



**INVENTARIO
NACIONAL
DE GLACIARES**

IANIGLA | U. N. CUYO
GOBIERNO | GOBIERNO
CONICET | DE MENDOZA

 Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sustentable
Presidencia de la Nación

**Informe de la subcuenca
Laguna de Pozuelos
Cuencas Varias de la Puna**

Provincia de Jujuy

Fotografía de la Laguna de Pozuelos (Foto: Francisco Córdoba)

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE

PRESIDENCIA DE LA NACIÓN

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: Ing. Mauricio Macri

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sustentable: Rabino Sergio Bergman

Unidad de Coordinación General: Dra. Patricia Holzman

Secretario de Política Ambiental en Recursos Naturales: Lic. Diego Moreno

Director Nacional de Gestión Ambiental del Agua y los Ecosistemas Acuáticos: Dr. Javier García Espil

Coordinador de Gestión Ambiental del Agua: Dr. Leandro García Silva

Responsable Programa Protección de Glaciares y Ambiente Periglacial: M.Sc. María Laila Jover

IANIGLA – CONICET

Inventario Nacional de Glaciares (ING)

Director del IANIGLA: Dr. Fidel Roig

Coordinador del ING: Ing. Gustavo Costa

Director técnico: Lic. Laura Zalazar

Profesional: Lic. Hernán Gargantini

Mayo 2018

La presente publicación se ajusta a la cartografía oficial, establecida por el PEN por ley N° 22963 - a través del IGN- y fue aprobada por expediente GG 17 0216/5 del año 2017

ÍNDICE

1.	Introducción	1
2.	Antecedentes	5
3.	Definiciones a los fines del Inventario	7
4.	Materiales y métodos	9
4.1.	Delimitación de cuencas hidrográficas a partir de modelos de elevación.....	12
4.2.	Selección de imágenes satelitales y georreferenciación.....	12
4.3.	Delimitación de hielo descubierto	13
4.4.	Digitalización de glaciares cubiertos y glaciares de escombros	13
4.5.	Base de datos de las geoformas inventariadas	13
4.6.	Control de campo	13
5.	Resultados	14
5.1.	Subcuenca Laguna de Pozuelos	14
6.	Bibliografía.....	15
7.	Anexos.....	18
7.1.	Imágenes revisadas para la subcuenca Laguna de Pozuelos	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación la subcuenca Laguna de Pozuelos.	10
Figura 2:	Diagrama de flujo de la metodología usada en el Inventario Nacional de Glaciares. ...	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Imágenes del sensor SPOT utilizadas como base en la subcuenca de la Laguna de Pozuelos.	13
----------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ALOS: Advanced Land Observing Satellite

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CBERS: China-Brazil Earth Resources Satellite

ENVI: Environment for Visualizing Images

GC: Glaciar cubierto

GCGE: Glaciar cubierto con glaciar de escombros

GD: Glaciar descubierto

GDEM: Global Digital Elevation Map

GEA: Glaciar de escombros activo

GEF: Glaciar de escombros fósil

GEI: Glaciar de escombros inactivo

Gl: Glaciar

GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space

H media: Altura media de la geoforma

IANIGLA: Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales

IPA: International Permafrost Association

ID: Código Identificador

ING: Inventario Nacional de Glaciares

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil

LANDSAT: Serie de satélites de observación terrestre manejados por la NASA y el USGS

Lat: Latitud

Long: Longitud

MDE: Modelo Digital de Elevación

MN: Manchón de nieve

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Estados Unidos)

PRISM: Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses

SPRING: Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SSRH: Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina

USGS: United States Geological Survey

UTM: Universal Transverse Mercator

WGMS: World Glacier Monitoring Service

1. Introducción

Argentina es uno de los pocos países del mundo que cuenta con varios miles de kilómetros cuadrados de glaciares y permafrost de montaña rico en hielo en su territorio. Según cálculos aproximados, Sudamérica tendría cerca de 25.500 km² cubiertos por glaciares, con un 15% del área total ubicada en Argentina (Williams y Ferrigno 1999; WGMS-UNEP 2007). Nuestro país ocupa el segundo lugar después de Chile, que contiene el 75% del área total de glaciares sudamericanos. Estos porcentajes colocan tanto a Chile como a la Argentina en una posición privilegiada con respecto a otros países, pero también les otorgan un mayor grado de responsabilidad para el estudio, monitoreo y protección de los glaciares en esta región del planeta. Sin embargo, a pesar de la gran extensión de hielo que existe en nuestro país y su clara importancia socio-económica, geopolítica, ambiental y científico-académica, el conocimiento actual sobre los glaciares y el ambiente periglacial en la Argentina es muy limitado. Si bien en las últimas décadas se ha avanzado significativamente en el estudio de nuestros cuerpos de hielo, aún hoy sólo un puñado de sitios han sido analizados en detalle, y en la actualidad no existe información sobre la ubicación, área total, significancia hidrológica o la historia reciente de los glaciares y geoformas periglaciales (también llamadas crioformas) a lo largo de vastas porciones de la Cordillera de los Andes.

Entre otros atributos, los cuerpos de hielo constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña y son reconocidos como “reservas estratégicas” de agua para las zonas bajas adyacentes y gran parte de la diagonal árida del país. Si bien la nieve que se acumula cada invierno en la Cordillera de los Andes constituye la principal fuente de agua para los ríos del oeste argentino, en años “secos” o con baja precipitación nival, los glaciares y partes que se descongelan de las crioformas tienen una contribución muy importante al caudal de los ríos andinos ya que aportan volúmenes significativos de agua de deshielo a la escorrentía ayudando a minimizar los impactos de las sequías en las actividades socio-económicas de los oasis de regadío. Por ello, la información detallada sobre el número, área y distribución espacial de los cuerpos de hielo no sólo brinda una estimación de las reservas hídricas en estado sólido existentes en las diferentes cuencas andinas, sino también información básica para conocer la capacidad reguladora de dichos cuerpos sobre los caudales de nuestros ríos en condiciones climáticas extremas.

