



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

MINUTA TÉCNICA N° 7

METODOLOGÍA DEL INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES

REALIZADO POR:
**UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

S.D.T. N°447

SANTIAGO, MAYO DE 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Sr. Juan Carlos García P.

Director General de Aguas (S)

Sr. Cristian Nuñez R.

Jefe Unidad Glaciología y Nieves

Sr. Gino Casassa R.

Profesionales Participantes

Srta. Alejandra Espinoza R.

Sr. Alexis Segovia R.

Sr. Jorge Huenante G.

Citar este informe como sigue:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. **METODOLOGÍA DEL INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES**, SDT N°447, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas Unidad de Glaciología y Nieves. Realizado por: Casassa, G., Espinoza, A., Segovia, A., Huenante, J.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	METODOLOGÍA EMPLEADA – GENERALIDADES.....	5
3.	FORMATO DEL INVENTARIO.....	7
4.	METODOLOGÍA DETALLADA - GLACIARES DESCUBIERTOS Y CUBIERTOS.....	8
4.1.	Definición de glaciar Adoptada por la DGA.....	8
4.2.	Adquisición de datos Satelitales.....	9
4.3.	Software de procesos SIG.....	10
4.4.	Mapeo de glaciares.....	10
4.5.	Clasificación de glaciares.....	11
4.6.	Caracterización fisiográfica.....	12
4.7.	Espesor, volumen y equivalente en agua.....	13
4.8.	Otras consideraciones.....	14
5.	METODOLOGÍA DETALLADA - GLACIARES ROCOSOS.....	15
5.1.	Terminología.....	15
5.2.	Definición de glaciar rocoso adoptada por la DGA.....	15
5.3.	Clasificación.....	15
5.4.	Mapeo del contorno de glaciares rocosos.....	17
5.5.	Espesor, volumen y equivalente en agua.....	18
6.	REFERENCIAS.....	19



MINUTA TÉCNICA N° 7, 03/05/2022 UGN-DGA-MOP/NC
METODOLOGÍA INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES 2022
Unidad de Glaciología y Nieves-Dirección General de Aguas
Ministerio de Obras Públicas
Nivel Central: Morandé 59, 8° piso, Santiago, Chile

03 mayo 2022

1. INTRODUCCIÓN

Los glaciares son cuerpos de hielo ubicados en la alta cordillera y que tienen una relevante función en la provisión y regulación de los recursos hídricos, los servicios y funciones ecosistémicas asociadas, y asimismo como indicadores de cambios climáticos. Chile concentra aproximadamente un 80% de la superficie de todos los glaciares andinos, y está en el séptimo lugar a nivel mundial.

La Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) es el organismo oficial encargado de elaborar el inventario de glaciares en Chile, llamado Inventario Público de Glaciares (IPG), que forma parte del Catastro Público de Aguas. Este inventario lo realiza la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la DGA, servicio público encargado de la investigación, medición y monitoreo de temas glaciológicos.

2. METODOLOGÍA EMPLEADA - GENERALIDADES

El inventario incluye glaciares descubiertos (vale decir prácticamente sin cobertura de rocas en superficie), cubiertos (con relevante cobertura de rocas), y glaciares rocosos (con cobertura total o casi total de rocas). Se adoptó en el IPG la clasificación primaria de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y

la Cultura (UNESCO), en que los glaciares se clasifican en glaciar de montaña (glaciar ubicado en la ladera de una montaña, mayor o igual a 25 hectáreas), glaciarete (glaciar menor a 25 hectáreas), glaciar de valle (cuyo cuerpo principal se ubica en un valle, mayor o igual a 25 hectáreas), glaciar efluente (que drena desde un campo de hielo, mayor o igual a 25 hectáreas), y glaciar rocoso (con cobertura total o casi total de rocas, independiente de su tamaño). Para el inventario, se empleó como criterio de mapeo un área mínima de 1 hectárea (ha), también según normativa UNESCO.

El primer Inventario Público de Glaciares (IPG) a nivel nacional fue realizado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA entre los años 2008 a 2014, y puesto a disposición de la ciudadanía el año 2014, por lo cual, se denominó IPG2014. El IPG2014 se basó principalmente en imágenes satelitales Landsat TM y Landsat ETM+ de fecha promedio 2002 y de una resolución espacial de 30 y 15 m.

Entre los años 2018 y 2022 la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas trabajó en la primera actualización del inventario 2014, en conjunto con una asesoría externa, que corresponde al Inventario Público de Glaciares versión 2022 (IPG2022). El IPG2022 está basado en imágenes satelitales de fecha promedio 2017, principalmente Landsat 8 (OLI) y Sentinel-2, de resolución espacial 15 y 10 m respectivamente. Para el caso de los glaciares rocosos, y dado su menor tamaño y dificultad de discriminar el hielo cubierto con el entorno rocoso, se utilizaron imágenes satelitales de una resolución menor a 3 m.

Debido a mejoras en la metodología, se agregaron al inventario 2022 varios cientos de glaciares, los cuales no habían sido detectados en el inventario anterior. Los glaciares del IPG2022 incorporados anteriormente en el IPG2014, fueron mapeados en esta ocasión hasta una superficie igual o superior a 0,1 ha. Por otra parte, en el IPG2022 se eliminaron varios cientos de manchones de nieve efímeros que en el IPG2014 habían sido considerados erróneamente como glaciares.

Con el fin de no subestimar el área de glaciares, se consideró siempre un principio precautorio para su mapeo. Concretamente, se asumió para este efecto un contorno máximo de extensión del área estimada de cada glaciar, cuyo límite en el caso de glaciares cubiertos y rocosos puede ser difícil de determinar en forma precisa, debido a la complejidad en discriminar en las imágenes satelitales el área de hielo cubierta por rocas y el suelo rocoso propiamente tal del entorno del glaciar.

El IPG2022 se sometió a un proceso de revisión de pares, invitando para tal efecto a 60 revisores, entre los cuales se encontraban instituciones públicas y privadas, organizaciones ambientales y científicos expertos en la materia, principalmente de Chile, pero también del extranjero; 22 revisores enviaron observaciones, las cuales se refieren a casi 8 mil glaciares del inventario, que fueron consideradas en la versión final.

