



Universidad de Concepción

GLACIARES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: MUCHO MÁS QUE HIELO

Alexis Segovia / Mariajosé Herrera / Alfonso Fernández / Mario Lillo
Marcelo Somos / Diego Rivera / Roberto Ponce



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Glaciares y servicios ecosistémicos: mucho más que hielo.

Alexis Segovia, Mariajosé Herrera, Alfonso Fernández, Mario Lillo

Marcelo Somos, Diego Rivera y Roberto Ponce.

Octubre 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

GLACIARES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: MUCHO MÁS QUE HIELO

Alexis Segovia / Mariajosé Herrera / Alfonso Fernández / Mario Lillo
Marcelo Somos / Diego Rivera / Roberto Ponce

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Alexis Segovia Rocha

Geógrafo, Universidad de Chile.
Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.
Docente en facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza y Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.



Marijosé Herrera Ossandón

Geógrafa, Universidad de Chile.
PhD Ciencias mención Geología, Universidad de Chile.
Profesora Asistente,
Departamento de Geografía
Universidad de Concepción.



Alfonso Fernández

Geógrafo
MSc. en Ciencias, UACH.
Doctor of Philosophy Geography (Physical),
The Ohio State University, Columbus, OHIO, USA.
Profesor Titular Departamento de Geografía
Universidad de Concepción.
Director Anillo 210080.
Director programa Ciencia Interdisciplinaria para los Andes del Sur (CIMASur), Fellow de la Humboldt Foundation (Investigadores expertos).



Mario Lillo

Doctor en Informática.
Universidad Politécnica de Madrid.
Profesor Titular de la
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.



Marcelo Somos

Ph.D. In Water Resources Engineering,
University of Texas at Austin, USA.
Profesor Asociado Facultad de Ciencias
Agropecuarias y Medio Ambiente, UFRO.
Director Laboratorio de Montaña
y Recursos Hídricos, UFRO.



Diego Rivera

Ingeniero Civil.
Doctor en Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Profesor Titular Facultad de Ingeniería,
Universidad del Desarrollo.
Investigador Centro de Investigación en
Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos,
Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo.
Investigador Principal CRHIAM.



Roberto Ponce

Ingeniero Comercial.
PhD in Science and Management of Climate Change,
Ca'Foscari University, Venice, Italy.
Profesor Asociado, Facultad de Economía y Negocios,
Universidad del Desarrollo.
Investigador Asociado CRHIAM.

RESUMEN

El estudio de la criósfera, entendida como el agua sólida en superficie, aborda ámbitos como balances de masa, balances de energía, cambios históricos y otros menos conocidos como los servicios ecosistémicos que este tipo de elementos entregan. Los servicios ecosistémicos se entienden como "Aquellos beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas" (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). De esta manera, el concepto intenta vincular a los tomadores de decisiones y a la población en general acerca de la relación entre el bienestar humano y el mantenimiento de las funciones básicas del planeta (Mooney y Ehrlich, 1987; Balvanera y Cotler, 2007). En el caso de los glaciares como fuente de agua dulce, indicadores de condiciones climáticas pasadas, servicios culturales, escénicos, turísticos, biológicos y su relación con el concepto de criohidrología que se centra en el estudio de los cambios de fase del agua y los cambios de energía y masa asociados a estas transiciones. Se hace un breve recorrido por la distribución de zonas de montaña en los países integrantes de la Macrozona Andina (Ecuador, Colombia, Perú, Bolivia, Chile y Argentina) y la presencia de glaciares en estas áreas. Así mismo, se presenta una revisión del estado actual de los glaciares en Chile, así como una clasificación primaria basada en la morfología de los cuerpos de hielo.

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra posee un 30% de superficie de tierra emergida y un 70% de superficie cubierta por agua; de este 70%, el 97,5% del agua corresponde a agua salada (océanos y mares) y el 2,5% corresponde a agua dulce. La distribución planetaria del total de agua dulce es desigual, ya que el 69% se localiza en zonas polares, así como también alturas geográficas importantes asociadas a las más altas a cumbres montañosas. El agua en las zonas altas con temperatura bajo 0°C es almacenada en estado sólido en forma de nieve y hielo glaciar (FAO, 2014), en las que se desarrollan paisajes y cuerpos de agua sólida (Steffen *et al.*, 2012; Ding *et al.*, 2020).

La criósfera se refiere al conjunto de manifestaciones del agua sólida en la superficie. Está compuesta por los glaciares, las capas de nieve, capas o mantos de hielo, plataformas de hielo, casquetes de hielo, permafrost y suelo estacionalmente congelado, hielo marino, hielo de lagos y ríos,

icebergs y precipitación sólida (IPCC, 2013; Ding *et al.*, 2020; Key *et al.*, 2020). La presencia de la criósfera es global, encontrándose en aproximadamente 100 países y en prácticamente todas las latitudes (Key *et al.*, 2020). Dentro de este grupo de países se encuentran aquellos de la Macrozona Andina (FAO, 2014a), es decir, Ecuador, Colombia, Bolivia, Perú, Chile y Argentina, los cuales comparten como eje estructurante la Cordillera de Los Andes. Las variaciones en la criósfera allí tienen efectos directos sobre el ciclo global del agua y sus ecosistemas asociados, el nivel del mar y los ecosistemas marinos a través del aumento en el aporte de agua fresca y dulce al océano. Se afectan además aquellas actividades relacionadas con la provisión y uso de agua, como por ejemplo la agricultura, generación de energía, salud, suministro de agua, entre otras (Ding *et al.*, 2020; Key *et al.*, 2020).

En América del Sur, la Cordillera de Los Andes constituye el rasgo más característico del relieve, abarcando una superficie de 2.870.596 de km² que presenta una alta variabilidad climática y diversos elementos geomorfológicos, lo que le confiere una alta riqueza ecosistémica (FAO, 2014a). En la Figura 1 se presentan las áreas de los países integrantes de la Macrozona Andina, la superficie de montaña que existe en cada uno y la relación entre ambas y se observa la importancia que tiene este relieve en la agrupación como sello distintivo de la Macrozona Andina.

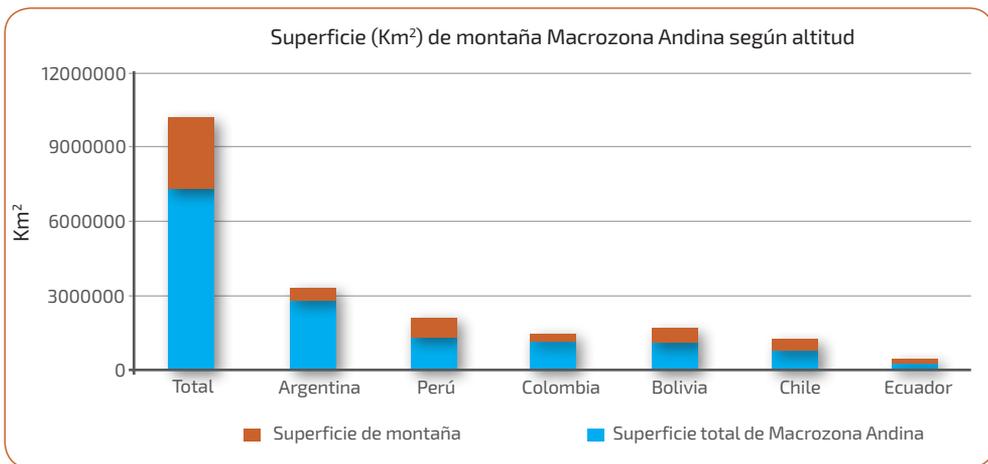


Figura 1.

Gráfico de superficie (Km²) de montaña Macrozona Andina según altitud. Fuente: Modificado de FAO, (2014a).

Las zonas cordilleranas y montañosas se han denominado "Torres de Agua" (en inglés *water tower*), ya que proporcionan agua hacia tierras más bajas, procedente de deshielos, fusión nival y precipitación orográfica líquida (Immerzeel *et al.*, 2010), este término es presentado por primera vez en la Cumbre de la Tierra Río de Janeiro 1992 (Capítulo 13 Agenda 21, CNUMAD,1992) y es difundido y ampliamente adoptado desde el 2002 (Año Internacional de las Montañas) y posteriormente el 2003 (Año Internacional del Agua dulce). De acuerdo con FAO (2014a), la décima parte de la población mundial recibe su sustento hídrico directamente de las montañas. En este sentido, la mayor valoración de las montañas radica en ser el origen de todos los grandes ríos y fuente de la mayoría de los cursos fluviales menores. Lo anterior se relaciona con el rol que cumplen las montañas dentro del ciclo del agua, a partir de la captura de humedad atmosférica desde las masas de aire que ascienden por las laderas, para luego, por cambios en la temperatura, generar condensación y precipitación. La precipitación puede presentarse en estado sólido o líquido, dependiendo de la altitud a la que se desarrolle y de la temperatura de la masa de aire.

El almacenamiento de agua en forma de nieve es esencial para las comunidades y sus actividades económicas (agrícolas, pecuarias e industriales) en períodos de menor pluviosidad, los que generalmente coinciden con altas temperaturas estivales y fusión del manto nival. En efecto, se calcula que un porcentaje mayor al 90% de los caudales fluviales, de regiones áridas y semiáridas, provienen de las montañas (FAO, 2014a). En zonas montañosas con precipitaciones estacionales, los glaciares actúan como un recurso hídrico en la estación seca una vez que la nieve ya se ha derretido.

Los glaciares cumplen un rol esencial en los ecosistemas y su dinámica, especialmente en el abastecimiento hídrico continuo de los cursos de agua. Influyen en los ciclos ecológicos en los que están presentes y entregan un bienestar general a la población, dado que son fuente de variados beneficios de provisión y regulación, así como de actividades culturales. Los beneficios antes mencionados se denominan servicios ecosistémicos, y en el caso de los glaciares toman una importancia cada vez mayor por el acelerado derretimiento y pérdida de masa que han sufrido en las últimas décadas, atribuible al cambio climático inducido por actividades humanas, esencialmente al aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, factores primarios clave en la mantención de los glaciares. Lo anterior, permite realizar una asociación inmediata entre el hielo y el agua; sin embargo, los glaciares representan mucho más que el simple aporte y/o reservorio hídrico que imaginamos, desarrollándose entonces una compleja relación entre ambientes congelados y la sociedad.

Chile, debido a sus características orográficas, presenta en gran parte del territorio, un aporte hídrico vinculado a cuencas cordilleranas con dominio nivoglaciario y glaciario (Ilustración 2), debido a que el 63% del territorio continental corresponde a zonas de montaña (477.670 km², FAO, 2014a). Chile, entonces, es dependiente de las montañas, en términos de provisión hídrica para todo tipo de actividades.