Los glaciares de Argentina constituyen además elementos emblemáticos del paisaje andino, realzando la belleza de los principales atractivos turísticos y generando ingresos significativos para la economía nacional. El ejemplo más claro lo constituye el glaciar Perito Moreno, en el Parque Nacional Los Glaciares, provincia de Santa Cruz, que atrae a cientos de miles de turistas cada año. Los glaciares que rodean a la localidad de El Chaltén (glaciar Torre, Piedras Blancas, y de los Tres, entre otros) también constituyen importantes atractivos turísticos dentro del mismo Parque Nacional, y realzan las imponentes vistas del cerro Torre y Monte Fitz Roy o Chaltén. Otros glaciares muy visitados son los glaciares del Monte Tronador en el Parque Nacional Nahuel Huapi, provincia de Río Negro. El más conocido es tal vez el Ventisquero Negro, un glaciar cubierto por detritos al cual se puede acceder en vehículo

durante todo el año. En la provincia de Mendoza, los glaciares colgantes de la pared sur del Cerro Aconcagua y los glaciares Horcones Superior, Horcones Inferior, y de los Polacos son los glaciares más conocidos. Miles de visitantes llegan cada año al Parque Provincial Aconcagua para escalar o simplemente admirar estas imponentes moles de roca y hielo.

Los cuerpos de hielo cordilleranos también constituyen excelentes laboratorios naturales para estudios científicos. Además de muchos estudios de índole hidrológica y geológica que pueden desarrollarse utilizando estos laboratorios naturales, los glaciares ocupan un lugar destacado a nivel mundial como indicadores de cambios climáticos pasados y presentes. En efecto, el rápido retroceso de los glaciares en los Andes y otras regiones montañosas del mundo es generalmente considerado como uno de los signos más claros del calentamiento que ha experimentado el planeta en las últimas décadas.

Por otra parte, los cambios relativamente rápidos en los cuerpos de hielo pueden ocasionar eventos potencialmente catastróficos para las poblaciones humanas e infraestructura ubicadas aguas abajo. En la provincia de Mendoza, el evento más conocido ocurrió entre 1933 y 1934 cuando el Glaciar Grande del Nevado del Plomo (ubicado en la subcuenca del río Tupungato) avanzó repentinamente y atravesó el valle del río del Plomo provocando el endicamiento del río y la formación de un lago de aproximadamente 3 km de largo. El 10 de enero de 1934 la presión del agua rompió el dique natural de hielo y originó un aluvión de agua, hielo y rocas que se desplazó por el valle del río del Plomo y continuó por los valles de los ríos Tupungato y Mendoza provocando graves destrozos (el famoso Hotel Cacheuta, por ejemplo, quedó completamente destruido) e incluso víctimas fatales. En 1984 el glaciar avanzó nuevamente y formó un lago de 2,8 km de longitud que afortunadamente drenó en forma gradual a través de una abertura formada en el dique de hielo. En 2007 el mismo glaciar experimentó un nuevo avance que atravesó el valle del río del Plomo pero no formó ningún lago debido a la presencia de un túnel subglacial.

Considerando los servicios ambientales que nos brindan, su alto grado de vulnerabilidad y los riesgos asociados a sus variaciones, los glaciares y geoformas periglaciales son generalmente concebidos como elementos muy valiosos del paisaje que deben ser estudiados, monitoreados y protegidos para poder conocerlos y preservarlos.

Dada la importancia que tienen los glaciares y las crioformas ricas en hielo para nuestro país, resulta imperioso desarrollar planes y estrategias de estudio y monitoreo de estas masas de hielo que permitan responder a preguntas básicas pero extremadamente relevantes como: ¿Cuántos cuerpos de hielo hay en nuestro país? ¿Qué volumen equivalente en agua tienen? ¿Qué cantidad de agua están aportando a las cuencas de nuestros ríos? ¿Qué cambios han experimentado en el pasado y qué podría esperarse en respuesta a los distintos escenarios de cambios climáticos propuestos para el siglo XXI? ¿Cómo se verán alterados por las distintas actividades humanas que se desarrollen en sus cercanías?

Conscientes de la importancia nacional y regional de los cuerpos de hielo en nuestra Cordillera, entre junio y octubre de 2010 las Honorables Cámaras de Diputados y Senadores de Argentina convirtieron en Ley un Proyecto de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y el Ambiente Periglacial”, que contempla entre otras medidas, la creación de

un Inventario Nacional de Glaciares. 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”, la cual establece:

*ARTÍCULO 1° — Objeto. La presente ley establece los presupuestos mínimos para la protección de los glaciares y del ambiente periglacial con el objeto de preservarlos como **reservas estratégicas de recursos hídricos** para el consumo humano; para la agricultura y como proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas; para la protección de la biodiversidad; como fuente de información científica y como atractivo turístico. Los glaciares constituyen bienes de carácter público.*

ARTÍCULO 2° — Definición. A los efectos de la presente ley, se entiende por glaciar toda masa de hielo perenne estable o que fluye lentamente, con o sin agua intersticial, formado por la recristalización de nieve, ubicado en diferentes ecosistemas, cualquiera sea su forma, dimensión y estado de conservación. Son parte constituyente de cada glaciar el material detrítico rocoso y los cursos internos y superficiales de agua.

Asimismo, se entiende por ambiente periglacial en la alta montaña, al área con suelos congelados que actúa como regulador del recurso hídrico. En la media y baja montaña al área que funciona como regulador de recursos hídricos con suelos saturados en hielo.

