

Septiembre de 2020

INFORME

LOS GLACIARES: ¿QUÉ QUEREMOS PROTEGER?

COMISIÓN DE GLACIARES

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Miembros

Jaime Illanes - Presidente

José Adolfo Moreno

Luis Nario

Octavio Ortiz

Jorge Pedrals

Humberto Peña

Luis Valenzuela

ÍNDICE

1.	RESUMEN EJECUTIVO	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	5
3.	LOS GLACIARES EN CHILE Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO	6
3.1.	DEFINICIÓN DE GLACIARES	6
3.2.	FORMACIÓN Y TIPOS DE GLACIARES	8
3.3.	GLACIARES EN CHILE Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO	11
3.4.	GLACIARES EN CHILE Y CAMBIO CLIMÁTICO	17
4.	LOS GLACIARES COMO RECURSO HÍDRICO ESTRATÉGICO.....	25
4.1.	INTRODUCCIÓN	25
4.2.	GLACIARES Y RECURSOS HÍDRICOS. CONSIDERACIONES GENERALES.....	27
4.3.	EL ROL DE LOS GLACIARES EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL CASO DE CHILE.....	30
4.4.	EL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS QUE SE REALIZAN EN EL ENTORNO DE LOS GLACIARES.....	35
5.	LOS GLACIARES COMO PARTE DE LA DINÁMICA DE UN ECOSISTEMA	37
5.1.	CONTEXTO.....	37
5.2.	RECURSO ECOSISTÉMICO	38
6.	LOS GLACIARES Y SU VALOR TURÍSTICO	41
6.1.	CONTEXTO MUNDIAL	41
6.2.	CONTEXTO EN CHILE.....	43
7.	LOS GLACIARES COMO FACTOR DE RIESGO	44
7.1.	RIESGOS ASOCIADOS A GLACIARES. ANTECEDENTES GENERALES.....	44
7.2.	DESASTRES ASOCIADOS A LOS GLACIARES EN CHILE.....	48
8.	EXPERIENCIAS Y ESTRATEGIAS INTERNACIONALES FRENTE AL COMPORTAMIENTO DE LOS GLACIARES	52
8.1.	CONTEXTO GENERAL.....	52
8.2.	GLACIARES Y SU RELACIÓN CON ACTIVIDADES EXTERNAS.....	53
8.2.1.	HIDROELECTRICIDAD	53
8.2.2.	TURISMO Y RECREACIÓN	56
8.2.3.	PECES DE CONSUMO	57

8.2.4.	MINERÍA.....	57
8.3.	MAYORES DESAFÍOS DEL PRESENTE Y FUTURO.....	63
9.	EL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA PROTECCIÓN DE LOS GLACIARES.....	63
9.1.	INGRESO AL SEIA.....	68
9.2.	VÍA DE INGRESO AL SEIA Y EVALUACIÓN DE IMPACTO.....	70
9.3.	ROL DE OTRAS INSTITUCIONES COMO COMPLEMENTO DEL SEIA.....	75
10.	UNA VISIÓN INTEGRAL NECESARIA EN LA FORMULACIÓN DE UNA POLÍTICA PÚBLICA SOBRE GLACIARES EN CHILE.....	78
11.	CONCLUSIONES.....	82
12.	RECOMENDACIONES.....	86

TABLAS

Tabla 1:	Distribución Geográfica de Glaciares en Chile.....	15
Tabla 2:	Pérdidas de masa por año para diversos glaciares de los Andes (Dussailante et al.).....	23
Tabla 3:	Tasas de derretimiento características en meses de verano (enero-febrero) en glaciares de los Andes Centrales.....	29
Tabla 4:	Importancia hidrológica de la cobertura de glaciares de cuencas del norte chico y de la zona central.....	31
Tabla 5:	Incidencia de los caudales mensuales originados en las superficies con glaciares en la escorrentía de la cuenca del río Maipo, como porcentaje del caudal total (%). Estación del río Maipo en El Manzano.....	34
Tabla 6:	Superficies glaciares intervenidas por faenas mineras, en relación con las superficies de las cuencas.....	35
Tabla 7:	Principales Glaciares con Interés Turístico en el Mundo.....	42
Tabla 8:	Antecedentes sobre eventos catastróficos asociados a glaciares desde 1950 en adelante.....	51

FIGURAS

Figura 1:	Clasificación Esquemática de Glaciares	10
Figura 2:	Partes de un Glaciar Blanco Descubierta	11
Figura 3:	Variaciones en la Superficie, Glaciar San Rafael	13
Figura 4:	Variaciones de la Superficie de Diferentes Glaciares en el Tiempo	14
Figura 5:	Cambios en el glaciar Muir; Alaska en un lapso de 60 años	17
Figura 6:	Cambios en la masa de los 37 glaciares del WGMS	18
Figura 7:	Mapas de Cambio de la temperatura (°C) proyectada para el período 2021-2050.....	20
Figura 8:	Mapas de Cambio de la precipitación (%) proyectada para el período 2021-2050.....	21
Figura 9:	Temperaturas mínimas proyectadas para la zona central de Chile (1970-2100)	22
Figura 10:	Impactos del Cambio Climático en la criósfera de montaña y sus consecuencias.....	24
Figura 11:	Régimen hidrológico en años de escasez extrema en ríos representativos (probabilidad de excedencia 95%) (Qmensual/Qanual).....	33
Figura 12:	Los Glaciares y la Hidrografía	39
Figura 13:	Mecanismo de generación de la crecida en el río Paine por ruptura de represamiento en el Lago Dickson (Peña y Escobar, 1983).....	46
Figura 14:	Mecanismo de generación del aluvión del río Manflas, por ruptura de la represa en el glaciar del Río Seco de Los Tronquitos. (Peña y Escobar, 1987)...	47
Figura 15:	Deslizamiento en Otta por deshielo de permafrost, 2011.	55
Figura 16:	Ejemplo del modelo de embalse estudiado en Suiza	56
Figura 17:	Acceso a la mina de Brucejack por glaciar Knipple.....	61
Figura 18:	Zona del proyecto de la mina Galore Creek, BC, Canadá	61
Figura 19:	Zona del yacimiento Mitchel, parte del proyecto KSM, BC, Canadá	62
Figura 20:	Mirada Integral sobre el Cambio Climático y la Protección de Glaciares	80

1. RESUMEN EJECUTIVO

El Instituto de Ingenieros de Chile es una organización académica que fue fundada el año 1888, es decir hace más de 130 años, y que a través del tiempo se ha caracterizado por hacer importantes aportes al desarrollo y discusión de políticas públicas en nuestro país y que han marcado su desarrollo.

Fiel a su tradición y a su compromiso de participar en los temas de interés nacional, el Instituto constituyó la Comisión de Glaciares para estudiar la situación de los glaciares en el país y la relación de éstos con su entorno, así como el efecto del cambio climático sobre ellos.

En la elaboración de cualquier política pública es necesario una perspectiva lo más amplia posible, multisectorial, de tal manera de evitar sesgos que pueden producir impactos adversos en otros elementos de la cadena de sustentabilidad o incluso en las formas de vida de algunas regiones en el país. Este informe ofrece una mirada amplia, multisectorial y tiene como objetivo fundamental hacer un aporte a la discusión sobre la situación de los glaciares, su protección y como otros procesos, entre ellos el cambio climático, pueden afectar la condición de éstos en el mediano y largo plazo.

Según cifras de la DGA, Chile cuenta con una superficie de glaciares que supera los 23.000 km². A estas cifras habría que agregar aquellos glaciares no inventariados, entre los cuales se encuentra un número importante de glaciares rocosos.

Durante los últimos años se observa un retroceso sostenido de la mayoría de los glaciares en el mundo y Chile no escapa a esta condición. Esta pérdida de masa se asocia primordialmente a los efectos del cambio climático. Según la opinión de algunos destacados científicos el cambio climático asegura una pérdida irreversible de glaciares, permafrost y nieves eternas independiente de las medidas que tomen los gobiernos para moderarlo. Diversos investigadores han modelado el cambio climático en el mundo y sus efectos para los próximos 50 a 100 años. En el caso particular de Chile, si bien las modelaciones pueden variar según las condiciones de borde y los modelos utilizados, todas ellas estiman un aumento sostenido de temperatura, que afectará aún más el retroceso de los glaciares en nuestro país. En este escenario, el rol de los glaciares no es ni será estático en el tiempo e irá variando en la medida que el cambio climático va afectando su retroceso. Llegará un punto donde el tamaño del glaciar no podrá sustentar su nivel de contribución a las escorrentías superficiales históricas.

Los glaciares cumplen en el ciclo hidrológico solo un papel regulador, almacenando volúmenes de agua en forma de hielo que son entregados a los ríos cuando existen condiciones térmicas adecuadas, sin afectar la disponibilidad media de recursos hídricos. Así, la existencia de una superficie con glaciares afecta la distribución temporal del caudal,

incrementando los flujos en los períodos de primavera-verano, en especial en los años de sequía.

De acuerdo con los antecedentes que se presentan se comprueba que, en la mayoría de las cuencas de Chile, sin considerar la región patagónica, las áreas cubiertas con glaciares no alcanzan al 1% de la superficie de las cuencas de cordillera, y el régimen hidrológico de los ríos no muestra un efecto apreciable de los glaciares en la disponibilidad hídrica, con la sola excepción de las cuencas de Aconcagua, Maipo y Rapel. La cuenca del Maipo, que presenta la mayor incidencia glaciaria, tiene una cubierta del 6,7 % de la superficie de montaña de la cuenca, y el total de hielo almacenado equivale al caudal medio que escurre aproximadamente durante 3 años, es decir, inclusive en ese caso, se trata de un volumen pequeño para considerarlo como una "reserva hídrica estratégica de largo plazo". Sin perjuicio de lo anterior, el aporte desde los glaciares en meses de verano en años de extrema sequía en dichas tres cuencas puede ser relevante, llegando en el caso del Maipo a representar el 60-70 % del caudal. El informe, entrega además antecedentes sobre los caudales que se producen en los distintos tipos de glaciares, enfatizando la gran variabilidad que se observa dependiendo de sus características y en especial de la existencia o no de una cubierta de detritos y de su espesor.

Este rol regulatorio que cumplen los glaciares es de gran importancia en la preservación de diversos ecosistemas; muchas veces son pequeños escurrimientos de agua que alimentan formaciones vegetales o proveen de agua a la fauna silvestre en épocas de sequía o de bajas precipitaciones. Este rol, es particularmente relevante en ecosistemas frágiles, como son, por ejemplo, los ecosistemas de alta montaña, ya que contribuyen a la generación de condiciones para la ocurrencia de bofedales, como son las vegas andinas que dan soporte alimenticio a animales y aves, permiten el ejercicio de la trashumancia y regularmente se asocian a la existencia de lagos y lagunas.

Por otro lado, el ciclo hidrológico ocurre en un conjunto de ecosistemas terrestres y acuáticos interrelacionados espacial y funcionalmente, que van desde el mar hasta grandes alturas donde se encuentran los glaciares. Existe bastante certeza que los sistemas frágiles de estas zonas altas, dependientes del ciclo hidrológico, se verán fuertemente afectadas por el cambio climático y sus efectos, entre ellos el retroceso de los glaciares, el aumento de las temperaturas y su distribución y el cambio de los regímenes pluviales.

Las autoridades chilenas a lo largo de los años han reconocido el rol que juegan los glaciares en este contexto y hoy día cerca de un 84% de la superficie de glaciares en el país cuenta con algún sistema legal de protección al estar incluidos en algún Parque o Monumento Nacional, o en alguna Reserva.

Respecto del turismo, éste se encuentra centrado particularmente en los glaciares blancos, ya que estos tienen un innegable valor estético y paisajístico, a diferencia de los glaciares de

roca. A nivel mundial y respecto de glaciares que son visitados constantemente por turistas destacan Islandia, Estados Unidos (Alaska principalmente), Canadá, Argentina y Chile.

A nivel local, si bien hay catastrados más de 23.000 glaciares por la DGA, sólo existe una zona con Declaratoria de Interés Turístico (ZOIT) y que corresponde a la Provincia de los Glaciares, territorio conformado por parte de las comunas de Tortel, Cochrane y O'Higgins en la Región de Aysén.

Los glaciares constituyen un factor de riesgo para la población y los bienes. En efecto, debido al precario equilibrio que ellos presentan en la naturaleza, su presencia se asocia a eventos catastróficos originados por: el desprendimiento de glaciares y bloques de hielo, la ruptura de represas de hielo, el vaciamiento violento de lagos formados por el retroceso de los frentes de los glaciares, y la interacción de los glaciares con el volcanismo. Estos riesgos, bien conocidos a nivel mundial, en el país se hacen presente con especial fuerza debido a ciertas características propias de su geografía, tales como la presencia de una extensa superficie de cubierta de glaciares, el relieve montañoso, y una importante actividad volcánica. A lo anterior se debe agregar la elevada sensibilidad del país al cambio climático.

La frecuencia y enorme magnitud que pueden alcanzar las crecidas y aluviones asociados a los glaciares en Chile se documentó en el informe con una revisión de los casos estudiados en los últimos 50 años. Para ese período se obtuvo información de 36 casos, informándose colapsos con el vaciamiento de volúmenes de agua tan importantes como 250 millones de m³ y con caudales máximos de hasta 11.000 m³/s.

Hacia el futuro, se espera que la recurrencia y gravedad de este tipo de fenómenos aumente, debido muy especialmente al impacto del cambio climático, que alterará severamente el actual equilibrio de los glaciares, y a la mayor presencia de la población en el territorio, asociada a la expansión de actividades de carácter productivo, turístico o recreacional. De acuerdo con lo anterior, en el informe se recomienda que el Estado desarrolle distintas iniciativas dirigidas a reducir estos riesgos.

Hay experiencia internacional de países con presencia de glaciares como son, entre otros, Noruega, Suecia, Austria, Francia y Canadá, en los cuales por muchos años han subsistido diversas actividades como el turismo, la generación hidroeléctrica y la minería junto a los glaciares, sin que haya sido necesaria una ley específica de protección de éstos, adoptando medidas de protección de los glaciares o de las poblaciones circundantes dependiendo de los méritos de cada caso en particular.

El único país en el mundo que tiene una ley específica de protección de glaciares es Argentina, país en el cual no existía una fuerte institucionalidad ambiental como en Chile y como en los países del hemisferio Norte ya mencionados. En el caso particular de Canadá, por ejemplo, siempre ha existido una importante actividad minera, especialmente en las zonas peri glaciales, y la institucionalidad ambiental de ese país ha aprobado o rechazado proyectos junto a glaciares mediante un análisis caso a caso.

Pero ante la evidente aceleración del proceso de deshielo de los glaciares, por el aumento de la temperatura en nuestro planeta por causa del cambio climático, la atención de los países del hemisferio Norte está enfocada desde hace varios años en cómo adaptarse a los efectos del cambio climático en general y cómo reemplazar las funciones que han tenido los glaciares en el pasado, tales como, el rol ecosistémico que ellos juegan, así como reguladores de escorrentías en épocas de sequías. En esos países se analizan alternativas de mitigación y compensación como, por ejemplo, a través de la construcción de embalses que recuperen la capacidad de regulación perdida. Otra preocupación importante en esos países es la definición de las medidas de protección ante los riesgos que para la población y la infraestructura representan el deslizamiento y ruptura de los glaciares e inclusive el aumento de temperatura en las laderas con permafrost.

Chile es un país muy extenso que presenta una diversidad de condiciones geográficas y climáticas a lo largo de su territorio. Los glaciares, y el rol de cada uno de ellos y su relación con los ecosistemas y recursos hídricos, es única y específica. Esto nos obliga a enfocar la protección de los glaciares en forma casuística y no generalizada. En este sentido, el Sistema de Evaluación Ambiental ("SEIA") es una herramienta de gestión ambiental idónea, que, inspirada por el principio preventivo, permite cautelar adecuadamente y en una base de "caso a caso" a los glaciares. En efecto, el texto actual de la Ley N° 19.300 y del Reglamento del SEIA, contienen diversas normas que garantizan una protección focalizada y efectiva - aunque perfectible- de los glaciares. Al respecto, se proponen opciones concretas de mejora o fortalecimiento del SEIA. Por su parte, se considera que instituciones como la SMA y los tribunales ambientales permiten garantizar el adecuado seguimiento y fiscalización de las obligaciones asociadas a proyectos o actividades que se relacionen a este objeto de protección ambiental. Del mismo modo, se considera que el SEIA precisa de un fortalecimiento de las políticas públicas asociadas a la protección de glaciares por parte del Ministerio de Medio Ambiente, cuestión que permite implementar normas de protección efectivas. Todo lo anterior permitirá mejorar la gestión del SEIA como instrumento preventivo frente a los distintos tipos de acciones o proyectos que pudieran implicar algún grado de afectación no deseado. Por otra parte, surge con especial atención, la necesidad de atender los llamados de expertos para hacer frente a situaciones de riesgo inminente a la vida o salud de la población producto del retroceso y pérdida de masa de un determinado glaciar. Por ello, se recomienda la adopción de normas de flexibilización del SEIA para la evaluación de obras o acciones urgentes y/o necesarias para anticipar y mitigar situaciones de riesgo producto de los efectos del cambio climático sobre los glaciares.

Este informe concluye con una serie de recomendaciones, entre ellas, fortalecer el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) con la incorporación de algunos Permisos Ambientales Sectoriales (PAS); fortalecer la investigación sobre glaciares, el ambiente periglacial y el permafrost; establecer un programa de vigilancia de glaciares peligrosos y la necesidad de consensuar entre los diversos actores de la sociedad algunas definiciones las que deberán ser claras y precisas.

2. INTRODUCCIÓN

El Instituto de Ingenieros de Chile, es una organización académica que fue fundada el año 1888, es decir hace más de 130 años, y que a través del tiempo se ha caracterizado por hacer importantes aportes al desarrollo y discusión de políticas públicas en nuestro país y que han marcado su desarrollo.

Fiel a su tradición y a su compromiso de participar en los temas de interés nacional, el Instituto constituyó la Comisión de Glaciares, para estudiar la situación de los glaciares en el país y la relación de éstos con su entorno, así como el efecto del cambio climático sobre ellos. Un estudio de esta naturaleza no puede, sino que conectarse con otros estudios que ha desarrollado este Instituto a través de los años y que dicen relación con el tema que nos preocupa; entre ellos:

- i. Aspectos claves para un desarrollo ambientalmente sustentable en Chile (2009).
- ii. Los recursos hídricos. El rol de los embalses para su regulación y mejor aprovechamiento (libro) (2010).
- iii. Temas prioritarios para una Política Nacional de Recursos Hídricos (2011).
- iv. Hacia una gestión integrada de recursos hídricos (2012).
- v. Bases para una Política de Gestión de Riesgos de Desastres en Chile (2013)
- vi. Cambio Climático. Percepciones e Impactos para nuestra economía (2013).
- vii. Construyendo confianza para el Desarrollo Sostenible. Una tarea urgente para Chile y la Ingeniería (2016)
- viii. La reforma al Código de Aguas y la gestión integrada de recursos hídricos (2017).

Este informe tiene como objetivo fundamental hacer un aporte a la discusión sobre la situación de los glaciares, su protección y como otros procesos, entre ellos el cambio climático, pueden afectar la condición de éstos en el mediano y largo plazo. Este documento ha sido desarrollado en torno a los siguientes temas:

- Situación actual y evolución de los glaciares en Chile en el tiempo incluyendo una visión de lo que sucedería a la luz del cambio climático.
- Los glaciares como un recurso hídrico estratégico.
- Los glaciares y su relación con los ecosistemas en los cuales se insertan.
- Los glaciares, el turismo y otras actividades económicas.
- Los riesgos asociados a la existencia de glaciares.
- La experiencia internacional en esta materia.
- El sistema regulatorio actual y como éste podría ser utilizado para la protección de los glaciares.
- Los análisis costo-beneficio (trade offs) necesarios en la formulación de una política pública sobre glaciares.

El informe termina con un conjunto de conclusiones y recomendaciones.

Antes de entrar de lleno en el informe propiamente tal, nos parece importante señalar lo siguiente:

- A través del presente informe se citan cifras proporcionadas por diferentes autores, entre ellas, superficies cubiertas por glaciares, masa glacial, tasa de retroceso superficial o tasa de reducción de masa, que aparentemente no coinciden entre sí. En parte ello se debe a que los diferentes autores han utilizado en sus análisis fechas y/o períodos de tiempo diferentes, lo que viene a confirmar que los glaciares no son formas estáticas en el tiempo.
- También resulta importante señalar que, en algunas materias específicas, no existen consensos entre diversos autores, entre ellas algunas definiciones de formas criogénicas. Si bien esta falta de consenso de modo alguno afecta lo medular de este informe, resulta necesario señalar que para la formulación de políticas públicas se requerirá de forma imperativa asumir una definición clara y precisa de estas formas o ambientes.
- Desde la década pasada el papel de los glaciares en el medioambiente ha dejado de ser motivo de interés exclusivo de especialistas para llegar a ser tema de debate en la opinión pública y, muy especialmente en Chile, en el Congreso Nacional. Así, desde el año 2005 se han propuesto 6 proyectos de ley con ese propósito. Los de mayor interés, para los efectos de este informe, son: el que corresponde al boletín N° 9364, ingresado el año 2014 y el correspondiente al boletín N° 11.876, actualmente en análisis en las comisiones del Senado. Si bien este informe tiene un alcance mucho más amplio que aquel en el cual se circunscriben los proyectos de ley ya citados, ellos no pueden ser ignorados.

Por último, es necesario agradecer a quienes han colaborado en la elaboración de este informe, ya sea especialistas nacionales o internacionales que la Comisión de Glaciares del Instituto de Ingenieros consultó para estos fines.

3. LOS GLACIARES EN CHILE Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO

3.1. DEFINICIÓN DE GLACIARES

Entre el 97 y 98% del total de agua existente en el planeta¹ se encuentra principalmente en océanos con una constitución salina que la hace difícilmente utilizable para su consumo directo. El porcentaje restante es agua dulce, de la cual el 75% está presente en estado sólido en glaciares y casquetes polares. Si bien el grueso del agua dulce está en forma de hielo en distintas partes de la tierra, su contribución a los sistemas hídricos ocurre de manera gradual,

¹ Ministerio de Obras Públicas (2016), Atlas del Agua Chile, DGA.

en función del derretimiento que experimentan los hielos a lo largo del tiempo, con las fluctuaciones propias como consecuencia del clima.

Conforme a la publicación "Glaciares de Chile"² los glaciares de montaña en el mundo (todos aquellos glaciares, excluidos los casquetes polares y Groenlandia), tienen un área aproximada de 785.000 km² y representan el 0,5% del hielo de la superficie terrestre. En el caso chileno, hay una superficie aproximada³ de 23.000 km² de este tipo de glaciares, un 3% del total en el mundo; la que es monitoreada por la Unidad de Glaciología de la Dirección General de Aguas creada el 2008 (RES. DGA N°1043 de 30 de abril de 2008).

Tal como se verá a continuación, no existe en el mundo, tanto académico como gubernamental, una definición única de glaciares. A continuación, se analizarán algunas de las definiciones actualmente en uso.

En el documento "Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana"⁴, se definen ocho tipos distintos de glaciares, en función de su ubicación, movimiento y forma; indicando para ellos de forma genérica que corresponden a *"una masa de hielo que se origina en la tierra en contraposición al hielo marino, que suele tener una superficie mayor que una décima parte de un kilómetro cuadrado (10 ha)"*.

La definición considerada el 2009 para un glaciar en el documento⁵ "Estrategia Nacional de Glaciares" de la Dirección General de Aguas, consistente con aquella propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), es:

"Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrada por los elementos topográficos que la rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar".

En esta definición se plantea que la masa de hielo "fluye pendiente abajo", cuando en realidad existen glaciares que en vez de fluir sólo muestran⁶ "evidencias de deformación" o "evidencias de movimiento pasado". Otra de las dificultades de esta definición, es que la nieve invernal o estacional a veces también muestra propiedades de flujo.

² Ministerio de Obras Públicas (2014), Glaciares de Chile, DGA.

³ Ministerio de Obras Públicas (2014), Glaciares de Chile, DGA.

⁴ Trombotto D. et al (2014), Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana, Vazquez Mazzini Editores, Argentina.

⁵ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

⁶ Trombotto D. et al (2014), Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana, Vazquez Mazzini Editores, Argentina.

De forma de resolver las dificultades que presenta la definición del IPCC antes indicadas, a continuación se plantea una definición operativa⁷ que “esté fuera de la discusión académica, práctica y fácil de aplicar”, la que permite incorporar tanto los glaciares visibles como los de roca:

“Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por periodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea). O cualquier superficie de terreno con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo”.

Este mismo documento indica que existirían “sesgos menores”, ya que podrían no incluirse algunos glaciares reconocidos como tales (como los muy pequeños), o al contrario incluir algunos cuerpos que no corresponderían a glaciares (como los glaciares de roca inactivos o fósiles).

Tal como se indicó anteriormente, existen muchas formas que han adoptado estas masas de hielo sobre la tierra, adaptándose a la topografía de los lugares que ocupan y a su vez modificándolos, en la medida que el clima ha tenido cambios significativos (más allá de lo estacional de cada año). Esto hace que los glaciares sean únicos y particulares al lugar donde están ubicados. Dado lo anterior, consideramos que es difícil caracterizar la morfología de un glaciar y su interacción con los otros sistemas ecológicos circundantes, si no es por medio de un trabajo específico y dedicado a esa área.

3.2. FORMACIÓN Y TIPOS DE GLACIARES

Para entender el comportamiento de los glaciares hay que remontarse a los distintos períodos de glaciación que han afectado la tierra, siendo el más reciente hace 10.000 años atrás⁸, el que dejó aproximadamente un 30% de la superficie terrestre cubierta con masas de hielo, lo que se compara con sólo un 10% hoy en día. En la medida que las temperaturas en la tierra han aumentado, estas masas de hielo han comenzado a retroceder, tomando distintas formas en función del lugar donde se ubican, así como a consecuencia del clima del lugar. Como resultado de este proceso, hoy se presentan una serie de ambientes en la corteza terrestre, los que en la zona austral y en algunas cotas de la cordillera, se pueden clasificar como ambientes periglaciales o glaciales, en los cuales el agua se encuentra en distintos estados.

Un ambiente periglacial (definición “Andina⁹”) es definido como un terreno por encima del bosque si éste existe, donde dominan los procesos de congelamiento y descongelamiento afectando las rocas y la parte superior del suelo; existiendo en la profundidad presencia

⁷ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

⁸ Kuskuy T. (2009), Climate Change Shifting Glaciers, Deserts, and Climate Belts, Facts On File.

⁹ Adaptación de la definición hecha en Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana.

permanente de terreno perenne congelado o permafrost. El permafrost¹⁰, por su parte, es el suelo o roca, incluyendo hielo y materia orgánica que permanece a una temperatura de 0° C o menos, por lo menos dos años consecutivos. Aproximadamente¹¹ un cuarto de la superficie terrestre del globo experimenta condiciones periglaciales, dentro de las cuales, en Chile las Regiones de Aysén y Magallanes, sectores altos de la Región Metropolitana y otros lugares similares, son ejemplo de este tipo de ambiente.

Un ambiente glacial¹², por su parte, se entiende como aquel cubierto por glaciares u otras formas de hielo o nieve perenne. Se deben entender los glaciares como sistemas¹³, con ganancias y pérdidas de agua, interactuando con otros sistemas, tales como la atmósfera, los océanos, ríos y la morfología de los terrenos.

Los glaciares se clasifican en función del estado en que se encuentran, lo que tiene relación con su evolución a lo largo del tiempo como consecuencia del clima y la geografía de cada lugar y la interacción con otros sistemas.

¹⁰ Adaptación de la definición hecha en la Guía Terminológica de la Geociología Sudamericana.

¹¹ French H. M. (2007), *The Periglacial environment*, John Wiley & Sons.

¹² Wainstein P. et al (2018), *Los Glaciares Rocosos (glaciares de escombros) – Crioformas aún cotidianamente confundidas*, Revista Minerales, Edición 289.

¹³ Benn D. I. y Evans D. J. A. (2010), *Glaciers & Glaciation*, Hodder Education.

Figura 1: Clasificación Esquemática de Glaciares



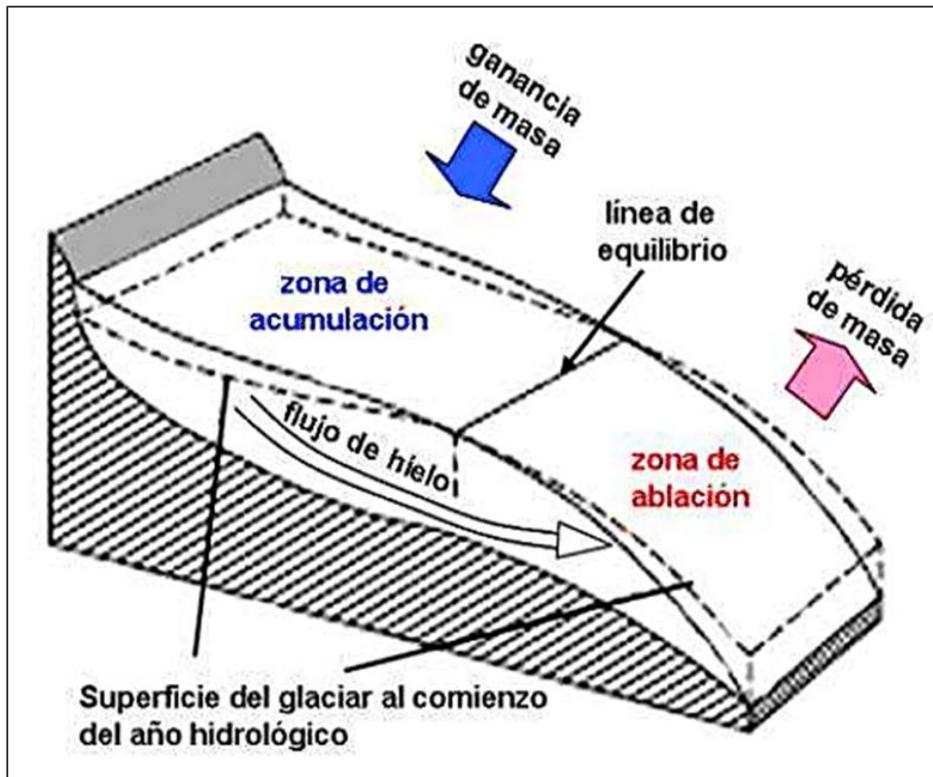
Fuente: Presentación del Dr. Gino Casassa, Instituto de Ingenieros, 31 de agosto, 2017.

