



ARTÍCULO 4

CARACTERIZACIÓN NACIONAL DE LAGOS DE DOMINIO GLACIAR

National characterization of glacier-dominated lakes

CARACTERIZACIÓN NACIONAL DE LAGOS DE DOMINIO GLACIAR

National characterization of glacier-dominated lakes



Alexis Segovia Rocha^{1-2*}, Yuliana Bustos López³, Pablo Iribarren Ancona⁴

RESUMEN: En base al mapeo que realizó previamente la Dirección General de Aguas para el Inventario Público de Lagos Glaciares, se hace una caracterización nacional de estos dividiendo los datos y el análisis por macrozona glaciológica y regiones. Se identificaron 5.384 lagos, concentrándose el 76% en la macrozona austral. El análisis incorpora además las categorías de peligro y riesgo. Aunque todos los lagos presentan algún nivel de peligro de vaciamiento repentino, no todos representan riesgo, ya que este depende de la población e infraestructura expuestas. La macrozona sur destaca por la mayor concentración de lagos con riesgo, especialmente en la región de Los Lagos, pese a que las zonas más australes poseen un mayor número total de lagos. Esto se explica por la mayor densidad poblacional en las áreas del sur, lo que incrementa la vulnerabilidad y, por ende, el riesgo asociado.

1. Facultad de Historia y Geografía, Universitat de Barcelona.

2. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

3. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

4. Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile.

RG|58

* AUTOR CORRESPONDIENTE
alexisegov@uchile.cl

Palabras claves: Vaciamiento repentino, GLOF, lagos glaciares, riesgo.

ABSTRACT: Based on the mapping previously carried out by the General Water Directorate for the Public Inventory of Glacier Lakes, a national characterization of these lakes was developed by dividing the data and analysis by glaciological macrozone and region. A total of 5,384 lakes were identified, with 76% located in the austral macrozone. The analysis also incorporates hazard and risk categories. Although all lakes present some level of hazard related to sudden drainage, not all represent a risk, as this depends on the exposed population and infrastructure. The southern macrozone stands out for having the highest concentration of lakes classified as risky, particularly in the Los Lagos region, despite the fact that the more austral regions contain a greater number of lakes overall. This is explained by the higher population density in the southern areas, which increases vulnerability and, consequently, the associated risk.

Keywords: Sudden drainage, GLOF, glacial lakes, risk.

INTRODUCCIÓN

La relevancia hidrológica de los glaciares en las cuencas andinas ha sido ampliamente documentada, ya que su aporte hídrico representa un servicio ecosistémico clave para el abastecimiento y la regulación del agua. En la macrozona centro de Chile, específicamente en las cuencas Olivares-Colorado, los glaciares generan un valor económico anual cercano a los USD 900 millones en servicios ecosistémicos (Segovia & Casassa, 2025).

El aumento sostenido de la temperatura promedio y la disminución de las precipitaciones han acelerado la fusión de los glaciares andinos, reduciendo su tamaño y aumentando la fragilidad hídrica en los países del Cono Sur (Aedo y Montecinos, 2011). Este retroceso coincide con lo señalado por Mote y Kaser, quienes identifican el calentamiento global como el principal impulsor del retroceso glaciar durante más de 150 años (Bernex y Tejada, 2010). Como consecuencia, se ha observado un incremento en la formación de lagos glaciares, producto tanto del derretimiento acelerado como de las condiciones geomorfológicas y glaciológicas de los glaciares (Berkhoff, 2022).

Drenkhan et al. (2019) definen los lagos glaciares como cuerpos de agua originados en depresiones formadas por ciclos de avance y retroceso del hielo, comúnmente represadas por morrenas. Estos lagos pueden clasificarse, según su ubicación relativa al glaciar, en subglaciares, proglaciares, englaciares o supraglaciares (Allen et al. 2022). Durante el siglo XX, el retroceso glaciar generó cambios significativos en la distribución y cantidad de estos lagos, incrementando los riesgos derivados de su interacción con masas de hielo inestables, particularmente en los campos de hielo patagónicos y en zonas con creciente ocupación humana (Iturrizaga, 2011). Los lagos proglaciares y periglaciares presentan además una alta variabilidad en volumen y superficie (Autoridad Nacional del Agua de Perú, 2014).

En Chile, el inventario de lagos glaciares se estructuró a partir de cuatro macrozonas glaciológicas —norte, centro, sur y austral—, permitiendo analizar su distribución y características según el contexto glaciológico regional (CECs, 2024; Segovia y Videla, 2017).

La caracterización de estos lagos es fundamental debido a los riesgos asociados a los GLOFs, eventos de vaciamiento súbito capaces de generar inundaciones de gran magnitud. Entre los principales mecanismos detonantes se identifican avalanchas de hielo y rocas, desestabilización de laderas y formación de témpanos (Richardson y Reynolds, 2000; Ballantyne, 2002; Berkhoff, 2022). Sus consecuencias pueden ser severas y persistentes en los sistemas fluviales, como lo evidencian casos documentados en la cuenca alta del Indo (Iribarren et al. 2015; Hewitt y Liu, 2013).

El retroceso glaciar, la formación de nuevos lagos y el aumento del riesgo asociado conforman un escenario dinámico que requiere monitoreo continuo y estrategias integradas de mitigación y gestión territorial.

MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización nacional de los lagos de dominio glaciar se desarrolló a partir del Inventario Público de Lagos Glaciares (IPLG) de la Dirección General de Aguas (DGA), utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Este enfoque permitió visualizar los polígonos de cada lago y obtener parámetros fundamentales como área, volumen equivalente en agua, tipo de represa, localización y categorías de peligro y riesgo. El IPLG fue revisado exhaustivamente y corregido cuando fue necesario respecto a la existencia y área de los lagos, por lo que los resultados obtenidos no coinciden completamente con la versión disponible para descarga en el sitio web de la DGA.

La metodología empleó 62 imágenes satelitales del período 2020–2022, priorizando Sentinel 2. A partir de estas imágenes se generó una composición multibanda para construir un mosaico basado en un buffer de los límites glaciares del Inventario Público de Lagos Glaciares 2022 (IPG2022), lo que permitió trabajar con información de menor densidad y mayor claridad para la detección de lagos. El uso de imágenes multitemporales es esencial para el monitoreo de glaciares y lagos y para la estimación del riesgo de vaciamientos repentinos mediante análisis geomorfológico y modelación (Bolch et al. 2011).

