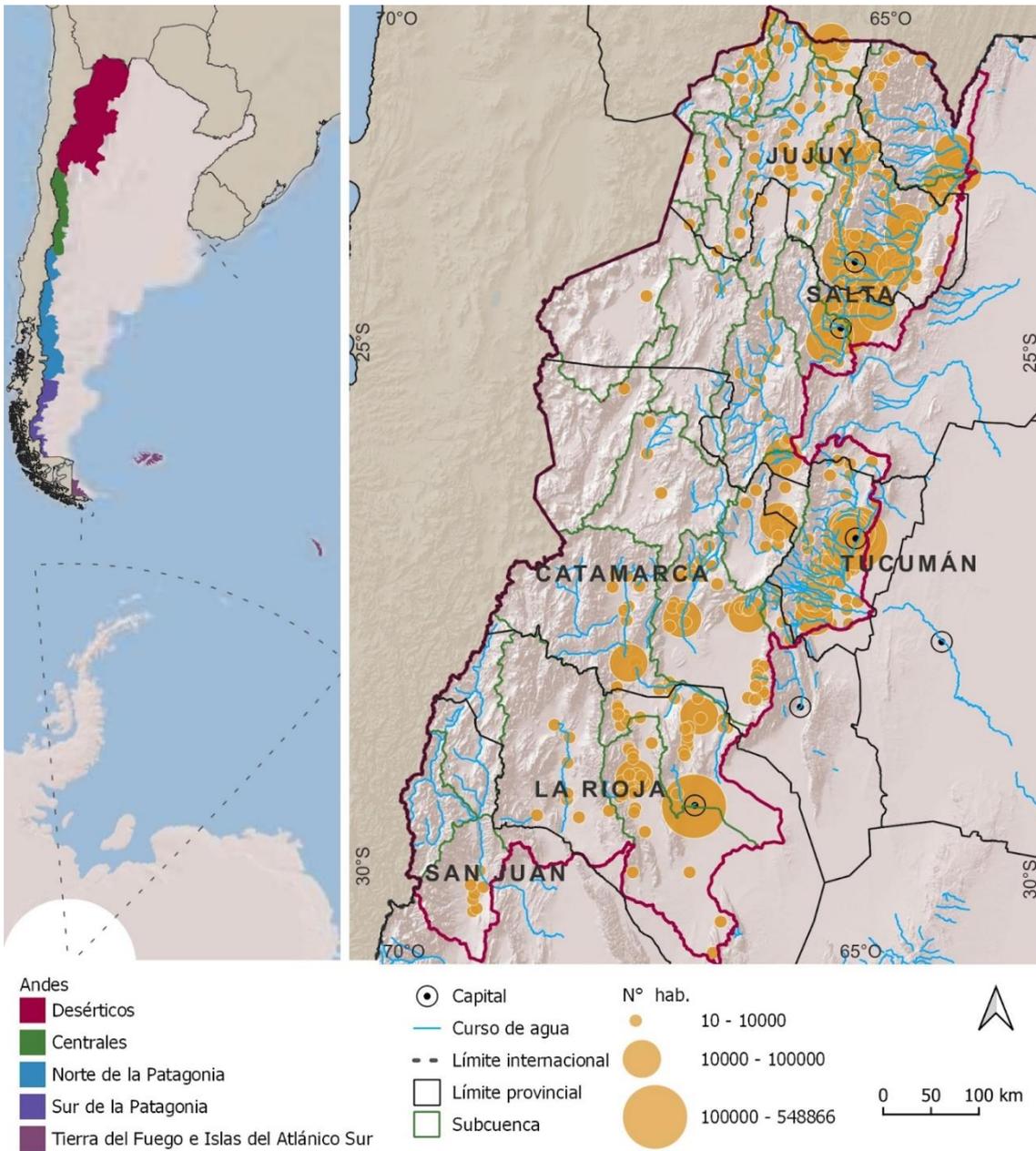


Figura 3. Mapa de presentación de las principales características socio-ambientales de los Andes Desérticos.

6. Antecedentes

La alta montaña de los Andes Desérticos ha despertado el interés de numerosos investigadores. Entre los estudios realizados en el ambiente periglacial, (Ahumada, 2002) sostiene que en el NOA los glaciares de escombros, se encuentran ubicados en alturas que van desde los 4000 msnm a más de 5000 msnm y están a su vez ligados a determinada topografía y orientación. Estos son importantes porque producen un significativo volumen de agua con menor cantidad de material suspendido si se los compara con los glaciares de hielo descubierto. Su núcleo congelado se encuentra protegido por la capa activa, siendo de esta manera más resistentes en el tiempo a las modificaciones de temperatura. Otros estudios se han focalizado en la geomorfología glaciar e inventario de glaciares en la Cordillera Oriental argentina, donde se ubican los glaciares de la alta cuenca del río Juramento (Martini et al., 2013, 2015). Falaschi et al. (2014) realizaron el primer inventario detallado de glaciares en la región de Valles Calchaquies de Salta (24,17°S–25,33°S, 66°W–66,5°O) comprendiendo tanto al sector de las sierras de Cachi-Palermo como de la sierra de San Miguel. En este inventario se utilizaron como base para la identificación de las geoformas, imágenes de alta resolución (ALOS-PRISM) en las que se identificaron manchones de nieve perenne, morenas y fundamentalmente glaciares de escombros. Estos últimos fueron clasificados en base a su actividad en dos grandes grupos, glaciares de escombros intactos y fósiles. En la primer clase se agruparon tanto a glaciares de escombros activos como inactivos, es decir, aquellos que poseen hielo en su interior; y en el segundo grupo se incluyeron a aquellas geoformas en las que no fue observada la evidencia de hielo en su interior, con características colapsadas y colonizadas por vegetación. En este trabajo fueron identificadas un total de 488 geoformas cubriendo un área total de 59 km², en ellos fue observado un límite inferior de ocurrencia de glaciares de escombros intactos aproximadamente a los 4300 msnm y a los 4100 msnm para los fósiles.

Dussailant et al. (2019) midieron los cambios de espesor de los glaciares andinos (de 10°N a 56°S) utilizando series temporales (2000 a 2018) de modelos de elevación digital obtenidos a partir del procesamiento de imágenes ASTER. En los Andes Desérticos observaron pérdidas de hielo relativamente moderadas ($-0,28 \pm 0,18$ m a.e. a⁻¹) en comparación con otras regiones. El análisis temporal entre los subperíodos 2000-2009 y 2009-2018 reveló un cambio en el espesor de ligeramente positivo a uno fuertemente negativo entre las latitudes 26 y 45° S.

En el año 2018 se publicó el primer Inventario Nacional de Glaciares de Argentina realizado a partir del análisis de imágenes satelitales ópticas. En la región de los Andes Desérticos se inventariaron un total de 2986 cuerpos de hielo, que cubrían un total de 271 km² de superficie y que representaban el 4,7% del área con cuerpos de hielo en la Cordillera de los Andes. Con respecto al tipo de cuerpos de hielo, los glaciares con hielo descubierto representaban el 35% de la superficie, los glaciares de escombros el 33% y los manchones de nieve el 30% (IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, 2018).

Más recientemente, Pitte et al. (2022) analizaron los cambios recientes en el balance de masa del glaciar del Agua Negra, de 1 km² de superficie, ubicado en la cuenca del río Jáchal. En el periodo comprendido entre 1959 y 2019 se observó que el glaciar perdió un 23% de área. Por otra parte, los resultados de mediciones glaciológicas realizadas durante siete años (2014-2021), en el marco del monitoreo llevado a cabo por el ING, indicaron un balance de masa anual promedio de $-0,52 \text{ m a.e. a}^{-1}$ (metros de agua equivalente por año), con balances medios de invierno y verano de 0,80 y $-1,33 \text{ m a.e. a}^{-1}$, respectivamente.

7. Principales resultados de la actualización del ING en la región

Como resultado del proceso de actualización del ING en los Andes Desérticos se identificaron un total de 3087 cuerpos de hielo que ocupan una superficie de 249,59 km² (Tabla 1). Estos datos indican, con respecto al primer ING, una reducción en la superficie de un 8% y un incremento del 3% en la cantidad de cuerpos de hielo. El aumento en la cantidad de geoformas, a pesar de la disminución del área, responde a dos razones principales, por un lado a la subdivisión de algunos cuerpos de hielo, mayormente manchones de nieve, y por otro lado a una mejora en la identificación de glaciares de escombros debido a una mayor disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución espacial.

De la superficie identificada en la actualización, el 39% corresponde a glaciares de escombros, el 36% a glaciares (34% hielo descubierto y 2% hielo cubierto) y el 25% a manchones de nieve (Figura 4 a)

Tabla 1. Superficie cubierta por los diferentes cuerpos de hielo en los Andes Desérticos.

| Tipo de geoforma | Área (km ²) | | |
|----------------------------|-------------------------|--------|--------|
| | | | |
| Glaciares | Hielo descubierto | 85,48 | 90,26 |
| | Hielo cubierto | 4,78 | |
| Manchones de nieve perenne | | 62,27 | 62,27 |
| Glaciares de escombros | Activos | 49,22 | 97,06 |
| | Inactivos | 47,84 | |
| Total | | 249,59 | 249,59 |

Los cuerpos de hielo de esta región se distribuyen aproximadamente entre los 3362 y los 6740 msnm. Un análisis por tipo de geoforma indica que los glaciares de escombros se localizan en promedio a 4683 msnm, los glaciares descubiertos a 5043 msnm y los manchones de nieve a los 5579 msnm (Figura 4 b).

Los Andes Desérticos se caracterizan, en general, por tener cuerpos de hielo pequeños, el 98% de los mismos tiene un área inferior a 0,05 km², con una superficie media de 0,08 km² (Figura 4 c). Una notable excepción es un campo de hielo de unos 17 km² de superficie que se desarrolla entre las cinco cumbres principales del Monte Pissis (6882 msnm). Hidrológicamente, este campo de hielo se distribuye hacia el sur en la cuenca

del río Jáchal, y hacia el norte en la cuenca Abaucán-Laguna Verde. En esta región, la mayor parte de las masas de hielo y de la superficie cubierta por los mismos tienen una orientación predominante hacia el sureste (Figura 4 d).

Los glaciares adquieren cada vez más relevancia hacia el sur, hasta llegar a ser la categoría más importante en cuanto a superficie cubierta en la cuenca del río Jáchal (Figura 5). Esta cuenca, con 1036 cuerpos de hielo que cubren un área de 127,53 km², es la que posee, además; la mayor cantidad de geoformas y de superficie cubierta seguida por la cuenca alta del río Juramento (ver anexo Tabla A 4). Teniendo en cuenta la división en provincias, Catamarca y Salta son las que más cuerpos de hielo presentan (714 cada una) y abarcan un área cubierta de 59,54 y 32,71 km² respectivamente (ver anexo Tabla A 5).

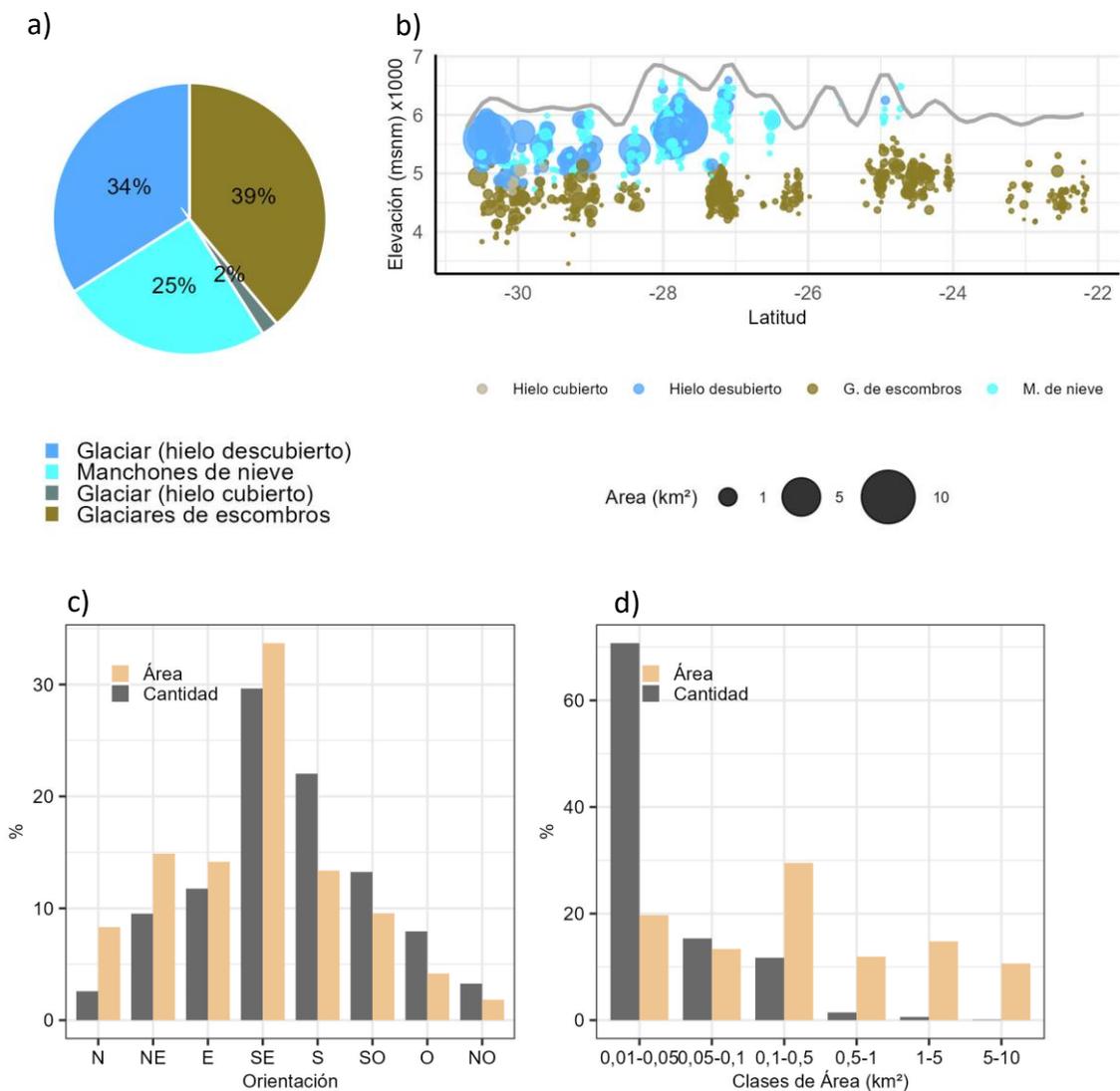


Figura 4. Principales características de los cuerpos de hielo de los Andes Desérticos.
a) Superficie cubierta en porcentaje según tipo de geoforma. b) Distribución latitudinal y altitudinal de los diferentes cuerpos de hielo. La línea de color gris indica la altura media de la cordillera en límite con Chile. c) Orientaciones de los cuerpos de hielo de acuerdo a la superficie ocupada y cantidad de glaciares, en porcentajes. d) Distribución del número y superficie de los cuerpos de hielo inventariados según clases de área.