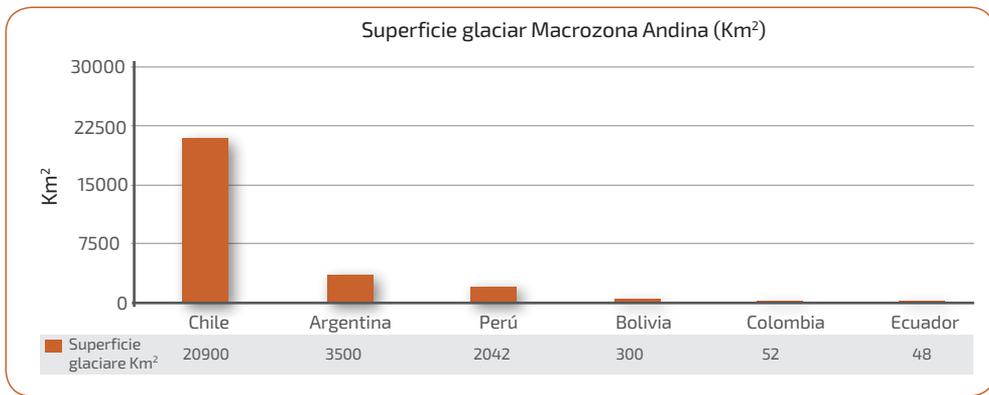


Figura 2.

Gráfico de superficie glaciar Macrozona Andina (km²).
Fuente: Modificado de FAO, (2014a).

LOS GLACIARES

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) establece que un glaciar es una “Masa permanente de hielo, y posiblemente neviza y nieve, que se origina sobre la superficie terrestre debido a la recristalización de la nieve y que muestra evidencia de flujos en el pasado o el presente. La masa de los glaciares generalmente aumenta por la acumulación de nieve y se pierde por el deshielo y la descarga de hielo en el mar o en un lago si el glaciar desemboca en un cuerpo de agua” (IPCC, 2018; Holmes, 1952; Liboutry, 1956; Kotlyakov & Komarova, 2007). Para que un glaciar gane masa, se requiere que la nieve acumulada en la temporada de mayores precipitaciones supere y perdure a la pérdida de nieve que se funde o sublima en la época cálida y seca. El hielo glaciar se puede explicar como moléculas de agua en estado sólido con una densidad que varía entre 800 a 900 kg/m³, lo cual está relacionado con las impurezas atrapadas en el hielo. Si derretimos un cubo de hielo glaciar, entre el 80% a 90% se transformará en agua y el resto son mayoritariamente burbujas de aire encapsuladas.

Pero, ¿cómo se forma un glaciar? Al compactarse, los copos de nieve pasan a formar un material llamado neviza. La neviza es un material poroso que permite la circulación de aire por su estructura. Sin embargo, la continua precipitación de nieve en la superficie genera el apilamiento de nieve en capas, la superposición de estas hace que las capas de nieve se vayan compactando en profundidad. Esto permite que, la neviza se vuelva tan densa que pierde su porosidad, encapsulando los gases en forma de burbujas dentro de su estructura. Al alcanzar este nivel de compactación, la neviza pasa a llamarse hielo (Figura 3). Las burbujas de aire atrapadas en el hielo glaciar y su análisis son piezas fundamentales del estudio de las variaciones del clima en nuestro planeta.

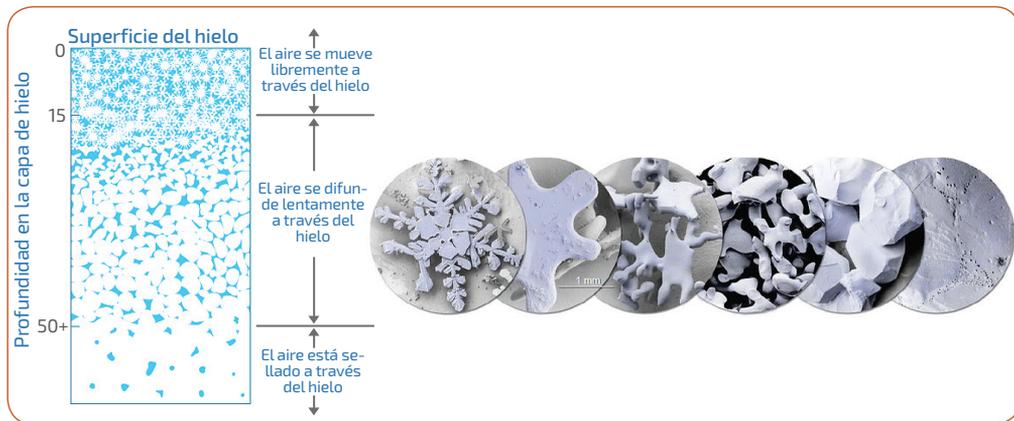


Figura 3.

Diagénesis de agua sólida, paso y transformación desde nieve a hielo.
Fuente: Hamblin & Christiansen, (2004).

Por otro lado, los glaciares rocosos (Figura 4) son las formas terrestres de detritos (fragmentos de roca sin granulometría específica) generadas por procesos de reptación (movimientos de suelo muy lentos) pasados o actuales de suelo congelado o *permafrost*, los que son identificables en el paisaje a través de morfologías características (RGIK, 2021). Esta definición está basada en rasgos geomorfológicos y no considera la génesis u origen de este tipo de crioformas. La presencia de fragmentos rocosos que cubren la superficie del hielo subyacente permite preservar al glaciar a través de la aislación generada por la cubierta detrítica en un ambiente diferente al del entorno dominante, aislándolo de las condiciones atmosféricas. Con ello, el espesor de la cubierta de fragmentos de roca está directamente relacionado con el mantenimiento del hielo (Whalley, 2003).

De acuerdo con la Asociación Internacional de Permafrost (*International Permafrost Association*, IPA), los glaciares rocosos se pueden identificar en terreno empleando los siguientes criterios: márgenes frontales y laterales con escarpes (ladera abrupta o a desplome, de altura variable), topografía superficial de crestas y surcos (ondulaciones convexas de la superficie asociadas al movimiento de compresión que dejan formas de colinas y zonas deprimidas entre ellas), presencia de lóbulos de soliflucción (onda o lóbulo aislado, que se extiende aguas abajo con forma de lengua) y frente (talud o cualquier superficie inclinada del terreno, natural o artificial que delimita la parte terminal de un área en movimiento sobre un terreno sin movimiento).

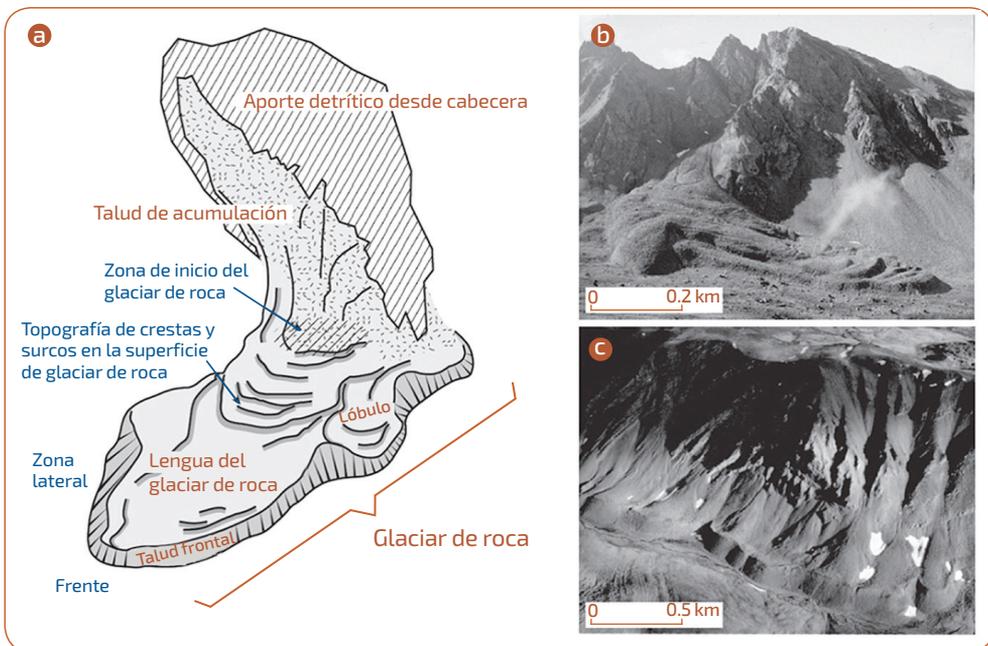


Figura 4.

(a) Diagrama esquemático de un glaciar rocoso con origen criogénico desde talud. (b y c) Glaciares rocosos activos con origen criogénico desde talud. Fuente: Frauenfelder, (2004).

Los glaciares rocosos no han sido tan ampliamente estudiados como los glaciares descubiertos (también llamados glaciares blancos) y cubiertos, y aún no existen consensos y metodologías robustas que permitan cuantificar el contenido de hielo en estos cuerpos y, en consecuencia, se presentan grandes brechas en la estimación de su aporte hídrico a las cuencas que los albergan.

CHILE Y SUS GLACIARES

Del total de glaciares andinos, Chile agrupa alrededor del 80% de esta superficie, y ocupa el séptimo lugar a nivel mundial (Segovia y Videla, 2017; DGA, 2022). El año 2022 la Dirección General de Aguas (DGA) actualizó el Inventario Público de Glaciares, basado en fuentes de imágenes de fecha promedio 2017, para un total de 26.169 glaciares que representan 21.010 km² de superficie glaciada, lo que representa un 2,7% del territorio chileno. Los glaciares identificados en el inventario del año 2014 (realizado con imágenes principalmente del año 2002) se han fragmentado por reducción de superficies en todo el país durante los últimos 15 años (Figura 5). Aunque ambos inventarios no son plenamente comparables, debido a diferencias metodológicas, se estima que la superficie de hielo disminuyó alrededor de un 8% en los últimos 15 años a nivel nacional, lo que se atribuye al calentamiento atmosférico observado a nivel nacional y a la disminución de precipitaciones en gran parte de Chile.

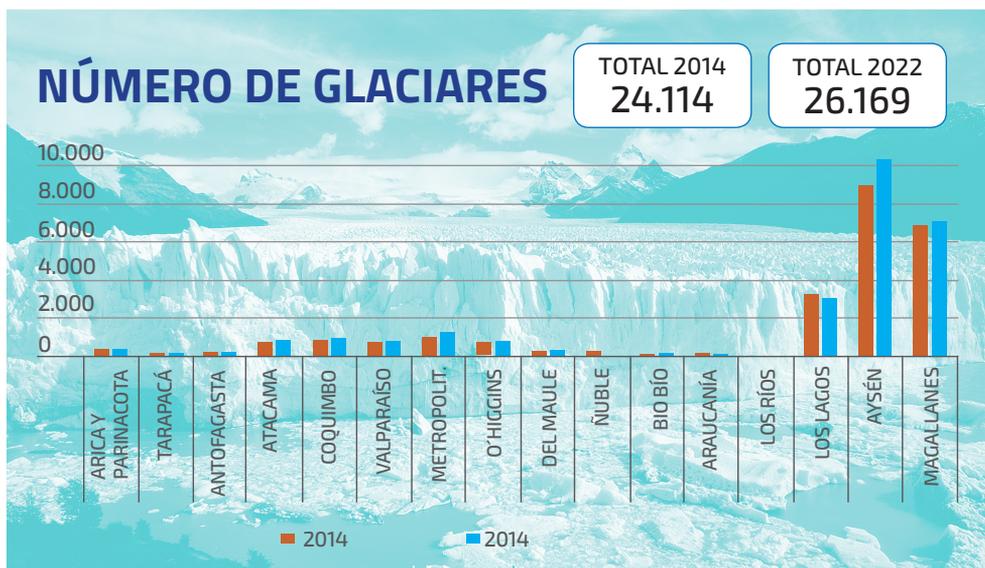


Figura 5.