El mapeo se realizó mediante una metodología semiautomática basada en el índice diferencial normalizado de agua (NDWI) y el índice diferencial normalizado de nieve (NDSI). Este último se utilizó para eliminar píxeles de nieve erróneamente clasificados como agua, mientras que el resultado final del NDWI fue revisado y corregido manualmente en SIG. Para asegurar el carácter glaciar de los lagos, se aplicaron filtros que consideraron un área mínima de 0,1 ha (0,001 km²), una distancia máxima de 2 km al glaciar asociado y la ausencia de desapariciones temporales de corta duración. Solo se incluyeron lagos proglaciares y supraglaciares.

En el análisis de peligro y riesgo se distingue que el peligro corresponde a la capacidad intrínseca de un estresor para causar daño, sin considerar población ni infraestructura expuesta (MMA, 2014). Bajo esta definición, todos los lagos glaciares presentan algún nivel de peligro de vaciamiento repentino. En cambio, el riesgo incorpora la probabilidad de que dicho peligro genere impactos negativos sobre personas o infraestructura, dependiendo directamente del grado de exposición (MMA, 2014), sin considerar impactos sobre el entorno natural. La exposición se define como la interacción potencial del receptor con la fuente de peligro en un período determinado y puede ser breve, moderada o prolongada (SEA, 2023).

El peligro de ocurrencia de un GLOF fue estimado por DGA UACH (2023) a partir de seis parámetros: potencial impacto de movimientos en masa, volumen del lago, pendiente aguas abajo, área de cuenca aportante, contacto con glaciares circundantes y tipo de represa. El índice resultante fue clasificado mediante el método Fisher Jenks en cinco categorías, desde “Muy bajo” hasta “Muy alto”. El riesgo se calculó multiplicando el valor de peligro por el número de construcciones o comunidades vulnerables dentro de un radio de 20 km, y se clasificó en seis categorías, incluyendo “Sin riesgo”.

MATERIALES Y MÉTODOS

El retroceso glaciar global, con una tasa de reducción de 0,18 % anual entre 1980 y 2015 (Yao Jun et al., 2020), ha favorecido la formación de nuevos lagos en zonas previamente cubiertas por hielo y la expansión de lagos existentes en contacto con glaciares (Mazzoni y Rabassa, 2020). En Chile, para el año 2025 se han catastrado 5.384 lagos de dominio glaciar, distribuidos de forma heterogénea entre macrozonas glaciológicas y regiones. De estos, 5.133 corresponden a lagos proglaciares y 251 a supraglaciares. Bajo el actual escenario de calentamiento global, se espera que este número continúe aumentando, dado que el retroceso acelerado del hielo ha generado nuevos lagos, frecuentemente contenidos por morrenas inestables, incrementando el riesgo de inundaciones por descargas súbitas (Mir et al., 2018; Acevedo, 2021).

La distribución de los lagos glaciares reproduce estrechamente la distribución de los glaciares en el país. Según el IPG2022, la macrozona austral concentra el 88 % de los glaciares de Chile, seguida por las macrozonas sur, centro y norte. En consecuencia, la macrozona austral alberga el 76 % de los lagos de dominio glaciar, reflejando la influencia combinada de factores climáticos y geográficos. En términos generales, una mayor presencia de glaciares se traduce en una mayor probabilidad de formación de lagos glaciares.

En la macrozona norte, los glaciares son mayoritariamente fríos debido a la elevada altitud de la cordillera de los Andes, situándose generalmente sobre los 4.000 m s.n.m., con temperaturas que pueden descender hasta -10 °C (Brown y Saldivia, 2000; Bórquez et al., 2006). Esta condición explica que tanto glaciares como lagos se concentren en rangos altitudinales elevados. Además, la cobertura nival disminuye progresivamente hacia el extremo norte del país (Saavedra et al., 2017; Cortés y Margulis, 2017; Cordero et al., 2019). Los lagos de esta macrozona presentan superficies entre 0,001 km² y 0,88 km², asociándose los de menor tamaño a glaciares cortos y empinados (Iturrizaga, 2011). En

conjunto, representan solo el 0,2 % del área total nacional y el 0,05 % del volumen (Tabla N°1).

En la macrozona centro, los lagos glaciares presentan áreas entre 0,001 km² y 7 km², con una superficie total de 21 km², equivalente al 1,3 % del área nacional. Su volumen estimado alcanza los 8 km³, correspondientes al 0,7 % del total del país. Aunque estos valores superan a los de la macrozona norte, permanecen muy por debajo de los observados en las macrozonas australes.

La macrozona sur se caracteriza por la abundancia de conos volcánicos, los que influyen en la dinámica y fusión de los glaciares ubicados en sus laderas (Bórquez et al., 2006). En esta región se observa una disminución del número de glaciares a medida que disminuye la altitud de la cordillera (DGA CECs, 2011). El lago de mayor tamaño alcanza los 3,8 km², superando a los mayores de las macrozonas norte y centro. En conjunto, los lagos del sur cubren 70 km² (5 % del área nacional) y almacenan aproximadamente 15 km³ de agua (1,4 % del volumen total).

La macrozona austral, donde se localizan los Campos de Hielo Norte y Sur —que concentran cerca del 60 % de la superficie glaciar del país—, presenta los lagos más extensos y numerosos. El mayor lago alcanza una superficie de 179,5 km² y se asocia a los glaciares Greve y Pío XI del Campo de Hielo Sur. El marcado retroceso y adelgazamiento de los glaciares patagónicos en las últimas décadas (DGA CECs, 2011) explica que esta macrozona concentre el 94 % del área nacional de lagos glaciares (1.455 km²) y el 98 % de su volumen (1.010 km³).

En conjunto, la distribución, tamaño y volumen de los lagos glaciares en Chile responden directamente al retroceso glaciar, a las condiciones topográficas y a la disponibilidad de masas de hielo, con un marcado dominio de la macrozona austral.

» **Tabla N°1:** Distribución de lagos de dominio glaciar por macrozona glaciológica.