*ARTÍCULO 3° — Inventario. Créase el Inventario Nacional de Glaciares, donde se **individualizarán todos los glaciares y geoformas periglaciares que actúan como reservas hídricas existentes en el territorio nacional** con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo.*

ARTÍCULO 4° — Información registrada. El Inventario Nacional de Glaciares deberá contener la información de los glaciares y del ambiente periglacial por cuenca hidrográfica, ubicación, superficie y clasificación morfológica de los glaciares y del ambiente periglacial. Este inventario deberá actualizarse con una periodicidad no mayor de CINCO (5) años, verificando los cambios en superficie de los glaciares y del ambiente periglacial, su estado de avance o retroceso y otros factores que sean relevantes para su conservación.

*ARTÍCULO 5° — Realización del Inventario. El inventario y monitoreo del estado de los glaciares y del ambiente periglacial **será realizado y de responsabilidad del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)** con la coordinación de la autoridad nacional de aplicación de la presente ley.*

Se dará intervención al Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto cuando se trate de zonas fronterizas pendientes de demarcación del límite internacional previo al registro del inventario.

El IANIGLA por disposición transitoria (Artículo 15) de la Ley 26.639, creó el documento “Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución” (IANIGLA, 2010), en donde se desarrolla la estrategia para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. La misma cuenta con tres niveles, de menor a mayor detalle de información. El objetivo del nivel 1 es el Inventario Nacional de Glaciares propiamente dicho, es decir la identificación y caracterización de todos los glaciares y crioformas del

ambiente periglacial que actúan como reservas hídricas estratégicas en la República Argentina. El nivel 2 tiene como objetivo conocer la variación temporal de los glaciares y criofomas a lo largo del país. Mientras que el objetivo del nivel 3 es establecer los factores ambientales que regulan el comportamiento y determinar la significancia hidrológica de estos cuerpos de hielo a la esorrentía andina.

En este informe, se describen los trabajos realizados para la identificación e inventario de los cuerpos de hielo en la subcuenca Laguna de Pozuelos, provincia de Jujuy. El inventario ha sido realizado siguiendo lineamientos internacionales (GLIMS) adaptados a condiciones locales y regionales a partir de la metodología elaborada en el IANIGLA (detallada más adelante) que sirve de base para el Inventario Nacional de Glaciares en Argentina.

El trabajo de identificación de glaciares en la subcuenca Laguna de Pozuelos fue elaborado en enero de 2017 y aprobado según resolución N°RESOL-2017-635-APN-MAD del 5 de septiembre de 2017, siguiendo lineamientos internacionales adaptados a condiciones locales y regionales. La metodología utilizada ha sido desarrollada por el IANIGLA (ver sección 4. Materiales y métodos) y sirve de base para el Inventario Nacional de Glaciares en Argentina.

2. Antecedentes

En el Noroeste Argentino (NOA), la criósfera está representada principalmente por el permafrost de montaña que se manifiesta topo-climáticamente por la presencia de glaciares de escombros y asociación de formas menores generadas por el congelamiento permanente o estacional del suelo. El permafrost es una condición térmica; se presenta cuando los suelos permanecen congelados por más de dos años (Van Everdingen 2005). El cambio climático y los disturbios antrópicos, que alteran el régimen térmico del suelo, tienen efecto sobre el permafrost: en su formación, persistencia, distribución, espesor y temperatura.

No todo el permafrost existente en la actualidad está en equilibrio con el clima. En las regiones de permafrost discontinuo, donde la temperatura del permafrost está cercana al descongelamiento, el permafrost puede fácilmente desaparecer como resultado de los cambios en la temperatura del suelo asociados al calentamiento climático global. Esta degradación del permafrost de montaña, particularmente los glaciares de escombros, estará asociada a fuertes impactos naturales tales como hundimientos por descongelamiento, reptación y deslizamientos de laderas, de rocas, flujos de detrito, flujos de barro y geliflujión acelerada. Estas inestabilidades pueden provocar serios daños en poblaciones aledañas, en el paisaje, en los ecosistemas, en la infraestructura de las regiones afectadas y fuertes cambios en el abastecimiento hídrico estacional del piso altitudinal que ocupan.

En el sector oriental del NOA (Cordillera Oriental, Sierras Subandinas y Sierras de Santa Bárbara), los glaciares de escombros activos, indicadores de permafrost discontinuo, se encuentran ubicados en alturas desde 4.000 a 4.850 msnm. Los glaciares de escombros son importantes porque producen un volumen de agua semejante al generado por glaciares cubiertos o descubiertos; el agua que liberan tiene menos material suspendido que el de los glaciares descubiertos y su núcleo de hielo se encuentra protegido por la capa activa, de manera que serían más resistentes en el tiempo a las modificaciones de la temperatura del aire en la altura (Ahumada 2008).

Estimaciones precisas del volumen de agua almacenada en los glaciares de escombros (en permafrost) requieren, al igual que en otros tipos de glaciares, la aplicación de metodologías geofísicas específicas (sísmica, geoelectrica o GPR, entre otras).

En la región del NOA el permafrost discontinuo ha sido detectado tempranamente en las cabeceras de sus ríos principales, a diferentes alturas y condiciones climáticas locales (Ahumada et al. 2009). Claramente su condición térmica actual estaría en desequilibrio con el modelo climático planteado por Haeberli (1985), donde el rango de precipitación para la formación de glaciares de escombros sería de 400 a 2.500 mm anuales y el de temperatura promedio anual sería de -15 a -2° C. Considerando este modelo, los glaciares de escombros permanecerían en un equilibrio inestable y ecológicamente resilientes con las condiciones de temperatura y precipitación del clima actual (Ahumada et al. 2006).

Los primeros estudios de permafrost en el NOA fueron desarrollados por Catalano (1927), quien señaló la presencia de masas rocosas aglomeradas por hielo que fluían por gravedad a modo de un glaciar, por lo que los denominó litoglaciares. En los Nevados del Acay y de Palermo – Cachi, los glaciares de escombros inventariados registraron su límite inferior a 4.500 y 4.650 msnm, respectivamente (Igarzábal 1983, Schellenberger 1998). En el Nevado de Quevar (6.130 msnm) y Granados (5.705 msnm) también se observaron núcleos de hielos cubiertos por detritos en las altas cumbres (Igarzábal 1983).