Comparación inventario glaciar 2014 y 2022. Fuente: Datos DGA, compilación Claudia Saravia, gráfico María C. Arvelo, Diario Financiero, (2022).

Los glaciares están presentes en todo el territorio nacional. Sin embargo, en cuanto al número y superficie, las mayores concentraciones están en las regiones de Chile central (Valparaíso y Metropolitana) y austral (Aysén y Magallanes). Estas diferencias macrozonales se deben a la diversidad geográfica, climática, geomorfológica, altitudinal y latitudinal del territorio chileno (Segovia y Videla, 2017).

La Estrategia Nacional de Glaciares del año 2009 identificó cuatro macrozonas glaciológicas en Chile (Figura 6). Cada una de ellas presenta condiciones glaciológicas, climáticas, e hidrológicas relativamente homogéneas (DGA-CECs, 2009). Los límites de las macrozonas glaciológicas se definen a través de los límites de cuencas hidrográficas.

Tabla 1.

Distribución de área glaciada por macrozonas glaciológicas (km² y %) de acuerdo a la superficie de polígonos glaciares reportada en el Inventario Público de Glaciares (IPG2022).

Macrozona glaciológica	Superficie de hielo (km ²)	Superficie de hielo (%)
Norte límite con Perú (~18°S) hasta la cuenca del río Choapa (~32°S)	233,8	1,11
Centro desde el río Choapa por el norte hasta la cuenca del río Maule (~36°S)	910,66	4,33
Sur cuyo límite meridional corresponde a la cuenca del río Aysén (~45°30')	1.180,29	5,61
Austral que comprende el resto de Chile Continental (~56°S)	18.685,06	88,93

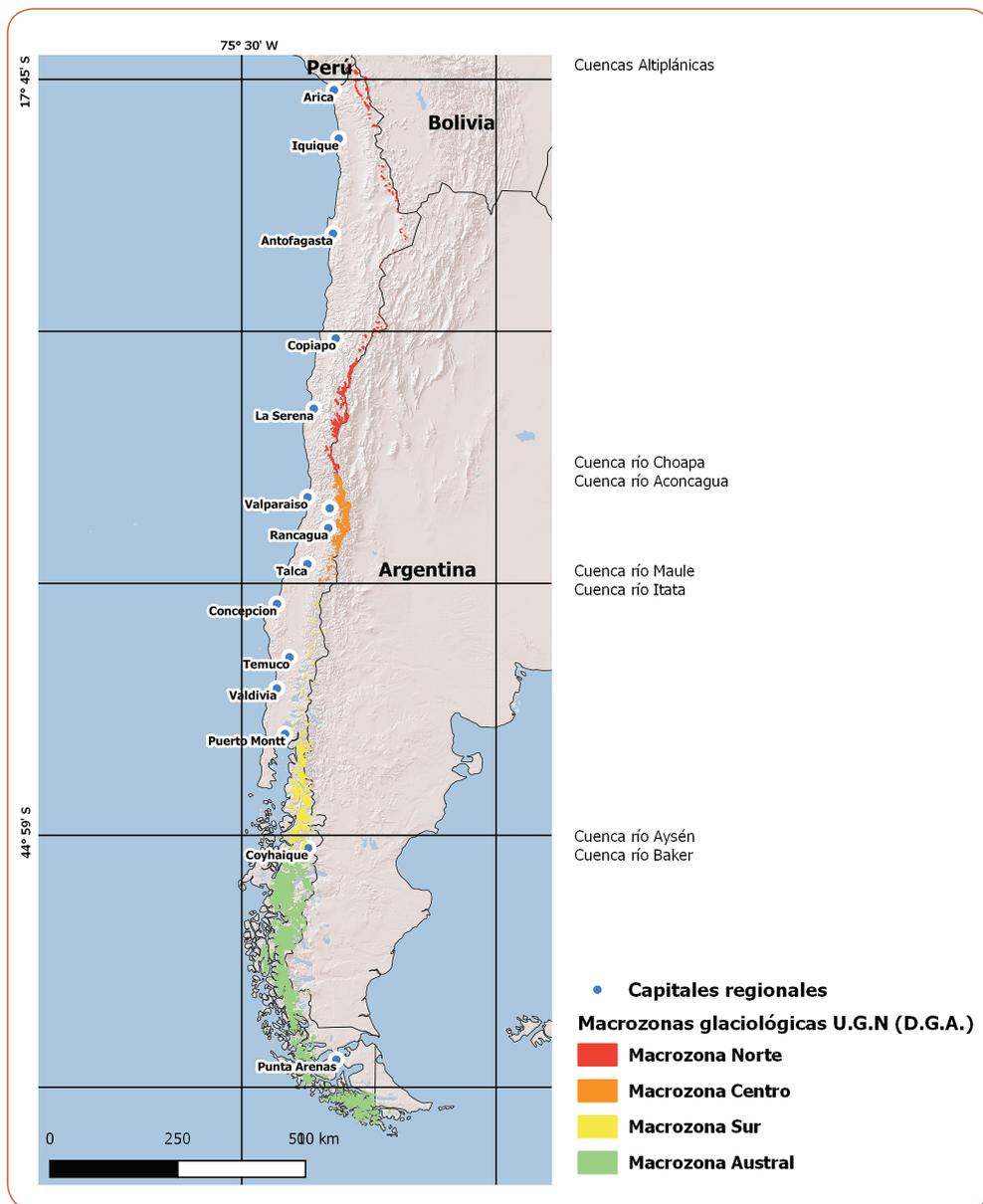


Figura 6.

Distribución de Macrozonas glaciológicas determinadas por la Unidad de Glaciares y Nieves (DGA). Fuente: Elaboración propia.

Un concepto clave para comprender el aporte de los glaciares al suministro de agua, es el de *peak water*, el cual se refiere a la tasa máxima de liberación de agua proveniente desde el almacenamiento en glaciares.

A escala global, Huss & Hock (2018) modelaron cambios en la escorrentía derivada de los glaciares en 56 cuencas de drenaje a gran escala (>5.000 km²), que tuvieran al menos 30 km² de hielo. El estudio revela que el 50% de las cuencas ya alcanzaron el *peak water*. Sugieren además que en cuencas que albergan glaciares de mayor tamaño el *peak water* se producirá más tarde (finales del siglo XXI). En cuencas donde predominan glaciares de menor tamaño, como las de América del Sur, el *peak water* ya se habría producido y en las próximas décadas los aportes de agua de fusión glaciar disminuirían.

A escala local, Ayala *et al.* (2020) evidencian la disminución del aporte del deshielo glaciar hacia el río Maipo, especialmente en períodos de sequía o años secos; sin embargo, debido a la variabilidad inter-anual, no es clara la existencia de un *peak water* en la cuenca (Figura 7).

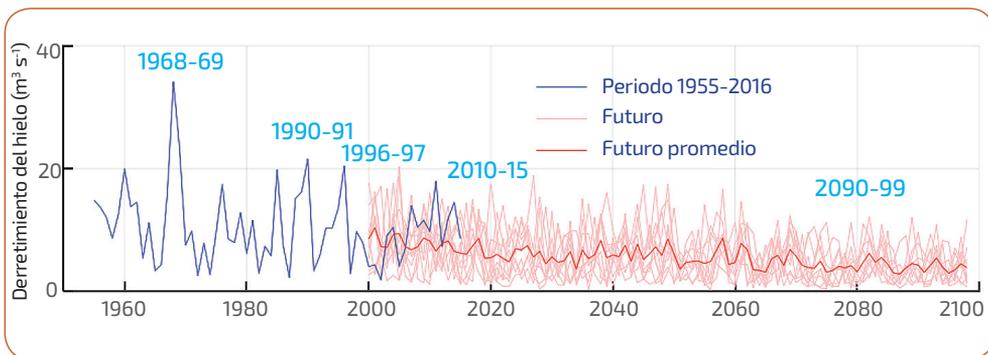


Figura 7.

Contribución hídrica del hielo glaciar en la cuenca del Maipo.

Fuente: Ayala *et al.*, (2020).

CLASIFICACIÓN DE GLACIARES

Dada la importancia a nivel nacional de los glaciares de las macrozonas centro, sur y austral de Chile y la existencia de distintos tipos de glaciares, es apropiado presentar una clasificación morfológica de glaciares basada en el tamaño, forma y emplazamiento de las masas de hielo. Existen 4 tipos de glaciares (Figura 8) con alta representación a nivel nacional, los que corresponden a los primeros cuatro de la siguiente lista:

Glaciaretos: acumulaciones de hielo que presentan áreas inferiores a 0,25 Km², por lo que son considerados las expresiones más pequeñas de los glaciares. No tienen o presentan escasas señales de flujo presente o pasado, y no poseen una delimitación clara de áreas de acumulación y ablación (Figura 8).



Figura 8.

Glaciarete en las laderas del Cerro Brujo, en el Valle del Río San Andrés, Cuenca del Tinguiririca. Fuente: DGA, (2009).

Glaciar de valle: glaciar cuya masa principal fluye y termina en un frente emplazado dentro de un valle. Presentan zonas de acumulación bien definidas (que puede ser una o más de una), las cuales se localizan en subcuencas que presentan formas características y se denominan circos glaciares. A través del peso del hielo se generan movimientos en los glaciares que permiten la confluencia de las áreas de acumulación en un valle (más largo que ancho), el cual encauza el flujo del hielo aguas abajo (Figura 9).



Figura 9.

Glaciar de valle. Glaciar Universidad, Región de O'Higgins. Fuente: Google Earth, (2023).

Glaciar de montaña: glaciares ubicados en las partes altas de las montañas o cordilleras, adosados o adheridos a las paredes o laderas de los sistemas montañosos. En este tipo de glaciares, el flujo del hielo desde las zonas altas correspondientes a áreas de acumulación que se da a través de una lengua glaciaria de dimensiones menores a las evidenciadas en los glaciares de valle. Dentro de esta clasificación se encuentran los glaciares adheridos a laderas, así como también los glaciares existentes en los faldeos de volcanes (Figura 10).



Figura 10.

Glaciar de montaña. Fuente: Rau *et al.*, (2005).

Glaciar efluente: glaciar que forma parte de un campo de hielo, el cual presenta un área de acumulación emplazada en una meseta en altura o plateau. El hielo es evacuado a través de una lengua efluente que generalmente está controlada topográficamente ya que se encauza por un valle preexistente (Figura 11).