La Figura 1 presenta una clasificación de glaciares presentada por el Dr. Gino Casassa¹⁴. Cada uno de estos tipos de glaciares tendrán un comportamiento distinto frente al cambio climático, más allá de las fluctuaciones propias de temperaturas estacionales. Aquellos totalmente descubiertos (blancos descubiertos) tendrán tasas de derretimiento altas, respecto de aquellos que están totalmente tapados por detritos rocosos, cuyo derretimiento será a tasas más bajas. Los glaciares blancos que comienzan gradualmente a acumular detritos o partículas en su superficie, debido al color oscuro del detrito, aumentan sus tasas de derretimiento como consecuencia de la disminución del albedo de su superficie y la mayor absorción de la energía solar. Sin embargo, cuando el manto de detritos es de un espesor suficiente, éste actúa protegiendo el manto de hielo, aislándolo del intercambio de calor con el medio externo y reduciendo su derretimiento.

En la Figura 2 se ilustran las distintas partes de un glaciar referidas a uno del tipo "blanco descubierta".

¹⁴ Casassa G. (2018), Ley de Glaciares un esperado acuerdo entre perspectivas ambientales y productivas para Chile, Revista Chilena de Ingeniería, Anales ICh. Vol. 130, Nº 1.

Figura 2: Partes de un Glaciar Blanco Descubierto



Fuente: Gualco L. (2018). Caso de estudio: Glaciar 12 del volcán Antisana. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

La zona de acumulación del glaciar es la que, debido a las condiciones climáticas, permite que en el largo plazo se presente un balance entre los procesos de acumulación y ablación positivo y, de este modo en esa zona, el glaciar gane masa de nieve, la que se va compactando gradualmente hasta convertirse en hielo junto con desplazarse según la pendiente. La zona de ablación será, por el contrario, donde el glaciar en su balance neto de largo plazo entre acumulación nival y ablación resulta negativo perdiendo parte de su masa.

3.3. GLACIARES EN CHILE Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO

El detalle de la cantidad de glaciares existentes en Chile y su superficie es tratado en distintos documentos oficiales, entre ellos la "Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos" (2009), "Glaciares de Chile" (2014) y el "Atlas del Agua" (2016); todos ellos de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas.

La importancia del documento de la "Estrategia Nacional de Glaciares" de la DGA, es que uno de los objetivos planteados fue¹⁵, "definir una línea de base glaciológica para Chile", junto con realizar las principales definiciones a considerar en el tema. Los inventarios

¹⁵ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

presentados en dicho documento están basados en múltiples estudios¹⁶ realizados entre los años 1979 al 2009, basados cada uno de ellos en imágenes y/o fotografías aéreas tomadas entre 1955 y el 2008. El inventario de glaciares en ese estudio no incorpora la superficie de los glaciares de roca¹⁷, habiéndose limitado a reconocer e identificar un total de 1.522 glaciares¹⁸ de roca.

Previo a presentar el catastro de los glaciares hechos por la DGA, es necesario hacer algunos comentarios respecto de la tasa de retroceso y/o disminución de volumen y superficie; sobre todo debido a la tendencia antes mencionada, respecto a que el cambio climático los está afectando de diferente forma dependiendo de su ubicación geográfica. La variación del tamaño de los glaciares, en general, se estudia en base a información basada en fotografías terrestres, aéreas y satelitales, pero debe ser considerada con cautela, ya que esta información muestra la superficie y no el volumen del glaciar, que es la variable clave¹⁹. Al respecto resulta de interés citar a Dussaillant et al²⁰ quienes señalan que, si bien la reducción de superficie de los glaciares Andinos está bien documentada, la magnitud de la pérdida de masa es debatible.

La disminución en el tamaño de los glaciares se mide ya sea en metros anuales de retroceso del frente expuesto de la zona de ablación o la variación de la superficie del glaciar; registrándose a modo de ejemplo en el caso del glaciar Juncal Sur en la cuenca del Maipo, un retroceso de 50 m/año en el período 1955 – 1997. El retroceso de los glaciares hace que la línea base definida por la DGA sea sólo una referencia, la que en el mediano plazo se verá modificada por procesos de derretimiento del glaciar, lo que, debido al cambio climático, va dejando expuesta una superficie de terreno libre en la medida que el tiempo transcurre.

En la Figura 3 se ilustra el caso del glaciar San Rafael, el que ha tenido procesos de retroceso y avance a tasas de 200 m/año entre 1935 y 1945, mostrándose en esta foto cambios hasta el año 2007; pudiendo verse una nueva gran área expuesta sin glaciar.

¹⁶ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

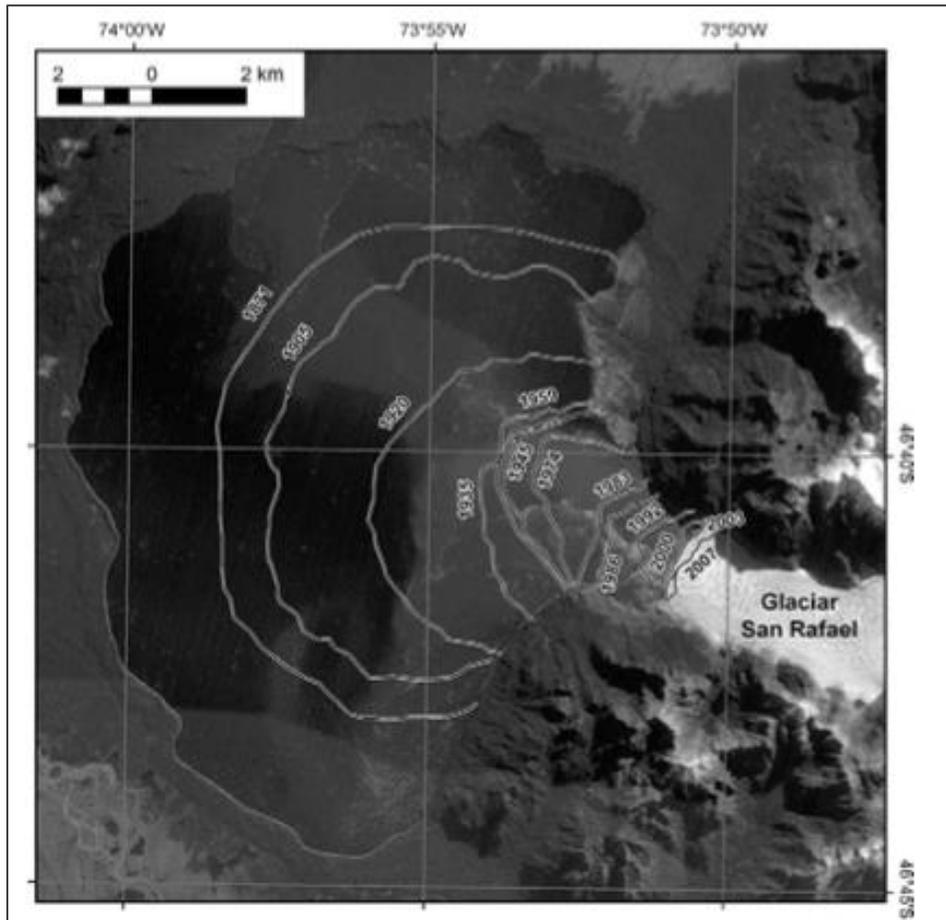
¹⁷ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

¹⁸ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

¹⁹ Ministerio de Obras Públicas (2014), Glaciares de Chile, DGA.

²⁰ Dussaillant I., Berthier E., Masiokas M., Hugonnet R., Favier V., Rabatel A., Pitte P. y Ruiz L. (2019), Two decades of glacier mass loss along the Andes; *Nature Geoscience*, Vol 12.

Figura 3: Variaciones en la Superficie, Glaciar San Rafael

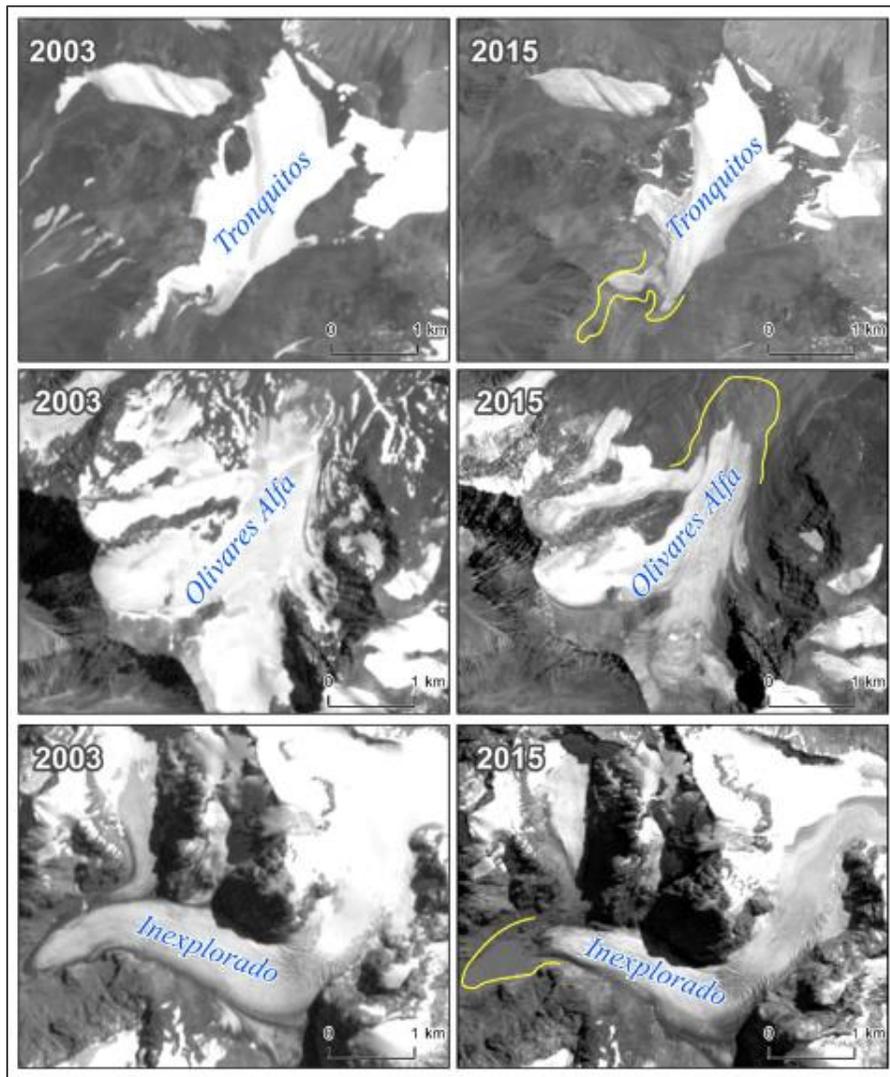


Fuente: Gonzalo Barcaza et al.

Un informe más reciente hecho en base a fotografías aéreas tomadas después del año 2000, muestra una serie de fotografías entre el 2001/2003 y el 2015, revelando variaciones²¹ en distintos glaciares a lo largo de Chile. Conforme a los autores del referido estudio, a lo largo del país existen distintos comportamientos de los glaciares como consecuencia del cambio climático, donde en algunas zonas han permanecido estables (Patagonia y Tierra del Fuego), mientras que en otras han mostrado retrocesos importantes; como se ilustra en la Figura 4 para el Glaciar Tronquitos cercano a Copiapó, Olivares Alfa en el Maipo e Inexplorado en Palena.

²¹ Barcaza G. et al (2017), Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America, *Annals of Glaciology* 58, Cambridge University Press.

Figura 4: Variaciones de la Superficie de Diferentes Glaciares en el Tiempo



Fuente: Gonzalo Barcaza et al.

Conforme a la Estrategia Nacional de Glaciares existen en Chile cuatro principales zonas glaciológicas; esto dada la extensión del país de más de 4.000 km, con diferencias de elevación desde el nivel del mar hasta cumbres andinas superiores a los 6.000 m. Estas corresponden ²² a Norte, Centro, Sur y Austral; cada una de ellas con características de clima y morfológicas bien marcadas. Los glaciares en el norte de Chile están ubicados en la cordillera en altas cotas, mientras que, en el sur del país, estos alcanzan a llegar al mar²³.

²² Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

²³ Barcaza G. et al (2017), Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America, *Annals of Glaciology* 58, Cambridge University Press.

En el documento antes citado, se inventariaron²⁴ 3.763 glaciares, con una superficie de 18.783 km². A la suma anterior, se le debe agregar un total²⁵ de 2.280 km² de glaciares no inventariados, llegando a un total de 21.063 km². La información entregada en el Atlas del Agua, con información más reciente y aprovechando imágenes satelitales, es levemente superior alcanzando un total de 23.641 km². De acuerdo con la Estrategia Nacional de Glaciares, resumiendo una serie de tablas contenidas en ella con notas aclaratorias de los estudios considerados y las dificultades metodológicas de cada estudio, las 4 zonas definidas contienen las siguientes superficies de glaciares según se muestra en la Tabla 1, las que corresponden a la²⁷ "Síntesis nacional de los inventarios y sus características".

Tabla 1: Distribución Geográfica de Glaciares en Chile

Zona	Regiones / Lugar	Número de glaciares	Área (km2)
Norte A	I, II, III y XV regiones.	59	67
Norte B	IV región.	214	47
Norte C	Glaciar Cerro Volcán.	1	0
Centro	Ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal, Tinguiririca, Mataquito y Maule.	1.334	878
Sur A	Ríos Itata, Bío Bío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno.	94	209
Sur B	Río Petrohué, Maulín, Chamiza y Volcán Mahuida.	23	146
Austral A	Campos de Hielo Norte y Sur.	110	13.612
Austral B	Península Muñoz Gamero y Gran Campo Nevado, Isla Riesco, Monte Sarmiento, Isla Santa Inés, Cordillera Darwin, Isla Hoste.	1.801	3.757
		3.636	18.716

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla no incluye una serie de glaciares inventariados por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA en 2009²⁸, con los cuales la cantidad total de glaciares inventariados en Chile a esa fecha llegaba a una cifra de 19,686 km². De igual forma esta tabla no incluye los glaciares de roca, los que se habrían dejado fuera debido a "limitantes metodológicas" en la

²⁴ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

²⁵ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

²⁶ Cifra que se compara con la indicada en el libro Glaciares de Chile (2016); donde se indica una superficie de 23.000 km², sin indicarse en este libro la fuente de la información.

²⁷ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

²⁸ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

forma de medir sus áreas²⁹. A lo anterior se suma, conforme lo reconoce el mismo documento Estrategia Nacional de Glaciares de la DGA, el hecho que el catastro está hecho en función de distintos trabajos, ejecutados en momentos del tiempo diferentes, con lo cual lograr una base de datos consistente es complejo.

Tal como se puede observar en la tabla anterior, si se descuentan las zonas australes y el sur del país, queda una superficie de unos 992 km² – que representan un 5% del total de los glaciares catastrados – de los cuales el 89%, es decir unos 883 km² están ubicados entre el Río Aconcagua y el Maule; zona de gran importancia económica para el país en términos de actividades agrícolas, vinícolas y mineras, además de la presencia de ciudades que acogen a más de un tercio de la población del país.

Conforme a un estudio presentado en la revista del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile³⁰, de un total de 23.600 km² de glaciares, un 80% de ellos se encuentran dentro de un Parque Nacional. A la cifra anterior hay que sumar los glaciares que se encuentran en alguna Reserva Nacional o en algún Monumento Nacional, lo que representa poco más que un 4%³¹, con lo cual se llega a que un total aproximado de 84% de la superficie de glaciares en el país está incluida en algún Parque o Monumento Nacional, o en alguna Reserva.

En el artículo³² “Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America” publicado el 2017, se presenta, conforme a lo que señalan sus autores, “el primer inventario completo de glaciares de Chile”, basado en información satelital tomada entre 2000 y 2003³³ desde el United State Geological Survey (USGS). Conforme a lo anterior, este catastro estaría más actualizado que la línea base hecha por la DGA en el documento del 2009, cuyos estudios fuente son fotografías aéreas tomadas entre 1955 en adelante, hasta el 2008.

El inventario presentado incluyó glaciares descubiertos, cubiertos y de roca, indicando una superficie total estimada de³⁴ 23.708 km², con un potencial error de 1.185 km² (5%). Esta cifra difiere en un +13% respecto del catastro de la DGA (21.063 km²) y, es prácticamente similar a la presentada en el Atlas del Agua (23.641 km²), lo que demuestra que diferentes fuentes de datos (por ejemplo, fechas de las imágenes satelitales) y métodos, producirán números distintos. En este plano es importante destacar que, dadas las características de los

²⁹ Ministerio de Obras Públicas (2009), Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos, S.I.T. N° 205, Dirección General de Aguas, Santiago.

³⁰ Segovia A. (2015), Glaciares en el Sistema nacional de Áreas Silbestres Protegidas por el Estado (SNASPE), Investig. Geogr. Chile.

³¹ Segovia A. (2015), Glaciares en el Sistema nacional de Áreas Silbestres Protegidas por el Estado (SNASPE), Investig. Geogr. Chile.

³² Barcaza G. et al (2017), Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America, Annal of Glaciology 58, Cambridge University Press.

³³ Barcaza G. et al (2017), Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America, Annal of Glaciology 58, Cambridge University Press.

³⁴ Valor que resulta ser similar al del libro Glaciares de Chile (2016).

glaciares, sus lugares de ubicación y comportamiento en el tiempo, sólo un trabajo de terreno y de gabinete dedicado a esa área específica, será capaz de determinar la morfología del lugar de manera detallada para el uso que fuera necesario.

3.4. GLACIARES EN CHILE Y CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático ha jugado un rol significativo en la disminución de la masa de los glaciares en el mundo, incluyendo Chile. Algunos científicos consideran que el retroceso de los glaciares debido al cambio climático habría comenzado con la revolución industrial alrededor del año 1760 y el significativo aumento del uso del carbón en la generación de energía.³⁵

La pérdida de masa en algunos glaciares ha sido dramática. La foto de la NASA³⁶ que se reproduce en la Figura 5 ilustra con claridad esta situación.

Figura 5: Cambios en el glaciar Muir; Alaska en un lapso de 60 años



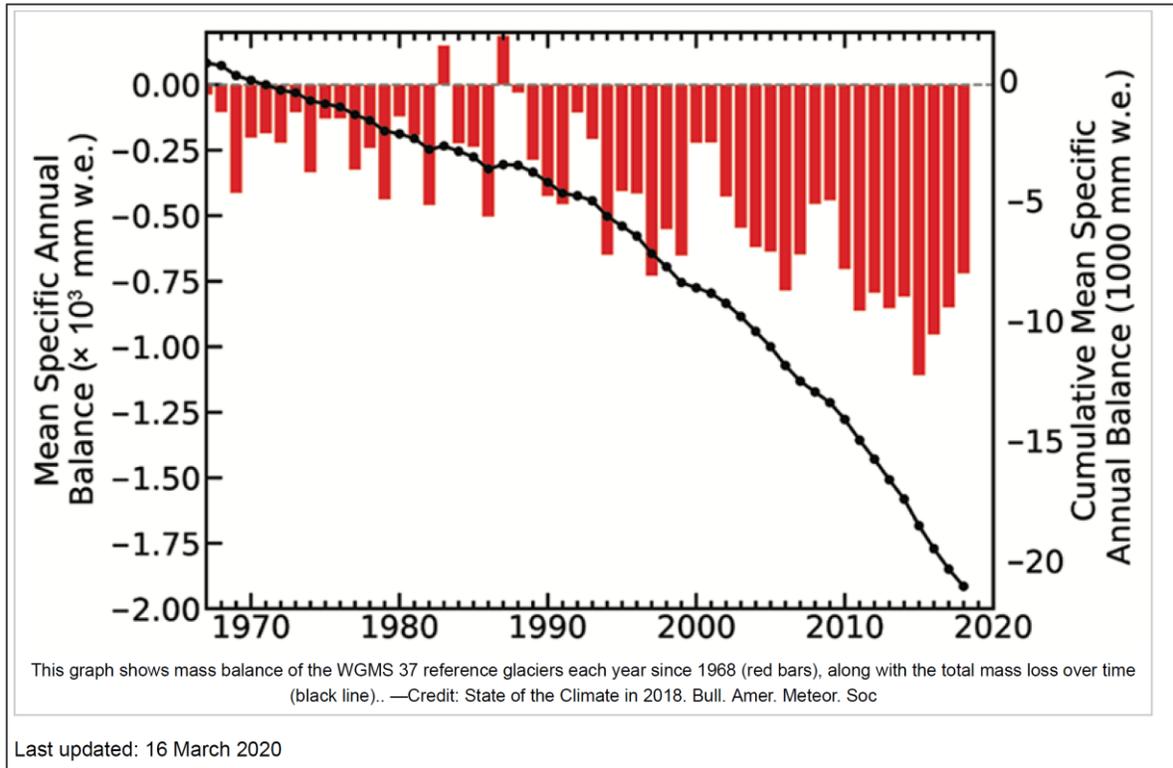
Fuente: NASA

Sin embargo, es a fines del siglo XX y comienzos del siglo XXI donde se empieza a observar un aumento en la tasa de pérdida de masa de los glaciares según se observa en la Figura 6.

³⁵ National Snow and Data Center (2020); Advancing knowledge of Earth's frozen regions

³⁶ NASA, Climate 365; www.nasa.gov

Figura 6: Cambios en la masa de los 37 glaciares del WGMS³⁷



Reconociendo el impacto del cambio climático en diversos aspectos de nuestra vida cotidiana y en particular en la pérdida de masa de los glaciares, la pregunta que formulan tanto quienes están en la posición de proponer políticas públicas como muchos científicos e investigadores es ¿qué ocurrirá en los próximos 100 años?

El Instituto de Ingenieros preocupado del Cambio Climático se abocó a estudiar el tema el año 2013. Los estudios y conclusiones de este esfuerzo fueron recopilados en el informe: Cambio Climático; Percepciones e Impactos para Nuestra Economía. Se analizaron los posibles escenarios futuros y las posibles consecuencias para el país, incluyendo los desafíos a enfrentar en materia de adaptación. Han pasado más de 7 años desde la elaboración de dicho informe y la cantidad de información científica disponible, las herramientas de análisis de información, así como las herramientas de modelación han progresado enormemente. También se puede señalar de los recursos destinados a la investigación han aumentado significativamente lo que permite hoy día tener un mejor conocimiento del fenómeno, y, por lo tanto, entre otras cosas, evaluar de mejor forma el impacto del cambio climático en los glaciares.

³⁷ WGMS (2020)– The World Glacier Monitoring Service monitorea cambios en más de 100 glaciares alpinos en el mundo. Cuarenta y dos de estos glaciares son clasificados como referentes en el cambio climático ya que cuenta con más de 30 años de información.

En los últimos años distintos investigadores han desarrollado diversos ejercicios de modelación del cambio climático en Chile. Los resultados varían entre estos distintos ejercicios, ya sea por la diferencia en los escenarios modelados, por la diferencia de modelos utilizados, así como por las condiciones de borde consideradas. Sin embargo, cualquiera sea el autor que se considere, todas las modelaciones concluyen que habrá un aumento importante de las temperaturas en distintas zonas de nuestro país con una disminución importante de las precipitaciones salvo en la Patagonia Sur.

Con el objeto de ilustrar lo anterior, se analiza, en primer lugar, los resultados de dos trabajos científicos que realizan proyecciones del cambio climático en nuestro país: los trabajos realizados por (CR)² y Charles JR Williams de la Universidad de Reading en el Reino Unido.

El primero de ellos es el trabajo Simulaciones Climáticas Regionales³⁸ realizado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² de la Universidad de Chile que hace proyecciones de temperatura y pluviometría para distintas regiones del país. Se presentan en este estudio los resultados de modelaciones para el periodo 2016-2050 para dos escenarios; i.e. un primer escenario, llamado RCP2.6, que considera un forzamiento antrópico del clima consistente con un aumento de la temperatura media del planeta inferior a 2°C, respecto de la era preindustrial. El segundo escenario, RCP8.5, considera que el forzamiento antrópico puede resultar en un calentamiento de hasta 5°C. Las Figuras 7 y 8 presentan los resultados de este estudio utilizando tres tipos de modelaciones MPI-ESM-MR; RegCM4-50km y RegCM4-10km, para los escenarios ya señalados RCP2.6 y RCP8.5.

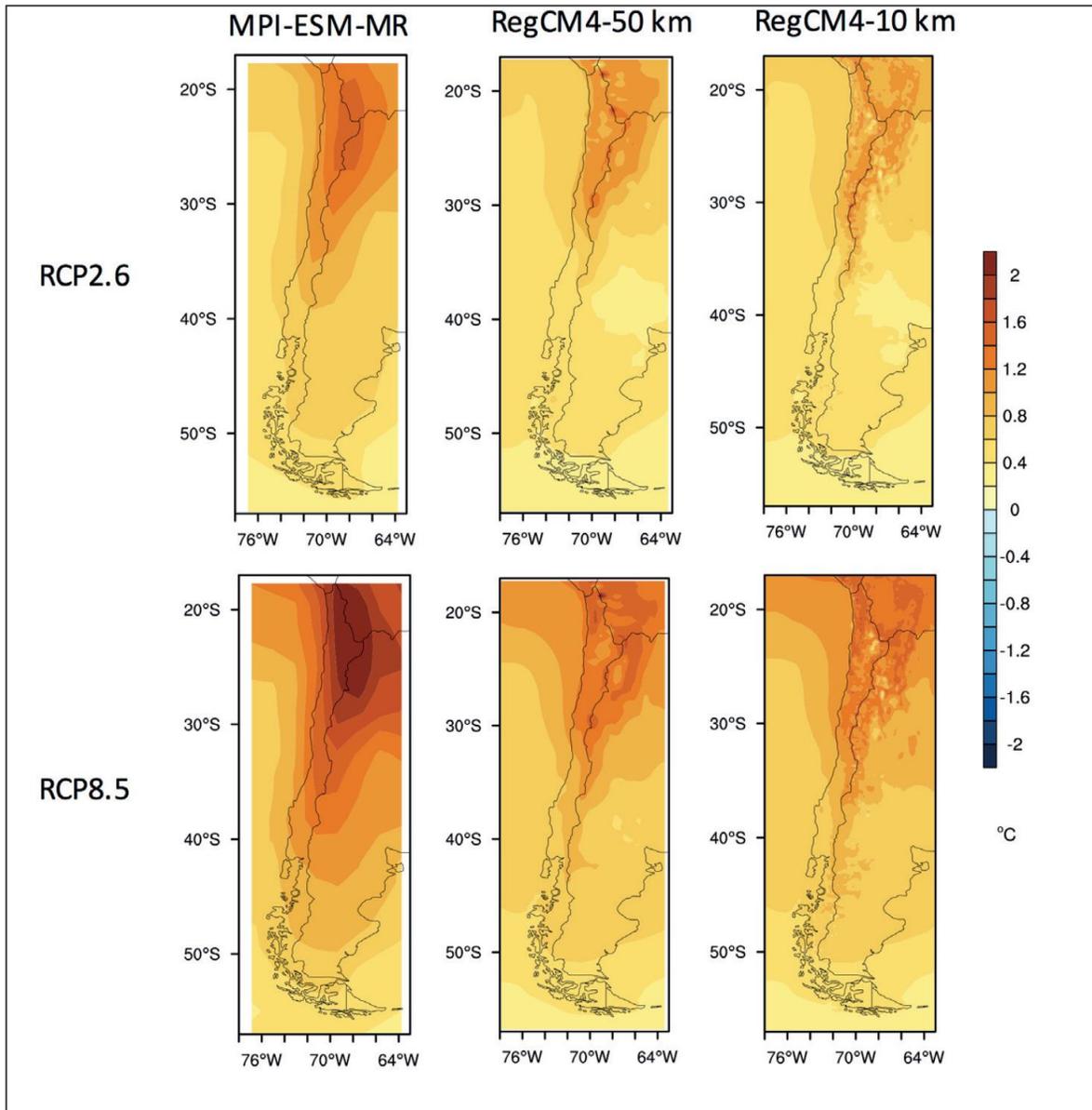
En la Figura 7 se ilustran los cambios de temperatura estimados para el período 2021-2050, respecto de las temperaturas para el periodo 1976-2005. Como se puede observar, todo el territorio nacional muestra un calentamiento que se traduce en un aumento de temperaturas en el promedio anual que oscila entre unos 0.5°C y 2.0°C, dependiendo de los escenarios modelados y de las condiciones de borde utilizadas.

Otros aspectos de interés que conviene señalar: (a) se estima un aumento de los trenes u olas de calor, definidos como 5 o más días consecutivos con una temperatura máxima diaria de 5°C por sobre un valor de referencia. Esto ocurre de forma más pronunciada en invierno en la Cordillera y, (b) se aprecia un aumento de las noches cálidas.

La Figura 8 presenta, por su lado, los cambios estimados en la precipitación para el periodo 2021-2050 respecto del periodo 1976-2005. En general se proyectan disminuciones de las precipitaciones promedio anual, excepto en la Patagonia Sur. Esta reducción no es homogénea a través del año; se estiman disminuciones robustas en invierno, pero un aumento en otoño y primavera.