Fuente: *Elaboración propia.*

MACROZONA GLACIOLÓGICA	CANTIDAD DE LAGOS	% DE CANTIDAD DE LAGOS	ÁREA (KM ²)	% DE ÁREA DE LAGOS	EQUIVALENTE EN AGUA (KM ³)	% DEL EQUIVALENTE EN AGUA	RANGO ALTITUDINAL (m s.n.m)
Norte	99	2	3	0,2	0,5	0,05	2936 - 6029
Centro	414	8	21	1,3	8	0,7	1677 - 5248
Sur	781	14	70	5	15	1,4	115 - 2586
Austral	4090	76	1455	94	1010	98	2 - 2106
TOTAL	5384	100	1548	100	1033	100	2 - 6029

La Tabla N°1 presenta el área total y el volumen equivalente en agua de los lagos de dominio glaciar por macrozona. Si bien el número de lagos influye directamente en estos valores, también inciden factores como la temperatura, la cantidad de glaciares y las condiciones geomorfológicas locales. El aumento de temperaturas favorece el retroceso glaciar y el deshielo, promoviendo la formación de lagos con distintos tipos de represa —principalmente morrénica o rocosa— según el contexto geomorfológico (Bernex y Tejada, 2010).

A escala regional, la distribución de los lagos de dominio glaciar coincide estrechamente con la de los glaciares. La mayor concentración se registra en la región de Aysén, seguida por Magallanes y

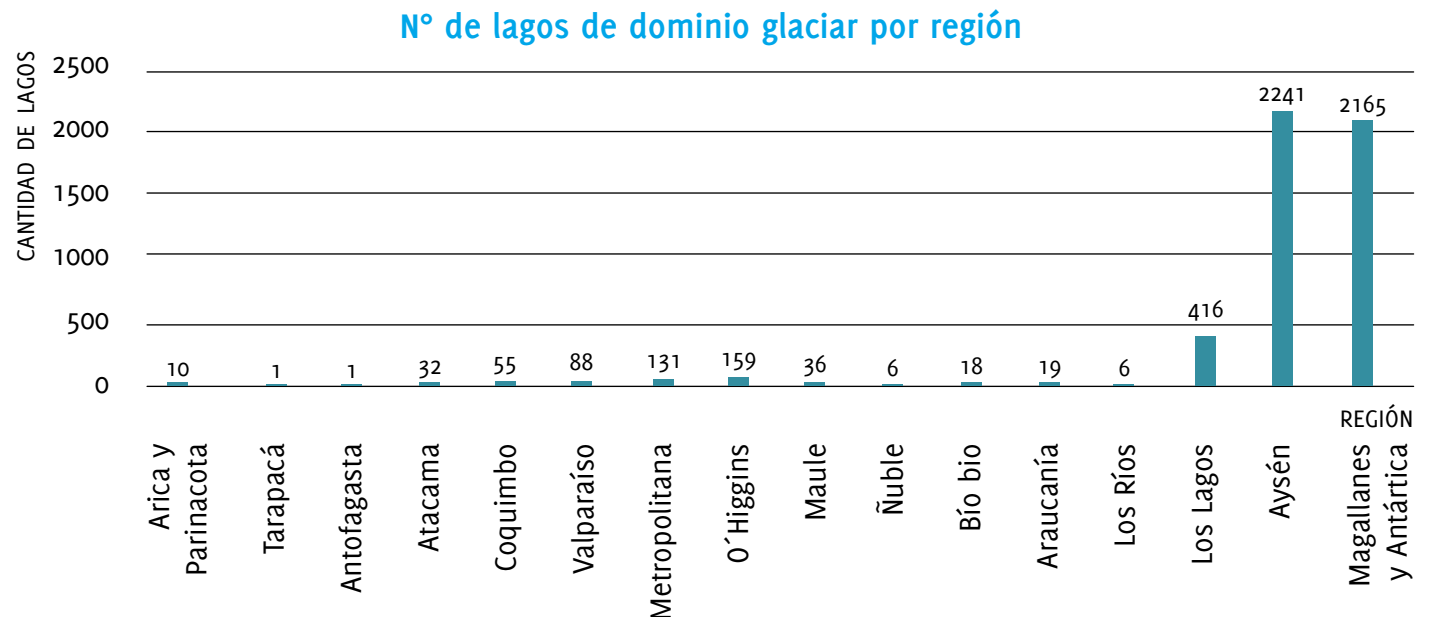
Antártica Chilena, con una diferencia de solo 76 lagos entre ambas (Figura 1). Estas regiones concentran además las mayores extensiones glaciares del país y, en conjunto, albergan 4.406 lagos, equivalentes al 82% del total nacional.

En contraste, aunque la región de Los Lagos posee más lagos que todas las regiones ubicadas más al norte, sus 416 lagos representan solo el 8% del total nacional. Esto se explica por su bajo equivalente en agua glaciar, que alcanza apenas el 0,9% del total, muy por debajo del 49,3% y 48,7% correspondiente a Aysén y Magallanes, respectivamente (Segovia y Videla, 2017). Así, pese a contar con 928,9 km² de glaciares, su capacidad para generar lagos glaciares es relativamente limitada.

RI62

» **Figura 1:** Distribución de lagos de dominio glaciar por región.

Fuente: *Elaboración propia.*



En la macrozona centro, regiones como Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins presentan más lagos de dominio glaciar que las regiones ubicadas al norte y algunas del sur, debido a las particularidades de su dinámica glaciar. En contraste, la macrozona norte posee pocos lagos glaciares, generalmente de menor tamaño que los de Aysén, ya que la mayoría de sus glaciares son del tipo rocoso según el IPC2022, lo que implica un movimiento, retroceso y aporte hídrico más lento. Además, los glaciares del norte tienen solo un 0,1% de equivalencia en agua (Segovia y Videla, 2017), limitando aún más la formación de lagos de dominio glaciar.