3. FORMATO DEL INVENTARIO

El formato del Inventario Público de Glaciares contempla los siguientes 20 campos obligatorios:

	CAMPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
1	SHAPE	Tipo de vector utilizado (polígono)	Texto
2	COD_GLA	Código del glaciar definido según normas UNESCO/WGI (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Glacier Inventory)	Texto
3	NOMBRE	Nombre del glaciar (en el caso de que posea un nombre, de lo contrario S/N)	Texto
4	CLASIFICA	Clasificación primaria del glaciar según normas UNESCO/WGI	Texto
5	ÁREA_KM2	Área total de hielo glaciar excluyendo afloramientos rocosos (nunataks)	km ²
6	REGIÓN	Nombre de la región donde se sitúa el glaciar	Texto
7	PROVINCIA	Nombre de la provincia donde se sitúa el glaciar	Texto
8	COMUNA	Nombre de la comuna donde se sitúa el glaciar	Texto
9	DATUM	Sistema de referencia geodésico	Texto
10	HUSO	Zona UTM (Universal Transverse Mercator) en la que se sitúa el glaciar	Texto
11	NORTE_M	Coordenada Norte UTM (centroide del polígono)	m
12	ESTE_M	Coordenada Este UTM (centroide del polígono)	m
13	FUENTE_DIG	Fuente digitalización (imagen satelital, foto aérea, ortofoto LiDAR, etc.)	Texto
14	FUENTE_FECHA	Fecha de la fuente utilizada para la digitalización	dd/mm/aaaa
15	INVENT_FECHA	Año de digitalización del polígono glaciar	4 dígitos
16	NOM_CUEN	Nombre de la cuenca donde se sitúa el glaciar	Texto
17	COD_CUEN	Código BNA (Banco Nacional de Aguas) de la cuenca donde se sitúa el glaciar	Número
18	COD_SCUEN	Código BNA de la subcuenca donde se sitúa el glaciar	Número
19	COD_SSCUEN	Código BNA de la subsubcuenca donde se sitúa el glaciar	Número
20	MZONA_GLACI	Macrozona glaciológica donde se sitúa el glaciar	Texto

Adicionalmente se incluyen los siguientes 21 campos secundarios o complementarios, que tienen carácter de opcional:

	CAMPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
21	CH_CASQ	En el caso que el glaciar forme parte de un campo de hielo o casquete de hielo	Texto
22	CUBIERTO	En el caso que el glaciar sea un glaciar cubierto	Texto
23	LATITUD_°	Coordenada geográfica (centroide del polígono)	Grados S (sur) en notación decimal
24	LONGITUD_°	Coordenada geográfica (centroide del polígono)	Grados O (oeste) en notación decimal

25	PERÍMETRO_K M	Perímetro del polígono	km
26	ORIENTA	Orientación principal del glaciar	N, NE, E, SE, S, SO, O, NO
27	HMEDIA_M	Altitud media del glaciar	m s.n.m.
28	HMAX_M	Altitud máxima del glaciar	m s.n.m.
29	HMIN_M	Altitud mínima del glaciar	m s.n.m.
30	PENDIENTE_°	Pendiente media del glaciar	Grados sexagesimales en notación decimal
31	ESP_MED_M	Espesor medio del glaciar	m
32	F_ESP_MED	Fuente espesor medio (referencia a fórmula o estudio específico)	Texto
33	VOL_KM3	Volumen estimado del glaciar	km ³
34	EQ_AGUA_KM3	Equivalente en agua estimado del glaciar	km ³
35	WGI_1	Clasificación primaria del glaciar según normas UNESCO/WGI (tipo de glaciar)	Número
36	WGI_2	Clasificación secundaria del glaciar según normas UNESCO/WGI (forma del glaciar)	Número
37	WGI_3	Clasificación terciaria del glaciar según normas UNESCO/WGI (característica morfológica del frente)	Número
38	FRENTE_TER	Clasificación de la superficie proglacial (lago, fiordo o terrestre)	Texto
39	RESOL_IMG_M	Resolución espacial de la imagen satelital o de la fuente utilizada	m
40	ERROR_KM2	Estimación del error del área digitalizada	km ²
41	OBSERVA	Observaciones	Texto

Este formato del Inventario Público de Glaciares fue establecido en la Resolución (Exenta) N° 698 del 8 de abril de 2022, De conformidad con lo dispuesto en el artículo 48 de la Ley N° 19.880, de 22 de mayo de 2003, que Establece Bases de los Procedimientos Administrativos que Rigen los Actos de los Órganos de la Administración del Estado, fue publicado en el Diario Oficial el 23 de abril de 2022.

4. METODOLOGÍA DETALLADA - GLACIARES DESCUBIERTOS Y CUBIERTOS

4.1. Definición de glaciar adoptada por la DGA

“Masa de agua terrestre en estado sólido, de ocurrencia natural, que haya perdurado al menos 5 años, con presencia de hielo y eventualmente neviza y nieve superficial, con evidencia de flujo actual o pasado, independiente de su estado de degradación, cualquiera sea su forma geométrica y ubicación (glaciar de valle, de montaña, efluente, campo de hielo, glaciarete u otros), y su cobertura detrítica superficial al final del período de ablación. Son partes constituyentes de un glaciar, su material detrítico rocoso superficial o incorporado en el interior del glaciar y el agua líquida, tanto superficial como interna”.

4.2. Adquisición de datos satelitales

Para la actualización del Inventario Público de Glaciares (IPG) se utilizó una serie de datos satelitales, adquiridos en general entre los años 2010 y 2021 para glaciares descubiertos, asegurando que cada imagen presentara la menor cobertura nubosa y nival posible. Se privilegiaron imágenes satelitales de fines de verano.