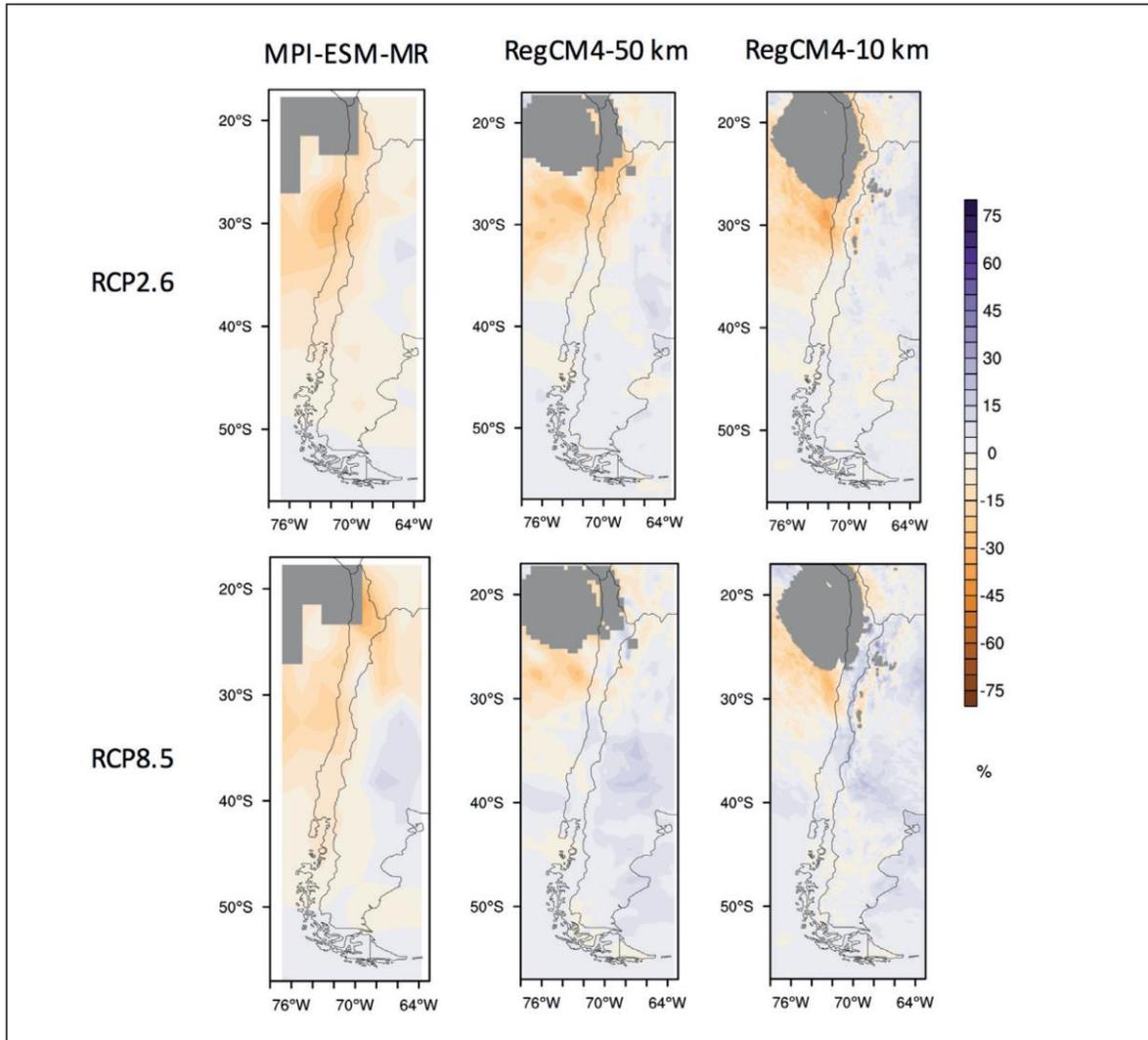
³⁸ Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²; Simulaciones Climáticas Regionales; 2018

Figura 7: Mapas de Cambio de la temperatura (°C) proyectada para el período 2021-2050



Fuente: Simulaciones Climáticas Regionales
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²; 2018

Figura 8: Mapas de Cambio de la precipitación (%) proyectada para el período 2021-2050



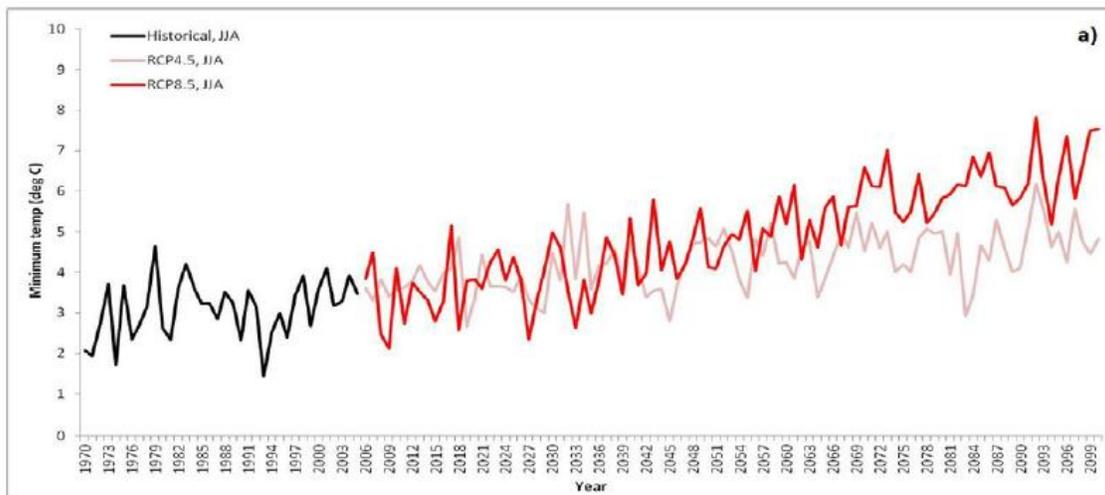
Fuente: Simulaciones Climáticas Regionales
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²; 2018

Las modelaciones realizadas por Williams³⁹, si bien para escenarios diferentes que aquellos considerados por (CR)², coinciden con lo señalado más arriba. Williams estima, aumentos en las temperaturas mínimas en la zona central de Chile de entre 4 y 7°C hacia el año 2100 dependiendo del escenario de forzamiento antrópico modelado.

La Figura 9 presenta las temperaturas mínimas estimadas por Williams para la zona central de Chile para dos escenarios; RCP4.5 y RCP8.5.

³⁹ Williams, CJR; Climate Change in Chile: An Analysis of State-of-the-Art Observations, Satellite-Derived Estimates and Climate Model Simulations; Journal of Earth Science & Climatic Change, 2017.

Figura 9: Temperaturas mínimas proyectadas para la zona central de Chile (1970-2100)



Fuente: Climate Change in Chile: An Analysis of State-of-the-Art Observations, Satellite-Derived Estimates and Climate Model Simulations; Charles JR Williams; Journal of Earth Science & Climatic Change, 2017.

De estas proyecciones se puede concluir que el cambio climático tendrá, sin lugar a duda, un impacto sobre los glaciares andinos, particularmente sobre aquellos en la zona central. En base a estos pronósticos, se puede señalar que se mantendría la tendencia histórica que se ha observado en los últimos años respecto del retroceso de los glaciares (ver sección 2.3 de este documento). La pregunta que por el momento no tiene respuesta es la velocidad de retroceso de los glaciares de la zona central y la magnitud de este retroceso, así como la contribución futura de los glaciares a la escorrentía superficial.

Con el objeto de explorar la respuesta a esta pregunta es de interés referirse a dos publicaciones específicas: Two decades of glacier mass loss along the Andes⁴⁰ de I. Dussailant et al y Toward mountains without permanente snow⁴¹ de M. Huss et al.al.

En el análisis realizado por Dussailant et al., que cubre un período que va desde los años 2000/2001 hasta los años 2016/2017 para diversos glaciares de la cordillera de los Andes, se observa una pérdida de masa importante de éstos tal como se reproduce en la Tabla 2.

⁴⁰ Dussailant, I, Berthier, E, Brun, Masiokas M, Hugonnet R, Favier V, Rabatel A, Pitte P, Ruiz L; Two decades of glacier mass loss along the Andes; Nature Geoscience; 2019

⁴¹Huss M, Bookhagen B, Huggel C, Jacobsen D, Bradley RS, Clague JJ, Vuille M, Buytaert M, Cayan DR, Greenwood G, Mark BG, Milner AM, Weingartner R, Winder M; Toward mountains without permanent snow and ice AGU Publications, 2017

Tabla 2: Pérdidas de masa por año para diversos glaciares de los Andes (Dussaillant et al.)

Region	Total glacier area (km ²)	Glacier area measured (%)	Mean number of DEMs	Survey period (yyyy/mm) ^a	Mass balance	
					(m w.e. yr ⁻¹)	(Gt yr ⁻¹)
Inner Tropics	174	80	11.5	2001/08-2016/11	-0.37 ± 0.25	-0.1 ± 0.0
Outer Tropics	1,967	94	17.3	2001/06-2017/03	-0.42 ± 0.23	-0.9 ± 0.5
Desert Andes	387	97	31.5	2000/11-2017/09	-0.12 ± 0.17	-0.1 ± 0.1
Central Andes	1,795	97	28.3	2001/08-2017/11	-0.31 ± 0.19	-0.6 ± 0.3
North Patagonia	1,753	96	18.2	2001/12-2017/07	-0.57 ± 0.22	-1.0 ± 0.4
South Patagonia ^b	21,362	70	11.3	2000/10-2016/09	-0.86 ± 0.27	-18.3 ± 5.7
Fuegian Andes ^b	4,053	62	6.9	2000/06-2016/03	-0.48 ± 0.27	-1.9 ± 1.1
Total Andes	31,631	74	12.8	2000/11-2016/10	-0.72 ± 0.22	-22.9 ± 5.9
Tropical Andes	2,271	93	16.9	2001/06-2017/03	-0.42 ± 0.24	-1.0 ± 0.5
Southern Andes	29,360	73	12.4	2000/11-2016/10	-0.75 ± 0.23	-21.9 ± 5.8

Supplementary Tables 1 and 2 give the subperiods. ^aFor a specific subregion, the survey period varies because, for each pixel, the date of the first/last DEM can be different. The survey period is thus the interval from the mean first date to the mean last date of all the DEMs used to extract rate of elevation change (Supplementary Figs. 6 and 7 show the distribution of these start/end dates for each subregion). ^bSRTM DEM is included when computing the final trend.

Fuente: Dussaillant et al, 2019

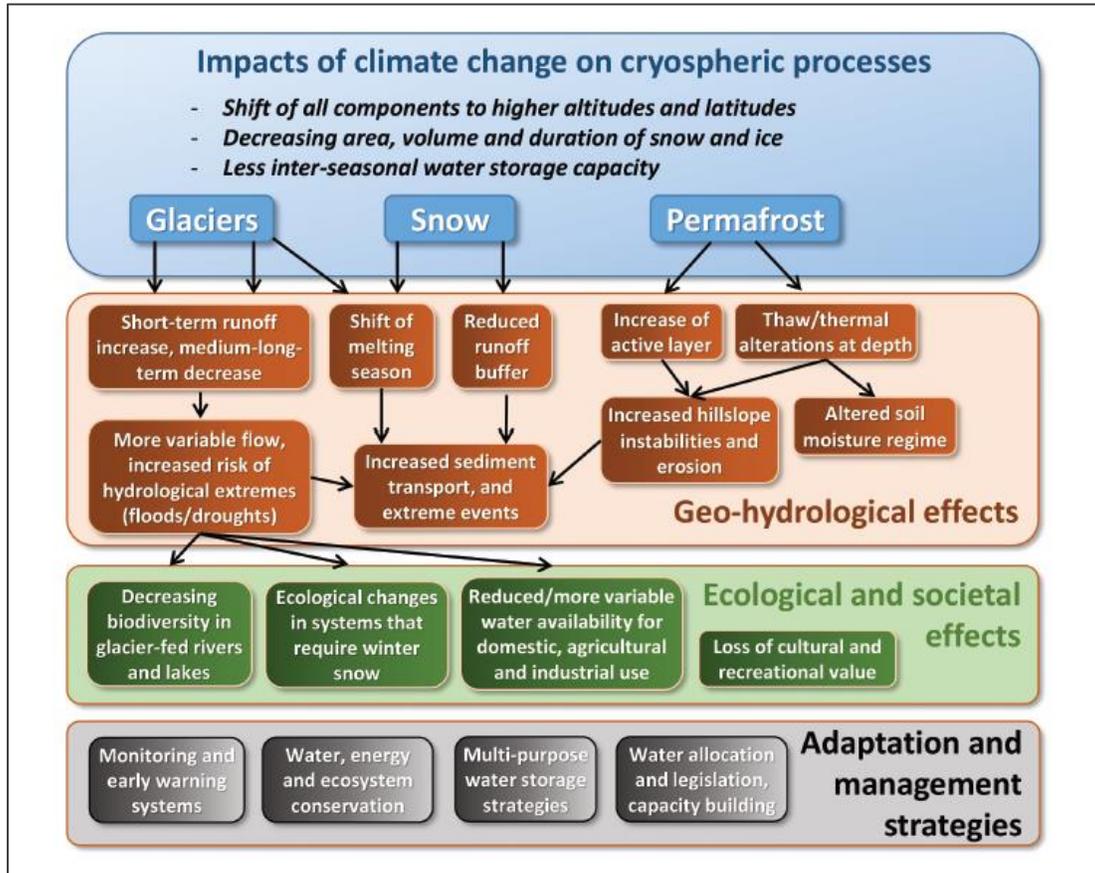
Dussaillant et al. señalan que la contribución de los glaciares a la escorrentía superficial puede descomponerse en dos: (a) la descarga balanceada o estacional desfasada que supone que el glaciar mantiene sus condiciones a través del tiempo; la nieve y hielo que acumula en el invierno se derrite en el verano, es decir, no hay pérdida de masa y, (b) la descarga no balanceada que representa el exceso de descarga por pérdida de masa del glaciar. Señalan que las escorrentías de los ríos San Juan, Mendoza, Aconcagua y Maipo aumentan su tasa de decrecimiento en forma sustancial a partir del año 2009. Los resultados de su investigación sugieren, además, que producto de la pérdida de masa de los glaciares – o descarga no balanceada – tuvo una contribución entre el 3 y 8% en la escorrentía de estos ríos. También señalan que probablemente la contribución de los glaciares a la escorrentía superficial durante los meses de mayor calor fue significativamente mayor a lo señalado precedentemente.

Sin embargo, los glaciares no siempre tendrán la capacidad de entregar el mismo volumen de agua frente a un alza en las temperaturas ambientales. En un principio entregarán cada vez más agua, hasta que el glaciar alcance un tamaño tal en el cual esta contribución llegará a ser máxima. Pasado ese punto, el tamaño del glaciar no será suficiente para sustentar ese nivel de contribución y su capacidad de aportar agua se verá reducida progresivamente.

Los resultados del análisis realizado por Huss et al. concuerdan con lo señalado en el párrafo anterior. Huss et al. señalan, además, que el mundo se encuentra en un período de transición desde montañas con glaciares a una situación donde la nieve y el hielo de las montañas no solo se verá significativamente reducida sino eliminada del todo.

En la Figura 10, se ilustra en forma esquemática los impactos producto del cambio climático previstos por estos autores y su vínculo con la criósfera de montaña.

Figura 10: Impactos del Cambio Climático en la criósfera de montaña y sus consecuencias



Fuente: Huss et al, 2017

Así como es posible concluir que los aumentos de temperatura en la zona central de Chile continuarán producto del cambio climático, también es posible concluir que el rol moderador que juegan los glaciares en las escorrentías de los ríos en la zona central durante los meses de verano irá disminuyendo en el tiempo, sin excluir la posibilidad que este rol moderador pierda relevancia.

Respecto del rol que juegan los glaciares en las escorrentías de los ríos, es interesante señalar, tal como se analiza con más detención en el capítulo 6 de este documento, que en muchos países la discusión hoy en día se ha ido centrando en como adaptarse al cambio climático y, como dicen Huss et al, al eventual retroceso y desaparición de muchos glaciares.

4. LOS GLACIARES COMO RECURSO HÍDRICO ESTRATÉGICO

4.1. INTRODUCCIÓN

La formulación de una política pública orientada a la protección de los glaciares, a partir de su reconocimiento como reserva estratégica de agua dulce es una demanda que se propone por primera vez en el país por la ONG Chile Sustentable el año 2006 en el libro: "Glaciares Chilenos. Reservas Estratégicas de Agua Dulce para la Sociedad, los Ecosistemas y la Economía"⁴². Ese documento presenta un análisis técnico del papel de los glaciares en la hidrología del país y un borrador de proyecto de ley para regular la protección de los glaciares, "como objetos de seguridad estratégica para responder al mantenimiento de los ecosistemas, las necesidades de las poblaciones humanas y las actividades productivas, en especial para la producción agrícola, la generación hidroeléctrica, los procesos mineros, la actividad turística, la preservación de los valores ambientales, escénicos y de los servicios ambientales que prestan para la conservación de la biodiversidad, con el objeto de mantenerlos como reserva de recursos hídricos y proveedores de agua de recarga de cuencas hidrográficas, caudales y napas subterráneas en épocas de verano y períodos de sequía" (artículo 1).

Como se ha señalado anteriormente en el capítulo 1 de este documento, de los 6 proyectos de ley presentados al Congreso, los de mayor interés para ser analizados desde el punto de vista de este informe son: el que corresponde al boletín N° 9364, ingresado el año 2014 por iniciativa parlamentaria y aprobado en la Cámara de Diputados el año 2016 y finalmente desechado por no contar con el patrocinio presidencial y el ingresado por un conjunto de senadores el año 2019, correspondiente al boletín N° 11.876, actualmente en análisis en las comisiones del Senado.

El texto aprobado por la Cámara de Diputados en el primero de estos proyectos (Boletín N° 9364-12) reconoce que los glaciares son "parte del patrimonio ambiental del país, constituyen reservas de agua dulce, cumplen funciones ecosistémicas y proveen servicios ecosistémicos" (artículo 1°). El proyecto define el concepto de "Reserva estratégica glaciar" como "aquel glaciar o conjunto de glaciares relacionados, que constituyan una reserva hídrica relevante para la cuenca donde se ubican y siempre que se trate de una masa terrestre que haya permanecido en estado sólido y cumplan funciones ecosistémicas y provean servicios significativos" (artículo 2°). Asimismo, incorpora un procedimiento administrativo, para declarar dichas "reservas estratégicas glaciares", que establece que la "relevancia hídrica del glaciar o conjunto de se determinará atendiendo su aporte hídrico potencial, priorizándose aquellos glaciares con mayor volumen de hielo, o bien aquellos ubicados en territorios con probada escasez hídrica en el tiempo o los existentes en reservas nacionales".

⁴² Bórquez R, Larraín S, Polanco R y Urquidí J.C (2006). Glaciares Chilenos: Reservas Estratégicas de Agua Dulce. Programa Chile Sustentable.

En forma muy similar, el proyecto de ley actualmente en discusión en el Senado (Boletín N° 11.876-12) tiene por objeto: “la protección de los glaciares, ambiente periglacial y permafrost con el objeto de preservarlos y conservarlos como reservas estratégicas de recursos hídricos, como proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas, para la protección de la biodiversidad, como fuente de información científica y para el turismo sustentable.”

Como se puede apreciar, la afirmación de que los glaciares (y su entorno periglacial) constituyen una “reserva estratégica” de recursos hídricos está en el centro de la preocupación parlamentaria, sin perjuicio de que, como se documenta más adelante, el alcance de esta afirmación no corresponda al rol que juegan los glaciares ni a su comportamiento; sobre todo a la luz del impacto que ha causado y está causando el cambio climático en estos aspectos. Sin lugar a duda, a nivel de los medios de comunicación y de parte de la opinión pública, este argumento puede resultar muy convincente, ya que sugiere que se trata de impedir que se ponga en riesgo en el futuro el suministro de agua a la población, los ecosistemas y que las actividades productivas circundantes colapsen debido a la destrucción de los glaciares. Además, dicha necesidad sería aún más crítica debido al proceso de cambio climático que amenaza la disponibilidad hídrica de la zona central del país.

Así, existe la opinión ampliamente extendida que el abastecimiento hídrico en las próximas décadas dependería de la protección de los glaciares y que cualquier acción que pudiera afectar su aporte comprometería gravemente la sostenibilidad del abastecimiento futuro. Inclusive en los distintos documentos se da como un hecho la existencia de un “consenso técnico”, acerca de este carácter de reserva estratégica hídrica. En el presente capítulo se analiza desde una perspectiva estrictamente técnica los alcances y la validez de dicha afirmación.

En el lenguaje común, el término “reserva estratégica” es utilizado en distintos contextos. Por ejemplo, en economía se emplea este término para referirse a la mantención de stocks de recursos críticos para la sociedad, tales como petróleo, minerales, alimentos y medicamentos, para ser utilizados en emergencias tales como: crisis sanitarias, cortes de suministro de corto plazo, subidas inesperadas de precio, amenaza o el estallido de una guerra, etc., con el objetivo de garantizar el abastecimiento durante un periodo mínimo previamente definido. En estos casos, los recursos almacenados o en reserva, se añaden a los flujos normales disponibles en un momento dado para enfrentar las emergencias. De acuerdo con lo anterior, el recurso almacenado constituirá una reserva estratégica efectiva en la medida que: a) su magnitud esté acorde con la demanda durante la emergencia, considerando su duración e intensidad y, b) esté disponible para ser utilizado cuando se presente la emergencia.

Al respecto cabe hacerse varias preguntas: ¿cuál es la importancia del aporte de los glaciares a los recursos hídricos en el caso de Chile?, ¿se puede sostener que son una “reserva estratégica”?, ¿cuáles serían los impactos en la disponibilidad hídrica que pudieran esperarse

por las faenas y actividades que se desarrollen en su entorno? Y, ¿cuáles serían las políticas más adecuadas para resguardar el interés público asociado a los recursos hídricos susceptibles de ser impactados? En los siguientes párrafos se analiza en general el papel de los glaciares en el ciclo hidrológico, posteriormente se focaliza dicho análisis en la situación que se presenta en el caso de Chile y, finalmente, se evalúa el impacto hídrico de los proyectos e iniciativas que se realizan en las zonas con cobertura de glaciares y se hacen consideraciones acerca de las políticas de protección más adecuadas.

4.2. GLACIARES Y RECURSOS HÍDRICOS. CONSIDERACIONES GENERALES

El caudal de un río, es el resultado de diversos procesos físicos que se inician con la precipitación del agua en la superficie de la cuenca y que incluyen los procesos evaporativos que retornan agua a la atmósfera y otros asociados al movimiento del agua en el suelo y a través de la red de drenaje superficial o subterránea. La velocidad del movimiento del agua en este ciclo se caracteriza por una enorme variabilidad temporal. Mientras en una crecida grandes volúmenes de agua escurren superficialmente en minutos, el flujo de las aguas subterráneas y de hielo pueden movilizarse en escalas de décadas o miles de años. En este contexto, los glaciares, al igual que las aguas subterráneas, cumplen un papel regulador del flujo. En el caso de los glaciares el almacenamiento se produce en forma de hielo y las descargas responden a las leyes termodinámicas que controlan los procesos de derretimiento. Por su parte, en el caso de las aguas subterráneas, el agua se almacena en forma líquida en los acuíferos y las descargas se producen de acuerdo con las leyes de la hidráulica. En un período de varios años el cambio en los almacenamientos resulta poco significativo, respecto al volumen total de agua que escurre en el mismo período, de modo que el caudal medio de largo plazo equivale aproximadamente a la diferencia entre la precipitación media y las pérdidas producidas en los procesos evaporativos (término relativamente estable). Es decir, el caudal medio de una cuenca para un período suficientemente largo depende de la precipitación y los procesos evaporativos y la presencia de glaciares no afecta la disponibilidad media de recursos hídricos. Sin perjuicio de lo anterior, el aporte neto de un glaciar a la escorrentía en los meses que tienen condiciones de temperatura favorables puede ser relevante, lo que se refleja en la distribución estacional del caudal en la cuenca. Así, el régimen hidrológico de una cuenca con presencia de glaciares se caracteriza por presentar un incremento de los caudales en el período de deshielo (fines de primavera y verano), en especial en los años de sequía, cuando los aportes de las aguas subterráneas van en descenso y el manto nival de carácter estacional ha desaparecido.

Para analizar la interacción de los cuerpos de hielo con el ciclo hidrológico resulta conveniente distinguir entre: (a) los glaciares con la superficie de hielo descubierta, (b) los que presentan su superficie cubierta con detritos rocosos y, (c) otras formaciones en las que se observa hielo intersticial o distribuido en lentes formando parte de una matriz de materiales rocosos⁴³. En cada una de estas situaciones el calor transferido a la masa de hielo, y en general los procesos de almacenamiento, de derretimiento y de drenaje son diferentes,

⁴³ En el punto 2.2 se presenta la clasificación general.

afectando de distinta manera el régimen hídrico. De acuerdo con lo anterior, para caracterizar el impacto hidrológico los cuerpos que contienen hielo se pueden clasificar en: a) glaciares descubiertos, con toda su superficie en contacto con la atmósfera, b) glaciares cubiertos, con parte de su superficie cubiertos por detritos rocosos y, c) glaciares rocosos.

Los glaciares rocosos son una mezcla de sedimentos rocosos y hielo, y presentan evidencias de movimiento pasado o presente. Su clasificación, origen y caracterización ha motivado diversos debates entre los especialistas. Para los efectos de este informe conviene distinguir entre los llamados glaciogénicos y criogénicos. Los primeros son formados por la evolución de glaciares cubiertos y se componen en profundidad principalmente por hielo. Por su parte, los criogénicos son crioformas, en que su composición es mayoritariamente formada por detritos (Casassa, 2017) y pueden ser considerados como pertenecientes al ambiente periglacial.

A su vez, en general, el permafrost se asocia a zonas de suelo o roca con hielo que se presenta en forma intersticial, ocupando poros o en lentes, cuñas y venas, y su almacenamiento estacional de agua está limitado a la capa que sufre ciclos anuales de congelamiento y descongelamiento denominada capa activa. El espesor de esta capa depende de factores como la temperatura del aire, presencia de vegetación, drenaje, tipo de suelo y roca (propiedades térmicas del suelo y la roca), contenido de agua, cubierta nival, pendiente y orientación. Si bien el permafrost se encuentra muy extendido en las latitudes elevadas del hemisferio norte (por ejemplo, en Canadá constituye más del 50% del territorio), en la zona andina se observa un permafrost de montaña que presenta una distribución espacial compleja (continua, discontinua o esporádica), dependiendo de factores tales como la elevación, topografía, microclima, granulometría de los materiales de superficie y la cubierta de nieve.

Como se ha señalado, el comportamiento hidrológico de los glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos es significativamente distinto, debido especialmente a las diferentes condiciones y procesos de transmisión de calor intervinientes. Así, por ejemplo, en el caso de un glaciar descubierto en los Andes Centrales en el período de verano, el principal intercambio se realiza a través de la atmósfera y corresponde a la radiación solar de onda corta y a los intercambios por radiación de onda larga, mientras que en glaciares con cubierta detrítica los intercambios en general se realizan por conducción de calor a través del suelo. Esto significa que los glaciares con cubierta detrítica y los glaciares de roca presentan tasas de derretimiento sustancialmente menores que los descubiertos, inclusive en algunos casos la protección que representa la cubierta es de tal magnitud y el derretimiento consecuente tan lento que son procesos de degradación que pueden durar centurias, respondiendo a cambios climáticos más que a la variabilidad de mediano o corto plazo. En la Tabla 3 se presentan a modo ilustrativo el rango de variación de las tasas de derretimiento en períodos de verano según la información de distintos estudios realizados en los Andes Centrales, las que dejan en evidencia las diferencias entre los distintos tipos de glaciares.

Tabla 3: Tasas de derretimiento características en meses de verano (enero-febrero) en glaciares de los Andes Centrales.

Tipo	l/s/ha
Glaciares descubiertos	3,40 – 1,40
Glaciares cubiertos	1,78 – 0,03
Glaciares de rocas	0,07 - 0,03

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de antecedentes de: Peña et al (1977, 1985)^{44, 45}; Marangunic (2013)⁴⁶; Cassasa et al (2015)⁴⁷; y Torres et al (2013)⁴⁸.

El concepto de disponibilidad hídrica está asociado a la gestión de una oferta de agua para abastecer determinadas demandas. Así, la disponibilidad de recursos hídricos se refiere a los flujos de agua que se pueden extraer en forma sostenible en un momento y en un punto dados, sin comprometer objetivos ambientales. Es relevante hacer presente que no solo la magnitud y distribución estacional de las demandas resultan críticos para definir la disponibilidad hídrica sino también su ubicación espacial, ya que ello incide directamente en los aportes disponibles y en las alternativas técnicas de aprovechamiento factibles. Esta consideración tiene la importante consecuencia de determinar el punto en el que corresponde evaluar el papel de los recursos hídricos asociados a los glaciares.

De acuerdo con lo anterior, el papel de los glaciares resulta de interés como reguladores estacionales y/o interanuales del caudal, como sería un reservorio de agua, contribuyendo con recursos de agua durante períodos de sequía y/o en determinados meses que presentan una situación de escasez. Además, el punto donde corresponde evaluar dichos recursos y, en consecuencia, los eventuales impactos sobre la disponibilidad hídrica, no es inmediatamente aguas abajo de la descarga de la zona glaciar, como lo hacen frecuentemente estudios científicos que no están orientados a evaluar las implicancias en la gestión del agua, sino donde efectivamente existen demandas que deben ser atendidas. Lo anterior es sin perjuicio de que, con propósitos distintos a su aporte a la disponibilidad hídrica (por ejemplo, por fines ambientales, escénicos, etc.), sea de interés evaluar dichos puntos.

⁴⁴ Peña H, y Narbona J. (1978). Proyecto Glaciar Echaurren Norte. Dpto. Hidrología. DGA-MOP.

⁴⁵ Peña H, Vidal F y Escobar F. (1985). Estimación de Tasas de Derretimiento de Nieve. VII Congreso Nacional. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.

⁴⁶ Marangunic C. (2013). Glaciares, medio ambiente y proyectos de desarrollo. Presentación Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales. Senado, Valparaíso. Chile.

⁴⁷ Casassa G, Apey A, Bustamante M, Marangunic C, Salazar C, y Soza D. (2015) Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile.

⁴⁸ Torres H, Brenning A, y García J-L. (2013). Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos. Rev. Geogr. Espacios Vol. 3, No5.

4.3. EL ROL DE LOS GLACIARES EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL CASO DE CHILE

Sin perjuicio de que la superficie de glaciares se encuentre distribuida ampliamente en todo el territorio nacional, el interés en su incidencia en los recursos hídricos en cuanto tales, se limita a la zona en la que los recursos de agua presentan una situación de escasez, esto es desde la Región de la Araucanía al norte. Más al sur, sin perjuicio de la importancia de los glaciares en la hidrología de las cuencas, la baja magnitud de las demandas hace que su aporte no sea de interés en la disponibilidad de recursos hídricos (con la excepción de los posibles aprovechamientos con fines hidroeléctricos, los cuales por razones diversas no se han hecho efectivos).

En la zona que se extiende desde la Región de La Araucanía hacia el norte, la disponibilidad de recursos hídricos se debe evaluar donde los ríos abandonan la zona cordillerana y entran a los valles, punto a partir del cual se atiende la mayor parte de las demandas. Esos puntos son ampliamente conocidos y normalmente disponen de registros de caudales de larga data que se emplean para la distribución de las aguas entre los usuarios. Por ejemplo, en la cuenca del río Maipo el punto de evaluación y manejo del río se localiza aguas abajo de la junta del río Maipo con el último de sus afluentes principales, el río Colorado, y aguas arriba de las extracciones que permiten abastecer los usos domésticos y agrícolas del valle, en el sector de La Obra.

Por otra parte, los glaciares existentes en la zona altiplánica se localizan principalmente en los conos volcánicos y los caudales de deshielo que generan se infiltran totalmente en las lavas volcánicas localizadas en sus inmediaciones, de modo que contribuyen a recargar las aguas subterráneas que afloran en forma de vertientes localizadas a los pies de los volcanes. En esas condiciones el papel regulador de las aguas subterráneas resulta preponderante en relación con el papel de los glaciares, y en el hecho los registros muestran una enorme estabilidad en los flujos a lo largo del tiempo (décadas). De acuerdo con estos antecedentes la zona que interesa estudiar se extiende entre la región de Copiapó y La Araucanía, y los impactos se deben evaluar en aquellos puntos que definen la disponibilidad de recursos hídricos, según lo explicado.