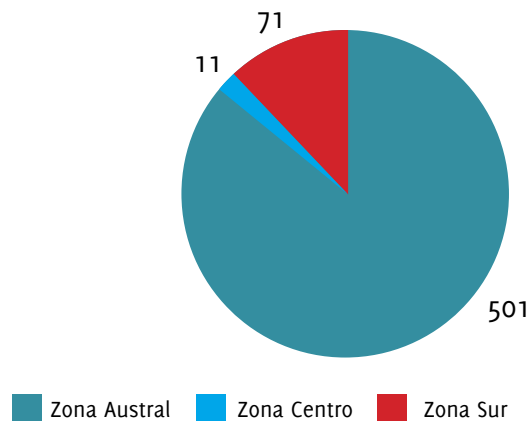
Peligro y riesgo de GLOF

A nivel nacional, existen 1.993 lagos glaciares clasificados con peligro "Muy alto" o "Alto" de vaciamiento repentino. La macrozona austral concentra la mayor cantidad, con 1.649 lagos, equivalentes al 83% de los lagos en estas categorías y al 30,6% del total de lagos glaciares del país. En contraste, la macrozona sur contiene 272 lagos con estas categorías de peligro, lo que representa el 14% del total nacional, pese a abarcar solo el 5% de los lagos del país. La macrozona centro aporta 58 lagos, equivalentes al 3%, mientras que la macrozona norte no presenta lagos con peligro "Muy alto" y solo posee 14 con peligro "Alto" (Figura 2), cifra que no alcanza el 1% a nivel nacional, siendo así la zona con menor nivel de peligro.

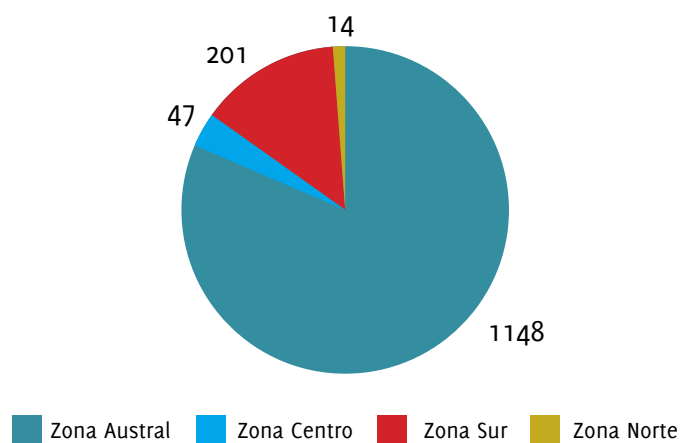
Los 15 lagos del país con valores de peligro superiores a 5,1 no presentan riesgo, ya que no cuentan con población o infraestructura cercana. Aun así, la categoría de peligro entregada por el Inventario es relevante para definir medidas preventivas en zonas turísticas. Por ejemplo, al ordenar los lagos según su nivel de peligro, el lago Dickson ocupa el lugar 14 y la laguna San Rafael el lugar 15 entre 5.384 lagos a nivel nacional. Este último es un destino donde se realizan actividades como navegación, pesca y montañismo (CONAF, 2025), lo que evidencia la importancia de contar con esta información para la gestión turística y de seguridad.

En cuanto al riesgo de GLOF, calculado multiplicando la exposición (número de elementos expuestos) por

Nº de lagos de dominio glaciar con peligro "Muy alto" de GLOF por Macrozona



Nº de lagos de dominio glaciar con peligro "Alto" de GLOF por Macrozona



» **Figura 2:** Arriba: número de lagos de dominio glaciar con peligro muy alto de GLOF por macrozona glaciológica. Abajo: número de lagos de dominio glaciar con peligro alto de GLOF por macrozona glaciológica. Fuente: Elaboración propia.

el valor de peligro, la mayoría de los lagos glaciares se clasifica en la categoría "Sin Riesgo". Las mayores concentraciones de lagos con algún grado de riesgo se encuentran en la macrozona sur y, en menor medida, en la macrozona centro (Tabla N°2). Esto se debe principalmente a la cantidad de infraestructura presente en estas zonas, pues el nivel de riesgo depende directamente del número de construcciones o poblados expuestos dentro del radio de análisis.

» **Tabla N°2:** Cantidad de lagos de origen glaciar por categoría de riesgo.

Fuente: *Elaboración propia.*

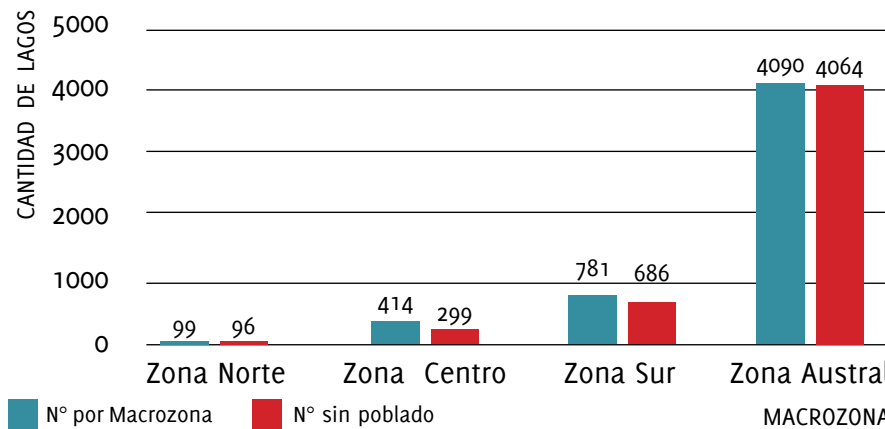
MACROZONA GLACIOLÓGICA	SIN RIESGO	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
Norte	65	6	27	1	-	-
Centro	181	34	93	60	41	5
Sur	418	43	172	96	33	19
Austral	3.992	44	46	8	-	-

El inventario también identifica si existe un poblado cercano a cada lago, indicando su nombre correspondiente. De los 5.384 lagos registrados, 5.145 no tienen un poblado en las cercanías (Figura 3), lo que significa que solo 239 lagos en todo el país poseen un asentamiento humano a una distancia máxima de 10 km. Este dato es relevante para la planificación de medidas de

adaptación y mitigación frente a posibles eventos de vaciamiento repentino. Asimismo, los lagos de dominio glaciar representan una importante fuente de aporte hídrico, especialmente en zonas áridas y semiáridas. Conocer la ubicación de los poblados cercanos permite evaluar la disponibilidad y calidad del agua, así como los potenciales impactos en la población.

Comparación entre el total de lagos de dominio glaciar sin poblado, por Macrozona Glaciológica.