Para el caso de las fuentes utilizadas para el mapeo del Inventario Público de Glaciares 2022 (IPG2022), todas las imágenes satelitales están georreferenciadas. Pese a lo anterior, en el análisis se ha verificado que puede existir un ligero desplazamiento de alrededor de 25 metros entre las fuentes de imágenes satelitales provistas por el "Base Map" de ArcGIS (WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4 y GeoEye-1) de resolución aproximada 0,5 metros, y las imágenes Landsat 8 (OLI) y Sentinel-2 de resolución 15 y 10 metros respectivamente, y a su vez un desplazamiento de aproximadamente 15 metros entre las imágenes Landsat 8 (OLI) y Sentinel-2 con las imágenes más recientes de Google Earth de 1,5 m de resolución. Por su parte, entre Google Earth y Base Map, hay un desplazamiento aproximado de 8 metros. Cabe señalar que el 95,9% de la superficie de hielo mapeada en el IPG2022 fue en base a imágenes Landsat 8 (OLI) (69,4%) y Sentinel-2 (26,5%).

Las imágenes utilizadas fueron:

- Landsat 8 (OLI) a 15 m de resolución (pansharpened)¹ en combinación R: 7 (infrarrojo de onda corta), G: 5 (infrarrojo cercano), B: 3 (verde).
- Sentinel-2 a 10 m de resolución (multiespectral) en combinación R: 8 (infrarrojo cercano), G: 4 (rojo), B: 3 (verde).
- Spot 6 a 1,5 m de resolución en color visible.
- Imágenes obtenidas de "Base Map" de Arcmap: WorldView-2 y WorldView-4 (0,5 m), WorldView-3 (0,31 m) y GeoEye-1 (0,46 m) en color visible.
- Hycon del año 1955 a escala 1:70.000.
- PlanetScope a 3 m de resolución en color visible.
- Ortofotos vuelos aéreos LiDAR de los años 2015 y 2019 entre 1 y 1,8 m de resolución en color visible.
- Google Earth a 1,5 m de resolución en color visible.
- Pléiades a 0,5 m de resolución en color visible.
- RapidEye a 5 m de resolución en color visible.

Los datos satelitales se descargaron desde los siguientes sitios de internet:

- <https://search.asf.alaska.edu>
- <https://search.earthdata.nasa.gov/>
- <https://glovis.usgs.gov/app>
- <https://scihub.copernicus.eu/dhus/https://www.planet.com/explorer/>

¹ La resolución espacial de la imagen multiespectral se puede mejorar mediante un proceso de fusión con la imagen pancromática (una técnica denominada *pansharpening*) para obtener una imagen multiespectral con la resolución de la imagen pancromática y las características espectrales de la imagen multiespectral. En el caso de Landsat que tiene una resolución de 30 m por píxel para la imagen multiespectral y 15 m por píxel para el pancromático, entonces se podrá obtener una imagen multiespectral con una resolución de 15 m por píxel (Vega *et al.*, 2008).

4.3. Software de procesos SIG

Los softwares empleados para el procesamiento de las imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y datos vectoriales .shp fueron: LEOWorks 3.0, GlobalMapper 12.0, QGIS 3.4+GRASS y ArcGIS 10.2.1.

El proceso de delimitación del IPG2022 se realizó en un 100% por operadores humanos y no se aplicó ningún tipo de proceso automático en esta etapa.

4.4. Mapeo de glaciares

- El mapeo de glaciares se realizó utilizando como base el Inventario Público de Glaciares de 2014 (IPG2014) de la DGA, que fue realizado considerando un área glaciar mínima de 1 ha. Se mantuvo en forma sistemática la tabla de datos asociados a los contornos de los glaciares inventariados.
- El Inventario mantuvo los códigos de cuencas del Banco Nacional de Aguas (BNA). El código BNA que se asocia a un glaciar se compone de 12 dígitos, los que se identifican de la siguiente manera:

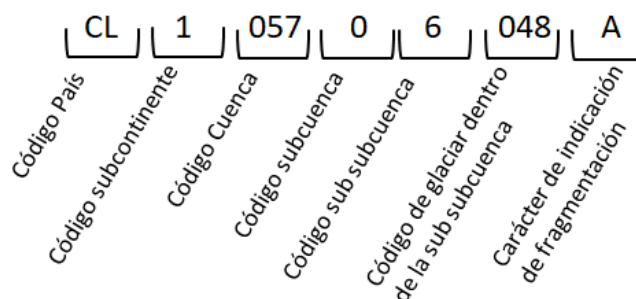


Figura 1. Ejemplo de código de glaciar. En cuanto al carácter de indicación de fragmentación (dígito 12), este tiene una letra mayúscula si corresponde a un glaciar fragmentado. En caso contrario, vale decir, un glaciar no fragmentado en el IPG2022, se identifica con el carácter "@". El código ejemplificado corresponde al glaciar Olivares Beta, un glaciar ubicado en Chile (CL), en el subcontinente sudamericano (1), en la cuenca del Maipo (057), subcuenca 0570, sub subcuenca 05706 y corresponde al glaciar número 048 dentro de la sub subcuenca, el cual se encuentra fragmentado, siendo este cuerpo el fragmento de mayor tamaño (A).

- Los glaciares se mantuvieron como tal hasta una superficie igual o superior a 0,1 ha. Vale decir, en esta nueva versión del Inventario de glaciares, los glaciares que disminuyeron su área y que actualmente presentan una superficie menor a 0,1 ha, no fueron incluidos en el Inventario (IPG2022).
- En el caso de glaciares no fragmentados, el dígito número 12 del código corresponde al símbolo tipográfico arroba (@).
- Para el caso de los glaciares fragmentados², se estableció adicionar una letra mayúscula extra en el código del glaciar. A su cuerpo principal (mayor superficie) se le asignó al final del código una letra «A», al segundo cuerpo de

² Los glaciares fragmentados corresponden a glaciares que originalmente estaban compuestos por un único cuerpo de hielo en el IPG2014 y que con el pasar del tiempo y su derretimiento se ha adelgazado al punto de dividirse en diferentes cuerpos pequeños. Todos los fragmentos del glaciar fragmentado adoptan el código madre seguido por una letra.

mayor superficie se le asignó una letra «B» y así sucesivamente. Los fragmentos de un glaciar preexistente se mantienen dentro del inventario hasta un tamaño de 0,1 ha.