Un primer indicador de la importancia de las zonas con glaciares en la escorrentía es el porcentaje de superficie cubierta con glaciares que forma parte de la cuenca aportante a los puntos críticos, ya que solo las precipitaciones en esa área pueden contribuir al almacenamiento en forma de hielo y en consecuencia tener un papel regulador de los caudales. Asimismo, resulta de interés como indicador la razón entre el volumen de agua almacenada en forma de hielo y el volumen promedio efluente a nivel de cuenca. Con ese propósito en la Tabla 4 se presentan en 12 cuencas principales localizadas desde el Norte Chico a La Araucanía los valores de: a) Las superficies de las cuencas de montaña hasta el o los puntos de salida al valle, utilizados para fines de evaluación de sus recursos hídricos; b) Los caudales medios que escurren en dichos puntos; c) La extensión superficial de los

glaciares según el inventario de la DGA, incluyendo glaciares blancos cubiertos y rocosos; y d) Sus correspondientes volúmenes de hielo medidos en su equivalente en agua. Adicionalmente se calculan dos indicadores: a) el porcentaje de superficie de la cuenca cubierta por los glaciares, y b) los años de escorrentía media que equivalen al volumen almacenado en forma de hielo. La información base contenida en dicha tabla proviene publicaciones de la DGA.

Tabla 4: Importancia hidrológica de la cobertura de glaciares de cuencas del norte chico y de la zona central

Nombre de la cuenca	Cuenca aportante		Glaciares		Indicadores	
	S (Km ²) (1)	Q (m ³ /s) (2)	S (Km ²) (3)	V (Hm ³) (4)	Sup. Glaciares/ Sup. Cuenca (%) (5)	Años de escorrentía equivalente (6).
Copiapó	7438	2,01	36,9	800	0,5	12,6
Huasco	5521	3,7	31,7	380	0,6	3,3
Elqui	4092	8,48	25,1	280	0,6	1,0
Limarí	3355	11,3	15,1	100	0,5	0,3
Choapa	2019	11,46	6,7	30	0,3	0,1
Aconcagua	2933	47,14	136	2900	4,6	2,0
Maipo	5807	110,3	388	11400	6,7	3,3
Rapel	4307	146,1	292	11500	6,8	2,5
Mataquito	2569	128,4	15	350	0,6	0,1
Maule	2853	145	23	400	0,8	0,1
Bío-Bío	6208	331,9	41	1540	0,7	0,1
Toltén	4349	422	42	1800	1,0	0,1

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los antecedentes que se indican.

(1): Superficie de la cuenca aportante. Fuente: DGA. Balance Hídrico de Chile 1988.

(2): Caudal medio de la cuenca aportante (m³/s). Fuente: DGA. Balance Hídrico de Chile. 1988.

(3): Superficie del área con glaciares (Km²). Fuente: DGA. Atlas del Agua. 2017.

(4): Volumen del agua almacenada en forma de hielo (Hm³). Fuente: DGA. Atlas del Agua. 2017.

(5): Superficie del área con glaciares como porcentaje de la cuenca aportante (%).

(6): Años de escorrentía media del río equivalentes al volumen de agua almacenada en forma de hielo.

De los antecedentes de la Tabla 4 se concluye que el área con glaciares representa una fracción muy reducida de la superficie de las cuencas de montaña, fluctuando en general entre el 0,3 y el 1,0 %. La excepción son las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel, donde llega a un máximo de 6,8%. Así, estando el efecto regulador de los glaciares limitado por las precipitaciones en esa superficie, su incidencia en el caudal a nivel de la cuenca en general debiera resultar pequeño. Asimismo, el volumen almacenado en forma de hielo es pequeño si se lo compara con el caudal que escurre anualmente en los ríos. En efecto, la tabla muestra que el dicho volumen representa en general entre 0,1 y 3,3 años de escorrentía y, en consecuencia, difícilmente pueden considerarse como una "reserva hídrica estratégica de largo plazo". La única cuenca que presenta un valor algo mayor es la cuenca de Copiapó (12,6 años) y corresponde a la presencia de masas de hielo con muy baja interacción con el entorno y bajas tasas de derretimiento.

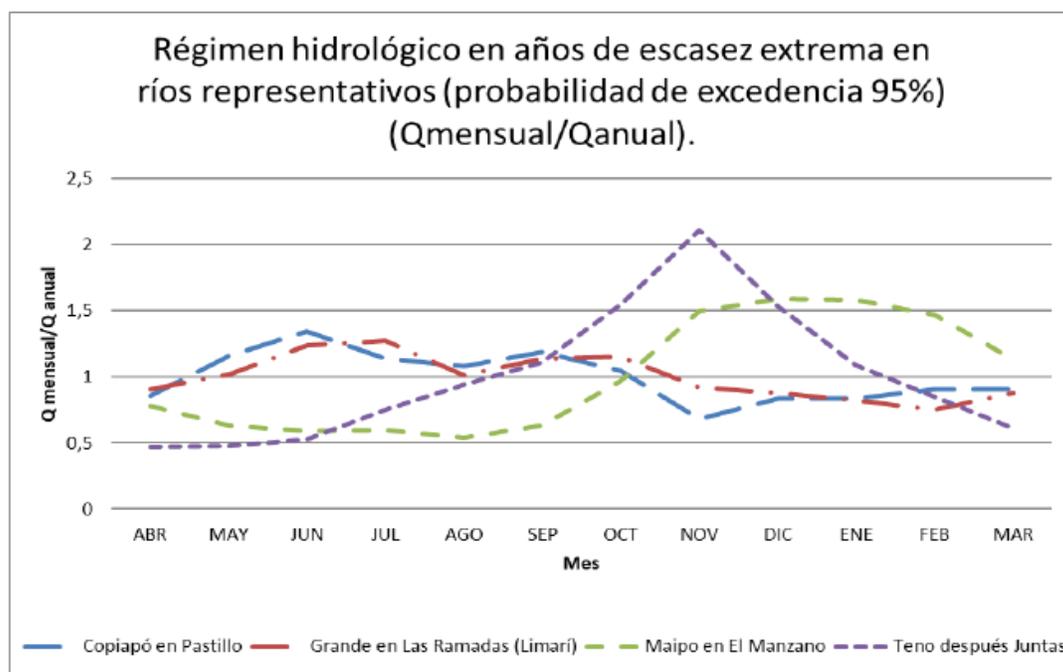
Más allá de la importancia del aporte de las zonas cubiertas por glaciares al escurrimiento medio, interesa investigar la importancia de dichos caudales durante los períodos de sequía cuando se presentan caudales mínimos, y en particular en los meses de verano, que corresponden a los de mayores demandas. Lamentablemente, los antecedentes disponibles no permiten evaluar directamente los caudales generados en las zonas glaciales, ya que no existen registros continuos que muestren los aportes totales de dichas zonas y solo se dispone de investigaciones en algunos glaciares y durante períodos de tiempo muy limitados. Inclusive, en campañas de monitoreo asociadas a investigaciones glaciológicas resulta difícil separar el aporte de los glaciares de los recursos hídricos que se generan de otras fuentes. Una estimación cualitativa de la importancia del aporte de las zonas glaciales en períodos de sequía se puede obtener del análisis del régimen hidrológico representativo de la disponibilidad hídrica de la cuenca en dichos períodos. Por otra parte, una estimación cuantitativa de dicho aporte se puede obtener a partir del conocimiento de los procesos hidrológicos resultante de la investigación en determinados glaciares y su aplicación al conjunto de los glaciares inventariados en la cuenca. A continuación, se presentan ambas aproximaciones.

En Chile Central las zonas con presencia de glaciares contribuyen a la esorrentía durante los meses finales de primavera y verano, considerando que en esos meses el balance de energía hace posible el deshielo. Estos aportes se pueden superponer al caudal originado en el deshielo de las nieves acumuladas principalmente en el período invernal y al caudal que entrega el paulatino vaciamiento de los diferentes acuíferos presentes en la cuenca. La duración del aporte hídrico directo debido al deshielo de las nieves estacionales varía anualmente, pero en años de escasas precipitaciones dura hasta mediados de la primavera (noviembre) o inclusive menos tiempo. Así, en esos años, en ausencia de deshielos asociados a glaciares, los caudales disminuyen a partir de ese momento en forma paulatina hasta el próximo período de precipitaciones del otoño-invierno, respondiendo solo al vaciamiento de las aguas subterráneas. Por el contrario, si existe un aporte relevante de los glaciares ello se refleja en un incremento de los caudales en los meses de verano por sobre los caudales de recesión asociados al aporte del agua subterránea.

Para analizar el impacto cualitativo del aporte de los glaciares se preparó la Figura 11, que ilustra el régimen hidrológico en ríos representativos de las cuencas del norte chico y de la zona central del país durante períodos extremadamente secos (año estadístico de probabilidad de excedencia del 95%). El gráfico entrega los caudales mensuales como porcentaje del caudal promedio anual para esas condiciones. El análisis de dicho gráfico muestra que en los ríos del norte chico (Copiapó y Limarí) los caudales se mantienen o disminuyen en los meses de primavera-verano, comportamiento que es característico de regímenes hidrológicos con aportes solo de aguas subterráneas. Por el contrario, en el río Maipo los caudales crecen en forma significativa entre los meses de noviembre y marzo, lo que se explica por el aporte asociado al derretimiento del hielo en los glaciares, el que se superpone a la paulatina disminución del aporte de las aguas subterráneas. Cabe señalar que, aunque no se muestra en el gráfico, un comportamiento similar se puede encontrar en

los ríos Aconcagua y Rapel, que también presentan una cobertura de glaciares significativa. Hacia el sur (río Teno), se observa que aún en años de bajas precipitaciones existe un caudal máximo en el mes de noviembre, asociado al derretimiento del manto de nieve estacional. Sin embargo, desde ese momento los caudales disminuyen sostenidamente siguiendo la reducción de la cubierta nival y las relaciones típicas que regulan el vaciamiento de las aguas subterráneas, sin que se observen aportes adicionales originados en el derretimiento del hielo en meses de verano. En síntesis, de acuerdo con estos antecedentes, se puede concluir que la disponibilidad hídrica de las cuencas del norte chico y las localizadas hacia el sur no muestran un impacto significativo en los caudales que sea atribuible al deshielo de las zonas cubiertas de glaciares, siendo la excepción las cuencas del Aconcagua, Maipo y Rapel.

Figura 11: Régimen hidrológico en años de escasez extrema en ríos representativos (probabilidad de excedencia 95%) ($Q_{\text{mensual}}/Q_{\text{anual}}$)



Fuente: Elaboración propia, con antecedentes estadísticos DGA.

Como se ha señalado, la evaluación cuantitativa del aporte de los glaciares a la disponibilidad hídrica solo puede realizarse en forma indirecta, aprovechando el conocimiento de la hidrología nival obtenida en investigaciones desarrolladas en algunos glaciares específicos. Al respecto, un primer trabajo con ese objetivo se desarrolló en la cuenca del río Maipo sobre la base de un modelo matemático que simulaba en forma separada la escorrentía de las zonas cubiertas con hielos de las del resto de la cuenca⁴⁹. Dicho modelo estimaba en forma diaria los procesos de: a) acumulación nival, b)

⁴⁹ Peña H y Nazarala B. (1987). Snowmelt-runoff Simulation Model of a Central Chile Andean Basin with Relevant Orographic Effects. Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover (Proceedings of the Vancouver Symposium), IAHS Publ. 166.

derretimiento de la nieve y del hielo considerando variables tales como elevación, orientación y pendiente de las laderas y c) los procesos hidrológicos de infiltración y de regulación propios de los sistemas acuíferos y de los glaciares. Para elaborar dicho modelo se tuvieron en consideración las investigaciones realizadas en glaciares de la zona central y el inventario de glaciares de la cuenca. Los resultados obtenidos para 4 años de simulación se entregan en la Tabla 5. Dicha tabla presenta a nivel de caudales mensuales el porcentaje de escorrentía que se genera en el deshielo de las áreas cubiertas por glaciares. Los resultados muestran que en años con precipitaciones elevadas (1982/83) el aporte de la zona glaciar es comparativamente muy pequeño, con valores que solo alcanzan al 6% de la escorrentía. En años secos el aporte es más relevante, como se aprecia en el año 1981/82, que llega a representar el 34% del escurrimiento (febrero/1982). Además, los resultados permitieron estimar el aporte de los glaciares en el año y mes más crítico del registro histórico (febrero 1969), concluyéndose que en esas condiciones pueden representar hasta un 67% de la escorrentía.

Tabla 5: Incidencia de los caudales mensuales originados en las superficies con glaciares en la escorrentía de la cuenca del río Maipo, como porcentaje del caudal total (%). Estación del río Maipo en El Manzano.

Año	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1981/82	5	9	17	28	34	30
1982/83	0	2	4	6	5	6
1983/84	1	2	4	7	12	15
1984/85	3	8	17	23	25	25

Fuente: Peña y Nazarala (1987)

En esa misma cuenca recientemente se realizó una nueva estimación del aporte de las zonas con glaciares en los meses de verano, extrapolando la información de las tasas de derretimiento obtenidas en nuevas investigaciones en glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos⁵⁰. Los resultados obtenidos para años con escasas precipitaciones fueron de 55% para los meses de enero-marzo, valores muy similares a los del estudio anterior. Cabe destacar que estos resultados son plenamente consistentes con los datos presentados en la Figura 11 a nivel de la cuenca del Maipo y confirman la importancia de los glaciares en la escorrentía de dicha cuenca, lo que se puede extender a las del Aconcagua y Rapel. En las cuencas ubicadas más al norte no existen estimaciones como la realizada para la cuenca del Maipo, pero sin lugar a duda la influencia glaciar, como se deduce de la Figura 11 y de la Tabla 3, es muy escasa. Para esa zona en algunos informes se entregan estimaciones del aporte hídrico de los glaciares, sin embargo, se trata de estimaciones referidas a los caudales en puntos inmediatos al frente glaciar, razón por la cual tienen una representatividad solamente local, y no reflejan la importancia de los glaciares a nivel de la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca.

⁵⁰ Casassa G, Apey A, Bustamante M, Marangunic C, Salazar C y Soza D. (2015) Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile

4.4. EL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS QUE SE REALIZAN EN EL ENTORNO DE LOS GLACIARES.

En las zonas con presencia de glaciares una materia del mayor interés práctico para la gestión de los recursos hídricos es el eventual impacto de la actividad humana que se realiza en su entorno. Dichos impactos pueden estar asociados, por ejemplo, a proyectos productivos, a actividades recreativas como la presencia de ciudades como la ciudad de Santiago. Las actividades más frecuentes en dichas zonas están asociadas al turismo y a la minería, y usualmente corresponden a la construcción de obras de infraestructura y vivienda, y a labores tales como movimientos de rocas por faenas mineras e inclusive, en ocasiones, han significado la remoción de zonas de hielos.

El impacto sobre los recursos hídricos depende en primer lugar de la extensión de la superficie de hielo afectada. En general, las actividades asociadas al turismo y la minería afectan una superficie comparativamente menor de las cuencas, sin perjuicio de que pudieran ser importantes en un contexto local a nivel de una subcuenca particular. En la Tabla 6 se presenta una recopilación de las principales superficies que han sido intervenidas en el caso de Chile por faenas mineras. Como se puede apreciar, en la práctica ellas afectan porcentajes de las cuencas que no alcanzan al 0,2 %.

Tabla 6: Superficies glaciares intervenidas por faenas mineras, en relación con las superficies de las cuencas.

Cuenca	Faena minera	Superficie de la cuenca (de montaña) (Km ²)	Área intervenida o por intervenir (Km ²)	Porcentaje de superficie de la cuenca afectada (%)
Choapa	Los Pelambres	2019	0,2	0,01
Aconcagua	Div. Andina Codelco	2933	2,1	0,07
Mapocho	Los Bronces	620	0,8	0,13

Fuente: Elaboración propia. Antecedentes de área intervenida o por intervenir de Brenning y Azócar^{51, 52}.

En cualquier caso, como se indicó en la sección 3.2 de este documento, estas actividades humanas no inciden en las precipitaciones y en consecuencia la escorrentía de esa pequeña superficie; sólo afecta su distribución temporal. Al respecto cabe preguntarse de qué forma la intervención de la superficie glaciar original afecta procesos relacionados con la generación de la escorrentía tales como los de acumulación y derretimiento del manto nival, evaporación, infiltración, etc. Para ello corresponde evaluar el comportamiento de dicha

⁵¹ Berland A. (2016). Glaciares Chilenos: reservas de agua estratégicas amenazadas. Un resumen de recientes resultados del IPCC, PNUMA y otras investigaciones. Chile Sustentable.

⁵² Brenning, A. y Azócar G.F. (2010) Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. Revista de Geografía Norte Grande, 47.

área con y sin proyecto (o actividad), considerando que la precipitación se mantiene inalterable. Aunque se trata de una evaluación compleja, se puede aceptar que el mayor impacto posible sería la inexistencia del deshielo asociado al área glaciar afectada en los períodos en los que el manto nival de carácter estacional en el lugar desaparece, es decir en los meses de verano de años con baja precipitación invernal.

De acuerdo con lo anterior, desde la perspectiva de los impactos hidrológicos, junto con la superficie afectada, resulta relevante la tasa de derretimiento por unidad de área que se presenta durante los meses de verano en la superficie intervenida. Como se ha señalado (Tabla 3), la tasa de derretimiento presenta importantes variaciones dependiendo del tipo de glaciar y de otras características. Entre estos factores lo más relevante es definir si se trata o no de glaciares recubiertos y, en especial, si corresponden a glaciares de roca; adicionalmente incide el espesor y características de la cobertura de detritos, cuando ella existe. En los ejemplos de tasas de derretimiento presentados en la Tabla 3 se observa cómo ella puede diferir en órdenes de magnitud tratándose de glaciares descubiertos, cubiertos o rocosos por el efecto de aislación de la cubierta de detritos. Inclusive en glaciares rocosos con escasa o nula actividad, los procesos de degradación asociados a cambios climáticos pueden desarrollarse por siglos, y sus aportes anuales pueden ser mínimos⁵³. Adicionalmente, la tasa de derretimiento puede fluctuar en un rango muy amplio debido a factores tales como latitud, elevación, orientación, y pendiente.

La importancia de la reducción de la escorrentía asociada a un proyecto (o actividad) depende de la disponibilidad hídrica a nivel de la cuenca donde se localiza y de las demandas que dejarían de servirse. Para ilustrar el orden de magnitud de los impactos que pudieran originarse en un proyecto determinado, se presenta, en el caso de la cuenca más sensible al aporte de los glaciares (Maipo), el impacto que tendría la intervención (eliminando) una superficie glaciar de 100 hectáreas (1 km²). En ese caso, el aporte de la zona con glaciares se reduciría del orden de un 0,25%. Si el impacto se evalúa desde la perspectiva de las zonas agrícolas que quedarían sin riego, se puede señalar que en un mes de verano la disminución en una hectárea del área cubierta de glaciares equivale a dejar de regar en promedio una superficie del orden de tres hectáreas, es decir en el ejemplo se afectaría el riego de unas 300 hectáreas. Si se trata de la superficie de un glaciar recubierto con material de roca (detritos) el impacto disminuiría en el ejemplo a menos de 200 hectáreas, y en el caso de los llamados glaciares de roca podría disminuir a menos de 10 hectáreas. En el ejemplo dado, considerando que los recursos hídricos de la cuenca superior del río Maipo permiten el riego de aproximadamente 100.000 hectáreas, el impacto afectaría un porcentaje muy menor de la zona agrícola.

Sin perjuicio de lo señalado, es posible imaginar situaciones con niveles de impacto más importantes, por ejemplo, si se tuviera un programa de proyectos o actividades que afectarían a un conjunto amplio de glaciares, o si se presentara una afección a escala regional,

⁵³ Arenson L, Jakob M, y Wainstein P. (2013). Hydrological contribution from degrading permafrost and rock glaciers in the northern Argentinean Andes. Mine Water Solutions 2013, Vancouver, Canada.

como sería la instalación de una fuente de contaminación atmosférica que genere el depósito de material particulado en una extensa zona, afectando el albedo del manto de nieve.

En síntesis, estos antecedentes dejan en evidencia que los proyectos y actividades que se realicen en el entorno de los glaciares siempre debieran ser evaluados ambientalmente, considerando las particularidades de cada caso.

Un factor adicional que es necesario considerar en relación con el impacto de largo plazo de las intervenciones en las zonas con glaciares se refiere al efecto del cambio climático. Al respecto es sabido que por dicho efecto se espera una importante reducción del área cubierta con glaciares en el norte chico y la zona central, en especial en el caso de los glaciares descubiertos, los que tenderán a fragmentarse, a incrementar sus áreas cubiertas por detritos y se acentuará la evolución de estos para transformarse en glaciares rocosos, todo lo cual se traduce en una reducción de su incidencia en el régimen hidrológico (ver puntos 2.3 y 2.4 de este documento). En ese escenario, la situación con o sin proyecto (o actividad), en el largo plazo tenderán a asemejarse, reduciendo el eventual impacto negativo de los proyectos. Sin embargo, siendo ello un proceso de ritmo incierto y que, además, desde la perspectiva de la evaluación ambiental contribuye a disminuir los impactos y no a incrementarlos, y considerando un enfoque preventivo y conservador, no debiera considerarse en dichas evaluaciones.

5. LOS GLACIARES COMO PARTE DE LA DINÁMICA DE UN ECOSISTEMA

5.1. CONTEXTO

Ya se ha analizado en el capítulo anterior el rol de los glaciares como recurso hídrico, centrando el análisis en el aporte de éstos a las escorrentías superficiales, principalmente ríos y cuencas. Este capítulo presenta una mirada desde un enfoque diferente; se centra en el rol de los glaciares como parte de la dinámica de un ecosistema donde éstos aportan un elemento vital – el agua – para el desarrollo y subsistencia de estos últimos. Los caudales bajo este enfoque pueden ser muy bajos e irrelevantes a efectos de suministro de agua para regadío, consumo de agua o generación eléctrica. Son caudales que se pierden en las estadísticas, pero son caudales significativos para el sustento de algunos ecosistemas. En ambas miradas, ya sea la mirada que se podría denominar macro orientada al aporte a las escorrentías superficiales como ríos, como la mirada que se podría denominar micro, orientada a la relación de los glaciares con algunos ecosistemas, el elemento común es el agua. Por lo tanto, con el objeto de no sorprender al lector, es necesario señalar que a veces existirán elementos comunes y similares en ambos capítulos de este documento.

Estas relaciones ecosistémicas también son reconocidas y recogidas en nuestro ordenamiento legal. De hecho, tal como se analizará más adelante en el capítulo 7 de este documento, en el Decreto Supremo N°40 de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente que

aprobó el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se establecen requerimientos específicos respecto de este punto.

5.2. RECURSO ECOSISTÉMICO

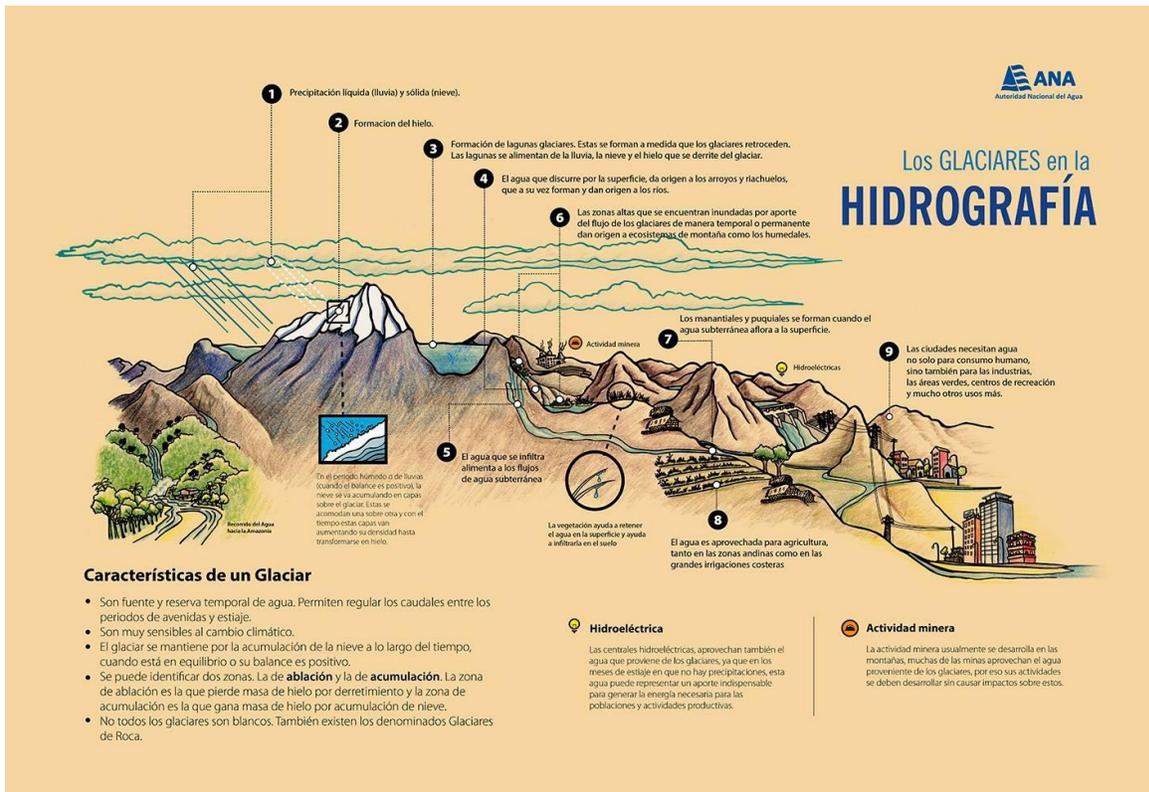
Tal como señalamos en el capítulo anterior, los glaciares juegan un rol regulatorio, particularmente en épocas de sequía. Este rol es de gran importancia en la preservación de diversos ecosistemas; muchas veces son pequeños escurrimientos de agua que alimentan formaciones vegetales o proveen de agua a fauna silvestre en épocas de sequía o de bajas precipitaciones. Este rol es particularmente relevante en ecosistemas frágiles, como son, por ejemplo, los ecosistemas de alta montaña. En estas zonas contribuyen a la generación de condiciones para la ocurrencia de humedales de montaña o bofedales, como son las vegas andinas que dan soporte alimenticio a animales y aves, y permiten el ejercicio de la trashumancia (pastura para las veranadas del ganado de las tierras bajas) y también se asocian a la existencia de lagos o lagunas.

Adicionalmente, los glaciares, presentan una estrecha relación de interdependencia con el sistema atmosférico y climático, ya que, si bien su alimentación depende de las precipitaciones de nieve y de las variaciones de temperatura, su presencia genera condiciones ambientales de bajas temperaturas, las cuales se traspasan a las masas de aire que circulan sobre ellos, a las que además le entregan humedad por sublimación y por evaporación de las aguas de fusión que presentan⁵⁴.

En la Figura 12, preparada por la Autoridad del Agua (ANA) del Perú se propone una relación entre los glaciares y la hidrografía. De particular interés, a efectos de este capítulo, es la relación de éstos con el desarrollo y sustento de los humedales altoandinos.

⁵⁴ Entrevista a Francisco Ferrando en El Mostrador, 14 de octubre de 2019.

Figura 12: Los Glaciares y la Hidrografía



Fuente: ANA-P

Según señala Angela Andrade Pérez⁵⁵ el ciclo hidrológico ocurre en un conjunto de ecosistemas terrestres y acuáticos interrelacionados espacial y funcionalmente, con características biofísicas, sociales y culturales particulares. Las interrelaciones entre estos ecosistemas son fuertes, y, por tanto, son relevantes para el funcionamiento de estos. Este conjunto de ecosistemas va desde el fondo del mar hasta las grandes alturas en los glaciares, nieves perpetuas y demás ecosistemas de alta montaña.

Una característica fundamental para la comprensión de las potencialidades, limitaciones y vulnerabilidad de los ecosistemas es la estrecha relación de los procesos ecológicos entre los diferentes tipos de cobertura y usos de la tierra, y los sistemas hídricos adyacentes. En este sentido, los ríos, y por extensión, los demás cuerpos de agua asociados a los mismos constituyen no sólo un complejo de ecosistemas en sí mismos, sino el medio integrador, sustentador de la vida y la biodiversidad en un territorio y un indicador del estado de los diferentes ecosistemas terrestres que atraviesan y contribuyen a modelar en su recorrido. Desde el punto de vista del ciclo hidrológico, los ecosistemas clave son aquellos en donde

⁵⁵ Andrade Pérez A; Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA – Oficina Regional para América Latina y el Caribe; 2004

el agua se almacena temporalmente, tales como lagos y humedales, ya que estos cumplen un papel esencial en el contexto del resto del sistema hídrico.

Las cuencas cumplen un rol crítico en el funcionamiento natural de la tierra, articulando ecosistemas terrestres, de aguas continentales y marinos, y suministrando el hábitat de la mayor parte de las especies, así como aportando una amplia gama de servicios ambientales al ser humano. Desde el punto de vista económico, juegan un rol crítico en el suministro de agua, alimento, energía hidroeléctrica, recreación y transporte a la sociedad.

En las zonas de captación de las cuencas se encuentran ecosistemas de Alta Montaña en donde elementos como la vegetación y el suelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar y almacenar agua (lluvia y nieve) que es liberada en otras épocas de año; esta característica determina su valor. Su importancia radica fundamentalmente en su capacidad para almacenar agua y regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos, y filtrar el agua, protegiendo su calidad.

Los bofedales son formaciones hidrofíticas compactas⁵⁶ y de gran importancia ecosistémica en la Cordillera de los Andes, particularmente en la zona norte del país. Se encuentran en la Cordillera de los Andes, según la altitud y estarían ubicados en los pisos de vegetación Altoandino partiendo de los 3.500 m.s.n.m. Son formaciones denominadas "azonales" asociadas a condiciones locales y alimentadas por agua de deshielo, ríos y lluvia. Poseen alta capacidad de almacenamiento, pero tienen baja capacidad de retención. Tienen un micro-relieve ondulado, que está relacionado con la dominancia de especies herbáceas en cojines compactos. Debido a sus características particulares, albergan una flora y fauna únicas. Éstos son centros de biodiversidad y también base de vida para el ganado y la población de montaña. Uno de los principales servicios ecosistémicos que ofrecen estos humedales altoandinos es la provisión de agua, no solamente para el abastecimiento de las comunidades humanas residentes en sus alrededores sino también para comunidades de fauna y flora, riego de suelos agrícolas, generación hidroeléctrica y consumo humano aguas abajo. Además, los humedales proveen fibras vegetales, alimentos y recursos genéticos, almacenan y regulan caudales y capturan carbono. El tipo de vegetación natural siempre verde y suculenta brinda un elevado potencial forrajero, además de tener un suelo permanentemente húmedo apto para el pastoreo⁵⁷.

Estas formaciones, dependientes del ciclo hidrológico, se verán fuertemente afectadas por el retroceso de los glaciares debido, principalmente, al cambio climático. Sin embargo, los estudios sobre el impacto del cambio climático en la biodiversidad de la región andina, y más específicamente en los bofedales, son por ahora muy escasos. Cualitativamente se anticipa que este impacto no sólo se traducirá en una disminución de los caudales y en la

⁵⁶ Revista Chilena de Historia Natural; Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes; 2006

⁵⁷ Alzérreca H, Prieto G, Laura J, Luna D, Laguna S; Características y Distribución de los Bofedales en el Ámbito Boliviano; PNUD, 2001

estacionalidad del escurrimiento, sino que también en las formas de vida y culturas asociadas a los bofedales.