Asimismo, los cuerpos de hielo y nieve de la región ubicada entre los 23° y 30° de latitud sur, fue inicialmente estudiada por Lliboutry (1956). El área se caracteriza por ser extremadamente árida y los cuerpos de hielo se ubican confinados en los picos mayores a 6.000 msnm. La mayoría se encuentran en pequeños circos o nichos de nivación, y unos pocos presentan grietas o signos de movimiento. Son formados por nieve recongelada y no presentan línea de equilibrio. Los cuerpos de hielo son de tipo reservorio, es decir que, todo el cuerpo de hielo se encuentra en balance positivo (acumulación) o negativo (ablación) dependiendo de la época del año (Mercer, J. H. 1967).

La gran altura que posee la cordillera de Los Andes, en esta región, produce que todas las precipitaciones sean en forma de nieve. La nieve es soplada de las cimas de las montañas y los cuerpos de hielo suelen ser solamente encontrados sobre las laderas sotavento de las grandes cumbres (Lliboutry, 1956).

3. Definiciones a los fines del Inventario

A los fines específicos y operativos del Inventario Nacional de Glaciares, el IANIGLA propuso en el documento: “**Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución**”, (IANIGLA 2010) (http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wpcontent/uploads/legales/fundamentos_cronograma_de_ejecucion.pdf), definiciones específicas y un tamaño mínimo de los cuerpos de hielo a inventariar dentro del ambiente glacial y periglacial de Argentina. El objetivo de estas definiciones es aclarar las características básicas de los diferentes cuerpos identificados en las imágenes satelitales y los procesos que las originan, para que puedan ser reconocidos por los operadores sin lugar a ambigüedades. Estos criterios han sido empleados en el inventario de cuerpos de hielo para la subcuenca Laguna de Pozuelos aquí presentado.

En el territorio de la República Argentina podemos agrupar a las reservas hídricas estratégicas en estado sólido en dos grandes grupos: glaciares (descubiertos y cubiertos) 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. No existe en la actualidad información precisa sobre la relevancia hidrológica de otras crioformas presentes en la Cordillera de los Andes, pero se estima que la misma es significativamente inferior comparada con los glaciares (descubiertos y cubiertos) y los glaciares de escombros. Por ello se ha propuesto estudiar, a través de las investigaciones relacionadas con el Nivel 3 del Inventario Nacional de Glaciares, el aporte de los suelos congelados y otras crioformas al caudal de los ríos andinos. En el caso de establecerse que la contribución hidrológica de otras crioformas sea relevante, las mismas serán incluidas en futuros inventarios.

Si bien las definiciones que aquí se presentan son más amplias que otras utilizadas para estudios específicos, las mismas concuerdan por un lado con los lineamientos generales dados por el WGMS (World Glacier Monitoring Service) y la IPA (International Permafrost Association), y además cumplen con la propiedad principal que debe tener un cuerpo de hielo para ser incluido en el inventario, su condición de reserva de agua en estado sólido. Es respetando estos dos conceptos que se proponen las siguientes definiciones:

Glaciar (descubierto y cubierto): cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recristalización de la nieve, con o sin cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias) o no (*) y de un área mayor o igual que 0,01 km² (una hectárea).

(*): Dentro de esta definición de glaciar se incluyen a los **manchones de nieve permanentes / glaciaretas** que como no tienen evidencia de movimiento, en general no se consideran glaciares. Sin embargo, dado que los manchones de nieve permanentes / glaciaretas son reservas significativas de agua en estado sólido, se han incluido en el inventario.

Glaciar 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, inactivos y fósiles (Haeberli 1985). 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; Trombotto 2002; Brenning 2005). Esta última categoría no ha sido incluida en el inventario por no tener importancia hidrológica.

Glaciar 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 glaciogénico (ambiente periglacial) en base a 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.

Cabe aclarar que en el ambiente periglacial existen numerosas geoformas con hielo en su interior. Sin embargo, los glaciares de escombros al estar sobresaturados en hielo, son los más importantes desde el punto de vista de reserva hídrica (Corte 1976; Schrott 1996; Brenning y Azócar 2010; Azócar y Brenning 2010). Es precisamente el alto contenido de hielo el que favorece su desplazamiento pendiente abajo (Haeberli 1985; Barsch 1996). Este movimiento es el que genera los rasgos característicos superficiales (crestas y surcos, crestas laterales) que permiten identificar a los glaciares de escombros en las imágenes satelitales (Haeberli 1985; Trombotto 1991; Barsch 1996; Ikeda y Matsuoka 2002). Por otra parte es importante aclarar que la distribución de hielo dentro de los glaciares de escombros no es homogénea, ya que existen variaciones tanto horizontales como verticales, de allí la importancia de identificar la totalidad del cuerpo (Barsch 1996; Gruber y Haeberli 2009; Arenson y Jakob 2010; Otto et al. 2010).

4. Materiales y métodos

La ejecución del Inventario de Glaciares de la República Argentina sigue las normativas internacionales establecidas por el World Glacier Monitoring Service (WGMS 1967 y posteriores, UNESCO-IAHS 1970, Muller 1977) y su programa World Glacier Inventory (WGI), las normativas del Programa Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS; Racoviteanu et al. 2009), la IPA (International Permafrost Association), y directivas empleadas en inventarios previos en los Andes Centrales y Patagónicos (Corte y Espizúa 1981, Delgado et al. 2010).

Este informe corresponde al inventario de glaciares de la subcuenca Laguna de Pozuelos, que forma parte de la cuenca Cuencas Varias de la Puna, ubicada en la región de los Andes Desérticos de la República Argentina, en la provincia de Jujuy.