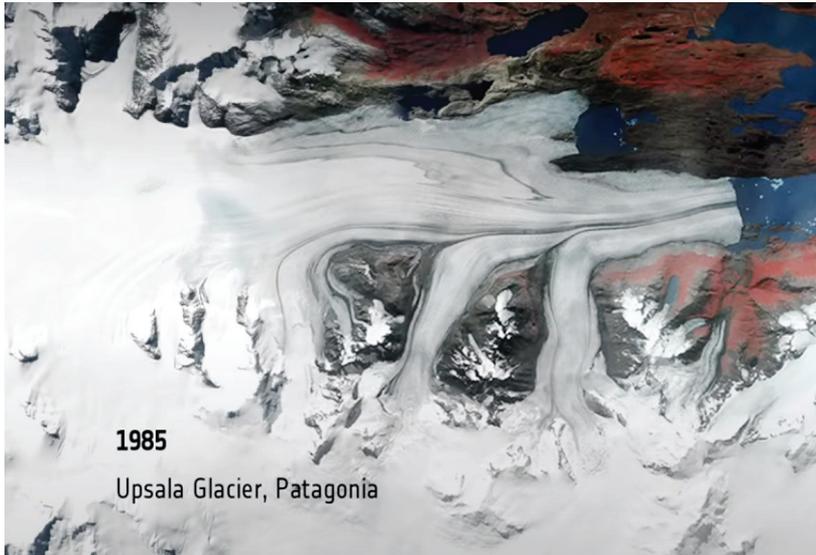


Figura 11.

Glaciar efluente. Glaciar Upsala, Campo de Hielo Sur. Fuente: ESA, (2023).

Campo de hielo: son grandes superficies de hielo que exhiben una zona de acumulación compleja compuesta por una planicie en altura o plateau y zonas escarpadas que la rodean. Todo el hielo de estas zonas de alimentación es evacuado por medio de varias lenguas efluentes, las cuales son controladas por la topografía subyacente. Dichas lenguas pueden presentar cuencas medianamente definidas, pero sus zonas de alimentación presentan divisorias de hielo difíciles de delimitar cuando se ubican en los plateaus, a menos que se hagan estudios interferométricos o mediciones con GPS de calidad geodésica, que incluyan estimaciones de velocidades y direcciones predominantes de flujo (DGA, 2009.)



Figura 12.

Campo de Hielo Norte. Fuente: DGA, (2009).

Plataforma de hielo: parte de un glaciar que flota en el agua salada (mar) o dulce (lago), no presenta contacto con la tierra en ningún punto de su superficie (Figura 13).

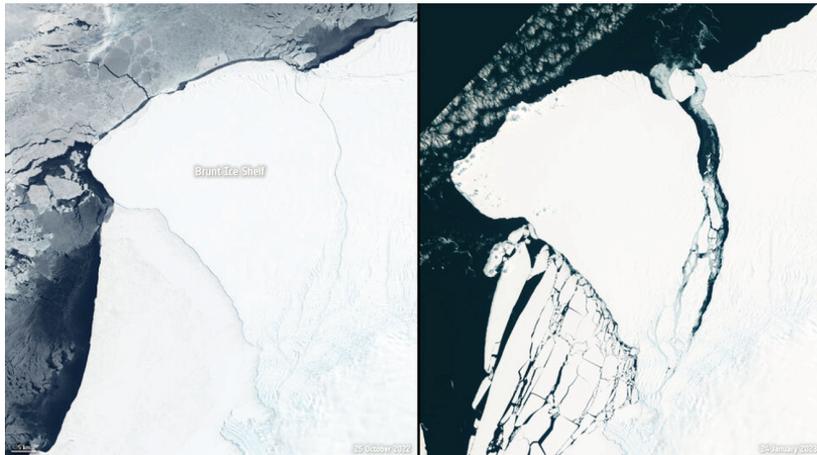


Figura 13.

Plataforma de hielo. Plataforma de hielo Brunt, Antártica. Fuente: ESA, (2023).

Iceberg o témpanos de hielo: trozos de hielo que flotan a la deriva y que se desprenden de distintos glaciares que tienen su frente en agua, ya sea dulce o salada (Figura 14).



Figura 14.

Iceberg en Groenlandia. Fuente: Keenpress, National Geographic, (2019).

Hielo marino: capa de hielo flotante que se forma a partir de agua de mar (con salinidad, pH, densidad y otras características específicas) que cambia de estado a través de procesos de congelamiento. Cabe señalar que por no formarse en tierra, el hielo marino no se considera como hielo glaciar. (Figura 15).



Figura 15.

Hielo Marino del Ártico. Fuente: Rich Reid, National Geographic Creative, (2018).

Adicionalmente, se puede distinguir a los glaciares de acuerdo con su cobertura detrítica y estructura interna. De forma simplificada se pueden establecer 3 grandes categorías:

Glaciares descubiertos: son ampliamente reconocidos y estudiados por la comunidad científica. Una de sus características principales es que el hielo es casi completamente visible, es decir, no cuenta con una cobertura detrítica significativa, la que de acuerdo a Rau *et al.* (2005) no debe ser mayor al 10% del área de ablación. Presentan pérdidas de masa asociadas a altas tasas de fusión, relacionadas con el contacto directo del hielo con la atmósfera.



Figura 16.

Glaciar descubierto, hielo limpio o *clean ice*.
Fuente: Rau *et al.*, (2005).

Glaciares cubiertos: cuentan con una abundante cobertura detrítica, la que puede ir desde un 10% al 100% del área de ablación. Las zonas con cobertura detrítica superior a 2 cm de espesor presentan tasas de fusión de hielo menor y en consecuencia el aporte a la escorrentía estival es menor. Son comunes en áreas montañosas donde existe aporte de material detrítico desde las laderas adyacentes al glaciar, que pueden cubrir discretamente o continuamente la lengua glaciar con espesores variables de material.



Figura 17.

Glaciar cubierto o *debris covered glacier*. Fuente: Rau *et al.*, (2005).

Glaciares rocosos: son formas de origen glacial y periglacial que presentan distribución a escala global. Los que han sido definidos anteriormente como formas detríticas que se desplazan en el terreno a través de movimientos muy lentos del permafrost, estas crioformas pueden presentar contenido de hielo (en cantidades variables) o no contener hielo, este último escenario se denomina permafrost seco (Figura 18).



Figura 18.

Fotografía de terreno, glaciar rocoso Barroso, 2019 (Región de Valparaíso). Fuente: Elaboración propia.

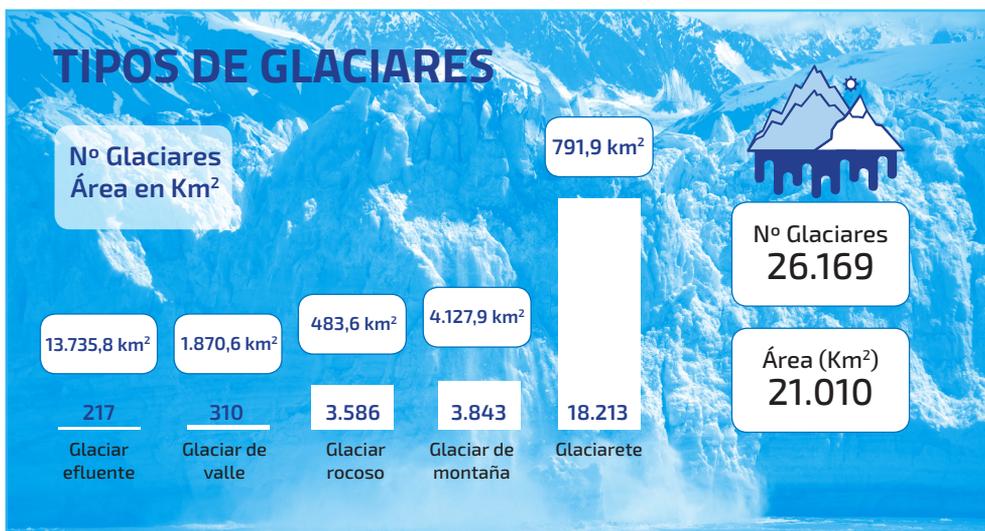


Figura 19.

Número y área (km²) según tipos de glaciares de acuerdo al inventario público de glaciares 2022. Fuente: Datos DGA, compilación Claudia Saravia, gráfico María C. Arvelo, Diario Financiero, (2022).

Una clasificación complementaria es la categorización de los glaciares de acuerdo a su estado físico/térmico, es decir, la temperatura de las masas de nieve y hielo y los procesos de ablación. De esta manera se presentan 3 tipos de glaciares:

Glaciares fríos: presentan temperaturas del hielo inferiores al punto de fusión por presión (menos de 0°C) en toda su masa. Los glaciares fríos también pueden denominarse como glaciares polares y son comunes en los polos, es decir, Antártica y el Ártico. En estas regiones se acumula hielo en forma de enormes glaciares continentales de espesores o potencias extremadamente altas, lo que resulta en el aumento de temperatura con la profundidad. Sin embargo, a pesar de este aumento de temperatura, los procesos de fusión no se generan fácilmente, aunque en profundidad sí pueden ocurrir. A través de la transferencia de calor por conducción entre el lecho rocoso y la base del glaciar se produce agua de fusión estacional, la cual facilita el movimiento glaciar producto de la lubricación de la zona basal de los glaciares (Bell, 2013). En Chile este tipo de glaciares se encuentran en la Macrozona Norte en altitudes por sobre los 3.000 m s.n.m.

Glaciares templados o temperados: se encuentran a su temperatura de fusión en forma permanente, en toda su masa y extensión, excepcionalmente el estado térmico del hielo puede variar en la zona superficial por un efecto estacional. La definición de glaciar templado involucra la presencia de agua. Al estar a su temperatura de fusión en toda la masa de hielo, la principal pérdida de masa glaciar se produce por procesos de fusión. El agua de fusión generada en estos glaciares puede ser transportada a través del glaciar templado, utilizando grietas y moulins. El agua líquida se traslada con un grado de congelación mínimo y concluye su flujo en el lecho del glaciar, lugar donde se pone en contacto con el sustrato rocoso o sedimentos (Fountain, 2011). En la Macrozona Austral se concentran las mayores áreas de glaciares temperados del planeta.

Glaciares politermales: presentan un régimen térmico basal mixto, es decir, se componen de hielo temperado (0°C o más) en el interior del glaciar, donde existe una capa potente de hielo, el cual se calienta hasta el punto de fusión por presión, así como también están formados por hielo frío (bajo 0°C) emplazado principalmente en las márgenes del glaciar, en zonas de hielo delgado y áreas superficiales. Generalmente, el hielo localizado en zonas elevadas y potentes presentes en la zona de acumulación, corresponde a hielo temperado (Glasser, 2011).