Por otro lado, y tal como se ha señalado anteriormente, cerca de un 84% de la superficie de glaciares en el país está incluida en algún Parque o Monumento Nacional, o en alguna Reserva, lo que evidencia la importancia de éstos como elemento de conservación dentro de estas áreas.

6. LOS GLACIARES Y SU VALOR TURÍSTICO

El valor netamente paisajístico, asociado particularmente a los glaciares blancos, es la capacidad de éstos de ser un punto focal de interés desde cualquier punto de observación. Esto es más relevante aún en regiones áridas, en las que encontrar un glaciar blanco lo hace muy inesperado, y resalta más su valor. Todo lo contrario, ocurre con los glaciares de roca, que no se distinguen del suelo del entorno que los rodean, y que comúnmente pasan inadvertidos en los valles andinos.

Los glaciares blancos tienen un innegable valor estético, paisajístico y por lo mismo turístico, pero no así los glaciares de roca con sus cubiertas de detritos rocosos. La gran mayoría de las personas sabe cómo es un glaciar blanco, no así uno de roca.

El turismo en glaciares blancos principalmente constituye, hoy en día, un segmento del turismo aventura. Se ofrecen productos tales como: visitas a frentes glaciares, caminatas breves sobre glaciares y recorridos por el día o, aún, travesías de varios días, práctica del ski en verano, cursos de instrucción en glaciares y de navegación en lagos y aguas pro-glaciales, y escaladas en hielo. A lo anterior se agrega una actividad económica como es la industria hotelera, con actividades deportivas y de recreación, y con fuentes de trabajo indirecto relacionadas con el turismo.

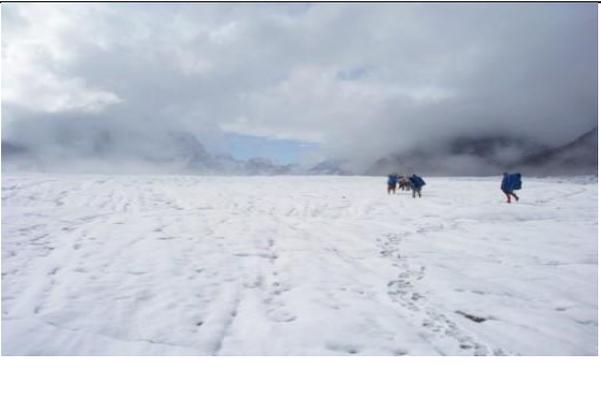
6.1. CONTEXTO MUNDIAL

Los países que contemplan una alta cantidad de glaciares y que son visitados constantemente por turistas corresponden a Islandia, Estados Unidos (Alaska principalmente), Canadá, Argentina y Chile. También hay grandes extensiones de glaciares en la Antártida y en Groenlandia que son más difíciles de visitar por turistas.

En la Tabla 7 se presenta una lista de Glaciares en el mundo que son considerados como atracciones turísticas.

Tabla 7: Principales Glaciares con Interés Turístico en el Mundo

Nombre del Glaciar/País	Características Generales	Imagen Referencial
Vatnajökull/Islandia	Ocupa cerca del 8% de la superficie total de Islandia.	
Perito Moreno/Argentina	Su lento avance forma puentes que se van destruyendo y regenerando en un ciclo que se repite cada 4 años aproximadamente	
Bering/Estados Unidos (Alaska)	El más grande de América del Norte	
Margerie/Estados Unidos (Alaska)	34 kilómetros de largo que también atrae una buena cantidad de turistas por sus definidas paredes y sus desprendimientos esporádicos	

Nombre del Glaciar/País	Características Generales	Imagen Referencial
Jostedalbreen/Noruega	Glaciar más grande de la Europa continental con unos 60 kilómetros de longitud y 600 metros de grosor	
Del Zorro/Nueva Zelanda	13 kilómetros de largo y su base llega a estar a sólo 33 metros por encima del nivel del mar. Eso hace que sean una de las atracciones turísticas más visitadas de la isla sur de Nueva Zelanda.	
De Biafo/Pakistán	De 67 kilómetros de longitud, es el glaciar más largo fuera de los polos terrestres. Lo llaman "la autopista de hielo" por unir los antiguos reinos de Nagar y Baltistán a 4500 metros de altura	

Fuente: Elaboración propia en base a información de <https://magnet.xataka.com/>

6.2. CONTEXTO EN CHILE

En base al último catastro de la Dirección General de Aguas (DGA) en Chile existen más de 24.000 Glaciares equivalentes a un área total cercana a los 24.000 km² de extensión. De estos, el 55% se encuentra en las regiones de Aysén y Magallanes y equivalen al 90% de la extensión total a nivel nacional. Sin embargo, sólo existe una zona con Declaratoria de Interés Turístico (ZOIT); la Provincia de los Glaciares, territorio conformado por parte de las comunas de Tortel, Cochrane y O'Higgins en la Región de Aysén. Esta declaratoria fue publicada en el Diario Oficial el 21 de febrero de 2018.

El turismo asociado a los glaciares en Chile es, actualmente, muy básico y focalizado, predominando principalmente en las regiones de Aysén y Magallanes Según la base de datos de SERNATUR⁵⁸, anualmente, entre 2009 y 2019, cerca de 470.000 personas en promedio visitaron algún Área Silvestre Protegida en dichas regiones, donde se encuentra la mayor proporción de superficie de glaciares dentro de dichas áreas.

En el resto de las regiones es bastante menor, destacando las 13.000 personas en promedio que visitan el Monumento Natural El Morado en la Región Metropolitana (entre 2009 y 2019), y las 22.000 personas que visitan la Reserva Natural Río Cipreses en la Región de O'Higgins (entre 2009 y 2019), donde se encuentra el Glaciar Universidad.

Sin embargo, es indudable que existe un potencial turístico que para que se traduzca en una actividad de mayor importancia, deberá ser desarrollado.

7. LOS GLACIARES COMO FACTOR DE RIESGO

7.1. RIESGOS ASOCIADOS A GLACIARES. ANTECEDENTES GENERALES

Más allá de su papel en relación con el medioambiente y los recursos hídricos, los glaciares son componentes del ciclo hidrológico que con frecuencia se asocian a graves desastres, los cuales han comprometido pérdidas de vidas humanas y la destrucción de bienes.

La raíz de estos comportamientos se explica por las características físicas de estos cuerpos de hielo⁵⁹. Por una parte, hay que considerar que las masas de hielo constituyen un cuerpo sólido impermeable que pueden represar grandes volúmenes de agua, se comporta como un material plástico que fluye como resultado de las fuerzas que lo solicitan, y, además, puede cambiar de estado sólido a líquido, según los aportes de energía que recibe. Así, la existencia de glaciares en el medio natural responde a 3 delicados equilibrios interrelacionados: hidrológico, termodinámico y de fuerzas. El balance hidrológico responde a los ciclos de acumulación y ablación de la nieve. El equilibrio termodinámico explica la relación entre la energía que recibe desde fuentes externas (atmósfera, geotermia, etc.) y los procesos asociados a la fusión, evaporación y sublimación. Los equilibrios de fuerzas dan cuenta de su deformación, de la sujeción a las superficies de roca en las cuales se sostienen y de su desplazamiento. Estos equilibrios se relacionan entre ellos de forma compleja y están en permanente ajuste, pudiendo experimentar cambios críticos por eventos extraordinarios (deshielos anormales, precipitaciones, temperaturas, etc.) y por procesos meteorológicos de mediano o largo plazo (variabilidad climática, cambio climático; etc.).

⁵⁸ SERNATUR (2019). Base de Datos (Estadísticas) de visitantes a Áreas Protegidas.

⁵⁹ LLiboutry L. (1964). *Traité de Glaciologie*. Masson & Cie, Editeurs. Paris.

En este contexto se pueden identificar los siguientes tipos de eventos catastróficos asociados a glaciares^{60 61}:

- a) *Desprendimientos de bloques de hielo o de glaciares.* Se trata de un deslizamiento violento de partes o de todo un glaciar que reposa en una superficie con una pendiente elevada, como es el caso de los glaciares colgantes, debido a un desequilibrio en las fuerzas intervinientes. En glaciares de montaña, en ocasiones constituye el mecanismo habitual de descarga del hielo formado en la zona de acumulación.

- b) *Vaciamiento de aguas represadas por el hielo y almacenadas en lagos localizados en las márgenes o debajo de una masa glaciar.* La causa de dicho represamiento se encuentra en situaciones tales como: el avance de un frente glaciar que intercepta cursos de agua colindantes, o la interrupción de un conducto subglacial de drenaje. Así, el agua líquida se puede vaciar en forma violenta por la ruptura de la represa generando importantes crecidas. El proceso de vaciamiento del agua líquida acumulada puede ser de distinto tipo. En el país se han estudiado casos en los que se observa un vaciamiento paulatino debido al ensanche de un conducto inicial a causa de la transferencia de calor desde el líquido que escurre. La física del proceso ha sido estudiada por Nye (1976)⁶², quien formuló las ecuaciones de conservación de masa y energía, de deformación plástica, de hidráulica del conducto y de transferencia de calor que lo rige. Ellas fueron utilizadas para simular el vaciamiento del lago Dickson, en el sector de las Torres del Paine⁶³. Un segundo mecanismo de vaciamiento documentado en el país corresponde a la falla estructural de una de las paredes de hielo, que es el tipo asociado a la crecida del río Manflas (1985) originado en el glaciar del río Seco de los Tronquitos⁶⁴. En las Figuras 13 y 14 se presenta un esquema de los mecanismos de vaciamiento en ambos casos.

⁶⁰ Peña H. y Klohn W. (1990). "Hidrología de Desastres en Chile: Crecidas Catastróficas Recientes de Origen No Meteorológico". Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 5.

⁶¹ Carrión D. (2007). Riesgos Naturales Asociados a Glaciares en Chile. Dirección General de Aguas/MOP – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía/ Uch

⁶² Nye J. F. (1976). Water flow in glaciers: Jokulhlaups, Tunnels and Veins. Journal of Glaciology. Vol. 17.

⁶³ Peña H. y Escobar F. (1983). Análisis de una Crecida por Vaciamiento de una Represa Glacial. VI Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago.

⁶⁴ Peña H. y Escobar F. (1987). "Análisis del Aluvión de Mayo de 1985 del Río Manflas: Cuenca del Río Copiapó". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Santiago.

Figura 13: Mecanismo de generación de la crecida en el río Paine por ruptura de represamiento en el Lago Dickson (Peña y Escobar, 1983).

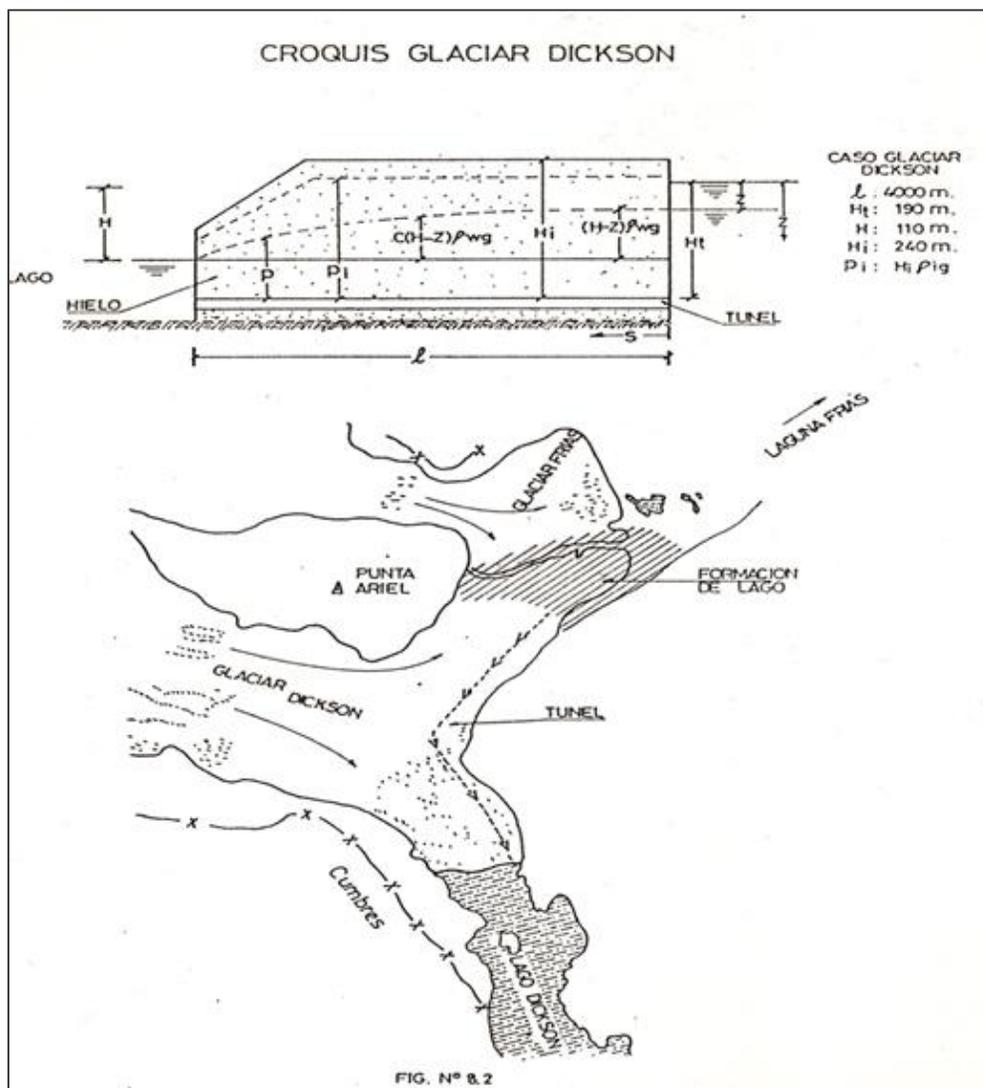
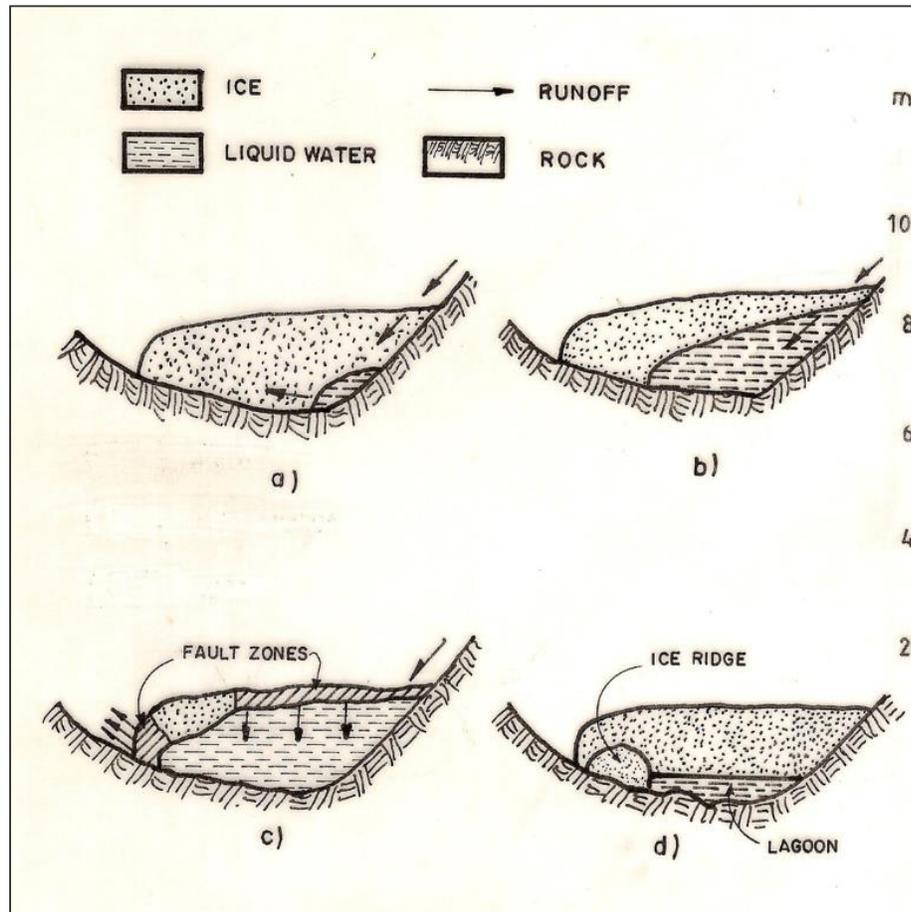


Figura 14: Mecanismo de generación del aluvión del río Manflas, por ruptura de la represa en el glaciar del Río Seco de Los Tronquitos. (Peña y Escobar, 1987).



- c) *Vaciamiento de lagunas proglaciales represadas por morrenas.* Resulta frecuente que el retroceso de un glaciar genere en su frente un lago contenido por una morrena. Dichas barreras morrénicas en ocasiones son estructuralmente débiles e inestables, existiendo diversos procesos que pueden generar su ruptura. Al respecto se han reportado vaciamientos violentos como resultado de: el rebalse y ruptura de la morrena por una ola producto de una avalancha de rocas o hielo; fallas asociadas a la desintegración de hielo remanente dentro de su núcleo; fallas por filtraciones; y fallas por deslizamientos de sus laderas, entre otras causas.
- d) *Eventos asociados a interacciones glacio-volcánicas (lahares y jokulhlaups).* En Chile existen muchas zonas en las que la actividad volcánica se localiza próxima a glaciares. Esta situación conlleva dos tipos de riesgo. El primero corresponde a inundaciones provocadas por el vaciamiento violento de volúmenes de agua líquida represados por el hielo, los que se han formado por el derretimiento del hielo debido a la actividad geotermal o eruptiva. Estos eventos son designados como jokulhlaups, palabra aplicada a estos fenómenos en Islandia, país en el que son frecuentes. Otro

tipo de desastre glacio-volcánico es el lahar. En este caso se trata de flujos de agua, con un alto contenido de sedimentos y materiales diversos, que escurren a gran velocidad por las laderas de los volcanes y que han obtenido su agua líquida de la fusión de nieves y hielos provocada por una erupción volcánica.

7.2. DESASTRES ASOCIADOS A LOS GLACIARES EN CHILE

La recurrencia de este tipo de fenómenos en el país se asocia a ciertas características propias de su geografía. Entre ellas se deben destacar: la extensa superficie de cubierta de glaciares en el país (ver capítulo 2); su relieve montañoso, que representa un 80% de su territorio con más de 300 cumbres sobre 5.000 msnm; la ubicación en una de las regiones dinámicamente más inestables de la corteza terrestre que se traduce en una elevada actividad volcánica y sísmica; y , finalmente, una elevada sensibilidad al cambio climático global⁶⁵.

En Chile hay referencias a desastres asociados a la presencia de glaciares desde el siglo XIX. Así, por ejemplo, ya en 1847 hay constancia de un repentino aluvión de hielo, nieve y rocas en el río Cachapoal, posiblemente asociado al Glaciar Cipreses, que arrasó puentes y casas y campos ⁶⁶ Sin embargo, solo en las últimas 4 décadas se dispone de estudios formales. Los antecedentes disponibles en el período anterior son fragmentarios, de un nivel técnico variable, y se encuentran dispersos en informes inéditos en empresas, organismos públicos de difícil acceso, o reportajes periodísticos.

A continuación, se presentan antecedentes proporcionados por distintos informes que han investigado en forma sistemática este tipo de fenómenos en el país^{67 68}. Un resumen con dicha información se encuentra en la Tabla 8:

- a) *Casos de desprendimiento de glaciares*: Los desprendimientos de hielo son frecuentes en la alta cordillera, sin embargo, normalmente ellos no generan una amenaza para las actividades humanas ya que no se presentan en zonas habitadas. Por esta razón en Chile no se conocen desastres generados por este tipo de fenómenos. Sin perjuicio de lo anterior, se puede mencionar el caso del colapso del Glaciar del Cerro Aparejo, localizado a corta distancia del río Yeso y del embalse del mismo nombre. Dicho glaciar, con un volumen estimado de 5 millones de m³, se desprendió el 1 de marzo de 1980 en forma violenta de su posición original, alcanzando velocidades estimadas del orden de 100 km/hr. Afortunadamente, el glaciar no llegó al embalse y no produjo daños debido a que se detuvo al impactar con la ladera del cauce

⁶⁵ Peña, H. y W. Klohn (1990). "Hidrología de Desastres en Chile: Crecidas Catastróficas Recientes de Origen No Meteorológico". Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 5

⁶⁶ Ibid.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ Carrión D. (2007). Riesgos Naturales Asociados a Glaciares en Chile. Dirección General de Aguas/MOP – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía/ Uch.

principal del Estero Aparejo, la cual se orienta en dirección perpendicular a la dirección del flujo⁶⁹.

- b) *Casos de rupturas de presas de hielo*. Existen numerosos ejemplos de este tipo de fenómenos en Chile en los últimos 50 años. Ellos cubren casos localizados tanto en el sector de los hielos patagónicos como en la zona central y en el norte chico:
- i. En la zona patagónica los casos han sido originados por avances y retrocesos de los glaciares, los que han provocado la interrupción de conductos que permitían el drenaje. En esta zona se destaca el caso del Río Paine, generado por el vaciamiento en 3 ocasiones de un lago de 250 millones de m³ represado por el Glaciar Dickson (1982- 1983), y que provocó una onda de crecida de 100 m³/s con inundaciones en el sector de las Torres del Paine⁷⁰. Además, en la zona patagónica se conocen numerosos casos asociados al glaciar Colonia. Este Glaciar en las décadas de los años 50 y 60 produjo 7 crecidas en el río homónimo (afluente al río Baker)⁷¹ y recientemente, en los años 2008 y 2009, ha generado 5 nuevas crecidas con volúmenes del orden de 200 millones de m³ y un caudal máximo de 2.500 m³/s, causando la inundación del valle⁷².
 - ii. En la zona central se tienen ejemplos documentados de este tipo de fenómenos en las cuencas de los ríos Maipo y Cachapoal. En el primero se conoce el caso de la crecida del río Olivares (1954) originada por la ruptura de una pequeña represa generada por el avance del glaciar Juncal Sur, la que produjo una onda de crecida de unos 400 m³/s causando daños importantes en la central Maitenes. En el río Cachapoal (1981), el desplazamiento del glaciar del mismo nombre generó la acumulación y posterior vaciamiento en 8 ocasiones en un período de 19 días, con volúmenes de agua de aproximadamente 2 millones de m³ y caudales máximos de 150 m³/s⁷³.
 - iii. En el norte Chico está documentado el caso de la crecida del río Manflas el año 1985 (Cuenca de Copiapó) originada en el glaciar Río Seco de los Tronquitos. El fenómeno se habría producido por el vaciamiento violento de un lago subglacial de unos 5 millones de m³ al fallar una de las paredes de hielo. El caudal de crecida al pie del glaciar fue estimado en 11.000 m³/s. Lo

⁶⁹ Peña H. 1980. Situación de los glaciares del estero Aparejo, río Yeso. Informe Interno, Dirección General de Aguas, (en Centro de Información Recursos Hídricos).

⁷⁰ Peña H y Escobar F. 1983. "Análisis de las Crecidas del Río Paine – XII Región". Publicación Interna 83/7. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago

⁷¹ Carrión D. (2007). Riesgos Naturales Asociados a Glaciares en Chile. Dirección General de Aguas/MOP – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía/ Uch

⁷² Dussailant A., Benito G, Buytaert W, Carling P, Meier C y Espinoza F. (2010). Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? en Natural Hazards · August 2010 Nat Hazards.

⁷³ Peña H. y Klohn W. (1990). "Hidrología de Desastres en Chile: Crecidas Catastróficas Recientes de Origen No Meteorológico". Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 5

que impidió un desastre en la cuenca del Copiapó fue la circunstancia afortunada de que el Embalse Lautaro, localizado a 83 km del glaciar, se encontraba ocasionalmente semivacío y pudo almacenar la crecida⁷⁴.

- c) *Ruptura de lagunas formadas por morrenas*: A diferencia de otros países en los que fenómenos de este tipo han sido la causa de grandes desastres (por ejemplo: Perú), en Chile solo se conocen casos en la región patagónica con impactos limitados por su escasa población. Así, en el Campo de Hielo Norte, en el valle del río Soler, un desprendimiento de bloques de hielo cayó sobre una laguna periglacial (1989), causando olas que colapsaron la morrena y generaron una inundación con pérdida de viviendas y ganado. Algo similar ocurrió en el valle del río Leones (2000), donde una gran avalancha provocó la ruptura de la barrera que contenía el lago Calafate⁷⁵.
- d) *Casos asociados a volcanismo*: como se ha señalado, en Chile el riesgo asociado a la interacción entre el volcanismo y la presencia de glaciares es muy elevada, siendo frecuente la formación de lahares en los que la fusión del hielo glaciar por la actividad volcánica ha incidido en su generación. Así, en los últimos 50 años se ha informado de lahares asociados a la presencia de glaciares en los volcanes: Peteroa (1991), Nevados de Chillán (1973), Copahue (1992, 2000), Llaima (1994), Villarrica (1971, 1994) y Hudson (1971, 1991). En diferentes ocasiones estos eventos han generado graves pérdidas y siempre han constituido un peligro para algunas localidades (por ejemplo: Coñaripe, Melipeuco)⁷⁶. En general existen escasas estimaciones de la magnitud de estos eventos, sin embargo, los casos documentados muestran que ella puede ser enorme. Por ejemplo, en el caso de la erupción del Volcán Villarrica de 1971, uno de las pocas que dispone de información, el volumen de la crecida generada se estimó en 25 millones de m³, con un caudal máximo de 3.500 m³/s⁷⁷.

En relación con la existencia de desastres asociados a la actividad geotérmica del tipo jokulhlaups, solo se conoce el caso del río Huemules de enero de 1973. En esa ocasión se produjo una gran inundación del valle del río Huemules debida al vaciamiento del agua líquida acumulada en la gran caldera de dicho volcán a causa del derretimiento de los hielos, sin que se registrara una erupción del Volcán Hudson. Cabe desatacar que el valle del río Huemules fue arrasado y el caudal máximo se estimó en 10.000 m³/s⁷⁸.

⁷⁴ Peña H. y Escobar F. (1987). "Análisis del Aluvión de Mayo de 1985 del Río Manflas: Cuenca del Río Copiapó". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Santiago. 1987; y Publicación Interna 87/3. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago.

⁷⁵ Carrión D. (2010). Análisis de un posible vaciamiento del lago Greve, Campo de Hielo Sur, en relación con distintos escenarios climáticos. Universidad de Chile – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía Santiago. Octubre 2010.

⁷⁶ Carrión D. (2007). Riesgos Naturales Asociados a Glaciares en Chile. Dirección General de Aguas/MOP – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía/ Uch

⁷⁷ Peña H y Klohn W. (1990). "Hidrología de Desastres en Chile: Crecidas Catastróficas Recientes de Origen No Meteorológico". Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 5

⁷⁸ Ibid.

Tabla 8: Antecedentes sobre eventos catastróficos asociados a glaciares desde 1950 en adelante

Fecha (1)	Cuenca	Río/Volcán	Glaciar	Tipo (2)	Volumen (3) Millones de m³	Caudal máximo (3) (m³/s)
1985	Copiapó	Manflas	Río Seco de Los Tronquitos	b)	5	11.000
1980	Maipo	Aparejo	Aparejo	a)	5	-
1954	Maipo	Olivares	Olivares	b)	0,4	400
1981	Rapel	Cachapoal	Cachapoal	b)	2	150
1991	Mataquito	Vn. Peteroa	Vn. Peteroa	d)	-	-
1973	Itata	Vn. Nevados de Chillán	Vn. Nevados de Chillán	d)	-	-
1992, 2000	Bío Bío	Vn Copahue	Vn. Copahue	d)	-	-
1956,1957 1994	Cautín	Vn. Llaima	Vn. Llaima	d)	3,4	-
1971, 1994	Toltén	Vn. Villarrica			15	3.500
1961	Mauullín, Petrohue, Chamiza.	Vn. Calbuco	Vn. Calbuco	d)	-	-
1955, 1976, 1989	Baker	Engaño	-	c)	-	-
1971,1973, 1991	Huemules	Vn. Hudson	Vn Hudson	d)	-	10.000
2000	Baker	Los Leones	-	c)	0,5	s/i
1953,1955, 1956,1958, 1963,1964, 1966. 2008 (2), 2009 (3)	Baker	Colonia	Colonia	b)	200	2500
1982 (2), 1983	Serrano	Paine	Dickson	b)	250	100
1985	Copiapó	Manflas	Río Seco de Los Tronquitos	b)	5	11.000
1980	Maipo	Aparejo	Aparejo	a)	5	-
1954	Maipo	Olivares	Olivares	b)	0,4	400
1981	Rapel	Cachapoal	Cachapoal	b)	2	150
1991	Mataquito	Vn. Peteroa	Vn. Peteroa	d)	-	-
1973	Itata	Vn. Nevados de Chillán	Vn. Nevados de Chillán	d)	-	-
1992, 2000	Bío Bío	Vn Copahue	Vn. Copahue	d)	-	-
1956,1957 1994	Cautín	Vn. Llaima	Vn. Llaima	d)	3,4	-
1971, 1994	Toltén	Vn. Villarrica			15	3.500
1961	Mauullín, Petrohue, Chamiza.	Vn. Calbuco	Vn. Calbuco	d)	-	-
1955, 1976, 1989	Baker	Engaño	-	c)	-	-

Fecha (1)	Cuenca	Río/Volcán	Glaciar	Tipo (2)	Volumen (3) Millones de m ³	Caudal máximo (3) (m ³ /s)
1971,1973, 1991	Huemules	Hudson	Vn Hudson		10.000	
2000	Baker	Los Leones	-	c)	0,5	s/i
1953,1955, 1956,1958, 1963,1964, 1966. 2008 (2), 2009 (3)	Baker	Colonia	Colonia	b)	200	2500
1982 (2), 1983	Serrano	Paine	Dickson	b)	250	100

Fuente: Elaboración propia, basada en Peña y Klohn (1990); Carrión D. (2007); Dussailant et al. (2010); y Carrión D. (2010).

(1): Si hay más de un evento se indica entre paréntesis junto a la fecha.

(2): Según la numeración y tipología establecida en 6.1 y 6.2.

(3): Se entregan los valores de los casos en que se han realizado estimaciones.

8. EXPERIENCIAS Y ESTRATEGIAS INTERNACIONALES FRENTE AL COMPORTAMIENTO DE LOS GLACIARES

8.1. CONTEXTO GENERAL

La sociedad en general, y principalmente en aquellos países en que la presencia de glaciares es importante, ha reconocido desde siglos la importancia de éstos en relación con los recursos hídricos asociados a su gradual deshielo, pero no siempre se ha comprendido su rol esencialmente regulador de esos recursos hídricos.