- Para el hallazgo de glaciares nuevos, se inventariaron solo glaciares mayores o iguales a 1 ha, asignándoles el código correspondiente a las cuencas BNA y su identificador dentro de la subsubcuenca correlativo seguido al último glaciar de la misma subsubcuenca, no importando su ubicación. Originalmente, en el IPG2014, los números correlativos de los glaciares en una subsubcuenca fueron asignados en forma horaria a partir del exutorio de la cuenca.
- Para los glaciares con presencia de detritos en su superficie, y para glaciares cubiertos, en la cabecera se asume que existe hielo cubierto hasta el borde inferior de eventuales afloramientos rocosos, o hasta la divisoria topográfica si no existen afloramientos rocosos. A menos que exista evidencia en las imágenes de un cambio de litología u otro cambio geomorfológico que sugiera un posible límite del glaciar. En este sentido se ha adoptado un principio precautorio, vale decir, se consideran parte de un glaciar las zonas donde se presume la existencia de hielo.
- En el caso de glaciares con cuenca de alimentación compartida en Campo de Hielo Sur, la divisoria topográfica de hielo se estimó a partir de una comparación de los modelos digitales de elevación (DEM según su sigla en inglés) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), los datos de velocidades de flujo de Mouginot y Rignot (2015), y el inventario de glaciares de Meier *et al.* (2018). Fuera de Campo de Hielo Sur, se utilizó el DEM Aster GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection - Global Digital Elevation Model) versión 2 del año 2011, y cartografía Regular IGM (Instituto Geográfico Militar) a escala 1:50.000 para determinar las divisorias topográficas, según fue también realizado en el IPG2014.

4.5. Clasificación de glaciares

- Se mantuvo las categorías para la clasificación primaria correspondiente al dígito 1 del WGI, basado en los parámetros morfológicos propuestos por GLIMS v1.0 del año 2005 (https://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf). En el IPG2022 solo se presentan tipos de glaciares de la clasificación primaria tipo 4, 5, 6, 7 y 9 (ver Tabla 1).
- Se adoptó la clasificación de Cogley *et al.*, 2011 para la categoría de “glaciarete”, quien lo define como: “un glaciar muy pequeño, menor a 0,25 km² (25 ha) de extensión, sin un patrón marcado de flujo visible en superficie”.
- Se incorpora la clasificación morfológica de los glaciares en cuanto a “Forma” y “Características Frontales”, correspondientes a los dígitos 2 y 3 del WGMS (2020) (http://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.pdf) y del WGI (2018) (<https://nsidc.org/data/g01130>). Para ello se consideran las variables descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación primaria y secundaria (forma y frente).

Número	Clasificación Primaria	Forma	Características Frontales
	Dígito 1	Dígito 2	Dígito 3
0	Misceláneo	Misceláneo	Misceláneo
1	Hielo continental	Cuencas compuestas	Piedemonte
2	Campo de hielo	Cuenca compuesta	Lóbulo expandido
3	Casquete de hielo	Cuenca simple	Lobulado
4	Glaciar efluente	Circo	Desprendente
5	Glaciar de valle	Nicho	Coalescente, no contribuidor
6	Glaciar de montaña	Cráter	Irregular, principalmente hielo limpio (glaciares de montaña o valle)
7	Glaciarete y manchón de nieve	Faldón de hielo	Irregular, hielo cubierto (glaciares de montaña o valle)
8	Plataforma de hielo	Grupo	Lóbulo simple, principalmente hielo simple (glaciares de montaña o valle)
9	Glaciar rocoso	Remanente	Lóbulo simple, principalmente hielo cubierto (glaciares de montaña o valle)

Fuente: Adaptado de WGMS y WGI.

- Un caso especial son los glaciares compuestos por múltiples unidades, incluyendo el concepto de glaciares “complejos” (RGIK, 2021). Un ejemplo de lo anterior es una secuencia, desde zonas topográficamente elevadas a zonas bajas, de un glaciar descubierto, uno o varios glaciares cubiertos, y uno o más glaciares rocosos (ej. Monnier and Kinnard, 2015). En el caso de existir evidencia publicada que dichos glaciares sean cuerpos separados, se respetó la opinión de los autores. En el caso de no existir tal evidencia, se optó por considerar el sistema glaciar como un solo cuerpo, vale decir asumiendo implícitamente que se trata de un glaciar “complejo”, aunque tal clasificación no queda preservada en la información del inventario.
- De manera similar, si un glaciar cubierto o descubierto cuenta con un tributario lateral, ya sea del tipo cubierto, descubierto o rocoso, y si dicho tributario tiene contacto directo con el glaciar principal, se considera que forman un solo cuerpo, a menos que exista evidencia publicada de lo contrario.
- La clasificación primaria de un glaciar compuesto por varios tributarios se rige de acuerdo a la clasificación individual de cada uno de sus componentes por separado. Para que tal glaciar sea clasificado como rocoso se debe cumplir que todos sus tributarios sean clasificados individualmente como rocosos. En cualquier otro caso (a lo menos un tributario distinto a glaciar rocoso) el glaciar es clasificado de acuerdo al cuerpo principal que predomina en la clasificación primaria.

4.6. Caracterización fisiográfica

El Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizado fue: SRTM (Shuttle RADAR Topography Mission), con una resolución espacial igual a 1 arco segundo (~30 m).

La misión SRTM tuvo lugar durante el mes de febrero del año 2000 (Rodríguez *et al.*, 2005). En base al DEM se generó un mosaico de escala nacional y/o zonal, del cual se obtuvo los siguientes parámetros fisiográficos:

- Pendiente (en grados)
- Altitud media (m s.n.m.)
- Altitud mínima (m s.n.m.)
- Altitud máxima (m s.n.m.)
- Orientación (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO).

Para llevar a cabo el proceso antes indicado se utilizó el siguiente flujo de trabajo (Fig. 2).