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE GLACIARES

El concepto de "Servicios Ecosistémicos" surge a finales de los años 60, cuando se inicia la discusión sobre la crisis ambiental y se cuestionan los impactos en la capacidad del planeta para regenerar y producir bienes suficientes para ser consumidos por las poblaciones humanas. Los servicios ecosistémicos devienen en un esfuerzo por crear puentes entre los tomadores de decisiones y al público en general acerca de la relación estrecha entre el mantenimiento de las funciones básicas del planeta y el bienestar humano (Balvanera y Cotler, 2007). La definición de servicios ecosistémicos más aceptada es que corresponden a *"Aquellos beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, estos incluyen servicios de provisión; como comida, agua y madera; servicios de regulación tales como regulación de ciclos climáticos, regulación de inundaciones, residuos y calidad de aguas y servicios culturales de tipo recreacional, estéticos y espirituales"* (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Servicios ecosistémicos de provisión de glaciares

En cuanto a los servicios ecosistémicos de los glaciares, se puede mencionar que estos cumplen un efecto regulador del caudal dada su capacidad de retención y liberación estacional de agua. Los glaciares mantienen con agua a las cuencas, aportando el recurso a los ríos, lagos y napas, y se constituyen en reservas estratégicas de agua dulce representando una fuente en períodos de sequía. Además, cumplen un rol de provisión continua de agua y de regulación gradual de entrega de ésta, en los períodos secos prolongados, modulando los caudales que podrían ser muy altos en la época de lluvia o muy bajos en la época seca. Este comportamiento entrega estabilidad a los ecosistemas naturales y seguridad al abastecimiento humano, las actividades industriales y el riego agrícola (Chile Sustentable, 2011). Asimismo, las cuencas con glaciares retienen más agua debido a que las masas de hielo limitan la pérdida y entrega de agua hacia la atmósfera por evaporación y sublimación, pues preservan eficientemente el agua producto de la baja temperatura y elevada devolución de radiación a la atmósfera (albedo) en comparación con las superficies rocosas. Por su parte, los glaciares rocosos deben ser considerados como sumideros de agua en el sistema hidrológico, debido a que el agua almacenada en estos glaciares presenta mayor resistencia a las variaciones climáticas, producto de la cubierta detrítica que los aísla del contacto directo con la atmósfera.

Servicios ecosistémicos de regulación de glaciares

Los glaciares son capaces de modificar las condiciones atmosféricas locales. Por ejemplo, las montañas con nieve y hielo enfrían las masas de aire, aumentando la humedad relativa y favoreciendo la condensación y posterior precipitación. A su vez, esas masas de aire presentan diferencias entre las circulaciones diurnas y nocturnas, ya que las primeras ascienden hacia las montañas desde los valles glaciares y, durante la noche, el aire baja desde las montañas encauzándose por los valles glaciares, mejorando las condiciones de recambio de aire y ventilación de las cuencas (IDEAM, 2012). La criósfera tiene un papel fundamental en la regulación del sistema climático global, ya que la nieve y el hielo cuentan con un alto albedo, es decir, devuelven a la atmósfera una porción de la radiación que reciben, pudiendo llegar a reflejar hasta un 98% de la radiación solar incidente.

A modo de comparación, el albedo del agua es alrededor de un 1%, el suelo desnudo refleja entre un 5 a 20% y los bosques entre 10 a 25% (Cuffey y Paterson, 2010; Bamber y Payne, 2004). Por lo tanto, al reducirse la criósfera (en términos de los cuerpos con superficies blancas), el albedo planetario se reduce, con lo que la Tierra absorbe más energía en la superficie terrestre y, en consecuencia, se eleva la temperatura, lo que a su vez resulta que la criósfera se reduzca a mayor velocidad producto del aumento del calentamiento global. Este ciclo continuo de elevación – retroalimentación positiva – de temperatura y pérdida de hielo que es difícil revertir. Por lo tanto, las masas de hielo cumplen un efecto regulador del sistema climático global, determinando localmente las características del entorno y modificando el balance radiativo a escala planetaria, atenuando el calentamiento global de la Tierra.

Una tendencia marcada y prolongada de pérdida o ganancia de masa en los glaciares afectará el equilibrio del nivel del océano. Según el National Snow and Ice Data Center (NSIDC) de Estados Unidos, es un efecto combinado entre el deshielo de los glaciares y la expansión térmica de los océanos (los fluidos se dilatan a mayor temperatura) lo que produce como efecto el aumento del nivel del mar. Bamber y Payne (2004) estipulan que el derretimiento del hielo de la capa Antártica y Groenlandia podrían elevar el nivel global del océano en aproximadamente 65 y 6 metros respectivamente.

Es importante considerar que los cambios en el nivel del mar se producen cuando existen desbalances en el balance hídrico. Estos desbalances se producen cuando las masas de hielo que se funden están por sobre la línea de tierra o *grounding line*, es decir, la fusión de plataformas de hielo (hielo flotante) no tienen aportes significativos al nivel del mar. Sin embargo, cuando el retroceso se acelera y alcanza glaciares y flujos de hielo sobre la línea de tierra, toda la masa y volumen fundido genera un *input* directo al sistema de balance hídrico y contribuye al aumento del nivel del mar.

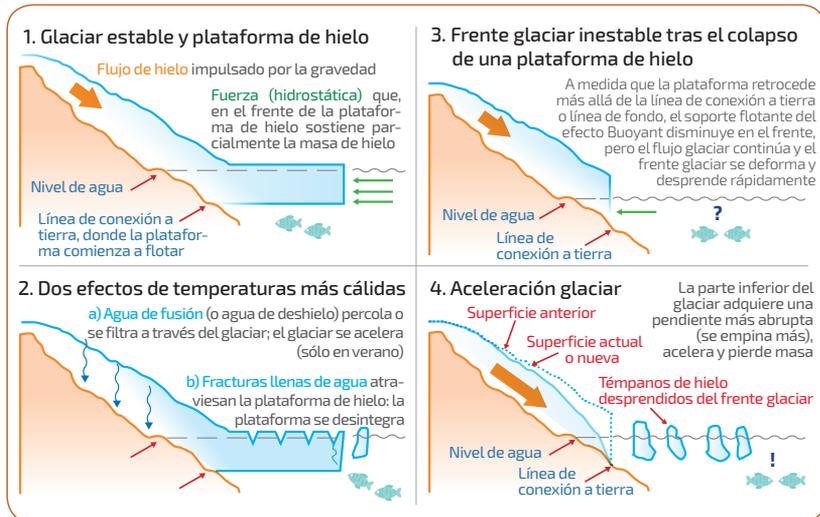


Figura 20.

Aportes diferencial al nivel del mar de un glaciar y su plataforma de hielo. Esquema de la evolución del sistema de aporte de icebergs desde hielo flotante y terrestre. Fuente: Banwell, (2018).



Figura 21.

Manto de hielo sobre la línea de tierra (*grounding line*) y plataforma de hielo flotante bajo el *grounding line*. Fuente: Huybrechts *et al.*, (2009).

Glaciares y servicios ecosistémicos: mucho más que hielo

Los glaciares son responsables de la morfología y los paisajes actuales de muchos lugares del planeta. El dominio morfológico de los glaciares en el paisaje es visible en formas de gran atractivo y valor paisajístico y con alto grado de endemismo y ricos en biodiversidad. En efecto, los pulsos de los glaciares con continuos avances y retrocesos producto de sus variaciones a lo largo de los siglos y milenios, generaron estas marcas singulares en los territorios que dan cuenta de los máximos glaciares (extensión y cobertura).

Los paisajes glaciares incluyen la formación de lagos en su frente terminal, los cuales se forman durante continuos avances y retrocesos, así cuando el glaciar retrocede el agua de la cuenca llena la hondonada resultante, quedando represada por los depósitos acumulados en su avance, como el Glaciar El Morado y la laguna homónima, localizados en el valle de Las Arenas, Cajón del Maipo, Región Metropolitana. Existen también otros lagos de origen glaciar, como los lagos de circo, los cuales rellenan las concavidades producidas por procesos erosivos en las zonas de acumulación.



Figura 22.

Glaciar y lago proglacial El Morado. Fuente: Imagen Google Earth, (2022).



Figura 23.

Imagen de lago de circo, sector valle del Toro Chico, Laguna de El Laja, Región del Biobío, Chile. Fuente: Imagen Google Earth, (2023).

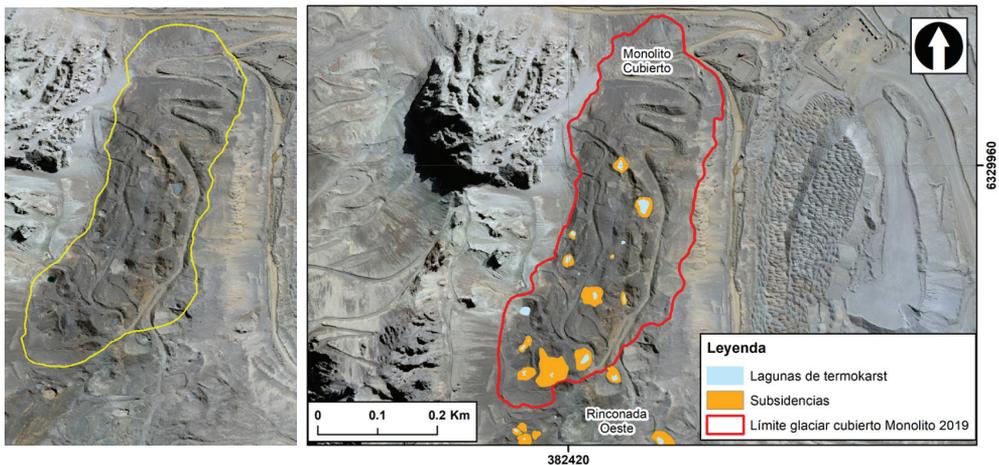


Figura 24.

Imágenes del glaciar Monolito, cuenca del río Blanco en la Región de Valparaíso. Presenta lagos de termokarst. Imagen izquierda: límite del glaciar Monolito y visualización de lagunas en la zona supraglacial; imagen derecha: mapeo de morfolgías supraglaciales en el glaciar Monolito. Fuente: Elaboración propia.

Los fiordos también son producto de las fuerzas glaciares, constituyéndose como grandes valles glaciares inundados por agua oceánica una vez que el hielo ha retrocedido. En estos paisajes de altas latitudes, los glaciares cortaron el territorio continental hasta alcanzar el mar, conformando un vasto archipiélago de islas continentales separadas por los brazos de agua. Un ejemplo de lo anterior es la zona austral de Chile al sur de Puerto Montt, donde el continente se presenta cortado por un patrón de islas en una matriz de fiordos resultado de la acción erosiva de los glaciares.