La subcuenca estudiada posee un área de 3.797 km² y limita al oeste, al norte y al noreste con la cuenca del río Pilcomayo, donde una porción del límite norte corresponde también con el límite internacional Argentino-Boliviano. Posteriormente hacia el sur y sureste colinda con la subcuenca Salinas Grandes perteneciente a la cuenca Cuencas Varias de la Puna.

La región de la puna se define por su clima continental seco donde las precipitaciones son escasas (entre 200 y 500 mm anuales), los vientos son frecuentes y de variable intensidad, las temperaturas son frescas o frías todo el año, la oscilación térmica es muy grande, entre 25 y 40°C entre el mes más frío y el más cálido. Existen varios meses por debajo de 0°C (inviernos muy rigurosos) que contrastan con veranos muy cálidos. La oscilación térmica diaria también es muy marcada. Los cursos de agua se forman por deshielo de las altas cumbres que siguen por vaguadas y quebradas hasta lugares bajos donde originan salares y lagunas; zigzaguean entre los cordones montañosos arrastrando escombros además de sales y boratos en disolución. En tramos superiores recorren capas de origen volcánico para luego discurrir en terrenos arcillosos, arenosos antes de desaguar en llanuras salinas (subsecretaría de recursos hídricos SSRH1).

La subcuenca de estudio, además, abarca un conjunto de cuencas endorreicas que se caracterizan por presentar pequeñas lagunas en los sectores más bajos de cada una de estas cuencas. Entre ellas se pueden mencionar la laguna Vizcachayoc y Larga como las más significativas (Figura 1).

¹<http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/83.pdf>

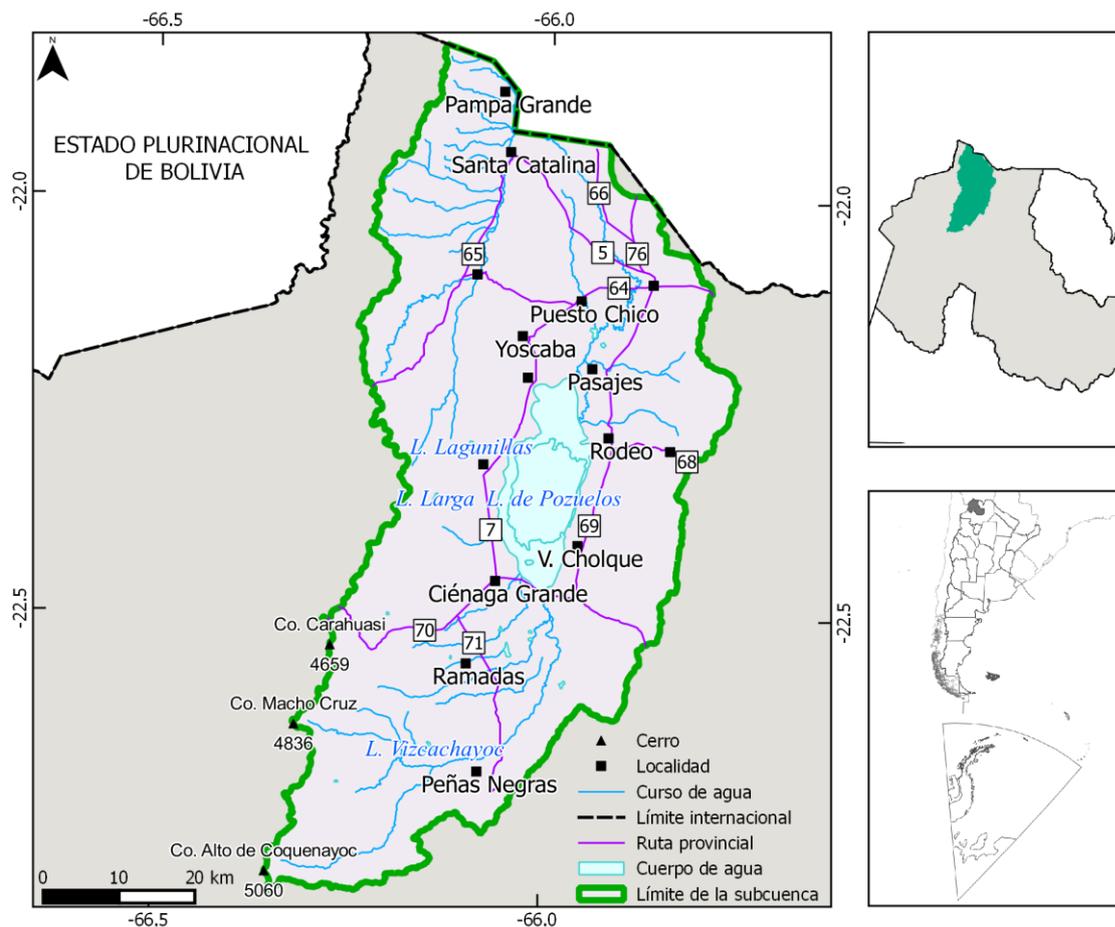


Figura 1: Mapa de ubicación la subcuenca Laguna de Pozuelos.

En la Figura 2 se puede ver un organigrama con los pasos metodológicos que forman parte del proceso de realización del Inventario Nacional de Glaciares. En las cuencas en las cuales no se ha detectado presencia de glaciares, algunos de los pasos metodológicos no se han realizado, como la digitalización de geoformas, construcción de base de datos y control de campo.