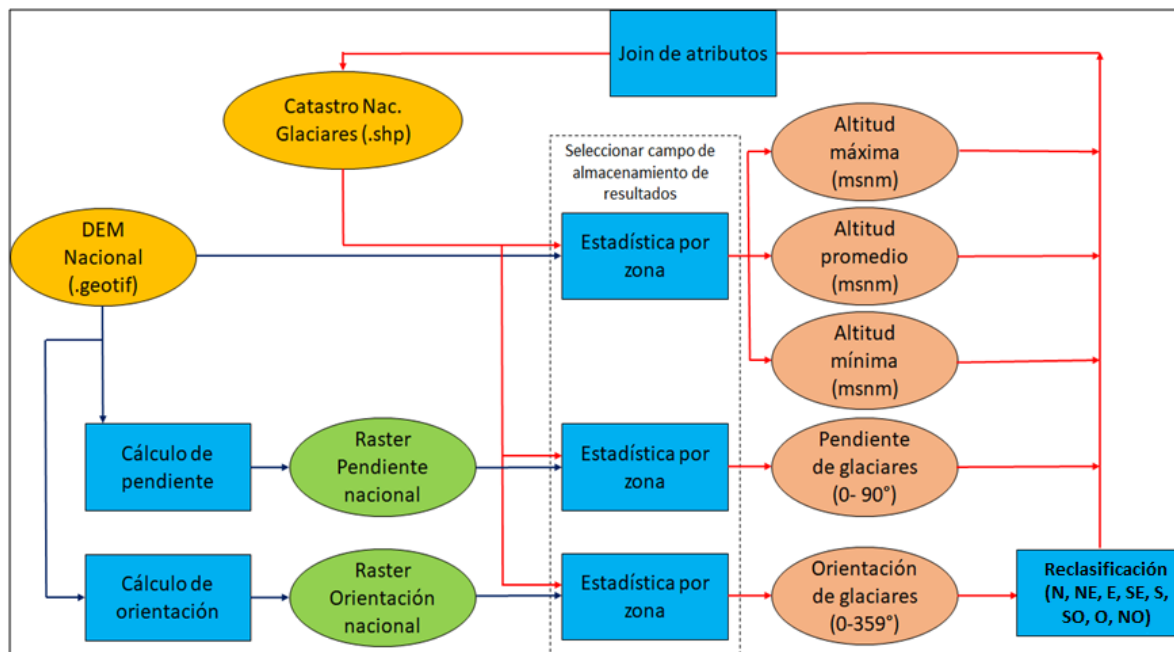


Figura 2. Flujo de trabajo para la obtención de parámetros fisiográficos de cada glaciar. Los elipsoides naranjos representan insumos de procesos; elipsoides verdes son resultados en formato ráster; cajas azules representan herramientas de trabajo SIG; elipsoides en damasco son resultados en formato .dbf. Fuente: DGA-INMAP (2019).

El diagrama presentado en la Fig. 2 es ejecutable mediante el entorno de constructor de modelo QGIS o entorno de consola Phytón. Este permitió generar de forma automática las estadísticas asociadas a cada glaciar inventariado. Cuando existió un campo vacío o no se calcularon las estadísticas en la primera corrida del modelo, este iteró de forma automática las veces necesarias hasta completar el 100% de los polígonos.

4.7. Espesor, volumen y equivalente en agua

Para la estimación del espesor de los glaciares descubiertos y cubiertos, se utiliza la fórmula de Chen & Ohmura (1990), que determina la estimación del espesor con

una relación basada en la superficie del glaciar. Este método es una relación estadística validada originalmente en la observación de 67 glaciares de los Alpes, medidos con técnicas de radar de penetración terrestre o sondeos sísmicos. Para ello se estima una densidad promedio del glaciar de 0,85 g/cm³, que corresponde a hielo poco denso, lo que es un promedio adecuado para glaciares de montaña, de valle y glaciaretos (Huss, 2013), considerando la zona de acumulación (donde hay una capa de nieve y neviza sobre hielo) y la zona de ablación (donde hay solamente hielo en la temporada de verano). Para estos glaciares de montaña, de valle y glaciaretos, se considera que están constituidos enteramente por hielo, vale decir el volumen equivalente de hielo es un 100% de su volumen. De esta manera, la secuencia del cálculo se puede expresar de la siguiente forma para la estimación del volumen y equivalente en agua de los glaciares montaña, de valle y glaciaretos:

$$\begin{aligned}\text{Espesor medio (m)} &= 28,5 \quad (\text{Superficie en km}^2) \quad 0,357 \\ \text{Volumen (km}^3\text{)} &= \text{Espesor medio (km)} \quad \text{Superficie (km}^2\text{)} \\ \text{Equivalente en agua (km}^3\text{)} &= \text{Volumen (km}^3\text{)} * 0,85.\end{aligned}$$

4.8. Otras consideraciones

- Se aplicó el cuadrilátero de exclusión del Acuerdo Chile-Argentina de 1998. Los glaciares en el recuadro han sido excluidos del presente inventario por encontrarse pendientes los trabajos de demarcación de la Comisión Mixta de Límites Chile-Argentina (conforme lo dispone el "Acuerdo entre la República de Chile y la República Argentina para Precisar el Recorrido del Límite desde el Monte Fitz Roy hasta el Cerro Daudet", de diciembre de 1998). El hielo glaciar dentro del cuadrilátero indicado no fue considerado en las cifras finales de inventario ni tampoco forma parte de los glaciares aledaños al cuadrilátero.
- El Inventario Público de Glaciares 2022 fue desarrollado en su conjunto completo en coordenadas UTM WGS84 huso 19 Sur.
- Los glaciares del IPG fueron identificados y clasificados de acuerdo a las cuencas del BNA, adoptando los códigos de estas cuencas y ubicación dentro de Chile. Debido a limitaciones en las divisorias de cuencas BNA, en muchos casos se prefirió utilizar la divisoria de cuencas DARH (Cuencas DARH, 2014) para ubicar el glaciar en la cuenca correcta.
- Se utilizó la versión 3.1 del límite internacional de DIFROL, a escala 1:50.000 en base a cartografía IGM, obtenido de <https://difrol.gob.cl/mapas/>. Esta misma traza limítrofe se utilizó para mapear glaciares transfronterizos con Argentina y Bolivia.