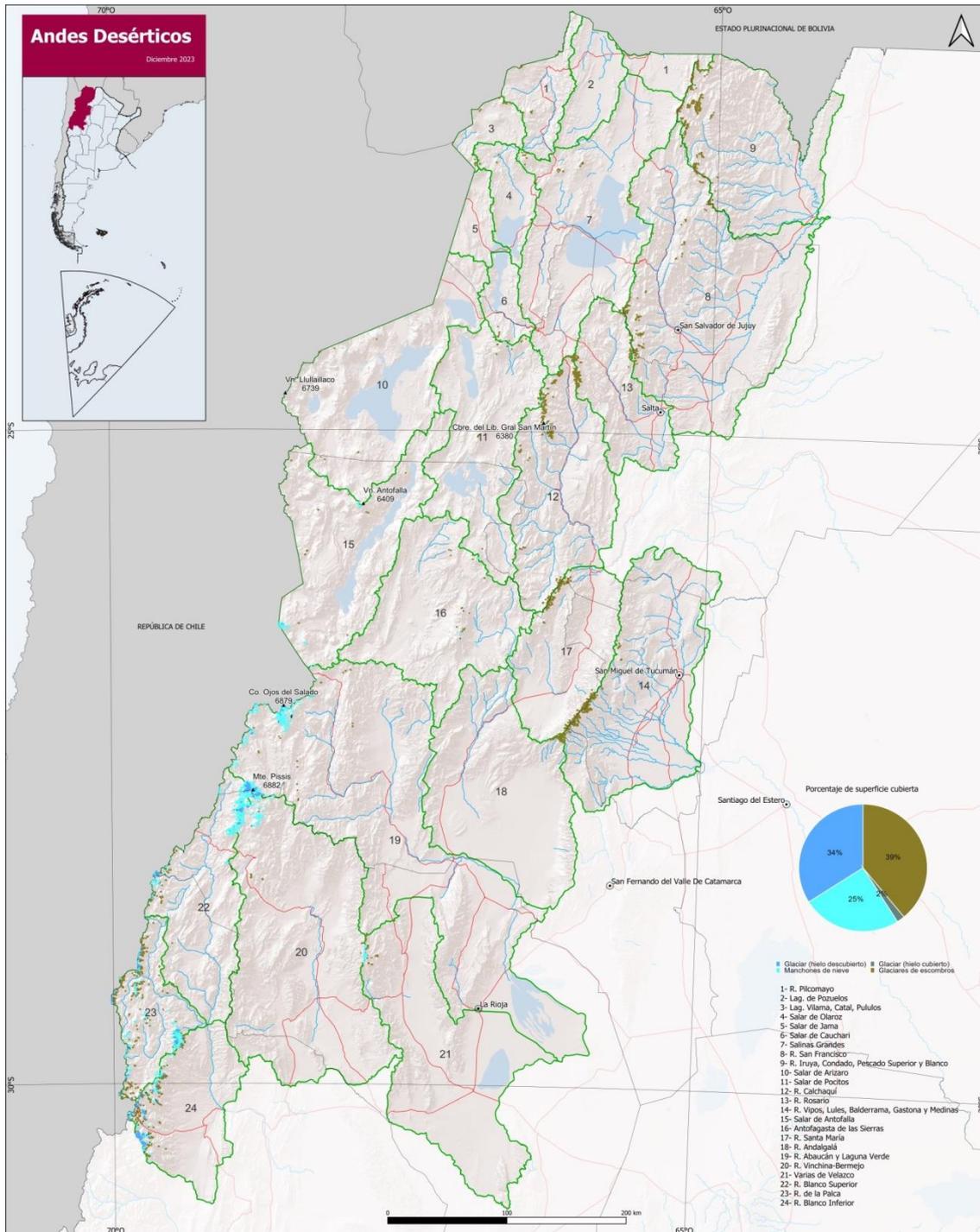


Figura 5. Mapa de localización de los tipos de cuerpos de hielo en los Andes Desérticos.

7.1. Variaciones recientes de los glaciares

La comparación realizada entre los resultados obtenidos en el inventario presentado en el año 2018, realizado mayormente con imágenes satelitales del año 2010, y el actual, elaborado con imágenes predominantemente del año 2020, indica una disminución en el área de 21,75 km² (8%) en aproximadamente 10 años. Esta disminución está impulsada mayormente por los manchones de nieve (-23%) y el hielo descubierto de los glaciares (-17%).

Aproximadamente, unos 90 cuerpos de hielo, mayormente manchones de nieve, que habían sido identificados en el primer ING no fueron visualizados en las imágenes de base de la presente actualización. En general se trata de pequeños cuerpos de hielo con una superficie media de 0,03 km², de acuerdo al inventario publicado en el año 2018, y localizados entre los 4500 y 6500 msnm.

7.1.1. Cambios en el área y espesor de los glaciares seleccionados

En este apartado se analizan las fluctuaciones (años 1986-2020) de glaciares de hielo descubierto y manchones de nieve, mediante la utilización de imágenes satelitales, en el área aledaña al Monte Pissis (Figura 6).



Figura 6. Monte Pissis y glaciar de los Argentinos visto desde el noreste (Foto: J. P. Scarpa 2017).

El sector de estudio se ubica entre los 27,63° y 28,17° de latitud sur y 68,53° y 69,08° de longitud oeste e incluye las nacientes de las subcuencas de Vinchina-Bermejo, Blanco Superior (afluente del Río Jáchal) y un sector de la Laguna Verde, perteneciente a la subcuenca del río Abaucán, en las provincias de Catamarca y La Rioja. La zona analizada cubre una superficie total aproximada de 2400 km² y se extiende desde los 4.000 msnm, donde aparecen los primeros cuerpos de hielo, hasta los 6882 msnm, que corresponde a una de las cumbres del Monte Pissis (Figura 7).

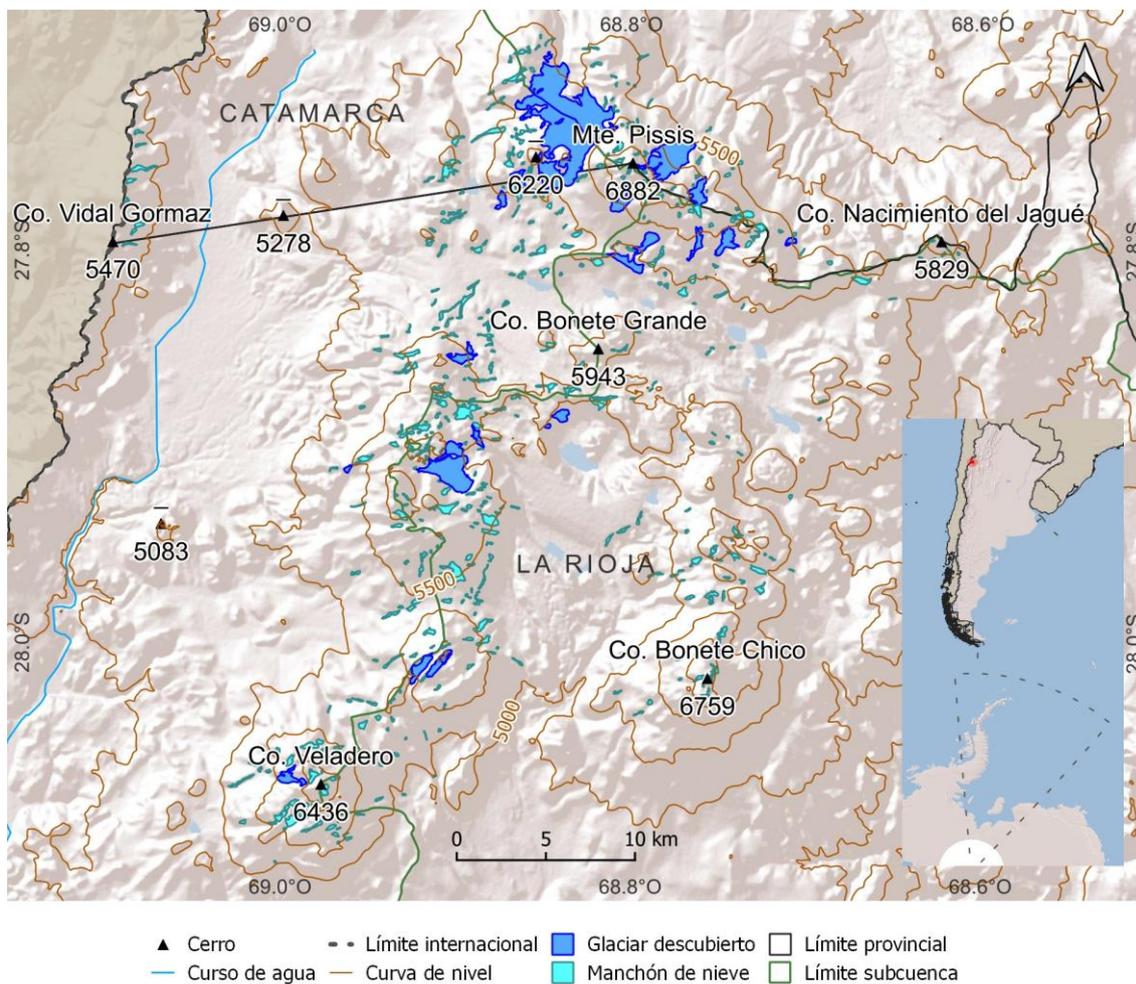


Figura 7. Mapa de ubicación del área aledaña al Monte Pissis.

El sector occidental del área de trabajo comprende a la Sierra del Veladero, que presenta una orientación predominante norte-sur y divide a las subcuencas del río Blanco Superior hacia el oeste de la subcuenca del río Vinchina-Bermejo hacia el este. En esta sierra se encuentran los cerros Veladero (6436 msnm) y el Bonete Grande (5943 msnm), entre otros. En el sector oriental el cerro más destacado es el Bonete Chico de 6759 msnm. Finalmente, hacia el norte se ubica el macizo montañoso donde se sitúa el Monte Pissis (6882 msnm.) y cerro Nacimiento del Jagués (5829 msnm) que dividen la subcuenca de La Laguna Verde, hacia el norte, de la subcuenca del río Vinchina-Bermejo hacia el sur (Figura 7).

El área se caracteriza por la presencia de manchones de nieve, glaciares de hielo descubierto y no se han identificado en el ING glaciares de escombros. En total se analizaron las fluctuaciones de unos 587 cuerpos de hielo, identificados en imágenes satelitales del año 1986. Del total de los cuerpos analizados, 566 corresponden a manchones de nieve y 21 a glaciares de hielo descubierto. Dentro de la categoría correspondiente a los glaciares de hielo descubierto, 15 presentaban superficies menores a 1 km² y 6 mayores a dicha área. En general todos estos cuerpos presentan una orientación predominantemente hacia el sureste.

En 1986 los manchones de nieve cubrían una superficie de 55,02 km², mientras que los glaciares de hielo descubierto sumaban un área de 39,38 km². En el período comprendido entre 1986 y 2020 todos los cuerpos redujeron su superficie, sin embargo, los manchones de nieve disminuyeron el área en un 60%, aproximadamente, mientras que los glaciares de hielo descubierto un 15% en promedio (Figura 8 y Figura 9 a). El análisis de las variaciones muestra que los manchones de nieve presentan una mayor variabilidad en la superficie que los glaciares de hielo descubierto, puesto que sus áreas son más sensibles a las variaciones interanuales de las precipitaciones (años secos y años húmedos). Esto mismo se observa al comparar los glaciares más grandes (mayores a 1 km²) con respecto a los más pequeños (menores a 1 km²). Los glaciares menores a 1 km² redujeron el área en un 23% mientras que los glaciares mayores a 1 km² lo hicieron en un 13% (Figura 9 b). Como consecuencia de este cambio generalizado en el área, la cota inferior a partir de la cual se localizan los manchones de nieve se elevó 200 m aproximadamente entre 1986 y 2020 (desde 4734 hasta 4917 msnm), mientras que las cotas inferiores de los glaciares de hielo descubierto se elevaron decenas de metros en el mismo período, desde 5150 hasta 5203 msnm (53 m en 35 años) (Figura 9 c).

El análisis de los cambios en el espesor (2000-2020) de los glaciares del área a partir de los datos generados por Hugonnet et al., (2021) indican una pérdida de 0,23 m por año, que se traduce en una pérdida de aproximadamente un 4,6 m en todo el período.