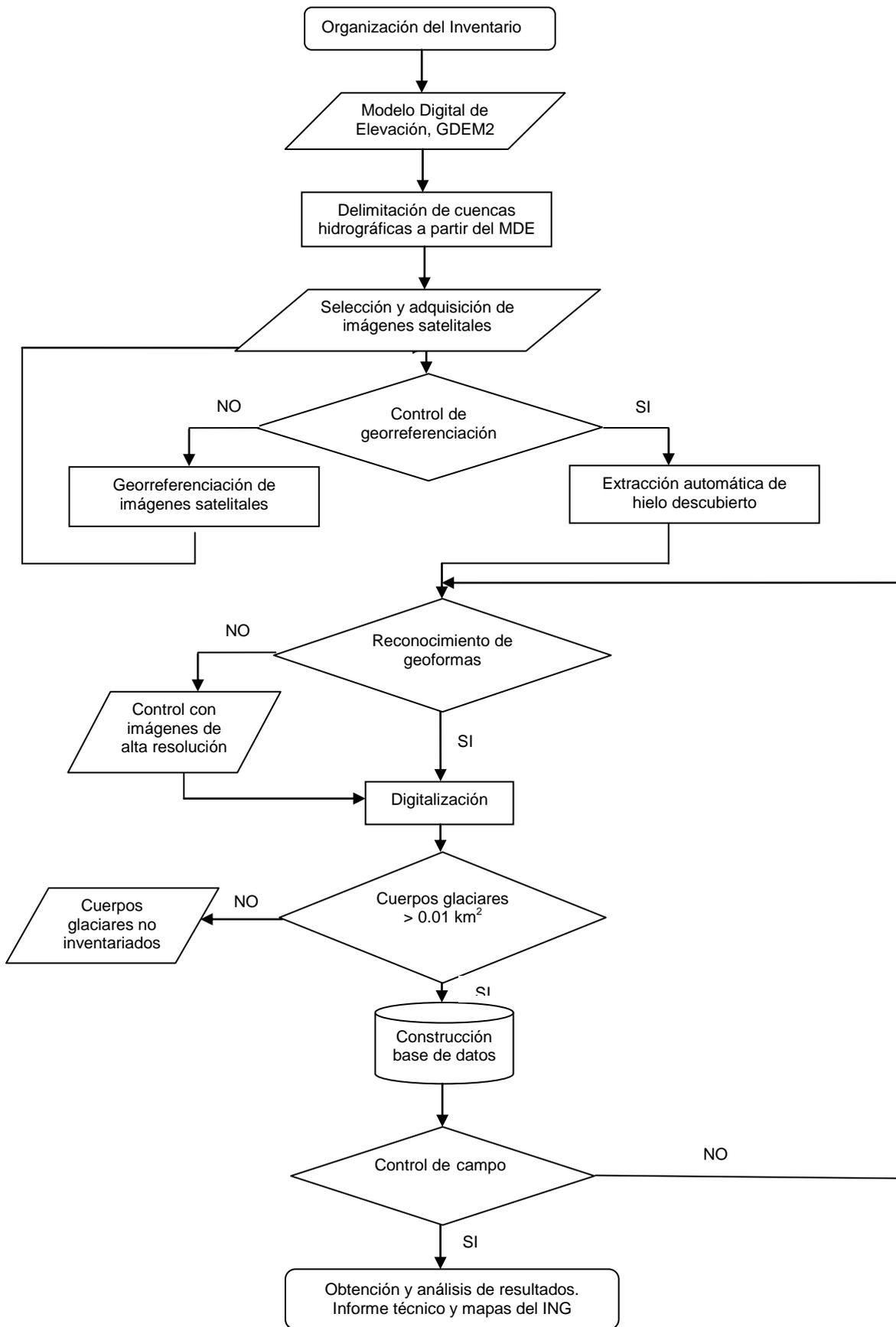


Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología usada en el Inventario Nacional de Glaciares.

4.1. Delimitación de cuencas hidrográficas a partir de modelos de elevación

La delimitación de cuencas hidrográficas en la subcuenca Laguna de Pozuelos se basó en información proveniente de modelos digitales de elevación (MDE). De los MDE disponibles se decidió trabajar con el SRTM v4 (resolución espacial 90 m).

Empleando el programa QGIS (software libre) se delimitó la subcuenca utilizando como base el SRTM. Los pasos básicos para obtener las cuencas hidrográficas en QGIS consisten en primer lugar en el llenado de sumideros y posteriormente delimitar el tamaño mínimo de la cuenca que viene dado en base al número de celdas que seleccionemos. La cuenca obtenida, fue posteriormente editada y corregida manualmente, en aquellos casos en que no hubo un buen ajuste entre el MDE y la imagen satelital de base. La edición manual de la cuenca fue realizada empleando el programa QGIS.

En el sector limítrofe entre Argentina y Bolivia, el borde de la subcuenca fue adaptado de acuerdo al límite acordado por ambos países según datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

4.2. Selección de imágenes satelitales y georreferenciación

Este estudio se realizó a partir de imágenes del satélite SPOT 4 y 5. Las imágenes seleccionadas corresponden al fin del periodo de ablación y fechas cercanas a ella, para la zona de estudio para evitar la presencia de nieve estacional. También se ha tenido cuidado en seleccionar imágenes con baja o nula cobertura nubosa, para evitar zonas sin información espectral. Se utilizaron dos escenas del satélite LANDSAT como base para la georreferenciación. Además se utilizaron imágenes de alta resolución espacial de Google Earth y el aplicativo de Bing.

Las imágenes SPOT fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Las imágenes LANDSAT fueron provistas gratuitamente por el USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS).

En la Tabla 1 se mencionan las imágenes utilizadas de base para realizar el estudio de la subcuenca Laguna de Pozuelos. Se detallan a partir del número identificador de la escena (ID_escena).

En este inventario las coordenadas están referidas al sistema de referencia global WGS84, y el sistema de proyección elegido es el UTM (Universal Transveral Mercator) 19S. Este sistema de referencia y proyección es utilizado internacionalmente, lo que permitirá comparar los resultados obtenidos en este trabajo con la información de otros países.

Tabla 1: Imágenes del sensor SPOT utilizadas como base en la subcuenca de la Laguna de Pozuelos.