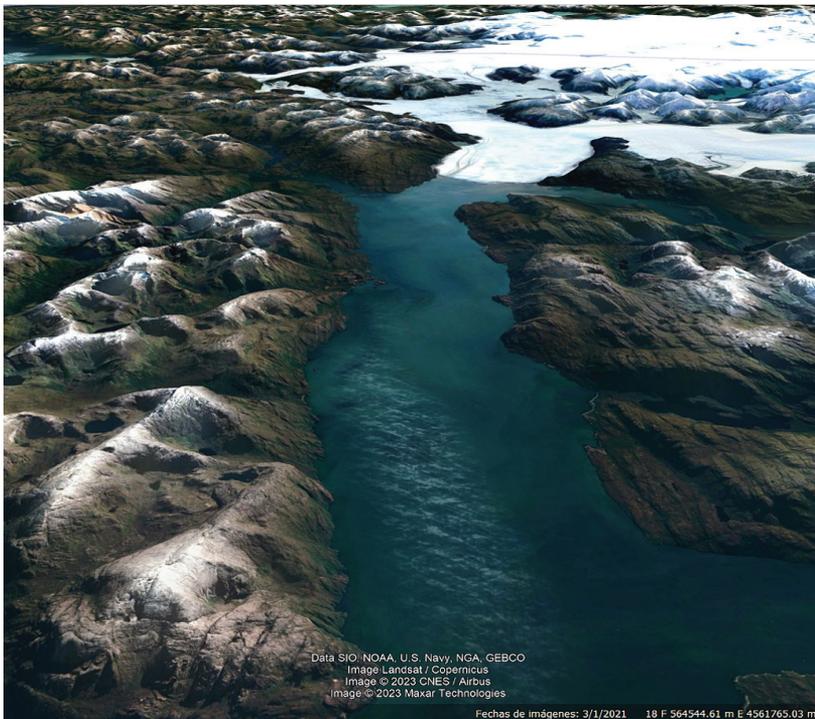


Figura 25.

Imagen de glaciar Pio XI y morfología de fiordo, Campo de Hielo Sur (CHS), Patagonia, Chile. Fuente: Imagen Google Earth, (2019).

Dadas las condiciones ambientales hostiles de las áreas con presencia de glaciares, se podría asumir que la flora y fauna es mínima o inexistente, ya que las bajas temperaturas, la alta radiación y la limitación de nutrientes, entre otros factores adversos, constituyen obstáculos adicionales a la supervivencia de especies. Sin embargo, se han reportado varios organismos

vivos en los glaciares, como microorganismos y algas, que crecen en la superficie del hielo y sostienen otros organismos, como insectos, gusanos de hielo, hongos y bacterias (Vijay *et al.*, 2011).

Por su parte, en las regiones montañosas, la riqueza (número de especies) y abundancia (número de individuos) de especies decrece con la altitud, en gran medida atribuible a la menor proporción de terreno disponible. No obstante lo anterior, el endemismo aumenta frecuentemente, debido al aislamiento topográfico y cambios rápidos en corredores biológicos (generación y pérdida) que imposibilitan la migración y dispersión de las especies (SAG, 2011).

En Antártica, pese a las extremas condiciones climáticas presentes, el mar se presenta como un ambiente ecológicamente rico en alimento, que permite el desarrollo de comunidades de aves como los pingüinos emperador, albatros y mamíferos como ballenas azules (el animal más grande del mundo). Así mismo, existen especies de algas, líquenes, musgos y hongos, que han desarrollado resistencia a las heladas y a la deshidratación, generando así la capacidad de crecer rápidamente en breves períodos, vinculados directamente a condiciones favorables.

Servicios ecosistémicos culturales de glaciares

Los glaciares presentan desde el punto de vista paisajístico un gran potencial turístico por sus atributos estéticos (tamaño, forma, color, etc.). Sus-tentan parte de la industria del turismo aventura o turismo de intereses especiales. Además, lo majestuoso y enigmático de estas masas de hielo se configura en un complemento para zonas que agrupan distintos intereses turísticos, como parques nacionales y áreas protegidas, donde los glaciares constituyen un elemento adicional de las riquezas turístico-ambientales.

En el ámbito cultural, las zonas glaciadas se suelen percibir con admiración y como lugares sagrados según algunas cosmovisiones de pueblos originarios, dado el alto nivel de complejidad para acceder a ellas y a los procesos naturales esenciales para la mantención de los ecosistemas que se desarrollan en aquellas áreas. Según Grebe (1991), las culturas indígenas andinas como las Quechua, Aymará, Atacameña y Mapuche, reconocen la existencia de espíritus guardianes de la naturaleza silvestre y sus fenómenos naturales, velando por el equilibrio y el bienestar. Asimismo, plantea Grebe (1991), los Uywiri, los Tata-Mayllkus o Tata-Cerros y los Negen-Winkul son espíritus que moran en las montañas, cerros y volcanes para las

culturas Aymara, Atacameña y Mapuche, respectivamente. Estos espíritus son dueños de las fuentes de agua de las cumbres, proporcionan agua para cultivos y protegen el bienestar y la fertilidad.

Los glaciares además se constituyen como potenciales laboratorios naturales para el desarrollo de la ciencia debido a que presentan posibilidades de estudio de diversas variables meteorológicas como sucesiones vegetacionales, eventos volcánicos y paleoclimáticas, mediante el análisis de "testigos de hielo" también conocidos como *ice core* o núcleo de hielo. Se les denomina "testigo" debido a que su registro nos cuenta y revela cómo eran las condiciones ambientales pasadas, que ningún ser humano ha podido presenciar, ver o medir, es decir, son registros paleo-ambientales. Los testigos de hielo se obtienen perforando el hielo glaciar con instrumentos especiales como taladros de hielo. Dependiendo de la longitud y profundidad del testigo, se usan taladros mecánicos (a motor) o manuales. El testigo más profundo obtenido hasta ahora en Antártica (Vostok) tiene una longitud de 3.000 metros y corresponde a una datación de 800 mil años (Augustin *et al.*, 2004). Por otro lado, el testigo de hielo extraído a mayor altura es el recuperado desde el Monte Everest, específicamente del glaciar South Col a 8.020 m s.n.m. (Potocki, 2022). Existen numerosos lugares de perforaciones para obtener testigos de hielo, que abarcan todo el planeta, desde el ecuador hasta las regiones polares, como las realizadas por el Instituto de Estudios Polares, posteriormente llamado Centro Byrd de Investigación Polar, y actualmente Centro Byrd de Investigación Polar y Climática de Estados Unidos (Thompson, 2017).



Figura 25.

Extracción de columnas de hielo.

Fuente: Dieter Tetzner, British Antarctic Survey, BAS, (2020).

En Chile, los testigos de hielo han sido obtenidos principalmente de la zona sur, austral y Antártica y un testigo de hielo en el norte del país, específicamente en el Cerro Tapado.

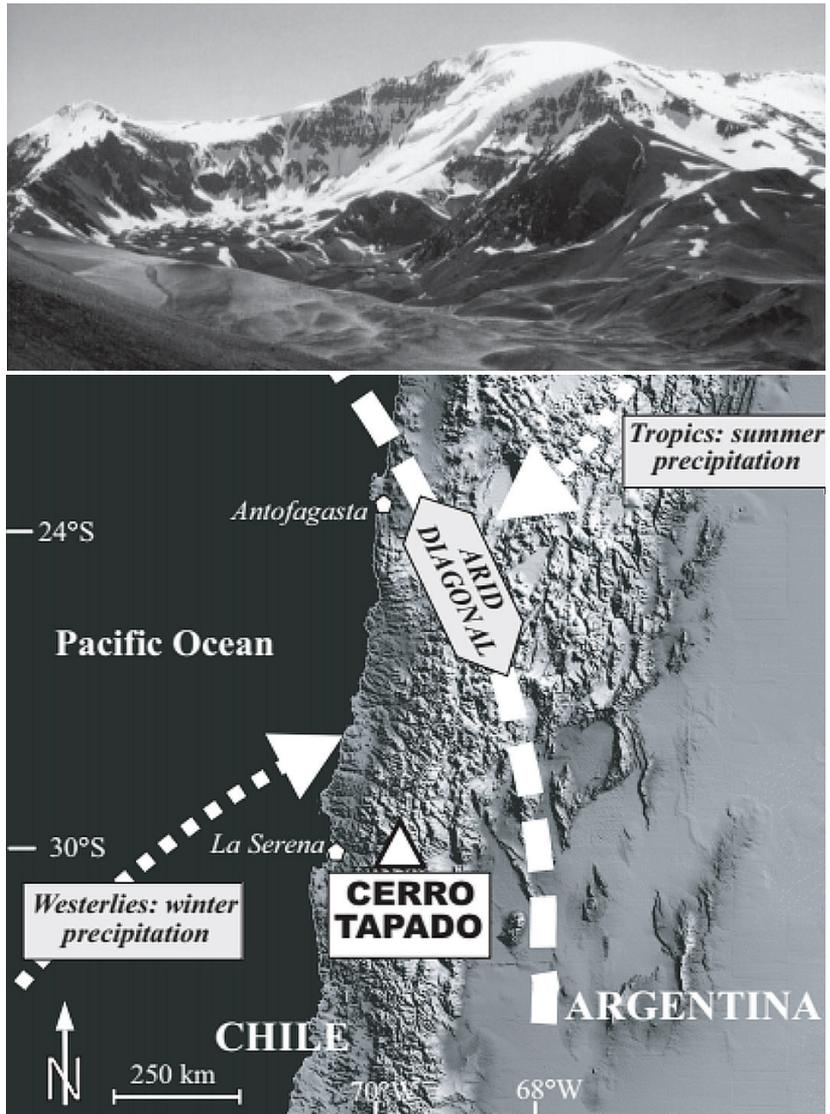


Figura 27.

Glaciar Tapado, testigo de hielo en el norte de Chile. Fuente: Ginot *et al.*, (2005).

En Antártica existen numerosos lugares de extracción de testigos de hielo. Algunos de los resultados expresan que, en 1775, 1521 y 1653 A.D., las tasas medias de acumulación anual fueron de 0,200, 0,204 y 0,221 metros equivalentes en agua (m weq), respectivamente. Así mismo, los datos indican que existe una variabilidad espacial, la que se estimó en 0,030 m weq, lo que equivale a aproximadamente el 15% de la acumulación media anual. Sólo cuatro registros de núcleos de hielo cubren 1.000 años y sugieren una disminución de la acumulación de nieve durante este período (Banta *et al.*, 2008).

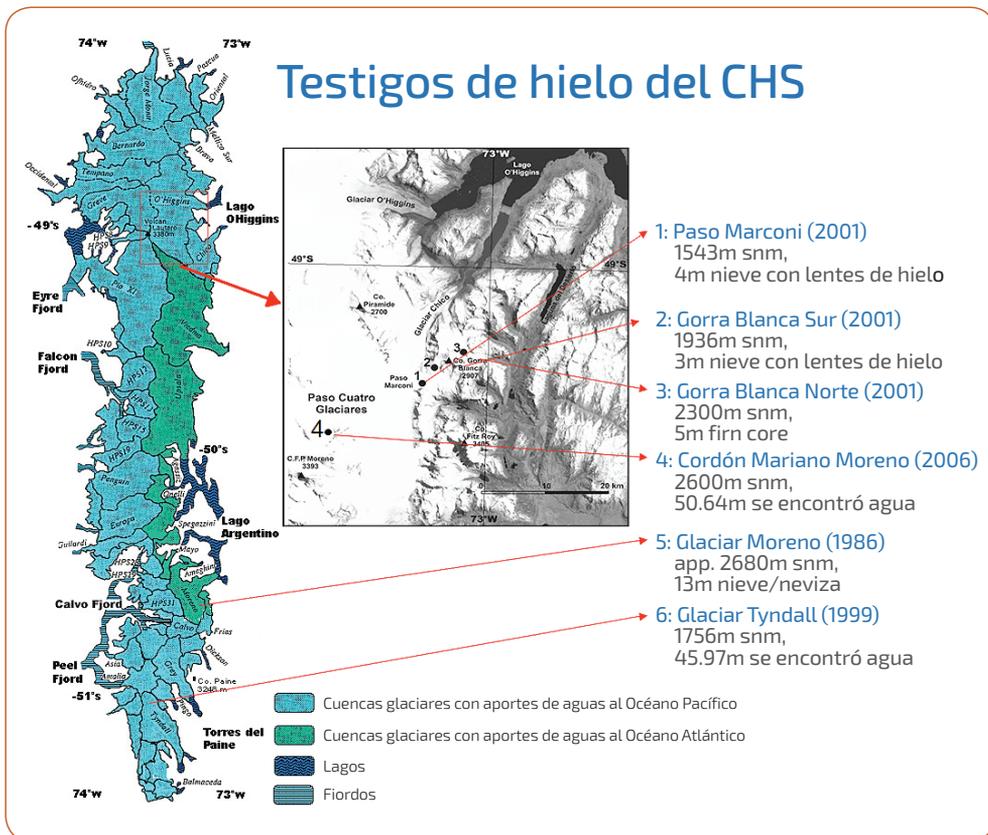


Figura 28.