A lo largo del tiempo y a medida que la economía de los países crecía, otros aspectos y actividades relacionados con los glaciares fueron adquiriendo importancia, principalmente en los últimos 100 años, siendo las más conocidas la relación de los glaciares con los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como las actividades relacionadas con el turismo y la hidroelectricidad. Por otro lado, con el desarrollo económico de los países la ocupación espacial de los glaciares presentaba limitaciones o interferencias en relación con: la conectividad territorial (caminos, líneas eléctricas, oleoductos y gaseoductos); las actividades económicas desarrolladas en zonas periféricas a los glaciares como la minería, el turismo y la agricultura; así como también con el crecimiento de ciudades ubicadas cercanas a glaciares.

Todas estas actividades e interferencias han tenido algún impacto, mayor o menor, sobre la evolución de los glaciares en el tiempo y los diferentes países han estado tomando diversas medidas para compatibilizar en la medida de lo posible la protección de los glaciares con las actividades económicas asociadas; los aspectos recreativos; y el desarrollo de las ciudades aledañas. En el presente capítulo se comentan algunos ejemplos de cómo algunos

países con presencia importante de glaciares han ido reaccionando ante estos desafíos, con mayor o menor éxito, desafíos que en general se refieren al presente y el futuro relativamente cercano.

La evidencia científica indica que desde ya hace varios años el cambio climático – asociado o incrementado por el fenómeno de calentamiento global de la tierra - está acelerando la retracción y disminución de la mayor parte de los glaciares del mundo. Una estimación relativamente reciente indica que la pérdida global de masa de glaciares fue de 259 ± 28 Gt por año en el período 2003 – 2009^{79 80} con una escorrentía de agua desde los glaciares sobre 1.350 km^3 por año. Estos estudios se han enfocado principalmente en la estimación de la posible subida del nivel del mar por efecto del deshielo de los grandes glaciares y en menor escala en el estudio de la disponibilidad de agua y de los montos de escorrentía. Un conocimiento mucho menor se tiene sobre otros impactos que pueden afectar más dramáticamente nuestro medio ambiente, como ser el impacto aguas abajo de los glaciares, impacto que afectará los ecosistemas de zonas húmedas (agrícolas, humedales) y zonas de costa marina, con implicaciones sociales y socio económicas significativas. La reducción de los glaciares alterará los regímenes hidrológicos, el transporte de sedimentos y los flujos biogeoquímicos y contaminantes hacia ríos y océanos. En este capítulo se comentará en términos generales la estrategia de algunos países respecto de planes de adaptación y de medidas de mitigación de estos impactos.

8.2. GLACIARES Y SU RELACIÓN CON ACTIVIDADES EXTERNAS

A continuación, se comentarán ejemplos de las acciones tomadas en relación con lo que hemos definido como los problemas del corto plazo, es decir sin considerar los problemas de un futuro no muy lejano de reducción dramática de los glaciares por efecto del cambio climático.

8.2.1. HIDROELECTRICIDAD

En algunos países en que esta es la principal fuente de energía eléctrica, la escorrentía de agua proveniente de los glaciares contribuye en forma importante a esa generación: por ejemplo, en un 91% en el caso de Islandia y de 15% a 20 % en el caso de Noruega. Austria a su vez genera el 70% de su electricidad con hidroeléctricas, las mayores de las cuales alimentadas por glaciares cercanos y en Suiza el 25% de la energía depende de los glaciares⁷⁸. En estos países no existe una legislación específica de protección de los glaciares, sino que una política general flexible que permite conciliar los intereses de preservación con los aspectos económicos representados por la generación energética. Si bien hay que reconocer que esta industria no necesariamente tiene una incidencia directa en los glaciares,

⁷⁹Milner, A. M. et al. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619807114>

⁸⁰Gardner AS, et al. (2013). A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 To 2009. *Science* 340:852–857. Abstract/FREE Full Text Google Scholar

pero sí la tiene en las zonas periglaciales. En Noruega (comunicación personal de A. Robertson a L. Valenzuela, 2019) y Francia⁸¹ hay casos en que se han aprobado inclusive tomas de agua directamente bajo un glaciar. En el caso de la central EDF de la Mer de Glace en el Mont Blanc, construida entre 1960 y 1970, ésta captaba del orden de 15 m³/s de agua subglacial; pero esta captación pasó, a partir del 2009, a ser superficial debido a la retracción del glaciar debido al efecto del cambio climático.

La preocupación en varios de esos países es la incertidumbre sobre el futuro de esa industria debido a la dificultad en estimar cómo variarán las escorrentías con el tiempo. En el caso de la planta hidroeléctrica de Mauvoisin en Suiza, que se alimenta de las aguas de un río alimentado a su vez por un gran glaciar, se esperaba inicialmente aumentar sus beneficios de US\$87,5 a US\$104 millones (1981-2010) a valores de US\$87,5 a US\$108,6 millones (2021-2050) por el aumento de escorrentía por el mayor derretimiento del glaciar, pero éstos caerían a valores entre US\$74,0 a US\$91,3 millones por la disminución de escorrentía hacia 2071 – 2100⁷⁸. Estas plantas hidroeléctricas pueden esperar beneficios puntuales mayores durante el verano, pero bajas sustanciales posteriormente. Las capacidades de los reservorios disponibles no tendrían la capacidad de compensar esas variaciones y menos en el largo plazo.

Eso ha llevado a que las autoridades, industrias y centros de investigación dediquen sus esfuerzos a estudiar la posible evolución del proceso de retracción y reducción de los glaciares, pero más importantemente a definir estrategias de adaptación al cambio climático. En Noruega el Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), que es parte del Ministerio del Petróleo y Energía tiene un nuevo *lei motif*: "Asegurando el Futuro". Hace pocos años la NVE publicó su Estrategia para la Adaptación al Cambio Climático 2015 – 2019⁸².

En su estrategia la NVE coloca un especial énfasis en el peligro de deslizamientos e inundaciones, seguridad de las presas existentes, licencias de plantas hidroeléctricas, aspectos globales de energía (oferta, demanda y complementación), supervisión ambiental e hidrología.

⁸¹ Robertson, A. (2019). Comunicación personal a L. Valenzuela.

⁸² NVE (2015). NVE's strategy for climate change adaptation 2015 – 2019. <http://www.nve.no/climate-change-adaptation/?ref=mainmenu>

Figura 15: Deslizamiento en Otta por deshielo de permafrost, 2011.



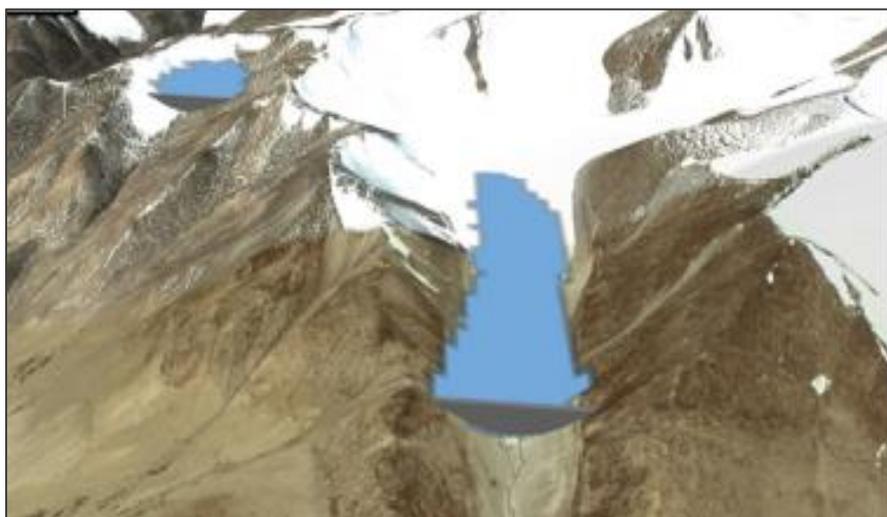
Fuente: NVE

NVE complementa su estrategia con una serie de medidas orientadas a mejorar el conocimiento de todos los aspectos involucrados en este complejo desafío.

Pero las visiones a futuro no se limitan al estudio del fenómeno, sino que también a explorar posibles soluciones de futuro. La revista *Nature* recientemente publicó un artículo de investigadores de prestigiosos institutos de investigación de Suiza⁸³ donde analizan el potencial de ocupación de los terrenos que los glaciares irán dejando libres de hielo, para construir en esos terrenos embalses que capten las precipitaciones (agua y nieve) que caen sobre esos lugares. El estudio estimó que la capacidad teórica para embalses sería de $875 \pm 260 \text{ km}^3$, que equivaldría al 48% de la escorrentía total de los glaciares. Realizando diversas correcciones y modelos estiman que el máximo del potencial de muchos embalses podría llegar a representar el 35% de la producción hidroeléctrica mundial. En este modelo incluyen países de todo el mundo, de Asia, Europa, Norte América e inclusive Chile. Se trata de un estudio teórico de un alto nivel que permite mostrar el potencial de una solución que podría aplicarse total o parcialmente. El estudio sólo considera las ventajas del punto de vista de la potencia hidroeléctrica, pero evidentemente podría tener todas las otras ventajas de un embalse de agua.

⁸³ Farinotti, D. et al. (2019). Large hydropower and water – storage potential in future glacier-free basins. *Nature*. Vol 575. 14 November 2019. 341-344. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1740-z>

Figura 16: Ejemplo del modelo de embalse estudiado en Suiza



Fuente: Farinotti et al, 2019

8.2.2. TURISMO Y RECREACIÓN

El turismo es quizás la única actividad que se realiza directamente asociada a la observación de los glaciares de valle o glaciares blancos, principalmente aquellos descubiertos. En este caso las políticas de todos los países han sido muy flexibles, inclusive en el caso de Argentina que es el único país del mundo que tiene una ley de protección de glaciares que prohíbe cualquier actividad en glaciares y zonas periglaciales, pero que sin embargo indica que los desarrollos científicos y turísticos son aprobados en glaciares sujeto a que no provoquen daño en los mismos. De hecho, el turismo en glaciares en Argentina constituye una importante actividad económica: el glaciar Perito Moreno es el glaciar más visitado en la región donde un atractivo turístico especial es la observación del rompimiento de la barrera de hielo de este. Otros aspectos del turismo asociado a glaciares han sido comentados en el capítulo 5.1 del presente informe.

El caso de Suiza es diferente pues la legislación existente de ese país está incluida en el Código Civil Suizo, pero no está enfocada específicamente, en la protección de los glaciares, sino que promueve el balance entre el desarrollo turístico y la protección del escenario natural que hace factible el turismo⁸⁴. Este código define los glaciares como objetos o elementos naturales que no tienen dueño, por no tener suelos aptos para cultivo, y por lo tanto son de propiedad pública para el uso común. Esta norma incluye el terreno y los puntos en que las aguas del glaciar llegan a los arroyos, ríos o lagos. Sin embargo, se reconoce en ese país que existen glaciares individuales que pertenecen a diferentes cantones. Estos cantones a su vez han reconocido algunos de estos glaciares como parte de propiedad privada. Esta situación ha dado origen a numerosas disputas por ejemplo al tratar algunas

⁸⁴ Cox, J. (2016). Finding a place for glaciers within environmental law: an analysis of ambiguous legislation and impractical common law. *APPEAL* Volume, 21- 33.

autoridades de limitar actividades muy populares como el ski y el montañismo, elementos importantes del turismo en ese país, colocando restricciones consideradas discriminatorias, por ejemplo, para la construcción de infraestructura como andariveles sobre áreas de glaciares, más allá de las exigencias de la legislación ambiental.

Disputas se han producido por ejemplo por la eventual responsabilidad producida por desprendimientos de glaciares, como el caso del Allain Glacier que provocó la muerte de 88 personas en una construcción al pie del glaciar en 1965. A pesar de estas dificultades Suiza, con gran pragmatismo ha podido establecer un complejo esquema para balancear el valor económico de los glaciares, su valor intrínseco y su valor como depósito o estanque de agua y procurar un adecuado balance con actividades de turismo y de generación hidroeléctrica.

El turismo en torno a los glaciares es también muy importante en Canadá, como el caso del glaciar Athabasca en la región de Alberta, sin que se haya justificado alguna ley específica de protección de los glaciares, fuera de las completas y estrictas leyes ambientales de ese país⁸³. Este turismo también es importante en otros países, como se ha señalado en el capítulo 5.1 de este informe, como Noruega, Suecia y Austria.

8.2.3. PECES DE CONSUMO

Como todas las especies de invertebrados y vertebrados, las especies animales y vegetales que viven gracias a las aguas provenientes del deshielo de los glaciares y el transporte de sedimentos que esas aguas traen consigo sufrirán un impacto importante. En ese sentido es importante entender cuáles podrían ser esos cambios y que medidas se pudieran tomar. Por su importancia económica para Chile, es interesante conocer lo que pudiera ocurrir tanto con los salmónidos naturales como con la industria del salmón.

Las especies de salmones y truchas tanto del Atlántico como del Pacífico son una gran fuente de proteínas para millones de personas y sostienen una importante industria pesquera, así como actividades de pesca deportiva y turismo asociado. Estudios han demostrado que existe un 17% de posibilidades que con el aumento de la temperatura peligre la especie del salmón Chinook hacia 2100, sin embargo, se ha demostrado⁷⁸ que otras especies de salmón pudieran verse beneficiados por las futuras condiciones climáticas y las calidades de las aguas. Países como Canadá están realizando complejas investigaciones para poder precisar los efectos en este importante alimento y actividad económica a fin de preparar la gradual adaptación a estas consecuencias del cambio climático.

8.2.4. MINERÍA

La actividad minera, especialmente la minería metálica, ha tenido desde el siglo XIX una relación de convivencia con los glaciares en varias regiones del mundo debido a que muchos depósitos de minerales están presentes precisamente en zonas montañosas y muchas veces a grandes altitudes. La historia tectónica de la tierra ha hecho que muchos de estos minerales

queden a profundidades a las cuales es posible su explotación justamente en muchas de las altas cumbres, donde justamente se han formado gran número de los glaciares.

Uno de los casos más conocido y pintoresco es el del triángulo del oro en las provincias de British Columbia y Yukon en Canadá, junto a la frontera con Alaska. La fiebre del oro que se desató en esa zona a fines del siglo XIX, que mostró el filme La Quimera del Oro de Chaplin, atrajo a miles de personas que se dedicaron a excavar y lavar oro en la zona periglacial, aprovechando los arroyos que traían el agua de deshielo. Esta actividad de pequeña y mediana minería resultó en una significativa contaminación de los ríos y consecuente impacto ambiental negativo, en especial con el hábitat de pueblos originarios.

Con el aumento de la necesidad de metales que ha acompañado el desarrollo económico, con el tiempo el tamaño de las operaciones mineras creció substancialmente y con ello el impacto en el entorno producido por las construcciones asociadas (accesos principalmente) y la producción de polvo por la propia explotación y por el transporte de mineral y residuos. En la gran mayoría de los casos de explotación minera cercana a glaciares estas instalaciones se han ubicado en la zona periglacial, a veces sobre glaciares rocosos, especialmente criogénicos (compuestos especialmente por detritos) que no presentan tantas dificultades como fundación de grandes construcciones o depósitos, pero mayoritariamente en zonas frecuentemente con presencia de permafrost. (Como se ha indicado anteriormente, el permafrost se extiende en más del 50% del territorio de Canadá).

Existen algunos pocos casos en que ha habido explotación afectando al cuerpo mismo de un glaciar blanco o de valle, que es el glaciar principal que tiene el mayor volumen de hielo y que es lo que habitualmente se reconoce como glaciar propiamente tal. El caso que causó mayor conmoción en el mundo es el caso del glaciar Davidova en Kirgizstan, en el cual Kumtor Gold Co., explotando una mina de oro excavó parcialmente el frente del glaciar a la vez que depositó la roca estéril y otros residuos sobre el glaciar provocando fenómenos de "surge" (aceleración de la velocidad normal de avance de un glaciar) lo que a su vez produjo problemas serios de estabilidad. La compañía Kumtor Gold entre 1994 y 2011 llegó a excavar 39 millones de m³ de hielo desde el glaciar. Ante la presión de ambientalistas y científicos de ese país el parlamento presentó una ley de protección de glaciares, la cual hasta el día de hoy no ha sido puesta en vigencia por el poder ejecutivo. La mina continua su operación, la que de acuerdo con sus licencias podría extenderse hasta el 2023 (Cox, 2016).

Este caso llamó la atención a un nivel global y de hecho llevó a que el tema del impacto de la minería sobre los glaciares se discutiera en varios países a nivel internacional. En Chile y Argentina el caso del proyecto de la mina de oro Pascua Lama, en la frontera de ambos países, causó grandes controversias y en general un rechazo a la eventual remoción de dos glaciares menores en la Cordillera de Los Andes. En el caso de Argentina este caso, unido a problemas con una mina de oro en el Sur de ese país, llevó a que se dictara la primera y única ley específica de protección de glaciares que existe en el mundo. Esta ley hace que prácticamente ese país abandone un potencial minero muy poco explotado, pero

manteniendo una muy pragmática flexibilidad en relación con el turismo en zona de glaciares, que representa una actividad considerada de importancia para el país.

El caso de Pascua Lama en Chile se trató con la legislación ambiental vigente, rechazándose finalmente el proyecto propuesto. Otros dos casos presentados en Chile de posible expansión de operaciones mineras existentes de larga data y cercanas a importantes glaciares de la zona central del país fueron analizados por varios años junto a la autoridad ambiental llegándose a soluciones consideradas ambientalmente aceptables, si bien a las compañías mineras involucradas les significará costos adicionales además de una reducción en los niveles de producción que sus reservas minerales permitían. Se trata de los casos de Codelco División Andina que ha propuesto una reducción sustancial a su proyecto de expansión original⁸⁵ y de la Mina Los Bronces operada por Anglo American que para su continuidad operacional ha propuesto adoptar un método de minería subterránea a fin de no impactar al glaciar bajo el cual se encuentran importantes reservas de mineral⁸⁶. El área intervenida en estos casos se muestra en la Tabla 6 del capítulo 3.4 de este informe.

Canadá es un país que tiene una larga historia y experiencia en la minería en las cercanías de glaciares, ya desde fines del siglo XIX en minería de oro de pequeña a mediana escala como se comentara anteriormente. Canadá ha podido establecer una legislación ambiental exigente, pero a la vez realista que permite que en cada caso se haga un análisis específico y se encuentre el adecuado balance entre la protección ambiental y la actividad económica. La historia de la minería cercana a glaciares en Canadá es muy variada, encontrándose ejemplos de todo tipo. A continuación, se describen algunos ejemplos de proyectos mineros en Canadá cercanos a glaciares.

La mina Granduc es conocida por el desastre asociado a ella, "the Granduc Mine Disaster". Se trata de un depósito de mineral de cobre conocido por cerca de 100 años⁸⁷. En 1964 se inició la construcción de un proyecto mediano estimado en CD\$55 millones. El mineral sería extraído por ambos portales de un túnel de 11 millas de largo. En la construcción de este túnel y otras instalaciones se instalaron varios campamentos incluyendo uno para 140 personas junto al glaciar Leduc. Se construyó una pista aérea en el glaciar por donde se abastecía el proyecto cuando el tiempo lo permitía. El resto del tiempo el abastecimiento se hacía a través de trenes Cat que recorrían una ruta de 22 millas atravesando varios glaciares incluido el masivo glaciar Salmon.

La zona es caracterizada por la alta precipitación de nieve con un récord de casi 28 m al año. El 18 de febrero de 1965 hubo un gran desprendimiento de nieve y hielo desde el glaciar lo que causó del orden de 100 muertes en uno de los campamentos. La construcción fue

⁸⁵ <https://www.terram.cl/2017/01/proyecto-que-reemplaza-a-andina-244-no-considera-tuneles-ni-interviene-glaciares/>

⁸⁶ Minería Chilena (2019). Continuidad de Los Bronces: Anglo American ingresa a tramitación ambiental proyecto por US\$3.000 millones. [https://www.mch.cl/Entradas > Negocios e Industria](https://www.mch.cl/Entradas/Negocios-e-Industria). 19, Julio.

⁸⁷ Lundberg, M. (1965). Death came silently: the Granduc mine disaster, Stewart, BC, February 18, 1965. Explore North.

retomada algunos años después por el otro portal del túnel, y el proyecto completó su construcción en 1970 a un costo de CD\$115 millones. En los años 80 paró la producción por razones económicas y se procedió a dismantelar todas las instalaciones.

Otro proyecto, el de la mina Windy Craggy, está localizado en la frontera entre Alaska y el territorio Yukon⁸⁸. Proyecto rechazado por las autoridades de British Columbia, Canadá, por las dificultades ambientales que presentaba, a pesar de tratarse de un proyecto que estimaba CD\$15 billones en cobre, 500 plazas de trabajo y CD\$1,2 billones en impuestos. Los problemas ambientales se relacionaban con un significativo riesgo de afectar a los ríos de la zona, ricos en salmones y otra fauna, la presencia de mineral generador de ácido (ARD), peligros de avalanchas de nieve que podrían impactar la integridad de infraestructura como tuberías de combustible y de mineral, además de la disposición de relaves en una zona rica en diversos hábitat y depósito de residuos generadores de ácido sobre glaciar. Las autoridades de British Columbia decidieron crear en la zona un gran parque de 1 millón de hectáreas incluyendo el área del proyecto. Se acordó una compensación a la compañía de CD\$167 millones, acordados después de un complejo juicio.

La mina Brucejack es una mina de oro, explotada subterráneamente desde 2017 y ubicada en el NorOeste de British Columbia, Canadá, en una zona cercana a glaciares⁸⁹. Los aspectos ambientales han sido importantes condicionantes del proyecto en términos de minimización de partículas de polvo, depósitos de residuos y otros. Sin embargo, debido a la difícil ubicación de la mina junto al lago Brucejak el acceso de trabajadores y materiales a la mina se hace a través de un camino de 12 km de largo que atraviesa el glaciar Knipple. El estado del glaciar es monitoreado diariamente (se cuenta con un glaciólogo permanente), así como también glaciares vecinos. En este camino no se permite aplicar arena, otros suelos o sal. Para su mantención se consideran técnicas de nivelación para mantener una superficie en hielo durante el verano. En el invierno se barre el camino y se rellenan las grietas.

⁸⁸ Walters, J, Hsu, S.L, Duncan, G (2007). Windy Craggy: Mining in British Columbia. University of British Columbia Faculty of Law.

⁸⁹ <https://www.pretivm.com/brucejack/overview/default.aspx>. (2020)

Figura 17: Acceso a la mina de Brucejack por glaciar Knipple



El proyecto de la mina Galore Creek de cobre-oro-plata está ubicado en el Noroeste de British Columbia, Canadá. Desde el estudio de prefactibilidad en 2011 se trabaja en estudio de factibilidad y permisos dentro de los cuales los más significativos son los acuerdos que se debe lograr con la etnia Tahltan.

Figura 18: Zona del proyecto de la mina Galore Creek, BC, Canadá



El proyecto se desenvuelve en una zona muy próxima a glaciares. La planta de tratamiento (95.000 ton por día) y los depósitos de estéril se ubican en un valle vecino, unidos a la mina por un túnel. El proyecto, en una versión anterior había comenzado su construcción en 2007, pero debido a dificultades constructivas fue detenido y el nuevo proyecto requerirá de nuevos permisos.

El proyecto KSM está localizado en el mismo sector de los casos anteriores, en British Columbia⁹⁰. Se trata de un proyecto que incluye varios depósitos de oro y cobre. El proyecto tiene una producción estimada de 130.000 ton por día y una inversión de US\$5 billones.

90 Seabridge Gold Inc. (2018). KSM project description. KSM_community@seabridgegold.net.

Actualmente está en el proceso de optimizar el proyecto, obtención de los permisos definitivos (concedidos en primera instancia) y en la busca de socios para su desarrollo. En la Figura 19 se puede observar el yacimiento Mitchel.

Figura 19: Zona del yacimiento Mitchel, parte del proyecto KSM, BC, Canadá



Al sur de la provincia de British Columbia, en la provincia de Alberta, existen más de 700 glaciares e importante actividad minera sin que tampoco en esta región haya leyes específicas de protección de los glaciares. Como en otras regiones del mundo en la provincia de Alberta la mayor amenaza a los glaciares es representada por el cambio climático (Cox, 2016). Entre 1985 y 2005 la provincia de Alberta perdió el 25% de su superficie glaciar. Al 2100 se espera que el 90% de los glaciares de las Rocky Mountains habrá desaparecido. Algunos investigadores estiman que las leyes generales de medio ambiente o relativas al agua no alcanzan a capturar todas las complejidades de los glaciares, sin embargo, reconocen que la minería no ha representado hasta ahora una amenaza en la provincia de Alberta (Cox, 2016).

De una manera realista, pero a la vez exigente Canadá ha podido a través del tiempo, junto con mejorar y complementar su legislación ambiental, tomar decisiones adecuadas respecto a la aprobación o rechazo de proyectos mineros en zona de glaciares sin necesidad de una ley específica de protección de glaciares. Canadá, como varios otros países, ya está considerando como un hecho la inevitable retirada y disminución de los glaciares por efecto del cambio climático y por lo tanto están dedicando gran esfuerzo y recursos a estudiar las consecuencias en el ecosistema en su compleja globalidad, así como las posibles medidas de mitigación y especialmente las medidas de adaptación.

Como ejemplo uno de los desafíos que están hoy enfrentando algunas zonas de British Columbia es como enfrentar los pedidos de otorgamiento de permisos de exploración minera en los terrenos que la retirada de los glaciares irá dejando libre (Robertson, 2019).

8.3. MAYORES DESAFÍOS DEL PRESENTE Y FUTURO

Existe incuestionable evidencia en todo el mundo de que el cambio climático asociado al calentamiento global continuará con mayor o menor velocidad del aumento de la temperatura dependiendo de cuan eficientes o ineficientes sean las medidas mitigadoras que implemente los países su conjunto. Una de las consecuencias de gran impacto en la sociedad es la retirada y disminución de los glaciares.

Aunque aún hay una gran incertidumbre en saber cómo exactamente va a evolucionar el cambio climático y el calentamiento global se sabe que, salvo casos excepcionales el balance anual de masa de hielo en la mayoría de los glaciares es negativo desde hace algunas décadas, en gran medida debido al cambio climático.

Los mayores desafíos del presente y del futuro es entender las consecuencias del cambio climático y de la gradual retirada y disminución del volumen de los glaciares y desarrollar las medidas de mitigación sobre los efectos negativos que se producirán. Es evidente que la gradual disminución de los glaciares tendrá consecuencias directas sobre actividades como la regulación de la escorrentía de agua producida por el estacional deshielo afectando el seguro abastecimiento de agua a las poblaciones y la generación hidroeléctrica, efectos negativos que se pudieran mitigar parcial o totalmente con la construcción de embalses de regulación como se comentó anteriormente. Otras actividades afectadas directamente por el progresivo retroceso de los glaciares son más difíciles de mitigar como es el caso del turismo y la recreación.

El proceso de deshielo puede tener un gran impacto en la criósfera; sistema que abarca la totalidad de la nieve, el hielo y el suelo congelado (incluido el permafrost) es decir el agua en estado sólido encima y debajo de la superficie terrestre. Es necesario, por lo tanto, investigar en cada caso las consecuencias en el mediano y largo plazo de esos impactos con el objeto de anticipar posibles medidas de mitigación y/o adaptación.

9. EL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA PROTECCIÓN DE LOS GLACIARES

Teniendo en cuenta las consideraciones señaladas en los capítulos anteriores, se estima que el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se erige como una herramienta suficiente y adecuada para la mantención de un sistema de protección casuística de los glaciares.

Dicha herramienta fue creada en virtud de la Ley N°19.300, Ley General de Bases del Medio Ambiente (LBGMA), producto de la necesidad de implementar un sistema que permitiera someter a una autoridad especializada el análisis de ciertos proyectos o actividades con anterioridad a su ejecución, con el objeto de determinar cómo controlar los impactos

ambientales que estos pudieran generar sobre distintos componentes ambientales, y, en algunos casos, compensarlos, mitigarlos o repararlos⁹¹. Así, la ley estableció cuáles proyectos debían someterse a evaluación de impacto ambiental por considerarse potencialmente generadores de tal impacto, cuáles eran las reglas para llevar a cabo dicha evaluación y cuáles eran los órganos encargados de la misma.

A partir del año 2010, en virtud de la Ley N°20.417, la administración del SEIA se encuentra a cargo del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), y se modificó la institucionalidad ambiental, creando además otros órganos que permiten generar un balance para el logro de los objetivos del SEIA: el Ministerio del Medio Ambiente, órgano encargado de generar políticas y normativa de carácter ambiental; la Superintendencia del Medio Ambiente, órgano encargado de fiscalizar y sancionar incumplimientos de los instrumentos de gestión ambiental, estando entre ellos, las resoluciones de calificación ambiental que emanan del SEA; y los Tribunales Ambientales, en cuanto órganos contencioso administrativos especiales y especializados. Esta ley además contempló un mandato para crear un nuevo órgano a cargo de la biodiversidad y áreas protegidas, que se denominará Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) cuya tramitación legislativa se encuentra pendiente⁹².

En este sentido, es relevante señalar que el órgano que cuenta con competencias para establecer políticas ambientales, así como formular planes o programas en materia ambiental, es el Ministerio de Medio Ambiente. En efecto, el artículo 70 de la Ley N° 19.300 otorga competencia a dicho ministerio para que, entre otras cosas, proponga las políticas ambientales e informe periódicamente sobre sus avances y cumplimientos **(letra a)**; proponga las políticas, planes, programas, normas y supervigile el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado **(letra b)**; colabore con los organismos competentes en la formulación de las políticas ambientales para el manejo, uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales renovables e hídricos **(letra f)**; proponga políticas y formule los planes, programas y planes de acción en materia de cambio climático. En ejercicio de esta competencia deberá colaborar con los diferentes órganos de la Administración del Estado a nivel nacional, regional y local con el objeto de poder determinar sus efectos, así como el establecimiento de las medidas necesarias de adaptación y mitigación **(letra h)**; proponga políticas y formule planes, programas y acciones que establezcan los criterios básicos y las medidas preventivas para favorecer la recuperación y conservación de, entre otros, los recursos hídricos, en especial los frágiles y degradados, contribuyendo al cumplimiento de los convenios internacionales de conservación de la biodiversidad **(letra i)**; y elabore los estudios necesarios y recopile toda la información disponible para determinar la línea de base ambiental del país **(letra k)**.

⁹¹ De esta manera, se daba cumplimiento a lo establecido por la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992, en su principio N°17, en el sentido de que *"Deberá emprenderse una evaluación del impacto ambiental, en calidad de instrumento nacional, respecto de cualquier actividad propuesta que probablemente haya de producir un impacto negativo considerable en el medio ambiente y que esté sujeta a la decisión de una autoridad nacional competente."*

⁹² Boletín 9404-12, Proyecto de ley Servicio de Biodiversidad y Áreas Silvestres Protegidas. A la fecha de elaboración del presente informe, se encuentra en segundo trámite constitucional.