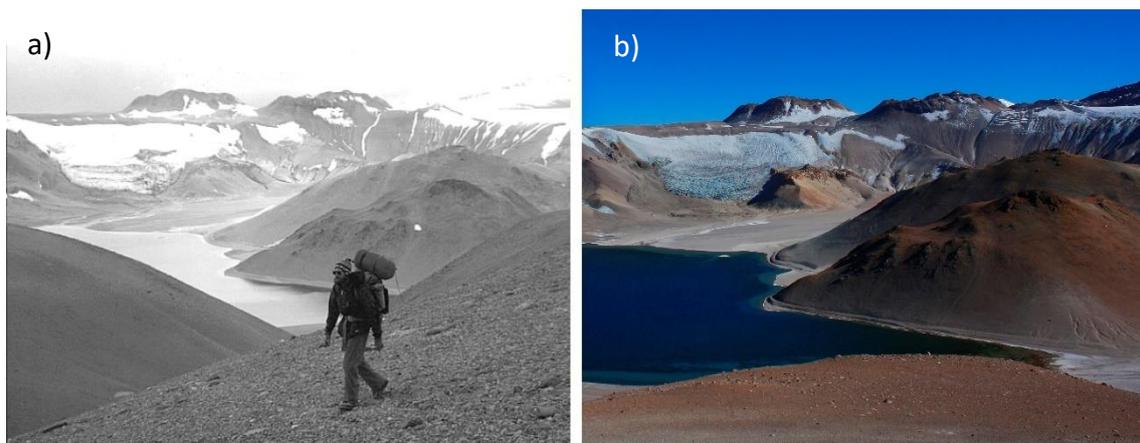


Figura 8. Comparación fotográfica de los cuerpos de hielo en la Corona del Inca Pillo.
a) Louis Glauser rodeando el cráter durante la expedición en 1986 (Colección de Reinhard). b) Campaña en terreno del ING en año 2017 (Foto: J.P. Scarpa).

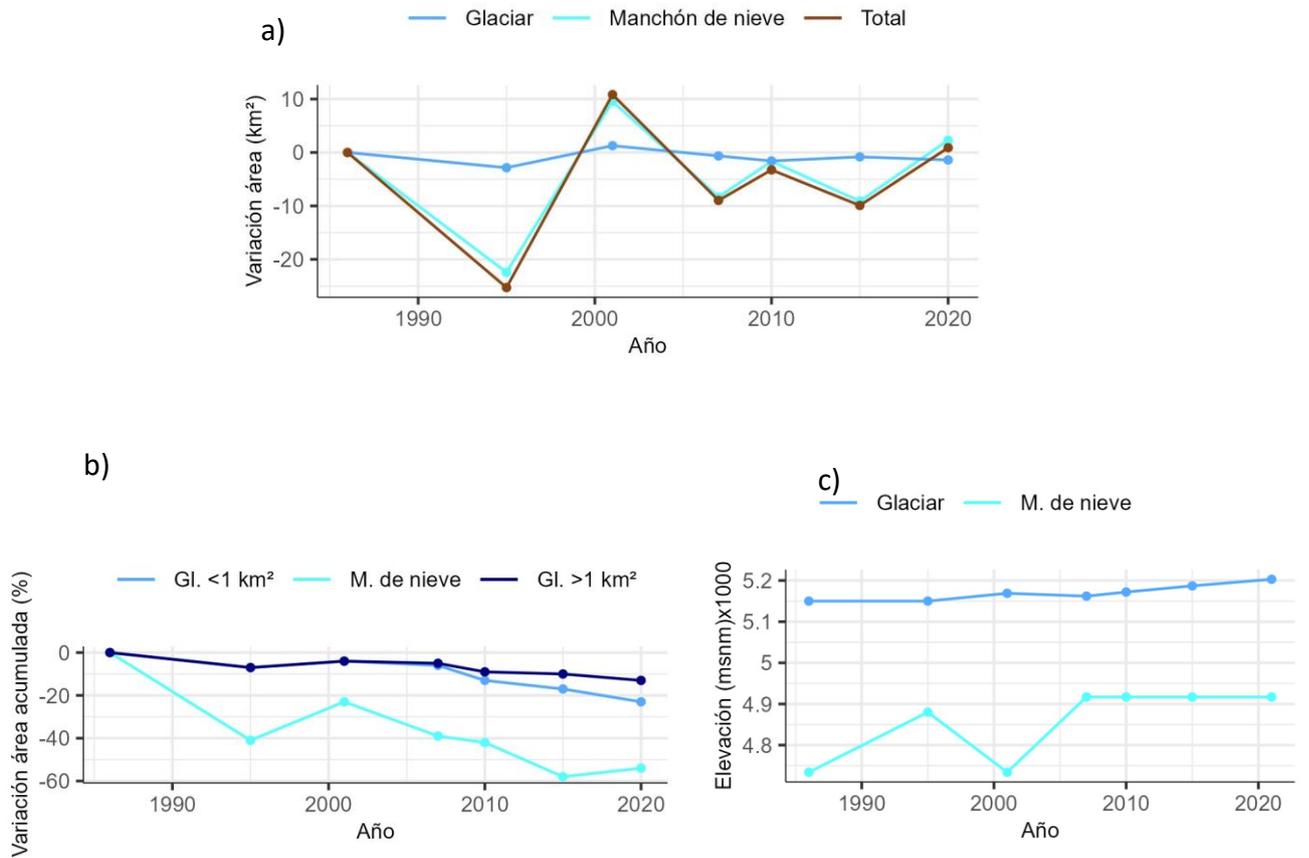


Figura 9. Cambios en los glaciares aledaños al Monte Pissis entre los años 1986 y 2020.
a) Variaciones en el área. b) Variaciones acumuladas en el área. c) Variaciones en la distribución altitudinal.

7.2. Cambio de masa y dinámica de cuerpos de hielo de referencia

Tanto glaciares, manchones de nieve perennes o glaciares de escombros pueden ser tomados como sistemas abiertos que intercambian energía y masa con el resto del ambiente (Benn & Evans, 2012; Haeberli, 1985). Para comprender cómo es la dinámica y el balance de masa de estos sistemas complejos, es necesario desarrollar estudios integrados que tengan en cuenta todos los aspectos propios y ajenos que influyen en los sistemas glaciarios y criogénicos.

7.2.1. Glaciar de Agua Negra

En la región de los Andes Desérticos, desde el año 2014 se lleva a cabo desde el ING el monitoreo del glaciar del Agua Negra, que lo convierte en el glaciar de referencia para esta región de la cordillera. El cuerpo de hielo está en un circo bien delimitado y casi no tiene cobertura detrítica. Se trata de un pequeño glaciar de montaña ubicado a 2 km de la ruta internacional 150 que une la ciudad de San Juan, en Argentina con La Serena, en Chile (Figura 10). En el año 2013 el glaciar del Agua Negra tenía un área de 1,02 km² y un largo de 2 km, con un rango de elevaciones entre 5250 y 4750 msnm y una orientación predominante hacia el sureste. En aproximadamente 10 años el área se redujo en un 14% (Figura 11).

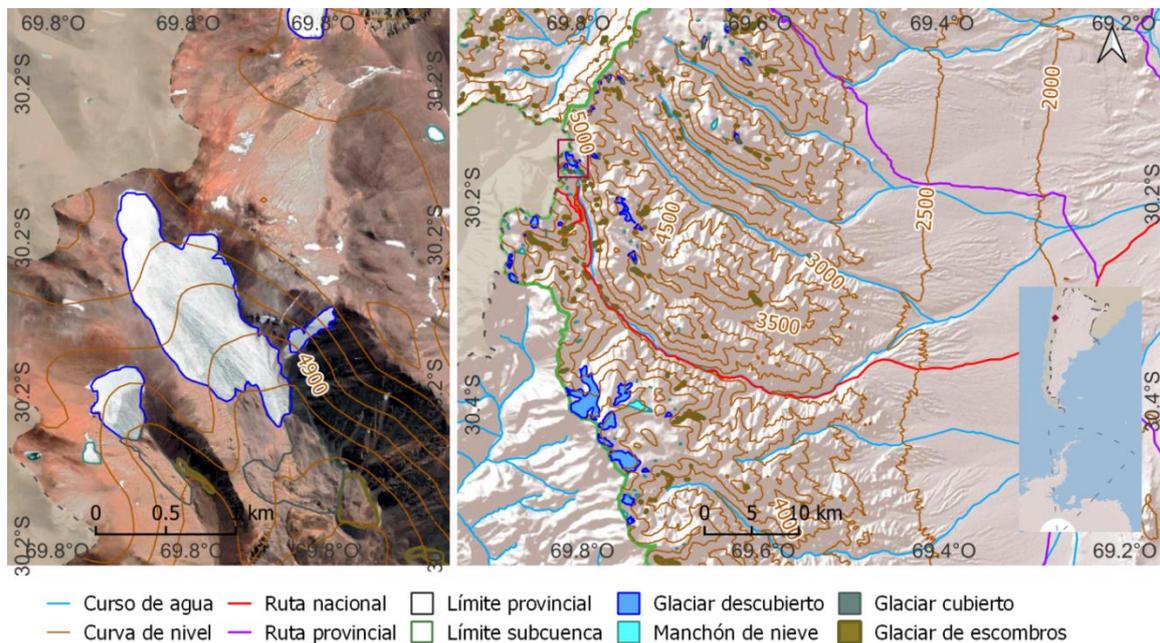


Figura 10. Mapa de ubicación del glaciar del Agua Negra. Provincia de San Juan.



Figura 11. Cambios en el glaciar del Agua Negra (2014-2022).
La imagen de la izquierda muestra el glaciar del Agua Negra en el año 2014 (Foto: P. Pitte), mientras que la de la derecha corresponde a una toma similar en el año 2022 (Foto: H. Gargantini)

El balance de masa anual promedio para el período 2014-2023 fue de 0,75 m a.e. a⁻¹ y el total acumulado de -6,79 m a.e. (Figura 12). En promedio la posición de la línea de equilibrio (ELA) se ubicó a los 5133 msnm, mientras que en algunos años como el 2020 y 2023 estuvo enteramente por encima del límite superior del glaciar que se encuentra alrededor de los 5250 msnm (Figura 13). El calentamiento regional y la disminución de las precipitaciones son probablemente las causas más importantes que explicarían este balance negativo del glaciar (Pitte, 2022).

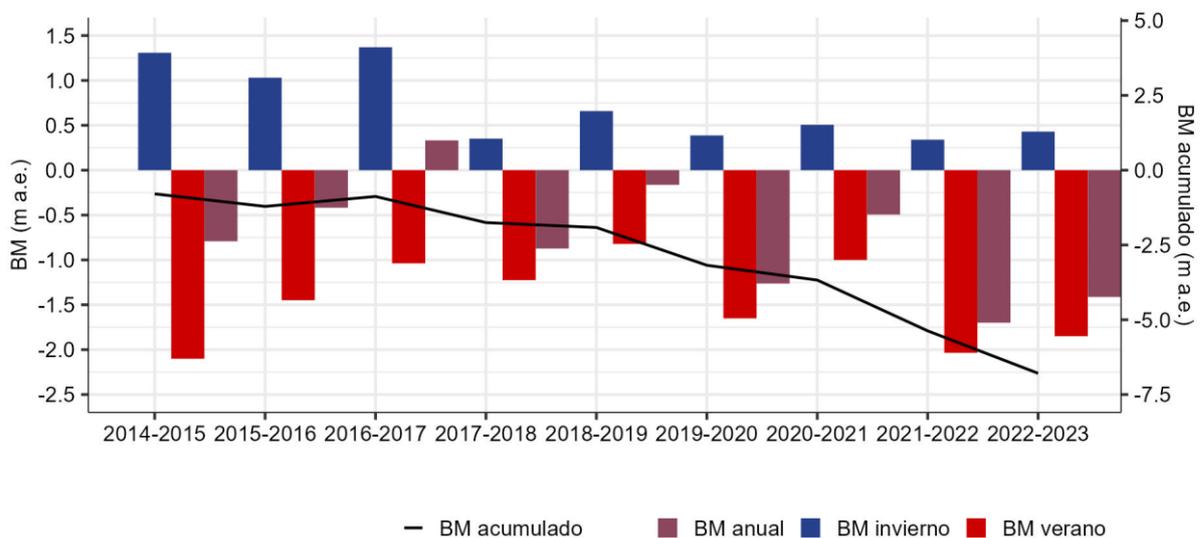


Figura 12. Balance de masa glaciológico del glaciar del Agua Negra (2014-2023).

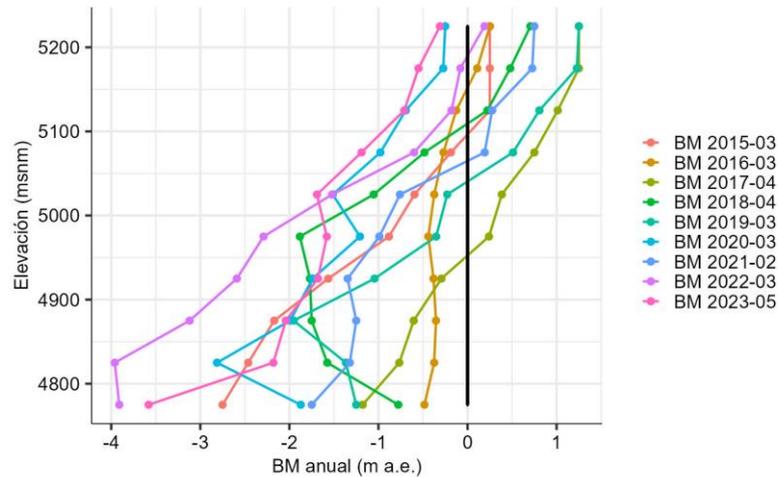


Figura 13. Altura de la línea de equilibrio (2015-2023).

7.2.2. Glaciar de escombros Corral Negro

Recientemente, durante la primavera del 2023, se avanzó en la incorporación de un nuevo sitio de monitoreo en los Andes Desérticos. Luego de un análisis detallado de este tipo de geformas en esta región de la cordillera, se decidió por comenzar los estudios en uno de los glaciares de escombros pertenecientes a la subcuenta del río Calchaquí, en la provincia de Salta. Se trata de un glaciar de escombros de origen criogénico de 0,14 km² ubicado en la quebrada de “Corral Negro”, cercano a la localidad de La Poma, que se encuentra ubicado en la cabecera de un valle, sobre un circo bien definido con un importante actividad periglacial (Figura 14 y Figura 15).