5. METODOLOGÍA DETALLADA - GLACIARES ROCOSOS

5.1. Terminología

Oficialmente en Chile se utiliza el término “glaciar rocoso” (Estrategia Nacional de Glaciares, 2009), nombre también utilizado en España (Ondicol *et al.*, 2011), aunque algunos prefieren el término “glaciar de rocas” (Lliboutry, 1956) o “glaciar de roca” (Geoestudios, 2008). En Argentina se le denomina glaciar de escombros (Corte, 1978). En inglés se le denomina “rock glacier”. En el Inventario Público de Glaciares nos referiremos a ellos como “glaciares rocosos”.

5.2. Definición de glaciar rocoso adoptada por la DGA

“Masa de fragmentos o bloques de roca y material fino que yace en una pendiente y contiene hielo intersticial o hielo macizo, presenta evidencias de flujo pasado o presente, y que en su superficie presenta una cobertura completa o casi completa de detritos.”

Esta definición está basada en la definición de la International Permafrost Association (IPA) (van Everdingen, 2005):

“Una masa de fragmentos de roca y material más fino, en una pendiente, que contiene ya sea hielo intersticial o un núcleo de hielo y que muestra evidencia de flujo pasado o presente.”

Y también está basada en la definición de UNESCO (Cogley *et al.*, 2011):

“Una masa de fragmentos de rocas y material más fino incluida en una matriz de hielo, que muestra evidencia de flujo pasado o presente.”

Nota: traducciones UGN-DGA-MOP.

Un glaciar rocoso se compone por lo tanto de detritos de rocas y hielo en diferente proporción. Puede ser de origen “glacial” o “glacigénico” (ej. Giardino *et al.*, 2011; Potter *et al.*, 1998; Krainer *et al.*, 2012), con un núcleo de hielo (hielo macizo); o de origen “criogénico” o “periglacial” (ej. Milana & Güell, 2008; Giardino *et al.*, 2011), con estructura interna hielo-cementada (hielo intersticial).

En el caso de los glaciares rocosos “glacigénicos”, se originan a partir de una transición desde un glaciar cubierto (Potter, 1972; Johnson, 1980; Humlum, 1996; Monnier and Kinnard, 2015a; Monnier and Kinnard, 2017; Jones *et al.*, 2019), lo cual presenta desafíos para diferenciar la condición de “glaciar rocoso” vs. “glaciar cubierto”, particularmente en un inventario de glaciares.

5.3. Clasificación

La DGA utiliza la clasificación primaria del WGI propuesta por UNESCO, adoptada por el World Glacier Monitoring Service (WGMS) (http://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.pdf) y una serie de otras instituciones de diversos países, utilizada para clasificar glaciares descubiertos y cubiertos. Basado en esta clasificación primaria, el dígito 1 del WGI para un glaciar rocoso corresponde al número 9, incluyendo en esta categoría, según el criterio de

la DGA, a las rampas protalus que contienen hielo.

La clasificación de la “Forma” para glaciares rocosos no está contemplada en la clasificación WGI y WGMS. Por lo tanto, se ha adoptado la clasificación propuesta por científicos de IANIGLA para el Inventario Nacional de Glaciares de Argentina (IANIGLA, 2014)³ (Tabla 2). No se utiliza para glaciares rocosos el dígito 3 “Características Frontales” del WGI y del WGMS.

Tabla 2. Clasificación primaria y secundaria (forma y frente) de glaciares rocosos.

Número	Clasificación Primaria	Forma
	Dígito 1	Dígito 2
0	Misceláneo	Incierto
1	Hielo continental	Lengua: largo mayor que el ancho
2	Campo de hielo	Lobado: ancho mayor que largo
3	Casquete de hielo	Espatulado
4	Glaciar efluente	Coalescente
5	Glaciar de valle	Otras
6	Glaciar de montaña	
7	Glaciarete y manchón de nieve	
8	Plataforma de hielo	
9	Glaciar rocoso	Remanente

Fuente: Adaptado de WGI 2018, WGMS 2020 e IANIGLA 2014.

La DGA no diferencia entre glaciares rocosos “activos” (que tienen un movimiento significativo) e “inactivos” (con movimiento inexistente o poco significativo), llamados “glaciares rocosos intactos” (Grupo de Acción “Rock glacier inventories and kinematics” de la IPA (RGIK, 2021)⁴. Tanto los glaciares rocosos activos como inactivos contienen hielo.

Aunque a veces es difícil distinguirlos a partir de imágenes satelitales, como norma la DGA no incluye en el inventario a los glaciares rocosos “relictos”, que no tienen flujo aparente, y más relevante aún, han perdido la totalidad o casi totalidad de su hielo interior (Colucci *et al.*, 2019; RGIK, 2021).

Para la DGA, un glaciar rocoso se caracteriza por:

- Prácticamente no presenta hielo visible en superficie.
- Puede presentar lagunas termocársticas (supraglaciares).
- Puede presentar crestas y surcos.
- Puede presentar lóbulos de flujo.
- Presenta talud frontal pronunciado.

³ http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/manual_ING_2014.pdf

⁴ https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Glaciology/Pub/Website/IPA/Guidelines/V4/210801_Baseline_Concepts_Inventories_Rock_Glaciers_V4.2.1.pdf

- Presenta taludes laterales pronunciados, al menos parcialmente.
- Topografía por lo general convexa.

Un glaciar cubierto, por el contrario, es un glaciar que presenta más de un 10% y hasta un 100% de cobertura de detritos en su zona de ablación (Rau *et al.*, 2005).