Satélite/sensor	ID Escena	Fecha
SPOT 4	SPOT4_HRVIR1_2012-05-07_13-56-13_I_676_394_S0_L2A	07 mayo 2012
SPOT 4	SPOT4_HRVIR1_2012-05-07_13-56-22_I_676_395_S0_L2A	07 mayo 2012
SPOT 5	SPOT5_HRG2_2012-04-07_14-47-18_J_676_396_S0_L2A	07 abril 2012

4.3. Delimitación de hielo descubierto

En esta subcuenca no hay glaciares descubiertos ni manchones de nieve perennes, por lo que se omitió el paso de la clasificación supervisada empleada para la delimitación de este tipo de geformas.

4.4. Digitalización de glaciares cubiertos y glaciares de escombros

En el caso del mapeo de glaciares cubiertos por detritos y glaciares de escombros, la digitalización manual sigue siendo la mejor metodología utilizada a nivel internacional (Stokes *et al.* 2007). En ese sentido, las imágenes de alta resolución espacial son las herramientas más indicadas para delimitar estos cuerpos de hielo. Se revisaron imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth y Bing y no se identificaron glaciares cubiertos ni glaciares de escombros en la subcuenca Laguna de Pozuelos.

4.5. Base de datos de las geformas inventariadas

En esta cuenca no se han identificado glaciares, por lo que no ha sido necesario elaborar una base de datos.

4.6. Control de campo

Los glaciares argentinos se ubican a lo largo de Cordillera de los Andes, en lugares inaccesibles, a gran altura y en zonas carentes de infraestructura vial, por lo que aun hoy encontramos zonas montañosas inexploradas. Las campañas del nivel 1 del ING tienen como objetivo relevar y documentar la presencia y el estado de glaciares, particularmente de aquellos para los que no existe o se tiene muy poca información. Además de obtener información en forma directa se busca generar un banco fotográfico que servirá para dar a conocer y monitorear de un gran número de glaciares.

En esta cuenca no se han identificado glaciares, por lo que no se ha realizado ningún control en el terreno.

5. Resultados

5.1. Subcuenca Laguna de Pozuelos

Después de analizar las imágenes seleccionadas para realizar el inventario de la subcuenca Laguna de Pozuelos, se concluye que no se han encontrado glaciares ni ningún tipo de crioforma en este sector.

Esta subcuenca no presenta cerros de grandes altitudes como para favorecer la formación y conservación de cuerpos de hielo. Los cerros de mayor elevación son Alto de Coquenayoc (5.060 msnm), Macho Cruz (4.836 msnm), Carahuasi (4.659 msnm).

Se destaca la observación de depósitos morenicos a lo largo de los valles entorno a la Sierra de Carahuasi, sobre el sector suroeste de la subcuenca de estudio, donde se ubica el cerro Alto de Coquenayoc (5.060 msnm). Estos depósitos evidencian la presencia de cuerpos de hielo en glaciaciones pasadas.

6. Bibliografía

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2005^a. High mountain permafrost in the argentine subtropic. *Terra Nostra* 05/1:9. Berlin.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. y Páez, S. V. 2005b. Los glaciares de escombros en el NW argentino, acuíferos de altura en riesgo ante los cambios globales. Presentado en CONAGUA 2005. Mendoza. CD Versión.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2006. Rock Glaciers in the Andean Criolithozone at the 27° S. Symposium on Climate Change: Organizing the Science for the American Cordillera (CONCORD). NOAA-IANIGLA-CONICET-mri-IAI-MAB-IHDP-UNESCO-PHI-FORECOS. Libro de Resúmenes, Mendoza, Argentina.

Ahumada, A. L. 2008. El conocimiento de la criósfera continental del NO de Argentina. Su comportamiento ante el calentamiento global. Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2008^a. Reconocimiento de permafrost andino en las nacientes del Río Santa María, Catamarca. IV Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de vida, Catamarca.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2008b. Geoindicadores de calentamiento global en Cumbres Calchaquíes. JUNGRA, Tucumán.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2009. El permafrost andino, reducto de la criósfera en el borde oriental de la Puna, NO de Argentina. XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas y Primer Taller de Trabajo de Estaciones Continuas GNSS de América Latina y del Caribe. Libro de Resúmenes CONICET-AGENCIA-UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO- ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOFÍSICOS Y GEODESTAS. Mendoza.

Arenson, L. y Jakob, M. 2010. The Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes – A Discussion of Azócar and Brenning (2010) and Brenning and Azócar (2010). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 286 - 288.

Azócar, G.F. y 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.

Barsch D. 1978. Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. Third International Conference on Permafrost, Proceedings 1, 349-353 p. Ottawa, Canada.

Barsch, D. 1996. *Rockglaciers*. Springer, 331 p. Berlin.

Brenning, A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of central Chile (33–35° S). *Permafrost and Periglacial Processes*. 16, 231–240.