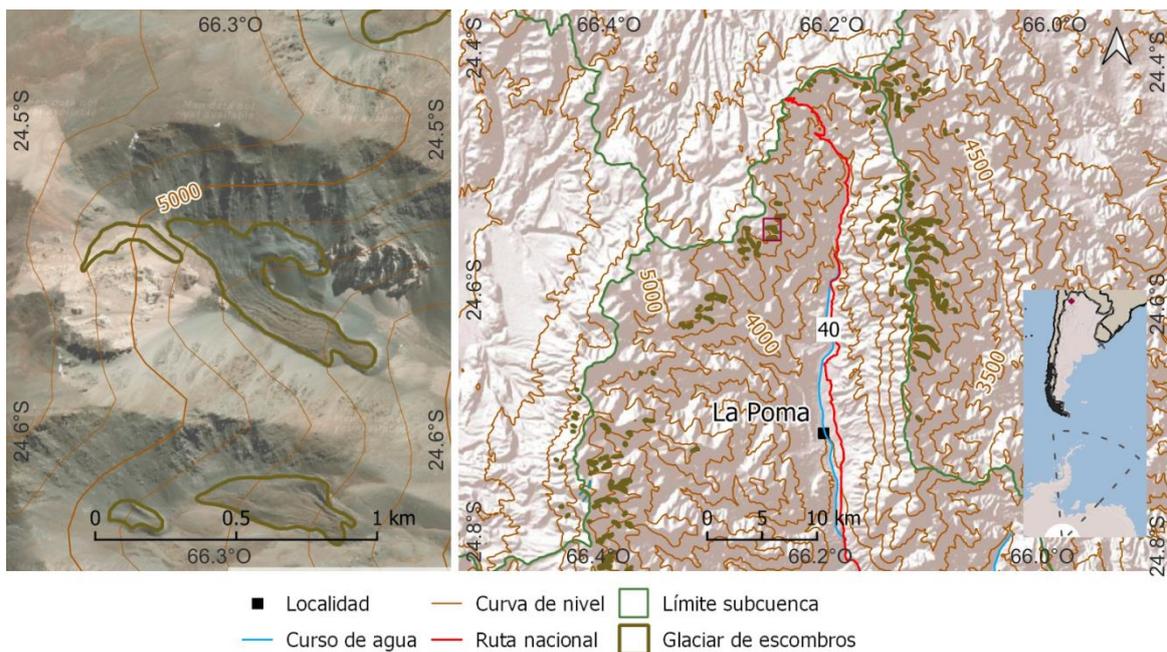


Figura 14. Mapa de ubicación del glaciar de escombros Corral Negro. Provincia de Salta

En este glaciar de escombros se instalaron termistores en la capa activa, siguiendo métodos desarrollados por la Unidad del Geogriología del IANIGLA (Trombotto, 2007; Trombotto y Borzotta, 2009). La capa activa del glaciar de escombros es la zona que entrega agua a la cuenca, también es posible que ingrese agua por derretimiento de la base del permafrost, pero ésta es mucho menor (Barsch, 1996).



Figura 15. Detalle de la superficie del glaciar de escombros Corral Negro con el valle del río Calchaquí al fondo (Foto: M. Castro 2023)

Si bien la instrumentación es reciente, se encuentra planificada para los próximos meses una nueva visita al lugar y así poder adquirir los primeros datos de temperatura en el glaciar Corral Negro. También está prevista la instalación de una estación meteorológica próxima al glaciar.

7.3. Significancia hidrológica y volumen de hielo almacenado

La cuantificación del aporte hídrico de los glaciares puede estimarse utilizando mediciones de escorrentía superficial en arroyos proglaciales y distintos modelos numéricos. Por otro lado, los registros meteorológicos permiten determinar, entre otras cosas, gradientes altitudinales de las diferentes variables observadas, diferencias en la distribución y cantidad de la nieve acumulada y flujos energéticos en sitios seleccionados. La correlación de estas variables posibilita establecer relaciones entre los regímenes de los caudales erogados por los glaciares y/o crioformas con las variaciones observadas en las estaciones meteorológicas.

Para lograr este objetivo desde el ING se instaló en la base del Glaciar del Agua Negra, en el año 2017 la estación meteorológica automática “Capayán” a 4754 msnm que ha registrado desde entonces datos, como una temperatura media anual de $-4,5^{\circ}\text{C}$, y una precipitación inferior a 500 mm anuales que se concentra principalmente en los meses de invierno. La radiación puede superar $440 \text{ w m}^2 \text{ h}$ y la humedad promedio es del 32%. Además, en el arroyo del Agua Negra se instaló una estación de aforo (Diaguita), situada a 3930 msnm donde se mide el nivel del agua para estimar el caudal y se toman datos de temperatura. Así por ejemplo los datos medios entre los años 2017-2018 muestran que el caudal se incrementa a medida que aumentan las temperaturas hacia fines de la primavera y alcanza el máximo en el mes de febrero (Figura 16 a). En el glaciar del Agua Negra se han realizado, además, mediciones con radar de penetración terrestre (GPR) que han permitido estimar el espesor de hielo en este sitio, que alcanzan profundidades máximas de hasta alrededor de 80 m y un volumen calculado mayor a 20 hm^3 (Figura 16 b).

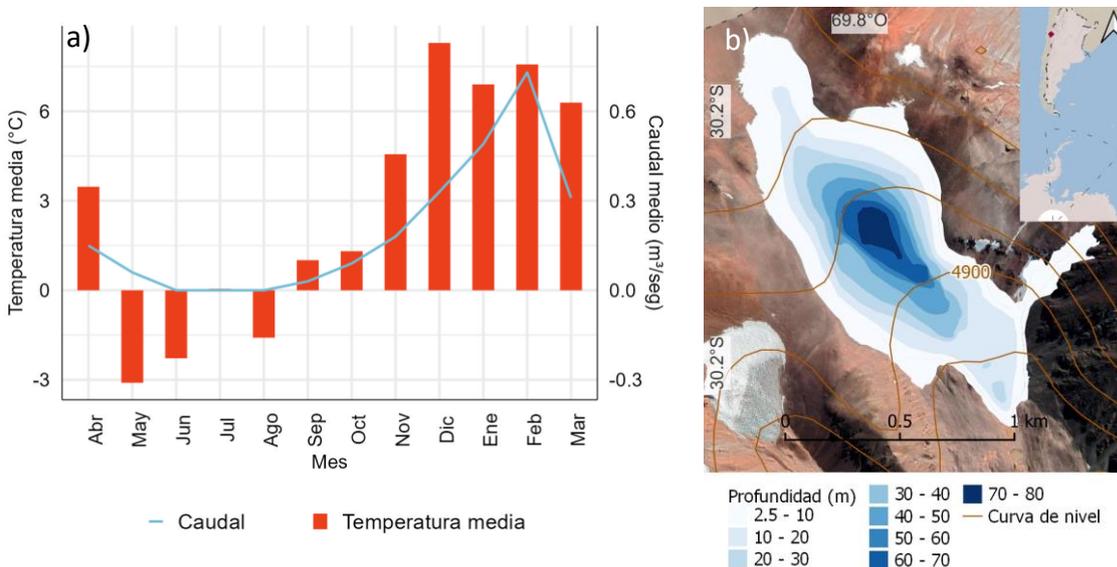


Figura 16. Monitoreo del glaciar del Agua Negra.

a) Datos medios mensuales de temperatura y caudales medidos in situ. b) Mediciones de espesor con GPR.

Respecto a los glaciares de escombros, los aportes hídricos están fundamentalmente relacionados con las variaciones en la capa superficial de los mismos (capa activa). Si bien también es posible que ingrese agua por derretimiento de la base del permafrost, este volumen es significativamente menor (Barsch, 1996).

Como se mencionó previamente, en la primavera del 2023, se iniciaron las tareas de monitoreo en este tipo de geoformas. De esta manera se obtendrán datos a mediano y largo plazo sobre el estado y las variaciones del tope de permafrost y la capa activa dentro del cuerpo de hielo, que brindarán información para conocer los ciclos estacionales de congelamiento y descongelamiento y su relación con los caudales medidos en cada sitio. A su vez, se complementarán los estudios en el sitio con los datos obtenidos a partir de la instalación de una nueva estación meteorológica en la zona.

La colección sistemática y continuada de estos datos permitirá, en el futuro, el desarrollo de modelos hidrológicos específicos que permitan determinar y diferenciar el aporte hídrico proveniente del derretimiento glaciar comparado con el aporte de otras fuentes como por ejemplo, la nieve estacional.

7.4. Impacto del cambio climático en los cuerpos de hielo

En coincidencia con el calentamiento global, los glaciares están perdiendo masa rápidamente en todo el mundo. Proyecciones realizadas a nivel mundial estiman que perderán aproximadamente entre el 18 y 36% del volumen de hielo (año 2015) para el final del siglo 21. En el caso de los Andes Desérticos, los análisis presentados previamente, indican una disminución en el área de los glaciares descubiertos del 17% y en los manchones de nieve del 23% en los últimos 10 años. Estos datos son confirmados por la disminución en el área observada en los cuerpos de hielo en los alrededores del Monte Pissis y en el glaciar del Agua Negra. La reducción del área se ve acompañada de una disminución en el espesor de los cuerpos de hielo y balances de masas negativos para el glaciar del Agua Negra (-6,79 m a.e. entre los años 2014-2023). Estos datos representan una primera aproximación a la evaluación del impacto del cambio climático en los cuerpos, pero sin embargo, deben ser complementados con mediciones in situ y satelitales, que resultan indispensables para comprender los cambios en los glaciares en profundidad y reducir la incertidumbre en las proyecciones en cuanto a su evolución (Hock 2021).

En relación al permafrost, los cambios en la temperatura durante largos periodos de medición son indicadores de cambio climático. El calentamiento resulta en un incremento del espesor de la capa activa, derretimiento del hielo del suelo y reducción del espesor y extensión lateral del permafrost. Estos cambios afectan la estabilidad del terreno produciendo hundimientos o erosión, cambios en la vegetación y en los ecosistemas. Al respecto, es importante sostener y ampliar las mediciones de temperaturas en los glaciares de escombros, obteniendo información sobre las variaciones en la capa activa y en las capas superiores del permafrost.

En concordancia con estos esfuerzos globales, la actualización del ING es un proceso continuo, cuyos resultados sumados al monitoreo sostenido en el tiempo de las masas de hielo, su aporte a la escorrentía de los ríos, mediciones meteorológicas y las variaciones en su volumen, permitirán generar una base de datos que a futuro será un insumo esencial para analizar el impacto del cambio climático en los cuerpos de hielo argentinos y sus posibles implicancias desde el punto de vista hidrológico.

8. Bibliografía

- Ahumada, A.-L. (2002). Periglacial phenomena in the high mountain of northwestern Argentina. *South African Journal of Science*, 98, 166-170.
- Azócar, G., & Brenning, A. (2010). Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 42-53.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J.-L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), Article 75pt2. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Barsch, D. (1978). *Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps*. 1, 348-353.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers. Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments* (Vol. 16). Springer.
- Benn, D., & Evans, D. J. (2012). *Glaciers and glaciation. 2nd edition* (2nd ed.). Hodder Arnold Publication.
- Bertone, A., Zucca, F., Marin, C., Notarnicola, C., Cuozzo, G., Krainer, K., Mair, V., Riccardi, P., Callegari, M., & Seppi, R. (2019). An unsupervised method to detect rock glacier activity by using Sentinel-1 SAR interferometric coherence: A regional-scale study in the Eastern European Alps. *Remote Sensing*, 11(14), 1711.
- Biskaborn, B. K., Lanckman, J.-P., Lantuit, H., Elger, K., Streletskiy, D., Cable, W., & Romanovsky, V. E. (2015). The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). *Earth System Science Data*, 7(2), 245-259.

- Brenning, A. (2005). *Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modelling and field mapping*. Humboldt Universität.
- Caminos, R. (1999). *Geología Argentina* (Vol. 29). Subsecretaría de Minería de la Nación, SEGEMAR.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., & Zemp, M. (2011). *Glossary of glacier mass balance and related terms* (IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86. IACS Contribution No. 2; Mass Balance, Número IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86. IACS Contribution No. 2, p. 114). UNESCO-IHP.
- 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), 802-808.
- Falaschi, D., Castro, M., Masiokas, M., Tadono, T., & Ahumada, A. L. (2014). Rock Glacier Inventory of the Valles Calchaquíes Region (~ 25°S), Salta, Argentina, Derived from ALOS Data: Rock Glacier Inventory of the Valles Calchaquíes, Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/ppp.1801>
- Filipponi, F. (2019). *Sentinel-1 GRD preprocessing workflow*. 11.
- Gatti, A., & Bertolini, A. (2013). Sentinel-2 products specification document. Available online <https://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.

- Haeberli, W. (1985). *Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers* (Mitteilungen Der Versuchsanstalt Für Wasserbau, Hydrologie Und Glaziologie, p. 143). ETH.
- Harris, S. A., French, H. M., Heginbottom, J. A., Johnston, G. H., Ladanyi, B., Sego, D. C., & van Everdingen, R. O. (1988). *Glossary of permafrost and related ground-ice terms* (Permafrost, p. 154). Permafrost Subcommittee. Associate Committee on Geotechnical Research. National Research Council of Canada.
- Hernández, J. (1973). Perforadora a percusión para suelos detríticos criogénicos. *IANIGLA*, 2003, 30.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., & Kutuzov, S. (2019). High mountain areas. En *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (pp. 131-202). H.-O. Pörtner, DC Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E....
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., & Brun, F. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726-731.
- IANIGLA-CONICET. (2010). *Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos cronograma de ejecución* (Glacier law, p. 86). Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- IANIGLA-CONICET. (2019). *Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Plan de actualización*.

- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. (2018). *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares* (Glacier inventory - Andes, p. 26). Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Ikeda, A. (2004). *Rock glacier dynamics near the lower limit of mountain permafrost in the Swiss Alps*. The University of Tskuba.
- INAI. (2022). *Mapa de pueblos originarios*. Instituto Nacional de Asuntos Indígenas. <https://www.argentina.gob.ar/derechoshumanos/inai/mapa>
- INDEC. (2010). *Censo nacional de población, hogares y vivienda*.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction*, 49(4), 44-45.
- Janke, J. R., Ng, S., & Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*, 296, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database*. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Jones, Harrison, S., Anderson, K., & Betts, R. A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, 8(1), 2834.
- Kääb, A., Strozzi, T., Bolch, T., Caduff, R., Trefall, H., Stoffel, M., & Kokarev, A. (2021). Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s. *The Cryosphere*, 15(2), 927-949.

- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of Chile and Argentina. En R. S. Williams & J. C. Ferrigno (Eds.), *Satellite image atlas of glaciers of the world. South America*. (Vols. 1386-1). USGS.
- Lliboutry, L., Gonzalez, O., & Smiken, J. (1957). *Les glaciers du désert Chilien*. 291-300.
- Martini, M. A., Strelin, J. A., & Astini, R. A. (2013). Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina (entre 22 y 25 S). *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 30(3), 569-581.
- Martini, M. A., Strelin, J. A., & Astini, R. A. (2015). Distribución y caracterización de la geomorfología glaciar en la Cordillera Oriental de Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 27(2), Article 2.
- Müller, F., Caflisch, T., & Müller, G. (1977). *Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory* (Glacier Inventory - WGMS, p. 19). Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich. http://www.wgms.ch/downloads/Mueller_etal_UNESCO_1977.pdf
- Nelson, F. E., Shiklomanov, N. I., Hinkel, K. M., & Christiansen, H. H. (2004). The Circumpolar active layer monitoring (CALM) Workshop and THE CALM II Program. *Polar Geography*, 28(4), 253-266.
- Noetzli, J., Arenson, L. U., Bast, A., Beutel, J., Delaloye, R., Farinotti, D., Gruber, S., Gubler, H., Haeberli, W., & Hasler, A. (2021). Best practice for measuring permafrost temperature in boreholes based on the experience in the Swiss Alps. *Frontiers in Earth Science*, 9, 607875.
- Østrem, G., & Brugman, M. M. (1991). *Glacier mass-balance measurements. A manual for field and office work* (Vol. 4). National Hydrology Research Institute.
- Pandey, P. (2019). Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery. *Geomorphology*, 340, 103-115.

- Paoli, H. P. (2003). Aprovechamiento de los recursos hídricos y tecnología de riego en el altiplano Argentino. *Recursos Hídricos de la Puna, Valles y Bolsones Áridos del Noroeste Argentino*. EEA-INTA Salta.
- Paul, F., Barrand, N. E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S. P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., & Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54, 171-182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Pitte, P., Berthier, E., Masiokas, M. H., Cabot, V., Ruiz, L., Ferri Hidalgo, L., Gargantini, H., & Zalazar, L. (2016). Geometric evolution of the Horcones Inferior Glacier (Mount Aconcagua, Central Andes) during the 2002-2006 surge: Horcones Inferior Glacier Surge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/2015JF003522>
- Pitte, P., Masiokas, M., Gargantini, H., Ruiz, L., Berthier, E., Hidalgo, L. F., Zalazar, L., Dussailant, I., Viale, M., & Zorzut, V. (2022). Recent mass-balance changes of Agua Negra glacier (30 S) in the Desert Andes of Argentina. *Journal of Glaciology*, 68(272), 1197-1209.
- Ramos, V. A. (2017). *Las provincias geológicas del noroeste argentino*. 42-56.
- Rangecroft, S., Harrison, S., & Anderson, K. (2015). Rock glaciers as water stores in the Bolivian Andes: An assessment of their hydrological importance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(1), Article 1. <https://doi.org/10.1657/AAAR0014-029>
- Rau, F., Mauz, F., Mogt, S., Singh Khalsa, S. J., & Raup, B. (2005). *Illustrated GLIMS Glacier Classification*. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'.

- RGIK. (2022). *Towards Standard Guidelines for Inventorying Rock Glaciers: Baseline Concepts (Version 4.2. 2)*.
- SAyDS, E. C. (2019). *Atlas de glaciares de la Argentina* (primera). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D., & Shahgedanova, M. (2007). Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46(1), Article 1. <https://doi.org/10.3189/172756407782871468>
- Trombotto Liaudat, D. (2002). El ambiente criogénico actual y el paleopermafrost en el extremo austral de América del sur. En D. Trombotto & R. Villalba (Eds.), *IANIGLA, 30 años de investigación básica y aplicada en ciencias ambientales* (pp. 65-69). IANIGLA-CONICET.
- Trombotto Liaudat, D. (2007). Profundización del tope de permafrost y tendencias en la dinámica criogénica, a partir de 1989, en el glaciar de escombros compuesto del valle de Morenas Coloradas, Mendoza, Argentina. *Boletín Geográfico*, 30, 71-83.
- Trombotto Liaudat, D., & Borzotta, E. (2009). Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Cold Regions Science and Technology*, 55, 321-330.
- Trombotto Liaudat, D., Wainstein, P., & Arenson, L. U. (2014). Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana. Buenos Aires: Vazquez Mazzini.
- UNEP. (2007). *Global outlook for ice and snow* (United Nations Environment Program, United Nations Environment Program).

- UNESCO-IASH. (1970). *Perennial ice and snow masses. A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory* (Technical Papers in Hydrology, Vol. 1). UNESCO.
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J., & Zalazar, L. (2019). Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>
- WGMS. (2017). *Global glacier change Bulletin. Bulletin No. 2 (2014-2015)* (Glacier Fluctuations, p. 257). WGMS.
- Willis, M. J., Melkonian, A. K., Pritchard, M. E., & Rivera, A. (2012). Ice loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012. *Geophysical Research Letters*, 39(17), Article 17. <https://doi.org/10.1029/2012GL053136>
- Zalazar, L., Ferri Hidalgo, L., Castro, M., Gargantini, H., Giménez, M., Pitte, P., Ruiz, L., Masiokas, M., & Villalba, R. (2017). Glaciares de Argentina: Resultados preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2, 13-22.
- Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Gimenez, 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.

Anexo

1. Materiales y métodos

1.1. Mapeo de glaciares

1.1.1. Selección de imágenes satelitales

La base del trabajo cartográfico son las imágenes satelitales ópticas en cuya selección se siguieron las sugerencias que tienen en cuenta la ausencia de nubes y la cobertura de nieve (Paul et al., 2013). Para minimizar los posibles errores que introduce la cobertura de nieve, que dificulta la delimitación de los cuerpos de hielo, se eligieron casi exclusivamente imágenes correspondientes al final del año de balance de masa (Cogley et al., 2011). En el caso de glaciares de los Andes Desérticos, el final del año de balance de masa coincide con el final de la temporada seca (fines de agosto y principios de septiembre).

Para realizar el inventario de los Andes Desérticos se utilizaron como base imágenes de los satélites SENTINEL 2 A y B, en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2019 a 2021. Estos satélites han sido desarrollados por la ESA (Agencia Espacial Europea) y proveen imágenes mediante el sensor Multi Spectral Instrument (MSI) en 12 bandas y a una resolución espacial de 10 a 20 m en el VIS (visible), IRC (infrarrojo cercano) y IRM (infrarrojo medio), características que las convierten en un producto ideal para el mapeo de cuerpos de hielo. Cada uno de los satélites adquiere imágenes cada 10 días y a través de la superposición de ambos se alcanza una resolución temporal como máximo de 5 días y en latitudes medias entre 2 y 3 días (Gatti & Bertolini, 2013). Las escenas obtenidas por la misión Sentinel están divididas en tiles de 110 x 110 km y para el caso del área objeto de estudio se utilizaron 28 tiles (Tabla A 1).

Las imágenes de base fueron obtenidas de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma, no sólo facilita la visualización y consulta en línea de información geoespacial sino también su procesamiento. De esta manera es posible procesar una gran cantidad de datos a diferentes escalas espaciales y temporales sin necesidad de tener que descargarlos. GEE incluye bases de datos provenientes de un gran número de satélites, variables ambientales, climáticas, topográficas, coberturas de suelo, entre otras (Gorelick et al., 2017).

La revisión, detección y mapeo de los glaciares de escombros y hielo cubierto por detritos fue realizada manualmente, delimitando cada cuerpo individualmente, usando las imágenes de alta resolución espacial como las disponibles en Google Earth y Bing. Estas imágenes han sido ampliamente utilizadas en trabajos relacionados con la identificación de glaciares de escombros y hielo cubierto por detritos (Jones et al., 2018; Pandey, 2019; Rangescroft et al., 2015).

Tabla A 1. Imágenes de base, Sentinel 2 utilizadas en la actualización del ING de los Andes Desérticos

| Satélite | Fuente | ID escena |
|------------|--------|--|
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210403T143729_20210403T144408_T19JEN |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210403T143729_20210403T144408_T19JFN |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210403T143729_20210403T144408_T19KEP |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210403T143729_20210403T144408_T19KFP |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KGP |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KGQ |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KGR |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KHP |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KHQ |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210828T142729_20210828T143756_T19KHR |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20201224T143729_20201224T144624_T19JEK |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20201224T143729_20201224T144624_T19JEL |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20201224T143729_20201224T144624_T19JE |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20191225T143721_20191225T144651_T19JDK |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JFK |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JFL |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JFM |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JGK |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JGL |

| Satélite | Fuente | ID escena |
|------------|--------|--|
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T19JGM |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T20JKQ |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200813T142739_20200813T143827_T20JKR |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200319T143729_20200319T144006_T19JDG |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200319T143729_20200319T144006_T19JDH |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20200319T143729_20200319T144006_T19JDJ |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20201002T142739_20201002T143802_T19JFH |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20201002T142739_20201002T143802_T19JFJ |
| Sentinel 2 | ESA | COPERNICUS/S2/20210103T143729_20210103T144608_T19JEJ |

Como apoyo en la identificación y diferenciación de hielo cubierto y glaciares de escombros se implementó una metodología basada en la interpretación de la imagen de coherencia interferométrica, generada a partir del procesamiento de imágenes de radar. Este método se utilizó también para identificar la actividad e inactividad de los glaciares de escombros. En ambos casos se utilizaron imágenes Sentinel 1 A y B, las cuales son obtenidas por dos satélites pertenecientes a la ESA en banda C, en diferentes resoluciones y configuraciones en órbitas ascendentes y descendentes. Esta tecnología tiene la ventaja de que permite obtener escenas independientemente de las condiciones climáticas (Filipponi, 2019). Para la generación de imágenes de coherencia se procesaron pares de escenas Sentinel 1, single look complex (SLD) en el modo interferometric wide (IW) que fueron descargadas del sitio <https://search.asf.alaska.edu> (Tabla A 2).

Tabla A 2. Imágenes de apoyo, Sentinel 1 utilizadas en la actualización del ING de los Andes Desérticos

| Satélite | Fuente | ID escena |
|------------|--------|---|
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20201214T095407_20201214T095437_035680_042CAB_0283 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20210308T095404_20210308T095434_036905_04574B_C59F |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20201214T095407_20201214T095437_035680_042CAB_0283 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20210308T095404_20210308T095434_036905_04574B_C59F |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20201214T095407_20201214T095437_035680_042CAB_0283 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20210308T095404_20210308T095434_036905_04574B_C59F |
| Sentinel 1 | ESA | S1B_IW_SLC__1SDV_20191219T100215_20191219T100242_019432_024B4F_4A2B |
| Sentinel 1 | ESA | S1B_IW_SLC__1SDV_20200312T100213_20200312T100240_020657_027283_FD81 |
| Sentinel 1 | ESA | S1B_IW_SLC__1SDV_20191219T100215_20191219T100242_019432_024B4F_4A2B |
| Sentinel 1 | ESA | S1B_IW_SLC__1SDV_20200312T100213_20200312T100240_020657_027283_FD81 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20191220T095454_20191220T095521_030430_037B96_E270 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220224T100311_20220224T100338_042053_05026D_F0D2 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220320T100311_20220320T100338_042403_050E4E_58CB |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220224T100311_20220224T100338_042053_05026D_F0D2 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220320T100311_20220320T100338_042403_050E4E_58CB |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220224T100336_20220224T100358_042053_05026D_D54C |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220320T100336_20220320T100358_042403_050E4E_9781 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20200112T225818_20200112T225846_030773_038778_1D88 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20200324T225818_20200324T225845_031823_03AC11_A027 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220207T095438_20220207T095506_041805_04F9D5_C764 |
| Sentinel 1 | ESA | S1A_IW_SLC__1SDV_20220207T095438_20220207T095506_041805_04F9D5_C764 |

1.1.2. Digitalización manual

Para la actualización de los límites de los diferentes cuerpos de hielo del ING se utilizó el primer inventario como base y edición manual basada en una interpretación visual de las imágenes de base y de apoyo. Estos procesamientos fueron realizados con el software QGIS (Figura A 1 a).

En el caso del hielo cubierto por detritos y los glaciares de escombros, los límites fueron ajustados mediante digitalización manual en base a imágenes satelitales de alta resolución espacial. La digitalización manual es considerada el método más preciso para la identificación de este tipo de coberturas (Barcaza et al., 2017; Jones et al., 2018; Stokes et al., 2007). En este caso no es recomendable la utilización de métodos semi-automáticos debido a que las características espectrales del hielo cubierto y glaciares de escombros son muy similares a las superficies que los rodean (Janke et al., 2017; Rangecroft et al., 2015).