RG164



» **Figura 3:** Comparación entre el total de lagos de dominio glaciar sin poblado, por macrozona glaciológica.

Fuente: *Elaboración propia.*

La Tabla N°3 presenta la cantidad de lagos clasificados por categoría de peligro, su distribución según niveles de riesgo y el total por región, lo que permite identificar claras diferencias territoriales. Regiones como Tarapacá y Antofagasta no registran lagos con algún nivel de riesgo, situación esperable dado que cada una posee solo un lago glaciar. No obstante, en ambos casos sí existe peligro, clasificado como “Muy bajo” o “Muy alto”, lo que evidencia que

la sola presencia de lagos no implica riesgo, el cual se manifiesta solo cuando existen poblados o infraestructura expuesta.

Las regiones Metropolitana, Valparaíso y O’Higgins concentran más lagos que la mayoría de las regiones ubicadas al norte y al sur hasta Los Lagos. Esta condición supone una mayor disponibilidad potencial de recursos hídricos ante escenarios de emergencia, considerando que los lagos pueden

actuar como reservas. Estas regiones albergan además el 56% de la población nacional (INE, 2017), lo que incrementa la relevancia del riesgo, ya que un vaciamiento repentino podría generar impactos significativos, aun cuando los lagos se ubiquen mayoritariamente en zonas cordilleranas y la población en áreas urbanas.

Las regiones de Los Ríos y Ñuble presentan solo seis lagos glaciares cada una (Tabla N°3), pero con comportamientos contrastantes. En Los Ríos, la mayoría de los lagos no cuenta con poblados

cercanos, por lo que prácticamente no existe riesgo de GLOF, salvo un lago en la comuna de Panguipulli que, pese a tener peligro “Muy bajo”, presenta riesgo debido a la presencia de dos infraestructuras expuestas. En Ñuble, en cambio, los seis lagos se encuentran en alguna categoría de riesgo. En ambas regiones ningún lago alcanza la categoría de peligro “Muy alto”, y comparten una distribución similar en los otros niveles de peligro, destacando que las diferencias de riesgo responden exclusivamente a la presencia o ausencia de elementos expuestos.

» **Tabla N° 3:** Número de lagos de dominio glaciar por categoría de peligro, con algún grado de riesgo y el total por región.

Fuente: Elaboración propia.

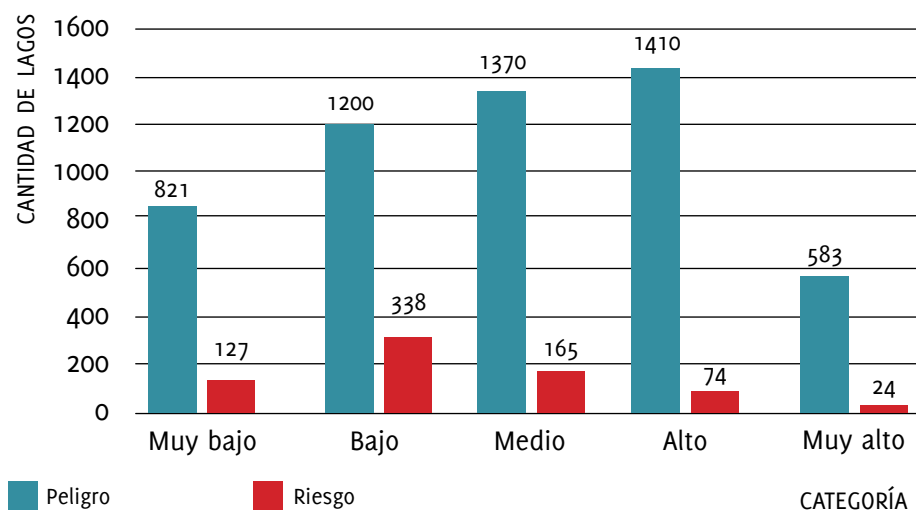
REGIÓN	N° DE LAGOS POR CATEGORÍA DE PELIGRO					N° DE LAGOS CON ALGÚN GRADO DE RIESGO	N° TOTAL DE LAGOS POR REGIÓN
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO		
Arica y Parinacota	0	1	2	4	3	4	10
Tarapacá	0	0	0	0	1	0	1
Antofagasta	0	0	1	0	0	0	1
Atacama	0	5	4	10	13	10	32
Coquimbo	0	8	10	20	17	20	55
Valparaíso	1	5	24	40	18	73	88
Metropolitana	4	19	27	50	31	92	131
O'Higgins	5	14	37	45	58	60	159
Maule	1	9	8	6	12	8	36
Ñuble	0	2	2	1	1	6	6
Bío bio	1	4	0	4	9	15	18
Araucanía	0	3	5	5	6	10	19
Los Ríos	0	2	2	1	1	1	6
Los Lagos	41	106	106	96	67	289	416
Aysén	275	585	579	512	290	88	2241
Magallanes y Antártica	255	647	563	406	294	58	2165

Las regiones de Tarapacá y Antofagasta presentan los menores niveles de peligro y riesgo, ya que cada una posee solo un lago de dominio glaciar. Además, desde Coquimbo hacia el norte no existe ningún lago clasificado en la categoría de peligro “Muy Alto”. No obstante, 34 de los 99 lagos presentes en estas regiones muestran algún grado de riesgo, lo que evidencia que la presencia de elementos expuestos sigue siendo determinante. Esta situación contrasta con las tres regiones más australes del país, donde se concentran 571 lagos en la categoría de peligro “Muy Alto”, de un total nacional de 583, lo que demuestra que el extremo sur agrupa casi la totalidad de los lagos con mayor nivel de peligro.

Por otro lado, la región de Los Lagos es la que presenta mayor cantidad de lagos con riesgo, aun cuando Aysén y Magallanes la superan ampliamente en número total de lagos. Esto se explica por la alta población de Los Lagos, que alcanza 828.708 habitantes según el CENSO 2017, en contraste con Aysén (103.158) y Magallanes (166.533). En estas regiones australes, la baja densidad poblacional limita significativamente la presencia de riesgo, ya que sin personas o infraestructura expuestas no se genera dicha condición.