Los glaciares que contienen cobertura de detritos “casi total”, vale decir detritos incluso en la zona alta o de “acumulación”, pero que no cumplen con las características expuestas anteriormente para glaciares rocosos, se catalogan para la DGA como glaciares cubiertos, presumiblemente en fase de transición, vale decir un estado intermedio entre glaciar cubierto y glaciar rocoso. No obstante lo anterior, en su clasificación primaria adoptan las categorías de “glaciarete”, “glaciar de montaña”, “glaciar de valle” o “glaciar efluente” según su forma y tamaño, sin especificar si su superficie total o parte de esta está cubierta o no con detritos.

Un caso especial son los glaciares rocosos compuestos por múltiples unidades, incluyendo el concepto de glaciares “complejos” (RGIK, 2021). Un ejemplo de lo anterior es una secuencia, desde zonas topográficamente elevadas a zonas bajas, de un glaciar descubierto, uno o varios glaciares cubiertos, y uno o más glaciares rocosos (ej. Monnier and Kinnard, 2015b). En el caso de existir evidencia publicada que dichos glaciares son cuerpos separados, se respetó la conclusión de los autores. En el caso de no existir tal evidencia se optó por considerar el sistema glaciar como un solo cuerpo, vale decir asumiendo implícitamente que se trata de un glaciar “complejo”, al igual que lo indicado en el caso de glaciares descubiertos y cubiertos, aunque tal clasificación no queda preservada en la información del inventario.

De manera similar, si un glaciar rocoso cuenta con un tributario lateral, y si dicho tributario tiene contacto directo con el glaciar principal, se considera que forman un solo cuerpo, a menos que exista evidencia publicada de lo contrario.

La clasificación primaria de un glaciar “complejo” se rige de acuerdo a la clasificación individual de cada uno de sus componentes por separado. Para que un glaciar “complejo” sea clasificado como glaciar rocoso se debe cumplir con que todos sus componentes sean clasificados de esta manera en forma individual (rocoso). En cualquier otro caso (a lo menos un tributario distinto a glaciar rocoso) el glaciar es clasificado de acuerdo al cuerpo principal que predomina en la clasificación primaria.

5.4. Mapeo del contorno de glaciares rocosos

Para la correcta visualización de los glaciares rocosos, se utilizó de preferencia imágenes de alta resolución obtenidas de la base de datos del software ArcGIS y Google Earth, en promedio del año 2017, SPOT 6 del año 2015 de una resolución de 1,5 m, imágenes PlanetScope, en promedio del año 2020 de resolución 3 m, y en su defecto imágenes Sentinel-2 del año 2019 de una resolución de 10 m.

En cuanto a la delimitación del contorno de glaciares rocosos, se consideró el análisis e informe propuesto por la IPA (RGIK, 2021), del cual se adoptó, como principio

precautorio, la "impronta geomorfológica extendida" (extended geomorphological footprint), en que el contorno del glaciar se asume que incluye todas las zonas "externas", vale decir, la cabecera, y los taludes laterales y frontales hasta su base. En el caso del talud frontal, que usualmente tiene una pendiente mayor al ángulo de reposo, si existe información topográfica suficiente, se mapea el borde hasta el punto donde la pendiente cambia de una forma convexa a una cóncava o pendiente uniforme.

Para el mapeo de la cabecera o zona alta, se buscó en las imágenes evidencia de presencia de hielo interno, considerando un cambio de pendiente, textura y color del sedimento proveniente de la parte alta de la ladera. En muchos casos, y especialmente en caso de duda, se asume que el límite superior del glaciar alcanza los afloramientos rocosos ubicados en la cabecera, o en ausencia de afloramientos podría incluso alcanzar la divisoria topográfica.

5.5. Espesor, volumen y equivalente en agua

Para la estimación del espesor de los glaciares rocosos, al igual que en el caso de los glaciares descubiertos y cubiertos, se utiliza la fórmula de Chen & Ohmura (1990), que determina la estimación del espesor con una relación basada en la superficie del glaciar. Este método es una relación estadística validada originalmente en la observación de 67 glaciares de los Alpes, medidos con técnicas de radar de penetración terrestre o sondeos sísmicos. Para ello se estima que el volumen de hielo es un 60% del volumen total del glaciar, lo cual es un promedio de las escasas mediciones existentes en el Norte Chico (Monnier and Kinnard, 2013) y en Chile central (EIA Andina 244, 2013; EIA Andina COA, 2018; Adenda Complementaria LBI, 2022; Mathys *et al.*, 2021; Hilbich *et al.*, 2021), y la estimación de un contenido del 50% de hielo utilizado por Brenning (2005) y Azócar y Brenning (2010), basado a su vez en Barsch (1996). El cálculo para la estimación del espesor, volumen y equivalente en agua es el siguiente:

$$\begin{aligned}\text{Espesor medio (m)} &= 28,5 \quad (\text{Superficie en km}^2) \quad 0,357 \\ \text{Volumen (km}^3) &= \text{Espesor medio (km)} \quad \text{Superficie (km}^2) \\ \text{Equivalente en agua (km}^3) &= \text{Volumen (km}^3) * 0,6.\end{aligned}$$