- Brenning, A. y Azócar, G.F. 2010. Statistical analysis of topographic controls and multispectral signatures of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°- 33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 54 – 66
- Catalano, L. R. 1927. Datos hidrológicos del desierto de atacama. *Boletín de la Dirección General de Minas, Geología e Hidrología*. Publicación 35:1-35.
- Corte, A. 1976. The hydrological significance of rock glaciers. *Journal of Glaciology* 17: 157-158.
- Corte, A. E. and L. E. Espizúa. 1981. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza. IANIGLA-CONICET. Mendoza. 64 p.
- Delgado, S., Masiokas, M., Pitte, P. y Villalba R. 2010. Developing an Argentinean glacier inventory: first results from the Southern Patagonia Icefield submitted to GLIMS. International Ice and Climate Conference, Valdivia, Chile, CECS.
- Gruber, S. y Haeberli, W. 2009. Mountain Permafrost, in *Permafrost Soils* (ed) R. Margesin, *Soil Biology* 16. springer-Verlag Berlin: p. 33-44p.
- Haeberli, W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Vol. 77, 142 p.
- IANIGLA, 2010. Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (www.glaciares.org.ar), 87 p., Mendoza.
- Igarzábal A. 1983. El sistema glaciolítico de la cuenca superior del Río Juramento, provincia de Salta. En VIII Congreso Geológico Argentino - Actas IV; 167-183.
- Ikeda A., and Matsuoka, N., 2002. Degradation of Talus-derived Rock Glaciers in the Upper Engadin, Swiss Alps. *Permafrost Periglac. Process.*, Vol. 13 (145–161).
- Lliboutry, L. 1956. Nieve y glaciares de Chile. *Fundamentos de glaciología*. Santiago, Chile, Ediciones de la Universidad de Chile. 471.
- Mercer, J. H. 1967. *Southern Hemisphere Glacier Atlas*. American Geographical Society New York. Earth Sciences Laboratory. ES-33
- Otto, J-Ch., Götz, J., Keuschnig, M., Hartmeyer I., Trombotto D. y Schrott, L. 2010. Geomorphological and geophysical investigation of a complex rock glacier system - Morenas Coloradas valley (Cordon del Plata, Mendoza, Argentina). *Geophysical Research Abstracts*, EGU2010-3625, Vol. 12.
- Racoviteanu, A.E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S.J.S. y Armstrong, R. 2009. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology* 50 (53).
- Schellenberger A, Mailänder R, Stingl H, Veit H. 1998. Investigations on Late Quaternary landscape and climate evolution en la Sierra de Cachi (Province of Salta, NW-Argentina). *Terra Nostra* 5: 144-145.

- Schrott, L. 1996. Some geomorphological-hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). *Zeitschrift für Geomorphologie NF Suppl.-Bd.*, 104, 161-173.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D. y Shahgedanova, M. 2007. Recent glacier retreat in Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46: 95-213.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D. y Shahgedanova, M. 2007. Recent glacier retreat in Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46: 95-213.
- Trombotto, D. 1991. Untersuchungen zum periglazialen Formenschatz und zu periglazialen Sedimenten in der 'Lagunita del Plata', Mendoza, Argentinie. ("Investigaciones sobre geoformas y sedimentos periglaciales en la 'Lagunita del Plata', Mendoza, Argentina"). *Heidelberger Geographische Arbeiten*, Heft 90: 171 páginas, Heidelberg, Alemania (ver en www.geog.uni-heidelberg.de/hga).
- Trombotto, D. 2002. "Inventory of fossil cryogenic forms and structures in Patagonia and the mountains of Argentina beyond the Andes". *South African Journal of Science*, 98: 171-180, Review Articles, Pretoria, Sudáfrica.
- UNESCO-IASH. 1970. Perennial ice and snow masses. A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory. Technical papers in hydrology 1. UNESCO. France. 56 pp.
- Van Everdingen, R. 2005. Multilanguage glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, Co: National Snow and Ice data center / World Data Center for Glaciology. 90 pp.
- WGMS. 1967. Fluctuations of glaciers 1959-1965, Vol. I. IAHS (ICSU)/UNEP/UNESCO. Paris. 52 pp.
- WGMS-UNEP, 2007. Global Glacier Changes: Facts and Figures, World Glacier Monitoring Services, United Nations Environmental Programme, Geneva.
- Williams, R.S., Jr., Ferrigno, J.G. (eds.) 1999. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World – South America. USGS Professional Paper 1386-I.

7. Anexos

7.1. Imágenes revisadas para la subcuenca Laguna de Pozuelos

Se presentan las tablas, ordenadas por tipo de satélite, con las imágenes utilizadas en el inventario de la subcuenca Laguna de Pozuelos.

La selección final de las imágenes utilizadas como base del inventario se realizó teniendo en cuenta aquéllas de fechas más recientes, que tuvieran poca cobertura de nieve estacional y ausencia de nubes.

El resto de las imágenes se seleccionaron teniendo en cuenta diversos objetivos:

- Como base de georreferenciación, se emplearon en este caso imágenes del satélite Landsat.
- Como ayuda para la interpretación se emplearon imágenes de sensores de alta resolución, en este caso fueron utilizadas las imágenes disponibles en Google Earth y en el aplicativo de Bing.

Satélite: **LANDSAT 5**

Sensor: TM (Thematic Mapper)

Resolución espacial: 30 m

Proveedor: USGS <http://www.usgs.gov>

ID_imagen	Fecha	Objetivo
LT52320762011298CUB00	25 octubre 2011	Base georreferenciación
LT52320752011250CUB00	07 septiembre 2011	Base georreferenciación

Satélite: **SPOT**

Sensor: HRVIR1 y HRG2

Resolución espacial: 20 m

Proveedor: CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales).

En la tabla siguiente se incluyen las imágenes satelitales utilizadas discriminadas por su número identificador de escena (ID_imagen).

ID_imagen	Fecha	Objetivo
SPOT4_HRVIR1_2012-05-07_13-56-13_I_676_394_S0_L2A	07 mayo 2012	Base inventario
SPOT4_HRVIR1_2012-05-07_13-56-22_I_676_395_S0_L2A	07 mayo 2012	Base inventario
SPOT5_HRG2_2012-04-07_14-47-18_J_676_396_S0_L2A	07 abril 2012	Base inventario



Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sustentable
Presidencia de la Nación

I A N I G L A



CONICET

U. N. C U Y O
GOBIERNO
DE MENDOZA

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 regiones y condiciones ambientales de nuestro país.

A partir del trabajo realizado por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), con la coordinación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, se han inventariado 16.078 glaciares y geoformas periglaciares en la cordillera de Los Andes y 890 en las Islas del Atlántico Sur, los cuales ocupan una superficie de 5.769 y 2.715 km² respectivamente. El Inventario Nacional de Glaciares describe por primera vez, en un instrumento sistematizado, todos los glaciares y geoformas periglaciares que actúan como reservas hídricas existentes en el territorio nacional, con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo.

El presente informe describe los resultados del Inventario Nacional de Glaciares de la subcuenca Laguna de Pozuelos, Cuencas Varias de la Puna, provincia de Jujuy.