En síntesis, la tabla N°3 evidencia que, aunque todos los lagos presentan algún nivel de peligro de vaciamiento repentino, solo aquellos ubicados cerca de infraestructura o población vulnerable alcanzan categorías de riesgo (Figura 4).

Comparación por categoría de peligro y riesgo.



» **Figura 4:** Cantidad de lagos de dominio glaciar por categorías de peligro y riesgo.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra con mayor claridad las diferencias en la distribución de lagos entre las categorías de peligro y riesgo, omitiéndose la categoría “Sin riesgo” al no tener equivalencia en peligro. Se observa que 1.410 lagos están clasificados con peligro “Alto”, pero solo 74 se encuentran en la misma categoría dentro del riesgo, constituyendo la segunda cifra más baja después del rango “Muy Alto”, que incluye apenas 24 lagos. Por el contrario, en el rango “Bajo”, la categoría de peligro ocupa una posición intermedia con 1.200 lagunas, mientras que es la categoría de riesgo más numerosa, con 338 lagos. En cuanto al riesgo “Medio”, este abarca 165 lagos, aunque en la categoría de

peligro existen 1.370 en este mismo rango. Finalmente, el riesgo “Muy Bajo” incluye 127 lagos, mientras que en peligro ese rango contiene 821 lagos.

La Figura 5 presenta la distribución de lagos con riesgo “Muy Alto” o “Alto” según Macrozona Glaciológica, graficando solo las macrozonas Centro y Sur, ya que las restantes no poseen lagos en dichos rangos. La macrozona centro cuenta con 5 lagos en riesgo “Muy Alto” y 41 en riesgo “Alto”. En tanto, la macrozona sur registra 19 lagos con riesgo “Muy Alto” y 33 con riesgo “Alto”. En esta comparación, la macrozona centro muestra una mayor tendencia hacia el riesgo “Alto”,

resultado coherente con la distribución de sus lagos en categorías de peligro más bajas, ya que el riesgo se determina a partir de los valores de peligro. En la macrozona sur se aprecia un patrón similar, aunque con diferencias menos pronunciadas.

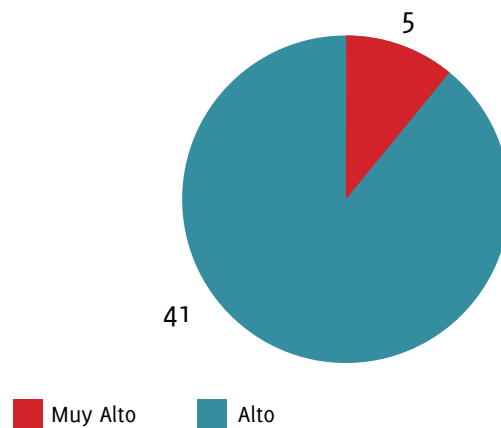
La presencia de lagos con rangos de riesgo “Muy alto” y “Alto” se concentra exclusivamente en las macrozonas centro y sur, debido a que son las que poseen mayor número de poblados cercanos por lago, lo que incrementa la exposición ante un posible evento de GLOF. La distribución de riesgo está estrechamente ligada a la presencia de asentamientos humanos próximos a los lagos.

Los lagos de dominio glaciar pueden estar contenidos por distintos tipos de represas: hielo, morrenas, rocas de fondo y movimientos en masa (Costa y Schuster, 1988; Berkhoff, 2022). El tipo de represa influye directamente en el peligro de vaciamiento, ya que las causas de los GLOF son diversas. Morales (2019) y Reynolds (2000), indican que el 29% de los vaciamientos repentinos se deben a avalanchas de hielo, otro 29% a derrumbes de morrenas, un 13% a las que sobrepasan y desestabilizan la represa, un 4% al movimiento estacional del glaciar y un 8% al colapso por infiltración de agua.

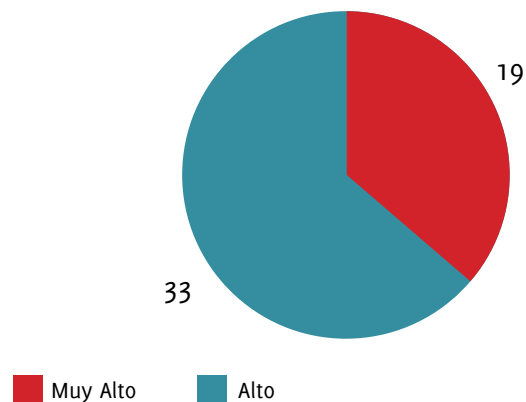
Las represas de morrenas son consideradas las más inestables entre las naturales, por lo que presentan mayor susceptibilidad al desbordamiento (Grabs y Hanisch, 1992; Acevedo, 2021). Estas represas pueden variar desde estructuras completamente cerradas, como en el glaciar Tap (Himalaya), hasta represas profundamente incisadas con descargas permanentes, como en el glaciar Müller de Nueva Zelanda (Iturrizaga, 2011). En lagos retenidos por hielo, las descargas muestran comportamientos similares a las producidas por represas de morrena, presentando un aumento exponencial hasta su punto máximo (Quiney y Carrivick, 2018; Acevedo, 2021).

Respecto a las represas de roca, sus colapsos pueden originarse por precipitaciones extremas o fusión nivoglaciar, las cuales provocan erosión del dique, además de procesos de remoción en masa

N° de lagos de dominio glaciar con rangos “Muy Alto” y “Alto” de riesgo en la Macrozona Centro



N° de lagos de dominio glaciar con rangos “Muy Alto” y “Alto” de riesgo en la Macrozona Sur



» **Figura 5:** Número de lagos de dominio glaciar con rangos muy alto y alto de riesgo.

Fuente: Elaboración propia.

que generan ondas de crecida (Costa y Schuster, 1991; Correas et al. 2023).

La mayoría de los lagos glaciares en Chile están represados por morrena, seguidos por represas de roca, mixtas, de hielo y solo dos artificiales, encontradas en la macrozona centro. La macrozona norte presenta la menor cantidad de lagos represados por hielo. Conocer el tipo de represa asociado a los lagos con riesgo “Muy alto” permite mejorar la toma de decisiones preventivas para evitar futuros desastres que afecten a la población.