Como se mencionó previamente, en el proceso de actualización se incorporó el análisis imágenes de radar, específicamente las imágenes de coherencia, como apoyo en la diferenciación del hielo cubierto y glaciares de escombros y en la determinación de la actividad o inactividad de los glaciares de escombros (además de implementar el criterio geomorfológico). Como resultado de la utilización de técnicas interferométricas, utilizando el programa SNAP, se obtuvo una nueva imagen, denominada de coherencia, en la cual los valores altos indican condiciones similares entre una imagen y la otra, mientras que los valores bajos señalan cambios, que en algunos casos se pueden considerar como un indicador de desplazamiento (Bertone et al., 2019). Para diferenciar el hielo cubierto y glaciares de escombros se utilizaron pares de imágenes con una diferencia temporal menor de 15 días, período en el cual es posible apreciar tasas de desplazamiento diferente entre ambas categorías y en consecuencia valores diferentes de coherencia. Para determinar la actividad de glaciares de escombros se analizaron períodos más largos, de uno a tres meses. En la imagen de coherencia, valores altos pueden ser interpretados con una señal de actividad y valores bajos de inactividad (Bertone et al., 2019). Los resultados obtenidos fueron interpretados visualmente (Figura A 1 b).

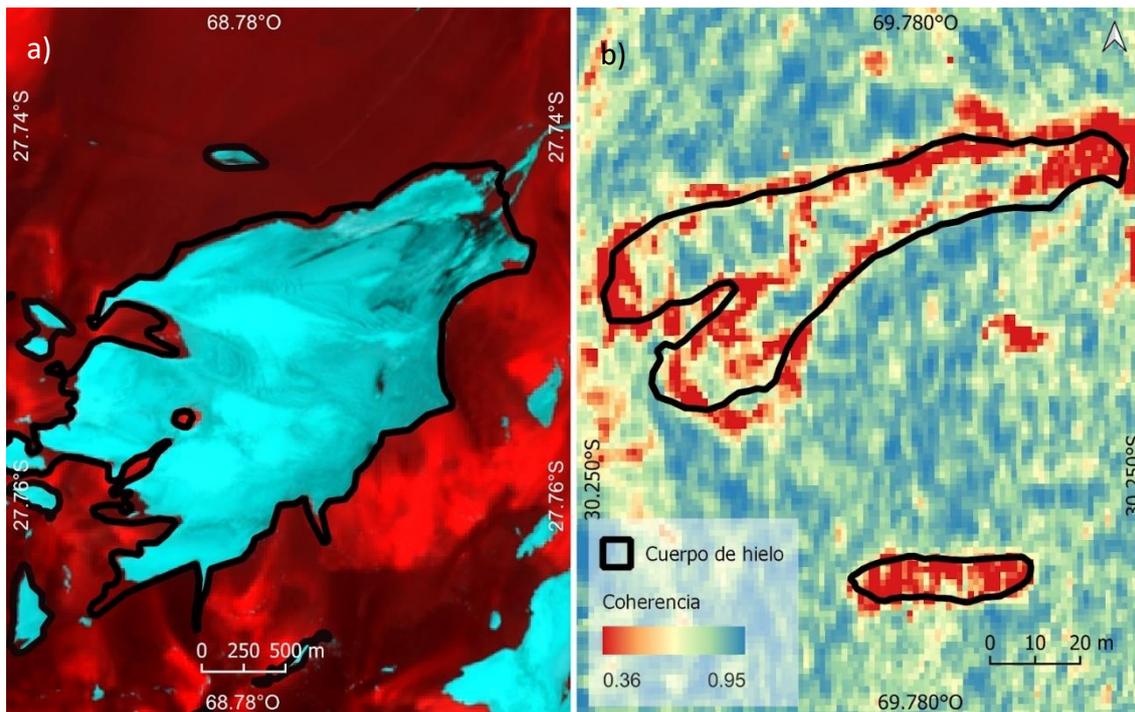


Figura A 1. Fuentes utilizadas en el mapeo de cuerpos de hielo.

- a) Imagen óptica Sentinel 2 del 18/01/2021, la línea negra indica el área de un glaciar identificado en el primer inventario y cuyos límites debieron ajustarse a la nueva imagen. b) Imagen de coherencia obtenida a partir del procesamiento del par interferométrico 24/02/2022 y 20/03/2022 de escenas de Sentinel 1. Las tonalidades rojas indican sectores caracterizados por la pérdida de coherencia, que coinciden con los límites de un glaciar de escombros representado en color negro**

En la actualización del ING se tomó como base un área mínima recomendada de 0,01 km², que coincide con la utilizada en el primer ING. El umbral de área mínima puede considerarse como el límite inferior para mapear glaciares con cierta certeza (Paul et al., 2013). También, corresponde al menor tamaño que puede ser identificado con seguridad a partir de satélites de observación terrestre que operan a una resolución espacial media de 15 a 30 metros (por ejemplo: Terra ASTER, ALOS, SPOT-HRV, Landsat TM/ETM+/OLI). Además, estas imágenes cubren amplias extensiones bajo las mismas condiciones de adquisición, y aseguran disponibilidad para lograr una cobertura global del país. La utilización de este criterio permite disminuir la incertidumbre en la definición cartográfica, posibilitan que los inventarios sean homogéneos y coherentes a lo largo del país, y permiten comparar los mapas de glaciares provenientes de cuencas, regiones y/o fechas diferentes.

En el caso de las masas de hielo identificadas en el primer inventario que disminuyeron su superficie por debajo del área mínima hasta su eventual desaparición, durante el proceso de actualización, fueron mantenidos en el nuevo inventario e identificados en la base de datos con la categoría ND en el campo Tipo_geof. En estos casos no se calculó el área y sus datos no fueron considerados en las estadísticas finales.

La actualización de los datos de elevación y pendiente, en aquellas geofomas que se detectaron cambios, fue realizada empleando como base el MDE SRTM v.4 (Jarvis et al., 2008).

1.1.3. Base de datos

La base de datos del Inventario Nacional de Glaciares de los Andes Desérticos incluye la identificación de cada uno de los cuerpos de hielo, su clasificación morfológica, y parámetros de índole física tales como el área, altura máxima, media y mínima, orientación, pendiente y largo total.

La base de datos incluye 37 campos coincidentes con el primer inventario de glaciares (IANIGLA-CONICET 2010). Sin embargo, el campo ID_GLIMS, que fue calculado en el primer inventario, no fue incluido en la actualización debido a que este parámetro es recalculado cuando el inventario es ingresado en la base de datos de GLIMS. Se actualizó la información de aquellos campos en donde fue necesario actualizar parámetros físicos de las geoformas debido a cambios en la superficie de las mismas. Se describen además, las fechas y características de las nuevas imágenes de base empleadas.

Resulta importante aclarar que la cantidad de filas (polígonos) identificados en la base de datos no corresponde necesariamente con la cantidad de cuerpos de hielo, puesto que un cuerpo de hielo puede estar compuesto por dos o más polígonos. Así por ejemplo, un glaciar puede estar formado por hielo descubierto y hielo cubierto, categorías que son representadas por polígonos diferentes.

A continuación se detallan los 37 campos que componen la base de datos de la actualización del ING:

1. Provincia
2. Cuenca
3. Subcuenca
4. Código cuenca

Esta columna provee información sobre la provincia, cuenca y subcuencas de cada una de las geoformas inventariadas. Un ejemplo de la codificación se muestra a continuación:

M0550000

El primer dígito corresponde a la provincia, codificada según normativa ISO 3166 (Ejemplo: M = Mendoza, U = Chubut).

Los siguientes tres dígitos corresponden al código de la cuenca principal, el cual ha sido establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH). (Ejemplo 055 = Mendoza, 100 = Cuencas varias de Antártida e islas del Atlántico Sur, incluidas Islas Malvinas).

Los próximos dos dígitos corresponden a la subcuenca en la que se ha realizado el inventario. Por el momento no existe una codificación oficial establecida para esta categoría, por lo que la misma puede ser establecida por cada grupo de trabajo siempre y cuando se documente y aclare en forma inequívoca los criterios empleados y la ubicación de la subcuenca dentro de la cuenca principal.

Los dos últimos dígitos corresponden al nivel de sub-subcuenca, se empleará en aquellos inventarios que trabajen a este nivel y se procederá a codificarlos siguiendo los mismos criterios establecidos para las subcuencas.

5. ID_local: código único identificador de cada glaciar que incluye las coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior de cada geoforma. En el ID_local, dichas coordenadas están expresadas en grados decimales de longitud y latitud con cuatro decimales. Por ejemplo, el ID_local “G6999210328801S” corresponde a un glaciar ubicado a 69,9921° de longitud Oeste y 32,8801° de latitud Sur.

6. Tipo_geoforma: esta columna agrupa a cada una de las geoformas inventariadas en base a su tipo principal. Los tipos de geoforma pueden ser:

GD-Glaciario descubierto: cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recristalización de la nieve y/o hielo, sin cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias), y de un área mayor o igual a 0,01 km² (una hectárea). En la actualización si bien se mantuvo la forma de identificación en la base de datos en los análisis se incorporó el término hielo descubierto para describir esta categoría.

MN-Manchón de nieve/glaciarete: pequeñas masas de nieve y hielo de forma indefinida. Se localizan generalmente en depresiones, lechos de ríos y pendientes protegidas. En general se desarrollan a partir de la nieve barrida por el viento, avalanchas y/o varios años de fuertes acumulaciones. En general no presentan patrones de flujo visibles, y existen al menos por dos años consecutivos. Los manchones de nieve permanentes/glaciaretes son reservas significativas de agua en estado sólido y por ello fueron incluidos en el inventario.

GC-Glaciario cubierto: cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recristalización de la nieve y/o hielo, con una cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias), y de un área mayor o igual a 0,01 km² (una hectárea). En la actualización si bien se mantuvo la forma de identificación en la base de datos en los análisis se incorporó el término hielo cubierto para describir esta categoría.

GE-Glaciario de escombros: cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost, cuyo origen está relacionado con los procesos criogénicos asociados con suelo permanentemente congelado y con hielo subterráneo o con el hielo proveniente de glaciares descubiertos y cubiertos, y de un área mayor o igual que 0,01 km² (una hectárea). Los glaciares de escombros dependen fuertemente del aporte de detritos, nieve y hielo.

Los glaciares de escombros se pueden clasificar por su grado de actividad en **activos (GEA)**, **inactivos (GEI)** y **fósiles (GEF)** (Haeberli, 1985; Ikeda, 2004). Los glaciares de escombros activos presentan frentes abruptos (>35°) con lineamientos de flujo, crestas y surcos longitudinales y transversales bien definidos. Una vez que dejan de moverse se llaman inactivos y aparecen como geoformas colapsadas con menor

pendiente en el frente (<35°), también puede aparecer cierta cobertura vegetal. El cuerpo de sedimentos que permanece una vez que el hielo se ha derretido se llama glaciar de escombros fósil (Barsch, 1978; Brenning, 2005; Trombotto Liaudat, 2002). Esta última categoría no ha sido incluida en el inventario por no tener importancia hidrológica.

GCGE-Glaciario cubierto con glaciar de escombros: en los Andes Centrales existen numerosos casos en los que un sector de hielo cubierto por detritos se transforma gradualmente en un glaciar de escombros. En general es muy difícil identificar y determinar la posición del límite entre el hielo cubierto (ambiente glaciar) y el glaciar de escombros glaciario (ambiente periglacial) a partir de sensores remotos, en particular si no se cuenta con información adicional proveniente de estudios detallados de campo. Por ello, en las tareas de inventario se ha utilizado una categoría nueva denominada glaciar cubierto con glaciar de escombros que incluye las porciones de hielo cubierto junto con el glaciar de escombros que se desarrolla a sus costados o en su porción terminal.

ND-No detectable: masas de hielo identificadas en el primer inventario que disminuyeron significativamente su superficie o desaparecieron completamente. Estas áreas se caracterizan por ser susceptibles de volver a formar cuerpos de hielo/nieve perennes si las condiciones climáticas se tornan favorables. Esta categoría no estaba incluida en el primer ING.

7. **Nombre común:** si lo hubiere.

8. **Clasificación Primaria:** basada en el documento “Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual”(Rau et al., 2005) preparado por el grupo de expertos de GLIMS http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf

0. Incierto

1. Sábana de hielo continental: es una gran masa de hielo que cubre un continente o gran parte del mismo. En la actualidad sólo existen las de Antártida y Groenlandia. Las sábanas de hielo no están totalmente controladas por la topografía subglacial y se caracterizan por ser más activas en sus bordes y a lo largo de las corrientes de hielo. Las partes más altas y abombadas llamadas domos tienen escasa pendiente y flujo de hielo muy limitado.
2. Campo de hielo: masa de hielo glaciar, confinada topográficamente, de superficie relativamente plana, y de la cual fluyen glaciares de descarga, y cuya superficie es menor a 50.000 km².
3. Calota de hielo: masa de hielo no confinada con forma de domo, que fluye en todas las direcciones.
4. Glaciar de descarga: glaciar que fluye desde el interior de un campo de hielo, calota de hielo y/o sábana de hielo, transfiriendo masa hacia las zonas más bajas.
5. Glaciar de valle: glaciar con el área de acumulación bien definida, cuya lengua está encauzada y fluye valle abajo.
6. Glaciar de montaña: un glaciar que se encuentra confinado por la topografía del terreno montañoso que lo rodea; frecuentemente localizado

en un circo o nicho (Müller et al., 1977). Incluye glaciares de circo, de nicho y de cráter.