6. REFERENCIAS

- Adenda Complementaria LBI. 2022. EIA Proyecto Los Bronces Integrado. Ítem VII Predicción y Evaluación del Impacto Ambiental del Proyecto o Actividad. Anglo American. Jaime Illanes & Asociados.
- Azócar, G. F. and 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, <https://doi.org/10.1002/ppp.669>.
- Barsch, D. 1996. *Rock glaciers*, Springer, Berlin-Heidelberg.
- Brenning, A. 2005. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modelling and field mapping. Dissertation, <https://doi.org/10.1002/ppp.528>.
- EIA Andina COA. 2018. Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional Actual. Línea de Base Glaciares. Anexo 1. Descripción cobertura detrítica y testigo de hielo de glaciar de roca. Geotest.
- Chen, J. & Ohmura, A. 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. In *Hydrology in Mountainous Regions, I – Hydrological Measurements; the Water Cycle*, Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990, Lang H, Musy A (eds). 10 p.
- Cogley, J.G., R. Hock, L.A. Rasmussen, A.A. Arendt, A. Bauder, R.J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson and M. Zemp. 2011. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris.
- Colucci, R. R., Forte, E., Žebre, M., Maset, E., Zanettini, C., & Guglielmin, M. 2019. Is that a relict rock glacier? *Geomorphology*. doi:10.1016/j.geomorph.2019.02.002.
- Corte, A.E. 1978. La distribución de los glaciares, glaciares cubiertos y/o de escombros en la región de los Andes Centrales y su relación con la distribución de las precipitaciones. *Inst. Argent. Nivol. Glaciol. An.*, 1977: 21--47.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), 2008. Identificación de Glaciares de Roca. Volumen N. 4, Informe Final, S.I.T. N. 167, 71 p. Realizado por: Geoestudios Ltda.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), 2019. Apoyo para la actualización 2019 del Inventario Público de Glaciares de Chile. Realizado por: INMAP.
- EIA Andina 244. 2013. Estudio de Impacto Ambiental "Expansión Andina 244". Corporación Nacional del Cobre.
- Giardino, J.R., N.R. Regmi and J.D. Vitek. 2011. En *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, Eds. V.P. Singh, P.H. Singh and U.K. Haritashya, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 943-948.
- GLIMS. 2005. Illustrated GLIMS Classification Manual, Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. 36 p. https://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf
- Hilbich, C., Hauck, C., Mollaret, C., Wainstein, P. and Arenson, L.U. 2021. Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes, part I: geophysics-based estimates from three different regions.

- The Cryosphere Discussions, <https://doi.org/10.5194/tc-2021-206>.
- Humlum, O. 1996. Origin of rock glaciers: observations from Mellemfjord, Disko Island, central West Greenland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7, 361–380.
- IANIGLA, 2014. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. 153 p.
- Huss, M. 2013. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere* 7, 877–887.
- Jones, D.B., Harrison, S. and K. Anderson. 2019. Mountain glacier-to-rock glacier transition. *Global and Planetary Change*, 181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102999>.
- Johnson, P.G. 1980. Glacier–rock glacier transition in the Southwest Yukon territory, Canada. *Arct. Alp. Res.* 12, 195–204.
- Lliboutry, L. 1956. Nieves y Glaciares de Chile. *Fundamentos de Glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, 471 p.
- Krainer, K., Mussner, L., Behm, M., Hausmann, H. 2012. Multi-disciplinary investigation of an active rock glacier in the Sella Group (Dolomites; Northern Italy). *Australian Journal of Earth Sciences* 105(2).
- Mathys, T., Hilbich, C., Arenson, L. U., Wainstein, P. A. and Hauck, C. 2021. Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes - Part II: an upscaling strategy of geophysical measurements to the catchment scale at two study sites. *The Cryosphere Discussions*, <https://doi.org/10.5194/tc-2021-251>.
- Meier W.J.-H., P. Hochreuther and M.H. Braun. 2018. An updated multi-temporal glacier inventory for the Patagonian Andes with changes between the Little Ice Age and 2016. *Front. Earth Sci.*, 6(62), doi: 10.3389/feart.2018.00062).
- Milana, J.P. & Güell, A. 2008. Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de roca glaciogénicos y criogénicos, obtenidas de datos sísmicos, Glaciar de El Tapado, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(3), 310-325.
- Monnier, S. and Kinnard, C. 2015a. Reconsidering the glacier to rock glacier transformation problem: new insights from the Central Andes of Chile. *Geomorphology* 238, 47–55.
- Monnier, S. and Kinnard, C. 2015b. Internal structure and composition of a rock glacier in the Dry Andes, inferred from ground-penetrating radar data and its artefacts. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26 (4), 335–346.
- Monnier, S. and Kinnard, C. 2017. Pluri-decadal (1955–2014) evolution of glacier–rock glacier transitional landforms in the Central Andes of Chile (30–33 °S). *Earth Surface Dynamics*, 5(3), 493–509.
- Mouginot, J. and E. Rignot. 2015. Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984–2014. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1441–1449, doi:10.1002/2014GL062661.
- Ondicol, R.P., Cañadas, E.S., & Trueba, J.J.G. 2011. Glaciares rocosos del sector central de la Montaña Cantábrica: indicadores paleoambientales. *Cuadernos de Investigación Geográfica/Geographical Research Letters*, 37, 119-144.
- Potter, N. 1972. Ice-cored rock glacier, Galena Creek, Northern Absaroka

- Mountains, Wyoming. Geol. Soc. Am. Bull. 83, 3025–3058.
- Potter, Jr. N., E.J. Steig, D.H. Clark, M.A. Speece, G.M. Clark and A.B. Arika. 1998. *Galena Creek rock glacier revisited—new observations on an old controversy*. Geografiska Annaler, 80 A (3–4), 251–265.
- Rau, F., F. Mauz, S. Vogt, S.J. Singh Khalsa, B. Raup. 2005. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. GLIMS Regional Center “Antarctic Peninsula”. Institut für Physische Geographie, Alberts-Ludwigs-Universität Freiburg, Alemania, 36 p.
- RGIK. 2021. Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers: baseline concepts (version 4.2.1). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics (Ed.), 13 p.
https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Geomorphology/Pub/Website/IPA/Guidelines/V4/210801_Baseline_Concepts_Inventorying_Rock_Glaciars_V4.2.1.pdf
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley. 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.
- Van Everdingen International Permafrost Association 2005] van Everdingen, Robert, ed.. 2005 (1998 revised May 2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. This glossary is sponsored by the International Permafrost Association. It is a revised version of Harris *et al.* (1988) and is available in multiple languages at NSIDC.
- Vega, M., J. Mateos, R. Molina and A.K. Katsaggelos. 2008. Super-resolution of multispectral images. The Computer Journal, 52(1), 153-167, doi:10.1093/comjnl/bxn031.
- WGI. 2018. National Snow and Ice Data Center. World Glacier Inventory, Version 1. 34 p. <https://nsidc.org/data/g01130>
- WGMS, 2020. World Glacier Monitoring Service, General information. 19 p. http://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.pdf