DISCUSIÓN

Dadas las diversas condiciones geográficas del país y el acelerado retroceso glaciar asociado al cambio climático, resulta fundamental establecer sistemas de alerta temprana frente a vaciamientos repentinos de lagos glaciares. La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2006) define estos sistemas como la provisión de información oportuna y efectiva que permite a las personas expuestas a un peligro adoptar medidas para reducir su riesgo, constituyéndose en herramientas clave para la mitigación de desastres. No obstante, su implementación debe considerar las limitaciones tecnológicas locales, en particular la disponibilidad de tecnologías de información y comunicación (TIC), especialmente en zonas rurales (Ives et al., 2010).

Esta limitación es significativa en Chile, donde 35.900 personas no cuentan con acceso a electricidad, afectando al 8 % de los hogares rurales y al 0,4 % de los urbanos (CASEN, 2015; redPE, 2018). Esta condición restringe la efectividad de sistemas de alerta basados exclusivamente en señales o comunicaciones electrónicas, por lo que se requiere diseñar mecanismos accesibles para toda la población. En este contexto, Ives et al. (2010) proponen la contratación de residentes locales para realizar inspecciones periódicas en lagos prioritarios, enfocadas en el monitoreo de niveles de agua y condiciones de drenaje, siguiendo el caso de Islandia desde la década de 1930, cuya experiencia permitió desarrollar un inventario glaciar actualizado de manera sostenida.

Aun así, la estrategia más eficiente continúa siendo la actualización periódica del Inventario Público de Lagos Glaciares, que facilita el seguimiento de su evolución y la detección temprana de nuevos lagos. El monitoreo más frecuente de aquellos lagos con riesgo alto permitiría mejorar los sistemas de alerta y la preparación ante eventos GLOF, pudiendo entregar incluso más de un día de aviso previo a zonas pobladas aguas abajo si existe supervisión continua del glaciar asociado (Hewitt & Liu, 2013). Para ello,

es indispensable comprender en profundidad los procesos y efectos geomorfológicos asociados a los GLOF (Iribarren et al., 2023).

Finalmente, como señalan Herrera & Segovia (2019), es necesario fortalecer la gobernanza en territorios glaciados, considerando las tensiones socioambientales existentes. Algunas normativas de protección glaciar, aunque ambientalmente justificadas, pueden dificultar intervenciones preventivas como el drenaje artificial de lagos proglaciares, una medida relevante para la reducción del riesgo y la adaptación al cambio climático (Iribarren et al., 2018).

CONCLUSIONES

Los glaciares desempeñan un rol clave en los ecosistemas de alta montaña al actuar como principales fuentes de agua, especialmente durante períodos de escasez hídrica, sosteniendo bofedales, lagos, lagunas y otros sistemas acuáticos. Las zonas glaciares y periglaciares de los Andes presentan además condiciones geográficas favorables —como valles glaciares, morrenas y glaciares activos— que facilitan la formación y presencia de lagos glaciares.

El acelerado retroceso de los glaciares ha impulsado un aumento en el número de lagunas de origen glaciar, incrementando los riesgos asociados, particularmente los vaciamientos repentinos (GLOF). Existe una relación directa entre la disminución de la masa glaciar y la proliferación de lagos glaciares, con implicancias relevantes para las comunidades expuestas. Las diferencias climáticas y geográficas entre macrozonas generan una marcada variabilidad regional en la distribución de estos lagos y, por ende, en los niveles de riesgo.

A nivel nacional, se han identificado 5.384 lagos de dominio glaciar entre el límite con Perú y la cuenca del río Baker, cubriendo una superficie total de 1.548,4 km². La macrozona austral concentra la mayor extensión, con 1.455 km², superando ampliamente a las macrozonas norte, centro y sur, que en conjunto no superan los 70 km². Sin embargo, pese a esta gran superficie, la macrozona austral no presenta lagos clasificados con riesgo “Alto” o “Muy alto”, debido principalmente a la baja presencia de poblados e infraestructura expuesta. En contraste, las macrozonas centro y sur concentran la totalidad de los lagos con riesgo “Alto” y “Muy alto”, evidenciando una mayor exposición humana. En la macrozona norte, aunque el número de lagos es reducido, existen áreas donde la infraestructura podría verse afectada, demostrando que una menor cantidad de lagos no implica ausencia de riesgo.

El análisis nacional muestra que, si bien la mayoría de los lagos se clasifican como “Sin riesgo”, una proporción significativa presenta niveles de riesgo en las macrozonas centro y sur, donde se requiere especial atención en planificación territorial y medidas preventivas. El estudio de los lagos glaciares en Chile permite comprender mejor los efectos del cambio climático en la alta montaña e identificar zonas prioritarias para la gestión y protección de las comunidades expuestas a GLOF.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, C. (2021). *Descifrando las condiciones meteorológicas asociadas a GLOFs en Patagonia* (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180760>
- Aedo, M. P., & Montecinos, T. (2011). *Glaciares andinos: Recursos hídricos y cambio climático. Desafíos para la justicia climática en el Cono Sur*. Programa Chile Sustentable. <https://center-hre.org/wp-content/uploads/2012/11/LIBRO-GLACIARES-ANDINOS-1RA-PARTE-opt.pdf>
- Allen, S. K., Sattar, A., King, O., Zhang, G., Bhattacharya, A., Yao, T., & Bolch, T. (2022). *Glacial lake outburst flood hazard under current and future conditions: Worst-case scenarios in a transboundary Himalayan basin*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(11), 3765–3785. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3765-2022>
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/199/ANA0000015.pdf>
- Ballantyne, C. (2002). A general model of paraglacial landscape response. *The Holocene*, 12, 371–376. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl553fa>
- Berkhoff, J. (2022). *Formación y evolución de lagos glaciares en Patagonia*. Tesis de magíster en ciencias, mención recursos hídricos. https://glaciouach.cl/wp-content/uploads/2022/08/Thesis_Msc_JB_21_03_2022.pdf
- Bernex, N., & Tejada, M. (2010). *Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos*. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/GRFFS/9.pdf>
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59, 1691–1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R., & Urquidí, J. C. (2006). *Glaciares chilenos: Reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29426>
- Brown, E., & Saldivia, J. (2000). *Informe nacional sobre la gestión del agua en Chile*. <https://dga.dconsultores.cl/items/e49d29b9-0636-4b41-85fo-030c92a26dbe/full>
- CASEN. (2015). *Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional del Ministerio de Desarrollo Social, año 2015*. <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2015>
- CECs. (2024). *Recursos para educación*. <http://www.cecs.cl/educacion/index.php?section=-glaciologia&clase=30&id=63>