7. Manchón de nieve permanente o glaciarete: pequeñas masas de nieve y hielo de forma indefinida. Se localizan generalmente en depresiones, lechos de ríos y pendientes protegidas. En general se desarrollan a partir de la nieve barrida por el viento, avalanchas y/o varios años de fuertes acumulaciones. En general no presentan patrones de flujo visibles, y existen al menos por dos años consecutivos.
8. Barrera de hielo: es la porción flotante de una sábana de hielo, de considerable espesor, que fluye por gravedad sin fricción sobre el mar, y de cuyo frente se desprenden los témpanos tabulares. Se nutre de glaciares, corrientes de hielo, acumulación de la nieve en superficie y por congelación basal. Usualmente tiene gran extensión horizontal y una superficie plana o suavemente ondulada. Las principales barreras de hielo se encuentran en la Antártida (Ross, Ronne- Filchner, Amery, Larsen, etc.).
9. Glaciar de escombros: el glaciar de escombros es una mesoforma criogénica de permafrost de montaña, sobresaturada en hielo que de ser activa, se mueve pendiente abajo por gravedad y por reptación y deformación del permafrost. Es una manifestación de un tipo de permafrost reptante. En general tiene forma de lengua o lóbulo con morfología superficial similar a la de una colada de lava. Sin embargo, sobre todo en los Andes Centrales de Argentina y Chile, los glaciares de escombros pueden alcanzar morfologías muy complejas, con zonas de aporte o de generación de cuencas compuestas y el desarrollo de más de un lóbulo frontal o una superposición de varios lóbulos.
10. Corriente de hielo: banda angosta de hielo que fluye dentro de una sábana de hielo a una velocidad muy superior al hielo circundante. Existen dos tipos principales de corrientes de hielo, las confinadas y no confinadas. Las corrientes de hielo no están bien delimitadas en todas sus márgenes, que en algunas zonas son más visibles por la presencia de grietas laterales que separan las zonas de flujo muy rápido de aquellas menos activas. Las corrientes de hielo drenan la mayor parte de las sábanas de hielo, siendo las principales abastecedoras de las barreras de hielo en Antártida.

9. Forma:

0. Incierto
1. Cuencas compuestas
2. Cuenca compuesta
3. Cuenca simple
4. Circo
5. Nicho
6. Cráter
7. Colgante
8. Grupo
9. Remanente

10. Frente:

0. Normal
1. Piedemonte

2. Expandido
 3. Lobulado
 4. De desprendimiento
 5. Coalescente no contribuyente
 10. De desprendimiento y piedemonte
 11. De desprendimiento y expandido
 12. De desprendimiento y lobulado
 13. Tributario de barrera de hielo
 14. Flotante
 15. De desprendimiento terrestre
 16. Confluente
- 11. Perfil longitudinal**
0. Incierto
 1. Regular o uniforme
 2. Colgante
 3. En cascada
 4. Cascada de hielo
 5. Interrumpido o reconstituido
- 12. Fuente de alimentación**
0. Desconocida
 1. Nieve-nieve volada
 2. Avalancha
 3. Hielo sobreimpuesto
- 13. Actividad de la Lengua**
0. Incierto
 1. Marcado retroceso
 2. Leve retroceso
 3. Estacionario
 4. Leve avance
 5. Marcado avance
 6. Posible pulso (surge)
 7. Pulso (surge) conocido
 8. Oscilante
 9. Adelgazante
- 14. Morena_1**
0. Sin morena
 1. Morena Terminal
 2. Lateral y/o media
 3. Morena de empuje
 4. Combinación de 1 y 2
 5. Combinación de 1 y 3
 6. Combinación de 2 y 3
 7. Combinación de 1, 2 y 3
 8. Cubierto, incierto si es morénico
 9. Morenas de tipo incierto o que no figura
- 15. Morena_2**
0. Sin morena

1. Morena Terminal
 2. Lateral y/o media
 3. Morena de empuje
 4. Combinación de 1 y 2
 5. Combinación de 1 y 3
 6. Combinación de 2 y 3
 7. Combinación de 1 , 2 y 3
 8. Cubierto, incierto si es morénico
 9. Morenas de tipo incierto o que no figura
- 16. Cobertura de la lengua**
0. Incierto
 1. Sin detrito
 2. Parcialmente cubierto de detrito (10-50%)
 3. Mayormente cubierto de detrito (50-90%)
 4. Completamente cubierto por detrito (>90%)
 5. Parcialmente cubierto de detrito con glaciar de escombros (GE) (10-50%)
 6. Mayormente cubierto de detrito con GE (50-90%)
 7. Completamente cubierto por detrito con GE (>90%)
- 17. Origen GE**
0. Incierto
 1. Criogénico: aquellos glaciares de escombros sin relación actual con los glaciares y generados a partir de taludes y canaletas nivo-detriticas.
 2. Glacigénico: aquellos glaciares de escombros originados a partir de un glaciar descubierto o cubierto.
 3. Combinado 1 y 2
- 18. Actividad del GE**
0. Incierto
 1. Activo: presenta evidencias de movimiento pendiente abajo y señales del mismo en superficie. En general este tipo de glaciares tiene una topografía superficial muy irregular y desarrollan pendientes frontales muy pronunciadas (35°-45°).
 2. Inactivo: no presentan movimiento pendiente abajo, pero que todavía contienen hielo.
- 19. Forma del GE**
0. Incierto
 1. Lengua: largo del glaciar mayor que el ancho
 2. Lobado: ancho del glaciar mayor que el largo
 3. Espatulado
 4. Coalescente
 5. Otras
- 20. Estructura _I**
0. Incierto
 1. Unidad: formado por un único glaciar de escombros.
 2. Multiunidad: formado por varios glaciares de escombros, pueden ser coalescentes o sobrepuestos.
- 21. Estructura II**
0. Incierto

1. Una raíz: una única fuente de alimentación.
2. Multiraiz: un glaciar de escombros que se alimenta de varias fuentes de alimentación o raíces, sea cual fuere su origen.
- 22. Longitud:** coordenadas geográficas de cada polígono (obtenida a partir de un centroide ubicado en el interior del mismo).
- 23. Latitud:** coordenadas geográficas de cada polígono (obtenida a partir de un centroide ubicado en el interior del mismo).
- 24. Área:** área de cada polígono expresada en km².
- 25. Largo_total:** largo de cada unidad, considerando la línea de flujo más larga de todo el glaciar, desde la zona más alta, atravesando la unidad hasta el frente de la misma, siempre lo más perpendicular posible a las curvas de nivel. Se expresa en metros (m).
- 26. H_max_total:** Altura máxima total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 27. H_med_total:** Altura media total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 28. H_min_total:** Altura mínima total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 29. Pendiente:** (Se expresa en grados).
- 30. Orientación:** Correspondiente a los 8 puntos cardinales.
- 31. H_max_parcial:** Altura máxima de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere) Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 32. H_med_parcial:** Altura media de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere) Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 33. H_min_parcial:** Altura mínima de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere) Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
- 34. Img_ba_F:** Fecha de la imagen de base a partir de la cual se realizó el inventario.
- 35. Img_ba_S:** tipo de sensor que capta la imagen empleada para el inventario (AVNIR, PRISM, CBERS, etc.).
- 36. Img_ap_F:** Fecha de la imagen de apoyo utilizada.
- 37. Img_ap_S:** tipo de sensor que capta la imagen de apoyo empleada.

1.2. Fluctuaciones de cuerpos seleccionados

Al igual que en el mapeo de glaciares se seleccionaron las imágenes teniendo en cuenta la cobertura de nubes y de nieve que dificultan la observación y delimitación de las masas de hielo, en total se utilizaron diez escenas (Tabla A 3). Se trató de utilizar imágenes cada 5 años dependiendo de la disponibilidad y en algunos años se emplearon más de una imagen debido a la presencia de nieve estacional en algunos sectores.

Los cuerpos de hielo fueron digitalizados de manera manual sobre las imágenes de base seleccionadas con el software QGIS.

Tabla A 3. Imágenes de base utilizadas para el análisis de variaciones de los cuerpos de hielo.

| Tipo | Sensor | Año | ID escena |
|------------------|------------|------|--|
| Imagen satelital | L5 TM | 1986 | LT05_L1TP_233079_19860317_20170218_01_T1 |
| Imagen satelital | L5 TM | 1995 | LT05_L1TP_233079_19950411_20170108_01_T1 |
| Imagen satelital | L5 TM | 2001 | LT05_L1TP_233079_20010105_20161212_01_T1 |
| Imagen satelital | L5 TM | 2007 | LT05_L1TP_233079_20070412_20161115_01_T1 |
| Imagen satelital | ALOS AVNIR | 2010 | ALAV2A224864150/160 |
| Imagen satelital | L8 OLI | 2015 | LC08_L1TP_233079_20150213_20170413_01_T1 |
| Imagen satelital | SENTINEL-2 | 2020 | COPERNICUS/S2/20200319T143729_20200319T144006_T19JDJ |
| Imagen satelital | SENTINEL-2 | 2020 | COPERNICUS/S2/20201224T143729_20201224T144624_T19JEK |
| Imagen satelital | SENTINEL-2 | 2020 | COPERNICUS/S2/20210103T143729_20210103T144608_T19JEJ |
| DEM | SRTM | 2000 | |

1.3. Cambios de masa y dinámica de los cuerpos de hielo de referencia

1.3.1. Glaciares de hielo descubierto

El balance de masa es el resultado entre la ganancia de masa originada por los distintos procesos de acumulación de un glaciar (nevadas, avalanchas y recongelamiento) y la pérdida de masa como consecuencia de los procesos de ablación como derretimiento, sublimación y desprendimiento de témpanos, en un período determinado. Usualmente el tiempo de estudio es una estación o un año hidrológico. Si la pérdida de masa es mayor a la ganancia (balance de masa negativo), el glaciar sufrirá un adelgazamiento y retracción; mientras que si la ganancia es mayor a la pérdida (balance de masa positivo), el glaciar aumentará su tamaño y podrá mostrar un avance del frente. Tanto la acumulación como la ablación se miden en agua equivalente (a.e.) para poder comparar la cantidad de agua en forma de nieve, hielo, lluvia, etc. que se acumula o se pierde a lo largo de dicho lapso en las distintas partes del glaciar (SAyDS, 2019).

El programa de monitoreo del glaciar del Agua Negra se inició en septiembre del año 2014 y se continúa en la actualidad. En este monitoreo se realizan mediciones de acumulación, con el método glaciológico (Cogley et al., 2011), durante la primavera (septiembre-diciembre) y de ablación durante el otoño (marzo-mayo) (Figura A 2). Las mediciones de acumulación consisten en medir el espesor y distribución del manto

nival depositado sobre la superficie del glaciar. Estas tareas se llevan a cabo mediante sondeos realizados en sectores transitables del glaciar, por lo general se toman entre 20-170 por campaña. Además, se acompaña de una descripción del manto nival, a través de una calicata efectuada manualmente con la ayuda de palas de nieve, que permite observar detalladamente el perfil de nieve desde la superficie hasta su contacto con el hielo glacial. En esta descripción se incluye la variación de la temperatura de la nieve con la profundidad (gradiente térmico) y la densidad. Esta última se determina utilizando sacatestigos de volumen conocido y una balanza. El procedimiento consiste en tomar muestras a lo largo de todo el perfil de nieve y pesar cada uno de sus tramos para calcular densidades parciales y luego integrar todo el perfil para obtener una densidad media. Finalmente, las profundidades de los sondeos se convierten en agua equivalente de acuerdo al valor de densidad media observado en la calicata.

La ablación se mide a través de 7 estacas introducidas entre 5 y 6 m dentro del hielo y ubicadas cada 50 m de elevación a lo largo del eje principal del glaciar. Estas son instaladas en la primavera con la ayuda de una caldera de vapor de agua, y son medidas nuevamente al final de la temporada estival para obtener los datos de ablación del glaciar en metros a.e.

La información de acumulación y ablación es interpolada manualmente, sobre la superficie de todo el glaciar, por medio de curvas que representan 0,50 m a.e, que además son extrapoladas a los sectores no transitados del glaciar (Østrem & Brugman, 1991). En el caso del glaciar del Agua Negra, que se caracteriza por la presencia de grandes penitentes, tanto de nieve como de hielo, se toma la base de los penitentes como superficie de referencia para medir tanto la acumulación como la ablación del cuerpo de hielo.

Otro parámetro que se calcula a partir de estas mediciones es la altura de la línea de equilibrio denominada ELA, por sus siglas en inglés (Equilibrium Line Altitude). Esta representa el límite imaginario que separa la zona donde el glaciar gana masa (área de acumulación) de la zona donde el glaciar pierde masa (área de ablación), es decir, donde el balance de masa es igual a cero. Este es uno de los parámetros más utilizados para relacionar la evolución del glaciar y el clima. Estrictamente, la misma tiene que calcularse de un estudio de balance de masa. Sin embargo, en algunos glaciares es posible derivarla de la ubicación de la línea de nieve o firn, que corresponde con el límite que separa el área por encima de la cual la nieve depositada durante el invierno se mantiene durante el verano siguiente (SAyDS, 2019). En el caso del glaciar del Agua Negra, usualmente, la ELA no se puede derivar a partir de la línea de nieve de finales del verano, debido a la presencia de penitentes que dificultan su observación. Por lo tanto, la ELA se calcula a partir de gradientes de equilibrio de masa derivados de las estacas de ablación (Pitte et al., 2022).

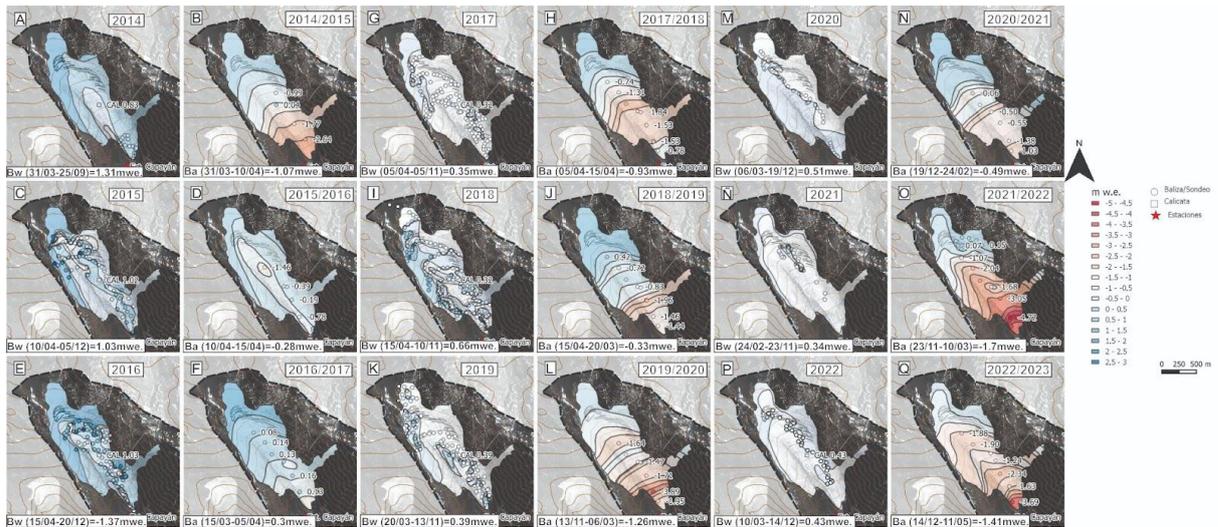


Figura A 2. Balance de masa de invierno y anual del glaciar del Agua Negra para cada uno de los años analizados (2014-2022).