De acuerdo a lo anterior, el Ministerio de Medio Ambiente cuenta con competencias suficientes para, por ejemplo, levantar información sobre los glaciares en nuestro país, determinar una línea de base nacional en relación a los glaciares, así como proponer y elaborar políticas, planes y programas en relación a glaciares, su protección, conservación y uso sostenible, cuestiones que a la fecha, no han sido desplegadas a cabalidad, existiendo un vacío en materia de políticas públicas para la protección y gestión de glaciares y su entorno. Al mismo tiempo, cuenta con competencias para establecer programas o planes en relación al cambio climático que, como es sabido, genera importantes efectos en los glaciares, pudiendo a partir de dicha competencia generar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en forma específica sobre este punto.

Lo anteriormente señalado es sumamente importante, y está relacionado directamente con el SEIA como herramienta de gestión ambiental para la protección de cualquier componente del medio ambiente, por ejemplo, los glaciares. En efecto, esa importancia es relevante considerando que una de las principales observaciones hacia el SEIA, como instrumento de gestión ambiental, está ligada a que no sería capaz de brindar un adecuado nivel de protección preventivo al medio ambiente. Dicha observación puede ser explicada, en parte, porque efectivamente el SEIA no puede ser visto, ni fue concebido, como un instrumento absoluto y completo para brindar tal nivel de protección. Es preciso entender que el SEIA es un instrumento de tercer nivel u orden para la protección ambiental, es decir, supone la existencia de instrumentos previos y de carácter general que deben ser aplicados al caso concreto. De esta forma, para su debida aplicación, se requiere en primera lugar la existencia de políticas públicas (primer nivel) y, en segundo, de normas y regulación de carácter general o específica (segundo nivel), a las cuales la autoridad dará aplicación mediante un instrumento de gestión ambiental (tercer nivel), que funcionará óptimamente si los dos pasos previos han sido adecuada y oportunamente establecidos. El SEIA como instrumento de gestión, sirve para la evaluación de impactos de un proyecto o actividad en particular⁹³ en relación con un área de influencia determinada. Lo anterior supone la existencia y definición previa de instrumentos de primer y segundo orden para la protección ambiental de determinados componentes.

Así, en la medida que realmente existan o se fortalezcan instrumentos de primer y segundo orden, el rol de protección del SEIA se robustece y adquiere mayor eficacia como instrumento de gestión. De esta forma, si tenemos en cuenta las competencias habilitantes antes descritas del Ministerio de Medio Ambiente, sería deseable y pertinente que este organismo tome un rol protagónico en la creación de políticas públicas y normas que entreguen una carta de navegación a órganos sectoriales, y al SEIA en relación a la evaluación de impacto de los proyectos que puedan afectar glaciares.

⁹³ Astorga, E. (2014), Derecho Ambiental Chileno Parte General.

En concordancia con lo anterior, estimamos que las observaciones que se realizan a este instrumento de gestión, relacionadas con una supuesta falta de eficacia en la protección de sistemas ecológicos sensibles, u orientados por una desconfianza en su aplicación práctica, no se condicen con el resultado práctico de la aplicación del mismo, y dichas observaciones están igualmente relacionadas o explicadas por la ausencia de instrumentos de primer y segundo orden en la pirámide regulatoria antes mencionada.

De esta forma, al robustecerse, por ejemplo, las vías de declaración de zonas protegidas en relación con los glaciares, sería posible incluir, como se verá más adelante, mayor cantidad de proyectos a evaluación ambiental para gestionar sus impactos. Asimismo, al crearse una línea de base en relación con los glaciares o establecerse criterios y estándares de protección en normas técnicas, sería posible aplicarlas en la evaluación de impacto ambiental de manera de obtener resultados eficaces en su protección. En otras palabras, si los servicios sectoriales y ministeriales desplegaran sus atribuciones en torno a los glaciares y su protección, todo ello redundaría en una evaluación casuística eficaz.

Finalmente, es dable indicar que lo anterior no obsta a señalar que es necesario perfeccionar el SEIA mediante cambios específicos. Como se verá más adelante en el presente capítulo, estimamos que la protección de glaciares mediante este instrumento de gestión, el SEIA, necesariamente requiere de hacer ajustes y modificaciones al mismo, de manera de clarificar el estándar de evaluación técnica y otros aspectos. Por su parte, a modo general, también podría sostenerse que gran parte de las observaciones al SEIA se relacionan, en el fondo, con aspectos de índole estructural u orgánica de su ente administrador, el Servicio de Evaluación Ambiental ("SEA"). En este punto, se comparte la necesidad de robustecer el nivel de jerarquía técnica de los funcionarios que lo componen, mejorar el nivel de independencia técnica en la toma de decisiones vs. poder político, cuestión que en general se puede extender a la de los funcionarios dependientes de la serie de organismos del Estado con competencia ambiental que interactúan en el proceso de evaluación ambiental⁹⁴.

Con todo, dado el desarrollo de las técnicas de evaluación ambiental, y las mejoras y reformas que en el pasado se han hecho al SEIA, estimamos que no hay un órgano de la administración del Estado mejor preparado para llevar adelante la administración del mismo que el SEA.

En esta misma línea, es el SEA el que, además, y en concordancia con las directrices que el propio Ministerio de Medio Ambiente diseñe, puede asumir una mirada de mitigación y adaptación al cambio climático. Esta mirada, incipiente en la evaluación de impacto y casi inexistente en nuestro ordenamiento jurídico vigente, debe ser implementada caso a caso en la evaluación de proyectos. De esta manera, en la medida que existan proyectos que se

⁹⁴ Otra alternativa, que por cierto requiere de una voluntad política muy determinada, es analizar la posibilidad de que junto con dotar de mayores capacidades técnicas a los funcionarios del SEA, se trasladen las competencias de servicios sectoriales con competencia para la evaluación ambiental de proyectos, a la estructura orgánica del propio SEA, estableciéndose en un solo órgano la función de evaluar proyectos o actividades que deban ejecutarse previa obtención de una resolución de calificación ambiental.

emplacen en glaciares o zonas cercanas, el SEIA puede gestionar y permitir una debida adaptación de los proyectos y los territorios circundantes a los efectos que el cambio climático pueda generar.

En efecto, tal como se ha señalado, el mejor camino no es prohibir o restringir actividades en los glaciares o en sus zonas circundantes, ya que ello no permite generar actividades de adaptación al cambio climático por parte de las localidades cercanas, como el uso de tales reservas hídricas para consumo, generación de energía o la agricultura. En la medida que tales actividades se encuentren permitidas y deban ser sometidas a una evaluación de impacto, es posible, por un lado, permitir a las localidades generar medidas de adaptación al cambio climático y, por el otro, gestionar los impactos de un proyecto focalizado en tales propósitos adaptativos y en la protección del medio ambiente. Esta mirada territorial, focalizada y específica no se da de manera eficaz en otro instrumento más que en el SEIA. Por su parte, tal como lo han advertido estudios recientes, es deseable también que la legislación pertinente y el SEIA establezca excepciones a la materialización de proyectos o actividades que busquen hacer frente a eventos puntuales o situaciones de riesgo inminente respecto de la población circundante a glaciares, producto de eventos asociados al cambio climático⁹⁵.

Por su parte, tal como lo han advertido estudios recientes, es deseable también que la legislación pertinente y el SEIA establezca excepciones a la materialización de proyectos o actividades que busquen hacer frente a eventos puntuales o situaciones de riesgo inminente respecto de la población circundante a glaciares, producto de eventos asociados al cambio climático⁹⁶. En efecto, se hace muy necesario tomar en consideración esta advertencia, e introducir en la Ley N° 19.300 y el Reglamento del SEIA, normas que otorguen mayor flexibilidad a la evaluación ambiental de obras o actividades que tengan por objeto implementar medidas de mitigación ante riesgos inminentes a causa del cambio climático o el retroceso de glaciares, en específico. En este sentido, no puede considerarse suficiente la actual redacción del artículo 15 de la Ley N° 19.300, toda vez que se refiere a situaciones derivadas de calamidades públicas, en el supuesto que ya ocurrieron, y cuya calificación de urgencia se encuentra entregada al Director Ejecutivo del SEA⁹⁷. Así, se debiera privilegiar procedimientos de evaluación ambiental con un enfoque preventivo, y asociado a situaciones de riesgo inminente calificadas por una autoridad competente y con conocimientos en la materia.

⁹⁵ Iribarren, P., et al. (2018), Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change, *Ambio* 47.

⁹⁶ Iribarren, P., et al. (2018), Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change, *Ambio* 47.

⁹⁷ Artículo 15 de la Ley N° 19.300: *“Cuando el Estudio de Impacto Ambiental se refiera a proyectos o actividades que deben ser implementados de manera urgente para atender necesidades impostergables derivadas de calamidades públicas, así como a servicios que no pueden paralizarse sin serio perjuicio para el país, el plazo de evaluación se reducirá a la mitad, ordenándose todos los trámites proporcionalmente a ese nuevo plazo. La calificación de urgencia para la evaluación será realizada por el Director Ejecutivo a petición del interesado. El reglamento determinará los requisitos, formas y condiciones necesarios para la solicitud, la aprobación y su debida publicidad.”*

A continuación, se identificarán las bondades del SEIA como instrumento de protección de los glaciares, así como la detección y análisis de sus principales críticas, generándose al respecto, propuestas para su fortalecimiento.

9.1. INGRESO AL SEIA

Nuestro ordenamiento jurídico regula el ingreso de proyectos al SEIA en el inciso 1º del artículo 8 de la LBGMA, al disponer que los proyectos o actividades señalados en el artículo 10 sólo podrán ejecutarse o modificarse previo ingreso al SEIA. De este modo, el artículo 10 de la LBGMA establece un listado taxativo de tipologías de proyectos que deben someterse al SEIA, de manera que aquellos que no se encuentren en una de las tipologías referidas quedarán exentos de una evaluación de impacto ambiental, sin perjuicio de la posibilidad de someterse al SEIA de forma voluntaria.

Cabe señalar que la LBGMA, a su vez, debe ser interpretada en conjunto con el artículo 3 del Decreto Supremo N°40 de 2012, del Ministerio de Medio Ambiente, que aprobó el Reglamento del SEIA, y que establece las especificaciones técnicas de cada una de las distintas tipologías de proyectos indicadas en el artículo 10 de la Ley N° 19.300.

Primeramente, debe considerarse que en la actualidad, los proyectos o actividades que se desarrollan en un glaciar son evaluadas ambientalmente. En efecto, es posible encontrar referencias a los glaciares en el artículo 10 de la LBGMA, el cual establece cuáles son las tipologías de proyectos que deben ingresar al SEIA para su evaluación.

Dicho artículo establece que *"Los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental, son los siguientes: (...)"*. Pues bien, dentro de las tipologías de proyectos enumeradas en el artículo 10, para estos efectos interesa, en primer lugar, aquella señalada en el artículo 10 literal a), el cual ordena el ingreso al SEIA de los siguientes proyectos: "Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas, presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, **significativos**, de **cuerpos o cursos naturales de aguas**." (énfasis agregado).

Este literal no se refiere a los glaciares de forma textual, sin embargo, es necesario conjugarlo con el artículo 3 letra a) del Decreto Supremo N°40 de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, que aprueba el Reglamento del SEIA, el cual precisa su contenido. Este último señala que deben ingresar al SEIA: "Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas. Presas, drenajes, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de **cuerpos o cursos naturales de aguas**, incluyendo a los **glaciares** que se encuentren **incorporados** como tales en un **Inventario Público a cargo de la Dirección General de Aguas**. Se entenderá que

estos proyectos o actividades son significativos cuando se trate de: (...) a.5. La ejecución de obras o actividades **que impliquen alteración de las características del glaciar.** (énfasis agregado).

Una de las observaciones efectuadas respecto del SEIA consiste en el hecho de que el Reglamento del SEIA, en su artículo 3 letra a) distinga entre glaciares inventariados y no inventariados para efectos del ingreso de un proyecto al SEIA⁹⁸. Lo anterior no requiere de una modificación legislativa para salvar esta observación, sino que basta con el robustecimiento de dicho inventario, obteniendo un resultado lineal y directo entre la inclusión de glaciares al Inventario Público y el ingreso al SEIA por este literal.

Por su parte, el artículo 10 literal p) de la LGBMA contiene otra tipología que incluye la posibilidad de impactos en glaciares, haciendo obligatorio el ingreso al SEIA para la "Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas, humedales urbanos o en cualesquiera otras **áreas colocadas bajo protección oficial**, en los casos en que la legislación respectiva **lo permita**". (énfasis agregado). Este literal tiene su correlato en el artículo 3 letra p) del Reglamento del SEIA, pero éste es idéntico a aquel y no añade más información."

Respecto a este último literal debe tenerse en cuenta el Instructivo del SEA, dictado mediante Ordinario 130844/2013, que uniforma criterios y exigencias técnicas sobre áreas colocadas bajo protección oficial y áreas protegidas para efectos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, dentro de las áreas colocadas bajo protección oficial se encuentran las áreas protegidas, y el artículo 36 de la LGBMA incluye dentro de las áreas protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas ("SNASPE") a los glaciares que se encuentren dentro de su perímetro. Por lo tanto, si dentro de alguna de esas áreas en que se pretenda desarrollar un proyecto, existiese uno o más glaciares, han de considerarse áreas protegidas por la ley para efectos de ingresar al SEIA por este literal.

Tal como se ha señalado en este trabajo, el 86% de los glaciares en Chile se encuentran incluidos en áreas protegidas según el SNASPE. Por tanto, actualmente, la mayoría de los proyectos que pretendan instalarse en un glaciar, deben evaluar sus impactos en el SEIA.

Al respecto, es interesante destacar que, tratándose de intervenciones por actividades emplazadas en áreas o zonas sensibles ambientalmente, en el derecho comparado, respecto a la necesidad de evaluación de sus impactos ambientales, prima un análisis "caso a caso". Así, por ejemplo, en el derecho español, ingresan a evaluación los proyectos o actividades que, sin tener la obligatoriedad de ingresar, puedan afectar directa o indirectamente a los espacios de la Red Ecológica Europea Natura 2000, cuando así lo decida la autoridad ambiental tras un estudio caso por caso de conformidad con ciertos criterios establecidos

⁹⁸ Herr, L., (2014), "Los glaciares y su protección jurídica en Chile", Memoria de prueba para optar al grado de licenciada en ciencias jurídicas y sociales, Universidad de Chile.

en la propia norma, los cuales incluyen consideraciones relativas a las características de los proyectos (tamaño, utilización de recursos naturales, contaminación, etc.), a la ubicación de los mismos (con criterios dirigidos a determinar “la sensibilidad medioambiental de las áreas geográficas que puedan verse afectadas por los proyectos”), y a las características del potencial impacto (extensión, probabilidad, duración, etc.)⁹⁹.

Lo anterior está en sintonía con lo propuesto hasta ahora en este trabajo, toda vez que, como ya se ha dicho, la ley debería dar un trato diferenciado por tipo de glaciar, además de que su rol en la disponibilidad hídrica varía según las condiciones específicas de la cuenca de que se trate, o del tipo de glaciar. Por ello, es necesario y posible mantener un sistema de análisis caso a caso por parte de la autoridad ambiental, en este caso el SEA, para todos aquellos proyectos o actividades que, no encontrándose en ninguno de los supuestos del artículo 10 de la Ley N° 19.300, complementado con el artículo 3 del Reglamento del SEIA, sean susceptibles de afectar un glaciar, en base a criterios similares a los descritos previamente, incluyendo la tipología de proyectos y su rol en la disponibilidad del recurso hídrico.

De esta manera, en la medida que se fortalezcan herramientas como el Inventario Público de Glaciares o la declaración y delimitación de estos como un área protegida, así como la inclusión de un sistema de análisis de ingreso caso a caso, el SEIA aumenta su cobertura como instrumento de protección, abarcando una mayor cantidad de proyectos o actividades emplazados en glaciares y/o que sean susceptibles de generar impactos sobre estos.

9.2. VÍA DE INGRESO AL SEIA Y EVALUACIÓN DE IMPACTO

Una vez despejada la duda respecto al ingreso al SEIA de un proyecto o actividad, se debe dilucidar si este ingreso debe efectuarse mediante una Declaración de Impacto Ambiental o (DIA) o mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Conforme a los artículos 8, 9 y 10 de la LBGMA, la decisión de ingreso por una u otra vía debe ser tomada exclusivamente por el titular del proyecto en razón de las características propias del mismo y, fundamentalmente de si éste genera o presenta alguno de los impactos significativos señalados en el artículo 11 de la LBGMA, que se encuentran profundizados en los artículos 5 a 10 del Reglamento del SEIA.

Las diferencias entre las dos vías de evaluación provienen fundamentalmente de la finalidad que cada instrumento tiene, y ello acarrea consecuencias tanto en el procedimiento administrativo como en el contenido del respectivo documento. Así, mientras en las DIAs el objetivo de la evaluación es descartar la existencia de impactos significativos, en los EIAs el eje de la discusión se relaciona con la caracterización pormenorizada de los impactos significativos que se generan, para luego asociar a ellos medidas de mitigación, compensación o reparación adecuadas.

⁹⁹ Lozano, B. (2008), Derecho Ambiental Administrativo.

En relación con los impactos que pueda generar un proyecto a un glaciar existen distintas posibilidades. Por un lado, es posible que el proyecto deba ingresar obligatoriamente al SEIA por encontrarse dentro de alguna de las tipologías señaladas en el acápite anterior, es decir, la letra a) o p) del artículo 10 de la LGBMA, correspondientes a las letras a) y p) del artículo 3 del Reglamento del SEIA, respectivamente, las cuales implican directamente una relación con glaciares. Otra posibilidad es que el proyecto deba ingresar obligatoriamente al SEIA en virtud de cualquier otra tipología del artículo 10 de la LGBMA.

En cualquiera de esos supuestos, el proyecto deberá ingresar mediante la presentación de un EIA cuando además presente los impactos significativos del artículo 11 de la LGBMA. Al respecto, los impactos significativos que pueden generarse a los glaciares se encuentran establecidos en los literales b) y d) del mencionado artículo 11, y su contenido está pormenorizado o detallado en los artículos 6 y 8 del Reglamento del SEIA, respectivamente. En cuanto al artículo 11 letra b), éste señala que el proyecto debe ser sometido al SEIA mediante un EIA si produce “Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire”.

Por su parte, el artículo 6 del Reglamento del SEIA, especifica qué debe entenderse por este efecto adverso significativo sobre dichos recursos. Al respecto establece lo siguiente: “El titular deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental si su proyecto o actividad genera o presenta efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.

Se entenderá que el proyecto o actividad genera un efecto adverso significativo sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire si, como consecuencia de la extracción de estos recursos; el emplazamiento de sus partes, obras o acciones; o sus emisiones, efluentes o residuos, se afecta la permanencia del recurso, asociada a su disponibilidad, utilización y aprovechamiento racional futuro; se altera la capacidad de regeneración o renovación del recurso; o bien, se alteran las condiciones que hacen posible la presencia y desarrollo de las especies y ecosistemas. Deberá ponerse especial énfasis en aquellos recursos propios del país que sean escasos, únicos o representativos.

A objeto de evaluar si se presenta la situación a que se refiere el inciso anterior, se considerará: (...). **g)** El impacto generado por el **volumen o caudal de recursos hídricos a intervenir o explotar**, así como el generado por el **transvase de una cuenca o subcuenca hidrográfica a otra**, incluyendo el generado por ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas y superficiales. (énfasis agregado).

La evaluación de dicho impacto deberá considerar siempre la magnitud de la alteración en: (...) **g.5. La superficie o volumen de un glaciar susceptible de modificarse.**” (énfasis agregado).

Otro tipo de impacto significativo que puede generarse en glaciares o en su sistema hidrológico asociado se encuentra en el artículo 11 letra d), que establece como impacto significativo la "**Localización en o próxima** a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, **glaciares** y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica, **susceptibles de ser afectados**, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar." (énfasis agregado).

Cabe recordar que el artículo 36 de la Ley N°19.300 incluye dentro de las áreas protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas a los glaciares que se encuentren dentro de su perímetro, por lo que en el art.11 letra d) estarían doblemente considerados, en caso de que el glaciar se encuentre declarado o sea parte de un área protegida.

Tal como se señaló anteriormente, el artículo 8 del Reglamento del SEIA especifica el alcance del artículo 11 letra d) mencionado. En primer lugar, repite lo que señala el artículo 11 letra d) indicando que "El titular deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental si su proyecto o actividad se localiza **en o próxima** a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos y **glaciares, susceptibles de ser afectados**, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar" (énfasis agregado). Luego, indica que se entenderá que el proyecto o actividad se localiza en o próximo a uno de estos elementos cuando aquellos se encuentran en su área de influencia.

También especifica que son recursos protegidos "aquellos colocados bajo protección oficial mediante un acto administrativo de autoridad competente, con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental" y que son áreas protegidas "cualesquiera porciones de territorio, delimitadas geográficamente y establecidas mediante un acto administrativo de autoridad competente, colocadas bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental."

Finalmente, en cuanto a la materia que nos concierne, esta norma establece cómo debe determinarse si los señalados elementos son susceptibles de ser afectados por el proyecto, como exige el encabezado de este artículo y del artículo 11 letra d), señalando que "A objeto de evaluar si el proyecto o actividad es **susceptible de afectar** recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, **glaciares** o territorios con valor ambiental, se considerará la **extensión, magnitud o duración de la intervención de sus partes, obras o acciones**, así como de los **impactos generados por el proyecto o actividad**, teniendo **en especial consideración** los **objetos de protección que se pretenden resguardar**." (énfasis agregado).

Además, en este orden de ideas, es necesario tener presente el artículo 18 del Reglamento del SEIA, el cual establece el contenido que debe tener un EIA. En lo que concierne a los glaciares, en su letra e), específicamente en el numeral e.1, señala que el medio físico incluirá la caracterización y análisis de los aspectos asociados a "Los glaciares, ubicación geográfica,

área superficial, espesor, topografía superficial, características superficiales como reflectancia y cobertura detrítica, caracterización a través de un testigo de hielo, estimación de las variaciones geométricas (área y longitud) a través del tiempo usando imágenes de alta resolución, y cálculo de caudales y de aportes hídricos. Dichos aspectos deberán incorporar las áreas de riesgo con ocasión de la ocurrencia de fenómenos naturales.”

Conforme lo señalado hasta ahora, es evidente que la regulación actual contempla expresamente a los glaciares como componente ambiental a preservar, mediante el ingreso al SEIA de proyectos o actividades relacionadas con los mismos y que, en caso de generarse un impacto significativo respecto de ellos, se contempla su ingreso al SEIA mediante un EIA, debiendo generar la respectiva medida de mitigación, compensación y/o reparación adecuada.

Sin perjuicio de lo anterior, es del caso reconocer que el problema o la crítica se genera en dos estadios: el primero, en relación con la mayoría de los proyectos son evaluados a través de una DIA y el segundo, en relación a la determinación de las medidas de compensación en el marco del SEIA.

En relación con el primer punto de crítica, y dado el interés existente en proteger decididamente los glaciares, podría salvarse mediante una modificación al artículo 11 de la Ley N° 19.300 que indique expresamente la obligatoriedad de evaluar todo proyecto que los intervenga mediante un EIA.

Una segunda opción, podría implicar que se eleve el nivel de escrutinio mediante el robustecimiento de la normativa, particularmente, estableciendo un nuevo permiso ambiental sectorial (PAS) para realizar proyectos o actividades que puedan alterar el estado de un glaciar, a cargo del órgano competente, que permita preservar el estado del mismo.

Este nuevo PAS, entonces, implica que el titular de un proyecto, pese a someterse vía Declaración de Impacto Ambiental al SEIA, deberá solicitar el permiso respectivo, debiendo entregarse todos los requisitos, antecedentes e información necesaria para su otorgamiento durante el proceso de evaluación ambiental. Incluso, en caso de no someterse en absoluto al SEIA, el proyecto de todas formas deberá solicitar el permiso sectorialmente al órgano respectivo, salvaguardándose así un grado de protección ambiental para tales casos ajenos a la evaluación de impacto ambiental

En este sentido, si bien se debe determinar la autoridad idónea para otorgar dicho permiso, pareciera ser que mientras no se aprueba la ley que creará el SBAP, la Dirección General de Aguas se mantiene como el organismo del Estado con competencia ambiental más idóneo para pronunciarse al efecto. Si en el futuro la ley que crea el SBAP se promulga, creemos que se generara espacio para debatir que servicio público debería considerarse el competente para la administración y para pronunciarse respecto a actividades al interior de los glaciares inventariados o protegidos.

Por otra parte, algunas de las críticas en torno a la evaluación de impacto respecto a glaciares y la determinación de medidas adecuadas para hacerse cargo de tales impactos, dice relación con evaluaciones de proyectos de antigua data, donde el estándar de la evaluación no se condice con los estándares actuales. En efecto, se ha señalado respecto de tales casos¹⁰⁰ que “la información entregada por el titular del proyecto sobre los glaciares en la línea de base y en la evaluación de los impactos ambientales fue insuficiente, imprecisa, confusa, errónea y, en ocasiones, hasta contradictoria. La consecuencia de aquello quedó de manifiesto en la proposición de medidas de mitigación, compensación y reparación, y de planes de seguimiento, que se caracterizó por ser insuficiente, ineficaz e, incluso, inexistente”¹⁰¹.

La crítica anterior se da en el marco del análisis de proyectos evaluados en forma previa a la modificación del año 2010, tanto respecto de la evaluación ambiental como de la institucionalidad ambiental. Dicho dato no es poco relevante, toda vez que, a partir de dicho hito, la evaluación ambiental ha sufrido un proceso de tecnificación y elevación de estándar, contándose además con nuevas herramientas que permiten mejorar el sistema de cumplimiento de la normativa ambiental y de los instrumentos de gestión asociados, tales como la propia RCA¹⁰².

En efecto, uno de los ejes de tal reforma fue el realizar la evaluación de impacto en etapas tempranas, obteniendo desde un principio toda la información que se requiere para la evaluación, pudiendo darse término anticipado a esta en caso de carecer la DIA o el EIA de información relevante o esencial (artículos 15 y 18 bis de la LBGMA). Hoy, la posibilidad real de calificar un proyecto considerando que la información proporcionada por el titular es insuficiente por parte de la autoridad, como en el caso de Pascua Lama, es prácticamente imposible, al igual que establecer medidas en forma posterior a la RCA, dependiendo del seguimiento, práctica utilizada en un comienzo del SEIA que hoy es descartada en base al principio preventivo que rige en materia de evaluación de impacto ambiental.

De esta forma, la crítica efectuada a partir de tales casos no representa la realidad regulatoria y práctica actual para la aplicación del SEIA, ni menos la futura, toda vez que, como ya lo señalamos previamente, la protección de los glaciares ha sido incorporada en forma expresa tanto respecto del ingreso al SEIA como de la evaluación de impactos significativos. Tanto así, que la propia autora que realizó la crítica posteriormente reconoce que “Con todo, y a

¹⁰⁰ Minera Los Bronces (2007), Codelco División Andina (2006), Minera Los Pelambres (2002 y 2004), Pascua Lama (2001 y 2006) y Central Hidroeléctrica Alto Maipo (2009).

¹⁰¹ Heer, (2014) p.199.

¹⁰² De hecho, el caso del proyecto minero “Expansión Andina 244”, evaluado en forma posterior a la reforma del 2010, pese a no haber terminado en una RCA por desistimiento del Titular, demuestra que el estándar de evaluación realizado por los servicios que participaron en tal proceso es completamente distinto a los casos previos en relación a la protección de los glaciares. En efecto, se mantuvieron constantemente las observaciones de las autoridades competentes, siendo enfáticos en la insuficiencia de la información proporcionada por el titular.

Ver: https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=7674601

pesar de las falencias propias de que adolece el SEIA, éste es el instrumento de política ambiental destinado a prever y evitar que se produzca un daño ambiental determinado.”¹⁰³.

Lo anterior, permite concluir que, en la medida que la regulación se fortalezca en los términos antes descritos (ingreso caso a caso, nuevo PAS) y las autoridades mejoren la gestión del instrumento (elaboración de guías, directrices técnicas, establecimiento de medidas durante el proceso de evaluación y no en forma posterior, etc.), éste se erige como un mecanismo suficiente para la protección de los glaciares susceptibles de verse afectados por la ejecución de proyectos o actividades.

Por último, no debe obviarse el hecho de que el SEIA permite la posibilidad de revisión y modificación de la RCA en ciertos supuestos normados en el artículo 25 quinquies de la Ley N° 19.300. Tal norma señala que *“La Resolución de Calificación podrá ser revisada, excepcionalmente, de oficio o a petición del titular o del directamente afectado, cuando ejecutándose el proyecto, las variables evaluadas y contempladas en el plan de seguimiento sobre las cuales fueron establecidas las condiciones o medidas, hayan variado sustantivamente en relación a lo proyectado o no se hayan verificado, todo ello con el objeto de adoptar las medidas necesarias para corregir dichas situaciones”*.

En este sentido, esta potestad revisora otorgada al SEA cierra el círculo de protección, brindando ciertos márgenes de flexibilidad a la RCA en caso de que las condiciones asociadas a los glaciares varíen sustantivamente en relación a lo proyectado o no se verifiquen tales circunstancias, pudiendo adoptarse las medidas necesarias para otorgar una adecuada protección.

9.3. ROL DE OTRAS INSTITUCIONES COMO COMPLEMENTO DEL SEIA

La Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y los Tribunales Ambientales, cumplen un rol muy importante en cuanto complemento del SEIA. Respecto a la SMA, a ella está entregado el resguardo del efectivo cumplimiento de las normas que regulan el SEIA, de las normas de emisión y de las condiciones establecidas en las RCAs por parte de los titulares de proyectos, mediante el seguimiento, la fiscalización y la sanción. En cuanto a este último punto, cabe señalar que la SMA es la encargada de instruir y llevar a cabo los procedimientos administrativos sancionatorios en contra de los titulares de proyectos por el incumplimiento de sus RCAs y Permisos Ambientales Sectoriales requeridos, los cuales pueden culminar con su condena o absolución. En el caso de condena, las sanciones pueden consistir en una amonestación por escrito, multa, clausura y la revocación de la RCA. Las facultades de la SMA se encuentran reguladas específicamente en la ley N°20.417, Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente.

¹⁰³ Heer, (2014) p. 201.