- CONAF. (2025). *Parque Nacional Laguna San Rafael*. <https://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-laguna-san-rafael/>
- Cordero, R. R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P. J., Sepúlveda, E., Jorquera, J., Carrasco, J., & Casassa, G. (2019). Dry-season snow cover losses in the Andes (18–40° S) driven by changes in large-scale climate modes. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53486-7>
- Correas, M., Moreiras, S. M., & Jeanneret, P. (2023). *Lagos actuales represados por procesos de remoción en masa en los Andes Centrales de Argentina (31°–36° S)*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/233038>
- Cortés, G., & Margulis, S. A. (2017). Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high resolution 31 year reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44, 6859–6867. <https://doi.org/10.1002/2017GL073826>
- Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1988). *The formation and failure of natural dams* (Open-File Report 87 392). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr87392>
- Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1991). *Documented historical landslide dams from around the world* (Open-File Report 91 239). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr91239>
- DGA-CECs. (2011). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. <https://glaciologia.cl/wp-content/uploads/2020/08/InformeVariacionesGlaciaresCECs2011-comprimido.pdf>
- 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. <https://dga.mop.gob.cl/inventario-publico-de-glaciares-actualizacion-2022/>
- DGA-UACH. (2023). *Asesoría y consultoría de apoyo para un inventario público de lagos glaciares* (59 pp.). <https://snia.mop.gob.cl/PIA/handle/20.500.13000/126798>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., & Haeberli, W. (2019). Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin. *Science of The Total Environment*, 665, 465–483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Herrera, J., & Segovia, A. (2019). *Ley de Protección de Glaciares: el devenir de un conflicto socioambiental*. *Investigaciones Geográficas*, 58, 118–134. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.52214>
- Hewitt, K., & Liu, J. (2013). Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: Historical perspectives on emerging threats. *Physical Geography*, 31, 528–551. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.6.528>
- INE. (2017). *Resultados Censo 2017*. <http://resultados.censo2017.cl>

- Iribarren, P., Mackintosh, A., & Norton, K. (2015). Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño Valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. *Science of The Total Environment*, 527–528, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.096>
- Iribarren, P., Kinney, J., Schaefer, M., Harrison, S., Wilson, R., Segovia, A., Mazzorana, B., Guerra, F., Farías, B., Reynolds, J., & Glasser, N. (2018). *Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change*. *Ambio*, 47, 835–845. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1043-x>
- Iribarren, P., Sepúlveda, C., Berkhoff, J., Rojas, I., Zingaretti, V., Mao, L., Mazzorana, B., & Durán Vilches, G. N. (2023). *Cascading impacts of GLOFs in fluvial systems: The Laguna Espontánea GLOF in Patagonia* (pp. 139–153). https://doi.org/10.1007/978-3-031-26647-8_8
- Iturrizaga, L. (2011). Glacier lake outburst floods. *En Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (pp. 381–399). https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_196
- Ives, J. D., Shrestha, R. B., & Mool, P. K. (2010). *Formation of glacial lakes in the Hindu Kush–Himalayas and GLOF risk assessment* (0 ed.). International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.521>
- Mazzoni, E., & Rabassa, J. (2020). *Retrosceso de glaciares, geología y formación de nuevos lagos*. *Museo*, 32, 29–38. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/117436>
- MMA. (2014). *Guía metodológica para la evaluación del riesgo ambiental*. <https://sqi.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/07/g2-Guia-Metodologica-Evaluacion-Riesgo-Ambiental.pdf>
- Mir, R., Jain, S., Lohani, A. K., & Saraf, A. (2018). Glacier recession and glacial lake outburst flood studies in Zanskar basin, western Himalaya. *Journal of Hydrology*, 564, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.031>
- Morales, O. (2019). *Caracterización y comparación geomorfológica de ríos patagónicos: Caso de estudio de tres cuencas afectadas y tres no afectadas por vaciamientos de lago glaciares (GLOFs)* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2019/fcm828c/doc/fcm828c.pdf>
- ONU. (2006). *Global survey of early warning systems*. <https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf>
- RedPE. (2018). *Políticas públicas y pobreza energética en Chile: ¿Una relación fragmentada?* Documento de trabajo elaborado por Catalina Amigo, Paz Araya, Marco Billi, Rubén Calvo, Tamara Oyarzún y Anahí Urquiza. <https://pobrezaenergetica.cl/wp-content/uploads/2025/10/DT1.Politicas-publicas-y-pobreza-energetica-en-Chile.pdf>
- Richardson, S. D., & Reynolds, J. (2000). Degradation of ice cored moraine dams: Implications for hazard development. *IAHS-AISH Publication*, 264, 187–197. https://www.researchgate.net/publication/285026299_Degradation_of_ice-cored_moraine_dams_Implications_for_hazard_development#fullTextFileContent

- Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. (2017). A snow climatology of the Andes Mountains from MODIS snow cover data. *International Journal of Climatology*, 37, 1526–1539. DOI: 10.1002/joc.4795. https://sites.warnercnr.colostate.edu/wp-content/uploads/sites/74/2017/09/2017IntlJClm37_3_1526-1539Saavedra_etal-A_snow_climatology_of_the_Andes_Mountains_from_MODIS_snow_cover_data.pdf
- SEA. (2023). *Guía para la evaluación ambiental del riesgo para la salud de la población*. <https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/03/08/Guia.pdf>
- Segovia, A., & Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Investigaciones Geográficas Una Mirada Desde El Sur*, (53), pp. 3–24. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2017.41739>
- Segovia, A., & Casassa, G. (2025). *Cuencas Olivares–Colorado: Caracterización glaciológica y valoración de servicios ecosistémicos vinculados al recurso hídrico*. *Revista de Geografía Norte Grande*, (91). <https://doi.org/10.4067/S0718-34022025000200103>
- Yao Jun, L., Ding, Y., Shangguan, D., & Rong Jun, W. (2019). Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015. *Advances in Climate Change Research*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.03.003>