1.3.2. Glaciares de escombros

La metodología de monitoreo utilizada en glaciares de escombros se basa en métodos desarrollados por la Unidad de Geociología del IANIGLA (Trombotto Liaudat, 2007; Trombotto Liaudat & Borzotta, 2009) en concordancia con las directivas internacionales para el monitoreo de permafrost (Global Terrestrial Network for Permafrost) (Biskaborn et al., 2015) y con adaptación para las zonas de montaña (Noetzli et al., 2021).

Existen diversos métodos para el monitoreo de capa activa (Nelson et al., 2004). En los Andes Centrales el método más probado es mediante perforaciones superficiales (Hernández, 1973) y la instalación de termistores o termómetros digitales a diferentes profundidades (Trombotto Liaudat, 2007) (Figura A 3). De esta manera es posible penetrar hasta el tope o límite superior del permafrost y conocer las variaciones de temperatura en la capa activa y capa transicional a lo largo del año.



Figura A 3. Proceso de perforación e instrumentación a 4730 msnm en el glaciar de escombros Corral Negro. Provincia de Salta. (Foto: I. Pecker Marcosig, 2023).

2. Resultados adicionales

Tabla A 4. Cantidad y área cubierta por los diferentes tipos de cuerpos de hielo según subcuencas y cuencas en los Andes Desérticos.

| Subcuenca | Cuenca | Cantidad | Área km ² | | | | |
|--|-------------------------------|----------|----------------------|-------------------|----------------|------------------------|------------------|
| | | | Total | Glaciar | | Glaciares de escombros | Manchón de nieve |
| | | | | Hielo descubierto | Hielo cubierto | | |
| R. Pilcomayo | Pilcomayo | 40 | 1,5189 | | | 1,5189 | |
| Lag. Vilama, Catal, Pululos | Varias de la Puna | 13 | 0,3943 | | | 0,3943 | |
| S. Olaroz | Varias de la Puna | 9 | 0,1423 | | | 0,1423 | |
| Salinas Grandes | Varias de la Puna | 43 | 1,4042 | | | 1,4042 | |
| R. San Francisco | San Francisco | 177 | 6,7544 | | | 6,7432 | 0,0112 |
| Salar de Cauchari | Varias de la Puna | 16 | 0,3668 | | | 0,3668 | |
| R. Iruya, Condado, Pescado Superior y Blanco | Bermejo | 256 | 8,5007 | | | 8,5007 | |
| Salar de Arizaro | Varias de la Puna | 21 | 0,7472 | | | 0,3033 | 0,4439 |
| Salar de Pocitos | Varias de la Puna | 37 | 0,7454 | | | 0,6682 | 0,0772 |
| R. Calchaquí | Alta Cuenca del Río Juramento | 245 | 13,5198 | 0,1811 | | 12,7634 | 0,5753 |
| R. Rosario | Alta Cuenca del Río Juramento | 98 | 7,2362 | | | 7,2362 | |

| | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------|----------|---------|--------|---------|---------|
| R. Vipos, Lules, Balderrama, Gastona y Medinas | R. Sali-Dulce | 150 | 12,316 | | | 12,2988 | 0,0172 |
| Salar de Antofalla | Varias de la Puna | 68 | 5,0531 | 0,6664 | | 0,4472 | 3,9395 |
| Antofagasta de las Sierras | Varias de la Puna | 24 | 0,5053 | | | 0,3751 | 0,1302 |
| R. Santa María | Alta Cuenca del Río Juramento | 194 | 9,2339 | | | 9,2339 | |
| R. Andalgalá | Salar de Pipanaco | 26 | 1,9277 | | | 1,9277 | |
| R. Abaucán y Laguna Verde | R. Colorado | 340 | 28,0484 | 14,435 | | 0,7949 | 12,8185 |
| R. Vinchina-Bermejo | R. Vinchina - Bermejo | 244 | 21,7209 | 9,1364 | | 0,4159 | 12,1686 |
| Varias de Velazco | Cuenca Varias de Velazco | 50 | 1,9211 | | | 0,7916 | 1,1295 |
| R. Blanco Superior | R. Jáchal | 284 | 34,3007 | 16,8189 | | 2,5384 | 14,9434 |
| R. de la Palca | R. Jáchal | 434 | 41,0335 | 15,9726 | 2,9497 | 15,7366 | 6,3746 |
| R. Blanco Inferior | R. Jáchal | 318 | 52,2013 | 28,2698 | 1,8312 | 12,4599 | 9,6404 |
| Total | Total | 3087 | 249,5921 | 85,4802 | 4,7809 | 97,0615 | 62,2695 |

Tabla A 5. Cantidad y área cubierta por los diferentes tipos de geoformas por provincias en los Andes Desérticos.

| Provincia | Cantidad | Área (km ²) | | | | |
|--------------|-------------|-------------------------|-------------------|----------------|----------------------|------------------|
| | | Total | Glaciares | | Glaciar de escombros | Manchón de nieve |
| | | | Hielo descubierto | Hielo cubierto | | |
| Jujuy | 247 | 9,0341 | | | 9,0229 | 0,0112 |
| Salta | 714 | 32,7143 | 0,1811 | | 31,5427 | 0,9905 |
| Tucumán | 129 | 9,8987 | | | 9,8815 | 0,0172 |
| Catamarca | 694 | 59,1097 | 24,7675 | | 14,5769 | 19,7653 |
| La Rioja | 478 | 40,4921 | 14,8879 | | 2,5452 | 23,059 |
| San Juan | 825 | 98,3432 | 45,6437 | 4,7809 | 29,4923 | 18,4263 |
| Total | 3087 | 249,5921 | 85,4802 | 4,7809 | 97,0615 | 62,2695 |

3. Contexto socio-económico

En esta sección se incluyen las entrevistas que se realizaron durante el trabajo de campo en el mes de octubre de 2023 en un sector de trabajo de los Andes Desérticos.

| Categorías de análisis | Fragmentos entrevista 1 (Poblador de El Saladillo, cuenca río Juramento, octubre, 2023) | Fragmentos entrevista 2 (Pobladora de El Saladillo, cuenca río Juramento, octubre, 2023) |
|------------------------|---|--|
| Agua | <p>- “¿Sabes de donde viene el agua?”</p> <p>- “Si, esta nace en peñas blancas, que sería ya donde termina la quebrada de corral negro, digamos. De ahí nace.”</p> <p>[...] y en los meses que más se sufre de agua son octubre, noviembre, diciembre...los primeros días de diciembre si no llueve estás jodido. Y cuando llueve tenés agua para todo”.</p> <p>- “¿Cuáles son los meses que más viene agua?”</p> <p>- “Y será de enero, febrero, marzo... si después queda la agüita ¿viste? Pero como aquí no se puede cultivar nada así que ya no la aprovechamos, ya va al Calchaquí (al río)</p> | <p>- “¿Conoce de donde viene el agua que tienen acá?”</p> <p>- “Esta viene del Abra del Acay”</p> <p>- “Para que la utiliza?”</p> <p>- “Para todo consumo, para todo...”</p> <p>- “¿Cuál es la época en donde escurre más agua?”</p> <p>- “En el verano, cuando llueve.”</p> |

| | | |
|--------------|--|---|
| <p>Nieve</p> | <ul style="list-style-type: none"> - “¿Cae nieve acá en el lugar?” - “Sí, 3 o 4 veces al año en los meses de marzo a setiembre por ahí.” - “¿Cuánto nieva?” - “Depende, hay días que se pone a nevar 3, 4 días y tener una altura mas o menos de 15 , 20 cm... aquí al lado de mi casa, pero en la montaña es mucho más.” - “¿Cuánto tiempo ves las laderas con nieve? ¿meses, días semanas?” - “Del san miguel cuando queda nevado así, en tiempo digamos de verano, no si la nieve, o lo que se ve ahí dura por lo menos medio año. allá al frente. Y lo que ves aquí en Corral Negro quizás te dura dos meses”. | <ul style="list-style-type: none"> - “Nieva aquí en el lugar?” - “A veces cae nevadas lindas...” - “¿En que meses?” - “Y, siempre en invierno, junio, julio, a veces en agosto. Una vez nevó en agosto ahí...” - “¿Cuánto más o menos nieva?” - “Por aquí cuando viene la nevada de abajo cae aquí en esta zona, caerán unos 4, 5 cm ...Cuando es nevada de arriba llega poco aquí”. - “¿Cuál es la época en que usted ve el paisaje nevado?” - “En invierno” - “Cuánto dura la nieve en la ladera de los cerros?” - “Cuando no está tan calor bueno, una semana. O menos...” |
| <p>Hielo</p> | <ul style="list-style-type: none"> - “¿Y hielo, has visto?” - “Sí, justo ahi donde uno va para peñas blancas, todo eso cienego, esa parte sale ... hay otras vertientes que salen y se forman, se forman masas de hielo, si no hay de las cascadas se congela el agua y quedan así las velas...” - “Y otras formas de hielo en la montaña? Recién me comentabas que veías...” - “Claro, eso de las vertientes eso se congela, se hace bastante grande...” | <ul style="list-style-type: none"> - “¿Sabe si hay hielo aquí, ha visto hielo?” - “En el invierno si.” - “¿Y otras formas de hielo en la montaña?” - “Y a veces, en invierno si se forma hielo... todo así para arriba”. |

| | | |
|-------------------|--|--|
| <p>Glaciares</p> | <p>- “¿Conoces si hay glaciares acá en la zona?”</p> <p>- “Había uno”.</p> <p>- “¿En serio?”</p> <p>- “Si, había uno acá atrás de este, en Toro muerto. Al fondo, había semejante masa de hielo cuando yo era chico. Que se yo, tendría por lo menos sin mentirte 200 metros de largo. No lo ves más ahora”.</p> | <p>- “¿Conoce si hay glaciares en la zona?”</p> <p>- No.</p> |
| <p>Vegetación</p> | <p>- “Que vegetación hay en la zona? Natural de aquí”.</p> <p>- “Tenemos <i>ansusonañamo</i> /no se entiende bien/, jarilla, cardones, yareta, copa copa, arcayuyo que son plantas medicinales”.</p> | <p>- “¿Que vegetación hay acá en la zona?”</p> <p>- “Acá hay para los animales la alfalfa, y después hay los pastos del cerro.”</p> |
| <p>Cambios</p> | <p>- “Has notado cambios en la cantidad de agua que viene? ¿Cuándo notas que hay más agua? ¿En qué épocas?”</p> <p>- “El agua se nota... hemos notado mucho porque nosotros antes cuando mi abuelo estaba me decía que el sacaba esta acequia que iba rebalsando de agua y ahora llevamos media acequia digamos,</p> <p>- “Y esta vegetación siempre ha sido igual o ha ido cambiando?”</p> <p>- “Ha ido cambiando, no se si antes llovía más porque uno ve que las xxxx /no logramos entender/ eran semejantes y ahora cada vez están más chiquitas digamos”.</p> | <p>- “Y ha notado cambio en la cantidad de agua que baja?”</p> <p>- “Si, se ha mermado mucho...”</p> <p>- “Usted piensa si hubiese glaciares, ¿habría que protegerlos?”</p> <p>- “Y sí”.</p> <p>- “¿Y de qué hay que protegerlos o de quiénes?”</p> <p>- “O sea que de la calor, ¿eso ve? Porque se cae enseguida, antes no era así. Antes nevaba, venia la nevada de Santa Barbara. Sabía pasar invierno y verano nevado este cerro y ahora no. Nada.</p> <p>- “¿Y ha cambiado la vegetación en los últimos años?”</p> <p>- “Si, todo cambió”.</p> <p>- “Todo.”</p> <p>- “Todo, por lo menos el año pasado a este tiempo no había nada de verde, por ejemplo.</p> |

| | | |
|----------------|--|--|
| | | Todo cambió, el clima cambio total...” |
| Miedos/temores | <ul style="list-style-type: none"> - “Que peligros tenés de vivir acá?” - “La sequía.” | <ul style="list-style-type: none"> - “Le preocupa algo de vivir acá? ¿Algún peligro que haya?” -”Por ahí me da miedo la gente extraña que pasa por acá” -”¿Y respecto a algún fenómeno del clima o meteorológico?” -”Por ahí caen rayos. Las tormentas.” |



El 28 de Octubre de 2010 fue promulgada la **Ley 26.639** de “**Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial**”. Esta ley contempla, entre otras medidas, la creación de un Inventario Nacional de Glaciares. Este inventario es fundamental para un estudio de largo plazo de los cuerpos de hielo de Argentina, su dinámica, hidrología y relación con el ambiente, definiendo metodologías de mapeo y monitoreo sistemáticos aplicables a las diferentes zonas y condiciones ambientales de nuestro país.

El presente informe describe los resultados de la actualización del Inventario Nacional de Glaciares correspondiente a la región de los Andes Desérticos de Argentina.



**Secretaría de Turismo,
Ambiente y Deportes**
Ministerio del Interior

**Subsecretaría
de Ambiente**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**MENDOZA
GOBIERNO**

I A N I G L A



República Argentina - Poder Ejecutivo Nacional
AÑO DE LA DEFENSA DE LA VIDA, LA LIBERTAD Y LA PROPIEDAD

Hoja Adicional de Firmas
Informe gráfico

Número:

Referencia: AD_INFORME_ING_03_2024

El documento fue importado por el sistema GEDO con un total de 72 pagina/s.