En relación con las normas que regulan el SEIA, por ejemplo, la SMA podría fiscalizar a un titular y determinar que debió ingresar al SEIA o que debió ingresar mediante un EIA en vez de hacerlo mediante una DIA. Al respecto, el no sometimiento a evaluación de impacto ambiental de un proyecto que sí lo requería, configura la infracción de elusión de ingreso al SEIA, en virtud de lo dispuesto en el artículo 35 literal b) de la LOSMA, infracción que puede ser calificada como grave o gravísima según si el proyecto requiere de una DIA o un EIA, respectivamente. En ese contexto, la SMA está encargada de fiscalizar permanentemente las hipótesis de elusión y, en el evento de verificar infracciones, deberá necesariamente ejercer la potestad sancionatoria en materia ambiental, para lo cual formulará los respectivos cargos que se le imputan al titular. La otra potencial reacción de la SMA ante un escenario de elusión es requerir obligatoriamente el ingreso al SEIA en los términos del artículo 3 literal i) de la LOSMA, facultad para la cual es necesario contar con un informe previo del SEA respecto a la necesidad de ingresar al SEIA o no.

Asimismo, como se ha dicho, la SMA fiscaliza el cumplimiento de lo establecido en las RCAs y en normas de emisión, por lo que los titulares tienen el deber de responder periódicamente a los requerimientos de información que les efectúe la SMA acerca de su estado de actividad y otros asuntos variados, así como reportar los monitoreos que realicen en sus instalaciones por medio de la plataforma RETC que administra el MMA, para facilitar el seguimiento y la fiscalización de la SMA. Todo lo anterior sin perjuicio de la información que, de acuerdo a la respectiva RCA, deban remitir al SEA.

Por su parte, la SMA cuenta además con competencia para suspender transitoriamente las autorizaciones de funcionamiento contenidas en las Resoluciones de Calificación Ambiental o adoptar otras medidas urgentes y transitorias, para el resguardo del medio ambiente, cuando la ejecución u operación de los proyectos o actividades, genere efectos no previstos en la evaluación y como consecuencia de ello se pueda generar un daño inminente y grave para el medio ambiente, conforme al artículo 3 literal h) de su ley orgánica.

En este sentido, la labor de la SMA es de gran relevancia para la protección de los glaciares, y así ha quedado demostrado en los hechos. La sola existencia de una herramienta e institucionalidad destinada a garantizar el cumplimiento de la RCA ha generado una mejora indiscutible en los estándares de evaluación, tanto en la información que entrega y debe entregar el titular del proyecto, como en la labor de los servicios públicos que participan en dicha evaluación. Esto último, porque a diferencia de lo que sucedía antes del 2010, hoy existe un organismo destinado a fiscalizar su cumplimiento y exigencias y sancionar en caso de infracción, así como dotado de herramientas para suspender la RCA en caso de la generación de impactos no previstos en la evaluación.

En efecto, en casos como Pascua Lama¹⁰⁴, Alto Maipo¹⁰⁵ o Central Hidroeléctrica San Andrés¹⁰⁶, - casos en que, precisamente y como se indicaba, se ha criticado la evaluación de impacto respecto a los glaciares- la SMA ha tenido un rol preponderante en el seguimiento y fiscalización asociado a la protección de los mismos, iniciando sendos procesos sancionatorios por incumplimiento de la RCA asociados a la no entrega de información o monitoreo que permitiría determinar el riesgo de impacto sobre tales formaciones, haciéndose incluso cargo el titular de los efectos de tales incumplimientos en el respectivo programa de cumplimiento.

Por su parte y en última instancia, a los Tribunales Ambientales (y la Corte Suprema a propósito del recurso de casación), creados por la Ley N°20.600, les corresponde el conocimiento y resolución de los recursos de reclamación interpuestos en contra de resoluciones dictadas por el Director Ejecutivo y por el Comité de Ministros, en el marco del SEIA. Asimismo, son los órganos competentes para conocer y resolver los procedimientos de daño ambiental con el objeto de ordenar su reparación. También conocen de reclamaciones en contra de resoluciones de la SMA y de otros órganos del Estado con competencia ambiental.

Lo anterior es relevante, toda vez que también tienen un rol en el sistema institucional de protección ambiental. En el caso concreto de los glaciares, el Tribunal Ambiental ha participado en la revisión de las resoluciones de la SMA, por ejemplo, en los casos de Pascua Lama (Rol R-5-2018) o Alto Maipo (Rol R-183-2018, R-184-2018, R-185-2018). Así, por ejemplo, en este último procedimiento, el tribunal decretó como medida cautelar innovativa que el titular consultara al SEA la necesidad de iniciar un procedimiento de revisión de la RCA, en paralelo al cumplimiento del Programa de Cumplimiento que comenzó a ejecutarse bajo la fiscalización de la SMA.

De esta forma, se debe destacar que el carácter sistémico del SEIA no termina en la RCA, sino que se proyecta en toda su vigencia, pudiendo revisarse, reclamarse, monitorearse y fiscalizarse conforme las normas e instituciones que establece la ley, a fin de otorgar una adecuada protección, en este caso, a los glaciares que han sido objeto de evaluación.

¹⁰⁴ En este caso (Rol D-002-2015), la SMA formuló cargos al titular, entre otras cosas, por haber cumplido parcialmente su compromiso de monitorear los glaciares y glaciaretos emplazados en el área de influencia del proyecto minero Pascua Lama.

¹⁰⁵ En este caso (Rol D-001-2017), la SMA formuló cargos, entre otras cosas, porque se realizaron tronaduras en la construcción del túnel El Volcán, sin contar con un programa de monitoreo de vibraciones de tronaduras visado y aprobado por parte de Sernageomin y DGA RM, conforme lo establecía la RCA en su considerando 7.3.5.

¹⁰⁶ En este caso, la SMA formuló cargos y sancionó al titular por el incumplimiento del considerando 4.7.8.4.1 de la RCA N°37/2009, por "no contar, aguas abajo del frente del glaciar, con estación fotográfica para su monitoreo, con el objeto de tomar fotografías del mismo con la periodicidad establecida en el RCA N°37/2009, esto es, 3 veces cada verano". La SMA estimó que tal incumplimiento impedía determinar el riesgo de impacto ambiental que se podría haber generado al Glaciar Universidad asociado al transporte y depositación de material particulado en el mismo causado por las actividades de la etapa de construcción afectando el albedo de su superficie blanca induciendo una tasa de fusión del hielo o neviza mayor que la normal y afectar así el balance de masas, ocasionando cambios geomorfológicos por deslizamiento o aluvionamiento. Estos serían los impactos que se generan por el polvo y ello es lo que se pretendía monitorear.

10. UNA VISIÓN INTEGRAL NECESARIA EN LA FORMULACIÓN DE UNA POLÍTICA PÚBLICA SOBRE GLACIARES EN CHILE.

En la elaboración de una política pública no es suficiente la mirada sectorizada. Si bien ésta es necesaria y ayuda a analizar el problema en sus diversas componentes y complejidades; estaría incompleta si no se complementa con una mirada holística donde se combinan las diferentes miradas de modo de ver el problema en su globalidad. Tal como se hace con el estudio y resolución de problemas complejos, en este documento se han analizado primero diversos aspectos relacionados con glaciares siempre en el entendido que luego es necesario integrar estos análisis bajo una mirada integral.

A modo de ejemplo, se puede señalar que muchos esfuerzos se han dedicado en el mundo en los últimos años, tanto en investigación como en la formulación de políticas públicas, en la gestión integrada del recurso hídrico. Sin embargo, tal como lo señala Schneider¹⁰⁷ et al. en el documento "Assessing the sustainability of water governance systems: the sustainability wheel", son muy pocos los enfoques holísticos sobre este tema que contengan una mirada exhaustiva del mismo en base a un análisis multidisciplinario. Señala, además, que para tener un sistema de gobernanza del agua adecuado es necesario tener una mirada sistémica que relacione los aspectos hidrológicos, ecológicos, sociales, económicos, técnicos, legales y culturales. A estos aspectos deberían agregarse otros aspectos como el uso del suelo y la planificación territorial, los riesgos naturales, sistema de derechos de agua, derechos de propiedad, entre otros.

Los análisis sectoriales por lo general se quedan con una mirada unidimensional del problema, y, por lo tanto, con una mirada sesgada. Por ejemplo, el considerar a los glaciares como un recurso hídrico estratégico no sólo no se ajusta a la realidad científica como ha sido analizado en este documento, sino que esconde aspectos centrales tales como el cambio climático y la necesidad de diseñar e implementar medidas de adaptación. En otras palabras, la protección de los glaciares *per se* no los convierte de modo alguno en un recurso hídrico estratégico porque hay un aspecto relevante en la disponibilidad hídrica en el largo plazo que ha sido ignorado; como es el cambio climático.

Lo mismo ocurre, por ejemplo, cuando se considera a los glaciares como un recurso turístico. Esta es una realidad que sólo será posible en la medida que el acceso a aquellos glaciares, los que resistan al cambio climático, sea seguro y los riesgos asociados a los glaciares sean manejados adecuadamente.

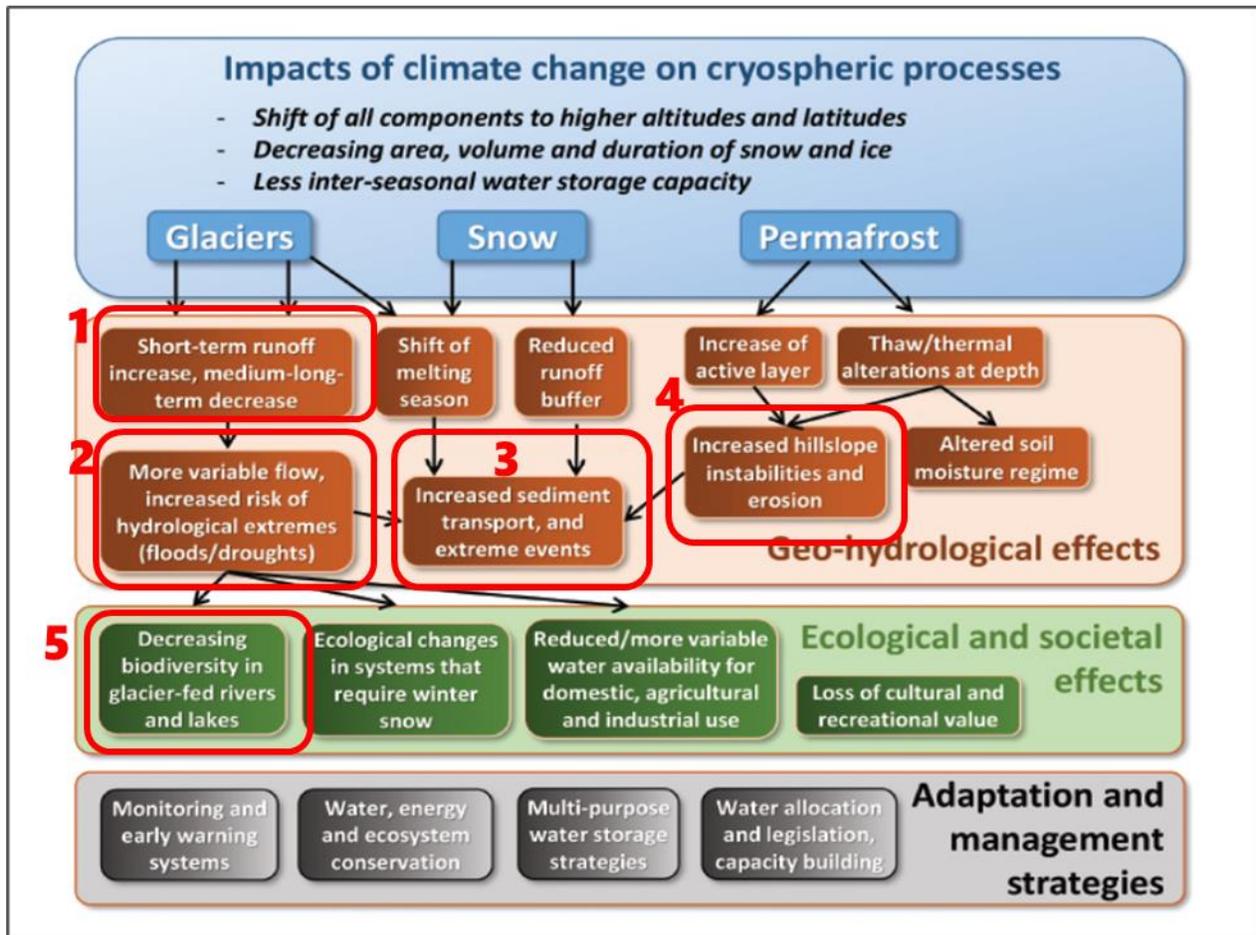
¹⁰⁷ Schneider F., Bonriposi M., Graefe O., Herweg K., Homewood C., Huss M., Kauzlaric M., Liniger H., Rey E., Reynard E., Rist S., Schädler B. y Weingartner R.; (2015) ; Assessing the sustainability of water governance systems: the sustainability wheel; Journal of Environmental Planning and Management.

El gran mérito del SEIA es que tiene una mirada holística tanto del medio ambiente como de los proyectos. Esta mirada holística permite integrar distintas visiones al problema sin perder de vista la relevancia de los aspectos específicos y propios de cada mirada sectorial.

La Figura 20, basada en la Figura 10 de este informe, presenta un análisis holístico del tema. En esta figura, enfocada a los impactos que produciría el cambio climático, se aprecia que existe una cadena de relaciones y factores que, bajo una mirada solamente sectorial, es muy fácil ignorar.

Centrar el análisis sólo o primordialmente en un solo aspecto y no en el todo, puede llevar a conclusiones sesgadas, ineficientes y, finalmente, de un alto costo social. Por ejemplo, considerar a los glaciares como un recurso hídrico estratégico, hipótesis errada según el análisis presentado en el capítulo 6 de este documento, (elemento 1 de la Figura 20), lleva a ignorar otros aspectos tanto o más relevantes como podrían ser los riesgos de inundación (elemento 2 de la Figura 20), la sedimentación de los cursos de agua superficial (elemento 3 de la Figura 20), la inestabilidad de taludes (elemento 4 de la Figura 20), la disminución de la biodiversidad (elemento 5 de la Figura 20), entre otros, todos ellos asociados a los efectos del cambio climático. Todo lo anterior sin considerar los riesgos propios de los glaciares, tal como se han descrito en el capítulo 6 de este documento; riesgos que se verán acrecentados por el cambio climático. Hacerse cargo de un aspecto en particular puede producir impactos adversos en otros elementos de la cadena de sustentabilidad.

Figura 20: Mirada Integral sobre el Cambio Climático y la Protección de Glaciares



Varios investigadores han apuntado a este aspecto; entre ellos Iribarren¹⁰⁸ et al. Hace una crítica específica a las leyes de protección de glaciares porque éstas no tendrían una mirada holística sino más bien sectorial. Con la intención de contar con una ley de protección de los glaciares se ignoran otros aspectos tanto o más importantes como podrían ser los señalados más arriba como son: los riesgos de inundación, la sedimentación de los cursos de agua superficial, la inestabilidad de taludes, la disminución de la biodiversidad, entre otros. En el documento “Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change”, estos autores señalan que las llamadas leyes de protección de glaciares (Glacier Protection Laws) están por lo general enfocadas en la protección de la criósfera de actividades dañinas. Sin embargo, concluyen que este tipo de leyes por lo general pasan por alto aspectos muy importantes tales como: (a) la dinámica de los glaciares; (b) la necesidad de intervenir en forma rápida y oportuna frente a riesgos originados por los

¹⁰⁸ Iribarren P., Kinney J., Schaefer M., Harrison S., Wilson R., Mazzorana B., Guerra F., Farías D., Reynolds J. y Glasser N.; (2018) Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change; Royal Swedish Academy of Sciences.

glaciares y evitar así un riesgo para la población, y, (c) dificultan el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático. A *contrario sensu*, tampoco deberían diseñarse políticas públicas que, para hacerse cargo de los riesgos originados por los glaciares, hicieran caso omiso de la protección de los mismos.

Considerando lo señalado por Huss et al (2017) y el análisis holístico presentado en la Figura 19 de este documento y lo señalado por Iribarren et al (2018) respecto de las leyes de protección de glaciares, resulta de gran importancia que cualquier política de protección de glaciares tenga una mirada integral del tema y no se centre sólo en aspectos particulares ya que las consecuencias podrían ser negativas para la sustentabilidad del país.

Hay un elemento común que está presente en las diversas secciones de este documento; i.e. el cambio climático. Este aspecto es relevante de considerar al momento de evaluar una política pública de esta naturaleza sobre glaciares. No es de extrañar, por lo tanto, que en varios países como Noruega, Suiza, Canadá y otros citados en este documento éstos estén focalizando su esfuerzo en una forma radicalmente distinta a la seguida por aquellas naciones que han optado por una ley de protección de glaciares. El esfuerzo de estos países en materia de glaciares está centrado primero en los efectos del cambio climático y, como consecuencia de ello, en las medidas de adaptación. Incluso han comenzado a estudiar cómo será el desarrollo sustentable futuro sin la presencia de glaciares o con una presencia reducida de los mismos.

Estos países, que se caracterizan por tener los estándares más exigentes de protección del medio ambiente y de sustentabilidad, han optado, además, por un análisis de proyectos caso a caso, en forma similar a como lo hace el SEIA en Chile. Nadie podría argumentar que estos países no tienen interés en la protección de glaciares.

Tal vez, tal como lo señalan Huss et al (2017) el cambio climático asegura una pérdida irreversible de glaciares, permafrost y nieves eternas independiente de las medidas que tomen los gobiernos para moderar el cambio climático. La necesidad de contar con medidas de adaptación serán necesarias en todos los sistemas montañosos. Concluye Huss et al (2017) que la sustentabilidad de una región dependerá de la capacidad de ésta de enfrentar el cambio climático y sus consecuencias. Es en este contexto que cualquier política pública sobre protección de glaciares debe considerar que ésta no puede terminar siendo un impedimento a la implementación de las medidas de adaptación al cambio climático como tampoco a los planes de prevención y mitigación de los riesgos que surgen de éste.

Se puede concluir que, si bien la mayoría de los seres humanos quieren proteger los glaciares, es necesario para conseguir este objetivo poner los énfasis en los aspectos que son relevantes. La protección de los glaciares no se consigue con una ley como las denominadas Glacier Protection Laws (GPL). A partir de la literatura especializada y de la

información técnica relevante este énfasis debería estar antes que nada en el diseño y desarrollo de medidas de adaptación frente al cambio climático.

Entre las medidas que habrá que implementar se pueden visualizar las siguientes: frente a la escasez de la disponibilidad del recurso hídrico, el desarrollo e implementación de un sistema de almacenamiento y gestión del agua; frente al derretimiento del permafrost, la necesidad de modificar y/o desplazar rutas que permitan la conectividad del país y el replanteo de ciertas líneas eléctricas; frente a los riesgos naturales que se presentarán como consecuencia de las inundaciones y/o sequías, la modificación de los planes reguladores o la zonificación del uso del suelo. También será necesario enfrentar la posible reubicación de grupos humanos como resultado de la relocalización de actividades agrícolas y productivas, de la pérdida de puestos de trabajo, la re-zonificación del uso del suelo, entre otros. En este contexto cualquier política pública sobre la protección de glaciares no puede transformarse en un obstáculo al desarrollo e implementación de las medidas ya señaladas.

11. CONCLUSIONES

1. Según cifras de la DGA, Chile cuenta con una superficie de glaciares que supera los 23.000 km². A estas cifras habría que agregar aquellos glaciares no inventariados, entre los cuales se encuentra un número importante de glaciares rocosos.
2. Durante los últimos años se observa un retroceso sostenido de la mayoría de los glaciares en el mundo. Chile no escapa a esta condición. Algunos investigadores sostienen que este retroceso se habría comenzado a producir con la revolución industrial a mediados del siglo XVIII y que la tasa de retroceso se habría acelerado a comienzos del siglo XXI.
3. En efecto, el retroceso de algunos glaciares en Chile durante los últimos años ha sido significativo.
4. Diversos científicos e investigadores han modelado el cambio climático en el mundo para los próximos 50 a 100 años. Si bien las modelaciones pueden variar según las condiciones de borde y los modelos utilizados, todas ellas estiman un aumento de temperatura sostenido que afectará más aún el retroceso de los glaciares.
5. Incluso algunos investigadores, entre ellos M. Huss et al. (2017), sostienen que el mundo se encuentra en un periodo de transición donde la nieve y el hielo de las montañas se verá significativamente reducida sino eliminada del todo.
6. Chile es un país muy extenso que presenta una diversidad de condiciones geográficas y climáticas a lo largo de su territorio. Los glaciares, y el rol de cada uno de ellos y su relación con los ecosistemas y recursos hídricos, es única y específica. Esto nos obliga

a enfocar la protección de los glaciares en forma casuística y no generalizada. Lo que puede ser bueno para proteger un glaciar puede no serlo para otro.

7. El aporte de los glaciares es muy variable a lo largo del país, y salvo excepciones contribuyen en una proporción menor a la disponibilidad hídrica. Esto no significa desconocer la existencia de cuerpos de hielo que interactúan con los recursos hídricos en numerosas cuencas, sino que en términos cuantitativos ello no resulta relevante para la gestión del agua a nivel de las cuencas.
8. En la generalidad de los casos no resulta apropiado referirse a los recursos hídricos almacenado en forma de hielo como "reservas hídricas estratégicas" por las siguientes razones:
 - 8.1. En ninguna cuenca su volumen es de una magnitud tal que permita asegurar el abastecimiento de las demandas actuales por un período prolongado de déficit, de modo que necesariamente deberán buscarse otras fuentes de suministro;
 - 8.2. A diferencia de otras reservas de agua a las que se puede recurrir en períodos de escasez, como es el caso de las aguas subterráneas y del agua almacenada en embalses artificiales, el aporte de los glaciares no se puede manejar a voluntad, dependiendo enteramente de las condiciones meteorológicas del entorno. Así, no presenta una característica fundamental de cualquier reserva: su disponibilidad para incorporarse en los momentos de déficit.
9. Sin perjuicio de lo anterior, en algunas cuencas la contribución de los glaciares a los caudales durante períodos de sequía puede ser muy relevante, lo que justifica plenamente desarrollar políticas específicas orientadas a la protección y gestión de dichos aportes.
10. Los antecedentes presentados dejan en evidencia que los proyectos y actividades que se realizan en el entorno de los glaciares frecuentemente tienen un impacto local en la generación de escorrentía, cuya magnitud depende críticamente de las características de la intervención de la superficie de glaciar afectada y de factores tales como el tipo de glaciar, cobertura y espesor de detritos, elevación, pendiente y orientación, entre otras. Sin embargo, dichos impactos se refieren exclusivamente a la distribución temporal de los aportes y, si se los compara con disponibilidad hídrica a nivel de la cuenca, y con la magnitud de las demandas significan en la mayoría de los casos una reducción menor del abastecimiento.
11. De acuerdo con lo anterior, una política de protección de los glaciares que responda al interés público debiera evaluar caso a caso los impactos de los proyectos y no establecer prohibiciones absolutas que impidan a priori su realización. Dicha política debiera considerar, como sucede en países desarrollados (Canadá, USA, Europa), la mejor solución técnica posible para impedir cualquier afección negativa. Si ello no

fuera posible, sería necesario considerar alternativas de mitigación y compensación, como por ejemplo la construcción de embalses que recuperen la capacidad de regulación perdida, el desarrollo de nuevas fuentes de agua (reutilización de aguas residuales, desalinización, etc.) o la incorporación de tecnologías de uso más eficientes. Finalmente, si lo anterior no fuera suficiente cabría rechazar la realización del proyecto.

12. Desde un punto de vista ecosistémico, los glaciares, principalmente los glaciares descubiertos, contribuyen en forma importante al desarrollo de los ecosistemas altoandinos. Los glaciares de rocas, por su muy baja tasa de derretimiento, contribuyen en menor medida con este aspecto.
13. Es el cambio climático y el consecuente retroceso de los glaciares, lo que ha afectado y afectará en forma importante a estos ecosistemas.
14. Respecto del uso de los glaciares como un recurso turístico o como recurso escénico, se puede señalar que sólo los glaciares blancos descubiertos caerían en esta condición.
15. Considerando, como se ha señalado, que la evaluación deberá hacerse caso a caso, en nuestra opinión es perfectamente posible sostener que la regulación actual en materia de evaluación de impacto ambiental contempla una protección compleja y suficiente, sin perjuicio de las propuestas que al respecto se presentan en este documento y en estas mismas conclusiones más adelante.
 - Se contempla expresamente a los glaciares en las causales de ingreso al SEIA.
 - Se contempla expresamente a los glaciares en la generación de impactos significativos a mitigar, compensar y/o reparar.
 - Contempla mecanismos de revisión, fiscalización, asistencia al cumplimiento y sanción en caso de infringirse las normas ambientales o exigencias de la RCA.
16. Los estándares de evaluación han mejorado considerablemente desde la reforma del 2010 al instrumento e institucionalidad, lo que permite señalar que todas las críticas realizadas a proyectos de antigua data, no se repiten ni debieran repetirse a futuro, debiendo considerarse la totalidad de la información, realizar evaluación de impactos en etapas tempranas del proceso y establecerse medidas de mitigación, compensación y/o reparación adecuadas en la propia RCA y no en forma posterior, conforme al diseño del propio instrumento de gestión.
17. De esta forma, considerando las recomendaciones efectuadas a lo largo de este informe y fortaleciendo el SEIA con un nuevo permiso ambiental sectorial (PAS) que permita dar cobertura de protección a glaciares, respecto de proyectos que no ingresen al SEIA o que ingresen mediante una DIA o EIA, la herramienta se torna en una suficiente y adecuada para lograr la protección de los glaciares en su totalidad, en virtud al caso concreto, teniendo en cuenta las características del tipo de glaciar de que se trate, así como las circunstancias de su entorno.

18. Respecto de los esfuerzos que están haciendo otros países en esta materia, podemos señalar que sólo un país en el mundo tiene una legislación particular para la protección de glaciares; i.e. Argentina. Los países en general, entre ellos Canadá, Suiza, Noruega, Suecia, han optado por analizar los proyectos caso a caso.
19. La mayoría de estos países están enfocados en cómo adaptarse a los efectos del cambio climático en general y a ver cómo reemplazar las funciones que han tenido los glaciares en el pasado tales como el rol ecosistémico que ellos juegan, como reguladores de escorrentías en épocas de sequías, y como proveedores de agua para hidroelectricidad, entre otras. Incluso, algunos países se están preocupando en la utilización del territorio y su ordenamiento una vez que los glaciares hayan retrocedido o incluso desaparecido.
20. Respecto de los riesgos asociados a los glaciares, los antecedentes presentados dejan en evidencia el riesgo que significa para la población y los bienes los desastres que se asocian a la presencia de glaciares en Chile. En especial interesa destacar que:
 - La frecuencia y enorme magnitud que pueden alcanzar las crecidas y aluviones asociados al colapso de volúmenes de agua represadas por el hielo o por morrenas glaciares, y a lahares. Al respecto los antecedentes muestran que en los últimos 50 años se tiene información de 36 casos de este tipo, con el vaciamiento de volúmenes tan altos como 250 millones de m³ y caudales máximos de hasta 11.000 m³/s. Además, en muchos de los casos se trata de caudales que superan por mucho las crecidas de carácter hidrológico observadas.
 - Se trata de fenómenos que se han presentado desde la región patagónica al norte chico, incluyendo la zona central y sur. Según las regiones ellos tienen distintas características, sin embargo, en todos los casos hay eventos de alta peligrosidad.
 - La propagación de estos eventos a lo largo de los cauces puede hacer llegar sus efectos hasta sectores alejados del lugar donde se originaron.
 - En general se trata de fenómenos que han resultado sorpresivos para la población y por lo mismo de alto riesgo. Asimismo, históricamente las decisiones públicas y privadas relacionadas con el emplazamiento de la población o de infraestructuras le han prestado escasa atención.
21. Hacia el futuro existen dos circunstancias que agravarán la situación anterior y debieran llevar a una mayor conciencia de los riesgos involucrados. Ellas son:
 - La mayor presencia de la población en el territorio, incluyendo lugares alejados antiguamente de difícil acceso o localizados en las márgenes de los cauces naturales, debido a la expansión de actividades de carácter, productivo, turístico o recreacional.

- El impacto del cambio climático. Considerando la importancia de los factores climáticos que afectan el equilibrio de los glaciares, resulta previsible que en un escenario de cambio climático la recurrencia de este tipo de fenómenos aumentará. Un ejemplo de los procesos que pudieran presentarse en distintos escenarios climáticos se ha estudiado en el caso del lago Greve (cuenca del río Baker) con el objeto de determinar un posible vaciamiento de dicho lago represado desde 1963 por los repentinos avances del glaciar Pío XI¹⁰⁹.
22. En la elaboración de una política pública no es suficiente la mirada sectorizada. Si bien esta es necesaria, ésta estaría incompleta si no se complementa con una mirada integral u holística.
 23. Una política sobre protección de glaciares no sería una excepción a esta regla. Ésta no puede ni debe centrarse sólo en el recurso hídrico, sino que debe considerar otros aspectos tan relevantes como este último; i.e. los riesgos de inundación, los riesgos asociados a los glaciares, la sedimentación de los cursos de agua superficial, la inestabilidad de taludes naturales, la disminución de la biodiversidad, entre otros.

12. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda fortalecer el SEIA con la incorporación de un PAS que permita dar cobertura de protección a los glaciares respecto de aquellos proyectos que hoy día no ingresan al SEIA. Esto sólo requeriría de un acto administrativo del Ejecutivo.
2. Es necesario realizar mayor investigación sobre los glaciares y su relación con las reservas hídricas y ecosistemas como también en áreas como el ambiente periglacial y permafrost, así como la relación entre estas formas criogénicas con el cambio climático.
3. La experiencia nos indica que la obtención de información cobra valor sólo se si desarrolla en forma continua en el tiempo.
4. Debiera ser el Estado quien promueva estos esfuerzos de investigación.
5. El Estado debiera establecer un programa de detección y vigilancia de glaciares potencialmente peligrosos, o "Servicio de Vigilancia de Glaciares Peligrosos". Ello supone la preparación de un catastro identificando dichos glaciares, y el desarrollo de metodologías y la implementación de programas de vigilancia de acuerdo con las características propias de cada uno de ellos. Este programa deberá encargarse de

¹⁰⁹D. Carrión (2010). Análisis de un posible vaciamiento del lago Greve, Campo de Hielo Sur, en relación con distintos escenarios climáticos. Universidad de Chile – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Escuela de Geografía Santiago. Octubre 2010

estudiar y desarrollar e implementar un sistema para una adecuada planificación y alerta de posibles desastres.

6. Es posible que la prevención de los riesgos requiera de iniciativas de intervención de los glaciares, como ha sido necesario realizar en países que han sufrido este tipo de fenómenos (por ejemplo, en Perú). Así, la legislación que regule la intervención humana en los glaciares debiera permitir la realización en forma oportuna y sin problemas de las obras de prevención. Algún organismo del Estado debiera estar facultado para hacer su diseño y materialización.
7. Es necesario consensuar entre los diversos actores de la sociedad, pero primordialmente entre los académicos, investigadores y técnicos, algunas definiciones. Éstas deberán ser claras y precisas con el objeto de poder diseñar políticas públicas adecuadas.