Localización y hallazgos de perforaciones de testigos de hielo en Campo de Hielo Sur (CHS). Fuente: Schwikowski *et al.*, (2013), extraído de Laboratorio de glaciología.

Criohidrología

Tradicionalmente, los procesos hidrológicos derivados de la criósfera han sido abordados por la hidrología clásica; sin embargo, en la actualidad se ha acuñado el concepto de criohidrología, el que se enfoca en el estudio del cambio de fase del agua. De esta manera, la hidrología y la criohidrología se diferencian principalmente en que esta última presenta frecuentes transiciones de fase entre los distintos estados del agua (sólido, líquido y gaseoso) y los cambios de energía, masa y otros, asociados a estas transiciones.

Los cambios de fase del agua están directamente relacionados con intercambios de energía, por lo tanto, afectan la interacción entre la criósfera y otras esferas como la atmósfera, hidrósfera, biósfera y litósfera.

Por otro lado, la alta sensibilidad al cambio climático es una característica común entre la hidrósfera y la criósfera. Sin embargo, en esta última los diferentes elementos que la componen tienen patrones de respuesta variados y, en consecuencia, los procesos de respuesta se complejizan.

Para abordar el estudio de la criohidrología, se ordenan temas de investigación en función de una línea principal que se puede agrupar en dos grandes secciones método-proceso y función-impacto.

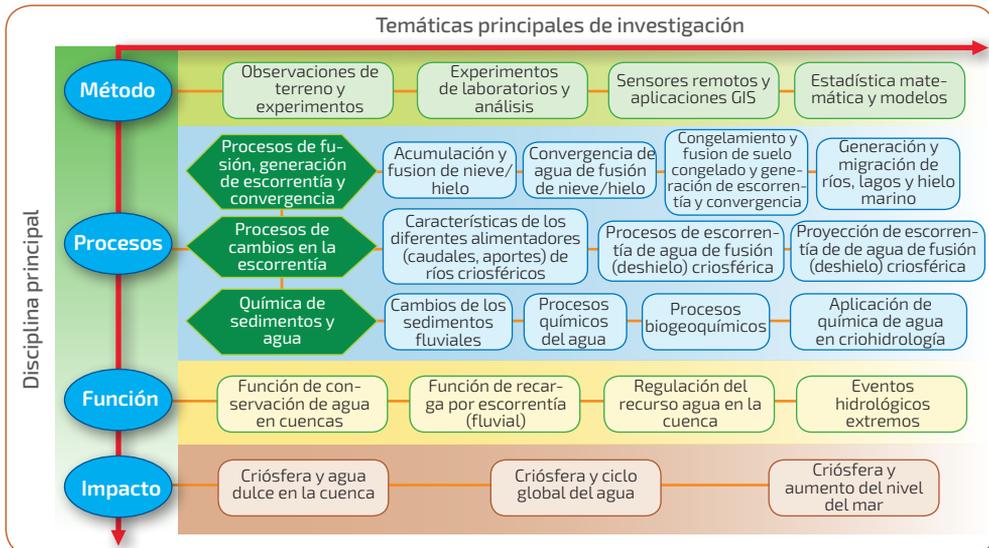


Figura 29.

Temas centrales de investigación de la criohidrología. Fuente: Ding *et al.*, (2020).

Otra característica de la criohidrología es la variada escala temporal y la amplia escala espacial que aborda, así dependiendo del enfoque estudiado, la escala temporal (de la criohidrología) oscila entre horas a cientos de años. Por ejemplo, si los temas de investigación se centran en el proceso/mecanismo, la escala temporal varía desde horas a cientos de años. En términos espaciales, la función hidrológica de la criósfera se analiza a escala de cuenca, por su parte los impactos de la criohidrología se observan a escala regional y/o global. La relación entre ambas escalas indica que la escala espacial se amplía cuando la escala temporal aumenta (Ding *et al.*, 2020).

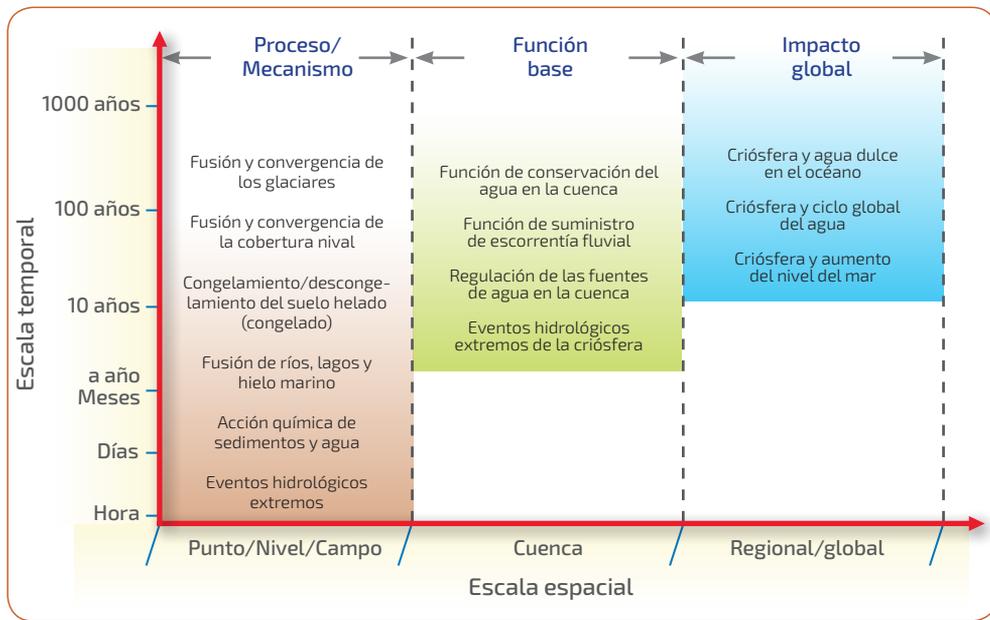


Figura 30.

Diferencia de los principales contenidos de investigación de la criohidrología a escala temporal y espacial. Fuente: Ding *et al.*, (2020).

A escala de cuenca, la criohidrología es fundamental desde la perspectiva hidrológica, cumpliendo funciones como la conservación del agua, recarga de escorrentía superficial en redes fluviales, regulación de recursos hídricos, mitigación de fenómenos de eventos hidrometeorológicos extremos, entre otros. Su impacto sobre otros sistemas naturales incluye el agua de la criósfera y del agua dulce dentro de cuencas fluviales, los componentes de la criósfera como parte del ciclo del agua y el aumento del nivel del mar asociado a variaciones en la criósfera. En Chile, Brenning y Azocar (2010),

llegaron a la conclusión de que el interés político y científico en los glaciares andinos rocosos solo aumentó debido al reconocimiento de su importancia hidrológica y las intervenciones mineras en ellos.

La intervención y afectación de glaciares rocosos tiene como consecuencia la pérdida de un recurso hídrico de forma permanente e irreversible, eliminando una fuente del sistema hidrológico que contribuye a los caudales de los ríos en la temporada cálida y, en especial, en años secos. Estas alteraciones suponen que en el largo plazo gran cantidad de estas cuencas presenten movimientos o remociones en masa, produciendo efectos negativos aguas abajo, en zonas pobladas asociados a procesos de filtración de aguas contaminadas y aluviones. De esta manera, los glaciares, la capa de nieve, el suelo congelado, el hielo de los ríos y lagos, el hielo marino, las placas de hielo, las plataformas de hielo, los icebergs y otros elementos de la criósfera pueden considerarse objetos de investigación de criohidrología. Los objetivos de la criohidrología se basan en comprender los procesos, funciones e impactos hidrológicos de la criósfera sobre los sistemas naturales y la sociedad.



Figura 31.

Base teórica y disciplinas básicas de la criohidrología a lo largo de la línea principal que incluye método, procesos, funciones bases e impacto de los diferentes elementos de la criósfera. Fuente: Ding *et al.*, (2020).

CONCLUSIONES

La criósfera y los glaciares son de suma relevancia para el funcionamiento del planeta y para nuestra propia supervivencia como humanidad. Los cuerpos de hielo son indicadores por excelencia del llamado "calentamiento global", puesto que el hielo responde rápidamente a los cambios de temperatura, y si a esto se le suman prolongados períodos de sequía, entonces el panorama se vuelve aún más complicado. De esta manera, los glaciares son más que hielo, pues proporcionan una multiplicidad de servicios ecosistémicos, los que en el caso de Chile son muy beneficiosos. Por eso se hace relevante realizar los esfuerzos institucionales que se enfoquen en proteger estas masas de hielo, asumiendo que nuestro comportamiento no ha sido respetuoso con la criósfera como elemento del medio natural y articulador del funcionamiento de las cuencas.

La mitología andina y otras culturas del mundo, ya reconocían el importante rol de las montañas y glaciares en la sobrevivencia de los pueblos originarios, a través de la provisión y regulación constante de los flujos hídricos proveniente de la cordillera, que permitían sostener aspectos como los cultivos, crianza de animales y, en general, todo el sistema de vida. Asimismo, le denotaban una relación directa entre la ética ambiental y el deterioro de los glaciares. No obstante, los foros de políticas públicas acerca del cambio climático rara vez prestan atención al contexto cultural y al razonamiento moral de las comunidades.

En Chile la superficie cubierta por glaciares (de distintos tipos) ha sufrido una disminución en torno al 8%, sin embargo, la cantidad de glaciares ha aumentado entre los períodos inventariados por la UGN (2014-2022), debido principalmente a la fragmentación de los cuerpos de hielo. A nivel global, desde 1961 los glaciares de nuestro planeta han perdido más de 9.625 gigatoneladas -9,6 billones de toneladas- de hielo. Todo en un plazo inferior a 50 años, lo que ha provocado un aumento de nivel del mar de 27 milímetros. Sin embargo, se debe hacer una distinción entre los glaciares de montaña y las extensiones de hielo en Groenlandia y la Antártica. Estos primeros cubren un área de aproximadamente 706.000 km² de territorio a nivel mundial, y con un volumen total estimado de 170.000 km³, y tienen el potencial de aumentar el nivel del mar en 0,4 metros.

Las tasas actuales de pérdida de masa indican que los glaciares podrían casi desaparecer en algunas cadenas montañosas durante este siglo. Las regiones fuertemente glaciadas continuarán contribuyendo al aumento del nivel del mar más allá del año 2100. Las mayores pérdidas regionales se han producido en Alaska, seguidas de los glaciares en los márgenes del manto de hielo de Groenlandia y los glaciares del sur de los Andes.

Por último, es importante destacar que la velocidad a la que se produce esta pérdida se ha incrementado significativamente en los últimos 30 años. Actualmente, se pierde un total de 335.000 millones de toneladas de hielo al año, lo que equivale a un aumento del nivel del mar de casi 1 mm anual.

En el mundo, la desaparición de los glaciares implica en última instancia menos agua para millones de personas, menos energía hidroeléctrica y menos disponibilidad para regar los cultivos. El deshielo de los glaciares provoca el aumento del nivel del mar, pero también hace crecer de forma crítica el riesgo de otras catástrofes naturales, como desbordamientos repentinos de lagos glaciares y el arrastre de residuos que conlleva.

REFERENCIAS

- Augustin L., Barbante C., Barnes PR., Barnola JM., Bigler M., Castellano E., Cattani O., Chappellaz J., Dahl-Jensen D., Delmonte B., Dreyfus G., Durand G., Falourd S., Fischer H., Flückiger J., Hansson ME., Huybrechts P., Jugie G., Johnsen SJ., Jouzel J., Kaufmann P., Kipfstuhl J., Lambert F., Lipenkov VY., Littot GC., Longinelli A., Lorrain R., Maggi V., Masson-Delmotte V., Miller H., Mulvaney R., Oerlemans J., Oerter H., Orombelli G., Parrenin F., Peel DA., Petit JR., Raynaud D., Ritz C., Ruth U., Schwander J., Siegenthaler U., Souchez R., Stauffer B., Steffensen JP., Stenni B., Stocker TF., Tabacco IE., Udisti R., Van De Wal RS., Van Den Broeke M., Weiss J., Wilhelms F., Winther JG., Wolff EW., Zucchelli, M. EPICA community members. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429(6992), 623–628. <https://doi.org/10.1038/nature02599>.
- Ayala, Á., D. Farías-Barahona, M. Huss, F. Pellicciotti, J. McPhee & D. Farinotti. 2020. Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14, 2005–2027.
- Bacigalupo, A. M., Carreño, G. S., Paerregaard, K., Drew, G., Gagné, K., & Gergan, M. 2021. Montañas y paisajes sagrados (1st ed.). Universidad Antonio Ruiz de Montoya.
- Balvanera, P., Cotler, H. 2007. Acercamiento al Estudio de los Servicios Ecosistémicos. *Gaceta Ecológica Número Especial 84-85 (2007)*: 8-15. 8p.
- Bamber, J., Payne, A. 2004. *Mass Balance of the Cryosphere*. Cambridge University. 644pp.
- Banta, J. & McConnell, Joseph & Frey, Markus & Bales, Roger & Taylor, Kendrick. 2008. Spatial and temporal variability in snow accumulation at the West Antarctic Ice Sheet Divide over recent centuries. *Journal of Geophysical Research*.
- Banwell, A. 2018. Breaking up at Sea: The Great Collapse of an Ice Shelf. *Bluesci. Cambridge University Science Magazine*.
- Bell, R., 2013. *Glacial Systems and Landforms (1st ed.)*. Anthem Press.
- Brenning, A., Azocar, G. 2010. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*.

- Chile Sustentable. 2011. Glaciares Andinos, Recursos Hídricos y Cambio Climático: Desafíos para la justicia Climática en el Cono Sur.
- Cuffey, K. and Paterson W. 2010. The Physics of Glaciers. Fourth Edition, Elsevier.
- DGA-CECs. 2009. Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos. (Informe S.I.T. N°205). Ministerio de Obras Públicas. República de Chile. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/GLA5194v1.pdf>
- DGA. 2022. Minuta Técnica 26/04/2022 UGN-DGA-MOP/NC inventario público de glaciares 2022.
- Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng, Han Tianding, Han Haidong, Wu Jinkui, Li Xiangying, Zhao Qiudong, Shangguan Donghui, Yang Yong, Liu Junfeng, Wang Shengxia, Qin Jia, Chang Yaping. 2020. Hydrological Basis and Discipline System of Cryohydrology: From a Perspective of Cryospheric Science. *Frontiers in Earth Science*, 8, 566. doi:10.3389/feart.2020.574707.
- FAO, 2012. Diagnóstico Nacional de Montaña, fortalecimiento de la gestión participativa para el desarrollo sostenible de los Andes. Informe Chile. Realizado por Juan Pablo Flores. 64pp.
- FAO, 2014. AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura.
- FAO, 2014a. Cordillera de Los Andes, una oportunidad para la integración y desarrollo de América del Sur, 124p.
- Fountain, A. 2011. Temperate Glaciers. In: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (eds) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht.
- Frauenfelder, R. 2004. Regional-scale Modelling of the Occurrence and Dynamics of Rockglaciers and the Distribution of Paleopermafrost. University of Zurich.
- Glasser, N.F., 2011. Polythermal Glaciers. In: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (eds) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht.

- Ginot, P., Kull, C., Schwikowski, M., Schotterer, U., and Gaggeler, H. W. 2001. Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean 5 Andes), *J. Geophys. Res.*, 106(D23), 32 375–32 386.
- Ginot, P., Stampfli, F., Stampfli, D., Schwikowski, M., and Gaggeler, H. W. 2020. FELICS, a new ice “ 10 core drilling system for high-altitude glaciers, *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 56 (Special Issue), 38–48.
- Ginot, P., Kull, C., Schotterer, U., Schwikowski, M., Gaggeler, H.W. 2005. Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past Discussions*, European Geosciences Union (EGU), 2005, 1 (2), pp.169-192.
- Ginot, Patrick & Kull, Christoph & Schotterer, Ulrich & Schwikowski, Margit & Gaeggeler, Heinz. 2006. Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past Discussions*. 10.5194/cp-2-21-2006.
- Grebe, M.E. 1991. Etnoecología Nativa: Creencias e interacciones entre Hombre y Naturaleza en la alta Montaña Andina. I taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los andes del Sur. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 243-250. 7pp.
- Hamblin W. K. & Christiansen E. H. 2004. *Earth's dynamic systems* (10th ed.). Prentice Hall Pearson Education.
- Holmes, A. 1952. *Geología Física*. Ediciones Omega S.A. 512pp.
- Huss, Matthias, Hock, Regine. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8. 135-140pp.
- Huybrechts, P. 2009. West-side story of Antarctic ice. *Nature* 458, 295–296pp.
- IDEAM, 2012. *Glaciares de Colombia, más que montañas de hielo*. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. 344p.
- Immerzeel, W.W., Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2010. Climate Change Will Affect the Asian Water Towers. *Science* 328, 1382-1385pp.

- IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge, CA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2018. Annex I. Glossary. [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- Key, J.R., Liu, Y., Wang, X., Letterly, A., Painter, T.H. 2020. Chapter 14 - Snow and Ice Products from ABI on the GOES-R Series, Editor(s): Steven J. Goodman, Timothy J. Schmit, Jaime Daniels, Robert J. Redmon, The GOES-R Series, Elsevier, 165-177pp.
- Kotlyakov, V.M. and Komarova, A.I., 2007. ELSEVIER'S Dictionary of Geography. 1073pp.
- Lliboutry, L. 1956. Nieves y glaciares de Chile. Editorial Universitaria.
- Marangunic, C. 1979. Inventario de glaciares en la hoya del río Maipo. Ríos Olivares y Colorado. Santiago, DGA.
- Masiokas, M. H., A. Rivera, L. E. Espizua, R. Villalba, S. Delgado, and J. C. Aravena. 2009. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3-4), 242–268pp.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis.
- Mooney, H.A. y Ehrlich, P.R. 1987. Ecosystem services: a fragmentary history. En: G.C. Daily (ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, DC. Pp:11-22.
- Potocki, M., Mayewski, P.A., Matthews, T. et al. Mt. Everest's highest glacier is a sentinel for accelerating ice loss. *npj Clim Atmos Sci* 5, 7. 2022.
- Rau, F. & Mauz, F. & Vogt, Steffen & Khalsa, Siri Jodha & Raup, Bruce. 2005. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. Institute For Physical Geography Freiburg.

- 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 pp.
- SAG, 2011. Manual de buenas prácticas para uso sustentable de ecosistemas de montaña. 121p.
- Schwikowski, M., Brütsch, S., Casassa, G., & Rivera, A. 2006. A potential high-elevation ice-core site at Hielo Patagónico Sur. *Annals of Glaciology*, 43, 8-13pp.
- Schwikowski, M., Schläppi, M., Santibañez, P., Rivera, A., and Casassa, G. 2013. Net accumulation rates derived from ice core stable isotope records of Pío XI glacier, Southern Patagonia Icefield. *The Cryosphere*, 7, 1635–1644pp.
- Segovia, A. y Videla, Y. 2017. Caracterización glaciológica de Chile. *Revista Investigaciones Geográficas de Chile* 53, 3-24pp.
- Steffen, K., Yang, D., and Ryabinin, V. 2012. "ACSYS: a scientific foundation for the climate and cryosphere (CliC) project," in Arctic climate change: the ACSYS decade and beyond. Atmospheric and oceanographic sciences library 43. Editors P. Lemke and H. W Jacobi (Dordrecht, Netherlands: Springer), 437–459pp.
- Thompson, L. G. 2017. Past, Present, and Future of Glacier Archives from the World's Highest Mountains. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 161(3), 226–243pp.
- Vera, A., Zúñiga-Reinoso, A., Muñoz-Escobar, C. 2012. Andiperla Willinkii. *Revista Chilena Ent.* 37, 87-93pp.
- Vijay, P., Pratap, S., Umesh, K. 2011. Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers.
- Vimeux, F., Ginot, P., de Angelis, M., Magand, O., Pouyaud, B., Casassa, G. 2007. The San Valentín glacier (Chilean Patagonia): a potential high-elevation deep ice core site for paleoclimate studies. First results from a shallow ice core. *Geophysical Research Abstracts*, Vol.9, 04116.
- Washburn, A.L. 1979. *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*. IX, 406p., numerous illustrations. London: Edward Arnold. ISBN 0 7131 6119 1.

- Whalley, W. and Azizi, F. 2003. Rock glaciers and protalus landforms: Analogous forms and ice sources on Earth and Mars. *Journal of Geophysical Research*, 108(E4), 8032, 17pp.
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, E., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S.U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., Cogley, J.G. 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, 382–386pp.



Universidad de Concepción

VOLCANISMO, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL VALLE DE AGUAS CALIENTES



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM