



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

ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES

FUNDAMENTOS

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS - CECS

S.I.T. N° 205

Santiago, Diciembre 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar Ch.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves
Geógrafo Sr. Gonzalo Barcaza S.

Inspectores Fiscales
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar C.
Ingeniero Civil Sr. Cristóbal Cox O.

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS

Jefe de Proyecto
Dr. Andrés Rivera (Glaciólogo)

Profesionales
MSc Francisca Bown (Glacióloga)
Claudio Bravo (Geógrafo)
Daniela Carrión (Licenciada en Geografía)
Dr. Gino Casassa (Glaciólogo)
Claudia Flores (Secretaria)
Dra. Paulina López (Hidroglacióloga)
MSc Camilo Rada (Geofísico)
Sebastián Vivero (Licenciado en Geografía)
Pablo Zenteno (Geógrafo)

Índice

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. ORIGEN DEL PROYECTO Y TRATAMIENTO GENERAL DEL TEMA	6
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO	6
1.3. OBJETIVOS	7
1.4. ¿POR QUÉ UNA ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES?	8
2. GLACIARES Y CAMBIO CLIMÁTICO	11
2.1. DEFINICIÓN DE GLACIAR	11
2.1.1. DEFINICIÓN OPERATIVA	12
2.2. CLASIFICACIÓN DE GLACIARES Y LAS FORMAS PRESENTES EN CHILE	12
2.2.1. MORFOLÓGICA PRIMARIA	12
2.2.2. TIPOS DE ZONAS DE ACUMULACIÓN	17
2.2.3. TIPOS DE FRENTE	18
2.2.4. CLASIFICACIÓN TÉRMICA	18
2.2.5. CLASIFICACIÓN DINÁMICA	19
2.3. CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE	20
2.3.1. CAMBIOS DE LARGO PLAZO (PRE-INSTRUMENTAL)	20
2.3.2. VARIABILIDAD Y CAMBIOS RECIENTES	21
2.3.2.1. CAMBIOS EN TEMPERATURAS	22
2.3.2.2. CAMBIOS EN PRECIPITACIONES	23
2.3.2.3. CAMBIOS EN ESCORRENTÍA	27
2.3.2.4. LÍNEAS DE NIEVE/EQUILIBRIO	29
2.3.3. PROYECCIONES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS FUTUROS	31
2.4. RESPUESTA DE LA CRIÓSFERA AL CALENTAMIENTO GLOBAL Y SUS POTENCIALES EFECTOS SOBRE ACTIVIDADES HUMANAS Y SOBRE EL MEDIO AMBIENTE	36
2.4.1. EFECTOS POTENCIALES GLOBALES	36
2.4.1.1. ESTADO DE LA CRIÓSFERA	38
2.4.1.2. IMPACTOS DE LOS CAMBIOS CRIOSFÉRICOS	42
2.4.2. EFECTOS POTENCIALES EN CHILE	44
2.4.2.1. ESTADO DE LA CRIÓSFERA EN CHILE CONTINENTAL	44
2.4.2.2. IMPACTOS DE LOS CAMBIOS CRIOSFÉRICOS EN CHILE	47
3. INSTITUCIONALIDAD, LEGISLACIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE GLACIARES	51
3.1. INSTITUCIONALIDAD Y SUS LÍNEAS GENERALES DE TRABAJO	51
3.1.1. INSTITUCIONES DEL ESTADO VINCULADAS A LA ADMINISTRACIÓN, ESTUDIO Y RESGUARDO DE GLACIARES	51
3.1.2. INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	53
3.1.3. EMPRESAS PRIVADAS	55
3.1.4. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN RECIENTE	57
3.1.5. PROGRAMAS DE ESTUDIO	57
3.2. MARCO NORMATIVO Y ESTRATÉGICO ACTUAL	58
3.2.1. LOS GLACIARES EN LA LEGISLACIÓN ACTUAL	58
3.2.2. POLÍTICA NACIONAL DE GLACIARES	62
3.3. PROPUESTAS LEGISLATIVAS	64
4. ESTADO ACTUAL DE LA GLACIOLOGÍA EN CHILE	67
4.1. ZONAS GLACIOLÓGICAS DE CHILE	67
4.1.1. ZONA NORTE	69
4.1.2. ZONA CENTRO	75
4.1.3. ZONA SUR	76
4.1.4. ZONA AUSTRAL	79
4.2. INVENTARIOS DE GLACIARES	82
4.2.1. COBERTURA NACIONAL, REGIONAL Y POR CUENCA HIDROLÓGICA	82
4.2.2. MÉTODOS UTILIZADOS E INFORMACIÓN DISPONIBLE	88
4.2.3. ESTIMACIONES DE ERRORES O INCERTIDUMBRES ASOCIADAS	91

4.3. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GLACIOLÓGICA	92
4.3.1. VARIACIONES AREALES Y FRONTALES	92
4.3.2. VARIACIONES VOLUMÉTRICAS.....	104
4.3.3. GLACIARES ROCOSOS	106
4.3.4. BALANCE DE MASA.....	107
4.3.5. BALANCE DE ENERGÍA.....	111
4.3.6. MEDICIONES GEOFÍSICAS.....	113
4.3.7. TESTIGOS DE HIELO	117
4.3.8. HIDROLOGÍA GLACIAR.....	119
4.3.9. ESTUDIOS INTEGRADOS O REVISIONES SISTEMÁTICAS	121
4.4. ANÁLISIS DE LAS REDES NACIONALES DE MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO EN CUENCAS CON APORTES GLACIARES	122
4.4.1. RED FLUVIOMÉTRICA DGA	122
4.4.2. RED METEOROLÓGICA DGA	127
4.4.3. RED METEOROLÓGICA DMC	128
5. INTERRELACIÓN GLACIARES-ACTIVIDAD HUMANA	132
5.1. ANÁLISIS DE LA DEMANDA Y DISPONIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS SELECCIONADAS CON APORTES GLACIARES	132
5.1.1. DESCRIPCIÓN DE CUENCAS SELECCIONADAS	132
5.1.2. IMPORTANCIA HÍDRICA DE LOS GLACIARES.....	134
5.1.3. DEMANDAS ACTUALES DE AGUA POR SECTOR PRODUCTIVO	140
5.1.4. COMPARACIÓN Y PROYECCIONES	144
5.2. RIESGOS ASOCIADOS A GLACIARES DEBIDO A CAUSAS NATURALES	146
5.2.1. ANÁLISIS GLOBAL Y TEORÍA	146
5.2.2. ESTUDIOS DE CASOS A NIVEL NACIONAL.....	152
5.3. IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES EFECTOS DE ACTIVIDADES HUMANAS EN LOS GLACIARES	157
5.3.1. ACTIVIDADES QUE PUEDEN AFECTAR GLACIARES.....	157
5.3.1.1. ACTIVIDAD MINERA: EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN	158
5.3.1.2. OBRAS HIDRÁULICAS.....	160
5.3.1.3. ACTIVIDADES TURÍSTICAS Y RECREATIVAS	161
5.3.1.4. ACTIVIDAD CIENTÍFICA.....	162
5.3.1.5. CONTAMINACIÓN DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OTRAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS.....	163
5.3.2. ESTUDIOS DE CASO	164
6. REQUERIMIENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS	168
6.1. ANÁLISIS CRÍTICO DE INFORMACIÓN EXISTENTE EN CHILE	168
6.1.1. INVENTARIOS.....	168
6.1.2. VARIACIONES FRONTALES Y AREALES.....	172
6.1.3. VARIACIONES VOLUMÉTRICAS.....	176
6.1.4. BALANCES DE MASA Y TESTIGOS DE HIELO	180
6.1.5. MEDICIONES GEOFÍSICAS	183
6.1.6. HIDROLOGÍA GLACIAR	185
6.1.7. PELIGROS ASOCIADOS A GLACIARES	186
6.1.8. GLACIARES ROCOSOS	186
6.1.9. EVALUACIÓN AMBIENTAL	187
6.1.10. CONSIDERACIONES GENERALES.....	188
6.2. ANÁLISIS CRÍTICO DE SITUACIÓN LATINOAMERICANA	188
6.3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS	191
6.3.1. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN EL USO DE SISTEMAS DE MONITOREO JERÁRQUICO	192
6.3.2. EL CASO DE CHILE	194
6.4. PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS A 5, 10 Y 20 AÑOS	197
6.4.1. A 5 AÑOS	197
6.4.2. A 10 AÑOS	198
6.4.3. A 20 AÑOS	198
6.5. MOTIVACIÓN DEL MONITOREO Y COSTO ALTERNATIVO	199
6.5.1. EL VALOR DE LA INFORMACIÓN Y COSTO ALTERNATIVO	199
6.5.1.1. RECURSOS HÍDRICOS	200
6.5.1.2. RECURSOS TURÍSTICOS.....	202
6.5.1.3. PELIGROS GLACIARES.....	203

6.5.1.4.	AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR	203
6.5.1.5.	ASPECTOS GEOPOLÍTICOS	204
6.5.1.6.	EFFECTOS SECUNDARIOS.....	204
7.	PLAN NACIONAL DE MONITOREO GLACIAR	205
7.1.	NIVEL 5: MONITOREO EXTENSIVO NACIONAL.....	205
7.1.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS	205
7.1.2.	NÚMERO DE GLACIARES Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.....	207
7.1.3.	ESTUDIOS RECIENTES EN NIVEL 5	207
7.1.4.	ESTUDIOS PRIORITARIOS.....	207
7.1.5.	LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA Y SEGUIMIENTO	207
7.2.	NIVEL 4: ANÁLISIS DE FLUCTUACIONES GLACIARES	208
7.2.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS	208
7.2.2.	NÚMERO DE GLACIARES Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.....	209
7.2.3.	ESTUDIOS RECIENTES EN NIVEL 4	209
7.2.4.	ESTUDIOS PRIORITARIOS	210
7.2.5.	LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA Y SEGUIMIENTO	210
7.3.	NIVEL 3: MONITOREO GLACIAR DE MEDIANA INTENSIDAD	210
7.3.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS	210
7.3.2.	NÚMERO DE GLACIARES EN ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN	212
7.3.3.	ESTUDIOS RECIENTES EN NIVEL 3	212
7.3.4.	ESTUDIOS PRIORITARIOS	212
7.3.5.	LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA Y SEGUIMIENTO	213
7.4.	NIVEL 2: MONITOREO DE DETALLE.....	213
7.4.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS	213
7.4.2.	NÚMERO DE GLACIARES Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.....	216
7.4.2.1.	PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN	219
7.4.2.2.	BÚSQUEDA PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS POR ZONA	220
7.4.3.	ESTUDIOS RECIENTES EN NIVEL 2	223
7.4.4.	ESTUDIOS PRIORITARIOS.....	223
7.4.5.	LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA Y SEGUIMIENTO	223
7.5.	NIVEL 1: MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO Y MULTIDISCIPLINARIO	224
7.5.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS	224
7.5.2.	NÚMERO DE GLACIARES Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.....	228
7.5.3.	ESTUDIOS RECIENTES EN NIVEL 1	229
7.5.4.	ESTUDIOS PRIORITARIOS	229
7.5.5.	LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA Y SEGUIMIENTO	229
7.6.	DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN	229
7.7.	ANÁLISIS DE COSTOS ESTIMATIVOS	230
7.7.1.	COSTOS NIVEL 5	231
7.7.2.	COSTOS NIVEL 4	235
7.7.3.	COSTOS NIVEL 3	238
7.7.4.	COSTOS NIVEL 2	242
7.7.5.	COSTOS NIVEL 1	246
7.7.6.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	250
7.7.7.	DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN	251
7.7.8.	RESUMEN DE COSTOS.....	251
8.	REFERENCIAS.....	252
	GLOSARIO DE GLACIARES MENCIONADOS Y SUS CUENCAS ASOCIADAS	288

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Origen del proyecto y tratamiento general del tema

Chile posee una gran cantidad de glaciares que son parte fundamental de sus ecosistemas, llegando con el tiempo a ser considerados también importantes para algunas de las múltiples actividades económicas y sociales del país. Su vulnerabilidad ha generado una creciente preocupación de la población en temas relacionados con su conservación y uso, lo que ha resultado en múltiples y dispersas iniciativas tanto personales, institucionales como legales. De este modo surge la necesidad de tratar el tema de una manera integrada y coordinada, mediante una estrategia nacional de glaciares, cuyos fundamentos se agrupan en el presente documento, donde se analiza el estado actual de los glaciares y su conocimiento. Esta estrategia, parte de las experiencias nacionales e internacionales que han permitido conocer los cuerpos de hielo, favoreciendo la promoción de políticas de protección y manejo, con el fin de enfrentar informadamente las tendencias actuales de cambio, las posibles respuestas glaciares y sus consecuencias futuras, frente a los escenarios de cambio climático que se pronostiquen.

1.2. Hipótesis de trabajo

General

El volumen de hielo almacenado en los glaciares de Chile está sufriendo una rápida reducción, principalmente en respuesta a los cambios climáticos y marginalmente por actividad volcánica y humana, lo que afectará la disponibilidad de recursos hídricos, con efectos negativos para un desarrollo sustentable y para la estabilidad de los sistemas naturales asociados. Si bien se ha avanzado en el conocimiento glaciológico del país, éste es aún incompleto y persisten deficiencias en la capacidad de las instituciones nacionales para abordar estas materias, por lo que una propuesta estratégica de glaciares, podrá ordenar el quehacer público a este respecto, gestionando nuevos recursos de investigación y generando información útil para tomadores de decisión.

Específicas

- La reducción volumétrica que afecta a los glaciares de Chile incrementará la inestabilidad de importantes zonas que rodean los glaciares, la mayoría de las cuales se encuentran incluidas en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres y Protegidas del Estado (SNASPE). Esto debido a que los glaciares actúan como estabilizadores del clima y relieve, así como de la disponibilidad de recursos hídricos en las zonas donde se emplazan.

- La creciente reducción de las masas de hielo está afectando la disponibilidad y ocurrencia de la escorrentía proveniente de cuencas englaciadas, resultando en una creciente competencia por los recursos hídricos, lo que tiene impactos en los diseños estratégicos necesarios para asegurar un uso y manejo sustentable de estos recursos.
- Un aceleramiento en el retroceso y adelgazamiento de glaciares resultará en un mayor aumento del nivel del mar global, lo que tendrá efectos negativos multiplicativos para las zonas costeras.
- La falta de una adecuada capacidad humana e institucional de Chile para el estudio y comprensión de los glaciares, origina conflictos de orden ambiental, socio-económicos y políticos. Disminuyendo además la efectividad de las decisiones gubernamentales en estas materias.

1.3. Objetivos

General

Formular una Estrategia Nacional de Glaciares que se constituirá en la hoja de ruta para su estudio en el largo plazo, definiendo metodologías y modelos básicos aplicables a vastas zonas climáticas del país, y su posible manejo frente a escenarios futuros de cambio climático.

Específicos

- Definir una línea de base glaciológica para Chile.
- Diagnosticar la capacidad humana existente en Chile, para abordar el estudio de glaciares.
- Diseñar un sistema integrado de observaciones glaciar/clima que permita compilar datos relevantes para un monitoreo de largo plazo.
- Contribuir al desarrollo de planes de acción nacional y regional que permitan mejorar el monitoreo de glaciares.
- Identificar los principales impactos futuros para el manejo de recursos hídricos y actividades humanas debido a la pérdida de masas de hielo.
- Desarrollar recomendaciones para soluciones integradas en relación a los conflictos más urgentes producto de la disminución de glaciares.
- Definir la naturaleza y calidad de los estudios necesarios para aquellas actividades que deban entrar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental por su relación con glaciares.

- Sentar las bases que permitan construir una capacidad de medición, análisis e integración de información glaciológica en la DGA, la que permitirá a las instituciones nacionales definir estrategias, políticas de adaptación y uso/manejo/protección de glaciares.

1.4. ¿Por qué una Estrategia Nacional de Glaciares?

El Gobierno de Chile se ha planteado como uno de los objetivos principales de esta administración el promover: “Una nueva política ambiental, mucho más exigente y moderna. Esta nueva política ambiental se basará en el concepto de desarrollo sustentable, de manera de compatibilizar crecimiento económico, protección de la naturaleza y equidad social. Esta política será el marco para una gestión ambiental basada en una mirada de largo plazo, pero con énfasis en la acción, mediante la definición de metas nacionales y regionales para cada uno de los ámbitos priorizados en este Programa de Gobierno.” (www.gobiernodechile.cl)

La concreción de este anhelo de transformar a Chile en un país con desarrollo sustentable depende de varios factores estructurales, destacándose como uno de los principales, las características, potencialidades y limitaciones de nuestro medio ambiente físico natural. La importancia del medio físico radica principalmente en que de allí extraemos los recursos naturales que sostienen nuestra economía, pero el medio natural que nos rodea es además parte de nuestro patrimonio y acervo, permite definir nuestra identidad nacional, constituye un elemento central de nuestra calidad de vida y constituye una herencia fundamental para generaciones futuras.

El medio natural de nuestro país experimentó a lo largo de la historia, cambios y procesos relacionados principalmente con la variabilidad y dinámica propia de la naturaleza. En las últimas décadas sin embargo, el rol del ser humano en la modificación del clima del planeta (Cambio climático), ha sido crecientemente demostrada (IPCC, 2007), teniendo efectos en los recursos naturales, su disponibilidad y estabilidad (Rosenzweig *et al.*, 2009). Entre éstos, los glaciares se han visto ampliamente afectados, debido al aumento de las temperaturas y al descenso de las precipitaciones de varias regiones, lo que ha traído consigo retrocesos y adelgazamientos generalizados (Rignot *et al.*, 2003). En el futuro, los cambios climáticos y la dinámica del sistema natural pueden exacerbarse, debido principalmente al nivel de desarrollo que ha alcanzado nuestra sociedad caracterizada por un creciente uso de combustibles fósiles, una mayor ocupación del territorio e intensidad en el uso y manejo de recursos naturales, la modificación de la composición química de la atmósfera y una creciente competencia por la adquisición de recursos naturales escasos.

Esta creciente presión sobre el medio natural está generando cambios en la disponibilidad y calidad de algunos de sus componentes, lo que genera vulnerabilidad e incluso especulación desmesurada en diversos sectores económicos, y que puede llegar a limitar seriamente las

posibilidades de alcanzar las metas de desarrollo y sustentabilidad propuestas. Uno de los componentes del sistema natural que es vital para nuestro desarrollo, que está sometido a fuertes presiones por su adquisición y que presenta síntomas de fragilidad debido a los cambios climáticos observados, es el agua, en todas sus formas y estados.

Glaciares; reservas estratégicas de agua en estado sólido

Uno de los componentes importantes en el ciclo hidrológico de nuestro país son los glaciares, que pueden ser considerados como reservas estratégicas de agua en estado sólido. Los glaciares también son considerados buenos indicadores de cambios climáticos, debido a que la mayoría de ellos han experimentado cambios históricos en clara relación con las variaciones de clima.

Chile es uno de los países que cuenta con una de las mayores superficies englaciadas a nivel mundial, y la mayor del hemisferio sur (excluyendo Antártica) del que representa un 62% de la superficie glaciar. Lidera también las estadísticas en Sudamérica con un 76% de la superficie glaciar. A nivel mundial Chile representa el 3,8% de la superficie glaciar excluyendo Antártica y Groenlandia (Dyurgerov & Meier, 2005; Casassa *et al.*, 2007a; UNEP, 2007).

Los glaciares de Chile son importantes pues constituyen un elemento prístino del paisaje, donde el hielo es percibido por la sociedad como una reserva ambiental, que debe ser protegida para preservar su belleza, que está libre de contaminación, donde se almacenan registros únicos del pasado y donde el hombre sólo puede ingresar en forma muy limitada.

Más en concreto, los glaciares de nuestro país son importantes porque:

- Contribuyen con un importante caudal a la escorrentía, principalmente en veranos de años con pocas precipitaciones en numerosos ríos del centro y norte de Chile.
- Están asociados a riesgos potenciales para zonas pobladas.
- Son un factor fundamental desde el punto de vista geopolítico (definición limítrofe).
- Pueden constituir recursos económicos rentables (asignación de acciones de agua de fusión glaciar para diferentes usos, actividades turísticas).
- Son laboratorios naturales para estudios científicos y tecnológicos.
- En su conjunto pueden generar un aporte sustancial al aumento del nivel global del mar.
- Son un componente ambiental que juega un rol importante en la dinámica natural.

En las últimas décadas se ha avanzado mucho en el conocimiento y estudio de estos cuerpos de hielo en Chile, no obstante lo anterior, hay un sinnúmero de preguntas que pueden formularse y que aún no tienen respuestas adecuadas. Por ejemplo: ¿Cuántos glaciares hay en nuestro país? ¿Qué volumen equivalente en agua tienen? ¿Cuánta agua están aportando a las cuencas de nuestro país? ¿Qué fluctuaciones han experimentado en el pasado? ¿Qué cambios se esperan en los distintos

escenarios de cambios climáticos futuros? ¿Cuál es el nivel de protección y/o manejo que define nuestra legislación?

En Chile los glaciares aún no están plenamente presentes en nuestra legislación, sin embargo hay algunos organismos estatales que se han preocupado de ellos, sin existir hasta el momento una adecuada coordinación ni visión integral, lo que busca ser aportado por la presente estrategia. El organismo del Estado que más ha destacado en este sentido, es la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que por sus misiones legales y administrativas, ha tenido un rol fundamental en todo lo relacionado con nieves y glaciares en Chile, lo que se ha reafirmado con una larga data de estudios y trabajos sobre esta materia.

En las últimas décadas, varios cuerpos de hielo han sido objeto de conflictos ambientales, debido a la creciente presión de algunos agentes económicos, que han intervenido zonas englaciadas, con fines productivos y exploratorios. Estas presiones, han sido consideradas amenazas a la existencia de cuerpos de hielo, en particular cuando las intervenciones propuestas, implican remoción de cuerpos de hielo. La posibilidad de que este tipo de presiones aumenten, obliga a una mejor preparación de los organismos del Estado, mejores datos sobre zonas involucradas y un plan de acción sobre cuerpos de hielo potencialmente afectados.

Hoy sin embargo, el creciente interés por temas medio-ambientales, la preocupación por los efectos del cambio climático y la definición que nos hemos dado de desarrollo sustentable, requiere un salto cualitativo y cuantitativo de proporciones en el conocimiento de los glaciares de Chile y la forma de enfrentar el desafío que imponen estos cambios en el futuro. Para ello, se propone la generación de un plan estratégico nacional, que permita en primer lugar abordar este tema con herramientas de última generación y definir al menos: el estado actual de la criósfera de nuestro país, los requerimientos científico-técnicos a resolver, las interacciones con otros sistemas naturales, los modelos de cambios futuros, las propuestas de modificaciones legales que se requieran, recomendaciones para tomadores de decisión, las medidas de protección, mitigación, uso y manejo de glaciares y las actualizaciones necesarias de planes gubernamentales relacionados.

Sin un proyecto de este tipo, habrá una incertidumbre significativa y creciente sobre las posibilidades de que nuestro país pueda concretar un desarrollo sustentable y armonioso con el medio ambiente, entre otros factores, por la vulnerabilidad de sectores económicos que dependen de la disponibilidad de recursos hídricos futuros, los que parcialmente se generan por el derretimiento de nieves y hielos del país.

Una estrategia de glaciares para Chile, permitirá posicionarnos como un país que le da importancia a las materias medioambientales, incorpora el cambio climático en sus políticas públicas y planifica estratégicamente medidas adaptativas frente a posibles impactos de los cambios en curso.

2. GLACIARES Y CAMBIO CLIMÁTICO

2.1. Definición de glaciar

Existen múltiples definiciones de glaciar, de todas ellas, se ha tomado como base para este trabajo, la propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001) que define glaciar como: "*masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo 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*". Los glaciares así definidos, pueden adquirir numerosas formas, desde glaciares descubiertos como el San Rafael en el Campo de Hielo Norte (CHN) que corresponde a la imagen popular de un glaciar, hasta los llamados glaciares rocosos, que corresponden a masas de hielo mezcladas con rocas en proporciones variables y cubiertos por una capa de detritos, presentando una morfología superficial que evidencia el flujo del hielo subyacente.

Los glaciares fluyen en forma relativamente lenta (desde algunos centímetros a cientos o pocos miles de metros por año) principalmente gobernados por la fuerza de gravedad.

Considerando lo señalado por Post *et al.*, (1971), y también por la discusión planteada por Marangunic (1979), la definición exacta se complica porque:

1. Incluso la nieve invernal o estacional muestra propiedades de flujo.
2. Pueden existir masas de hielo perenne de dimensiones importantes que no evidencian flujo. Lo que puede deberse a una topografía que no permite el flujo, o al estancamiento de un glaciar anteriormente activo. Otro caso problemático son las acumulaciones de hielo perenne alimentado por avalanchas desde glaciares colgantes activos, las que frecuentemente muestran poco movimiento.

A lo anterior, pueden sumarse otras complicaciones, como la existencia de masas de hielo recubiertas de material morrénico o de origen volcánico, el cual puede alcanzar a tener una gran proporción, representando más del 50% del volumen total, resultando en una morfología ondulada que evidencia la existencia de flujo, típica de los denominados glaciares de roca.

El carácter perenne de un glaciar, implica que su formación y génesis requieren de un período mínimo de varios años. Hay evidencias de regeneración de glaciares en conos volcánicos sometidos a erupciones, proceso que por ejemplo en el Monte St. Helens de EE.UU. requirió 16 años para formar un cuerpo de hielo de decenas de metros de espesor (Walder *et al.*, 2007). El hielo que existe en un glaciar puede tener

cientos o miles de años (Patagonia, Andes) hasta millones de años en los casquetes de Antártica y Groenlandia.

2.1.1. Definición operativa

Dado que las características de una estrategia nacional y sus acciones asociadas requieren de una definición operativa fuera de la discusión académica, práctica y fácil de aplicar, se entenderá el concepto de glaciar para los efectos de esta estrategia como:

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

Esta definición pudiera no incluir algunos glaciares reconocidos como tales por la academia (como los muy pequeños) o pudiera incluir algunos cuerpos que no corresponderían a glaciares según otras definiciones (como los glaciares de roca inactivos o fósiles), pero estos sesgos son menores y no invalidan el valor de esta definición particularmente sencilla, concisa y clara.

2.2. Clasificación de glaciares y las formas presentes en Chile

2.2.1. Morfológica primaria

Esta es la clasificación principal, la que pone en evidencia la diversidad glaciar, diferenciándolos por su naturaleza, tamaño y características. Cada tipo de glaciar representará desafíos particulares para su estudio, el que ha de realizarse con diferentes técnicas y precisiones.

Casquetes de hielo continental o Islandis (Ice sheets). Es una gran masa de hielo que cubre un continente, como Antártica o grandes extensiones como Groenlandia, las cuales no están totalmente controladas por la topografía de la corteza que subyace al hielo. Este tipo se caracteriza por ser más activo en sus bordes y a lo largo de corrientes de hielo (Ice Streams). Las partes más altas y abombadas se denominan "Domos",



Figura 2.1: Casquete de hielo antártico visto desde el Cordón Centinela.

que se caracterizan por su muy escasa pendiente, gran altura y flujo de hielo muy limitado; desde estos Domos nacen los principales glaciares que drenan el casquete de hielo mediante Ice Streams. Se trata de glaciares fríos que en general presentan escasa alimentación. En términos genéticos obedecen al fenómeno de autocatálisis, que implica la generación de condiciones climáticas, caracterizadas por la presencia

semipermanente de un centro de altas presiones con bajísimas temperaturas, que permitió su formación y actual mantención.

Plataformas de hielo flotantes (Ice shelves).

Es la porción flotante de un glaciar cuyo frente termina en aguas oceánicas profundas. Las principales plataformas se encuentran en Antártica (Ross, Ronne-Filchner y Amery), pero también se encuentran en Groenlandia y el Ártico canadiense, donde el hielo puede alcanzar el punto de flotación en algunos glaciares que presentan dimensiones muy inferiores a los de Antártica.

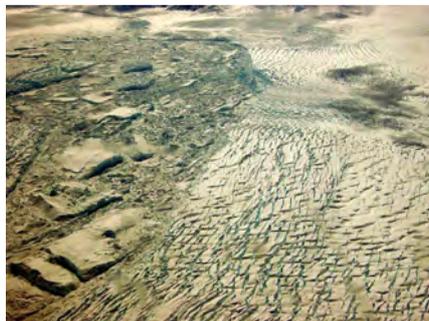


Figura 2.2: Plataforma de hielo flotante Wordie, en Antártica.

El borde externo de las plataformas de hielo flotantes presenta una pared vertical de decenas de metros de altura, lo que llevó a los primeros exploradores a denominarlas como Gran barrera de hielo (Great Barrier).

El espesor de las plataformas que puede alcanzar hasta 200 m en el frente, va incrementándose hacia zonas superiores del glaciar alcanzando máximos de hasta 700 m de espesor en la zona donde la base del hielo deja de flotar y empieza a posarse sobre roca (grounding line). Esta zona, que marca la transición entre hielo flotante y posado sobre rocas-sedimentos, se evidencia en la superficie de la plataforma por una serie de grietas producidas por la flexión que afecta al hielo flotante producto de las mareas oceánicas. El Hinge line es conocido como el fin de la zona afectada por la flexura del hielo, siendo muy difícil de detectar, a menos que se empleen técnicas interferométricas.

Las plataformas de hielo flotante son alimentadas por hielo meteórico proveniente de glaciares o corrientes de hielo fluyendo desde el interior de Antártica o Groenlandia. En la base de las plataformas flotantes puede haber acreción de hielo marino, que se genera por congelación de agua de mar y/o congelación de agua de fusión de origen glaciar.

Corrientes de hielo (Ice Streams). Se refiere a glaciares que drenan un casquete de hielo continental mediante altas tasas de flujo con velocidades muy superiores a las del entorno glacial. Estas corrientes de hielo no exhiben una delimitación precisa en todos sus márgenes, sin embargo en algunas zonas son más visibles por grietas laterales que separan las zonas de máximo flujo de aquellas zonas menos activas. Las corrientes de hielo se caracterizan por numerosas líneas de flujo u ondulaciones longitudinales que denotan las fuentes del hielo que las alimentan. Estas corrientes de hielo, son las principales abastecedoras de hielo de las plataformas de hielo flotantes.



Figura 2.3: Corriente de hielo, Glaciar Shirase, en Antártica Este.

Ejemplos de este tipo de glaciares se encuentran en Antártica, estando totalmente ausentes en Chile continental.

Glaciares de Piedmont (Piedmont glaciers). Son glaciares enclavados en la Cordillera pero cuya alimentación es suficientemente abundante como para permitir que una lengua penetre el Ante País o Pie de Monte, derramando su caudal de hielo, en forma de abanico divergente.

Se distinguen las siguientes partes:

1. La parte superior con cuencas compuestas, las que desembocan en una cuenca o circo.
2. La lengua propiamente dicha, encauzada en un valle, con distintas longitudes.
3. El Lóbulo (Pie expandido), que es su elemento característico, el cual sale de la montaña y forma un semiarco similar a un gran cono de deyección.



Figura 2.4: Glaciar de Piedmont: Glaciar San Quintín, Campo de Hielo Norte.

Esta categoría no se presenta en Chile central, sin embargo fue la forma típica de los glaciares Cuaternarios que inundaron la depresión central, arrastrando sedimentos y socavando el fondo generando las cuencas lacustres. En Patagonia aún existen algunos ejemplos como el glaciar San Quintín del Campo de Hielo Norte.

Glaciares de valle (Valley glaciers). Se caracterizan por tener una o más zonas de acumulación, ubicadas en subcuencas o circos, las cuales confluyen en un valle, más largo que ancho, el cual permite el flujo de hielo aguas abajo. No posee lóbulo de derrame y su frente queda circunscrito al valle. Recibe el nombre de glaciar Alpino, por ser la forma típica de varios glaciares de los Alpes, a partir de los cuales se conceptualizó. En literatura inglesa existe una categoría especial llamada "Transection glacier", que puede ser asociado a uno de valle pero más complejo, con varias zonas de acumulación que están interconectadas para confluir en un valle donde se ubica la lengua efluente (Benn & Evans, 1998).



Figura 2.5: Glaciar de Valle: Glaciar Universidad.

Casos típicos en Chile central son el Juncal Norte y Juncal Sur.

Glaciares en Calota (Ice caps). Estos tienen importancia puesto que ocupan la cúspide de un centro montañoso. Estos glaciares tienen un abombamiento en la parte central tipo "domo", fruto de la acumulación y la topografía subyacente. La ablación se produce por los bordes, ya sea por el contorno en su conjunto o por medio de lenguas que penetran en valles. En este último caso se habla de glaciares compuestos. Estas lenguas divergentes por lo general obedecen a un flujo radial con eje en la cúspide de la topografía dominante.



Figura 2.6: Glaciar en Calota en el Volcán Osorno.

Los más característicos en Chile son las calotas del Volcán Osorno.

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



Figura 2.7: Campo de Hielo Norte, Patagonia.

Ejemplos típicos de este tipo de glaciares están en los Campos de Hielo Patagónicos.

Glaciares de cráter (Crater glaciers). Son aquellos que ocupan una depresión topográfica, rodeada de un cordón montañoso, que impide la evacuación superficial del hielo acumulado, el cual fluye hacia el centro de la depresión y pierde masa por ablación superficial y también gracias al calor geotermal en los conos y cráteres que los contienen.

Caso típico es el glaciar del cráter del Volcán Lonquimay.



Figura 2.8: Glaciar de cráter en la caldera del Volcán Sollipulli.

Glaciares de montaña (Mountain glaciers). Definidos como glaciares localizados en las partes altas de la cordillera, con formas variables, y donde la evacuación desde las zonas de acumulación (más anchas que largas), se da por medio de una lengua glaciár pequeña (en comparación con un glaciár de valle). Su zona de acumulación es bien definida. Esta categoría es empleada por el TTS/WGI como concepto universal para inventarios (Müller *et al.*, 1977).



Figura 2.9: Glaciár de montaña en el Canal Beagle.

Glaciares de Circo (Cirque glaciers). Son aquellos que ocupan una depresión de carácter semicircular generada por erosión glaciár (Circo), la cual es rodeada por flancos montañosos con mucha pendiente que culminan en cumbres o cordones tipo "aretés". Una vez que los glaciares de circo han retrocedido (o desaparecen), estas depresiones son usualmente ocupadas por un lago, el cual es embalsado por un umbral rocoso o quiebre de pendiente por donde salía la lengua glaciár en forma de cascada de hielo.



Figura 2.10: Glaciár de circo en el Valle del Francés, Parque Nacional Torres del Paine.

Glaciáretes (Niche, wall-sided, glaciárets, ice aprons o cliff glaciers).

Esta categoría corresponde a las más pequeñas masas de hielo, sin existir una definición exacta de sus dimensiones. Estos pueden encontrarse en laderas de montañas, depresiones, sectores en sombras, sectores receptores de avalanchas de nieve, etc. Estas masas de hielo pequeñas, pueden no evidenciar flujo y pueden deberse a nieve que perdura por al menos dos años consecutivos, pero que es prácticamente inactiva. En años muy secos estas masas tienden a desaparecer, cubrirse de materiales o reducirse significativamente.



Figura 2.11: Glaciárete en las laderas del Cerro Brujo, en el Valle del Río San Andrés, Cuenca del Tinguiririca.

Glaciares rocosos (rock glaciers). Glaciares rocosos, de roca o de escombros, son cuerpos de hielo y rocas, que evidencian flujo, a tasas muy inferiores en comparación con glaciares descubiertos, debido a que la proporción de hielo, versus volumen total, puede ser inferior al 50%. Estos cuerpos de hielo/roca pueden ser glaciogénicos, vale decir que se generan a partir de un glaciar descubierto que después de un proceso evolutivo, se va recubriendo por material morrénico o de avalanchas de rocas laterales y cuya alimentación nivosa disminuye, resultando en un flujo decreciente, hasta que su morfología cambia completamente, predominando el material rocoso por encima del volumen equivalente de agua (eq. a. de ahora en adelante) en estado sólido; o puede ser pedogenético, vale decir con origen en la evolución de una forma del relieve, a partir del permafrost de montaña o suelo congelado, cuyo flujo (soliflucción), puede acrecentarse con mayores proporciones de agua en estado sólido intraglaciario, o hielo intersticial, hasta generar una morfología ondulante típica, con taludes verticales frontales y otros rasgos característicos. Los glaciares rocosos poseen una geometría en forma de lengua o lóbulo, cuya estructura interna está constituida por una mezcla de hielo (40-60%), roca y sedimentos finos, que se desplazan lentamente ladera o valle abajo, a velocidades que varían entre los 10-100 cm a⁻¹ (Azócar & Brenning, 2008 & 2009).



Figura 2.12: Glaciar rocoso al interior del Valle de Navarro, Cuenca del Río Juncal.

2.2.2. Tipos de zonas de acumulación

Es posible subclasificar los glaciares en función de las características de sus zonas de acumulación. A continuación se describen los principales tipos de cuencas de alimentación de glaciares empleadas en parte por el inventario mundial de glaciares de acuerdo al WWG/TTI (Müller *et al.*, 1977).

Cuencas compuestas: Dos o más cuencas de alimentación que dan origen a lenguas glaciares individuales, las que se unen aguas abajo formando una lengua principal (glaciares Cipreses y Universidad).

Cuenca compuesta: Zona de acumulación con varias subcuencas, cuyo hielo es evacuado por medio de una lengua glaciar (Glaciar Juncal Sur).

Cuenca simple: Una cuenca de alimentación más ancha que larga, bien delimitada, cuyo hielo es evacuado por una lengua principal (Glaciar Juncal Norte).

Plateau: Superficie relativamente plana cuyas divisorias de hielo son difíciles de mapear, a menos que se cuente con mediciones especializadas de velocidad de hielo, que permitan definir flujos superficiales de hielo divergente. Estas superficies son grandes

receptáculos de nieve, la cual se transforma en hielo, que fluye aguas abajo por portezuelos, por donde salen lenguas efluentes (Campos de Hielo Patagónicos).

2.2.3. Tipos de frentes

La naturaleza del frente de un glaciar puede alterar de manera crucial su balance de masa y su dinámica, en función de la existencia de desprendimientos o el contacto con masas de agua dulce o salada, es por esto que su correcta clasificación es fundamental para entender de manera correcta la diversidad de comportamientos observados en los glaciares de Chile, los que presentan múltiples tipos de frentes.

De montaña: Son frentes terminales posados en roca, o materiales morrénicos, desde donde nacen cursos de agua de fusión glaciar. Las pendientes son variables, pero la pérdida de masa se da por ablación y eventualmente sublimación. Ejemplos: Echaurren Norte, Cipreses, Juncal Norte.

Desprendentes en lagos (freshwater calving front): Son frentes desprendentes (producen témpanos) de glaciares que desembocan en lagos no sometidos a mareas. Ejemplos: Nef, Colonia, Tyndall.

Desprendentes en fiordos (tidewater calving fronts): Son frentes desprendentes en aguas oceánicas sometidas a salinidad variable, mareas y corrientes de diversas intensidades. Ejemplos: San Rafael, Amalia.

Complejos: Frentes con varios de los tipos anteriores, debido a la existencia de más de una lengua terminal (brazos) o más de un tipo de término, o frentes confluentes. Ejemplo: Pío XI, que posee un frente en fiordo, varios otros en lagos y un par de brazos en tierra.

2.2.4. Clasificación Térmica

En este tipo de clasificación, lo esencial es la temperatura de la masa de hielo, que contribuye a controlar la evolución cristalográfica de la nieve, así como los procesos de ablación.

Se distinguen 3 categorías:

Los glaciares fríos. Aquellos que poseen una temperatura del hielo muy inferior a 0° C. La ablación es por lo general escasa, y generada por ocasionales eventos cálidos, que no alcanzan a afectar la temperatura de toda la masa de hielo, sino que sólo la superficie. Una parte importante de pérdida de masa se genera por sublimación y deflación. En Antártica, también puede perderse masa por calving. Al no existir ablación superficial, la transformación de la nieve en hielo es lenta. La acumulación se da por precipitación nivosa, que es de carácter seco y de baja densidad. En Chile existen glaciares fríos en la Zona Norte, donde los escasos glaciares allí ubicados están a gran altura, presentando temperaturas del orden de -8,5 a -20°C (Ginot *et al.*, 2001, 2002 & 2006;

Schwikowski *et al.*, 2006). También se ha detectado hielo frío en las cercanías de la cumbre del Monte San Valentín en la Zona Austral (Vimeux *et al.*, 2008).

Los glaciares temperados. Un glaciar temperado posee en toda su masa la temperatura de fusión del hielo. La temperatura del punto de fusión varía con la presión, que depende en forma directa del espesor de hielo, su densidad y la aceleración de gravedad. La mayor parte de los glaciares chilenos tienen esta característica y en la Zona Austral se dan los más típicamente temperados del planeta. La acumulación en este tipo de glaciares se da por una variada gama de procesos deposicionales, incluyendo nieve húmeda, seca, avalanchas laterales, granizo, y eventualmente recongelamiento. La ablación es principalmente por derretimiento, pero también por sublimación, calving y deflación.

Los glaciares politermales. En algunos glaciares del ártico canadiense y de Svalbard (Noruega), la temperatura del hielo está muy por debajo del punto de fusión, sin embargo en la base de la lengua terminal, pueden alcanzarse temperaturas cercanas al punto de fusión, lo que genera cierto nivel de derretimiento estival y mayor deslizamiento basal. No se han detectado estos glaciares en Chile.

2.2.5. Clasificación Dinámica

A continuación se describen los tipos tradicionales de glaciares asociados a sus condiciones de flujo diferencial.

Los glaciares inactivos. Son los que no tienen o han disminuido sustancialmente su alimentación y sólo persisten por la lenta fusión del hielo. Son relictos y no tienen movimiento. En general se trata de bloques de hielo desgajados de lenguas glaciares en retroceso.

Un ejemplo de esto se puede ver en el Glaciar Amalia, donde su brazo meridional ha retrocedido dejando un gran segmento relicto protegido por la ladera sur del Volcán Reclus.

Los glaciares pasivos. Son aquellos que fluyen lentamente (velocidades centimétricas por “año”). La evacuación de rocas es dificultosa y sus frentes y la mayor parte de sus superficies están cubiertos de material morrénico. Los glaciares rocosos presentan tasas muy bajas de flujo que pueden asociarse a esta categoría.

Un ejemplo interesante es el glaciar rocoso existente en la cumbre del Cerro San Ramón, a pocos kilómetros de la ciudad de Santiago.

Los glaciares activos. Son glaciares con velocidades de flujo del hielo cuyos valores van desde decímetros hasta metros por día, lo que asegura la evacuación de rocas y otros materiales morrénicos hacia el frente terminal del glaciar.

Los ejemplos más emblemáticos en Chile son sin duda el Glaciar San Rafael en el CHN y el Glaciar Grey en el Campo de Hielo Sur (CHS).

Los glaciares galopantes (surging glaciers). Son aquellos que experimentan tasas de flujo un orden de magnitud o más, por encima de

las velocidades normales, lo que se produce en forma irregular, cada algunos años, lo que puede deberse a cambios en los perfiles de equilibrio, cantidad de agua subglacial disponible, existencia de lagos subglaciares, entre otras.

Un ejemplo bastante estudiado es el Glaciar Pío XI en el CHS, el cual pasó por una fase galopante a comienzos del siglo XX.

2.3. Cambio climático en Chile

Actualmente el sistema climático global se encuentra en proceso de cambio. Las causas de este cambio, se deben a que las actividades humanas han modificado la composición de la atmósfera desde la era preindustrial.

En Chile la variabilidad climática se ha investigado desde diversos aspectos: (1) investigaciones para la reconstrucción de la variabilidad climática antes del período de instrumentación, ello a través del análisis de testigos de hielo en el Norte de Chile y con anillos de árboles en el Centro y Sur del país, (2) investigaciones asociadas a la variabilidad climática realizadas con datos de estaciones meteorológicas y radiosondas y (3) las proyecciones de comportamiento del clima realizadas con modelos.

2.3.1. Cambios de largo plazo (pre-instrumental)

Zona Norte

En el norte de Chile se ha prestado mayor atención a la variabilidad climática en relación a la presencia de la Diagonal Árida (25° - 27° S). Las investigaciones realizadas permiten reconocer las diferencias en las condiciones climáticas al norte y al sur de esta zona de transición tanto en la actualidad como en el pasado (Messerli *et al.*, 1998; Kull *et al.*, 2002). También se han realizado investigaciones en relación a la influencia del hombre sobre su medio natural a lo largo de la historia a través de datos arqueológicos, lo cual es un indicio de la influencia sobre su medio en esa región del país (Messerli *et al.*, 2000; Grosjean *et al.*, 1997; Núñez *et al.*, 2002).

Zona Centro y Sur

Las investigaciones actuales basadas en anillos de árboles, fluctuaciones glaciares y documentos históricos han significado un importante avance en el entendimiento de la variabilidad climática en los últimos 1.000 años con la cual es posible comparar los cambios actuales (Lara *et al.*, 2005) (Figura 2.13). Las investigaciones se concentran de preferencia en la zona sur del país (Aravena *et al.*, 2002; Villalba *et al.*, 1998; Lara *et al.*, 2008) En general estas reconstrucciones muestran un aumento consistente de la temperatura durante el siglo XX comparado con siglos anteriores (Lara *et al.*, 2005). La misma situación se deriva de la reconstrucción de la variabilidad de las precipitaciones donde Le Quesne *et al.*, (2008) reconstruyeron con anillos de *Austrocedrus chilensis* las precipitaciones para los últimos 712 años, en la que se ve una importante variación anual y decadal, sin embargo es posible observar en la sección final de dicha serie de tiempo, una clara tendencia de disminución para

los últimos 150 años en Chile Central, lo que explicaría el retroceso de los glaciares detectado en esta zona.

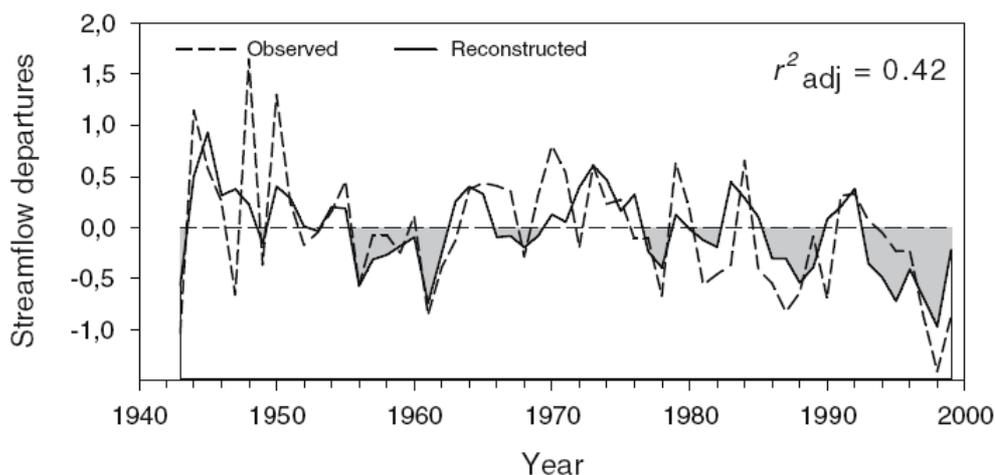


Figura 2.13: Comparación de reconstrucción con anillos de árboles y observación en el río Puelo (Lara *et al.*, 2008).

Zona Austral

Numerosos estudios han analizado cambios climáticos de largo plazo en la Zona Austral, durante el Cuaternario y en particular el Holoceno. Entre los métodos empleados, pueden mencionarse los dendrocronológicos, termoluminiscencia, tefrocronológicos, sedimentológicos, etc. (Glasser *et al.*, 2005; Kilian *et al.*, 2007; Winchester & Harrison, 1996; Winchester & Harrison, 2000; Harrison & Winchester, 2000; Winchester *et al.*, 2001; Harrison *et al.*, 2001; Harrison *et al.*, 2006; Harrison *et al.*, 2007; Harrison *et al.*, 2008).

2.3.2. Variabilidad y cambios recientes

En Chile, los recursos hídricos (como los glaciares y los campos de nieve) y las actividades productivas (por ejemplo agricultura, pesqueras, turismo, generación hidroeléctrica, etc.) dependen en gran medida de la variabilidad climática. Conocer la magnitud y los patrones espaciales de los cambios de temperatura y precipitación reciente y sus proyecciones en el ámbito del cambio climático es un importante tópico a considerar (Falvey & Garreaud, 2009; Masiokas *et al.*, 2006; Montecinos *et al.*, 2000). Muchas investigaciones se han realizado respecto a la variabilidad climática reciente básicamente mediante la utilización de datos de estaciones meteorológicas (Sanguineti, 1994; Quintana, 2004; Pezoa, 2003; Novoa, 2008; Bown, 2004, entre otros).

El conjunto de estas investigaciones muestran una distribución espacial y altitudinal de los cambios de las temperaturas, demostrando singularidades en el comportamiento del clima a lo largo del país y no una respuesta única frente al actual proceso de cambio climático, que debe ser considerado en la toma de decisiones con el fin de dar énfasis en aquellas zonas afectadas negativamente.

2.3.2.1. Cambios en temperaturas

En Chile las tendencias de aumento de temperaturas han sido evaluadas por Rosenblüth *et al.*, (1997), detectando para el período 1933 - 1992, una tasa de calentamiento de 1,3 a 2,0 °C 100 a⁻¹. Sin embargo existen diferencias a lo largo del territorio nacional:

Zona Norte y Centro

Rosenblüth *et al.*, (1997), detectó un aumento de las temperaturas; que en las estaciones costeras alcanzó entre 2,0 y 2,7 °C (Antofagasta) para el período 1960 – 1992. En la estación Punta Ángeles (33° 01' S) el aumento de las temperaturas para el mismo período llegó a 3,8 °C.

Falvey & Garreaud (2009) determinaron un patrón espacial en el cambio de las temperaturas superficiales para Chile durante el período 1979 - 2006. Entre los 17° y 37° S la característica más notable es el contraste entre el enfriamiento detectado en la costa (-0,2 °C/década) y el calentamiento detectado en el valle central y en Los Andes (+0,25 °C/década). El enfriamiento en la costa entre los 17° y 37° S correspondería a una causa natural del calentamiento global debido a la intensificación del Anticiclón del Pacífico (Falvey & Garreaud, 2009).

El análisis de datos de radiosonda en la costa central de Chile (Quintero y Valparaíso) muestra una estructura vertical en la tendencia de las temperaturas caracterizado por el enfriamiento cerca de la superficie y con un calentamiento máximo aproximadamente a los 1.300 m de altitud (Falvey & Garreaud, 2009).

Zona Sur

En la Zona Sur de Chile no se observa un calentamiento en las estaciones Temuco-Puerto Montt donde se ha estimado un enfriamiento entre 1960 - 1992 (Rosenblüth *et al.*, 1995 & 1997) (Figura 2.14) y 1950 – 1970 (Sanguinetti, 1994). Bown & Rivera (2007) confirmaron el enfriamiento superficial detectado para esta zona entre los años 1933 y 1992 (Rosenblüth *et al.*, 1997) a través del análisis de la información de series de temperatura de 1950 al año 2000. Sin embargo, los registros de radiosonda en Puerto Montt muestran un aumento de la temperatura en los niveles superiores de la troposfera (Bown & Rivera, 2007).

En esta zona Falvey & Garreaud (2009) determinaron que en el cambio de las temperaturas superficiales durante el período 1979 - 2006 la tendencia no es clara y no se encuentran patrones espaciales identificables.

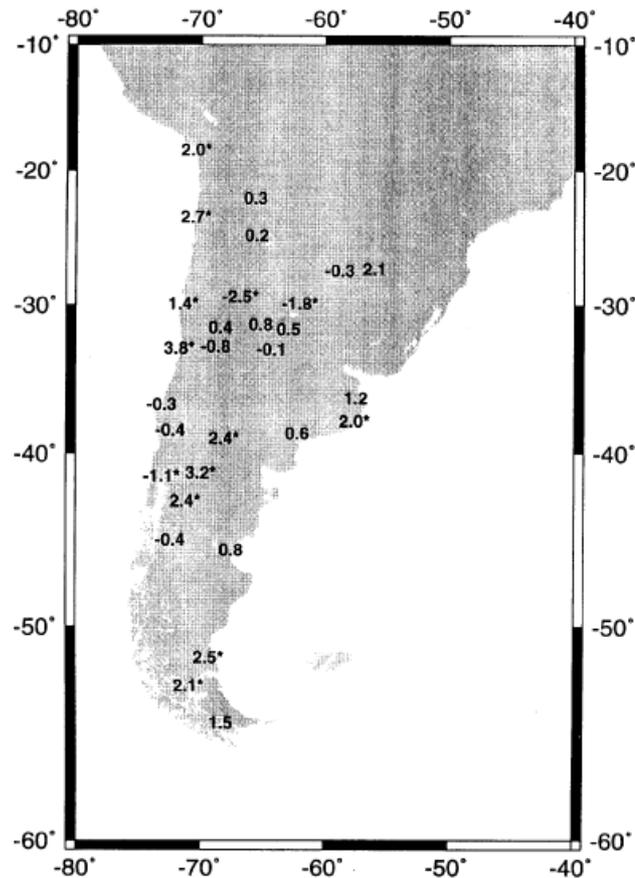


Figura 2.14: Tendencia de las temperaturas medias anuales para el período 1960-1992 (°C/100 años) (Rosenblüth *et al.*, 1997).

Zona Austral

Para la Patagonia entre los 43° y 45° S Rosenblüth *et al.*, (1995) determinó que no existe una tendencia clara en las temperaturas superficiales durante el siglo XX mientras que al sur de los 46° S existe un aumento de las temperaturas para el último siglo (0,4° C a 1,4° C). Carrasco *et al.*, (2002) determinó, con análisis de datos de estaciones meteorológicas, un aumento de las temperaturas en Campo de Hielo Sur hasta mediados de los 80s pero no un cambio significativo posterior a esa fecha. Falvey & Garreaud (2009) estimaron que no existe una tendencia significativa sobre el territorio entre los 38° y 48° S en el período 1976-2006, por lo que no es posible reconocer patrones espaciales.

2.3.2.2. Cambios en precipitaciones

Las investigaciones de las precipitaciones en Chile han determinado en general, una tendencia a la disminución durante el siglo XX, sin embargo, se reconocen importantes anomalías pluviométricas anuales atribuidas a fenómenos El Niño Oscilación del Sur (ENOS), sobretodo a partir del año 1976, donde si bien no existe un acuerdo en su alcance espacial al sur de los 40° - 41° S, si se tiene certeza de su influencia en la región de Chile Central, la cual es de primera importancia debido a la dependencia de recursos hídricos asociados a los asentamientos humanos allí

localizados. Para los glaciares, el impacto asociado a esta disminución general y cambio de régimen, se traduce en una disminución de su área y volumen debido a la sensibilidad de los glaciares a la precipitación. Por otro lado, la variabilidad en las precipitaciones asociada al fenómeno ENOS se traduce en balances de masa positivos o negativos de acuerdo al ciclo que se presenta, así para el glaciar Echaurren se han presentado balances de masa positivos durante años donde se presenta el fenómeno de El Niño y negativos durante la ocurrencia de fenómenos La Niña. La mayor ocurrencia de años con fenómenos La Niña ha fortalecido el balance de masa negativo de dicho glaciar. El conocimiento de la variabilidad hidroclimática interanual reduce la incertidumbre asociada a la ocurrencia de eventos hidrológicos, los cuales tienen importancia para la planificación de los recursos en el corto y mediano plazo (Waylen & Poveda, 2002).

Zona Norte y Centro

En estas zonas se observa una reducción en los últimos 100 años, especialmente en el Norte Chico, donde se determinó una disminución del 30% de las precipitaciones en La Serena (Downing *et al.*, 1994), y en el Centro de Chile (Rütllant & Fuenzalida, 1991; DGA, 1999). Sin embargo, en el período 1970 - 2000, Quintana (2004) determinó una tendencia positiva en varias estaciones al norte de los 34° S donde se señala un aumento de las precipitaciones del orden de los 30 mm lo cual no es significativo dentro del contexto de disminución de las precipitaciones en Chile.

Existe una gran variabilidad interanual de los montos de precipitación, en estrecha relación con el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) especialmente en Chile Central. Respecto a ello existe una gran variedad de investigaciones (Ej. Sanguinetti, 1994; Escobar & Aceituno, 1998; Montecinos & Aceituno, 2003). A continuación se muestra una síntesis de los estudios asociados a ENOS.

Este fenómeno se ha hecho más frecuente a partir del año 1976 debido al cambio de régimen en el sistema acoplado océano-atmósfera en el Pacífico (Quintana & Aceituno, *in press*). Por otro lado, se estima como otra posible fuente de la variabilidad de las precipitaciones las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) (Montecinos *et al.*, 2000). Las manifestaciones regionales de la Oscilación Interdecadal del Pacífico y la Oscilación Antártica constituyen un factor significativo de la variabilidad de la precipitación en Chile en una escala temporal mayor a la del fenómeno ENOS (Quintana, 2004). De hecho, el “salto climático”, evidente en variables hidrometeorológicas a partir del año 1976, correspondería al cambio de la polaridad en la Oscilación Interdecadal del Pacífico (Garreaud *et al.*, 2009).

Escobar & Aceituno (1998) estimaron la relación del fenómeno ENOS con la precipitación nival en Chile Central. Entre los 30° y 35° S se determinó una relación directa entre los montos de acumulación (mayor acumulación) y la ocurrencia de ENOS mientras al sur de los 35° S, la relación no es significativa. Masiokas *et al.*, (2006) por su parte, determinaron sobre la base del análisis de datos de rutas de nieve en Chile y Argentina una relación directa entre fenómenos ENOS y la

acumulación nival entre los 30° y 37° S, estimándose que durante los años El Niño existe una mayor acumulación de nieve en Los Andes. El efecto del fenómeno ENOS decrece con la latitud, estimándose que al sur de los 40° S la correlación es insignificante (Rosenblüth *et al.*, 1997).

Montecinos & Aceituno (2003) determinaron las respuestas estacionales frente al fenómeno ENOS; así entre los 30° - 35° S se obtienen precipitaciones sobre el promedio para los meses de invierno (Junio, Julio, Agosto) y entre los 35° - 38° S las precipitaciones aumentan para los meses finales de primavera (Octubre, Noviembre).

Con una perspectiva hidrológica, Mardones (2009) también aborda el tema de las precipitaciones, en un estudio del comportamiento futuro de los caudales de las cuencas nivales de la IV Región en el contexto del cambio climático. Los resultados de la investigación, que utilizó el modelo PRECIS, igualmente muestran una tendencia a la disminución en la precipitación media anual con la consiguiente prolongación de los períodos secos.

Zona Sur

Quintana (2004) a través del análisis de tendencia mediante regresión lineal en las series anuales y estacionales de precipitación entre 30 y 54° S, muestra, en general, una disminución de las precipitaciones, siendo el período 1970-2000 entre 39° y 47° S, el más significativo. La disminución de la precipitación se traduce en una menor frecuencia de días con lluvias y en una disminución de la intensidad de la precipitación (Quintana y Aceituno, *in press*). La estación Valdivia es la que refleja la mayor disminución de las precipitaciones, registrándose en promedio cada año 15 mm menos que el año anterior, tendencia extendida en todo el período 1961 – 2000 (Bown & Rivera, 2007).

La respuesta estacional frente al fenómeno ENOS, entre los 38° - 41° S consiste en la ausencia de precipitación en los meses de verano (Enero, Febrero, Marzo) (Montecinos & Aceituno, 2003).

Zona Austral

En la Zona Austral la disminución de las precipitaciones llega a sobrepasar los 1.400 mm entre los 52° y 53° S, específicamente en la estación Bahía Félix, donde las precipitaciones disminuyeron de 5.400 mm a cerca de 4.000 mm entre 1915 y 1985. En el caso de la estación Islotes Evangelistas se detectó una disminución de 1.000 mm entre 1915 y 1985, lo cual representa aproximadamente un tercio del total de la precipitación de 1915 (Rosenblüth *et al.*, 1995). A pesar de ello, las tendencias de mediano y largo plazo son menos claras que las de las temperaturas. Quintana (2004) estimó un aumento de las precipitaciones anuales en el período 1970 - 2000 del orden de 100 mm en varias localidades al sur de los 47° S, las cuales sin embargo no son significativas.

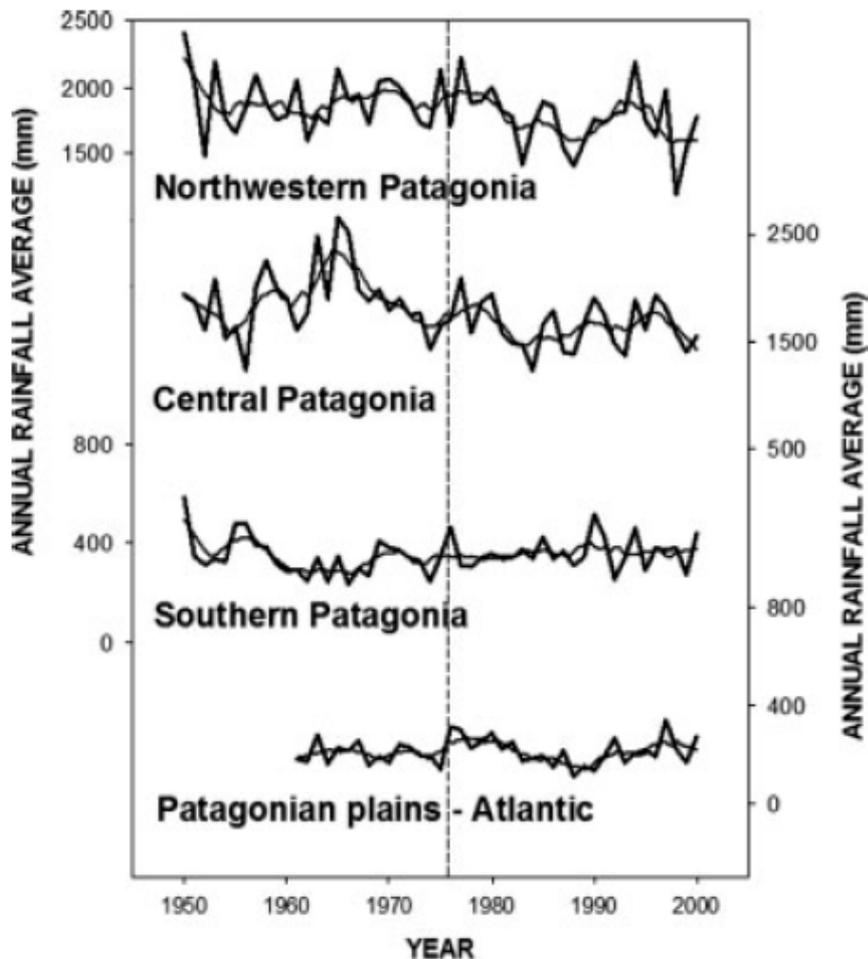


Figura 2.15: Promedios anuales de precipitación en Patagonia. Línea punteada indica año 1976 (Aravena & Luckman, 2008).

Estaciones de la Zona Austral de Chile, como Punta Arenas, Isla San Pedro, Cabo Raper, Puerto Aysén, Isla Guafo y Ancud no muestran una tendencia clara de disminución o aumento secular, pero sí presentan importantes ciclos con anomalías pluviométricas positivas, lo que se traduce en años más lluviosos respecto al promedio (Santana, 1984; Rosenblüth *et al.*, 1995).

Rasmussen *et al.*, (2007) han determinado que si bien en el período 1960 - 1999, aparentemente en la Patagonia no ha existido una disminución en el monto total de las precipitaciones, el aumento de la temperatura ha generado una disminución de la precipitación tipo nieve, lo que se traduce en la pérdida de masa de los Campos de Hielo. Modelos en Campo de Hielo Sur han determinado la posibilidad de que exista una disminución del monto de las precipitaciones durante el verano, mientras se espera un aumento de las precipitaciones en invierno. Por lo tanto, en el futuro se esperaría un comportamiento marcadamente estacional del clima en esta región, con importantes diferencias de los montos de precipitación entre los meses de verano e invierno (Carrasco *et al.*, 2002).

En la Zona Austral del país y en base a registros instrumentales, Aravena & Luckman (2008) han estimado patrones espacio-temporales para las

precipitaciones; así entre los 41° y 47° S se determinó un patrón decadal en las precipitaciones, mientras que entre los 51° y 53° S se determinó un patrón bianual en las precipitaciones (Figura 2.15). Por otro lado, la variabilidad anual de las precipitaciones en esta zona del país, estaría controlada por la Oscilación Antártica. Sin embargo, Schneider & Gies (2004) estimaron que al sur de los 53° S y en la costa oeste, el 15% de las anomalías pluviométricas se deben a fenómenos asociados a la Oscilación del Sur.

2.3.2.3. Cambios en escorrentía

En el presente existen escasos estudios que relacionan la variabilidad hidrológica con los cambios climáticos recientes. Ellos se han concentrado principalmente en la zona central del país debido a la importancia de los recursos hídricos en la economía y población regional. Al respecto destaca el trabajo de Masiokas *et al.*, (2006) en que se analizan series de acumulación en los Andes centrales de Chile y Argentina durante la segunda mitad del siglo XX, en las que se demuestra que existe una positiva y significativa asociación con los eventos cálidos El Niño. A su vez, las series de caudales a ambos lados de la cordillera están fuertemente correlacionadas con los registros de acumulación, al mostrar patrones de variabilidad interanual y tendencias de largo plazo muy similares (Figura 2.16).

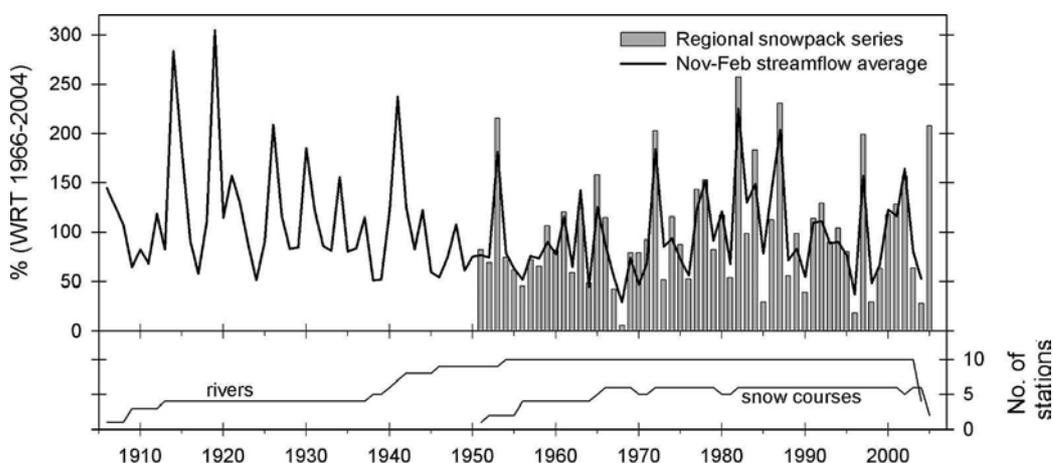


Figura 2.16: Relación entre la serie de acumulación 1951–2005 (barras) y la serie de caudales promedio de 1906–2004 para la estación Noviembre – Febrero en Chile central y Argentina centro-occidental (línea sólida). Valores expresados en porcentaje respecto de la media de 1966–2004. La correlación resultante es de 0,945 (Masiokas *et al.*, 2006).

El caudal ha mostrado un cambio claramente positivo en el período de 1951 a 2004, lo que está muy probablemente asociado a una mayor frecuencia de ciclos de acumulación superiores al promedio en décadas recientes; esto a su vez a consecuencia de la mayor ocurrencia de eventos El Niño. A ello hay que agregar que las temperaturas tanto en estaciones chilenas como argentinas indican un importante calentamiento atmosférico, especialmente en el ciclo anual y estival, donde el incremento en la acumulación no ha logrado contrarrestar los

efectos negativos en los glaciares. De todo ello se deduce que los mayores caudales observados se relacionan tanto a mayor acumulación como al aumento en la ablación asociado a mayores temperaturas, sin embargo en la medida en que la merma de glaciares se extienda en el largo plazo, la contribución glaciar a la esorrentía se verá reducida progresivamente hasta niveles mínimos para luego eventualmente desaparecer (Masiokas *et al.*, 2006).

Así también existe un análisis reciente de los patrones hidroclimáticos en la cuenca superior del Aconcagua, una de las principales cuencas englaciadas de la zona central. En términos de tendencia, Pellicciotti *et al.*, (2007) detecta en los últimos treinta años lo opuesto a Masiokas *et al.*, (2006), es decir, una disminución en el caudal en la sección superior de la cuenca tanto a nivel anual como estacional (Figura 2.17), sin observar cambios significativos en la precipitación que pudieran ser asociables al cambio mencionado en el caudal. Por otra parte, se analizan datos de aumento de temperaturas locales por lo cual se discute el rol de esta variable en acelerar el retroceso glaciar observado en la cabecera de la cuenca (Bown *et al.*, 2008) como explicación plausible a una contribución disminuida de los cuerpos de hielo a la esorrentía del Aconcagua superior. De lo anterior se puede esgrimir que, si bien la tendencia negativa que presenta Pellicciotti *et al.*, (2007) parece ser contradictoria a la de Masiokas *et al.*, (2006), podría ser indicativa de que en la cuenca superior del Aconcagua se ha alcanzado en la actualidad un nivel crítico en la evolución glaciar, a partir del cual la tendencia observada desde los años cincuenta se invierte observándose a partir de 1970 un descenso en la contribución del glaciar al caudal.

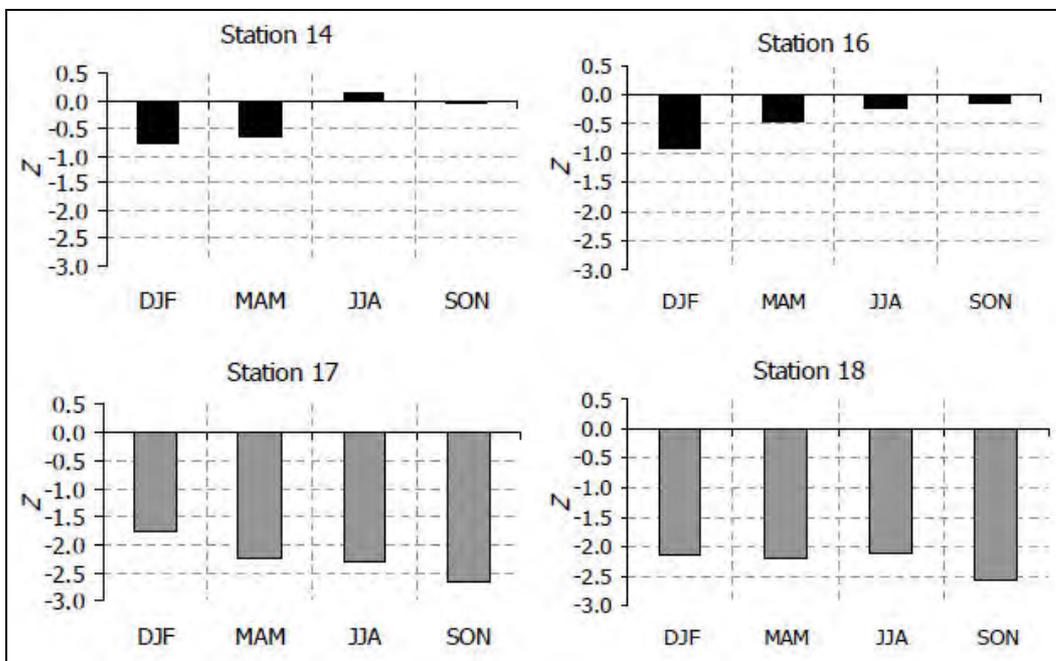


Figura 2.17: Tendencias de caudal en cuatro estaciones analizadas en la cuenca superior del Aconcagua, período 1970-2002. En color gris las que presentan significancia estadística (Pellicciotti *et al.*, 2007). Z es el parámetro de correlación del test estadístico Mann-Kendall, el cual denota una tendencia al alza cuando es positivo y a la baja cuando es negativo.

De forma similar, los datos de fines de verano analizados por Casassa *et al.*, (2009) con el fin de evaluar los impactos de la deglaciación en una serie de estaciones con respaldo glaciar, indicó descenso de caudal en el Nef en la confluencia con el Baker en los últimos treinta años. Esto podría sugerir que los impactos de la deglaciación ya comienzan a sentirse en el caudal, sin embargo la tendencia generalizada que reporta Casassa *et al.*, (2009a) desde los años cincuenta es levemente positiva por lo cual debiera esperarse que la contribución de los glaciares alcance un peak a partir del cual se registre un descenso futuro en respuesta al aumento de temperaturas.

También se han realizado algunos estudios que hacen proyecciones de los caudales considerando diferentes escenarios futuros del cambio climático, entre estos estudios cabe mencionar:

Figueroa, 2008; se presenta un modelo construido para la cuenca del Río Cachapoal, integrando la componente superficial y subterránea de los recursos hídricos. Para simular la escorrentía superficial se utilizó el modelo de Sacramento y el SNOW-17, para el modelo de aguas subterráneas se modificó uno existente en la DGA. Integrando estos modelos, se generó un modelo de simulación operacional de la cuenca. Luego los efectos del cambio climático se incorporaron utilizando los escenarios A2 y B2 (ver figura 2.20 para definición) del IPCC, (2007), los que fueron evaluados en el Modelo Integrado de la cuenca a un horizonte de 30 años. Se encontró que los caudales medios mensuales de salida de la cuenca del Cachapoal se verían afectados por un aumento en el período de deshielo y una disminución en el período invernal.

López, 2001; se aplicó el Snowmelt Runoff Model en la cuenca del Río Mapocho y para vincularlo con los cambios climáticos se utilizó los pronósticos de modelos de circulación general de la atmósfera GISS y GFDL. Se concluye que dado un aumento de la temperatura de 4,5°C, la escorrentía media de primavera se reduciría en un 34% y en verano un 10%, mientras que los caudales de otoño e invierno aumentarían en un 15% y 24% respectivamente.

2.3.2.4. Líneas de nieve/equilibrio

Las líneas de nieve y equilibrio son un excelente indicador de la variabilidad climática. Ambas son sensibles tanto a cambios de temperatura como a cambios en las precipitaciones (Condom *et al.*, 2007). Por lo tanto, el análisis de sus estimaciones y evolución se transforma en un importante indicio de la magnitud de los cambios climáticos y sus impactos en la disponibilidad de los recursos hídricos a corto, mediano y largo plazo.

La estimación de la cobertura nival y sus cambios es un importante tópico en relación a la disponibilidad de recursos hídricos. A este respecto destaca el estudio DGA (2008d) respecto a las características estacionales, topográficas, altitudinales y latitudinales de la cobertura

nival a lo largo del territorio nacional y que puede servir como indicador general de la línea de equilibrio. La oscilación de la línea de equilibrio incide sobre la superficie donde se acumula nieve, lo que a su vez incide en la alimentación de los glaciares (DGA-UC, 2008).

En Los Andes de América del Sur, Condom *et al.*, (2007) calculó la altitud de la línea de equilibrio a un nivel regional (Figura 2.18). Esta línea de equilibrio zonal no se puede aplicar en algún caso particular de estudio de glaciares, debido a que existen características propias en cada glaciar que definen su propia línea de equilibrio (topografía superficial, exposición, pendiente, etc.), sin embargo, a nivel regional y en el contexto de cambio climático es un importante indicador de la respuesta glaciar (Condom *et al.*, 2007).

De forma general se ha determinado una tendencia positiva de la isoterma 0° C (excepto en Punta Arenas) indicando el aumento altitudinal de la línea de nieves entre 1958 y 2006 (Carrasco *et al.*, 2008).

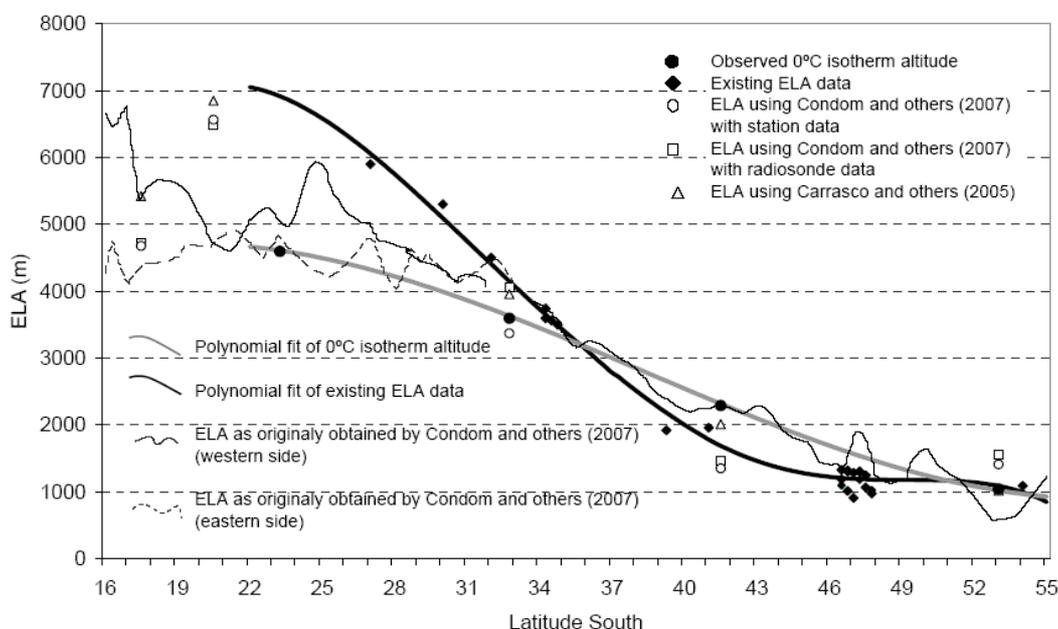


Figura 2.18: Líneas de Equilibrio regionales calculadas por Condom *et al.*, (2007) y Carrasco *et al.*, (2005) comparadas con observaciones (Carrasco *et al.*, 2008).

Zona Norte

Una de las primeras estimaciones de la línea de nieve a lo largo del país, fue realizada por Nogami (1976) quien a través de la interpretación de fotografías aéreas, mapas y recopilación de antecedentes previos, determinó la altitud actual de la línea de nieve para toda la Cordillera de Los Andes. Por ejemplo, en el volcán Lulllaillaco estimó la altitud en 6.620 m s.n.m. disminuyendo a unos 5.000 m s.n.m. en el límite sur del Norte Chico. Por desgracia, no se especifica la fecha de la estimación, la cual se realizó con antecedentes publicados el año 1955.

Zona Centro

Nogami (1976) determinó que en la Zona Centro de Chile, la altitud de la línea de nieves oscila entre los 4.400 m s.n.m. en el volcán Tupungato y los 2.800 m s.n.m. en los Nevados de Chillan. Estimación realizada analizando las cartas topográficas disponibles a la fecha.

Los análisis de la evolución de la línea de nieve han sido realizados con datos de radiosonda. En Chile Central, Carrasco *et al.*, (2005) estimaron para el último cuarto del siglo XX (1975 - 2001), un aumento promedio en la isoterma 0° C de 122 ± 8 m y 200 ± 6 m en invierno y verano respectivamente, lo que se traduce en el aumento de la altitud de la línea de nieves y de equilibrio, sugiriendo que el retroceso y disminución de las masas glaciares se debe a un calentamiento en la troposfera.

Zona Sur

Rivera (1989) determinó sobre la base de fotografías aéreas de 1955 y 1961, la línea de equilibrio para varios glaciares entre las cuencas del Bío-Bío y Petrohué con valores que oscilan entre los 3.680 m (Volcán Lanín) y los 1.730 m de altitud para el glaciar Captren ubicado entre la Sierra Nevada y el Volcán Llaima.

Zona Austral

Aniya *et al.*, (1996), en su inventario de glaciares de Campo de Hielo Sur determinó 23 valores de líneas de equilibrio para un total de 48 glaciares inventariados, el mínimo para el glaciar Tyndall a 650 m de altitud y la máxima para el glaciar Bravo a 1.500 m de altitud, lo que fue realizado en base a imágenes satelitales Landsat TM del año 1986.

Para el glaciar Pío XI, Rivera & Casassa (1999) investigaron la evolución de la línea de equilibrio determinando el aumento de la altitud para el período 1945 – 1995 en 220 m.

En consecuencia se ha detectado un aumento de la altitud de la isoterma 0° C con el consiguiente incremento en la elevación de la línea de nieves y de equilibrio en la segunda mitad del siglo XX.

2.3.3. Proyecciones de cambios climáticos futuros

IPCC y proyecciones regionales (región según IPCC)

En el contexto del cambio climático el IPCC (2007) ha realizado las investigaciones necesarias demostrando con fuentes científicas el aumento de la temperatura a nivel global. En todos los continentes se ha determinado un aumento de la temperatura desde 1906 hasta el año 2005, demostrando una significativa influencia antrópica en este aumento. El calentamiento del sistema climático es un hecho como lo muestra la evidencia del incremento de la temperatura del aire y de los océanos (0,6° C en el período 1900 - 2005), el derretimiento del hielo/nieve y el aumento del nivel del mar. Estos cambios son más significativos a partir de la segunda mitad del siglo XX.

En cuanto a las proyecciones globales, se espera un aumento de 2,8° C para el período 2090 - 2099 respecto al período 1980 - 1999. Si las concentraciones de dióxido de carbono se estabilizan a los valores del año 2000 aun existiría un aumento de la temperatura debido al lento tiempo de respuesta de los océanos.

Chile se encuentra dentro de la región Sur de Sudamérica (SSA) (Figura 2.19) en la cual la modelación con uno de los escenarios (A1B, el cual describe un futuro con crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes y una utilización equilibrada de todo tipo de fuentes) determinó un aumento anual promedio de temperaturas, para 2080 - 2099 (respecto de 1980 - 1999) de 1,7° a 3,9 °C, con el 50% de los modelos en el intervalo 2,3° a 3,1° C (naranja en la Figura 2.19). En cuanto a las precipitaciones se espera que el promedio anual disminuya a lo largo del territorio nacional, llegando a una reducción del orden del 30% en Chile Central.

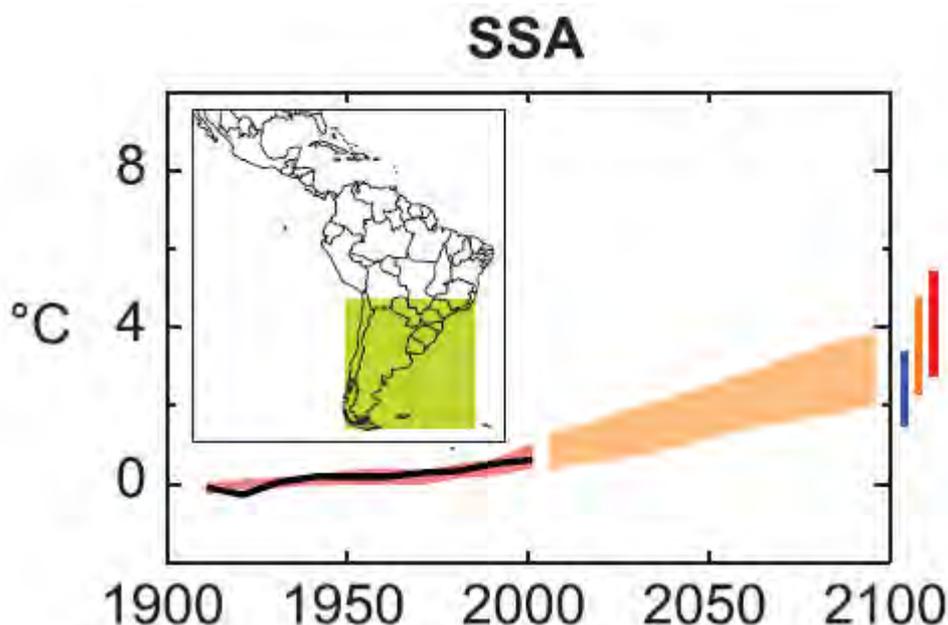


Figura 2.19: Anomalía de temperaturas en grados Celsius para el período 1906-2005 (línea negra con franja roja), respecto a la normal 1900 - 1950, y proyección de comportamiento (franja color crema) de las temperaturas en Sur Sudamérica (SSA) para distintos escenarios (Azul, B1; Naranja A1B; Rojo A2) (IPCC, 2007).

Para el escenario menos pesimista (B1, en azul en la Figura 2.19) del IPCC (mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos) se espera un aumento de la temperatura promedio de la atmósfera de 2 a 2,4 °C para fines de este siglo.

En relación a las proyecciones generales para el período 2090 - 2099, se esperan las siguientes consecuencias en el sistema natural a nivel global:

- La cubierta de nieve y la superficie de glaciares de montaña se espera que disminuya, así mismo las extensiones de hielo marino en ambas latitudes polares.
- Se espera un aumento de los eventos extremos, como sequías, olas de calor, precipitaciones intensas.
- La trayectoria de los sistemas frontales se desplazaría más hacia las latitudes altas.
- El nivel medio del mar se espera que incremente entre 0,28 a 0,43 m según los distintos escenarios.

En Chile, no existen proyecciones respecto a cambios en la cobertura nival, existiendo sólo descripciones de la dinámica de la cobertura nival en relación a factores como la estacionalidad, la topografía, la altitud y la latitud para el período 2000 - 2007 (DGA-UC, 2008), sin embargo, asumiendo un aumento de la altitud de la isoterma cero se esperaría una disminución de las superficies máximas de cobertura nival determinada para las distintas zonas de Chile en el estudio DGA-UC (2008).

Modelos de proyección del comportamiento en Chile fueron realizados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2006) en petición a los requerimientos de CONAMA.

Este informe (DGF, 2006) determina la variabilidad climática para la parte final del siglo XX y realiza las proyecciones para el siglo XXI a una escala local y a nivel de la superficie. La resolución espacial usada fue de 25 km, cubriendo todo el territorio continental de Chile, dividido en 5 zonas:

- Norte Grande: de 17 a 27° S
- Norte Chico: de 26 a 32° S
- Chile Central: de 31 a 37° S
- Región Sur: de 36 a 45° S
- Región Austral de 44 a 56° S

Las proyecciones para el período 2071 – 2100 muestran que se espera un aumento de la temperatura del aire desde la I Región hasta la XI Región de alrededor de 2° C a 4° C siendo más acentuado hacia las regiones andinas y en la vertiente oriental de los Andes y disminuyendo de norte a sur. De hecho en algunos sectores de la Región Austral el calentamiento no alcanzaría a llegar a 1° C. Estacionalmente, el calentamiento sería mayor en verano excediendo los 5° C en algunos sectores altos de la Cordillera de Los Andes (Figura 2.20).

Respecto a la precipitación, se espera un aumento de ellas en el Norte Grande y el Norte Chico. En el primer caso el aumento de las precipitaciones se concentra en los meses de verano (10% a 100 % más de precipitación). En el segundo caso, el aumento de las precipitaciones es mayor durante los meses de otoño (30% a 100% más). Por otro lado, se espera una disminución de la precipitación en un 10 a 20% en la Zona Centro y Sur del país mientras que un aumento de 10 a 20% se

pronostica para la Región Austral, aumento que estará concentrado en los meses de invierno ya que se espera una disminución de la precipitación estival del orden del 25%, situación que ya había sido modelada por Carrasco *et al.*, (2002) en la zona de Campo de Hielo Sur.

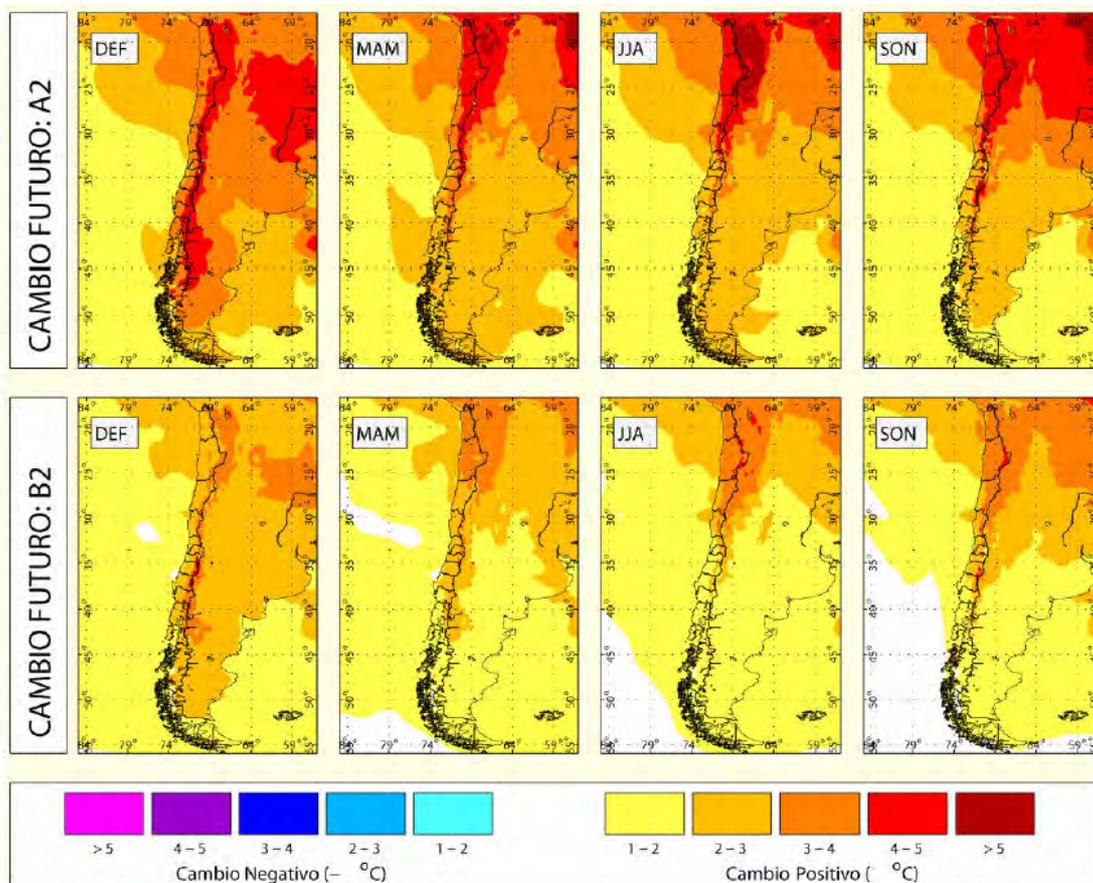


Figura 2.20: Proyección de aumento de temperatura con dos modelos para el período 2071 – 2100 (DGF, 2006).

Escenarios:

A2: es el escenario más extremo en cuanto a las emisiones de gases con efecto invernadero. Este escenario asume un desarrollo global muy heterogéneo, más orientado al crecimiento económico y con un incremento continuo de la población mundial y regional. No se toman acciones especiales para combatir temas como el calentamiento global o cambios medioambientales (IPCC, 2007).

B2: es un escenario moderado en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario asume un desarrollo global con énfasis en las soluciones locales para los temas económicos, sociales y de sustentabilidad medioambiental, un sostenido incremento de la población (menor que en A2) y un desarrollo económico intermedio (IPCC, 2007).

Los impactos hidrológicos asociados a estas proyecciones denotan el cambio de precipitación nival a líquida, generándose la disminución del área andina para acumular nieve debido al aumento de la altura de la isoterma 0° C (DGF, 2006; Carrasco *et al.*, 2005 & 2008).

En la región cordillerana comprendida entre las latitudes 30 y 40° S, que corresponde a las regiones de mayor productividad desde el punto de vista silvoagropecuario y en la que se ubica la generación hidroeléctrica del sistema interconectado, hay reducciones del área comprendida sobre la isoterma 0° C en todas las estaciones del año, pérdida que es muy

significativa durante los cuatro primeros meses del año calendario (DGF, 2006). Por lo tanto los cambios estacionales en la cobertura nival y los rangos de fusión como resultado del calentamiento tendrán importantes impactos en la agricultura y generación hidroeléctrica en esta zona del país (Falvey & Garreaud, 2009).

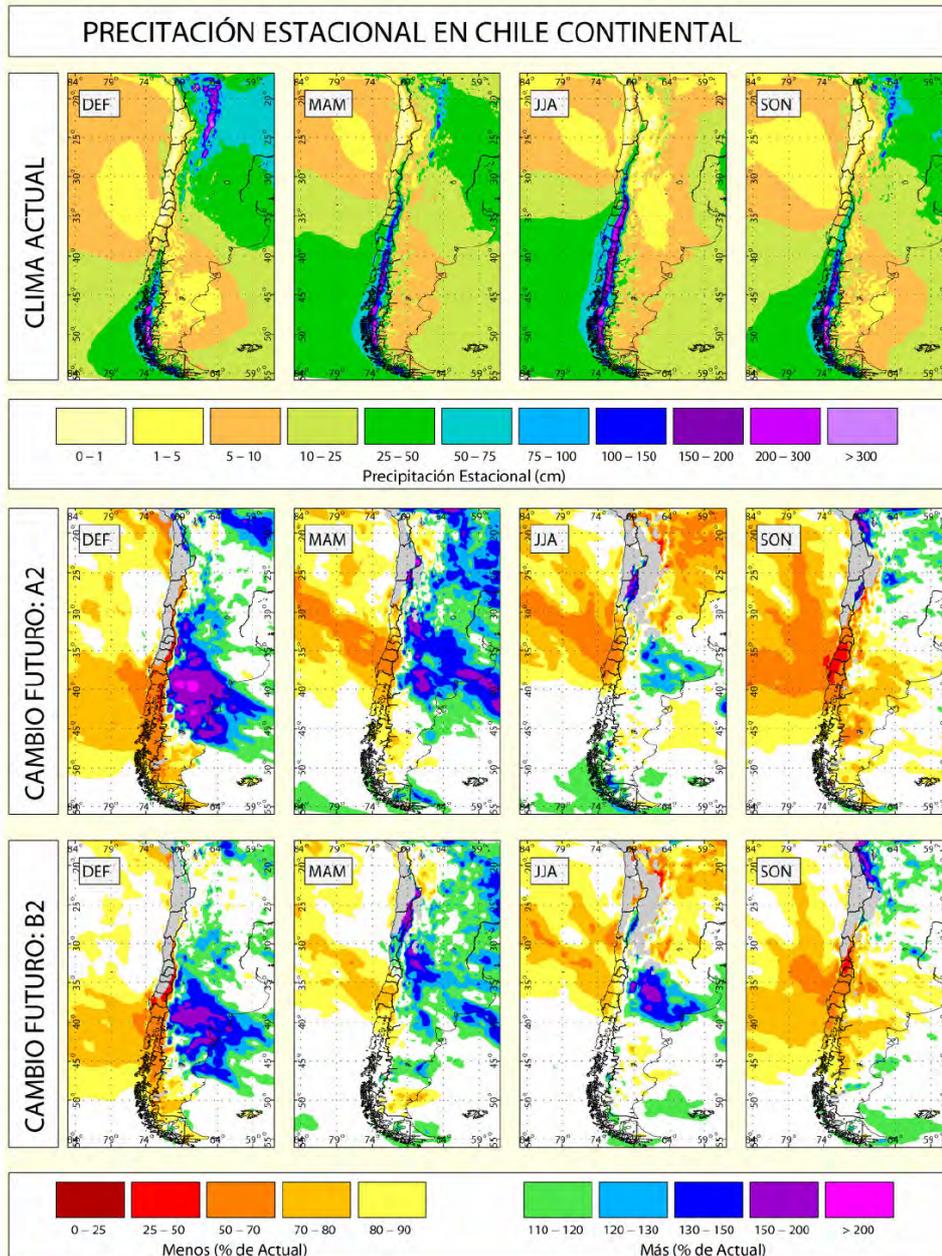


Figura 2.21: Proyección de cambios en las precipitaciones bajo dos modelos para el período 2071 – 2100 (DGF, 2006). (Ver Figura 2.20 para definición de escenarios)

Por otra parte, en cuanto a la pluviometría, con excepción de la región altiplánica en verano y el extremo austral en invierno, dominan las disminuciones. Cabe notar que en la estación invernal todo el territorio nacional comprendido entre 30 y 40° S ve disminuidas sus precipitaciones. La pérdida también se extiende al período estival por todo el territorio comprendido entre 38 y 50° S y a ún más al norte por el sector andino (DGF, 2006).

Tales disminuciones pluviométricas se suman a la elevación de la isoterma cero para ofrecer un cuadro particularmente preocupante en las Regiones Centro y Centro Sur, donde se espera una alta vulnerabilidad a eventos extremos. En particular, se espera un alto impacto en la disponibilidad energética del país por anomalías asociadas a El Niño y La Niña, y restricciones a la disponibilidad hídrica y demandas de irrigación en Chile Central, por los mismos fenómenos (CONAMA, 2008).

Sin embargo proyecciones a corto plazo muestran un mejor escenario en la disponibilidad de recursos hídricos. Novoa (2008) determinó que la tendencia de cambio climático del ecosistema semiárido de transición de la IV Región de Coquimbo, determinada mediante el análisis de los caudales naturales aportados por el sistema hídrico, refuta la supuesta aridización, ya que los recursos hídricos tienden a incrementarse. Por lo tanto existiría la capacidad de abastecimiento de los recursos hídricos necesarios para el desarrollo regional, al menos hasta el año 2017 (Novoa, 2008).

Frente a los antecedentes existentes respecto al cambio del sistema climático en Chile, CONAMA (2008) concluyó que Chile es un país vulnerable al cambio climático, frente a lo cual es necesario tomar medidas de adaptación y mitigación.

2.4. Respuesta de la Criósfera al calentamiento global y sus potenciales efectos sobre actividades humanas y sobre el medio ambiente

2.4.1. Efectos potenciales globales

El derretimiento y reducción significativa de todos los componentes criosféricos ha producido relevantes impactos a nivel global en los sistemas físicos y biológicos, en formas de vida de comunidades indígenas del Ártico, y en actividades humanas tal como el deporte y el turismo en zonas de montaña. Escenarios futuros de calentamiento debieran resultar en una amplificación de todos estos efectos, posiblemente provocando mayores impactos tal como la disminución de especies polares y de alta montaña, la destrucción de infraestructura en terrenos de permafrost, avalanchas destructivas de roca, y un aumento de crecidas glaciales. Efectos positivos tal como el aumento del tráfico marítimo y el aumento de operaciones costa afuera en el Ártico se verán probablemente contrarrestadas por una mayor contaminación.

A continuación se realiza un resumen del estado actual de la criósfera a nivel global, los impactos observados y cambios futuros bajo un escenario de calentamiento climático.

El Cuarto Informe del IPCC (IPCC, 2007) evalúa el estado de la criósfera (Figura 2.22), incluyendo hielo marino, suelo helado, nieve estacional, glaciares de montaña y casquetes de hielo, plataformas flotantes y hielos continentales. La criósfera terrestre almacena cerca del 75% del agua

dulce del planeta (Lemke *et al.*, 2007). Del total de agua dulce almacenada en forma de hielo, un 87% está concentrado en el hielo continental de la Antártica (Tabla 2.1). Por otra parte, más del 17% de la población mundial habita en cuencas alimentadas por el derretimiento de glaciares y nieve estacional (Stern, 2007). La criósfera y sus cambios asociados son asimismo una componente crítica del sistema climático terrestre y el ciclo hidrológico, con una fuerte influencia en el nivel global del mar.

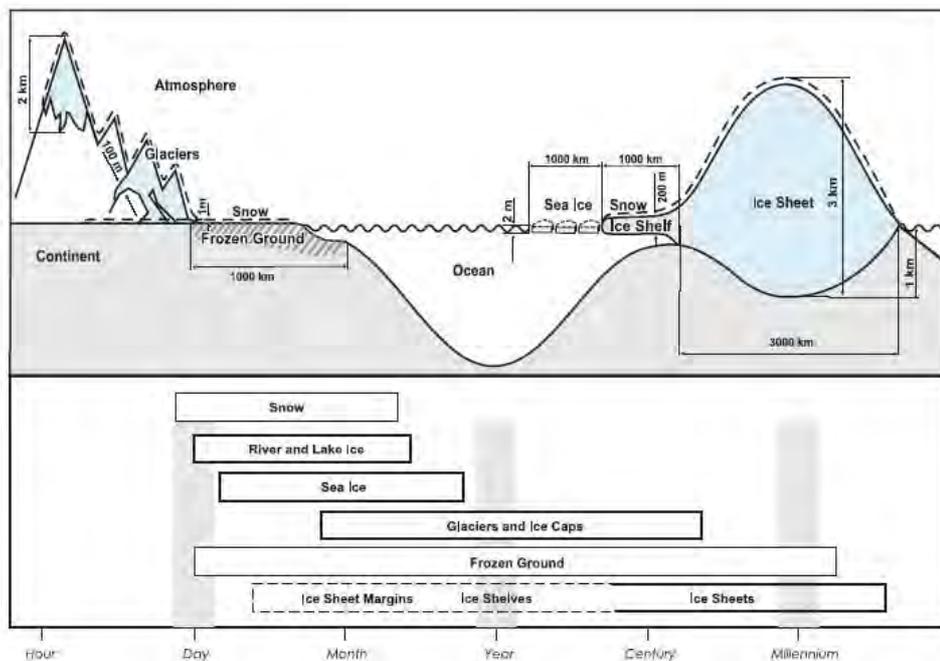


Figura 2.22: Diferentes componentes de la criósfera y escalas de tiempo asociadas. Reproducido de la Fig. 4.1 del IPCC (2007).

El clima de la tierra varía de acuerdo a distintas escalas temporales, desde pocos años a milenios e incluso millones de años. Uno de los ciclos naturales más prominentes es el de las glaciaciones, que han afectado nuestro planeta desde mucho antes que la presencia humana, durante varias épocas geológicas. Las glaciaciones han sido sucedidas por períodos más cálidos conocidos como interglaciales. Durante los últimos 2 millones de años, período conocido como Cuaternario, los ciclos glaciales-interglaciales han durado cerca de 100,000 años, con épocas glaciales frías de unos 75,000 años que han sido unos 5 °C más frías que el presente en latitudes tropicales, y más frías aún en latitudes mayores (Jansen *et al.*, 2007). Hacia el final de la última glaciación, conocido como el Último Máximo Glacial (UMG), unos 20,000 años atrás, extensas capas de hielos continentales cubrían partes de Norteamérica, Escandinavia, Siberia y el sur de Sudamérica, con un nivel del mar que era alrededor de 120 m más bajo que en la actualidad. Han ocurrido asimismo ciclos climáticos naturales menos prominentes a escalas más cortas (milenios a siglos), el último de los cuales es conocido como la “Pequeña Edad del Hielo”, que culminó hacia mediados-fines del siglo 19, cuando las temperaturas eran alrededor de 1 °C más frías que en la actualidad y los glaciares avanzaron en muchas cadenas montañosas a nivel global. Hay múltiples otros ciclos climáticos naturales que afectan nuestro planeta a escalas de tiempo más cortas, con impactos que

varían de acuerdo a la región geográfica, tal como ciclos El Niño-La Niña en El Océano Pacífico y la Oscilación del Atlántico del Norte.

Tabla 2.1: Área, volumen y equivalente de nivel del mar correspondiente a los distintos componentes criosféricos.

Componente criosférico	Área	Volumen de hielo	Aumento potencial nivel del mar ^g	Contribución al nivel del mar (Tabla 4.6 de Lemke <i>et al.</i> , 2007)	
	(10 ⁶ km ²)	(10 ⁶ km ³)	(m)	1961-2003	1993-2003
Nieves terrestres Hemisferio Norte	1,9–45,2	0,0005-0,005	0,001-0,01	~0	~0
Hielo marino	19-27	0,019-0,025	~0	~0	~0
Glaciares y calotas de hielo (estimación baja ^a), (estimación alta, ^b)	0,51-0,54	0,05-0,13	0,15-0,37	+0,32 a +0,68	+0,55 a +0,99
Plataformas de hielo ^c	1,5	0,7	~0	~0	~0
Casquete Groenlandia ^d	1,7	2,9	7,3	-0,07 a +0,17	+0,14 a +0,28
Casquete Antártica ^c	12,3	24,7	56,6	-0,28 a +0,55	-0,14 a +0,55
Suelo helado estacional ^e	5,9-48,1	0,006-0,065	~0	~0	~0
Permafrost ^f	22,8	0,11-0,037	0,03-0,10	~0	~0
TOTAL	66-159	28,4-28,6	64,1-64,4	0,69±0,47	1,19±0,42

Notas: Se indican los mínimos y máximos anuales para la nieve, el hielo marino, y el suelo helado estacional, y la media anual para los demás componentes. Los valores para los glaciares y los casquetes de hielo indican las estimaciones máximas y mínimas excluyendo los glaciares y casquetes de hielo de la periferia de Groenlandia y Antártica. Fuente: Lemke *et al.*, (2007). Notas:

a) Ohmura (2004); se excluyen los glaciares y casquetes de hielo de la periferia de Groenlandia y Antártica.
b) Dyurgerov & Meier (2005); se excluyen los glaciares y casquetes de hielo de la periferia de Groenlandia y Antártica.

c) Lythe *et al.*, (2001).

d) Bamber *et al.*, (2001).

e) Zhang *et al.*, (2003).

f) Zhang *et al.*, (1999), excluyendo el permafrost bajo los océanos, bajo los hielos continentales y bajo los glaciares.

g) Asumiendo un área oceánica de 3,62 × 10⁸ km², una densidad de hielo de 917 kg m⁻³, una densidad de agua de mar de 1.028 kg m⁻³, y con agua de mar reemplazando hielo anclado bajo el nivel del mar.

Actualmente, es claro que el aumento de los gases de invernadero antropogénicos, que no tiene precedentes en al menos los últimos 800.000 años (Lüthi *et al.*, 2008), es mayoritariamente responsable por el calentamiento reciente que ha afectado nuestro planeta. El calentamiento alcanza a 0,74 °C en los últimos 100 años (IPCC, 2007), siendo más prominente en los últimos 50 años. Esto es particularmente cierto para cuerpos temperados de nieve y hielo, donde el calentamiento atmosférico contribuye directamente al derretimiento.

2.4.1.1. Estado de la Criósfera

Recientes revisiones del estado de la criósfera a nivel global se presentan en IGOS (2007), Lemke *et al.*, (2007), UNEP (2007) y WGMS (2008). La Tabla 2.1 muestra el área, volumen de hielo, el aumento potencial del nivel del mar, y la contribución al nivel del mar para cada componente criosférica (IPCC, 2007). El ascenso actual del nivel del mar

es de $3,1 \text{ mm a}^{-1}$ (IPCC, 2007), con una contribución probable del 38% a partir del derretimiento de glaciares, casquetes de hielo y hielos continentales (Tabla 2.1).

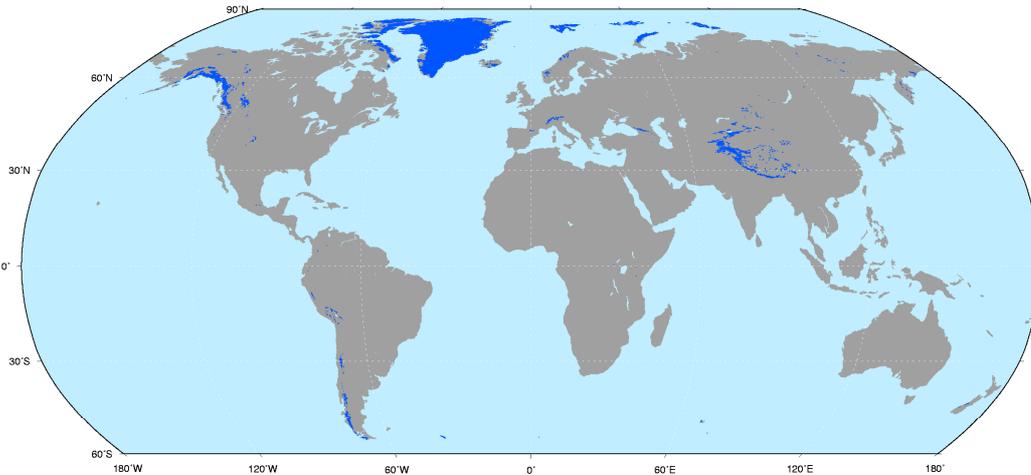


Figura 2.23: Figura y datos de los glaciares a nivel mundial provistos por Zemp et al., (2007), WGMS, Zurich y Bruce Raup, University of Colorado, USA.

a. Glaciares de montaña y casquetes de hielo

Los glaciares y los casquetes de hielo han mostrado una reducción generalizada en décadas recientes, muy probablemente en respuesta al notable calentamiento atmosférico observado a partir de la segunda mitad de la década de 1970. El adelgazamiento y pérdida de área de glaciares ha ocurrido en prácticamente todas las cadenas montañosas del mundo, incluyendo Alaska, el noroeste de EE.UU., el suroeste de Canadá, y Patagonia. Las mayores concentraciones de hielo ocurren en Alaska, el Ártico y Asia central (Figura 2.23), zonas que en consecuencia muestran las mayores contribuciones al nivel del mar. En la Figura 2.24 la serie de datos de balance de masa global de glaciares muestra una tendencia muy negativa, particularmente en las últimas décadas. La extensión de los glaciares es ahora la menor observada en los últimos 5.000 años, y el retroceso glaciar actual está fuera de los límites de la variabilidad natural y puede ser atribuido principalmente al calentamiento antropogénico (IPCC, 2007). La contribución actual de los glaciares y casquetes de hielo al nivel del mar en el período 1993-2003 es de $0,77 \text{ mm a}^{-1}$. Una revisión actualizada del estado actual de los glaciares se presenta en WGMS (2008).

b. Plataformas de hielo

Las plataformas de hielo ocurren principalmente en la Antártica, como una continuación del hielo continental interior. Muchas plataformas de hielo de edades de varios miles de años, tal como Wordie y Larsen B, han colapsado en el sector norte de la Península Antártica debido al gran calentamiento atmosférico observado, calentamiento que también está sucediendo en el Ártico (por ejemplo la reducción de la plataforma de Ward Hunt) (Lemke et al., 2007). Dado que las plataformas de hielo ya están flotando ellas no contribuyen directamente al nivel del mar, pero si producen una aceleración del hielo interior y el consiguiente aporte al

nivel del mar dado que se reduce la fuerza de contención del flujo de hielo interior al producirse el colapso de estas plataformas.

c. Hielos continentales

Los hielos continentales son lejos las mayores masas de hielo del planeta en términos de volumen, con Antártica contribuyendo el 87% (aumento de nivel del mar de 56,6 m), y Groenlandia el 11% (7,3 m de aumento potencial de nivel del mar) (Tabla 2.1). En Groenlandia el adelgazamiento del borde continental debido a la aceleración del flujo de hielo y aumento de derretimiento ha superado con creces el aumento de la acumulación de nieve en el interior, con una contribución positiva al nivel del mar estimado en $0,21 \text{ mm a}^{-1}$. El sector del Mar de Amundsen de Antártica Occidental ha experimentado un retroceso, adelgazamiento, aceleración del flujo de hielo y colapso de las plataformas flotantes, similar a lo sucedido en la Península Antártica y algunas otras áreas alrededor del margen de Antártica. La mayor parte de las estimaciones de balance de masa para Antártica arrojan ahora valores negativos (Ej. Rignot *et al.*, 2008), a pesar que aun no hay un consenso absoluto acerca del signo de su contribución al nivel del mar.

d. Nieve estacional

La cubierta de nieve estacional está disminuyendo en muchas regiones, particularmente en primavera y verano, con un aumento altitudinal asociado de la línea de nieves (Lemke *et al.*, 2007). En las regiones donde ocurre disminución de la cubierta de nieve y del manto de nieve normalmente se ha verificado un calentamiento atmosférico, mientras que en las zonas donde se ha medido un aumento de la nieve estacional ha habido usualmente un aumento de precipitación.

e. Suelo helado

La temperatura del suelo helado en las capas superiores ha aumentado hasta en $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en el Ártico, con evidencia de derretimiento en Alaska y Tíbet (Lemke *et al.*, 2007). El área estacional de suelo helado ha disminuido en un $\sim 7\%$ en el hemisferio norte en 1901 - 2002, con una disminución en primavera de hasta un 15%, junto con disminución de espesor y aumento de la capa de nieve (Lemke *et al.*, 2007).

f. Hielo marino

La extensión mínima de hielo marino al final del verano en el Ártico ha disminuido a una tasa de $7,4 \pm 2,4\%$ por década desde 1978, con una disminución menor durante el invierno, y una tasa de reducción de la cobertura promedio anual de $2,7 \pm 0,6\%$ por década (Lemke *et al.*, 2007). El hielo marino de la Antártica muestra gran variabilidad interanual pero sin ninguna tendencia consistente.

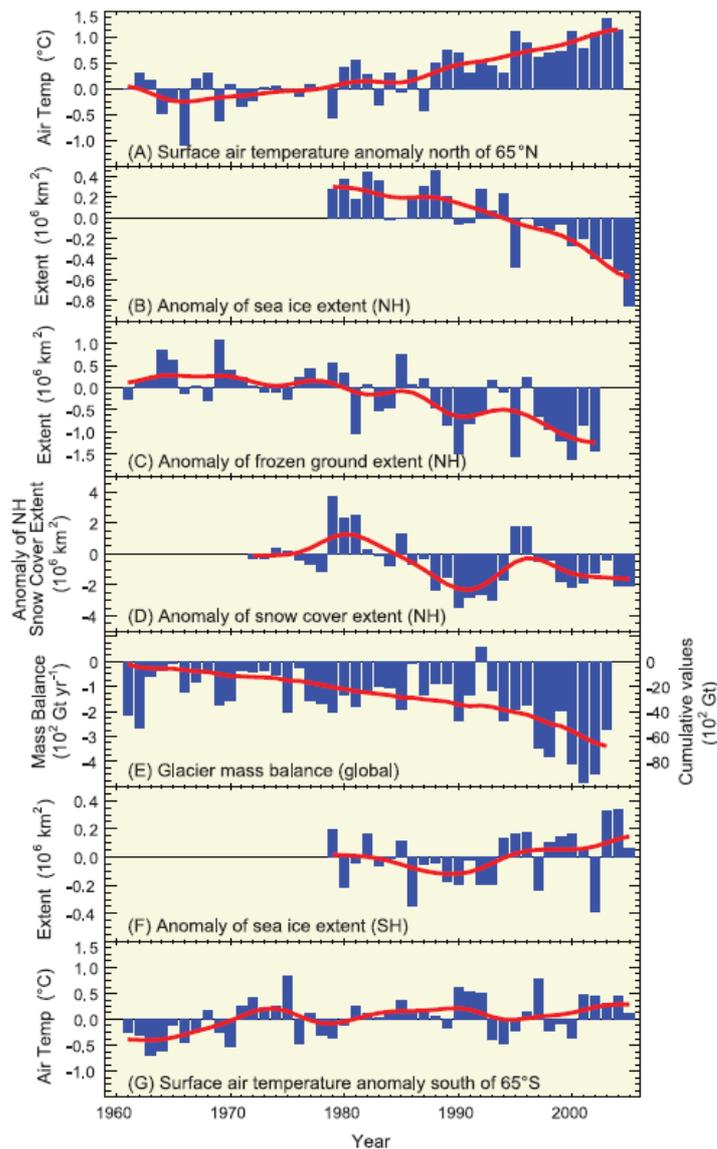


Figura 2.24: Series de datos de anomalías (desviación de medias de largo plazo) de temperatura polar superficial del aire (A, G), extensión de hielo marino Ártico y Antártico (B, F), extensión del suelo helado en el Hemisferio Norte (NH) (C), cubierta de nieve del NH (D) y base de datos global de balance de masa de glaciares (E). La línea roja sólida en E denota el balance de masa acumulado; en los otros paneles muestra variaciones decadales. Fuente: Lemke *et al.*, 2007.

g. Hielo lacustre y fluvial

A pesar de su gran variabilidad espacial, el hielo lacustre y fluvial del hemisferio norte muestra evidencia de fechas de congelamiento cada vez más tardías a razón de $5,8 \pm 1,6$ días por siglo y fechas de rompimiento (descongelamiento) cada vez más tempranas a razón de $6,5 \pm 1,2$ días por siglo, lo que se interpreta como un efecto del calentamiento climático (Lemke *et al.*, 2007).

2.4.1.2. Impactos de los cambios criosféricos

Existen abundantes impactos reportados en las características físicas y biológicas debido a cambios en la criósfera, tal como se indica abajo (Rosenzweig *et al.*, 2007 & 2008). Estos cambios también están produciendo cambios en las formas de vida de comunidades indígenas del Ártico y otras actividades humanas (Rosenzweig *et al.*, 2007 & 2008).

a. Glaciares de montaña, casquetes de hielo, hielos continentales y plataformas flotantes

Los impactos incluyen cambios en la escurrentía (IPCC, 2008), cambios en peligros potenciales asociados en zonas de montaña, impactos en el turismo y en deportes de montaña (Rosenzweig *et al.*, 2007). En el corto plazo la escurrentía glacial debiera aumentar debido al aumento del derretimiento, pero el retroceso continuo de los glaciares debería conducir a una reducción de la disponibilidad de agua (Figura 6.9). Hay evidencia de un aumento de la escurrentía en cuencas de alta montaña en los Alpes, Perú, el sector norte de la Columbia Británica y el Yukon, y Asia central, mientras que cuencas bajas de los Alpes y del sector meridional de la Columbia Británica ya muestran una disminución de la escurrentía producto del fuerte retroceso glacial (Casassa *et al.*, 2009a). El derretimiento glacial en Alaska está resultando en el levantamiento de la corteza por rebote isostático (Rosenzweig *et al.*, 2007). A medida que los glaciares se derriten se destruyen valiosos registros paleoclimáticos preservados en las capas de neviza y hielo (Rosenzweig *et al.*, 2007). El retroceso también genera un aumento de tamaño de los lagos periglaciales, transformándose éstos en un peligro potencial. La reducción de los glaciares está resultando en la pérdida de rutas de escalada en hielo en los Andes, los Alpes y África (Schwörer, 1997; Bowen, 2002), y puede también impactar el turismo en zonas alpinas debido a cambios en el paisaje (Watson & Haeberli, 2004; Mölg *et al.*, 2005). Actividades de esquí también están afectadas por la reducción de los glaciares, tal como ha ocurrido en el Glaciar Chacaltaya en Bolivia (Rosenzweig *et al.*, 2007). La reducción de los glaciares está resultando asimismo en colonización de flora y fauna en terrenos en deglaciación (Jones & Henry, 2003). El registro de imágenes satelitales de los últimos 22 años muestra que zonas de tundra en el Ártico han experimentado un “enverdecimiento” debido a colonización de flora, mientras que áreas forestales muestran una disminución de actividad fotosintética, presumiblemente debido al estrés debido a más altas temperaturas (Bunn & Goetz, 2006). Hábitats microbiales han sufrido una reducción en el Ártico canadiense (Vincent *et al.*, 2001). El calentamiento produce un derretimiento mayor de los glaciares, particularmente durante el verano en las zonas de ablación, con una pérdida correspondiente del manto de nieve estacional que puede resultar en una mayor exposición de grietas superficiales, lo cual a su vez puede afectar operaciones aéreas en pistas de nieve y hielo, tal como ha sido reportado en la Península Antártica (Rivera *et al.*, 2005). El retroceso, la aceleración del flujo del hielo y el colapso de los glaciares, corrientes de hielo (ice streams) y plataformas flotantes puede provocar un aumento del desprendimiento de témpanos, que puede a su vez afectar la navegación oceánica y/o lacustre, aunque no existe evidencia aun que esto esté ocurriendo.

b. Cubierta de nieve

Los máximos de escorrentía primaveral están ocurriendo ahora una a dos semanas más temprano en Norteamérica y Eurasia, así como un aumento de los caudales base de invierno (Rosenzweig *et al.*, 2007).

c. Suelo helado

La degradación de los suelos helados estacionales y el permafrost está ocasionando cambios del suelo tal como un aumento de humedales y “enverdecimiento” asociado del Ártico y Eurasia, vale decir colonización de plantas (Jones & Henry, 2003). Se predice asimismo un aumento potencial de carbono a partir de fuentes enterradas de metano (Lawrence & Slater, 2005; Zimov *et al.*, 2006), a pesar que aún no existe ninguna evidencia que ello esté ya ocurriendo. Los sistemas de drenaje también están siendo afectados en el Ártico y en Eurasia, con un aumento inicial de los lagos y un drenaje sucesivo en terrenos de permafrost. El tiempo de tráfico posible para vehículos con ruedas sobre caminos congelados en Alaska está siendo cada vez más corto debido al aumento del derretimiento de los suelos helados. La degradación de los suelos helados debiera traducirse en un debilitamiento del suelo y efectos asociados en la infraestructura, aunque no hay aun evidencia que ello esté sucediendo. La degradación de los suelos helados en las zonas alpinas debiera producir inestabilidad de taludes y caída de rocas, tal como ocurrió durante los eventos excepcionales de caída de rocas en los Alpes durante el verano extraordinariamente caluroso de 2003 (Rosenzweig *et al.*, 2007).

d. Hielo marino

La fuerte reducción del hielo marino del Ártico está ya afectando la población de los icónicos osos polares (Amstrup *et al.*, 2006; Regehr *et al.*, 2006). Hay signos iniciales del aumento de tráfico marítimo en las rutas del Ártico (Eagles, 2004), lo cual podría generar problemas con la soberanía marítima en pasos claves como el paso del Noroeste y Noreste, y en el descubrimiento de islas y promontorios que se descubren al derretirse el hielo (Mohr & Forsberg, 2002). En el Ártico se espera a futuro también una mayor cantidad de instalaciones costa afuera para explotaciones de hidrocarburos. Un aumento de tráfico marítimo y operaciones de hidrocarburos puede producir impactos económicos positivos pero con un aumento consiguiente de polución (Rosenzweig *et al.*, 2007, ACIA, 2005).

e. Cambios en la salinidad del océano, circulación y ecosistemas

En el Atlántico septentrional (Ártico) y en el Mar de Ross (Antártica) se ha medido una menor salinidad (endulzamiento) del agua, lo cual probablemente está relacionado con el derretimiento de los hielos. Se han reportado impactos en los ecosistemas oceánicos, tal como la reducción de biomasa de krill y un aumento de salpas en la Antártica (Atkinson *et al.*, 2004), una reducción de algas marinas en el océano Ártico debido al poblamiento de especies de agua dulce (Reid *et al.*, 1998) y cambios en algas y peces debido al calentamiento (Beaugrand & Reid, 2003).

f. Hielo lacustre y fluvial

El acortamiento del período de 12 días de ocurrencia de hielo lacustre y fluvial en el hemisferio norte en los últimos 150 años (Lemke *et al.*, 2007) debería impactar actividades de patinaje en hielo y potencialmente afectar la hidrología de agua dulce y el tráfico invernal de vehículos. Existe también una reducción de crecidas por rompimiento de presas de hielo debido a una disminución del congelamiento de agua dulce. Se han reportado en lagos del Ártico cambios en la estructura térmica y características cuantitativas/cualitativas del agua bajo el hielo, en conjunto con cambios en partículas suspendidas y en la composición química del agua (Straile *et al.*, 2003). Estos cambios pueden a su vez producir efectos en la ecología de los lagos.

2.4.2. Efectos potenciales en Chile

En Chile existe evidencia robusta de una reducción del tamaño y masa de los glaciares, lo que ha resultado en un aumento asociado del nivel del mar de $0,062 \pm 0,018 \text{ mm a}^{-1}$ (Rivera *et al.*, 2007), lo que representa un 8% de la contribución total de $0,77 \text{ mm a}^{-1}$ de los glaciares, casquetes de hielo y hielos continentales del planeta (Lemke *et al.*, 2007).

Aun no existe evidencia clara que la reducción de los glaciares esté afectando los recursos hídricos, aunque en el corto plazo el aporte hídrico de los glaciares debiera aumentar producto del mayor derretimiento y luego disminuir a largo plazo producto de la reducción del glaciar.

Por otro lado, el derretimiento de los glaciares está causando el aumento de tamaño de lagos periglaciales en Chile, al igual como sucede en otras cordilleras del mundo, lo que podría gatillar a futuro una mayor frecuencia de crecidas glaciales. Y también pueden darse otros tipos de fenómenos asociados a glaciares que pueden afectar a la comunidad como las avalanchas de hielo, inundaciones, lahares, entre otros.

La reducción de los glaciares está causando un impacto en la escalada en hielo en Chile central, con la desaparición paulatina de rutas sobre hielo. El ascenso de la línea de nieves en Chile central probablemente ya ha impactado las actividades en los centros de esquí más bajos (Lagunillas, Farellones).

En esta sección se presenta un resumen del estado de la criósfera en Chile continental para luego realizar un resumen de los efectos observados y potenciales efectos futuros debido a la reducción de los distintos componentes criosféricos en la misma zona.

2.4.2.1. Estado de la Criósfera en Chile Continental

La criósfera comprende el hielo marino, suelo helado, nieve estacional, glaciares de montaña y casquetes de hielo, plataformas flotantes y hielos continentales. En Chile continental no existen plataformas flotantes ni hielos continentales, los que están circunscritos a las zonas polares.

a. Glaciares de montaña y campos de hielo

Los glaciares de montaña incluyen glaciares limpios o blancos (esencialmente sin detritos) y glaciares de roca (con alto contenido de detritos) (Marangunic, 2007). En Chile existen glaciares de montaña a lo largo de todos los Andes, de norte a sur con excepción de la región de Antofagasta donde prácticamente no existen glaciares debido a la aridez (Lliboutry *et al.*, 1958; USGS, 1998). Los glaciares de roca se concentran en las zonas áridas (norte y centro de Chile) y tienden a alcanzar zonas topográficamente más bajas, donde suele ocurrir menor acumulación de nieve (Brenning & Trombotto, 2006). En la Zona Austral existe una gran concentración de glaciares blancos, muchos de los cuales constituyen masas continuas de hielo que se denominan campos de hielo. Chile posee el mayor número de glaciares de Sudamérica (Zemp *et al.*, 2007), representando un 74% del total de la superficie glaciar de Sudamérica, estimada por Casassa *et al.*, (2007a) en 28.286 km². Del total de 21.063 km² de los glaciares de Chile, el 76% está concentrado en las zonas de CHN (Rivera *et al.*, 2007), CHS (Aniya *et al.*, 1996) y el campo de hielo de Cordillera Darwin (CHCD) (DGA, 2008a).

La gran mayoría de los glaciares chilenos presenta un claro retroceso y adelgazamiento en el último siglo (e.g. Rivera *et al.*, 2008a), que se ha incrementado en las últimas décadas (e.g. Rignot *et al.*, 2003). A pesar de este retroceso generalizado, existen algunos pocos casos de glaciares que han avanzado, ya sea por condiciones locales de geometría de la cuenca, clima o razones dinámicas internas del hielo. Tal es el caso del glaciar Pío XI por ejemplo, que se ha postulado corresponde a un glaciar tipo surge o galopante (Rivera *et al.*, 1997a), vale decir que entra periódicamente en un estado de avance rápido debido a causas dinámicas internas. Las máximas tasas de pérdida de hielo se han registrado en la Zona Austral de Chile, con un retroceso de 15 km en 100 años en el glaciar O'Higgins de CHPS (Casassa *et al.*, 1997); un adelgazamiento de 30 m a⁻¹ en el glaciar HPS12 (Rignot *et al.*, 2003), y una tasa de retroceso de 787 m a⁻¹ en el glaciar Marinelli de CHCD entre 1992 y 2000 (Porter & Santana, 2003). En la Zona Austral hay evidencia de un pequeño pero significativo aumento de espesor de los glaciares en la zona de acumulación del Gran Campo Nevado (Möller *et al.*, 2007) y también en las zonas de acumulación de algunos glaciares de CHN y CHS (Casassa *et al.*, 2009b), lo que probablemente esté relacionado con un aumento de la precipitación nival en las últimas décadas.

Los glaciares en Chile tienen un rol esencial en la generación de recursos hídricos, especialmente en la época de deshielo y más aún durante años de extrema sequía, períodos en los cuales el aporte glaciar puede alcanzar hasta un 67% del caudal total, como es el caso del río Maipo (Peña & Nazarala, 1987). En el Norte Chico y los Andes de Chile central existen numerosos glaciares de roca que han sido inventariados solamente en algunas cuencas (Caviedes, 1979; Brenning & Trombotto, 2006). Estos cuerpos de hielo tienen alta importancia también en la generación de recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas (Corte, 1976), especialmente considerando que contienen en promedio un eq. a. de 0,3 km³ por cada 1.000 km² de área cubierta, siendo este valor un

orden de magnitud superior al encontrado en los Alpes suizos (Brenning, 2005).

b. Nieve estacional

Masiokas *et al.*, (2006) analizaron los datos de equivalente en agua de rutas de nieve de la DGA en el período 1951 - 2005, incluyendo datos de Argentina, encontrando una tendencia positiva de nieve, pero que no es significativa estadísticamente. Este aumento de nieve probablemente se debe a la frecuente ocurrencia de eventos El Niño durante el período posterior a 1976. Casassa *et al.*, (2003) también analizaron los datos de rutas de nieve de Chile, pero sin encontrar tendencias. Utilizando imágenes satelitales de microondas pasivas, que tienen una resolución espacial de más de 10 km, Foster (2008) no detectó tendencias de cobertura de nieve estacional en el período 1979-2006, pero sí una alta variabilidad temporal. Basado en datos de temperatura de radiosondas, Carrasco *et al.*, (2008) encontraron tendencias positivas de temperatura a 850 hPa (cota 1.400 m aproximadamente) a partir de datos de radiosondas de Antofagasta, Quintero/Santo Domingo y Puerto Montt, concluyendo que la isoterma cero, y por ende la línea de nieves en el norte-centro y sur de Chile ha ascendido en el período 1958 - 2006. En Punta Arenas sin embargo, Carrasco *et al.*, (2008) no encontraron tendencias en la temperatura de las radiosondas a 850 hPa.

c. Suelo helado

Existen muy pocos estudios específicos sobre suelos helados (ya sea suelo helado permanente o permafrost, o suelo helado estacional) de la alta Cordillera de los Andes de Chile (Lliboutry, 1961). Por lo general los estudios se refieren a condiciones geomorfológicas generales (Ej. Paskoff, 1967; Schröder, 1999 & 2001; Veit, 1993) o bien a glaciares rocosos (Brenning, 2003; Lliboutry, 1986; USGS, 1998; Marangunic, 1976). Milana & Güell (2008) en su estudio de glaciares rocosos de El Tapado en la cuenca del Río Elqui, muestran cómo los métodos sísmicos permiten determinar con bastante precisión el porcentaje de agua contenido en el Permafrost o diferenciarlo del suelo no congelado, ya que dependiendo del contenido de hielo la velocidad de propagación de las ondas sísmicas puede variar en un factor cercano a 3 (de 1.660 a 4.200 m/s). En Argentina en cambio existen mayores antecedentes (e.g. Trombotto, 2002). El retroceso de los glaciares está generando un aumento del área de los suelos helados (e.g. Trombotto, 2006), pero por otra parte el calentamiento atmosférico también debe producir un derretimiento del hielo contenido en dichos suelos, aunque no existe documentación al respecto. Algunas empresas mineras han estudiado problemas de estabilidad de taludes en suelos helados debido a su influencia directa en operaciones extractivas (Ej. Apablaza *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 1992).

d. Hielo marino

El hielo marino en Chile continental está circunscrito a muy limitadas zonas en los fiordos en cuyas cabeceras descargan al Océano Pacífico los glaciares de Chile austral, principalmente en el CHS y el CHCD. En dichos fiordos la baja salinidad del agua debido al aporte de aguas de derretimiento de los glaciares reduce efectivamente la salinidad y permite el congelamiento de la superficie del mar en reducidas zonas durante los

períodos invernales más fríos. Por ejemplo un examen visual en el Fiordo Falcon (CHS) por los autores ha permitido detectar que el hielo marino coexiste en una mezcla con témpanos desprendidos por los glaciares. No se conocen para los fiordos australes chilenos antecedentes científicos sobre este tema.

e. Hielo lacustre y fluvial

En la alta cordillera andina de Chile existen numerosos lagos y cauces, muchos de los cuales se pueden congelar superficialmente durante algunos períodos invernales fríos. Por ejemplo un espesor de hielo de 70 cm fue observado por uno de los autores (Gino Casassa) en el lago somital del volcán Licancabur (5.900 m), Región de Antofagasta, al final del invierno del año 1984.

El número de lagos y cauces congelados aumenta hacia el sur, siendo frecuentes en las regiones australes de Chile. No se conocen antecedentes científicos relacionados sobre este tema en Chile.

2.4.2.2. Impactos de los cambios criosféricos en Chile

a. Glaciares de montaña y campos de hielo

Los impactos de la reducción de los glaciares y campos de hielo incluyen aumento del nivel del mar a nivel global, cambios en la escorrentía, cambios debido a inestabilidad de taludes en zonas de montaña por desaparición de glaciares, levantamiento de la corteza por isostasia, impactos en el turismo y en deportes de montaña (Rosenzweig *et al.*, 2007).

Proporcionalmente a su tamaño, los glaciares de Chile austral están aportando al nivel global del mar más que muchos otros glaciares del mundo debido a sus altas tasas de adelgazamiento y retroceso (Rignot *et al.*, 2003; Rivera *et al.*, 2002). El aporte del CHN y CHS al nivel del mar asciende a $0,041 \pm 0,016 \text{ mm a}^{-1}$ (Rivera *et al.*, 2007).

En el corto plazo la escorrentía glaciar debiera aumentar debido al aumento del derretimiento, pero el retroceso continuo de los glaciares debería conducir a la postre a una reducción de la disponibilidad de agua luego que el glaciar disminuya a un tamaño menor a un cierto tamaño crítico (Corripio *et al.*, 2008; Casassa *et al.*, 2009a). Pellicciotti *et al.*, (2007) analizaron la escorrentía en las estaciones fluviométricas del río Aconcagua en río Blanco y río Blanco en río Blanco, y asimismo las tendencias de precipitación, concluyendo que existe una significativa tendencia de disminución de escorrentía en ambas estaciones en el período 1970 – 2002, consistentes a nivel anual y estacional. Pellicciotti *et al.*, (2007) concluyeron que las variaciones en la precipitación no son suficientes para explicar la disminución observada de escorrentía, y que la causa debe obedecer a una disminución del derretimiento de los glaciares y/o de la cobertura de nieve, debida a su vez al calentamiento atmosférico y un aumento asociado de la línea de nieve. Considerando el gran tamaño de los glaciares existentes en las nacientes de los ríos Aconcagua y Blanco, sería improbable suponer que dichos glaciares han disminuido a un tamaño menor al tamaño crítico (Casassa *et al.*, 2009a),

tal como ya está ocurriendo en cuencas bajas de los Alpes y en el sur de Canadá. Casassa *et al.*, (2009a) analizaron la escorrentía en 13 estaciones de montaña en Chile central cuyas áreas englaciadas varían entre menos de 1% a 23,5% del total de la cuenca. El análisis de la escorrentía media mensual de febrero mostró un leve aumento, aunque estadísticamente no significativo, para la mayor parte de las estaciones en el período 1950 – 2007 (Figura 2.25). Masiokas *et al.*, (2006) muestran un pequeño, pero significativo aumento de $0,93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{a}^{-1}$ y $0,38 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{a}^{-1}$ de la escorrentía media mensual del río Maipo en El Manzano y del río Tinguiririca en Bajo los Briones, respectivamente, para el período 1954 - 2003. Este aumento puede estar relacionado a mayor acumulación nival y a un aumento de ablación de nieve y hielo debido al calentamiento durante la estación de fusión (Masiokas *et al.*, 2006). En la zona centro-sur de Chile (latitudes de $35\text{--}47^\circ\text{S}$), e n las últimas décadas las precipitaciones muestran una reducción con un calentamiento asociado en zonas cordilleranas (Carrasco *et al.*, 2008), por lo cual las tasas positivas de escorrentía, si es que fuesen significativas, sugerirían un aumento de la escorrentía glaciar.

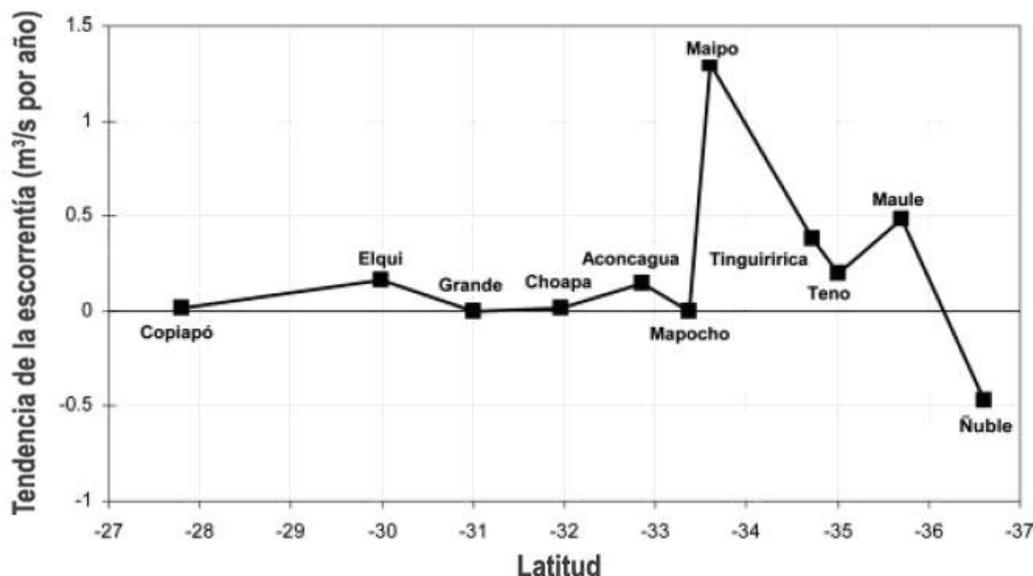


Figura 2.25: Tendencias de escorrentía media mensual de febrero para estaciones fluviométricas de Chile central ($27\text{--}37^\circ\text{S}$) (Casassa *et al.*, 2009a). Los datos corresponden al período 1950 – 2006 para la mayor parte de las estaciones. Las estaciones son: Copiapó en La Puerta, Elqui en Algarrobal, Grande en Las Ramadas, Choapa en Cuncumén, Aconcagua en Chacabuquito, Mapocho en los Almendros, Maipo en El Manzano, Tinguiririca en Bajo Briones, Tinguiririca bajo río Azufre, Teno después de Junta, Maule en Armerillo, Ñuble en San Fabián y Nef en confluencia con Baker.

El derretimiento glaciar en la cordillera de los Andes está resultando en levantamiento de la corteza por rebote isostático (Ivins & James, 2004), tanto debido a una respuesta elástica, inmediata, como a una respuesta viscosa, que puede tardar varios años a varios milenios dependiendo de la viscosidad del manto terrestre subyacente. Antecedentes preliminares indican que en la zona de los campos de hielo de la Patagonia se está produciendo un levantamiento isostático de varios centímetros por año (Reinhard Dietrich, comunicación personal). Este levantamiento, debido a

su pequeña magnitud y características de homogeneidad espacial a escalas de varios kilómetros, no alcanza a afectar actividades humanas, pero sí produce un descenso relativo del nivel del mar en la zona.

El retroceso de los glaciares puede también impactar el turismo en la cordillera de los Andes al desaparecer la nieve y el hielo que son elementos de atracción para los visitantes.

La reducción de los glaciares está afectando actividades deportivas, como por ejemplo la pérdida de hielo en rutas originalmente sobre glaciares o canalones. Un caso emblemático es la pared sur del cerro San Francisco (4.345 m) en el cajón del Maipo, ascendida por primera vez el 7 de diciembre de 1945 por Eberhard Meier y Luis Krahl del Club Andino Alemán, quienes realizaron la mayor parte de la ascensión escalando en hielo a través de glaciar San Francisco. Desde hace varios años, debido al fuerte retroceso del glaciar, no es posible realizar la ascensión por la ruta original y en cambio hay que efectuar una buena parte de la ruta en roca. Al retroceder los glaciares y transformarse más rápidamente la nieve en hielo en el verano se pueden también afectar actividades de esquí, lo cual puede potencialmente ocurrir en el glaciar Mocho por ejemplo, donde existe el centro de esquí TEN80, de la reserva biológica Huilo-Huilo, la única cancha de esquí sobre un glaciar en Chile.

Finalmente, la reducción de los glaciares está resultando en colonización de flora y fauna en terrenos en deglaciación (Pisano, 1978).

b. Cubierta de nieve

A pesar del calentamiento climático registrado en la mayor parte de Chile en la troposfera media, no existen tendencias significativas en la cubierta de nieve (Masiokas *et al.*, 2006; DGA, 2008d; López *et al.*, 2008). Carrasco *et al.*, (2005) registraron un aumento de la isoterma 0 °C en Chile central durante el período 1975-2001. Si esta tendencia continúa, esto debiera traducirse en una disminución de la cubierta de nieve en bajas altitudes (1.500-2.000 m). Un impacto posible del ascenso de la isoterma cero son inundaciones más frecuentes debido a la presencia de precipitación líquida en zonas donde normalmente se presentaba precipitación sólida, tal como ocurre por ejemplo durante eventos El Niño en Chile central (Garreaud & Rütllant, 1996). En efecto, a partir de 1976 se observó una mayor frecuencia de fenómenos El Niño en el Pacífico suroriental, ligado a la fase cálida (positiva) de la Oscilación Decadal del Pacífico (Giese *et al.*, 2002). Frente a escenarios de calentamiento atmosférico, los ríos de la zona central de Chile deberían cambiar de un régimen esencialmente nivoglacial a un régimen más bien pluvio-nivoglacial, con máximos de escorrentía cada vez más tempranos durante la primavera (DGF, 2006).

Ante escenarios de ascenso de la línea de nieves por calentamiento atmosférico, los centros de esquí ubicados a cotas bajas debieran experimentar una disminución de la cubierta de nieve. Existe evidencia inicial que esto ya estaría ocurriendo en los centros de esquí de Farellones y Lagunillas (Casassa *et al.*, 2003).

c. Suelo helado

No se conoce evidencia en Chile que indique la ocurrencia de una degradación de los suelos helados estacionales y permafrost en la cordillera de los Andes. Pero es claro que de continuar a futuro las tendencias de calentamiento debiera producirse una degradación de los suelos helados y permafrost, con una consiguiente inestabilidad de taludes y caída de rocas, tal como probablemente ocurrió durante la generación del aluvión del Río Colorado (Casassa & Marangunic, 1993) en Chile central en 1987.

d. Hielo marino

No se conoce de evidencia en Chile que apunte a una disminución del hielo marino en los fiordos de Chile austral como tampoco a impactos asociados. De continuar las tendencias de calentamiento atmosférico debiera disminuir la cubierta de hielo marino invernal en los fiordos, con un posible aumento de tráfico marítimo en dichos fiordos, y posibles cambios en los ecosistemas.

e. Hielo lacustre y fluvial

No se conoce de evidencia en Chile que apunte a una disminución del hielo lacustre y fluvial, como tampoco de impactos asociados, pero claramente si continúan las tendencias de calentamiento debiera reducirse la extensión y espesor de hielo lacustre y fluvial, con eventuales cambios asociados en las propiedades físicas y químicas de los lagos, y en su ecología. Sin embargo, debido a que las temperaturas invernales en los Andes de Chile son relativamente moderadas con respecto a las del hemisferio norte, no se estima que el calentamiento reciente pueda ocasionar impactos de mucha relevancia tal como ya está ocurriendo en el Ártico por ejemplo.

3. INSTITUCIONALIDAD, LEGISLACIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE GLACIARES

3.1. Institucionalidad y sus líneas generales de trabajo

3.1.1. Instituciones del Estado vinculadas a la administración, estudio y resguardo de glaciares.

Si bien en la legislación chilena no hay antecedentes explícitos que normen los glaciares ni que establezcan instituciones encargadas de velar por ellos, se establece el deber de la DGA de llevar un catastro de los glaciares del país. Además, en la práctica, distintas instituciones ligadas a la protección de recursos hídricos y del patrimonio natural han abordado parcialmente el tema de los glaciares en su que hacer. Entre estas instituciones se cuentan:

- CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente): Administra las normas ambientales, los planes de prevención y descontaminación, información y educación ambiental y, particularmente relevante: el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), siendo CONAMA también quien se pronuncia respecto a las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), los que involucran en ocasiones actividades sobre o en la vecindad de glaciares, como ocurre principalmente con proyectos mineros. CONAMA es también el organismo central encargado y coordinador de las acciones a realizar en el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático. De igual modo juega un rol fundamental en la Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, en la cual se la puntualiza como uno de los promotores de proyectos para la determinación de la calidad de las aguas y se la identifica como la institución del Estado encargada de regular la calidad de las aguas y de la protección y conservación ambiental, además a nivel nacional, forma parte del Consejo Ministerial de Cuencas, y a nivel local, puede formar parte de los Organismos de Cuenca a lo largo del país.
- DGA (Dirección General de Aguas), Ministerio de Obras Públicas: Es el organismo del Estado encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente; y proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica, ambas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas. Con estos fines, entre muchas otras actividades, mantiene y opera el servicio hidrométrico nacional, publicando la información correspondiente. En lo respectivo a monitorear todos los sistemas hídricos del país, la DGA entiende que esto incluye los glaciares y que tiene competencia directa en este sentido. Por ello, desde el inicio de la década de los 70's ha realizado catastros de glaciares en diversas cuencas hidrográficas, ha monitoreado el Glaciar Echaurren en la

cuenca alta del Río Maipo, ha realizado estudios de vaciamientos súbitos de lagos glaciares, ha monitoreado condiciones de peligros por violentos deslizamientos glaciares, y ha controlado rutas de nieve. El año 2008, se crea en la DGA la Unidad de Glaciología y Nieves, con el objetivo de monitorear los glaciares del país y estudiar el comportamiento de estas estratégicas masas de hielo. Esta unidad es el primer órgano del Estado dedicado al estudio glaciológico, no obstante haber existido en el pasado, otras unidades dentro de la DGA que realizaron una importante actividad glaciológica, como el Sub Departamento de Hidrología Aplicada y Glaciología y el Sub Departamento de Meteorología y Nieves dependiente del Departamento de Hidrología. La DGA ha establecido una amplia red de monitoreo hidrometeorológico, la que incluye numerosas estaciones en cuencas con aporte glaciar.

- CONAF (Corporación Nacional Forestal): Con la misión de “Garantizar a la sociedad el uso sostenible de los ecosistemas forestales y del patrimonio natural”, la CONAF tiene a su cargo la administración del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), dentro de las cuales se encuentra la gran mayoría de las masas glaciares del país. Producto de esto ha estado involucrado en catastros generales de la superficie de nieves y glaciares comprendida en el SNASPE, reportándose un total de 46.467 km² (reportado a FAO y publicado en el Anexo 3 de “Información sobre el manejo forestal, recursos forestales y cambio en el uso de la tierra en América Latina”).
- DIFROL (Dirección de Fronteras y Límites): Debido a que la frontera internacional de Chile, atraviesa numerosos glaciares e incluso el Campo de Hielo Sur en una extensa sección, DIFROL ha tenido que involucrarse en temas glaciológicos, realizando estudios y campañas de terreno, cuyos resultados pueden tener carácter confidencial.
- INACH (Instituto Antártico Chileno), Ministerio de Relaciones Exteriores: Con la misión de incentivar el desarrollo de la investigación científica, tecnológica y de innovación en la Antártica, INACH está activamente involucrado en temas glaciológicos, que si bien están enfocados en Antártica, sin un impacto directo en la hidrología nacional de interés económico y de la población, la constituyen de todos modos en una autoridad a nivel nacional en el tema glaciológico, contando y colaborando con especialistas en el tema. Además INACH participa en proyectos que estudian la Antártica, sus características y dinámica, con relación a sus efectos e influencias presentes y pasadas en Sudamérica y muy particularmente en la región de Magallanes, algunos ejemplos recientes son: “Conexiones geológicas entre Antártica occidental y Patagonia, desde el Paleozoico tardío al reciente: tectónica, paleogeografía, biogeografía y paleoclima”, “Relaciones paleofitogeográficas y evolucionarias entre las floras del sur de Patagonia y la Península Antártica durante el Cretácico” y “Proveniencia de complejos metasedimentarios del norte de la

Península Antártica y Patagonia: implicaciones tectónicas”, entre otros.

- Ministerio de Defensa: Las tres ramas de las fuerzas armadas se han involucrado en labores de estudio y gestión de glaciares, en parte por su formidable capacidad logística o por operar en zonas glaciadas como la Base de la Fuerza Aérea “Arturo Parodi” la cual se encuentra directamente sobre un glaciar al interior del Territorio Antártico. Este ministerio, ha destinado a su vez recursos logísticos y económicos a diversos proyectos en colaboración con otras instituciones como INACH y CECS, con este último se han desarrollado prototipos de radares de hielo en el proyecto SIRAHT (2005-07), travesías terrestres al Polo Sur (2004-05), Lago Ellsworth (2006) y Polo de la Inaccessibilidad (2007-08) y Campañas P3 de exploraciones aéreas a Antártica y Campos de Hielo (2002, 2004 y 2008).

Es importante destacar el SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental), una iniciativa de CONAMA que cuenta con una plataforma para la distribución digital de información territorial, incluyendo entre muchas cosas, información de estaciones y cuencas hidrológicas, uso de suelos y áreas silvestres protegidas. Esta plataforma muestra una forma interesante de maximizar el uso de la información ambiental y territorial disponible, concepto que debe extenderse a la información relativa a glaciares y sus cuencas dependientes.

Otra iniciativa similar es el SNIT (Sistema Nacional de Información Territorial), y su GEOPortal, dependiente del Ministerio de Bienes Nacionales. Este también cuenta con una plataforma para la distribución y sistematización de la enorme cantidad de información geoespacial que producen constantemente los distintos organismos del Estado. El sistema contiene una enorme cantidad de información, tanto de libre acceso como restringida.

Tanto en SINIA como en SNIT, se puede encontrar algo de información relativa a los glaciares del país, como imágenes satelitales, fotos aéreas, delimitación de cuencas hidrográficas, guías a las rutas patrimoniales que los recorren, etc. Sin embargo falta abundante información en manos de la DGA, universidades, centros de estudios y privados, la que podría ser incorporada a estos sistemas u otros, existentes o nuevos, lo que requiere una evaluación del tema.

3.1.2. Instituciones de investigación

Diversas instituciones educacionales, privadas y centros de investigación, han realizado un monitoreo glaciológico de distintas zonas del país, aunque sin la debida sistematización y coordinación. Entre los centros de estudios destacan:

- CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas): Es una Unidad de Desarrollo Científico y Tecnológico Regional, fundada en el año 2003. Se gestó gracias a un proyecto conjunto de la

Universidad de La Serena, la Universidad Católica del Norte y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA-INTIHUASI. Actualmente cuenta con 38 investigadores y desarrolla numerosos proyectos en las áreas de agricultura, clima, acuicultura, oceanografía, biología marina, biología terrestre e hidrología, incluyendo en esta última área varios estudios de los glaciares de la alta cordillera del Norte Chico. En la actualidad está realizando investigación con apoyo de la empresa Barrick Gold en la zona de Pascua Lama y en el Glaciar Tapado, donde se monitorea el balance de masa y la dinámica de glaciares. También participan del proyecto ACQWA en el Río Aconcagua, donde se estudia el balance energético e hídrico del glaciar Juncal Norte. Entre los especialistas del instituto, destacan los que trabajan en sensores remotos, estudios de terreno (balance de masa) e hidrología.

- CEQUA (Centro de Estudios del Cuaternario): Fue creado a principios del año 2002 por el Gobierno Regional de Magallanes y Antártica Chilena, en conjunto con la Universidad de Magallanes, el Instituto Antártico Chileno y el Instituto de Fomento Pesquero. Lo que se consolidó cuando el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología aprobó la creación del "Centro de Estudios del Cuaternario de Fuego-Patagonia y Antártica Chilena" con el objetivo de formar un centro de investigación científica multidisciplinario enfocado a estudios de la evolución Cuaternaria del medio ambiente natural en el extremo sur de Sudamérica y Antártica, particularmente el establecimiento de las grandes masas de hielo, su retiro y posterior colonización biótica y humana. Actualmente cuentan con 44 investigadores desarrollando proyectos en las áreas de biología marina, oceanografía biológica, física espacial, ozono, bioquímica del medio ambiente, poblamiento humano, ecología marina, modelación y simulación, climatología, botánica, paleoecología y glaciología. En ésta última área destacan los estudios de espesor de hielo realizados en el Glaciar Tyndall del Parque Nacional Torres del Paine y algunas expediciones a Cordillera Darwin. En la actualidad el instituto no cuenta con glaciólogos, pero realiza estudios en zonas aledañas a glaciares, en particular dendrocronología.
- CECS (Centro de Estudios Científicos): Corporación privada sin fines de lucro, fundada a principios de los 80 en Santiago, y que se trasladó a la ciudad de Valdivia el año 2000, cuando inició un programa de glaciología y cambio climático. En la actualidad realiza actividades de investigación en varios lugares de Los Andes, la Península Antártica y el interior del Casquete Antártico. Destacan los proyectos para estudios glaciovolcánicos, inundaciones de carácter glaciar, interacciones glaciares-Plataformas de Hielo Flotante, estabilidad de glaciares del de Antártica, cambios volumétricos en glaciares antárticos, etc. Entre los estudios destacan balances de masa, energía, hídricos, variaciones volumétricas, fotogrametría, sensores remotos satelitales, levantamientos aerotransportados, modelación, testigos de hielo, dinámica glaciar y desarrollo de radares.

- DPA-UMAG (Dirección de Programas Antárticos, Universidad de Magallanes): Unidad de investigación de esta universidad estatal de la ciudad de Punta Arenas, que realiza investigación tecnológica de radares y que tiene un programa de magíster donde se tocan temas antárticos, incluyendo glaciología. Aquí destacan las mediciones de radar en el Parque Nacional Torres del Paine (Glaciar Tyndall), estudios de grietas en las cercanías de la base O'Higgins del Ejército de Chile en la Península Antártica, y el desarrollo de radares para estudios de espesor de hielo, desde sistemas aerotransportados a terrestres.
- UCH (Universidad de Chile): A pesar de que en el pasado la mayor parte de la investigación glaciológica se realizó en la Casa de Bello (Luis Lliboutry estuvo en el Departamento de Geografía en la década de 1950 y publicó su libro Nieves y glaciares de Chile, en la editorial de la Universidad), en la actualidad sólo hay actividades docentes con una cátedra de glaciología en el Departamento de Geografía, y un grupo de investigadores que han iniciado el estudio de testigos de hielo en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Este último grupo, está analizando testigos de nieve someros extraídos por el CECS en Antártica. Esta investigación es llevada a cabo por una estudiante de doctorado de la Universidad, con apoyo del CECS y CONICYT.

3.1.3. Empresas privadas

Entre las empresas privadas, que han realizado trabajos glaciológicos, destacan las consultoras:

- Terrasat: Con experiencia en mediciones geodésicas en ambientes englaciados, particularmente en Patagonia.
- Geoestudios: La empresa Geoestudios Ltda. posee personal especializado liderado por el Dr. Cedomir Marangunic, geólogo con grado de doctor en glaciología. En los últimos 40 años el Dr. Marangunic y Geoestudios han realizado numerosos estudios glaciológicos para diversas empresas del sector público y privado, incluyendo, entre otras, a empresas mineras, hidroeléctricas, y al Ministerio de Obras Públicas. Los estudios emprendidos por Geoestudios se pueden clasificar en los siguientes temas:
 1. Cambios en el comportamiento de los glaciares, tanto glaciares blancos como glaciares de roca, en respuesta a factores naturales y a intervenciones humanas, incluyendo el uso de un modelo de simulación 2D de glaciares
 2. Recursos hídricos provenientes de la nieve y el hielo, incluyendo balance hídrico y calórico, la influencia de microtopografía (penitentes por ej.) y la influencia de detritos rocosos
 3. Glaciares en transición: Transición de un glaciar blanco a un glaciar de roca

4. Deslizamiento de glaciares
5. Avalanchas de nieve
6. Manejo de glaciares y formación de nuevos glaciares.

La inversión anual promedio en los temas mencionados durante los últimos 12 años ha sido del orden de 10 millones de USA dólares (Marangunic, comunicación personal).

Tabla 3.1: Resumen de proyectos FONDECYT regular relacionados con glaciología.

PROYECTO	INSTITUCION RESPONSABLE	INVESTIGADORES NACIONALES	ZONA	AÑO	RECURSOS ASIGNADOS
VARIACION RECIENTE DE GLACIARES EN EL HIELO PATAGONICO SUR Y SU RELACION CON CAMBIOS CLIMATICOS	U. MAGALLANES	Gino Casassa, Andrés Rivera, Heiner Lange, Juan Carlos Aravena	Austral	1995	\$ 24.768.000
				1996	\$ 14.674.000
				1997	\$ 9.748.000
HIELO PATAGONICO SUR: ESTUDIOS GEOFISICOS Y MODELACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS GLACIARES	U. MAGALLANES	Gino Casassa, Andrés Rivera, Heiner Lange, Juan Carlos Aravena	Austral	1998	\$ 38.508.000
				1999	\$ 27.442.000
				2000	\$ 20.873.000
CAMBIOS CLIMATICOS DURANTE LOS ULTIMOS 1000 ANOS EN LOS ANDES DEL SUR DE CHILE (41° -51° S) UTILIZANDO REGISTROS DENDROCRONOLOGICOS, GLACIARES Y DOCUMENTALES	U. AUSTRAL	Antonio Lara, Juan Carlos Aravena, Alexia Wolodarsky, Andrés Rivera, María Eugenia Solari	Sur y Austral	2000	\$ 43.235.000
				2001	\$ 35.510.000
				2002	\$ 23.389.000
GLACIER-VOLCANO INTERACTIONS IN SOUTHERN CHILE: VOLCANIC HAZARD AND CLIMATE CHANGE IMPLICATIONS.	CECS	Andrés Rivera, Jorge Clavero, Gino Casassa	Sur y Austral	2004	\$ 35.883.000
				2005	\$ 28.580.000
				2006	\$ 20.535.000
ENVIRONMENTAL PROXY RECORDS AND MASS BALANCE STUDIES FROM CENTRAL CHILE AND PATAGONIA BY MEANS OF FIRN AND ICE CORES	CECS	Gino Casassa, Andrés Rivera, Jorge Carrasco	Centro y Austral	2004	\$ 28.735.000
				2005	\$ 32.826.000
PAST CLIMATE CHANGES IN PATAGONIA OBTAINED FROM THREE HIGH-ALTITUDE ICE CORES.	CECS	Gino Casassa, Andrés Rivera, Jens Wendt	Austral	2006	\$ 29.050.000
				2007	\$ 27.350.000
				2008	\$ 13.710.000
LATE-HOLOCENE GLACIER FLUCTUATIONS IN THE ANDES OF SOUTHERN CHILE: MULTI-CRITERIA DATING APPROACH INTEGRATING HIGH-RESOLUTION DENDROGLACIOLOGIC METHODS WITH LICHENOMETRY, TEPHROCHRONOLOGY AND STRATIGRAPHIC ANALYSIS	CECS	Juan Carlos Aravena, Andrés Rivera, Rodrigo Villa	Austral	2008	\$ 40.409.000
				2009	\$ 47.288.000
GLACIAL LAKE OUTBURST FLOODS IN THE CHILEAN ANDES: MEASUREMENTS AND MODELLING APPROACH FOR EARLY PREDICTION	CECS	Gino Casassa, Jens Wendt, Jorge Carrasco	Austral	2009	\$ 23.600.000
ICE-CAPPED ACTIVE VOLCANOES IN SOUTHERN CHILE: GLACIER IMPACTS OF GEOTHERMAL ACTIVITY AND ERUPTIVE EVENTS. SUPPORT TO DECISION MAKING AND ADAPTATIVE PROCESS.	CECS	Andrés Rivera, Jorge Clavero, Francisca Bown	Sur y Austral	2009	\$ 46.367.000
TOTAL					\$ 612.480.000

3.1.4. Proyectos de investigación reciente

Durante las últimas décadas FONDECYT ha financiado casi 10.000 proyectos de investigación científica, de los cuales sólo una decena ha estado relacionada con el estudio de glaciares. La mayor parte de dichos proyectos han estado ubicados en la Zona Austral. La Tabla 3.1 resume los proyectos tipo FONDECYT regular relacionados con glaciología que han sido aprobados a la fecha.

3.1.5. Programas de estudio

Pregrado

En Chile no existen programas de pre grado en Glaciología. No existe el título profesional de Glaciólogo, ni se cursan licenciaturas en estas materias. Sólo existe un curso de glaciología que se dicta en la carrera de Licenciatura en Geografía (por Dr. Andrés Rivera) de la Universidad de Chile. Hasta la década de 1980, se dictó un curso en la escuela de Geología de la misma universidad (por Dr. Cedomir Marangunic). No obstante lo anterior, existen módulos de glaciología que se tratan en numerosas carreras ligadas con hidrología, ciencias de la tierra, ecología y meteorología, los que se dictan en varias universidades del Consejo de Rectores.

Al año se produce un número muy limitado de memorias de título que tiene relación con las nieves y hielos de Chile, destacándose los trabajos de titulación de la escuela de Geografía de la Universidad de Chile (en promedio más de una memoria anual en temas relacionados con glaciares en la década del 2000). Además, existen algunas memorias que tocan tangencialmente el tema de glaciares, en Geología, Derecho, Ecología, Meteorología y Recursos Naturales. También hay algunas memorias de título en el ámbito tecnológico, que están relacionadas con glaciares (sobre radares en la UMAG).

Postgrado

En Chile no hay programas de magíster ni doctorado en temas relacionados con Glaciología. Hay programas donde se han cursado algunos ramos y donde se han escrito tesis de grado en relación con glaciares, pero son trabajos esporádicos. Destacan los trabajos en el Magíster de Geografía de la Universidad de Chile, en el Magíster en Geofísica de la Universidad de Chile y Ecología de la misma Universidad.

El problema principal para la existencia de un programa en estas materias, es la falta de profesionales activos, con doctorados relacionados con glaciología trabajando en Chile. En estos momentos, hay 7 chilenos con doctorados en materias relacionadas con glaciología; tres en el CECS (Gino Casassa, Andrés Rivera, Paulina López), uno en la empresa privada (Cedomir Marangunic), uno en el INACH (Ricardo Jaña), uno en la UMAG (Carlos Cárdenas, que más bien es ingeniero electrónico, pero cuya tesis se relacionó con glaciares al diseñar radares

para su medición) y uno en el CEQUA (Juan Carlos Aravena, que es más bien dendrocronólogo, pero que su tesis se relacionó con glaciares).

No obstante lo anterior, hay un número mayor de profesionales que trabajan en temas relacionados con glaciología en Chile, destacándose un importante número en la DGA del MOP, en varias consultoras privadas, y en los centros de investigación a lo largo del país. También hay un número creciente de extranjeros con doctorados en materias relacionadas con glaciología que trabajan permanentemente en Chile (1 en el CECS y 2 en el CEAZA).

3.2. Marco normativo y estratégico actual

3.2.1. Los glaciares en la legislación actual

Chile no cuenta con lo que se podría denominar una ley o estatuto jurídico propio sobre glaciares. Ni siquiera existe una definición básica legal sobre lo que se debe entender por “glaciar”, ni hay un tratamiento jurídico particular sobre las zonas o áreas que comprende o que se relacionan con estos territorios o ecosistemas. Se ha podido constatar que no existe ninguna norma de protección de glaciares y tampoco ningún estudio, monografía o publicación que efectúe un tratamiento jurídico o regulatorio del tema.

Lo anterior ha sido medianamente solventado por la reciente Política Nacional de Glaciares, sin embargo esta no tiene fuerza obligatoria (fuerza de ley), por lo que no puede obligar acciones ni emitir sanciones.

De este modo, la legislación actual no protege a los glaciares como un componente particular del medio ambiente, resaltando su particular fragilidad, importancia hidrológica, científica, recreativa ni su rol clave en los ecosistemas en que se presentan. Sólo, gracias a modificaciones decretadas a finales del año 2008, garantiza su identificación a través de un Inventario de Glaciares y exige que actividades que alteren a los glaciares inventariados, se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Al no tener los glaciares un marco jurídico ni definición en la ley, su preservación, protección y cuidado depende de la Constitución Política, la que se preocupa especialmente de la preservación de la naturaleza, y que garantiza, en su N° 8 del artículo 19°, el derecho de todas las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, a la vez que impone al Estado el deber de velar porque este derecho no sea afectado y de tutelar por la preservación de la naturaleza. Asimismo, faculta al legislador para establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente. Esta facultad es extendida en el inciso segundo del N° 24 del mismo artículo, autorizando expresamente a la ley para establecer las limitaciones y obligaciones al derecho de propiedad, que deriven de su función social, precisando que dicha función comprende, entre otros factores, las exigencias de la conservación del patrimonio ambiental.

Por otro lado, tampoco es posible abordar el tema de los glaciares a través del Código de Aguas, pues en su forma actual, no es suficientemente explícito acerca del manto nivoso y los glaciares, por lo que no otorga atribuciones para fiscalizar eventuales intervenciones en ellos o en sus alrededores.

En la ley, tampoco se establece la propiedad de los glaciares. Se determina que la lluvia y la nieve caídas no tienen dueño, pero que una vez incorporadas a caudales, y constituirse en una reserva hídrica, pertenecen al Estado, al igual que ríos, lagos y el suelo bajo ellos. Quedando los glaciares en una situación indefinida, en que por no ser considerados, no se determina su trato ni como nieve caída ni como reserva hídrica (Marangunic, 2007).

Los glaciares comenzaron a ser considerados en la legislación chilena en enero del año 2006, cuando el consejo directivo de CONAMA aprueba la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC). En ella no se mencionan explícitamente los glaciares, pero se sientan las bases para un trabajo que sin duda incorporará esta componente del ecosistema, como se verá más adelante en este documento.

La primera iniciativa exitosa atendiendo explícitamente el tema glaciar, es el Decreto MOP N°365, publicado en el Diario Oficial el día 11 de Octubre de 2008, con el título “Modifica decreto número 1.220, de 1997, aprobatorio del Reglamento de Catastro Público de Aguas”. En él se modifica el reglamento mencionado, estableciéndose como parte del Catastro Público de Aguas el Inventario Público de Glaciares independiente y adicional al previo Inventario público de cuencas hidrográficas y lagos. En este Decreto se establece la forma y procedimientos aplicables a este inventario, en orden de incorporar nuevos glaciares, mantenerlo actualizado y disponible al público.

De particular relevancia es el punto número 6 de su artículo primero, el que señala:

6.- Agréguese los artículos 29 bis, 29 bis 1 y 29 bis 2:

Artículo 29 bis.- En el Inventario Público de Glaciares se incluirá la información relativa a los glaciares del territorio nacional. La información que deberá contener será la que se determine por Resolución del Director General de Aguas.

Artículo 29 bis 1.- Los interesados en incorporar nuevos glaciares al inventario podrán presentar, hasta el último día del mes de junio de cada año, la correspondiente solicitud a la Dirección General de Aguas, que deberá contener, a lo menos, lo siguiente:

a) Individualización del solicitante: Nombre, domicilio, Rol Único Tributario, y otros datos que permitan su identificación.

b) Descripción del glaciar: Denominación o nombre del glaciar, si lo tuviere; referencias a lugares geográficos, localidades u otras

singularidades de fácil identificación; tipo de glaciar (glaciar blanco, cubierto o de roca); superficie estimada (há o km²).

c) Ubicación: Región, provincia, comuna y cuenca hidrográfica; coordenadas y elevación (msnm), que permitan la identificación cierta del glaciar.

El artículo 29 bis 2, detalla los plazos con que contará la DGA y el solicitante para completar el proceso de incorporación de nuevos glaciares al inventario nacional. Señala que es responsabilidad de la DGA desarrollar las labores técnicas pertinentes para determinar si las solicitudes hacen referencia a cuerpos que efectivamente correspondan a un glaciar. Indica además el deber de la DGA de mantener el inventario actualizado y publicar anualmente los cambios que en él se realicen.

Finalmente, este primer artículo señala que el Inventario Público de Glaciares estará a cargo de un profesional de la División de Hidrología, quien se denominará Archivero de Glaciares.

El artículo segundo establece un plazo de un año para fijar el texto final del Reglamento del Catastro Público de Aguas considerando los cambios establecidos.

Considerando este decreto y respondiendo a sus requerimientos, el 22 de Junio de 2009, el Director General de Aguas emitió la resolución "Establece información relativa al Inventario Público de Glaciares de la DGA", la que fue publicada en el Diario Oficial el día 17 de Julio de 2009, estableciendo las características técnicas de la información que contendrá el Inventario relativa a cada glaciar que se incluya en él. Esta información se discute en detalle en el numeral 6.1.1.

El Inventario Público de Glaciares juega un rol fundamental para iniciar un trabajo a nivel nacional en el tema glaciar, ya que sienta las bases necesarias para iniciar cualquier conversación al respecto, dando respaldo a asuntos tales como la cantidad, localización e individualización de los glaciares de Chile. Además es la primera iniciativa con efectos en la ley que incorpora el concepto de glaciar, reconociendo de manera implícita la importancia de éstos para el país y el interés del gobierno en su estudio.

La última iniciativa legislativa relativa a glaciares, también exitosa, fue publicada en el Diario Oficial el día 29 de Noviembre de 2008, con el título "Modifica el artículo 2° del decreto N° 95 d e 2001, que aprueba el texto refundido, coordinado y sistematizado del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental", el que apoyándose en el Inventario Público de Glaciares recién creado, hace modificaciones al SEIA de modo que las actividades que pudieran afectar glaciares inventariados, se sometan a los procedimientos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, señalando explícitamente respecto de dicho artículo que (se intercalan notas en cursivas para contextualizar cada una de las modificaciones):

1.- Sustitúyase el actual inciso segundo de la letra a), de su artículo 3, por el siguiente:

"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 el Inventario Público a cargo de la Dirección General de Aguas. Se entenderá que estos proyectos o actividades son significativos cuando se trate de:"

El Artículo 3 detalla los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental y que deben someterse al SEIA.

Su letra a) habla de lo que se entenderá por actividades significativas para el caso de acueductos, embalses o tranques y sifones, presas, drenaje, desecación y dragado, defensa o alteración significativos de cuerpos o cursos naturales de aguas. Por lo que esta modificación incluye a las actividades que afecten glaciares como significativas para los efectos del SEIA.

2.- Agréguese una nueva letra a.5) en el artículo 3 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, en los términos siguientes:

"a.5. La ejecución de obras o actividades que impliquen alteración de las características del glaciar."

3.- Incorpórese una nueva letra q) en el artículo 6 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental, del siguiente tenor:

"q) La superficie o volumen de un glaciar susceptible de modificarse".

El Artículo 6 expone los elementos que se considerarán a la hora de determinar si un 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, con propósito de determinar si el titular deberá o no presentar un estudio de impacto ambiental. De este modo se incorpora la consideración de los glaciares susceptibles de modificarse.

Finalmente, un trabajo conjunto del Consejo Directivo de la CONAMA y del mundo académico y de investigación nacional, entregó en Diciembre 2008 el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático, diseñado para responder a los ejes y objetivos de la Estrategia Nacional de Cambio Climático de 2006.

Este plan de acción abarca el cambio climático de manera integral incluyendo múltiples líneas de acción las que incluyen variadas vías de

adaptación a los impactos del cambio climático, incluyendo en particular a los posibles cambios en los recursos hídricos. En este caso, las líneas de acción incluyen entre otras cosas la evaluación de los efectos del cambio climático en las distintas fases del ciclo hidrológico y pronosticar las tendencias hidrológicas, todo lo cual implica la necesidad de un mayor conocimiento de los glaciares. Esta necesidad se materializa de manera más concreta en la línea prioritaria de acción titulada “Elaboración de un Registro Nacional de Glaciares” en la que estarían involucrados la DGA, CONAMA y el Ministerio de Defensa y sería ejecutada entre los años 2008 y 2010.

Este registro contempla en su primer punto el Inventario Nacional de Glaciares ya mencionado:

1. Construir un Inventario Nacional de Glaciares: A cargo de la DGA y congruente con el Decreto N°365 de Octubre de 2008 que modifica el reglamento del Catastro Público de Aguas.

A lo que se suman las siguientes acciones:

2. Instalar Redes de Monitoreo de Glaciares: A cargo de la DGA.

3. Elaborar la Estrategia para la Gestión y Manejo de Glaciares, considerando escenarios probables de cambio climático: A cargo de CONAMA.

4. Identificar las acciones o medidas para minimizar o mitigar los efectos derivados de cambios en glaciares, en la administración y gestión del recurso hídrico: A cargo de la DGA.

5. Identificar situaciones o áreas de riesgo derivadas de modificaciones en glaciares, que puedan afectar zonas urbanas y desarrollos industriales o mineros: A cargo de la DGA.

6. Determinar la estructura interna de grandes masas de hielo y el volumen de agua congelada existente, a objeto de modelar y proyectar a futuro el retroceso de los glaciares: A cargo de la DGA y del Ministerio de Defensa.

3.2.2. Política Nacional de Glaciares

El 9 de Abril del año 2009, el Consejo de Ministros de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), aprobó la “Política para la Protección y Conservación de Glaciares”, la que establece la posición del gobierno frente a los glaciares, abarcando temas como su definición, conservación y manejo.

Con el objetivo general de conservar y preservar los glaciares de Chile, define principios y lineamientos en función de lograr los objetivos específicos de:

1. Conocer y valorar los glaciares chilenos en un contexto y realidad nacional e internacional, mediante la creación de un registro nacional de glaciares y otras prioridades de investigación por definir.
2. Establecer medidas de preservación y conservación de los glaciares chilenos, que aseguren la continuidad de los procesos naturales y productivos que estos sustentan y la generación de servicios ambientales.
3. Establecer tipologías de los glaciares y condiciones de usos permitidos.
4. Diseñar instrumentos y mecanismos institucionales para la implementación de la Política Nacional de Glaciares, y asegurar y fortalecer la permanencia de los objetivos a través del tiempo.

Menciona y contextualiza dentro de dicha política el rol de planes de acción en curso, como la ya mencionada inclusión de los glaciares al Sistema de Evaluaciones de Impacto Ambiental (SEIA) y la elaboración del Inventario Público de Glaciares por parte de la DGA. Pone énfasis en la necesidad de establecer con exactitud qué glaciares se encuentran en áreas protegidas y cuáles no, así como clarificar las características de las diferentes figuras de protección y sus modalidades de funcionamiento.

Además se vincula en sinergia con la Estrategia Nacional de Biodiversidad, fortaleciendo el compromiso de la CONAMA y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) para materializar fondos de investigación en materias ambientales ayudando a determinar las implicancias de los glaciares en su rol ecosistémico.

Se vincula de igual forma con la Estrategia Nacional de Cambio Climático, para la modelación de escenarios climáticos, establecer la vulnerabilidad y resiliencia de los ecosistemas y su impacto en los diferentes sectores sociales.

Se reconoce también la resiliencia de los ecosistemas glaciares como la capacidad de tolerar intervenciones, y si bien establece que dichas intervenciones deben ser reguladas y sometidas al SEIA, agrega que serían posibles si los intereses superiores de la nación así lo exigen.

Señala además que CONAMA y la DGA, haciendo uso de sus atribuciones velarán por el cumplimiento de esta política en los Organismos de Cuenca, creados en el marco de la Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas.

Finalmente se establece el marco para la realización de mecanismos de implementación de la política, definiendo los lineamientos estratégicos que deben cumplir, su forma y su mecanismo de evaluación.

Si bien esta política no presenta ninguna acción concreta, constituye los cimientos para construir mecanismos, normas y acciones que conduzcan a una correcta valoración, protección y manejo de los glaciares de Chile. Establece además por primera vez la postura del gobierno frente a estas

valiosas masas de hielo y las define de manera amplia y precisa, señalando que se entiende por glaciares “toda masa de hielo perenne, formada por acumulación de nieve, cualquiera que sean sus dimensiones y sus formas”.

3.3. Propuestas legislativas

La primera iniciativa legal que menciona tangencialmente los glaciares y que propone instrumentos para su protección fue el proyecto de ley “Crea zonas libres de contaminación” (Boletín N° 37 14-12), del parlamentario Leopoldo Sánchez Grunert, el que fue ingresado a trámite el 4 de Noviembre de 2004, y se encuentra aún en primer trámite constitucional, sub etapa “Primer informe de Comisión de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente”.

En Agosto de 2005, ingresó a la Comisión de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente de la Cámara de Diputados del Congreso Nacional el proyecto de ley “Establece la prohibición de ejecutar proyectos de inversión en glaciares”, patrocinado por los diputados Roberto Delmastro, Arturo Longton, Leopoldo Sánchez y Antonio Leal (Boletín 3947-12). El proyecto se aprobó en general en primer trámite constitucional en la Comisión antes referida, el mismo mes. Pero el 8 de Junio de 2006, se solicita su archivo y es retirado. El proyecto, de aprobarse como había sido propuesto, habría impedido cualquiera alteración antrópica de los glaciares de Chile.

La relevancia del tema, motiva el proyecto de ley “Valoración y protección de los Glaciares”, presentado por los senadores Antonio Horvath, Carlos Bianchi, Guido Girardi, Carlos Kuschel y Alejandro Navarro, el que tras argumentar y exponer la importancia de los glaciares, a la luz de los más recientes estudios nacionales e internacionales, propone cambios a la Ley de Bases del Medio Ambiente y al Código de Aguas (al igual que en el proyecto del año 2005). Esta moción pretende de esta manera, definir los glaciares legalmente, normar las actividades sobre ellos y establecer sanciones a quienes actúen en perjuicio de su conservación. Además, establece con claridad la propiedad de los glaciares y del suelo bajo ellos.

Debido a la discusión y alcances que tuvo este proyecto de ley, a continuación se presenta una breve reseña de la evolución de la propuesta de ley en los trámites constitucionales:

- El 16 de Mayo 2006, el proyecto de ley inicia su tramitación en el Senado (Boletín N° 4205-12). Se hace cuenta del proyecto y pasa a la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales.
- El 29 de Noviembre 2006, es aprobado en unanimidad por la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales, quedando así en condiciones de ser votado por el Senado.
- El 4 de Diciembre 2006, es aprobado en general, unánimemente por la comisión de CONAMA.
- El 5 de Diciembre 2006, se presenta el primer informe de la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales.

- El 20 de Diciembre 2006, es aprobado por el Senado en primer trámite, también en unanimidad. Estableciendo el plazo de indicaciones hasta el 15 de Enero 2007.
- El 10 de Enero 2007, se acuerda ampliar el plazo de indicaciones al 15 de Marzo 2007.
- El 14 de Marzo 2007, la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales solicita una extensión del plazo para realizar indicaciones hasta el 2 de Abril, a fin de que el Ejecutivo realice la coordinación de los distintos servicios competentes a su aplicación.
- El 2 de Abril de 2007 se emite el boletín de indicaciones, el que contiene un total de 23 indicaciones.
- El 12 de Abril, la Comisión de Medio Ambiente acordó esperar la propuesta de la ministra del ramo, Ana Lya Uriarte, respecto a la posibilidad de aprobar la iniciativa, en primer trámite; o incluir sus normas en la actual Ley de Bases del Medio Ambiente.
- El 11 de Abril 2008, y producto del vaciamiento repentino del lago Cachet 2, se solicita al Ejecutivo fijar urgencia al proyecto de Ley con el fin de agilizar su tramitación. La solicitud no es acogida.
- El 29 de Abril 2008, la Comisión de Medio Ambiente se reúne a estudiar las modificaciones propuestas.
- El 27 de Mayo 2008, el Ejecutivo congela el proyecto de ley y propone reforzar el rol de la DGA en el tema (fuente: noticias www.senado.cl). Según fuentes de CONAMA, el proyecto no está del todo descartado pero se opta por avanzar en la opción de una Política Nacional de Glaciares.

Actualmente, según el Sistema de Tramitación de Proyectos del Congreso Nacional (SIL), se encuentra en la etapa de “Primer trámite constitucional”, subetapa “Segundo informe Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales”, sin urgencia.

Un nuevo proyecto de ley, denominado “Modifica la ley N° 1 9.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en relación al sistema de evaluación de impacto ambiental” (Boletín N° 5157-1 2), menciona de manera secundaria los problemas ambientales relacionados con glaciares, haciendo mención de la problemática generada por el proyecto minero Pascua Lama. El proyecto hace modificaciones a la ley para extender los alcances de la exigencia de Evaluaciones de Impacto Ambiental. La ley 19.300 en su forma actual entre otras cosas establece el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas y establece normas que velan por el uso racional del suelo a fin de evitar su pérdida y degradación.

Respecto de este proyecto de ley, el 19 de Diciembre de 2007, se presenta el primer informe de la Comisión de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente. Este proyecto de ley se encuentra en primer trámite constitucional, y la cuenta del primer informe se encuentra en tabla.

También el 19 de Diciembre de 2007, entra en tramitación el proyecto de ley titulado “Establece delitos en contra del medio ambiente” (Boletín N° 5654-12), que si bien no define ni indica medidas directas hacia la

protección de glaciares, alude a ellos en la argumentación que motiva el proyecto de ley.

Un nuevo proyecto, y el tercero atendiendo de manera directa la problemática glaciar, es presentado a tramitación en el Senado el 18 de Diciembre de 2008, en forma de proyecto de ley con el título "Establece normas en resguardo de los glaciares" (Boletín N° 6 308-12). Éste además de dar una definición legal simple y amplia de glaciar, limita, norma y establece sanciones a las actividades realizadas sobre los glaciares. El 23 de Diciembre de 2008, el proyecto pasa a la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales, quedando en tabla al finalizar la sesión del Senado de aquel día. Actualmente, según el Sistema de Tramitación de Proyectos del Congreso Nacional (SIL), se encuentra en la etapa de "Primer trámite constitucional", sub etapas "Primer informe de Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales".

El año 2004, un conjunto de organizaciones ecologistas, académicas y asociaciones de agricultores iniciaron conversaciones para avanzar hacia una normativa de protección de los glaciares en Chile, la que se incluyó en los "10 Compromisos para la Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo Nacional", suscrito por la entonces candidata a la presidencia Michelle Bachelet.

Un grupo de trabajo funcionó durante el año 2006, generando un "Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares", entregando en Octubre a la Secretaría General de la Presidencia, para que se patrocinara su envío al Congreso Nacional. Este proyecto de ley así como su gestación es extensamente tratado por Bórquez *et al.*, (2006). Al momento de realizarse esta revisión el proyecto no ha iniciado aún su tramitación en el Congreso Nacional.

4. ESTADO ACTUAL DE LA GLACIOLOGÍA EN CHILE

4.1. Zonas glaciológicas de Chile

La enorme diversidad climática y geográfica de Chile, ha generado también una gran diversidad glaciológica, lo que hace necesario evaluar la problemática de manera zonificada, dado que a lo largo del país se presentan escenarios, dificultades y condiciones diversas, en muchas ocasiones específicas de una zona geográfica particular. De este modo las soluciones y acciones deben realizarse de manera sectorizada, tomando en cuenta la diversidad con el fin de lograr una mayor eficiencia y eficacia de las acciones a realizar.

De este modo es imprescindible definir zonas de problemáticas afines a lo largo del país, lo que se realiza a continuación considerando las características climáticas, geomorfológicas y glaciológicas de Chile continental.

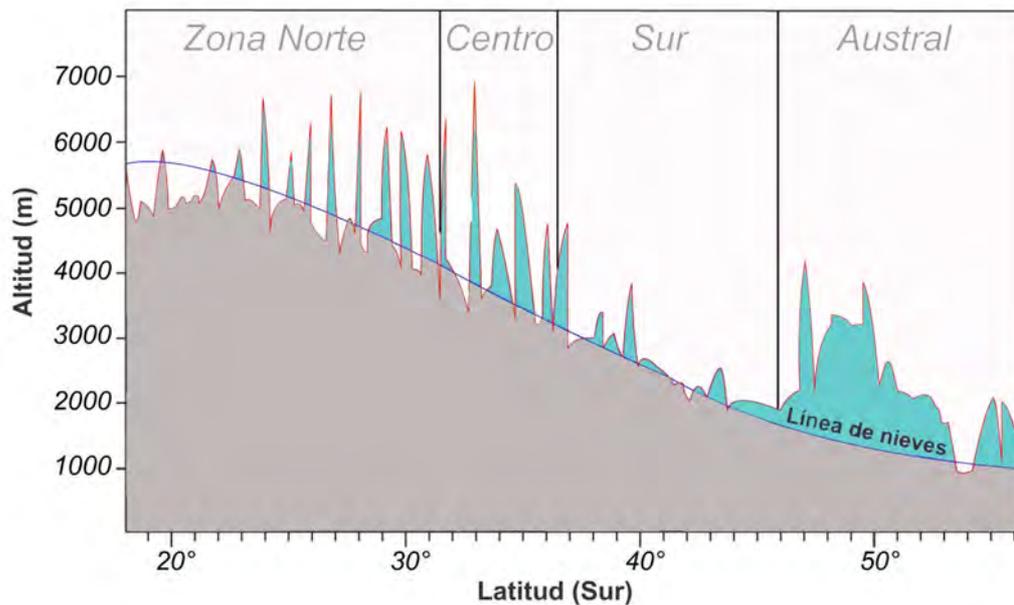


Figura 4.1: Perfil altitudinal de la Cordillera de los Andes a lo largo de Chile. Se muestra en azul el perfil aproximado de la línea de nieves y los límites aproximados de la zonificación propuesta para el país (adaptado de Broecker & Denton, 1990).

Se ha dividido el país en cuatro zonas, respetando el marco geográfico delineado por las cuencas hidrográficas del país, las que son la unidad física por excelencia que vincula territorios, ecosistemas y poblaciones de características comunes. En este marco, las cuatro zonas representan regiones geográficas con similitudes naturales, problemas glaciológicos comunes y características glaciares relativamente homogéneas. Estas zonas, conservan los delineamientos generales postulados en la literatura reciente (Rivera *et al.*, 2008; USGS, 1998; Masiokas *et al.*, 2009). Las zonas más extensas han sido a su vez subdivididas en dos o tres subzonas como se señala a continuación. La Figura 4.2 muestra la distribución espacial de estas zonas a lo largo del país, así como las cuencas limítrofes más relevantes.

La necesidad de esta zonificación quedará clara al revisar su diversidad climática y geográfica. La Figura 4.1 ayuda a entender el origen de algunas de las diferencias que motivan la zonificación. En ella se muestra el perfil altitudinal de la Cordillera de los Andes a lo largo de las cuatro zonas glaciológicas. Se puede apreciar como la Zona Norte, sumamente árida, se caracteriza por numerosas cumbres que sobrepasan la línea de las nieves, dando lugar a pequeños glaciares a gran altitud, en la Zona Centro siguen las grandes cumbres pero los valles están más cerca de la línea de nieves, dando lugar a glaciares mayores que se extienden desde las cumbres a los valles. Luego en la Zona Sur, la cordillera de los andes baja, y los glaciares se reducen a algunos conos volcánicos aislados. Finalmente en la Zona Austral, el alzamiento de la cordillera sumado a la menor altitud de la línea de nieves y a las abundantes precipitaciones, dan lugar a los enormes glaciares y campos de hielo que la caracterizan.

Estas zonas glaciológicas se justifican también desde el punto de vista climático (Figura 4.3), dado que representan los principales regímenes que existen en el país y que generan las condiciones glaciológicas diferenciadas de Chile. Desde esta perspectiva climática, la Zona glaciológica Norte (18-32°S) se caracteriza por un clima árido y semiárido, con precipitaciones de verano en la zona altiplánica del extremo norte donde se generan algunos glaciares sobre conos volcánicos de gran altura, para luego dar paso a la Diagonal árida de los Andes con ausencia casi absoluta de precipitaciones y de glaciares incluso a gran altura. En la parte sur de esta zona, existe un régimen semiárido con escasas precipitaciones de origen invernal que van incrementándose en dirección al sur, permitiendo un mayor número de glaciares descubiertos y un importante número de glaciares rocosos. La Zona glaciológica Centro (32-36°S), se caracteriza desde el punto de vista climático, por un régimen mediterráneo, con precipitaciones moderadas que se concentran en invierno, con veranos secos y cálidos. Estas condiciones junto con una mayor altura de la Cordillera, permiten la existencia de un gran número de glaciares. La Zona glaciológica Sur (36-46°S) se caracteriza por un aumento significativo de las precipitaciones totales y por una progresiva extensión del período de ellas, llegando en la parte sur de esta zona, a cubrir prácticamente todo el año. Los veranos son secos y cálidos en la parte norte, reduciéndose el período seco en extensión y temperatura en dirección al sur. Estas condiciones junto la menor altura y macidez de la Cordillera Andina, explican la menor presencia relativa de glaciares, los que se ubican sobre conos o edificios volcánicos que logran tener una altura superior a la línea de nieve regional. Finalmente la Zona glaciológica Austral (46-56°S) se caracteriza desde el punto de vista climático, por una mayor precipitación anual que no tiene una marcada estacionalidad (ocurren durante todo el año), pero que presentan una importante proporción de precipitación nivosa invernal que no sólo afecta las altas cumbres, sino que puede llegar al nivel del mar en la zona más austral. Este régimen de precipitaciones muestra un fuerte contraste oeste-este, caracterizado por un régimen húmedo-frío semipermanente en el oeste, versus uno estepárico frío en el margen oriental de la Cordillera andina. Desde el punto de vista térmico las temperaturas son bajas todo el año, con

valores sub-cero en invierno, incluso cerca del nivel del mar. Los veranos son ventosos, con temperaturas moderadas y ocasionalmente templadas. Estas condiciones climáticas, junto a la presencia de una Cordillera andina con alturas culminantes sobre los 3000 m s.n.m., permiten la existencia de grandes campos de hielo y numerosos glaciares que pueden llegar hasta el nivel del mar.

A continuación se detallan las características de cada zona glaciológica.

4.1.1. Zona Norte

Esta zona se extiende desde el extremo norte del país hasta la cuenca del Río Ligua.

Administrativamente comprende desde la región de Arica y Parinacota en el extremo norte del país hasta la IV^a región de Coquimbo, albergando según el Instituto Nacional de Estadísticas un total de 1.973.432 habitantes para el año 2006. La zona incluye también una fracción de la V^a región de Valparaíso.

Latitudinalmente, esta región incluye en términos generales, el territorio nacional comprendido entre los paralelos 18° y 32° de latitud sur.

Está caracterizada por climas áridos y un escaso número de glaciares, todos ellos asociados a centros montañosos de gran altitud, donde temperaturas extremadamente bajas permiten la existencia de cuerpos de hielo perennes a pesar de las escasas precipitaciones, concentradas principalmente durante la época estival.

Morfológicamente se distingue la Cordillera de la Costa elevada y abrupta, en cuya vertiente oriental se encuentra el farellón costero, mientras que la vertiente oriental limita con el desierto interior. En la Subzona Norte A, el desierto se presenta como una extensión de planos inclinados asociados a procesos de depositación de la Cordillera de Los Andes en épocas de clima más húmedo. En la alta cordillera se distingue una alineación de edificios volcánicos, los cuales en su mayoría llegan a una altitud de 5.500 a 6.500 m. Estructuralmente la mayoría corresponden a estrato volcanes compuestos. También se distinguen en menor número calderas volcánicas asociadas a flujos de piroclastos riolíticos (González-Ferrán, 1995). Aún se aprecia en la Cordillera vestigios de actividad glacial y un importante volcanismo actual representado por el volcán Lascar (5.154 m de altitud).

Las Subzonas Norte B y Norte C corresponden al denominado Norte Chico, donde la unidad central corresponde a un paisaje dominado por una serie de cordones transversales donde existen importantes cuencas. La Cordillera de la Costa se encuentra más disectada debido a la presencia de estos valles transversales; corresponde además a una zona donde no existe volcanismo debido a una discontinuidad tectónica volcánica a partir de los 27° S. En la Cordillera de Los Andes existen importantes alturas como el cerro Las Tórtolas que sobrepasa los 6.000 m de altitud.

Esta zona comprende 307.286 km², los que constituyen el 40,7 % de la superficie nacional, sin embargo alberga tan sólo un 0,57 % (120,42 km²) de los glaciares de Chile continental. A pesar de la escasa superficie glaciaria, la relevancia de esta zona desde el punto de vista glaciológico surge de la extrema aridez general sumada a una población y actividad minero-industrial extremadamente demandante de recursos hídricos. En consecuencia, estos glaciares son particularmente importantes por su contribución a los caudales de escorrentía (aún poco estudiada), su valor paisajístico al encontrarse en zonas desérticas, por los riesgos potenciales y los conflictos ambientales que están apareciendo debido a exploraciones y explotaciones mineras que los afectan.

La gran mayoría de los glaciares de la zona son pequeños, con áreas inferiores a 1 km² y con muy pocos glaciares en el rango de tamaños entre 1 y 10 km² (Rivera *et al.*, 2002), siendo el glaciar Del Potro, de 4,88 km², el mayor de ellos (Vivero, 2008). Muchos de estos glaciares son rocosos.

Debido al tamaño y diversidad climática, geomorfológica y glaciológica de la zona, será subdividida en tres subzonas:

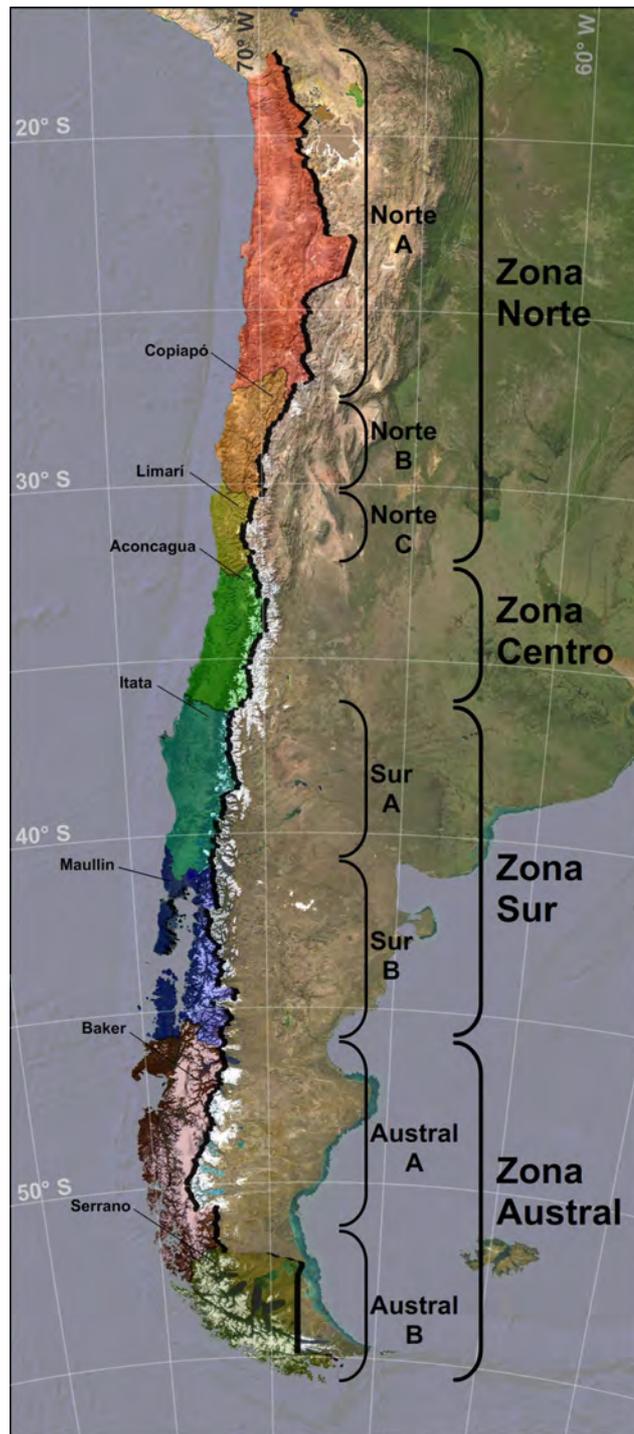


Figura 4.2: Zonas y subzonas glaciológicas definidas para la Estrategia Nacional de Glaciares.



Figura 4.3: Zonas climáticas de Chile, indicando montos anuales de precipitación (mapa adaptado de A. Brodbeck, Instituto de Geografía, University of Berne, 2001).

Norte A

Esta subzona se extiende desde el extremo norte del país hasta las cuencas cerradas de la Región de Atacama (todo el territorio al Norte de la cuenca del Río Copiapó, sin incluirla), alcanzando así hasta el paralelo 27° sur. Corresponde a la región más seca, atravesada por la llamada Diagonal árida de Sudamérica.

Administrativamente incluye desde la región de Arica y Parinacota en el extremo norte del país hasta la IIª región de Antofagasta y parte de la IIIª región de Atacama. Tiene una superficie total de 220.091 km² (29,1 % del país).

La subzona se caracteriza por un marcado gradiente altitudinal de costa a cordillera, por lo que su distribución climática condicionada por dicho patrón se conforma por bandas alargadas paralelas a la costa. De este modo, en el litoral se encuentra un clima desértico con nublados abundantes caracterizado por la Camanchaca, que se presenta en forma de niebla en horas de la noche y al amanecer. Este clima es remplazado hacia el este por uno de tipo desértico normal y desértico marginal de

altura, este último por sobre los 2.000 m de altitud. Las zonas altas de la cordillera, donde se encuentra buena parte de los glaciares de la zona, se caracterizan por un clima de estepa de altura.

Las precipitaciones son en general escasas y con su máximo en el extremo norte, donde alcanzan los 400 mm anuales, para luego descender hacia el sur, alcanzando al interior de Antofagasta valores por debajo de lo encontrado en Socompa, donde se registran tan solo 40 mm anuales. Más al sur vuelven a aumentar, dando lugar a los característicos “nevados”, nombre con que se conoce a las más altas cumbres de la zona.

En esta subzona, también llamada “de los Andes Secos” por el USGS (1998), las precipitaciones son predominantemente estivales, producto del llamado “invierno boliviano”, y son de origen convectivo, producidas por el ascenso de masas de aire cargadas de humedad provenientes de la cuenca del Amazonas y el Océano Atlántico. En esta subzona se inicia la transición a las precipitaciones de origen frontal, ya más comunes en su extremo sur, y dándose casi exclusivamente en los meses de invierno.

En esta subzona se encuentran muy pocos glaciares y su distribución es dispersa. Los que se han inventariado (Garín, 1987) conforman una superficie total de 66,96 km² (0,32 % del país), estando la mayor parte de ellos asociados a grandes montañas como lo son los Volcanes Pomerape, Parinacota, Guallatire, San Pablo, o los cerros Acotango, y Colorados, todos ellos por sobre los 6.000 metros de altitud.

La mayor parte de estos glaciares aportan sus aguas a cuencas endorreicas con excepción de aquellos entre Calama y Ollagüe que contribuyen a la cuenca del Río Loa.

Norte B

Constituida principalmente por las cuencas de los ríos Copiapó (límite norte), Huasco y Elqui (límite sur), se entiende aproximadamente entre los paralelos 27° y 30° sur, abarcando una superficie de 57.423 km² (7,6 % del país). Administrativamente está dividida entre la III^a región de Atacama y la IV^a región de Coquimbo.

Esta subzona conserva las características desérticas de la anterior, con nublados más abundantes en la costa, y al interior caracterizada por un clima desértico marginal de altura, con una amplitud térmica diaria y anual de magnitudes similares en torno a los 13 °C. Las precipitaciones convectivas son escasas, siendo las precipitaciones frontales la principal fuente de agua, la que llega principalmente durante los meses de invierno (70%). La cobertura nival comienza a tener mayor importancia en esta zona, repercutiendo notoriamente en los caudales de los ríos y sus crecidas a comienzos de verano.

Esta subzona, por sus características climáticas y geográficas alberga la mayor parte de los glaciares descubiertos de la Zona Norte, los que suman un total de 46,91 km² (0,25 % del país), considerando los inventarios de la cuenca del Río Copiapó (Vivero, 2008) y del Río

Huasco (Nicholson *et al.*, 2009), además del inventario de Garín (1987) para los glaciares en Cordillera Doña Ana y Cerro Tapado en la cuenca del Río Elqui.

En cuanto a los glaciares rocosos sólo se han inventariado los denominados glaciares rocosos activos de la cuenca del Río Huasco (Nicholson *et al.*, 2009) encontrándose que éstos tienen una superficie total de 6,3 km².

Sin embargo, el estudio DGA, 2008c realizado por Geoestudios, identificó numerosos glaciares de roca no inventariados en la zona, mostrando que existe un sesgo en la representatividad de estos cuerpos en los inventarios debido a la mayor dificultad de su detección con métodos tradicionales.

Norte C

Constituida principalmente por las cuencas de los ríos Limarí (límite norte), Choapa, Petorca y La Ligua (límite sur), quedando comprendida aproximadamente entre los paralelos 30° y 32° sur. Abarca una superficie total de 29.772 km² (3,9 % del país), y administrativamente se localiza principalmente en la IV^a región de Coquimbo (Limarí y Choapa), y en menor proporción en la V^a región de Valparaíso (Petorca y Ligua).

La costa presenta un clima de estepa con nubosidad abundante, mientras que al interior, donde se encuentran los glaciares, el clima es de estepa con gran sequedad atmosférica, caracterizado por una escasa influencia oceánica, cielos despejados, baja humedad relativa y amplias oscilaciones térmicas, con amplitudes de hasta 20°C. Las precipitaciones son sin embargo suficientes para eliminar los rasgos desérticos, y son de carácter frontal dándose principalmente en invierno, donde se registra más del 75% de los totales anuales.

Los glaciares de la Zona Norte han sido inventariados sólo por Garín (1987), el que no se encuentra apropiadamente actualizado, puesto que utiliza datos de hasta 55 años de antigüedad. En dicho inventario se registra tan sólo un glaciar para esta subzona, en el Cerro Volcán (RC1M94), en la cuenca alta del Río Limarí, con una superficie de 0,1 km². Esta aparente carencia de glaciares no es tal, y tan sólo hace evidente el fenómeno ya señalado para la Zona Norte B, donde la dificultad de detección de los glaciares de roca lleva a un importante sesgo en los inventarios, pues los métodos tradicionales son incapaces de delimitarlos o tan solo detectarlos.

Si bien no hay inventarios que comprueben esta supuesta existencia de glaciares de roca, el estudio DGA, 2008c realizado por Geoestudios identificó cientos de ellos. Además, existen otros estudios puntuales como el realizado por Ferrando (2003) que muestran la existencia de glaciares rocosos en la cuenca del Río Limarí y sus características, los cuales no aparecen en ninguno de los inventarios disponibles actualmente.

4.1.2. Zona Centro

Constituida por las cuencas de los ríos Aconcagua (límite norte), Maipo, Rapel, Mataquito y Maule (límite sur). Queda comprendida de manera general entre los paralelos 32° y 36° sur y cuenta con una superficie de 75.252 km² (10,0 % del país), la que corresponde administrativamente a las regiones V^a (Aconcagua), Metropolitana (Maipo), VI^a (Rapel) y VII^a (Mataquito y Maule).

Corresponde a la región de clima mediterráneo de nuestro país, presentando en la costa un clima templado cálido con lluvias invernales y una estación seca prolongada de 7 a 8 meses. Hacia la cordillera, el clima varía a templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses.

Este clima dominante en la cordillera, se caracteriza por una estación lluviosa extendida, bajas temperaturas y frecuentes heladas, con precipitaciones muchas veces por encima de 1.000 mm anuales y llegando hasta 2.500 mm en la alta cordillera del extremo sur de la zona.

Este régimen de precipitaciones sumado a la topografía cordillerana, producen en invierno una abundante cubierta de nieve y dado que la isoterma asciende considerablemente durante la breve estación seca (4 a 5 meses con precipitaciones inferiores a 40 mm en algunas áreas), en verano se registra un considerable aumento de los caudales producto del deshielo.

La variabilidad climática interanual de esta zona, está fuertemente correlacionada con la señal ENOS (El Niño/Oscilación del Sur), afectando los valores absolutos de precipitación y en particular afectando la precipitación nival en cordillera (Escobar y Aceituno, 1998).

En la zona central se distinguen las cuencas cerradas de origen tectónico con relleno aluvial, volcánico y glacial. Estas corresponden a las cuencas de Santiago y Rancagua. Al sur de la Angostura de Pelequén el Valle Central Longitudinal se va ensanchando en forma de abanico hacia el sur. El relleno del valle también corresponde a aluvial, volcánico y glacial. En la Cordillera de Los Andes vuelve a aparecer el volcanismo. La altitud de la Cordillera de los Andes va disminuyendo gradualmente al sur, teniendo como referencia los 6.570 m de altitud del volcán Tupungato en la Región Metropolitana hasta los 3.830 m de altitud del volcán Descabezado Grande en la Región del Maule.

Esta zona, exhibe la mayor superficie de hielo fuera de Patagonia, con 939,5 km² (4,46 % del país) según los inventarios de las cuencas de los ríos Aconcagua (DGA, 2008a), Maipo (Marangunic, 1979), Cachapoal (Caviedes, 1979), Tinguiririca (Valdivia, 1984), Mataquito (Noveroy, 1987) y Maule (Tapia, 2004), incluyendo numerosos glaciares descubiertos y una importante proporción de glaciares rocosos. Todos los glaciares presentan una amplia gama de tamaño, con predominancia de glaciares pequeños (inferiores a 1 km²) y glaciares medianos (1-10 km²), donde destaca el glaciar Juncal Norte (Bown *et al.*, 2008), y algunos glaciares considerados grandes, ubicados en el rango superior

(sobre 10 km²), donde destacan el Juncal Sur (Rivera *et al.*, 2002) y el Cipreses (Rivera *et al.*, 2006a). En esta zona se lleva a cabo el monitoreo sistemático del Glaciar Echaurren Norte por parte de la DGA (Escobar *et al.*, 1995a & 1995b) y en forma ocasional, el monitoreo de varios otros glaciares por instituciones de investigación nacional y extranjera, destacando los estudios en el Juncal Norte (Pellicciotti *et al.*, 2007 & 2008). La importancia de los glaciares está principalmente relacionada con los recursos hídricos estratégicos que representan para la Cordillera Andina, donde los glaciares pueden llegar a contribuir hasta con un 60-70% del caudal de escorrentía en los meses de verano de años secos (Peña & Nazarala, 1987). También son importantes para la generación de energía (hidroelectricidad), los riesgos potenciales y las actividades turísticas y recreativas que pueden albergar.

Los glaciares rocosos han sido debidamente inventariados sólo en la cuenca del Río Aconcagua (DGA, 2008a), donde dan cuenta de 61,6 km².

4.1.3. Zona Sur

La zona se extiende desde la cuenca del Río Itata a la del Río Aisen, lo que en términos generales corresponde a una banda entre los paralelos 36° y 46° sur, cubriendo una superficie de 172.849 km² (22,9 % del país). Administrativamente considera a las regiones VIII^a, IX^a, XIV^a (de Los Ríos), X^a y parte de la XI^a.

Ésta zona es caracterizada por abundantes precipitaciones y una Cordillera de los Andes considerablemente reducida en altitud, alcanzando cotas altas sólo en aislados centros montañosos, de origen principalmente volcánico y frecuentemente activos (González-Ferrán, 1995).

Si bien su posición más austral y las abundantes precipitaciones son factores favorables para el desarrollo de masas glaciares, la topografía general no se eleva lo suficiente para generar áreas glaciares importantes, las que quedan restringidas principalmente a los conos volcánicos de mayor altitud (Rivera, 1989).

En esta zona las grandes unidades de relieve se encuentran “enmascaradas” por la acción de los glaciares durante el Último Máximo Glacial hace aproximadamente 15.000 años y así también existe una importante influencia del volcanismo cuaternario. La altitud de la Cordillera de los Andes es más baja debido al proceso de hundimiento al que está sometida la región. Las alturas máximas bordean los 3.000 m de altitud. Esto ha significado que las formas altas de relieve se encuentren más deprimidas y su contacto con las formas bajas (planicies litorales y depresión intermedia) no sea abrupto sino transicional.

En el sector meridional de la Subzona Sur A, la morfología predominante se caracteriza por la presencia de conos volcánicos nevados; además se caracteriza por una serie de lagos ubicados en el margen oriental de la Depresión Intermedia. Estos lagos se encuentran represados en su

margen occidental por depósitos de morrenas frontales y laterales. Los glaciares responsables de estos depósitos morrénicos son de tipo piedemonte desarrollados durante la Última Glaciación y que como consecuencia de su acción generaron por sobreexcavamiento una serie de lagos. El sentido de estos lagos corresponde a la dirección de las paleo-líneas de flujos principales de los paleo-sistemas glaciares (principalmente Este – Oeste). Así también, se caracteriza por la presencia de conos volcánicos

En la Subzona Sur B la Depresión Intermedia se encuentra casi totalmente sumergida en el mar (por ejemplo en el Seno de Reloncaví). El valle sólo aparece emergido en algunas zonas de Chiloé oriental. En la Cordillera de los Andes se aprecian los vestigios de una importante actividad volcánica tanto pasada como presente, destacándose los volcanes Osorno, Michinmahuida y Chaitén, entre otros.

La zona cuenta en su conjunto con una superficie glacial aproximada de 554,7 km² (2,63 % del país) dentro de los que se incluye una estimación muy preliminar de superficies no inventariadas al sur del Estuario del Reloncaví.

Sur A

Constituida principalmente por las cuencas de los ríos Itata (límite norte), Bío-Bío, Imperial, Toltén, Valdivia y Bueno (límite sur), se extiende en términos generales entre los paralelos 36° y 41° sur, incluyendo 93.599 km² (12,4 % del país), correspondientes a las regiones VII^a, VIII^a, XI^a, X^a y XIV^a.

El disminuido relieve de Los Andes suprime en esta zona los gradientes climáticos Este-Oeste, predominando un gradiente latitudinal. Se encuentra aquí un clima templado cálido con una estación seca reduciéndose en duración desde 5 meses en el norte, a menos de 4 meses en el centro, para transformarse en un clima templado lluvioso con influencia mediterránea en el extremo sur de la subzona.

Los climas presentes en la zona se caracterizan por precipitaciones abundantes de origen frontal con valores típicamente entre 1.000 y 3.000 mm anuales, presentándose las mayores precipitaciones sobre las zonas cordilleranas.

La distribución de precipitaciones se concentra en invierno, pero se extiende a lo largo de todo el año, en particular en la sección meridional de la subzona.

El registro climático, desde 1933, muestra un leve descenso de las temperaturas superficiales, sin embargo dichos registros han sido obtenidos bajo la cota 200 m s.n.m.

Por el contrario, estudios con sondas meteorológicas, muestran que la isoterma 0°C, se ha elevado significativamente durante las últimas décadas producto de un calentamiento troposférico de entre 0,019 y 0,031 °C (Bown & Rivera, 2007), lo que es concordante con el retroceso

y adelgazamiento observados en los glaciares estudiados, los que se encuentran por lo general sobre los 1.500 m de altitud.

Los glaciares aquí presentes suman un total de 208,85 km² (0,99 % del país), los que son principalmente descubiertos, y el escaso material de recubrimiento suele ser de origen volcánico. Los inventarios que consideran la zona estudian la cuenca del Río Itata (Zenteno, 2008) y las cuencas de los ríos Imperial, Toltén, Valdivia y Bueno (Rivera, 1989).

Los glaciares tienen una amplia gama de tamaños destacando los medianos y algunos grandes como el Pichillancahue-Turbio del Volcán Villarrica (Rivera *et al.*, 2006b). En esta zona existe un programa de monitoreo desde el 2003 en el Glaciar sureste del Volcán Mocho (Bown *et al.*, 2007) encabezado por el CECS. También existen estudios de centros de investigación nacionales y extranjeros en los volcanes Villarrica, Chillán y el Monte Tronador. Los glaciares son importantes en esta zona principalmente por los riesgos potenciales relacionados con la actividad volcánica, pero también por el potencial para generar hidroelectricidad, y las actividades turísticas-recreacionales.

Sur B

Se extiende desde la cuenca “Cuencas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo” (Código 104) hasta la cuenca del Río Aysén. Está compuesta principalmente por las cuencas de los ríos Maullín, Puelo, Yelcho, Palena, Aysén, las que se encuentran comprendidas en términos generales entre los 41° y 46° de latitud sur. La subzona abarca 79.250 km² (10,5 % del país) los que administrativamente corresponden a las regiones X^a de Los Lagos y parte de la XI^a de Aysén.

Zona de cordillera baja y desmembrada, con abundantes fiordos que fraccionan el territorio continental e insular.

El clima sufre un rápido cambio desde templado lluvioso con influencia mediterránea en el extremo norte de la subzona a templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias, el que domina mayoritariamente. Dicho cambio, ocurre como respuesta al irrumpimiento de abundantes golfos, fiordos y canales a partir de Chiloé.

Este clima predominante se caracteriza por intensas precipitaciones, que alcanzan con frecuencia los 4.000 mm anuales y se producen durante todo el año, pero predominantemente durante el invierno, siendo en los meses de Mayo a Agosto (25% del año) donde se concentra un 45% de las precipitaciones. Es también una zona de gran influencia oceánica, lo que produce temperaturas moderadas a lo largo de todo el año, con oscilación reducida y altos valores de humedad atmosférica.

En la región interior se produce una transición a clima de estepa fría, caracterizado por una importante disminución en las precipitaciones (aquí inferiores a 1.000 mm), la humedad y las temperaturas, al tiempo

que se produce un aumento de los vientos y las amplitudes de las oscilaciones térmicas diarias y anuales.

Esta subzona cuenta con aproximadamente 346 km² de glaciares (1,64 % del país) de las cuales sólo una fracción minoritaria se encuentra propiamente inventariada (145,86 km²), dentro de lo que se incluyen las cuencas de los ríos Petrohué, Maullín y Chamiza (Rivera, 1989) y el Volcán Michinmahuida (Masiokas *et al.*, 2009).

Si bien hay estudios en áreas menores o glaciares específicos, no existe un inventario propiamente tal que considere los demás glaciares de la subzona, los que se encuentran distribuidos en los numerosos centros montañosos y volcánicos, entre los que se cuenta por ejemplo los Montes Yanteles, el Cerro Yate, el Nevado Queulat, los volcanes Melimoyu, Macá, Cay y Mentolat entre otros. Para esta subzona, con motivo de poder comparar propiamente tal su importancia relativa respecto de la superficie glaciar del país, se le asignó un área glaciar no inventariada estimada en 200 km².

4.1.4. Zona Austral

En el extremo sur del país, la Zona Austral se extiende desde la Cuenca del Río Baker hasta el cabo de hornos.

Esta zona se caracteriza por un régimen pluviométrico oceánico, con fuertes precipitaciones que llegan a un máximo alrededor de los Campos de Hielos Patagónicos, donde un aumento de la altitud de la cordillera permite la existencia de la mayor superficie de hielo de Sudamérica. Esta zona tiene un gran número de glaciares y centros montañosos englaciados, con tamaños de todos los rangos, controles topográficos muy diversos y en general accesos difíciles y remotos.

En esta zona es donde con más intensidad se desarrolla el hundimiento tectónico, lo cual se evidencia debido a la posibilidad que ha tenido el mar de penetrar hacia el interior a través de fiordos y canales. Por lo tanto la morfología de esta zona corresponde a una intrincada red de fiordos, canales, islas, estrechos y volcanes, principalmente en el lado occidental. Hacia el lado oriental se encuentran importantes lagos (General Carrera y O'Higgins) que se han originado por la impronta glacial desarrollada durante el Último Máximo Glacial en la región y que se encuentran represados en su margen oriental (ya correspondiente a la Republica de Argentina) por potentes cordones morrénicos.

En la Subzona Austral A, la Cordillera de Los Andes se caracteriza por la presencia de los dos Campos de Hielo. En Campo de Hielo Norte (CHN) la altitud máxima promedio oscila entre 2.000 y 3.500 m de altitud, siendo su máxima cumbre el Monte San Valentín con una altitud de 4.020 m. En Campo de Hielo Sur (CHS) las altitudes de las cimas oscilan entre 2.200 y 3.500 m.

En la Subzona Austral B se encuentra la Cordillera Darwin y una serie de centros montañosos en diversas islas y penínsulas (Santa Inés, Gran Campo Nevado, Isla Hoste, entre otros). Las altitudes de esta subzona son notablemente más bajas en promedio respecto a la anterior. También se aprecia una importante impronta en el modelado del territorio debido a la acción glacial en el Último Máximo Glacial, especialmente en la zona del Estrecho de Magallanes, y los Senos de Otway y Skyring.

La zona se extiende en términos generales del paralelo 46° sur hasta el Cabo de Hornos en el paralelo 56° sur. Cubriendo una superficie de 204.004 km² (27,0 % del país) y la que corresponde administrativamente a una parte de la XI^a región de Aysén y a la XII^a región de Magallanes. Esta zona alberga la mayor parte de los glaciares de Chile, Sudamérica y todo el hemisferio sur excluyendo Antártica, los que alcanzan una superficie aproximada de 19.448,9 km² (92,34 % del país), la que incorpora una fracción no inventariada estimada en 1.811 km².

Esta importante participación en área, sumado al hecho de que ésta proviene en su mayoría de algunas decenas de grandes glaciares (y no de numerosos glaciares pequeños), permite afirmar que la participación en volumen al total nacional de glaciares será aún mayor y por lo tanto, cercana al 100%, lo que la transforma en una reserva única de agua, resaltando su importancia hídrica y las repercusiones que tendría su desaparición. De este modo, la importancia de los glaciares de esta zona está relacionada con su contribución al aumento global del nivel del mar, su aporte a los caudales de los ríos, la importancia geopolítica en zonas fronterizas, la generación de energía hidroeléctrica, los riesgos potenciales y las actividades turísticas-recreacionales que allí se realizan.

Austral A

Se extiende desde la cuenca del Río Baker hasta la cuenca “Costeras entre Seno Andrew y Río Holleberg e islas al oriente” (Código 122), incluyendo la subcuenca del Río Serrano.

Se encuentra comprendida aproximadamente entre los paralelos 46° y 52° sur, incluyendo numerosas cuencas hídricas, siendo las principales las de los ríos Baker, Pascua y Serrano. Cubre una superficie de 120.420 km² (15,9 % del país), la que administrativamente corresponde a una parte de la XI^a región de Aysén y a la XII^a región de Magallanes.

Esta subzona alberga los Campos de Hielo Norte y Sur, los que contienen las principales masas de hielo del país, y si bien se han realizado en ellos inventarios, no existe ninguno que abarque todos los glaciares de la subzona, pues se concentran por lo general en los campos de hielo e ignoran los numerosos glaciares dispersos en torno a éstos y en el resto de la subzona.

En las zonas bajas se mantiene la misma distribución y características climáticas de la Subzona Sur B, apareciendo sin embargo un clima de

hielo por efecto de la altura al interior de las grandes superficies heladas de los CHN y CHS por sobre los 800 metros de altitud. Este clima se caracteriza por temperaturas medias anuales ligeramente por debajo de los 0 °C, escasa oscilación térmica y fuertes vientos, los que provienen predominantemente del Oeste y Noroeste. Los datos meteorológicos disponibles para esta zona son insuficientes para una adecuada caracterización climática, sin embargo se presumen precipitaciones extraordinariamente abundantes, las que en algunos casos podrían llegar a los 10.000 mm anuales, sin embargo no existen datos concluyentes ya que no hay registros significativos como para determinar valores medios independientes de efectos topográficos locales.

Estimaciones de la superficie glaciaria en esta subzona indican un valor aproximado de 15.612 km² (74,12 % del país), en base a los inventarios de Campo de Hielo Norte (Rivera *et al.*, 2007), Campo de Hielo Sur (Aniya *et al.*, 1996) y trabajos puntuales en el Volcán Hudson y Cerro Erasmo (Rivera *et al.*, 2006c). A esto se suman estimaciones preliminares para todos los demás glaciares de la subzona, los que incluyen numerosos glaciares satélites de los campos de hielo y otros centros montañosos como lo son el Monte San Lorenzo y otros cordones menores, todos los cuales se estima suman un total aproximado de 1.731 km².

Debido a su tamaño y diversidad, los dos campos de hielo de la Patagonia han concentrado la mayor parte de los estudios de la zona. Sin embargo, en la actualidad no hay programas sistemáticos de monitoreo en la zona, aunque en meses recientes la DGA y el CECS iniciaron un programa de balance de masa en el Glaciar Nef.

Es importante destacar, que en esta subzona, los glaciares juegan un rol paisajístico fundamental en el Parque Nacional Torres del Paine, uno de los principales atractivos turísticos del país.

Austral B

Se extiende desde la cuenca “Costeras e Islas entre Río Hollemberg, Golfo Alte. Laguna Blanca” (Código 124) hasta el Cabo de Hornos.

Se encuentra comprendida aproximadamente entre los paralelos 52° y 56° sur, extendiéndose así hasta Cabo de Hornos, su geografía se encuentra fuertemente fragmentada por fiordos, senos y canales. Cubre una superficie de 83.584 km² (11,1 % del país), la que administrativamente corresponde integralmente a la XII^a región de Magallanes y Antártica Chilena.

Climáticamente sigue la tendencia de la Subzona Austral A con un clima templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias en su margen occidental, el cual cambia dramáticamente hacia el interior del continente a un clima trasandino con degeneración esteparia y luego a estepa fría, transición marcada por un abrupto cambio en las precipitaciones y con ello en la vegetación. Las precipitaciones caen desde valores cercanos a 9.000 mm anuales en los archipiélagos del

Pacífico hasta tan solo 250 mm anuales en el extremo oriental del Estrecho de Magallanes.

El extremo meridional de la subzona, al sur del Estrecho de Magallanes, presenta un clima de Tundra, con gran influencia oceánica, la que produce un régimen isotérmico en donde el mes más frío y el más cálido tienen una diferencia de sólo 4 °C. Las precipitaciones son del orden de los 1.000 mm anuales y son más abundantes en verano.

Esta subzona cuenta también con amplias superficies glaciares, de las cuales los inventarios existentes incluyen la Península Muñoz Gamero y Gran Campo Nevado (Schneider *et al.*, 2007), la Isla Riesco (Casassa *et al.*, 2002), el Monte Sarmiento, la Isla Santa Inés, Cordillera de Darwin y la Isla Hoste (DGA, 2008a), siendo aún inciertas las superficies glaciares contenidas en la Cordillera de Sarmiento y el Volcán Burney, entre muchos otros centros montañosos menores distribuidos entre el continente y las islas. Los inventarios indicados anteriormente suman una superficie total de glaciares de 3.756,92 km² y considerando una superficie no inventariada estimada en 80 km², esta subzona contendría un total aproximado de 3.837 km² (18,2 % del país).

Actualmente hay un programa de monitoreo universitario en el Gran Campo Nevado (Möller *et al.*, 2007) y estudios específicos en varios glaciares (Rivera *et al.*, 2008a; Porter & Santana, 2003).

4.2. Inventarios de Glaciares

4.2.1. Cobertura nacional, regional y por cuenca hidrológica

En Chile han sido inventariados 3.763 glaciares (incluyendo todos los tipos de glaciares) con una superficie de 18.783 km². Considerando lo inventariado y las estimaciones para el sur del país (Tabla 4.2), la superficie cubierta por los glaciares chilenos sería de 21.063 km². Estas cifras no incluyen los inventarios realizados por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA en 2009, lo que haría ascender el número de glaciares blancos a 5.979 y a 1.514 los glaciares rocosos, llegando a una superficie inventariada de 19.686 km².

A continuación se presenta una descripción de los inventarios existentes para cada zona glaciológica definida. En las secciones posteriores se analizarán los métodos utilizados, la información disponible y los errores asociados.

Zona Norte

En la Zona Norte del país se han inventariado en total 314 glaciares con una superficie total de 120,4 km². El inventario de glaciares realizado por Garín (1987) permitió reconocer e inventariar 80 glaciares, 8 nevados y una cubierta semipermanente de nieve, los cuales cubren un área de 148,78 km². Sin embargo éste presenta serios problemas de consistencia, pues la suma independiente de las áreas señaladas para cada uno de los 89 cuerpos de hielo y nieve, conduce a un total de

194,34 km², muy superior al total de 148,78 km² señalado en las tablas de resúmenes, habiéndose descontado ya el efecto de la contabilización duplicada del mayor glaciar del Cerro Los Tronquitos. Esto hace sumamente difícil desglosar los valores por cuenca, dada la inconsistencia de los números. En este inventario también se describen las características físicas y morfológicas de las masas de hielo y/o nieve perenne de esta zona. Recientemente, Vivero (2008) realizó la actualización del inventario de glaciares descubiertos de la cuenca del Río Copiapó y también analizó las variaciones frontales recientes de algunos de estos glaciares. En resumen el inventario presenta para ésta cuenca una superficie total de 23,04 km² de hielo y nieve perenne, e incorpora en esta suma a todos los cuerpos de hielo con superficies superiores a 0,01 km².

Para esta misma zona se encuentra en preparación el inventario correspondiente a la cuenca del Río Huasco (Nicholson *et al.*, 2009) el cual representa una nueva actualización al inventario de Garín (1987) y que incluye además en su superficie a los glaciares rocosos. La superficie total estimada en este estudio para glaciares descubiertos y rocosos es 23,17 km², de los cuales 6,30 km² corresponden a glaciares rocosos.

Tabla 4.1: Síntesis nacional de los inventarios y sus características.

Zona	Áreas glaciares o cuencas	Número	Área (km ²)	Sensor utilizado	Año Imágenes y/o Fotografías Aéreas	Métodos Utilizados	Fuente
Norte A	I ^a y XV ^a regiones*	14	29,70	Fotografías aéreas	1955/1961/1980	Técnicas Aerofotogramétricas	Garín (1987)
	II ^a región*	14	12,13				
	III ^a región* (1)	31	25,13				
Norte B^x	IV ^a región* (2)	10	7,01	Fotografías aéreas	1955/1961/1980	Técnicas Aerofotogramétricas	Garín (1987)
	Río Copiapó	92	23,04	ASTER	2001/2002	Clasificación Multiespectral	Vivero (2008)
	Río Huasco	112 ⁺	16,86 ⁺	ASTER	2004	Digitalización manual de imagen	Nicholson <i>et al.</i> , (2009)
Norte C^x	Glaciar Cerro Volcán*	1	0,1	Fotografías aéreas	1955/1961/1980	Técnicas Aerofotogramétricas	Garín (1987)
Centro	Río Aconcagua	101 ⁺	59,89 ⁺	ASTER	2003/2008	Clas. multiespectral y digitalización manual	DGA (2008a)
	Río Maipo	647	421,90	Fotografías aéreas	1955/1956	Técnicas aerofotogramétricas	Marangunic (1979)
	Río Cachapoal	146	222,42		1955/1956		Caviedes (1979)
	Río Tinguiririca	261	106,46		1955/1956		Valdivia (1984)
	Río Mataquito	81	31,91		1954/1955/1956		Noveroy (1987)
	Río Maule	98	35,32		1966/1967/1978/1985/1994		Tapia (2004)

* Inventario preliminar.

⁺ Excluyendo los glaciares rocosos, los que se muestran en la Tabla 4.4.

^x No se incluye aún el inventario de las Cuencas Elqui, Limarí y Choapa realizado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA en 2009 (175 glaciares con una superficie de 10,43 km²).

(1) No incluye las superficies para las cuencas de los ríos Copiapó y Huasco, actualizados por Vivero (2008) y Nicholson (2009) respectivamente.

(2) No incluye el Glaciar Cerro Volcán (RC1M94) ni una superficie de nieve semipermanente de 31 km².

Tabla 4.1: Síntesis nacional de los inventarios y sus características (continuación).

Zona	Áreas glaciares o cuencas	Número	Área (km ²)	Sensor utilizado	Año Imágenes y/o Fotografías	Métodos Utilizados	Fuente
Sur A	Río Itata	21	7,60	ASTER	2004	Clas. multiespectral	Zenteno (2008)
	Río Bío Bío	29	52,37	Fotografías Aéreas	1955/1961 1979/1981	Técnicas aerofotogramétricas	Rivera (1989)
	Río Imperial	13	18,72				
	Río Toltén	14	68,48				
	Río Valdivia	6	42,33				
	Río Bueno	11	19,35				
Río Petrohué	12	60,57					
Sur B ^x	Río Maullín	1	2,84				
	Río Chamiza	1	1,05				
	Volcán Michimahuida	9	81,40	ASTER	2007	Clas. multiespectral	Masiokas <i>et al.</i> , (2009)
Austral A	Campo de Hielo Norte	70	3.953,00	ASTER y LANDSAT	2001	Clas. multiespectral y digitalización manual	Rivera <i>et al.</i> , (2007)
	Campo de Hielo Sur (3)	40	9.659,00	LANDSAT	1986	Clas. multiespectral	Aniya <i>et al.</i> , (1996)
Austral B	Península Muñoz Gomero y Gran Campo Nevado	75	252,50	Fotografías aéreas	1998	Digitalización manual mosaico ortofotos	Schneider <i>et al.</i> , (2007)
	Isla Riesco	45	215,00	Fotografías aéreas e Imagen LANDSAT	1984/1986	Estereoscopia y clas. multiespectral	Casassa <i>et al.</i> , (2002)
	Monte Sarmiento	165	273,06		2001/2002/ 2004/2005/2006	Digitalización manual composición falso color falso color	DGA (2008a)
	Isla Santa Inés	258	273,76				
	Cordillera Darwin	627	2.333,14				
Isla Hoste	631	409,46					
Subtotal		3636^x	18.715,41^x				

^x No se incluye aún el inventario de Chiloé Continental realizado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA en 2009 (2.552 glaciares con una superficie de 737,81 km²). (3) Incorpora sólo glaciares inventariados en Campo de Hielo Sur sin considerar aquellos pertenecientes a la zona del "Acuerdo entre la República de Chile y República Argentina para precisar el recorrido del límite desde el Monte Fitz Roy hasta el Cerro Daudet", Buenos Aires 16 de Diciembre de 1998.

Tabla 4.2: Estimación de superficies glaciares para zonas no inventariadas.

Áreas glaciares o cuencas		Número	Área (km ²)	Fuente
Aysén	Chiloé Continental	s/i	800	Lliboutry (1956)
	Yantales			
	Melimoyu			
	Volcán Hudson			Rivera <i>et al.</i> , (2006c)
	Cerro Erasmo			Rivera <i>et al.</i> , (2006c)
	Cerro San Lorenzo			Casassa (1995)
	Cerro Blanco			USGS (1998); Aniya <i>et al.</i> , (1996)
	Muchos glaciares pequeños			
Alrededores de Campos de Hielo	Muchos glaciares pequeños	s/i	1.400	Rivera <i>et al.</i> , (2000, 2002, 2006c)
Magallanes	Volcán Burney	s/i	80	www.glaciologia.cl
Subtotal de áreas estimadas			2.280	

Zona Centro

En Chile Central se ha inventariado un total de 1.421 glaciares con una superficie total de 940 km².

Los inventarios han sido principalmente realizados por encargo de la DGA del MOP y preparados por Marangunic (1979) para la cuenca del río Maipo, Caviades (1979) para la cuenca del río Cachapoal, Valdivia (1984) para las cuencas de los ríos Aconcagua y Tinguiririca, Noveroy (1987) para la cuenca del río Mataquito, Tapia (2004) para la cuenca del Maule y DGA (2008a) como actualización de la cuenca del Aconcagua. Cabe destacar respecto a esta cuenca que, Bown *et al.*, (2008) realizó una primera actualización en base a imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer) del año 2003. Debido a los requerimientos solicitados por la DGA se realizó una nueva actualización del inventario de la cuenca del Río Aconcagua. En este caso se utilizaron imágenes ASTER del año 2008, las cuales presentaban menor cobertura nival respecto a las imágenes del año 2003, lo que en definitiva permitió descartar algunas áreas de 2003 que correspondían a nieves temporales y además reconocer un mayor número de glaciares rocosos en dicha cuenca. Este inventario entrega para la cuenca del Aconcagua un total de 121,49 km², de los cuales 61,60 km² corresponderían a glaciares rocosos.

Zona Sur

Para la Zona Sur del país, se contabilizan en total 117 glaciares con una superficie total de 354,71 km². En ella, se combinan los inventarios realizados por Rivera (1989) para las cuencas de los ríos Bío-Bío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno, Petrohué, Maullín y Chamiza, y por Zenteno *et al.*, (2004) y Zenteno (2008) para la cuenca del Río Itata.

Similar al caso de la cuenca del Aconcagua, el primer inventario en la cuenca del Itata se realizó con una imagen Landsat del año 2003 con una importante cobertura nival. Posterior a ello, se utilizó una imagen ASTER del año 2004 de mejores características que permitió descartar algunas áreas identificadas en la imagen de 2003, que correspondían a cobertura nival estacional.

Esta zona cuenta con vastas áreas no inventariadas en su sector meridional, cuya superficie glaciar se estima podría alcanzar valores del orden de los 200 km².

Zona Austral

En esta zona se encuentra la mayor parte del hielo de Chile, con un total de 1.911 glaciares inventariados sumando un área de 17.368,92 km², a lo que se suma un número importante de glaciares sin inventariar (estimados en aproximadamente 2.080 km²). En ella se cuenta con inventarios en el CHN por Aniya (1988) y actualizado por Rivera *et al.*, (2007); el CHS por Aniya *et al.*, (1996); el Gran Campo Nevado (GCN) por Schneider *et al.*, (2007); y la Isla Riesco analizada por Casassa *et al.*, (2002). En el último año y de manera de superar los vacíos de información desde los 53° S al sur, se ha realizado un catastro inédito para los glaciares ubicados en los principales centros montañosos y sus zonas aledañas (Cordillera Darwin, Monte Sarmiento, Isla Santa Inés e Isla Hoste), contribuyendo en último término a la determinación más precisa de la superficie total de hielo existente en Chile (DGA, 2008a). Se determinó una superficie glaciar de 2.333 km² correspondientes a la Cordillera Darwin, similar a la estimación preliminar de Lliboutry (USGS, 1998) que alcanzaba los 2.300 km². Por otro lado Lliboutry (1956) estimó 250 km² para la Isla Santa Inés, mientras que DGA (2008a) determinó 273 km². La mayor superficie glaciar determinada por DGA (2008a) puede deberse a que se integraron al inventario glaciares pequeños de los alrededores del campo de hielo de dicha isla. En definitiva el total de la superficie glaciar determinada para esta zona (DGA, 2008a), resultó ser mayor a las estimaciones previas (Lliboutry, 1956; USGS, 1998).

Recientemente se ha realizado para esta zona el inventario para los glaciares del Volcán Michinmahuida, en el cual se reconocieron 9 cuerpos de hielo a través del análisis de una imagen ASTER del año 2007 (Masiokas *et al.*, 2009).

No obstante los avances experimentados últimamente, aún existe poca información en Chiloé continental y Aysén (41° - 48° S) donde existen superficies englaciadas pobremente conocidas como los volcanes Melimoyu, Hudson y Maca, cerros San Lorenzo, Blanco, Erasmo y

Yantales entre otros. Sólo existen estimaciones preliminares para el Volcán Hudson y el Cerro Erasmo donde Rivera *et al.*, (2006c) estimó para el primero 105 km² en el año 2005 y para el segundo 165 km² en el año 2002. En total se estima un área de aproximadamente 800 km² para todos estos centros montañosos no inventariados (Tabla 4.2).

En algunas zonas de Patagonia aparte de los CHN y CHS, hay varios otros centros englaciados sin cuantificar. Aniya *et al.*, (1996) no incluyó en su inventario glaciares de circo y de valle localizados en el margen del CHS, para los cuales Rivera *et al.*, (2002) estimó una superficie de 1.400 km² (Tabla 4.2). En la zona al sur de CHS aun falta por inventariar en detalle los glaciares correspondientes al Volcán Burney, estimados en 80 km² y los de islas ubicadas al oeste del CHS.

4.2.2. Métodos utilizados e información disponible

Los métodos y materiales en los diversos inventarios están asociados a la utilización de sensores remotos. Los primeros inventarios de glaciares del país (Marangunic, 1979; Caviedes, 1979; Valdivia, 1984; Garín, 1987; Noveroy, 1987; Rivera, 1989) se realizaron aplicando técnicas aerofotogramétricas y cartográficas a partir de las fotografías aéreas de los años 1955/56, 1961, 1979 y 1981. El uso de las fotografías aéreas es adecuado para los inventarios de glaciares debido a la buena resolución que presentan. Sin embargo, si bien todos los inventarios están georreferenciados, la falta de ortorrectificación de las fotografías aéreas usadas puede generar superficies y parámetros glaciares imprecisos, dada la topografía de las zonas montañosas estudiadas.

Posteriormente se han realizado inventarios con imágenes satelitales Landsat (Aniya *et al.*, 1996; Rivera *et al.*, 2007) y ASTER (DGA, 2008a; Vivero, 2008; Zenteno, 2008; Nicholson *et al.*, 2009). Para estos casos se aplicaron métodos de clasificación multiespectral en las imágenes satelitales, complementadas con análisis de Modelos Digitales de Elevación (MDE) tanto con datos de la cartografía regular del Instituto Geográfico Militar (por Ej. Vivero, 2008) como datos provenientes de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) del año 2000 (por ej. DGA, 2008a; Zenteno, 2008) y MDE generados a partir de imágenes ASTER (Rivera *et al.*, 2007; Nicholson *et al.*, 2009).

Cabe destacar que las fotografías aéreas se siguen utilizando para realizar los inventarios, como es el caso de Casassa *et al.*, (2002) donde se analizaron fotografías aéreas del año 1984 en conjunto con una imagen Landsat de 1986. Por otro lado, Schneider *et al.*, (2007) utilizó fotografías aéreas de 1984 y 1998, con las cuales se generó un mosaico de ortofotos donde se delimitaron los cuerpos glaciares para Gran Campo Nevado. Las fotografías aéreas, debido a su resolución, con características óptimas de nubosidad, cobertura nival y con un adecuado proceso de rectificación, continúan siendo una buena herramienta para la confección de inventarios.

Respecto a la información que contiene cada inventario, cabe destacar que gran parte de ellos fueron realizados de acuerdo a la norma de UNESCO-TTS/WGS (Muller *et al.*, 1977), principalmente los realizados a

finés de los 70s, durante los 80s y los realizados recientemente (Marangunic, 1979; Caviedes, 1987; Valdivia, 1984; Garín, 1987; Noveroy, 1987; Rivera, 1989; Vivero, 2008; DGA, 2008a). Recientemente, sin embargo Paul *et al.*, (2009), estimó que existen 8 parámetros básicos que todo inventario de glaciares debe contener. Aquellos realizados de acuerdo a la norma UNESCO, contienen en general 7 de los 8 parámetros solicitados por Paul *et al.*, (2009), la variable pendiente media no ha sido incluida en la mayoría de los inventarios en Chile, con la excepción del realizado para Cordillera Darwin y Cuenca del Aconcagua (DGA, 2008a), donde se incluyó dicha información. Por otro lado existen inventarios no realizados de acuerdo a dicha norma pero que si contienen la información básica solicitada por Paul *et al.*, (2009), tal es el caso de Aniya *et al.*, (1996), Casassa *et al.*, (2002) y Schneider *et al.*, (2007). En la Tabla 4.3 se aprecia la información que contiene cada inventario respecto a los 8 parámetros determinados por Paul *et al.*, (2009). El resto de los inventarios se han realizado dentro del ámbito de investigaciones más amplias, por lo que sólo contienen información general como la superficie, coordenadas e identificación pero no entregan mayores antecedentes para cada cuerpo glaciar (Nicholson *et al.*, 2009; Rivera *et al.*, 2007; Zenteno, 2008; Masiokas *et al.*, 2009).

Ninguno de los inventarios citados incluye en sus bases de datos a cuerpos de hielo inferiores a 0,01 km² debido a que corresponde al tamaño mínimo que suele ser considerado como glaciar, dado entre otras cosas a que cuerpos menores pueden desaparecer más fácilmente en los veranos secos por lo que con menos frecuencia constituyen cuerpos perennes (ver definición de glaciar en sección 2.1). Por otro lado, este valor es el límite inferior que adecuadamente se puede digitalizar con imágenes ASTER y Landsat de buenas condiciones (baja o nula cobertura nival y nubosa). Por lo tanto, es correcto y se recomienda no incluir superficies inferiores a este valor (Paul *et al.*, 2009).

Los inventarios del Norte de Chile (Garín, 1987; Vivero, 2008) y Chile Central (Noveroy, 1987) no incluyen en sus datos la superficie de glaciares rocosos. Sin embargo, recientemente Geoestudios realizó una identificación de glaciares rocosos para las cuencas de Copiapó, Huasco, Totoral, Elqui y Aconcagua (DGA, 2008c), determinándose un total de 1.188 glaciares de roca para estas cuencas (Tabla 4.4). En este estudio solo se reconocieron e identificaron los glaciares de roca con fotografías aéreas. No se determinó sus áreas debido a limitantes metodológicas ya que no se georreferenciaron ni ortorrectificaron las fotografías aéreas.

Por otro lado Brenning (2005) determinó algunas superficies de glaciares de roca en Chile Central, combinando observaciones de terreno y métodos estadísticos. En este estudio se realizó una cuantificación de glaciares de roca en algunos centros montañosos como Cerro Del Potro, Cerro Tapado, Cerro La Parva, Cerros Picos Negros, Cerro Catedral y Cerro Los Moños (Tabla 4.5).

Tabla 4.3: Información básica contenida en los inventarios de glaciares de Chile de acuerdo a los parámetros de Paul *et al.*, (2009).

Inventario	Identificación	Coordenadas	Superficie	Largo	Elevación Máxima	Elevación Mínima	Elevación Media	Orientación Media	Pendiente Media
Zona Norte									
Garin (1987)	Si	si	si	si	Si	si	si	Si	no
Vivero (2008)	Si	si	si	si (1)	Si	si	si	Si	no
Nicholson <i>et al.</i> , (2009)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Zona Centro									
Marangunic (1979)	Si	si	si	si	Si	si	si	Si	no
Caviedes (1979)	Si	si	si	si (1)	Si	si	si	Si	no
Valdivia (1984)	Si	si	si	si	si (2)	si (3)	si	Si	no
Noveroy (1987)	Si	si	si	si	Si	si	si	Si	no
Tapia (2004)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
DGA (2008a)	Si	si	si	no	Si	si	si	Si	si
Zona Sur									
Rivera (1989)	Si	si	si	si	Si	si	si	Si	no
Zenteno (2008)	Si	si	si	no	No	no	no	No	no
Zona Austral									
Aniya <i>et al.</i> , (1996)	Si	si	si	si	Si	si	no	Si	no
Casassa <i>et al.</i> , (2002)	Si	si	si	si	Si	si	no	Si	no
Rivera <i>et al.</i> , (2007)	Si	no	si	no	No	no	no	No	no
Schneider <i>et al.</i> , (2007)	Si	si	si	si (4)	Si	si	no	Si	no
DGA (2008a)	Si	si	si	no	Si	si	si	Si	si
Masiokas <i>et al.</i> , (2009)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i

- (1) Solo contiene datos de largo de algunos glaciares
(2) En original aparece como “altitud área de acumulación”
(3) En original aparece como “altitud área de ablación”
(4) En original aparece como “largo medio”
s/i Sin Información. Inventarios no se encontraban disponibles en la DGA.

Tabla 4.4: Glaciares rocosos identificados e inventariados en las distintas zonas glaciológicas de Chile.

Zonas Glaciológicas	Áreas glaciares o cuencas	Número de glaciares			Fuente
		Inventariados		Identificados	
		Número	Superficie (km ²)		
	Subcuencas altoandinas			7	DGA (2008c)
NORTE	Río Copiapó			151	DGA (2008c)
	Río Totoral			0	DGA (2008c)
	Río Huasco	40	6,30	118	DGA (2008c)
	Río Elqui			284	Nicholson <i>et al.</i> , (2009) DGA (2008c)
CENTRO	Río Aconcagua	87	61,60	628	DGA (2008a) DGA (2008c)
	Río Maipo			326	Marangunic (1979)
	Río Tinguiririca			8	Valdivia (1984)
TOTAL		127	67,9	1.522	

Por ejemplo para el Cerro Tapado Brenning (2005) determinó 3,3 km² de superficie de glaciares de roca, mientras Iribarren (2008) determinó 3,1 km² en 11 cuerpos definidos como glaciares de roca (cuenca Estero El Empalme).

Cabe destacar que existe una importante diferencia en la determinación del número de glaciares de roca entre el inventario DGA (2008a) y la identificación realizada por Geostudios (DGA, 2008c) en la cuenca del Río Aconcagua, posiblemente debido a las diferentes fuentes de identificación que se utilizaron, ya que en el primero se usaron imágenes satelitales ASTER y en el segundo fotografías aéreas de mayor detalle.

Tabla 4.5: Cuantificación de glaciares de roca en distintos centros montañosos (Brenning, 2005).

Cerro	Cuenca	Área Glaciares Rocosos (km ²)
El Potro	Copiapó	3,9
Tapado	Elqui	3,3
Parva del Inca	Aconcagua	1,1
Picos Negros	Maipo	0,7
Catedral	Maipo	2,3
Los Moños	Tinguiririca	1

4.2.3. Estimaciones de errores o incertidumbres asociadas

No todos los inventarios presentan un análisis de los errores en la medición de la superficie glaciar, los cuales se pueden asumir como sistemáticos o debido a condiciones particulares de las fuentes utilizadas. En el primer caso, la DGA (2008a) asume un error sistemático de 0,2 km² para los glaciares descubiertos y el triple para los glaciares rocosos, Vivero (2008) asume un error de 1,92 km² para el total de la superficie inventariada y Rivera *et al.*, (2007) asume un error sistemático en la estimación de las áreas de Campo de Hielo Norte. En todos

estos casos se utilizó como variables para la determinación del error el perímetro de cada polígono y el tamaño del píxel de la imagen satelital.

Por otro lado Aniya *et al.*, (1996) menciona una estimación de error debido a la presencia de nieve en la imagen satelital utilizada para su inventario pero no entrega un valor de error para la superficie total. Casassa *et al.*, (2002) estimó un error de $\pm 40 \text{ km}^2$ en la estimación total de la superficie glaciar en Isla Riesco, debido a la existencia de cobertura nival estacional en las fotografías aéreas utilizadas. Debido a ello, se realizó una interpolación sobre la base de la comparación de ortofotos e imágenes Landsat sin cobertura nival a fin de obtener una superficie glaciar más real con el consiguiente cálculo de error.

Schneider *et al.*, (2007) estima un error del orden del 10% en la determinación de la superficie de Gran Campo Nevado debido a la incertidumbre del cálculo de la superficie en zonas de gran pendiente originada por la proyección vertical y debido a que la delimitación de glaciares fue difícil de determinar en zonas con morrenas superficiales.

4.3. Análisis de información glaciológica

4.3.1. Variaciones areales y frontales

Este tipo de estudios, por su simplicidad y fácil determinación utilizando fotografías terrestres, aéreas y satelitales, constituyen el registro más completo y extenso del comportamiento glaciar, pero debe ser considerado con cautela, pues la información que entrega no determina el cambio real de los glaciares, porque la variable clave es la masa, la que si bien está relacionada con el área no queda determinada por ésta.

Zona Norte

Entre los 27° S y 31° S , el aumento en las precipitaciones y las cumbres que se elevan sobre la actual línea de nieves, permiten la existencia de numerosos glaciares en la vertiente chilena de los Andes. La cuenca del Río Copiapó contiene numerosos centros montañosos con glaciares como el Cerro Del Potro ($28^\circ 23' \text{ S}$) con $4,8 \text{ km}^2$ de área el año 2002 y el Cerro Tronquitos ($28^\circ 30' \text{ S}$) con numerosos glaciaretos (Vivero, 2008). En las cabeceras del Río Huasco ($\sim 29^\circ \text{ S}$) existen aproximadamente 14 km^2 de hielo (Nicholson *et al.*, 2009), incluyendo al glaciar Guanaco ($29^\circ 21' \text{ S}$), de $1,8 \text{ km}^2$ para el año 2005. Otro centro montañoso importante de la zona es el Nevado Tres Cruces ($27^\circ 06' \text{ S}$) de $1,1 \text{ km}^2$ de área el año 2000 (Vivero, 2008).

En el Glaciar Tronquitos ($28^\circ 32' \text{ S} - 69^\circ 43' \text{ W}$), ubicado en la cuenca superior del río Copiapó, se han estudiado las variaciones frontales en un período que comprende 47 años (Rivera *et al.*, 2002). Entre 1955 y 1984, las tasas de retroceso en este glaciar han sido cercanas a 14 m a^{-1} y con escasa pérdida de superficie (ca. $0,3 \text{ km}^2$), mientras que para el período siguiente (1984-96) se observó un aumento significativo de estas tasas, alcanzando los 23 m a^{-1} con pérdidas de área equivalentes a $0,2 \text{ km}^2$ para todo el período (Rivera *et al.*, 2002).

Según Garín (1987), el glaciar Tronquitos para el año 1955 contaba con un área total de 8,8 km². Mediciones realizadas el año 1984 determinaron que la extensión altitudinal de este glaciar fluctuaba entre los 5.642 m y los 4.800 m de altitud. La localización de este glaciar a gran altitud da origen a un hielo de bajas temperaturas (hielo frío), por lo tanto su dinámica y movimiento es escaso.

Garín (1987) inventarió en forma preliminar numerosos campos de nieve y glaciaretos de esta zona, pero sólo un grupo menor de ellos, han sido estudiados más en detalle, en especial cerca de las cumbres del Volcán Llullaillaco a 24° 43'S (Lliboutry, 1956; Grosjean *et al.*, 1991) y del Volcán Ojos del Salado a 27° 05'S (Lliboutry *et al.*, 1958).

En general la información histórica acerca de las variaciones recientes de los glaciares de esta zona es escasa, con excepción de las descripciones de Brügger (1928), Lliboutry *et al.*, (1958) y Mercer (1967) y las fotografías aéreas más antiguas, que datan del año 1955. Actualmente con imágenes satelitales ha sido posible identificar un número considerable de pequeños glaciares y campos de nieve. De este modo, se ha estimado que los glaciares en esta zona se encuentran retrocediendo con tasas que fluctúan entre 4 y 35 m a⁻¹.

Vivero (2008) analizó variaciones frontales recientes en glaciares de la zona, aplicando métodos de Band Ratio en imágenes satelitales ASTER, en combinación con análisis de Modelos Digitales de Elevación y datos de la cartografía regular del Instituto Geográfico Militar para determinar los parámetros de cada glaciar como son la orientación, altitud mínima y máxima. Para las variaciones frontales recientes se utilizaron imágenes satelitales MSS, TM y ASTER entre los años 1976 y 2005. El análisis de las variaciones del frente norte del glaciar Del Potro, presentó un retroceso de 128 metros durante el período 1976-2005, correspondiente a una tasa de 4 m a⁻¹.

Zona Centro

En esta zona, se han realizado diversos estudios sobre las variaciones de los glaciares, mostrando tendencias de retroceso con diferentes tasas, las que dependen principalmente de sus condiciones locales (Rivera *et al.*, 2000).

En Bown *et al.*, (2008) se analizaron las variaciones recientes de los glaciares de la cuenca del Aconcagua utilizando fotografías aéreas junto con datos satelitales Landsat, ASTER y SRTM, determinando una pérdida de área de hielo con tasas equivalentes a 0,63 km² a⁻¹ para un período de 48 años entre 1955 y 2003. Más recientemente, DGA (2008a) actualizó el inventario con imágenes del año 2008.

En el Glaciar Juncal Norte (33° 02'S, 70° 06'W), cuenca del Río Aconcagua, se han documentado retrocesos de 9,1 m a⁻¹ (Bown *et al.*, 2008). Estos son moderados en comparación con los restantes glaciares de la región, debido a que su frente se localiza en un valle profundo con paredes abruptas que circundan la lengua terminal, donde la radiación solar directa alcanza al hielo sólo por escasas horas al día, lo que se conoce como "estrechamiento de horizonte" (Rivera *et al.*, 2000). El retroceso ha fluctuado entre 4 y 20 m a⁻¹

hasta el 2006, afectando principalmente el frente recubierto, con un área perdida de 1,46 km² en el período 1955-2006 (Bown *et al.*, 2008).

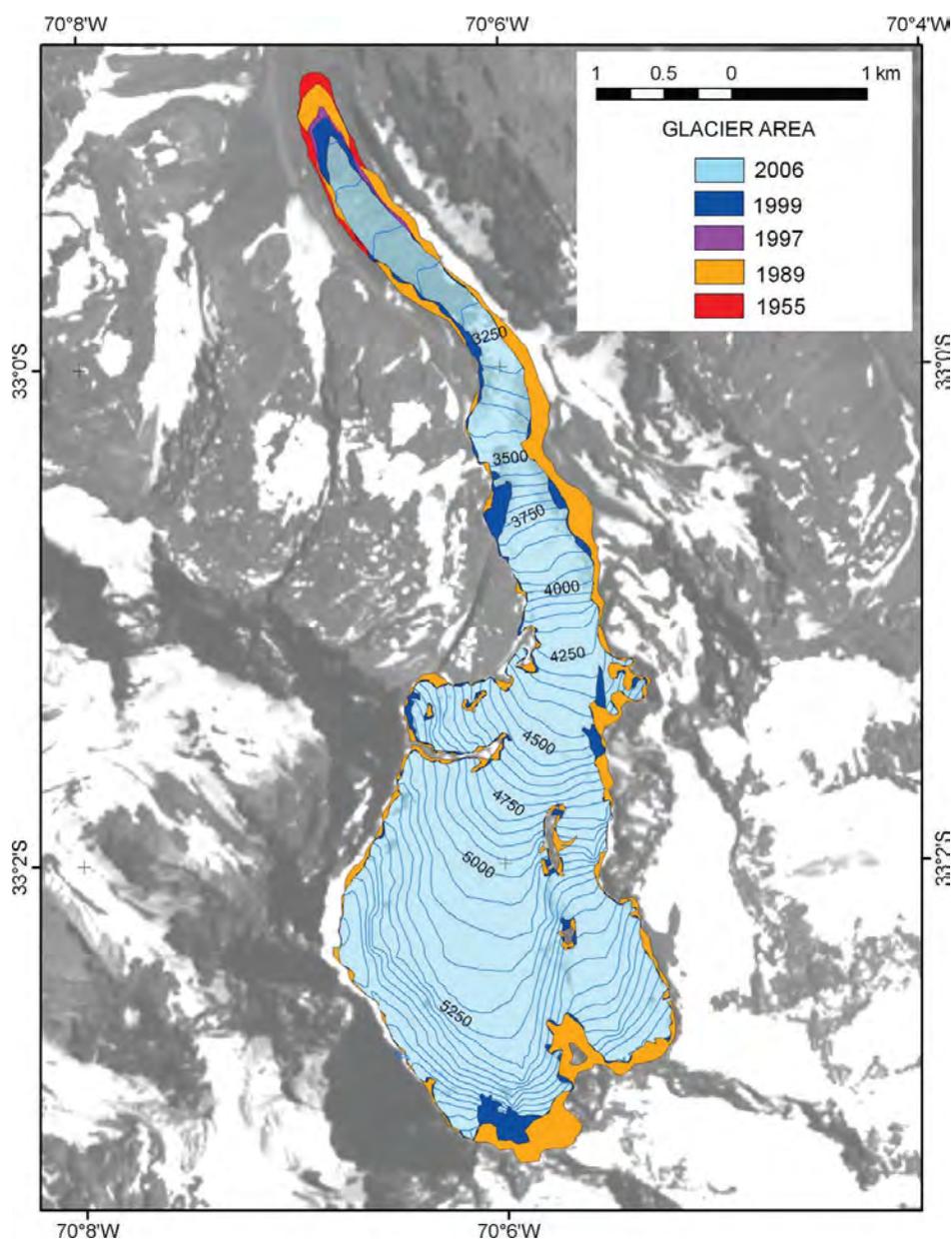


Figura 4.4: Variaciones areales del glaciar Juncal Norte desde 1955. Curvas de nivel (en m) basadas en datos del SRTM. Fuente: Bown *et al.*, 2008.

El Glaciar Juncal Sur (33° 05'S - 70° 06'W), en la cuenca del Maipo, con 22,7 km² en 2006 presenta una de las mayores tasas de retroceso cercanas a los 50 m a⁻¹ para el período 1955-1997 (Rivera *et al.*, 2000). En el margen Oeste del glaciar Juncal Sur se encuentran los glaciares Olivares Beta (33° 08'S - 70° 05'W) y Olivares Gamma (33° 08'S - 70° 10'W), que tenían 9,9 y 12,8 km² de superficie el año 2006, respectivamente. Sin embargo, ambos estaban unidos en 1935 cuando fueron avistados durante una ascensión al Cerro Risopatrón (Lliboutry, 1956). Desde entonces, ha ocurrido un proceso de retroceso, especialmente en el Glaciar Beta que retrocedió más de 3,9 km en 71 años. El Olivares Gamma también ha experimentado un retroceso frontal, acumulando 2 km en el mismo período (Rivera *et al.*, 2002; Rivera *et al.*, 2008a).

Los glaciares ubicados entre el Juncal Sur y el Olivares Gamma analizados en Acuña (2001) mostraron reducciones de áreas de 0,4 km² (glaciar G30) y 0,7 km² (glaciar G32) entre 1955 y 1997, respectivamente. El área total de estos es relativamente pequeña en comparación con sus glaciares vecinos, ya para 1997 ambos tenían superficies que no superaban a 1 km² (0,9 km² para el glaciar G30 y 0,7 km² para el glaciar G32).

Destacan en esta zona los avances de 4 glaciares durante la primera mitad del siglo XX, éstos corresponderían a los glaciares Sureste del Nevado del Plomo, Glaciar Nieves Negras, Museo y Juncal Sur en la cuenca del Maipo. Éste último, avanzó en 1947 cerca de 3 km, vertiendo en el circo del Gran Salto del Olivares con 600 m de caída, formándose bajo éste un pequeño glaciar pedemontano de 1 km² (Lliboutry, 1956). Más tarde el Glaciar Juncal Sur entró en la fase de retroceso ya descrita.

En la Cuenca del Río Cachapoal, Caviedes (1979) determinó las variaciones de los glaciares Cipreses, Cachapoal y Palomo Norte, encontrando en éste último retrocesos equivalentes a unos 70 m a⁻¹, entre 1955 y 1968, mientras que para el período 1968-1978 las tasas de retroceso serían de 25 m a⁻¹. Una actualización de esas variaciones puede encontrarse en Le Quesne *et al.*, (2008).

El Glaciar Cipreses (34° 33'S - 70° 22'W), en la cuenca del Cachapoal, visitado por primera vez en 1860 (Caviedes, 1979), es uno de los que presenta los registros históricos más largos, con un retroceso de casi 5 km desde 1842 (Rivera *et al.*, 2006a).

En la cuenca del Tinguiririca, el Glaciar Universidad (34° 42'S - 70° 20'W), llamado así por Lliboutry (1956), presentó un avance hacia el año 1945, para luego retroceder cerca de 1 km en su frente cuando fue visitado en 1956 (Lliboutry, 1956 y 1958). Con posterioridad, este glaciar ha retrocediendo a una tasa estable de 18 m a⁻¹ (Acuña, 2001), totalizando una pérdida de 2 km hasta 2004 (Rivera *et al.*, 2006b). Una actualización de esas variaciones fueron publicadas en Le Quesne *et al.*, (2008).

Subzona Sur A

En el sector norte de la región, los Nevados de Chillán (36° 49' 32" S, 71° 24' 25" W), que constituyen la principal zona glaciar del río Itata, fueron visitados por Philippi (1863), quien dibujó un mapa de un glaciar de unos 30 km². En el año 2004 la superficie de ese glaciar era de sólo 5 km² (Zenteno *et al.*, 2004). Para la Sierra Velluda (37° 28' 10" S, 71° 28' 55" W), se cuenta con dibujos de un glaciar a principios de 1828 por E. Poeppig, los que fueron comparados con fotografías de Carlos Keller de los años cincuenta, ilustrando una reducción significativa en su área (Poeppig, 1960).

Se han estudiado las variaciones frontales del Glaciar Sureste del Volcán Mocho (39° 57' 8" S, 72° 00' 42" W), como parte de un plan de monitoreo detallado (Rivera *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2006b), encontrando una tendencia clara al retroceso, con una importante pérdida de superficie entre 1976 y 2004 de 0,036 km² a⁻¹.

Similarmente se ha monitoreado el Glaciar Pichillancahue-Turbio (39° 26' 09" S, 71° 54' 20" W) del volcán Villarrica (Casassa *et al.*, 2004), encontrando una pérdida de 5 km² de su superficie entre 1961 y 2007 (Rivera *et al.*, 2006b; Rivera *et al.*, 2008b).

Un trabajo más general, revisa las variaciones de glaciares sobre volcanes activos entre los 36° y 41° S (Zenteno, 2008) utilizando series de imágenes satelitales MSS, TM y ASTER, las que muestran significativas disminuciones de sus áreas. La mayor disminución de área se registró en el volcán Nevados de Chillán, con una reducción total del 66% para el período 1976 y 2004. La menor reducción de área la experimentó el volcán Villarrica con una pérdida porcentual del 29%. Los glaciares que presentaron los mayores retrocesos frontales fueron los ubicados en el volcán Nevados de Sollipulli (38° 58' 33" S, 71° 31' 17" W), con un máximo de 1.130 ±64 m para el período 1976 - 2005. Sin embargo, las mayores tasas de retroceso frontal de 118 ±7 m a⁻¹ para el período 2000 – 2003, se registraron en el volcán Callaqui (37° 55' 13" S, 71° 26' 57" W).

Subzona Sur B

Los glaciares Casa Pangue y Norte del Monte Tronador (41°08' S, 71°49' W), en el extremo norte de esta región, también tienen un interesante registro histórico, ya que su primera fotografía fue publicada por Gallois (1901). Desde entonces se ha monitoreado su estado con fotografías terrestres, resultando en un importante retroceso (Rivera *et al.*, 2008a). Las fluctuaciones del Glaciar Casa Pangue, han sido reconstruidas hasta la Pequeña Edad del Hielo mediante anillos de crecimiento de los árboles. Muchos de los árboles que allí crecen evidencian inflexiones en sus troncos debido al flujo del hielo que existe en el subsuelo (Rabassa *et al.*, 1981). Desde fines del siglo XIX este lugar ha sido visitado y descrito por varios exploradores, entre ellos el naturalista Hans Steffen y el padre italiano Alberto Agostini. Un extenso registro de fotos aéreas comienza a su vez en 1961, poniendo en evidencia un fuerte adelgazamiento de este glaciar, el cual se ha visto acelerado en años recientes (Fernández *et al.*, 2006; Bown & Rivera, 2007; Rivera *et al.*, 2008a; Masiokas *et al.*, 2009).

Existen aquí numerosos glaciares menores, que aún no se han investigado sistemáticamente y sólo existen algunos estudios geológicos o dendrocronológicos. Como por ejemplo en el Volcán Michinmahuida (Naranjo *et al.*, 1993). En esta zona, Fernández *et al.*, (2006) estudió las variaciones recientes para dos casos particulares: El Glaciar Casa Pangue entre 1953 y 2000, encontrándose una tasa de retroceso de 0,017 km² a⁻¹, y el Glaciar Río Amarillo, en el período 1961-1997, encontrando un retroceso a tasa de 0,032 km² a⁻¹.

Rivera *et al.*, (2008a) analiza las variaciones desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, de los glaciares cercanos al Lago Inexplorado al interior de Hornopiren.

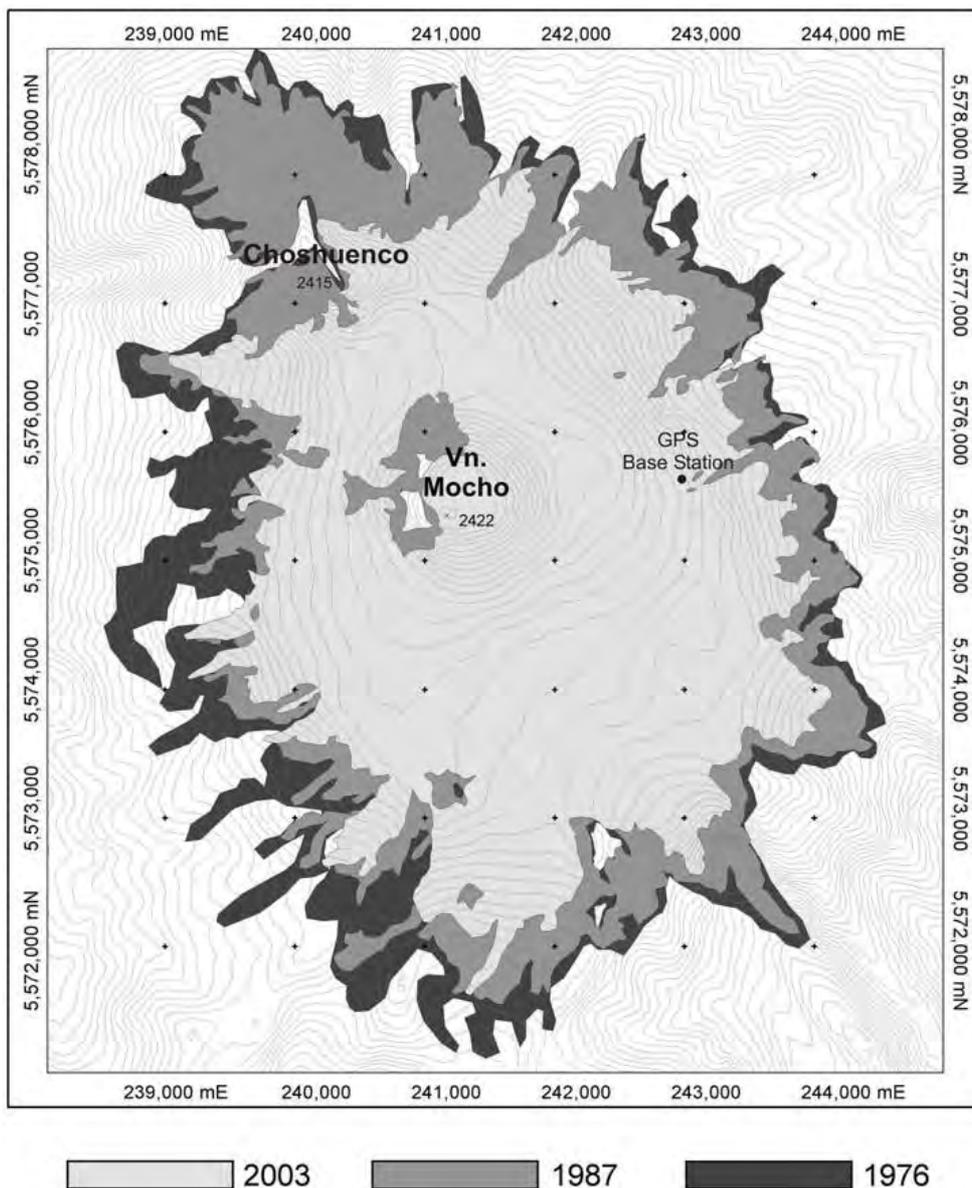


Figura 4.5: Extensión glaciar en el Volcán Mocho-Choshuenco en 1976, 1987 y 2003.
 Fuente: Rivera *et al.*, 2005.

Subzona Austral A

Los primeros estudios al respecto fueron realizados por Luis Lliboutry en los 50s (Lliboutry, 1956), sistematizando el estudio de todas las zonas glaciares de Chile. Debido al carácter pionero de sus estudios, en la Zona Austral se centró básicamente en aspectos descriptivos. Sin embargo, hace referencia a las variaciones frontales en el CHN. En el Glaciar San Rafael, describe períodos de retroceso entre 1905 y 1935, y de avance entre 1935 y 1945, todo a una tasa de aproximadamente 200 m a^{-1} . Análogamente estudia los retrocesos del Tadeo (San Quintín) con variaciones similares al anterior, y menciona el Glaciar Steffen, señalando que no presentaba signos de retroceso en 1945. Otros estudios que realizó en referencia a las variaciones glaciares, fueron acerca de la "trim line" que evidencia el retroceso y adelgazamiento generalizado de los glaciares del oriente del CHN. En el CHS también menciona aspectos de las variaciones del Glaciar Jorge Montt que habría abandonado 10 km^2 de "hielo muerto", del glaciar principal de éste y otros, de manera principalmente

cuantitativa y poco sistemática. Destaca en su análisis las diferencias entre los lados occidentales y orientales del CHS. Lliboutry estudió también los glaciares de Cordillera Darwin y describió numerosos glaciares menores de dicha región.

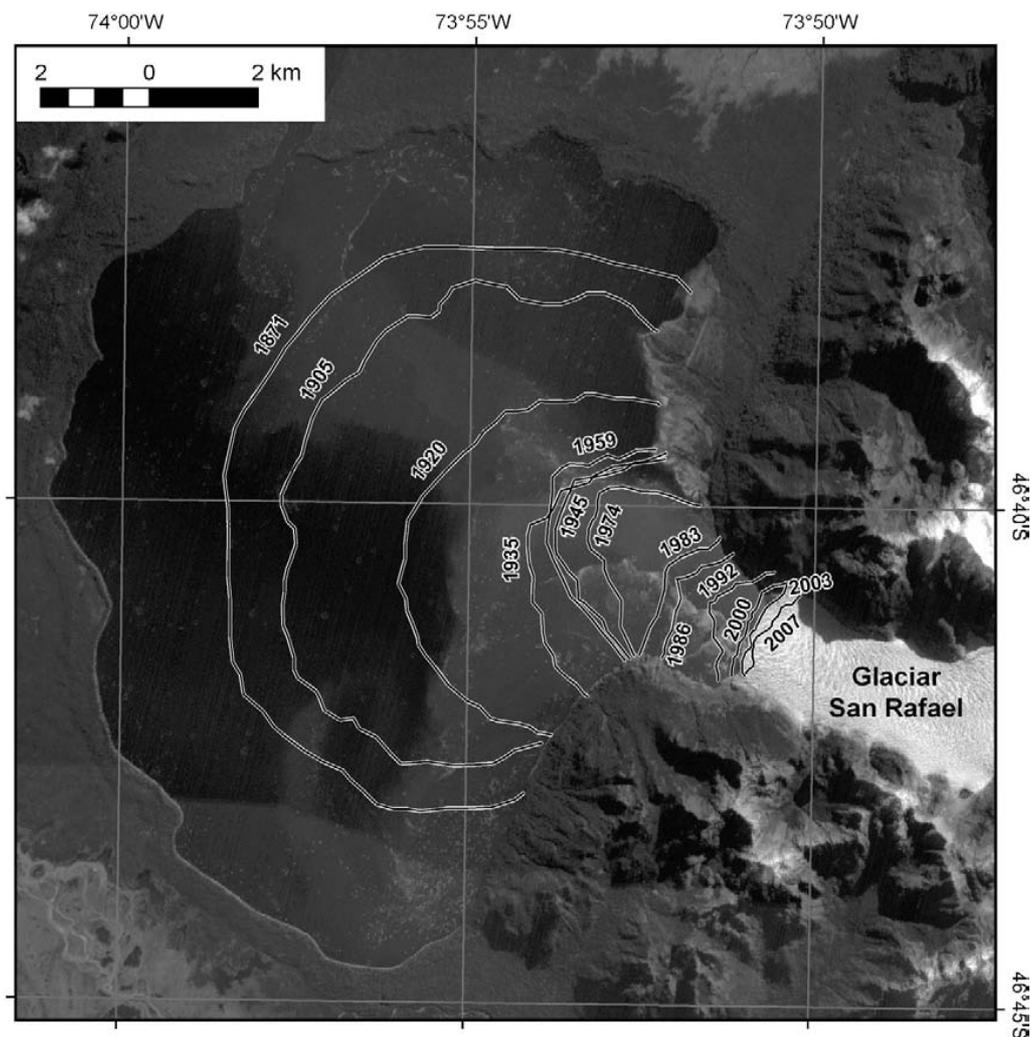


Figura 4.6: Fluctuaciones del glaciar San Rafael, Campo de Hielo Patagónico Norte, Chile, Durante los últimos 136 años.
Fuente: Masiokas *et al.*, 2009.

Otros estudios realizados en esa época, se llevaron a cabo en la vertiente argentina del CHS, en los glaciares Ameghino y Perito Moreno (Nichols & Miller, 1951, 1952), los que durante 1949 concluyeron que entre 1870 y 1880 el Glaciar Ameghino alcanzó su máxima extensión dentro de los últimos cientos de años, luego retrocedió varios cientos de metros hasta su posición en 1949. Por otro lado se documenta como el Glaciar Perito Moreno avanza sobre bosque maduro y se establece que su avance había sido sostenido desde comienzos del siglo XX. A éstos estudios se suman los realizados por la American Geographical Society's Southern Chile Expedition 1959, que realizó estudios en el Glaciar San Rafael de Chile y en los glaciares Fitz Roy y Río Manso en Argentina (Lawrence & Lawrence, 1959).

En los 60's se realizaron algunos trabajos en el CHN (Heusser, 1960 & 1964; Tanaka, 1961) y en CHS (Marangunic, 1964; Mercer, 1968; Mercer, 1970), incluyendo los glaciares San Rafael, Témpano, Bernardo, Chico, Frías, San

Lorenzo, Mariano Moreno, Ofhidro, Hammick (u Occidental) y O'Higgins, entre otros. Los trabajos de Mercer (1968) se extendieron a las variaciones holocenas, estableciéndose ya que existió un rápido retroceso en torno al año 10.000 antes de presente, donde algunos glaciares ya alcanzaban un tamaño similar al que presentan hoy en día. Se identificaron también tres períodos de avances posteriores (4.600 A.P., 2.000 A.P. y el último durante los siglos XIX y XX).

Contemporáneamente, se registró el aporte de las numerosas observaciones realizadas por Shipton en sus incursiones a los Campos de Hielo (Shipton, 1959, 1962, 1963 & 1964). Destaca en este período el atlas de glaciares del hemisferio sur de Mercer (1967), donde se estiman superficies glaciares para todo Chile, incluyendo Patagonia. En la década del 70 se realizó una importante expedición científica británica al Glaciar Benito, en el margen occidental del Campo de Hielo Norte (Session, 1999), en donde se realizaron múltiples estudios y se documentó el frente del glaciar con fotografías, pero los resultados se concentraron en mediciones de flujo, balance de masa y líneas de nieve.

A partir de la década de los 60s, se inician las investigaciones más sistemáticas, lideradas por proyectos Japoneses de Investigación (destacándose las campañas de 1967, 1969 y 1983/84, 1985/86, 1990, 1993, 1998/99 y 2003), las que abarcan ambos campos de hielo y comprenden variados temas. Las variaciones recientes fueron estudiadas y revisadas en todas las campañas (Aniya & Enomoto, 1986; Aniya, 1988; Aniya, 1992; Aniya & Skvarca, 1992; Aniya *et al.*, 1992; Naruse *et al.*, 1995; Wada & Aniya, 1995; Aniya *et al.*, 1997; Aniya, 1999; Aniya, 2001; Aniya & Wakao, 1997; Aniya, 2007; Aniya *et al.*, 2007a; Aniya *et al.*, 2007b). Durante las temporadas 83/84 y 85/86, las investigaciones se concentraron en Campo de Hielo Norte. Los resultados más recientes, y que incorporan todo el registro histórico (Aniya, 2007) revelan una pérdida total de superficie de 101,36 km² entre 1945 y 2005 considerando los 21 glaciares más importantes, donde el retroceso ocurrió a tasas de entre 0,042 a 0,279 km² a⁻¹ por glaciar.

Para la década de los 90s, las investigaciones se extendieron al Campo de Hielo Sur. Desde los primeros trabajos, se ha monitoreado el estado de aproximadamente 70 glaciares en ambos Campos de Hielo, lo que se complementa con trabajos en terreno en los glaciares San Rafael, Soler, Exploradores, Nef, Tyndall, y los glaciares Upsala y Moreno por la vertiente Argentina. Las publicaciones más recientes de este grupo y que incluyen todos los trabajos previos y consideran 48 glaciares del CHS (Aniya *et al.*, 1997), muestran una pérdida total de 200 km² en el período entre 1944 y 1986, y estiman una pérdida en volumen de 40 a 80 km³ en las zonas de ablación y de 100 a 300 km³ en las zonas de acumulación para el mismo período.

Estas investigaciones japonesas sentaron las bases para el desarrollo de los estudios científicos en ambos campos de hielo que se han llevado a cabo hasta la actualidad. Pues más allá de las variaciones frontales, se realizaron varios estudios glaciológicos, meteorológicos, geológicos, hidrológicos y biológicos.

Las variaciones glaciares previas al registro fotográfico y cartográfico, han sido abordadas en estudios geomorfológicos con diversos métodos de datación

como los de Glasser *et al.*, (2005) y Kilian *et al.*, (2007). Este último encontró para Gran Campo Nevado que los retrocesos del Holoceno se iniciaron entre los años 18.300 y 17.500 antes del presente (fecha calibrada), pero alrededor del 84% de la superficie se perdió en un breve período de mil años a partir del año 15.000 antes del presente, producto probablemente de un aumento de la ELA de 200 a 300 metros. Establece además que esta masa de hielo ha reaccionado más sensiblemente al cambio climático que el CHS.

Las metodologías de datación se han complementado con investigaciones apoyadas por métodos liquenométricos y dendrocronológicos. Estas investigaciones abarcan estudios específicos de algunos glaciares como el Nef, Arco, Colonia, San Quintín, San Rafael, León, Gualas y Reicher (Winchester & Harrison, 1996; Winchester & Harrison, 2000; Harrison & Winchester, 2000; Winchester *et al.*, 2001; Harrison *et al.*, 2001; Harrison *et al.*, 2006; Harrison *et al.*, 2007; Harrison *et al.*, 2008).

El estudio más reciente de este tipo (Harrison *et al.*, 2008) realiza un análisis de imágenes ASTER y sedimentología para describir la geomorfología del glaciar León (CHN) y las morrenas asociadas. Mediante una combinación de liquenometría, dendrocronología y técnicas de luminiscencia se demostró que el glaciar retrocedió desde un gran complejo morrénico terminal hace unos 2.500 años y experimentó un gran retroceso desde los límites morrénicos del siglo XIX. Las fluctuaciones del glaciar León aparecen controladas por la relación entre las fuerzas climáticas y dinámicas de calving.

También se ha hecho un exhaustivo uso de registros históricos para aportar información previa a las primeras fotografías aéreas (Araneda *et al.*, 2007; Casassa *et al.*, 1997; Warren, 1993), permitiéndose una reconstrucción histórica del CHS (Casassa & Marangunic, 1987; Casassa & Rivera, 2001).

Desde mediados de los 90's hasta la actualidad, el Laboratorio de Glaciología de la Universidad de Chile y el CECS han estado participando en la investigación glaciológica en cooperación con la mayoría de los grupos ya citados y realizando investigaciones de forma paralela. Destacan: variaciones frontales en los glaciares del Parque Nacional Torres del Paine (Rivera & Casassa, 2004), donde se encontró un adelgazamiento de entre 1,4 y 3,4 m a⁻¹ desde 1975, y una reducción del área glaciar de un 8% (62,2 km²) desde 1945. También se estudiaron las variaciones del glaciar O'Higgins (Casassa *et al.*, 1997), encontrándose un retroceso frontal de 14,6 km entre 1896 y 1995. Las variaciones del glaciar Pío XI han sido particularmente estudiadas (Rivera, 1992; Warren *et al.*, 1997; Rivera *et al.*, 1997a; Rivera *et al.*, 1997b; Rivera & Casassa, 1999) cuantificándose un anómalo avance de 10 km entre 1945 y 1995. En CHS Rivera *et al.*, (2005) estudia las variaciones del Glaciar Chico (Figura 4.7).

Las variaciones en CHN fueron abordadas por Rivera *et al.*, (2007), donde se encontró adelgazamientos medios de 4 m a⁻¹ y una pérdida total de área de 140 km², correspondiente al 3,4% del CHN entre 1979 y 2001, concentrándose las mayores pérdidas en el Glaciar San Quintín con 33 km² y el Steffen con 12 km² (Rivera *et al.*, 2008a).

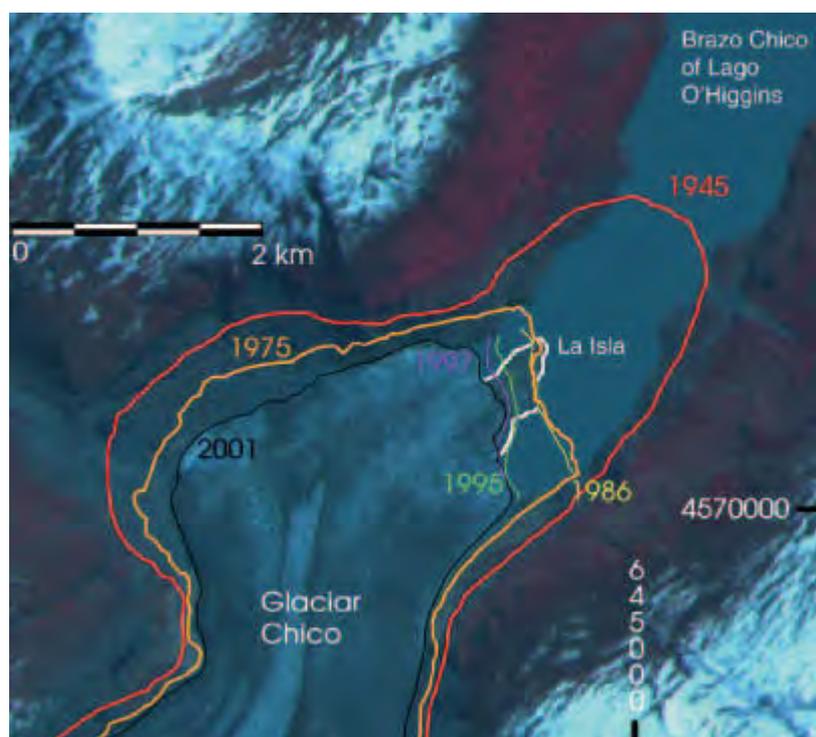


Figura 4.7: Variaciones Frontales del Glaciar Chico desde 1945.
Fuente: Rivera *et al.*, 2005.

El Centro de Estudios del Cuaternario (CEQUA) de Punta Arenas, también ha contribuido con estudios del Glaciar Tyndall, en particular del lóbulo Zapata (Araos *et al.*, 2007), donde se detectó una reducción de la superficie glaciar de 1,3 km² entre 1975 y 2003 (Godoi *et al.*, 2003).

En los alrededores de ambos campos de hielo existen numerosos glaciares menores, que aún no se han investigado sistemáticamente y sólo existen algunos estudios geológicos o dendrocronológicos. Como por ejemplo los ubicados en el Volcán Hudson (Naranjo *et al.*, 1993) y en el Monte San Lorenzo (Aravena, 2007). En esta zona, Fernández *et al.*, (2006) estudió las variaciones recientes para tres casos particulares: Arroyo San Lorenzo, Cerro Blanco, y Exploradores, encontrando para este último las mayores pérdidas de área, alcanzando 1,4 km² entre 1945 y 1997. Rivera *et al.*, (2006c) estudió las variaciones glaciares en el Volcán Hudson y el vecino Glaciar Erasmo.

A pesar de la mayor cobertura espacial que se alcanza en los estudios de variaciones frontales mediante el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales, prácticamente la totalidad de los estudios están centrados en los grandes glaciares de los Campos de Hielo Norte y Sur, habiendo muy escasos estudios de los glaciares medianos y pequeños distribuidos en la Patagonia fuera de estos grandes cuerpos glaciares. Existe además un natural sesgo favoreciendo el estudio de glaciares anómalos (San Rafael, Pío XI, O'Higgins) en lugar de fortalecer la significancia estadística de las propiedades medidas en glaciares típicos.

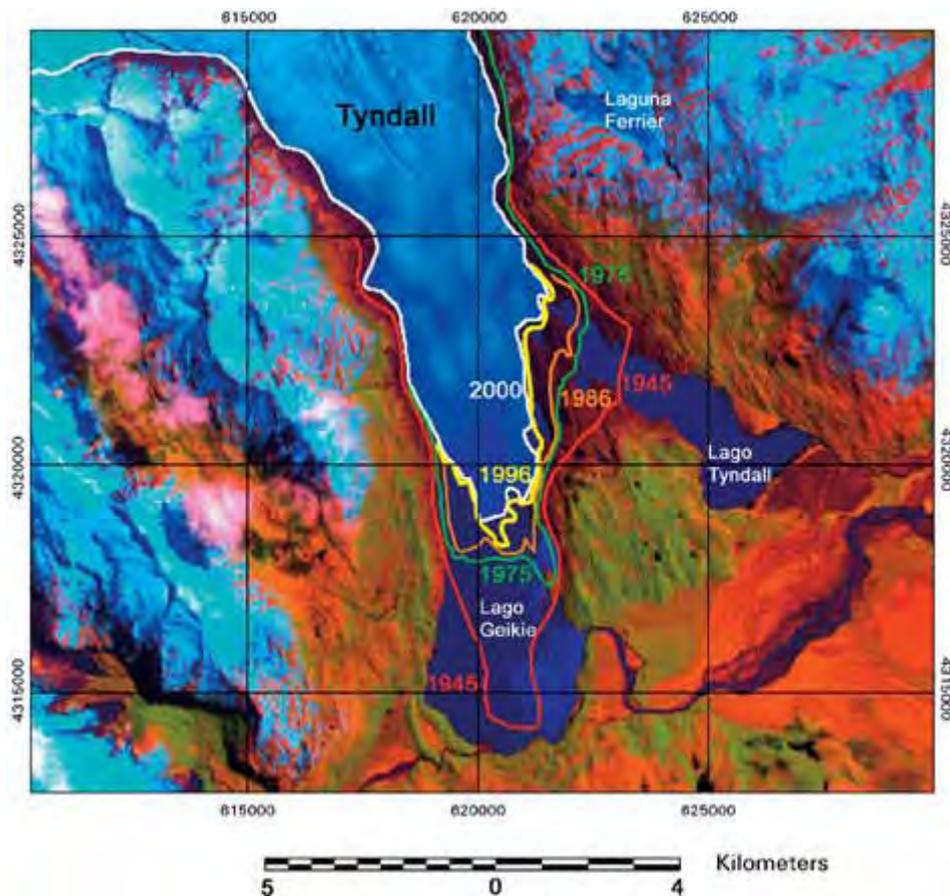


Figura 4.8: Imagen Landsat ETM+ (bandas 1, 4 y 5) con las variaciones frontales del frente de calving del glaciar Tyndall.
Fuente: Rivera & Casassa, 2004.

El uso de imágenes de radar (RADARSAT, ERS-1, ERS-2, etc.) ha sido muy escaso a pesar de su enorme potencial en la zona, dado que las dificultades técnicas en su procesamiento y los errores involucrados pueden ser poco significativos en comparación a su mayor resolución temporal dada su capacidad de observar bajo las nubes.

El uso de LIDAR combinado con fotografías aéreas desde aviones/helicópteros, ha tenido un fuerte desarrollo en los últimos años, destacando los trabajos de Keller *et al.*, (2007), Rivera *et al.*, (2008c) y Casassa *et al.*, (2008). Estos últimos, han desarrollado un sistema que permite registrar posiciones frontales de glaciares con gran precisión, permitiendo combinarse con datos altimétricos y generar MDE y mosaicos rectificadas de los glaciares. Este tipo de mediciones se ha llevado a cabo en el CHN en la totalidad de sus glaciares, pero en particular en el glaciar Colonia, debido al vaciamiento del Lago Cachet II, CHS (por el vaciamiento del Lago Témpanos) y en los glaciares Grey y Tyndall de las Torres del Paine.

En el caso del Lago Cachet II, se estimó para éste un volumen de agua de 0,2 km³, la que drenó bajo el glaciar Colonia por una distancia de aproximadamente 8 km, emergiendo en el frente del glaciar y provocando el colapso de partes del frente, donde se pudieron observar grandes fracturas. El drenaje habitual del lago a través de un río lateral de 7 km de largo se secó totalmente luego del evento. El levantamiento aéreo láser se efectuó el 28 de mayo de 2008, cubriendo el lago Cachet II y partes del glaciar Colonia,

mostrando que el nivel del lago se había recuperado en ese momento hasta un nivel de 20 m por debajo de su estado normal (Casassa *et al.*, 2008b).

Subzona Austral B

En el extremo austral de la Patagonia, estudios más sistemáticos comenzaron a realizarse recién a mediados de los 90's, entre los que se incluyen las variaciones frontales de algunos glaciares en la Cordillera Darwin (Holmlund & Fuenzalida, 1995), siendo el caso más significativo el del Glaciar Marinelli (Porter & Santana, 2003), el que entre 1992 y 2000, se encontraba retrocediendo a una tasa de 787 m a^{-1} . También se han realizado estudios de los glaciares en la Isla Santa Inés (Aravena, 2007), del Monte Sarmiento (Strelin *et al.*, 2008; Rivera *et al.*, 2008a) y de Gran Campo Nevado (Kilian *et al.*, 2007; Schneider *et al.*, 2007; Möller *et al.*, 2007).

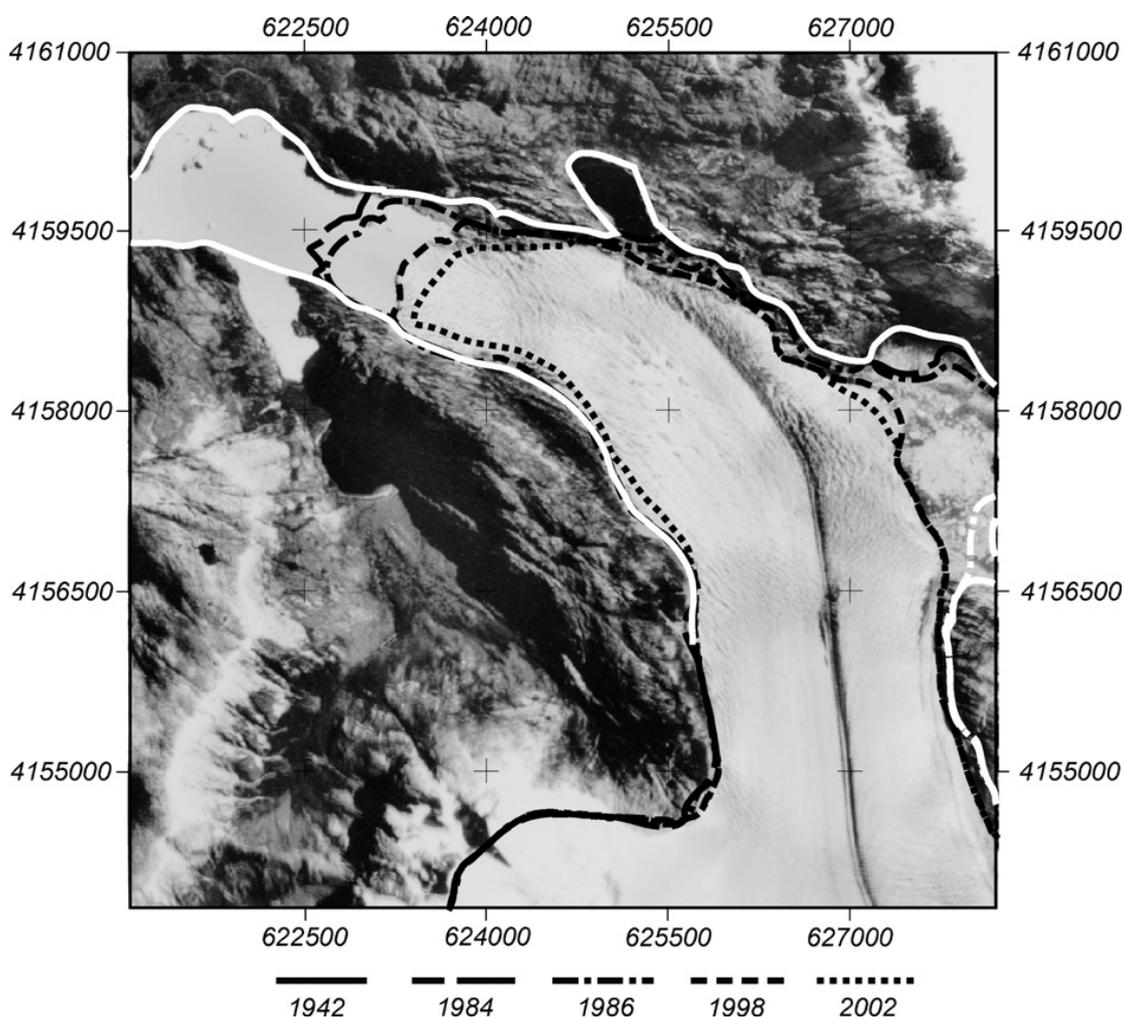


Figura 4.9: Variaciones frontales del glaciar Noroeste (nombre no oficial), el más grande glaciar del Gran Campo Nevado, en 1942, 1984, 1986, 1998 y 2002.

Fuente: Schneider *et al.*, 2007.

Aquí no se han utilizado imágenes de radar (RADARSAT, ERS-1, ERS-2, etc.) para determinar variaciones areales, a pesar de su enorme potencial en la zona, dada la capacidad de las señales de radar de atravesar la persistente cobertura de nubes existente en esta subzona.

Rivera & Wendt (2008) utilizó, en la Isla Santa Inés, al sur del Estrecho de Magallanes, una plataforma aerotransportada que permite registrar posiciones frontales de glaciares con gran precisión, mediante el uso combinado de LIDAR y fotografías aéreas verticales.

4.3.2. Variaciones volumétricas

Si bien las variaciones del área son un indicador de la dinámica glaciar, la variable de interés es la masa y sus variaciones, para lo cual es preciso estudiar el espesor de los cuerpos de hielo y sus variaciones, lo que requiere observaciones más específicas y escasas, pero que sin embargo en estudios muy puntuales, han sido medidas desde mediados de la década de los 80, utilizando diversos métodos.

Zona Norte

Sólo existe un estudio realizado por Rivera *et al.*, (2002) en el glaciar del Cerro Tapado (30° 08' S, 69° 55'W) entre los años 1955-1999, realizando la comparación de datos topográficos generados a partir de fotografías aéreas y datos GPS de terreno, sin que se detectaran cambios de espesores.

Zona Centro

Acuña (2001) determinó cambios volumétricos utilizando técnicas fotogramétricas con pares estereoscópicos de fotos para los años 1955 y 1997, detectando adelgazamientos de 1,44 m a⁻¹ y 1,09 m a⁻¹ en los glaciares Olivares Gamma y G32, respectivamente.

En Rivera *et al.*, (2002) se analizaron los cambios volumétricos en la zona de acumulación del glaciar Esmeralda para el período 1955-2000, sin detectarse cambios. En contraste, en las zonas de ablación de los glaciares Juncal Sur, Olivares Gamma y G32, se confirman las pérdidas de hielo presentadas en Acuña (2001).

Zona Sur

En Zenteno (2008) se analizaron los cambios volumétricos en glaciares sobre volcanes activos entre los 36° y 41° de latitud Sur (Subzona Sur A), utilizando datos topográficos SRTM3 del año 2000 y del IGM derivados de restitutiones fotogramétricas realizadas entre los años 1956 y 1961. Los mayores adelgazamientos de hielo se registraron en el glaciar principal del volcán Copahue, con un total de 40 ± 21 m para el período 1961 – 2000. Los menores adelgazamientos de hielo se obtuvieron en el volcán Nevados de Chillán.

Si bien se ha documentado que el análisis de cambios de elevación utilizando la topografía SRTM como referencia reciente, produciría una sobre estimación de la pérdida de hielo (Berthier *et al.*, 2007), los resultados obtenidos en el análisis de Zenteno (2008) son consistentes con las pérdidas de masa medidas por Rivera *et al.*, (2006b).

Recientemente, Rivera *et al.*, (2005) y Rivera *et al.*, (2006b), han estudiado los cambios volumétricos de los glaciares en los volcanes Villarrica y Mocho-

Choshuenco, utilizando mediciones GPS, topografía derivada de cartografía IGM y modelos digitales de elevación obtenido por el sistema AirSAR C, de JPL/NASA, determinando disminuciones de áreas, marcados retrocesos frontales y balances de masa negativos. En consecuencia, es probable que los glaciares en la Zona Sur del territorio nacional, donde aún no se han estudiado completamente sus variaciones, también presenten señales de retroceso frontal, reducción de áreas y disminuciones de espesor, como parece ser la tendencia generalizada.

Zona Austral

Mediciones directas con teodolito fueron realizadas en el Glaciar Soler (Nakajima, 1985). En el Glaciar Tyndall se realizaron tres campañas (Naruse *et al.*, 1987; Kadota *et al.*, 1992; Nishida *et al.*, 1995), encontrándose un adelgazamiento de $4,0 \text{ m a}^{-1}$ entre 1985 y 1990 y de $3,1 \text{ m a}^{-1}$ entre 1990 y 1993 (Nishida *et al.*, 1995). En el Perito Moreno Skvarca *et al.*, (2004) encontraron un leve adelgazamiento del glaciar a lo largo de un perfil transversal entre 1990 y 1996, el cual se revirtió encontrándose un significativo engrosamiento de 5 m entre 1996 y 2002.

En el Pío XI, mediante la comparación de cartografía regular de distintas fechas, se encontró que adicionalmente al avance de su frente, el glaciar se engrosó 44,1 m en la zona de ablación entre 1975 y 1995, lo que resultó ser más pronunciado en las áreas bajas (Rivera & Casassa, 1999).

Levantamientos más extensos y regulares fueron realizados mediante comparación de cartografía y modelos digitales de elevación generados por radar (Rignot *et al.*, 1996), derivándose de ellos una reducción en el volumen total de CHN y CHS de $41,9 \text{ km}^3 \text{ eq. a.}$ por año lo que corresponde a $0,105 \text{ mm}$ de aumento en el nivel del mar (Rignot *et al.*, 2003). También se ha realizado este tipo de análisis utilizando estereoscopia satelital (Rivera, 2004; Rivera *et al.*, 2007; Rivera *et al.*, 2005). Estudios más sofisticados, como los realizados en el Volcán Hudson han empleado los métodos anteriores en conjunto con modelos de elevación generados con radares aerotransportados (Rivera *et al.*, 2006c), o utilizando altímetros láser aerotransportados (Keller *et al.*, 2007). También se han realizado levantamientos GPS en terreno (Rivera & Casassa, 2004; Araos *et al.*, 2007; Fernández *et al.*, 2006). Mayor continuidad en las mediciones, se ha dado para el Glaciar Tyndall, debido a las tempranas mediciones japonesas, que fueron continuadas por ellos y más recientemente por CEQUA utilizando GPS (Godoi *et al.*, 2003; Araos *et al.*, 2007a; Araos *et al.*, 2007b), encontrándose en el estudio más reciente adelgazamientos de $1,6 \text{ m a}^{-1}$ (entre los años 2002 y 2003). Raymond *et al.*, (2005) compila y homogeniza todas las mediciones disponibles para este glaciar hasta el año 2002, para estimar un adelgazamiento medio entre 1993 y 2002 de $3,6 \text{ m a}^{-1}$.

4.3.3. Glaciares rocosos

Si bien representan una fracción muy pequeña de los glaciares de Chile en términos de área y volumen, revisten particular interés puesto que son capaces de subsistir en climas excepcionalmente áridos, jugando un rol gravitante dentro de los escasos recursos hídricos de dichas zonas.

Zona Norte

Si bien muchas cumbres andinas entre los 19° y 27° S se elevan por sobre la isoterma 0°C, las escasas precipitaciones son insuficientes para alimentar los glaciares, en algunos casos incluso por sobre los 6.000 m de altitud (Jenny & Kammer, 1996). Por ello, un número importante de cuerpos de hielo corresponde a glaciares rocosos activos e inactivos que se localizan principalmente en las laderas de la Cordillera Andina del río Copiapó y Choapa. Más al norte, en los volcanes San Pedro y San Pablo (21° 53'S), Payne (1998) describe un glaciar de roca activo que alcanza una altitud mínima de 4.525 m.

Los glaciares rocosos del semiárido de Chile se caracterizan principalmente por tener orígenes de tipo glacial o periglacial, con diferentes grados de actividad asociados a la exposición de sus laderas. Según un estudio reciente estos glaciares corresponderían a formas que datarían del Holoceno tardío y en la actualidad se encontrarían en desequilibrio con las condiciones climáticas, evidenciado por las formas de termocarst aparecidas en superficie (Iribarren, 2008).

Los glaciares rocosos de la zona, han sido sólo parcialmente descritos (Paskoff, 1993). Según Brenning (2005), estos tendrían un importante rol en la esorrentía de los ríos y que sin embargo, han sido fuertemente impactados por exploraciones/actividades mineras (Brenning, 2008).

Brenning & Trombotto (2006) aplicaron modelos de regresión logística para identificar algunos factores de control en la distribución de glaciares rocosos en la Zona Norte del país, una de las que presenta mayores concentraciones de estos tipos de glaciares en todo el planeta. Las variables utilizadas se relacionan con características climáticas, morfometría local y regional. El modelo aplicado por estos autores logró reproducir los patrones de distribución regional de estos glaciares y los resultados son usados en la determinación de los nichos climáticos de los glaciares rocosos de esta zona. Del mismo modo el estudio constituye un aporte a la explicación de la presencia de glaciares rocosos en altitudes bajas y bajo condiciones topoclimáticas favorables.

Zona Centro

Los glaciares rocosos han sido reconocidos hace años como cuerpos importantes de la Cordillera de Santiago (Liboutry, 1956; Marangunic, 1976; Puig & Valdivia, 1977). Hoy se sabe que cumplen un rol en el régimen hídrico y juegan un papel clave en el sistema de transporte de sedimento de la alta montaña semiárida como lo señala Brenning (2003), en cuyo estudio se destaca la importancia de estos cuerpos de detrito y hielo en los sistemas

geomorfológico e hidrológico, tomando el Cajón de la Casa de Piedra como ejemplo.

Esta subcuenca del río Yeso se ubica cerca del embalse El Yeso, el que es de gran importancia para el abastecimiento de agua para Santiago. El permafrost insular del Cajón de la Casa de Piedra empieza a los 3.000 m de altitud en forma de glaciares de escombros activos. Entre los 3.500 y 3.800 m de altitud, los glaciares de escombros activos ocupan incluso el 16% del total de las superficies detríticas y constituyen la forma predominante del mesorelieve. Por lo tanto, hay que suponer la existencia de permafrost discontinuo de montaña a partir de altitudes sobre los 3.500 m. En el área de estudio existen glaciares de escombros de talud, igual que glaciares de escombros morrénicos vinculados a grandes lenguas glaciares muertas y a los depósitos morrénicos correspondientes. La transición hacia el piso nival se ubica alrededor de los 3.800 m de altitud y está vinculada a la línea de equilibrio reciente. Los glaciares de escombros activos del Cajón de la Casa de Piedra almacenan más agua que los glaciares descubiertos. Esta relación puede ser considerada como representativa para muchas cuencas pequeñas de la Cordillera de Santiago con altitudes menores a los 5.000 m.

Zona Sur y Austral

En esta zona no se han detectado glaciares de este tipo, no obstante existir una importante superficie de glaciares parcialmente recubiertos, en particular debido a la presencia de volcanes activos, que han generado grandes cantidades de lava y cenizas volcánicas, las que se han depositado sobre algunos glaciares, destacándose los del Volcán Chillán, Llaima y Villarrica (Rivera, 1989; Rivera *et al.*, 2006b), Volcán Michinmahuida (Masiokas *et al.*, 2009), y en parte por el arrastre de material morrénico (Aniya *et al.*, 2007b). Destacan también como glaciares con importante recubrimiento, los Glaciares Exploradores y Grosse ubicados en la ladera norte del CHN (Rivera *et al.*, 2007) y en el CHS el Glaciar Frías (Rivera & Casassa, 2004).

4.3.4. Balance de masa

Las variaciones de área y volúmenes resultan interesantes pues son maneras sencillas de obtener una buena idea de la evolución de la masa de un glaciar, que es la variable por excelencia para entender su dinámica. De este modo el balance de masa del glaciar resulta fundamental para enfrentar problemáticas relativas al estado y futuro de un glaciar. Existen diversas formas de estimar este balance de masa, ya sea estudiando su variación de volumen y densidad, lo que se conoce como el método geodésico. O cuantificando los procesos de acumulación y ablación en su superficie, lo que constituye el método clásico glaciológico. A continuación se muestra un recuento de los estudios de esta naturaleza realizados en el país.

Zona Norte

Las mediciones de balance de masa existentes para la Zona Norte, se han concentrado en los glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco, entorno al proyecto minero Pascua Lama. La medición directa de los balances de masa para los años hidrológicos 2003-2004 y 2004-2005, fueron realizadas mediante

el análisis de testigos de hielo y de una red de balizas instaladas previamente por la consultora Golder Associates (Vallon & Vincent, 2005).

Los resultados de las mediciones de acumulación de nieve presentados en el estudio para el período 2003-2005, muestra para el glaciar Guanaco valores de 1,62 m de nieve o 0,68 m eq. a. En el glaciar Toro 1, la acumulación medida es de 2,17 m de nieve o 0,91 m eq. a. En el glaciar Toro 2, 2,46 m de nieve, o 1,03 m eq. a., y en el glaciar Esperanza se registraron los mayores valores de acumulación, siendo estos superiores a 4,0 m de nieve y 1,8 m eq. a. Las mediciones de balance de masa estivales para los cuatro glaciares mencionados durante 2 años consecutivos, entre el 7 de Marzo de 2003 y el 25 de Marzo de 2005, presentan tendencias negativas (Vallon & Vincent, 2005).

Respecto a los procesos de ablación en los glaciares señalados, éstos se cuantificaron en función de la altitud de los lugares de observación para el período 2004 – 2005. Los datos presentan una gran dispersión y ninguna variación significativa de la ablación con respecto a la altitud. La fusión promedio de la nieve y hielo (promedio de 30 mediciones sobre 4 glaciares en 2 años) es de $1,4 \pm 0,2$ m eq. a. (Vallon & Vincent, 2005).

A partir del año 2006 se inició también el monitoreo de los glaciares Estrecho y Ortigas 1.

Recientemente, se ha presentado un plan de monitoreo de los glaciares del proyecto Pascua Lama para los glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco, Estrecho y Ortigas I (Barrick, 2008), con el cual se pretende llevar un seguimiento sistemático de la dinámica de estos glaciares durante la vida útil del proyecto. Se espera que pronto se cuente con nuevos resultados para estos glaciares.

Adicionalmente, hay estudios puntuales que aportan datos útiles para definir un balance de masa o algunos de sus componentes, destacándose el trabajo de Ginot *et al.*, (2002), donde se analiza un testigo de hielo de 36 m de largo hasta la base del glaciar del Cerro Tapado (5.536 m s.n.m., 30° 08'S, 69° 55'W) en la cuenca del Río Elqui (30° 08'S) con el objetivo de reconstruir las condiciones climáticas pasadas en el Norte de Chile. Dada la marcada estacionalidad de la precipitación en la región (invierno corto y húmedo, con numerosos períodos secos extendidos), se detectó una intensa ablación nival y procesos postdeposicionales, que tienen lugar en la superficie del glaciar durante los períodos estivales, como por ejemplo la sublimación y deposición seca (Ginot *et al.*, 2001 & 2006). Durante el período 1962-1999 se registró una acumulación anual neta de 316 mm y una pérdida anual de 327 mm eq. a. por sublimación deducida del análisis de ese mismo testigo de hielo. El análisis químico del testigo de hielo muestra un total inicial de acumulación anual de 539 mm eq. a. La variabilidad anual de la acumulación y sublimación puede exhibir una correlación con el Índice de Oscilación del Sur (SOI).

Dado que tras todo derretimiento parte del agua se recongela en el firn, se estableció que el derretimiento no es un factor preponderante en el balance de masa de estos glaciares. Sin embargo esto debe tomarse con cautela, dado que estaciones muy cercanas aguas abajo de estos glaciares han registrado caudales significativos para cuerpos de hielo de estas dimensiones, en

particular durante los meses de enero y febrero, lo que pareciera indicar que la fusión es un proceso activo y significativo.

Zona Centro

Peña *et al.*, (1986) muestra los resultados de estudios de caracterización del manto nival, mediciones de ablación y de balance de masa en el glaciar Echaurren Norte. Principalmente se estudió la densidad de la nieve en función de su edad, de la elevación y del transcurso del período de fusión.

Los datos de balance de masa recolectados en el Glaciar Echaurren Norte (33° 33'S, 70° 08'W), ubicado a 50 km al este de Santiago, a una altitud media de 3.750 m y con un área de 0,4 km², forman parte de un programa regular de la Dirección General de Aguas, abarcando un extenso período, desde 1975 hasta la fecha, y constituyen el registro de balance de masa más prolongado de un glaciar en Chile y en todo el Hemisferio Sur.

Las mediciones que se llevan a cabo se realizan con una red de 48 balizas complementadas con datos de densidad de nieve obtenidos en pozos estratigráficos. Los resultados para el período 1975 a 1993, presentados en Escobar *et al.*, (1995a y b) indican que la ablación durante el período de deshielo fue de 252 mm eq. a. anual promedio, con una acumulación invernal promedio de 280 mm eq. a. El balance neto para el período es positivo, pero existe una gran variación interanual. Este balance positivo del glaciar Echaurren Norte contrasta con el retroceso generalizado en otros glaciares de Chile central (Escobar *et al.*, 2000).

La Figura 4.10 muestra el balance de masa acumulado del Glaciar Echaurren actualizado a 2009, en él se ve una pérdida de más de 9 m eq. a. desde el año 1975 hasta 2000.

En Casassa *et al.*, (2006) se presentan datos actualizados de balance de masa para glaciares de la zona central del país. Estas investigaciones confirman las variaciones interanuales en las mediciones de balance de masa que se han detectado en los glaciares de Argentina (Leiva *et al.*, 1986; Leiva, 1999; Leiva & Cabrera, 1996; Leiva *et al.*, 2007) y Glaciar Echaurren, estrechamente relacionados a los eventos ENOS, con balances de masa negativos durante La Niña y positivos para los años El Niño (Leiva *et al.*, 2007). Con posterioridad al año 1988, las series de datos de balance de masa de los glaciares Piloto Este (32° 37' S, 70° 09' W) en Argentina, y del glaciar Echaurren Norte muestran tendencias negativas, concordantes con los retrocesos de los glaciares de la región, probablemente debidos al calentamiento regional observado (Rosenblüth *et al.*, 1997).

Recientemente la DGA, realizó un levantamiento LIDAR de topografía superficial en los glaciares de La Paloma (Diciembre 2008) y Echaurren Norte (Abril 2009), por medio de las empresas DIGIMAPAS S.A. y Terra Remote Sensing Ltda. respectivamente. Esta topografía de alta precisión permitirá obtener balances de masa a través del método geodésico en caso de una repetición del levantamiento o por comparación a otras fuentes.

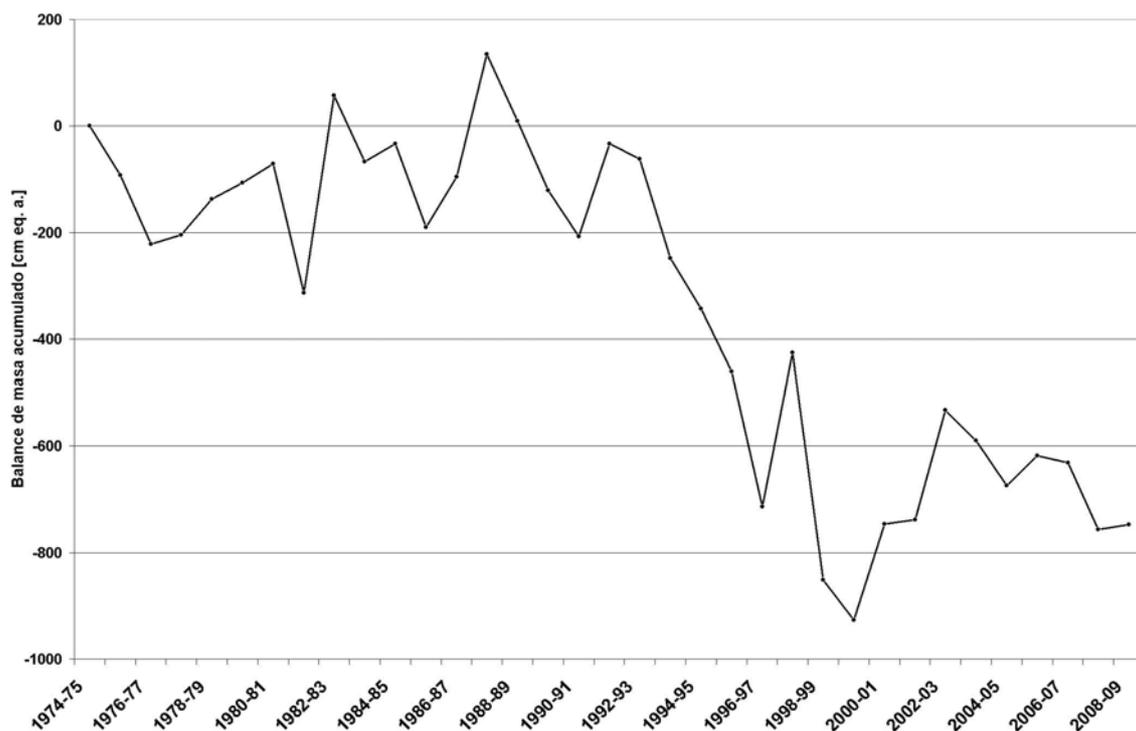


Figura 4.10: Balance de masa acumulado del Glaciar Echaurren Norte desde 1975 actualizado a 2009.

Zona Sur

En el Mocho-Choshuenco se está realizando un monitoreo que incluye balances de masa periódicos (Figura 4.11) desde el año 2003 (Rivera *et al.*, 2005), reportándose años con balance de masa negativo y otros, positivo (Bown *et al.*, 2007), demostrando importante variación interanual.

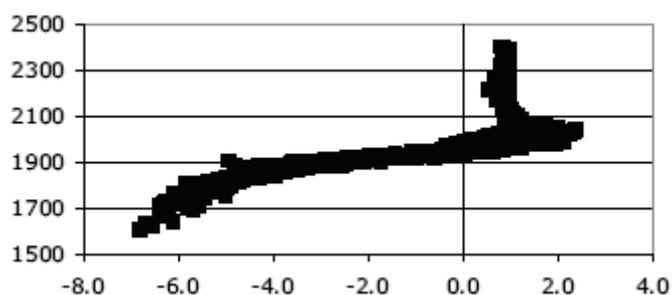


Figura 4.11: Balance de masa neto del glaciar del Mocho-Choshuenco en el período 2003/04 en metros eq. a. (eje horizontal) v/s altitud en metros. Los puntos representan valores de pixeles individuales cubriendo toda el área glaciar. La ELA para este año se localizó a 1956 ± 53 m.

Fuente: Rivera *et al.*, 2005.

Para el Glaciar Pichillancahue-Turbio del volcán Villarrica ($39^{\circ}25'S$, $71^{\circ}56'W$), se ha estimado un adelgazamiento del orden de un metro anual en el período 1961-2004 (Rivera *et al.*, 2006b). Se cree que en este volcán hay una gran influencia geotermal, lo que incidiría en una mayor ablación desde la base del glaciar, y en sentido opuesto, la depositación de cenizas en la superficie tendría un efecto positivo al aislar al glaciar de la radiación solar (Brock *et al.*, 2007).

Zona Austral

Las primeras estimaciones de balances de masa en la Patagonia chilena fueron resultado de las expediciones japonesas a partir de 1983, pero los estudios de este tipo son parciales y no hay mediciones sistemáticas. El único programa que pretendía ser permanente fue iniciado en los 90's en el Glaciar de Los Tres (un glaciar pequeño aledaño al CHS), el cual lamentablemente no pudo ser continuado (Popovnin *et al.*, 1999). Existen datos de balance de masa para el Glaciar Soler en Campo de Hielo Norte (Fukami & Naruse, 1987), para el Glaciar Tyndall en CHS (Takeuchi *et al.*, 1995), para los glaciares San Rafael, Upsala y Perito Moreno (Warren *et al.*, 1995; Takeuchi *et al.*, 1995; Naruse *et al.*, 1995; Takeuchi *et al.*, 1996) y para el Perito Moreno (Aristarain & Delmas, 1993).

Los estudios de balance de masa no se han extendido mayormente desde esa época cómo sucedió con otro tipo de investigaciones, y hasta el momento sólo se han continuado los trabajos que aportan datos de balance de masa en el Glaciar Tyndall por Shiraiwa (2002) y Kohshima *et al.*, (2007) cuyos resultados se mencionan en la sección de testigos de hielo. También se han incorporado algunos estudios de balance de masa en el Glaciar Chico (Schwikowski *et al.*, 2006), donde Rivera (2004) midió una pérdida de masa de $1,73 \text{ km}^3 \text{ eq. a.}$ entre 1975 y 2001.

Una síntesis de los datos obtenidos por modelos, testigos de hielo y mediciones in situ, puede encontrarse en Casassa *et al.*, (2006), donde se recopilan datos de 15 glaciares de los cuales 10 se encuentran en la Zona Austral, todos ellos con balance de masa positivo entre 7 y $1.540 \text{ cm a}^{-1} \text{ eq. a.}$ a excepción del Glaciar Martial Este en la sección Argentina de Tierra del Fuego que muestra un balance de $-5 \text{ cm a}^{-1} \text{ eq. a.}$ Esta tendencia positiva en el marco de retroceso generalizado, se explica pues la mayoría provienen de estudios de testigos de hielo o tan sólo una estaca, todos los cuales han sido emplazados en zonas de acumulación y no son representativos del balance de masa total de los glaciares.

En la Subzona Austral B, los estudios se reducen a Gran Campo Nevado (Möller *et al.*, 2007), donde se encontró entre los años 1984 y 2000, un engrosamiento neto de las zonas de acumulación, el que no compensa un pronunciado adelgazamiento en las zonas de ablación, produciendo un balance medio final de $-0,35 \text{ m a}^{-1} \text{ eq. a.}$ en el período.

4.3.5. Balance de energía

El balance de energía es el vínculo entre las condiciones meteorológicas y el balance de masa, pues permite estudiar la cantidad de energía neta recibida por el glaciar, lo que a su vez determina la tasa de derretimiento de éste y con ello su aporte a la escorrentía. Entender en detalle los procesos energéticos del glaciar resulta además un elemento fundamental para modelar su respuesta frente a posibles escenarios climáticos futuros.

Zona Norte

En referencia al balance de energía en glaciares, Schotterer *et al.*, (2003) analizó los efectos de la sublimación y del derretimiento en la información obtenida desde testigos de hielo en el glaciar del Cerro Tapado. Los resultados obtenidos en dicho trabajo indican pérdidas diarias de ~2 mm eq. a. (~5 mm de nieve) durante el período de sequía seguido al El Niño 1997/1998. A partir de la cuenta de las capas anuales de hielo y de las dataciones directas se infirió que la mayor parte del hielo acumulado sobre el glaciar es de edad inferior a 100 años, sin embargo, las variaciones isotópicas y químicas al menos en la base del testigo de hielo del Cerro Tapado apuntan a condiciones climáticas diferentes a las ocurridas en siglos recientes.

Al igual que para los estudios de balance de masa, se ha presentado un plan de monitoreo para medir el balance de energía de los glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2, Guanaco, Estrecho y Ortigas I (Barrick, 2008), se esperan nuevos resultados derivados de dichos estudios.

Zona Centro

Uno de los primeros estudios de balance de energía en un glaciar de la zona de Chile central, fue realizado por Fuenzalida *et al.*, (1978) en el glaciar Echaurren Norte. La investigación consistió en realizar mediciones micrometeorológicas durante los meses de febrero y marzo de 1978.

Un estudio similar orientado a la estimación de tasas de derretimiento de nieve, fue desarrollado por Peña *et al.*, (1985a) donde 64 días de datos micrometeorológicos combinados con mediciones de ablación de nieve entre los 3.750 y 4.600 m de altitud en los Andes Centrales de Chile, fueron utilizados para testear y calibrar fórmulas empíricas de ablación. Concluyendo que las formulas utilizadas en otras regiones del mundo no son adecuadas para la zona de estudio, proponiéndose nuevas expresiones empíricas que consideran los flujos radiativos y la temperatura del aire.

Un resultado similar al de Peña *et al.*, (1985a) fue obtenido recientemente, Pellicciotti *et al.*, (2008) estudiaron el balance de energía y el régimen de derretimiento en el glaciar Juncal Norte utilizando modelos de diferente complejidad, principalmente tomando datos meteorológicos de estaciones automáticas (AWS) para investigar la relación glaciar-clima y testear distintos modelos de ablación. Los resultados de dicha investigación indican que el albedo de la superficie permanece prácticamente constante para las superficies de hielo y nieve debido a la escasez de precipitaciones, encontrándose así que los cambios de albedo producto del envejecimiento de la nieve no son significativos en este glaciar. También se demuestra que la radiación de onda corta neta es el componente dominante en el balance de energía de los glaciares de esta región, confirmando los resultados de Corripio (2003).

Recientemente, Corripio *et al.*, (2008) y Corripio & Purves (2005) modelaron los impactos de los cambios climáticos en los glaciares de montaña y en los recursos hídricos de los Andes Centrales. La investigación se basó en el uso del modelo SnowDEM (Snow Distributed Energy Balance Model). El modelamiento sugiere que, a pesar de la escasez de datos, la disponibilidad de

agua de derretimiento tenderá al aumento a mediano plazo, con rápidas desintegraciones de los glaciares a largo plazo.

Zona Sur

Como parte del programa de monitoreo en el Volcán Villarrica, se realizó un balance de energía superficial, incluyendo mapas diarios de albedo obtenidos a partir de fotografías terrestres y mediciones GPS. El modelo se aplicó durante un período de 12 días (Rivera *et al.*, 2008b). Este trabajo se complementa con el balance de energía medido en el mismo glaciar por dos veranos consecutivos, usando dos estaciones meteorológicas automáticas (AWS) instaladas sobre roca y hielo por Brock *et al.*, (2007), donde se encontraron tasas de derretimiento en verano de entre 1,3 y 1,6 metros mensuales, además de estudiarse en detalle el efecto en el balance de energía de la tefra depositada sobre el glaciar en función de su espesor.

Zona Austral

Al igual que con los balances de masa, los primeros estudios de detalle de balance de energía se realizaron en la expedición japonesa de 1983 y subsiguientes, donde se incluyeron estudios de los glaciares Soler y San Rafael (Ohata *et al.*, 1985a; Ohata *et al.*, 1985b; Fukami & Naruse, 1987; Kobashashi & Saito, 1985). En los 90's, los glaciares Perito Moreno, Tyndall y finalmente Exploradores, fueron añadidos a las investigaciones del grupo japonés (Takeuchi, 1995; Aniya *et al.*, 2005). Recientemente se han realizado también estudios en el Glaciar Lengua en Gran Campo Nevado (Schneider *et al.*, 2007), único en la Subzona Austral B. Sin embargo, todos los estudios realizados hasta ahora son espacial y temporalmente muy limitados, no existiendo datos sistemáticos en ninguno de los sitios mencionados.

4.3.6. Mediciones geofísicas

El glaciar es un sistema sumamente dinámico en el cual los procesos sub superficiales y basales juegan un rol fundamental. Para entender estos procesos es necesaria la aplicación de diversas técnicas geofísicas que permiten entender la estructura interna, el espesor y la topografía subglaciar que condiciona el flujo. Las principales técnicas utilizadas son los radares de penetración terrestre (GPR), la sísmica, la batimetría acústica y la gravimetría, entre otras técnicas.

Zona Norte

En el glaciar del Cerro Tapado, un equipo de investigadores pertenecientes a la Universidad de Berna, el Paul Scherrer Institute (PSI) y de la Universidad de Chile, llevaron a cabo un estudio glaciológico que ha permitido detectar espesores con instrumentos de precisión (Rivera *et al.*, 2001). Este se llevó a efecto en febrero de 1999 permitiendo detectar espesores máximos de hielo cercanos a 42 m en la cabecera del glaciar.

La medición de espesor obtenida indirectamente de la extracción del testigo de hielo, aunque poco significativa, sería un aporte fundamental para la estimación del volumen de recursos hídricos en estas latitudes, así como para la

determinación de los cambios en el adelgazamiento o engrosamiento de la masa de hielo a futuro (Acuña, 2001).

En Milana & Güell (2008) se presentan los resultados de la sísmica de refracción aplicada al estudio de dos glaciares de roca adyacentes pertenecientes al sistema de glaciares de El Tapado, en la cuenca del Elqui. Uno de los cuerpos analizados tendría origen glaciogénico, debido a que se generaría por la transformación de un glaciar descubierto convencional, que progresivamente va adelgazando y perdiendo hielo, hasta convertirse en uno principalmente cubierto con material rocoso, pero que posee un núcleo de hielo. El otro glaciar rocoso estudiado, más pequeño, es originado en un circo con alimentación proveniente de avalanchas de nieve y roca, por lo que se interpretó como de tipo/origen criogénico. El estudio determinó que las diferencias genéticas de ambos glaciares no se reflejan en estructuras desiguales de las lenguas terminales para ambos glaciares rocosos, pero si muestran importantes contrastes en las características internas determinadas por la sísmica de refracción. Otro aporte del estudio es la evidencia sustentada de que los glaciares rocosos pueden tener diferentes orígenes (glaciogénicos o criogénicos) a pesar de encontrarse adyacentes y mostrar la misma estructura externa.

Para la Empresa Nevada a cargo del proyecto Pascua Lama, la consultora Golder Associates también ha llevado a cabo mediciones de espesor de hielo con radar y GPR, junto a mediciones de velocidad de flujo de hielo con GPS. El informe de la empresa consultora presenta los resultados de un perfil longitudinal realizado sobre el glaciar Toro 1, utilizando un radar de penetración terrestre (GPR, Ground Penetrating Radar) para medir el espesor del hielo. El perfil se trazó entre los 5.080 m y 5.130 m de altitud, detectándose un espesor máximo de 21 m, cuya principal característica es una tendencia a la disminución del espesor a medida que el glaciar va adquiriendo mayor altitud, presentándose un mínimo de 4 m en los 5.130 m (Golder Associates, 2005).

Rivera *et al.*, (2001), aplicó técnicas de radar terrestre GPR en el Glaciar Tapado, donde a través del análisis de la potencia de reflexión interna y de fondo, permitió caracterizar una condición fría sin deslizamiento basal para el glaciar Tapado,

Zona Centro

En la zona central en Chile se han realizado algunos estudios de medición de espesor, entre ellos el de Rivera *et al.*, (2001), donde se presentan mediciones de espesor en algunos glaciares ubicados entre los 31° y 41° de latitud sur (es decir incluyendo glaciares de la Zona Sur).

La información fue obtenida mediante técnicas de radar en cinco glaciares. En todos los casos, se logró la penetración de la totalidad del hielo, lo que implica que la presencia de agua supra, intra y subglacial no afectó significativamente las señales.

El sistema se probó tanto en superficies glaciares descubiertas, como en zonas con cubierta detrítica, la que si bien generó cierto nivel de ruido en los registros no impidió la penetración de las señales hasta el fondo subglacial,

obteniéndose espesores máximos de 230 m en la zona de ablación del glaciar Juncal Norte. El análisis de la potencia de reflexión interna y de fondo, permitió caracterizar una condición temperada para el glaciar Juncal Norte. Las mediciones de espesor de hielo realizadas con este sistema de radar tienen una precisión bastante mejor que otros métodos de prospección geofísica empleados en Chile (1-6%), permitiendo un cálculo más confiable y preciso de volumen equivalente en agua existente en estado sólido en la cordillera.

En esta zona se han podido medir espesores continuos de hielo en los glaciares Juncal Norte y San Francisco, en ambos casos se pudo penetrar la totalidad de hielo, presentándose el máximo de espesor en la zona de ablación del glaciar Juncal Norte (230 m de espesor).

Bolius *et al.*, (2006) realizaron dos perfiles de espesor de hielo en la zona de acumulación del glaciar Esmeralda, a 5.330 m de altitud. Los valores máximos de espesor de hielo fueron de 92 m y de 99 m.

Zona Sur

Las primeras experiencias de medición de espesores en la zona fueron llevadas a cabo utilizando radares en combinación con gravimetría, determinándose el espesor del hielo de la caldera del Volcán Sollipulli, encontrándose valores de hasta 650 m, conteniendo esta caldera aproximadamente 6 km³ de hielo (Gilbert *et al.*, 1996).

Sobre los glaciares más estudiados de la región se han realizado también mediciones de espesor de hielo, utilizando radares terrestres de baja frecuencia (Casassa *et al.*, 2004), las que han indicado espesores de hielo máximos de 190 m en el Pichillancahue-Turbio y 270 m en el Mocho (Rivera *et al.*, 2006a). También se ha experimentado con Ground Penetrating Radar (GPR) de frecuencias mayores (400 MHz), los que se han empleado para detección de grietas y estructura interna del hielo en el Volcán Mocho (Zamora *et al.*, 2007).

Se han realizado modelos para estimar espesores pasados, basándose en parámetros actuales de los glaciares y sus extensiones máximas registradas en morrenas terminales, incluyendo las más recientes de la pequeña era de hielo que tuvo lugar a finales del siglo XIX (Bravo *et al.*, 2006), encontrándose por ejemplo, para el Glaciar Pichillancahue un espesor medio de 58 m, consistente con los valores encontrados con GPR (Rivera *et al.*, 2006a).

El único estudio en la Subzona Sur B fue realizado el año 2000, ocupando radares terrestres de baja frecuencia en el Glaciar Casa Pangué del Monte Tronador, donde se obtuvieron valores de hasta 176 m de espesor (Rivera *et al.*, 2001).

Zona Austral

Las primeras mediciones de este tipo datan de los trabajos de Lliboutry (1956), donde se señalan, por ejemplo, velocidades de flujo en el Glaciar Grey, basándose en el desplazamiento observado de las rocas depositadas en su

superficie por un antiguo derrumbe, de lo que deriva un desplazamiento medio de 450 m a^{-1} entre 1946 y 1956.

Este tipo de mediciones no fueron la excepción para las expediciones japonesas, que usando el seguimiento de balizas en terreno, en 1983/84 estudiaron el flujo de hielo en el Glaciar Soler en el CHN y en 1985/86 incorporaron al Glaciar San Rafael (Naruse, 1985; Naruse, 1987), encontrándose para el primero velocidades de 840 m a^{-1} en la zona de acumulación y de 84 m a^{-1} cerca del frente, mientras que para el San Rafael la situación era opuesta, con 4.748 m a^{-1} a un kilómetro del frente y 6.209 m a^{-1} en el frente mismo. Luego durante la campaña de 1990, estudiaron también el flujo de hielo en el Glaciar Tyndall en el CHS (Kadota *et al.*, 1992) encontrando en un perfil transversal, velocidades desde $25,6 \text{ m a}^{-1}$ en el borde hasta $186,3 \text{ m a}^{-1}$ $2,5 \text{ km}$ al interior del glaciar. Volviendo al Soler en 1998 y 2003 (Yamaguchi *et al.*, 2003; Aniya & Naruse, 2001; Aniya *et al.*, 2002) se encontraron velocidades mayores a las de 1985 en todos los puntos estudiados, siendo estas diferencias de hasta $47,5 \text{ m a}^{-1}$. También se estudió con profundidad el Glaciar Exploradores el 2005 (Aniya *et al.*, 2005), encontrando velocidades máximas de 146 m a^{-1} . Los trabajos en el Tyndall fueron continuados por Raymond *et al.*, (2005) y también con campañas en terreno del CEQUA (Araos *et al.*, 2007).

Pionero en la aplicación de técnicas de interferometría de radar desde plataformas satelitales en esta zona, fue el trabajo de Rignot *et al.*, (1996a & 1996b), sobre los glaciares San Rafael, San Quintín, Gualas y Reichert, determinando velocidades superficiales con una precisión de $1,5 \text{ m a}^{-1}$ lo que se ha extendido a los glaciares Europa, Penguin y Perito Moreno, entre otros. (Rott *et al.*, 1998; Foster *et al.*, 1999; Stuefer, 1999; Floricioiu *et al.*, 2008). Entre los resultados de estos estudios cabe destacar la gran variabilidad de velocidades de flujo encontrada, y la utilidad que demostraron este tipo de mediciones para determinar líneas de flujo, campos de velocidades y establecer divisorias de cuencas. Entre los resultados más recientes (Floricioiu *et al.*, 2008) se encuentran las velocidades frontales máximas de algunos de los principales glaciares que caen al Lago Argentino desde CHS, encontrándose valores de $3,8 \text{ m}$ diarios en el Perito Moreno y de $5,6 \text{ m}$ diarios en el Upsala.

Otros estudios geofísicos han sido realizados con el propósito de determinar el espesor del hielo en distintos transectos en Campo de Hielo Norte y Sur. La primera técnica utilizada fue la gravimetría, exitosamente aplicada en el plateau del CHN, a los glaciares Soler y Nef (Casassa, 1987), encontrándose espesores de $1.460 \pm 500 \text{ m}$, $575 \pm 85 \text{ m}$ y $1.000 \pm 250 \text{ m}$ respectivamente.

Luego, de manera más sostenida, se realizaron estudios utilizando radares de penetración terrestre en el glaciar Tyndall (Casassa, 1992; Casassa & Rivera, 1998; Rivera & Casassa, 2002; Godoi *et al.*, 2003). Ahí, Casassa (1992) registró un máximo de 616 m de espesor pero debido a limitaciones técnicas no fue posible penetrar el hielo a lo largo de todo el perfil, por lo que se esperarían espesores máximos mayores. Sin embargo, en mediciones más recientes Godoi *et al.*, (2003) encontró un valor máximo muy similar de 617 m .

También se han realizado estudios de espesor con métodos sísmicos, obteniendo resultados positivos en el Glaciar Perito Moreno en Argentina, donde en una transecta de 8 km se encontró un espesor máximo de 720 m (Rott *et al.*, 1998), lo que en combinación con los campos de velocidades determinados por interferometría de radar, permitieron obtener una primera aproximación al flujo neto de hielo en una sección transversal del glaciar.

Mediciones batimétricas en las proximidades de glaciares son de gran importancia, pues permiten entender de manera cabal la dinámica de los retrocesos observados durante las últimas décadas y su interdependencia con la topografía subglaciar y la línea de varadura/flotación. Sistemas acústicos han permitido mapear la sedimentación reciente y relacionarla con los cambios climáticos recientes (Boyd *et al.*, 2008; Koppes *et al.*, 2009), determinándose para el Lago O'Higgins, en la zona abandonada por el retroceso del glaciar homónimo, una profundidad de 800 metros, la mayor reportada para un lago en las Américas y una de las mayores del mundo (Casassa *et al.*, 2007b).

4.3.7. Testigos de hielo

Zona Norte

Los principales estudios de testigos de hielo en la Zona Norte del país han sido realizados por Ginot *et al.*, (2001; 2002; 2006) y Schotterer *et al.*, (2003), con el objetivo de aportar con información acerca de los balances de masa y energía, cuyos resultados fueron descritos anteriormente en los puntos correspondientes. A éstos hay que agregar a Boliuss *et al.*, (2006), quienes extrajeron testigos de hielo someros desde el glaciar La Ollada en el Cerro Mercedario (31° 85' S, 70° 07'W; 6.070 m s.n.m.) en Argentina. Una datación preliminar del testigo mediante la cuenta de capas anuales para un período de 17 años (1986–2002), entregó un promedio de acumulación neta de 0,45 m a⁻¹ eq. a. Los análisis glacioquímicos indican también que los paleo-registros del glaciar La Ollada se encuentran bien preservados, en contraste a los del glaciar Esmeralda donde el registro se encuentra influenciado por formaciones de agua derretida y percolada.

Zona Centro

En enero de 2003, Boliuss *et al.*, (2006) extrajeron un testigo de hielo somero desde el glaciar Esmeralda (33° 81'S - 70° 81'W; 5.300 m s.n.m.) del Cerro El Plomo. El objetivo de esta investigación fue obtener información para una reconstrucción paleoclimática en una región fuertemente influenciada por ENOS. En esta área los montos de precipitación se encuentran fuertemente correlacionados al Índice de Oscilación del Sur, con valores mayores durante la fase El Niño. Un análisis preliminar del testigo muestra que el registro se encuentra influenciado por formaciones de agua derretida y percolada.

Zona Sur

La única experiencia publicada al respecto, fue llevada a cabo en los Volcanes Mocho-Choshuenco y Osorno, en la que dos testigos someros de aproximadamente 10 metros en hielo/neviza fueron analizados en su componente biológica, determinando a partir de ellos un balance de masa en la

cumbre del Volcán Osorno de 1,51 m eq. a. para el período 2004-2005, mientras que para el Volcán Mocho-Choshuenco, se encontraron tres capas anuales encontrándose un balance de masa medio de 0,69 m eq. a. para el período 2002-2005. Ambos balances de masa corresponden a las partes altas de las zonas de acumulación, por lo que los valores positivos no entran en conflicto con las tendencias al retroceso de estos glaciares, las que dan cuenta de un balance total neto negativo.

Estos valores fueron validados con medidas independientes en el Mocho-Choshuenco, estableciendo así la utilidad de este tipo de estudios para la determinación de balances de masa (Santibáñez *et al.*, 2008). Si bien han existido recientemente otras campañas con el propósito de extraer testigos someros de hielo en los glaciares de esta zona, no existen aún publicaciones al respecto.

Zona Austral

En esta zona se han extraído del orden de diez testigos de hielo con diferentes propósitos relacionados con la determinación de la acumulación de nieve, la reconstrucción paleoclimática y el estudio de la variabilidad climática en Patagonia. El primer testigo fue recuperado por la expedición Japonesa de 1985/86 en el área de acumulación del CHN, alcanzando una profundidad de 37,6 m (Yamada, 1987), aproximadamente 27 m eq. a., en el se encontró una secuencia estratigráfica donde se identificaron dos veranos, infiriéndose para el período entre los veranos 1983-84 y 1984-85 una acumulación neta de 3.450 mm eq. a. En la zona de acumulación del glaciar Perito Moreno, en Argentina, Aristarain & Delmas (1993) extrajeron un testigo de 13,7 m a una altitud aproximada de 2.000 m. En 1996, obtuvieron también un testigo de 14,5 m desde la zona de acumulación del Glaciar Nef, CHN a 1.756 metros de altitud (Matsuoka & Naruse, 1999), de él se derivaron acumulaciones netas bastante elevadas, encontrándose valores de 17,8 m a⁻¹ en el período 1997-98 a 1998-99 y de más de 11,0 m a⁻¹ en el período 1998-99 a 1999-2000.

La siguiente experiencia fue realizada también por japoneses en el Glaciar Tyndall en 1999, obteniendo un testigo de 45,97 m (Aniya & Naruse, 2001; Shiraiwa, 2002; Kohshima *et al.*, 2002; Kohshima *et al.*, 2007; Godoy *et al.*, 2002), del cual se derivó una acumulación neta de 12,9 metros eq. a. de invierno a invierno entre los años 1998 y 1999. El principal problema encontrado en el análisis de los testigos de hielo, proviene del carácter temperado de los glaciares estudiados, con abundante percolación de agua, la que borra gran parte de la información contenida en el hielo. Es por ello, que se inició la búsqueda de hielo frío a mayores elevaciones, con la esperanza de encontrar datos útiles para reconstrucciones paleoclimáticas. En este sentido, se realizaron tres perforaciones en la zona del Cerro Gorra Blanca, CHS (Schwikowski *et al.*, 2003; Schwikowski *et al.*, 2006). Los dos testigos más bajos sufrían de abundante percolación, pero el tercero, de 5 m y extraído a 2.300 m de altitud, conservaba más información y de él se derivó una acumulación neta anual de 0,97 m eq. a. anuales.

Tras varias campañas conjuntas del IRD (Francia) y el CECS, se logró la extracción de testigos someros a gran altitud en los Montes San Valentín (2005) y San Lorenzo (2006). En el primero de ellos se perforó 50 m,

encontrándose hielo en muy buena situación para estudios paleoclimáticos y se derivó una acumulación media de $0,19 \text{ m a}^{-1}$ eq. a. desde el año 1960.

En tanto, el Paul Scherrer Institut (Suiza) en conjunto con el CECS, extrajeron en 2006 un testigo de 50 metros en una zona elevada del Monte Mariano Moreno en Campo de Hielo Sur (Schlappi *et al.*, 2008; Schwikowski *et al.*, 2007).

Una perforación excepcional fue sin duda la realizada el año 2007 por el IRD y el CECS nuevamente en el Monte San Valentín, esta vez alcanzando una profundidad de 122 metros y con una excelente conservación del hielo (Vimeux *et al.*, 2008). Se espera realizar a este testigo análisis similares a los realizados al testigo somero (15,3 m) extraído en el mismo sitio el 2005. Entre estos análisis se incluye perfiles de concentración de especies químicas utilizando cromatografía iónica, composición isotópica (Oxígeno 18 y Deuterio) y mediciones de radioactividad natural y artificial mediante espectrometría gamma de bajo nivel. La datación se realizará en base a tres técnicas: decaimiento radioactivo natural del Plomo 210, identificación de horizontes radiactivos conocidos (pruebas nucleares) y el conteo de ciclos de depositación de polvo continental. Debido a la gran cantidad de información contenida en el testigo, no existen aún resultados publicados de estos análisis.

4.3.8. Hidrología glaciar

Zona Norte

En esta zona no se registraban estudios detallados de la hidrología glaciar que relacionen el aporte del derretimiento de los cuerpos de hielo a los caudales, hasta los estudios realizados por el Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEAZA) en las cuencas del Norte Chico, donde Favier *et al.*, (2009) estudió rutas de nieve, caudales y estaciones en altura, para determinar el rol de algunos glaciares y la cobertura de nieve. En este estudio se estima que con el régimen actual de precipitaciones y temperaturas, la criósfera no es estable, y contribuye la no despreciable descarga de un 5-10% de agua a la cuenca del Embalse La Laguna. Ellos estiman que el retroceso de glaciares determinado por Rivera *et al.*, (2002) en las últimas décadas, no ha generado un incremento de caudales, debido a la paralela reducción de área glaciar.

Zona Centro

Según Peña & Nazarala (1987), utilizando un modelo de simulación de derretimiento de nieve durante las sequías de los años 1968-1969 y 1981-1982, el aporte de los deshielos a los caudales del Río Maipo puede llegar hasta un 67% en veranos de años secos.

Pellicciotti *et al.*, (2007) estudió los caudales del Río Aconcagua en dos estaciones, detectando una disminución de caudales en las últimas décadas, lo que parecía estar en contradicción con las tendencias de retroceso glaciar de la zona.

Pellicciotti *et al.*, (2008) estudiaron el Glaciar Juncal Norte de $7,6 \text{ km}^2$, utilizando la información de dos estaciones meteorológicas automáticas,

probaron diferentes modelos de balance energético con el propósito de determinar correctamente los valores de ablación del glaciar, los que tienen directa relación con el volumen de agua descargado. Lograron un método que para este caso particular ajustó la ablación con errores del 2% a lo largo de los dos meses estudiados, donde el valor absoluto era de 3.695 mm eq. a. Propusieron a su vez una variante que predeciría con más precisión la ablación observada.

Basándose en el estudio de Peña *et al.*, (1985a) y otras aproximaciones empíricas, Peña *et al.*, (1985b) propone un método de evaluación de crecidas por derretimiento de nieve para la zona central del país, trabajo en el que se incluye una modelación de la esorrentía y dos métodos empíricos de estimación de tasas de derretimiento de nieve.

Zona Sur

La ausencia de estudios en esta zona se debe probablemente al efecto combinado de la escasez relativa de glaciares y la abundancia relativa de agua, lo que hace suponer que el aporte glaciar a los recursos hídricos de la zona no es de importancia, lo que aún no ha sido rigurosamente determinado.

Zona Austral

Los estudios aquí se encuentran principalmente relacionados a los Campos de Hielo Norte y Sur. Los primeros estudios locales de la hidrología asociada a los glaciares de la zona, fueron producto de las observaciones realizadas en las prolíficas expediciones japonesas de 1983/84 y 1985/86, las que se realizaron en el Glaciar Soler (Saito & Kobayashi, 1985; Fukami & Escobar, 1987). Contemporáneamente, la DGA realizó el primer estudio extensivo a toda la región que rodea los Campos de Hielo Patagónicos (Peña & Escobar, 1987), en el que se realizaron estimaciones preliminares de descarga, se estudió la variación estacional de los caudales y la importancia de las crecidas de origen glaciar en el área.

Un segundo estudio se publicó en 1992, como colaboración entre la DGA y el equipo de glaciólogos japoneses (Escobar *et al.*, 1992), en el que se estudiaron los balances de agua de la región, la delimitación de cuencas hidrográficas en cartografía 1:250.000, información hidrológica, mapas de distribución de temperatura y precipitación dentro y alrededor de los Campos de Hielo, con lo que se obtuvo un valor de la precipitación media anual de 6.700 mm para el CHN y 7.000 mm para el CHS, también se obtuvo flujos de descarga, los que para el Campo de Hielo Norte resultaron de $890 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y de $2.980 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el CHS, siendo el flujo de descarga anual de $3.380 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para toda la región como conjunto. Las descargas específicas resultaron de $0,203 \text{ m}^3\text{km}^{-2}$ para el CHN y de $0,215 \text{ m}^3\text{km}^{-2}$ para el CHS.

Desde entonces, nuevos estudios locales se realizaron en el Glaciar Soler (Aniya & Naruse, 2001), Glaciar Nef (DGA, 2008a) y el Glaciar Exploradores (Aniya *et al.*, 2007a & b).

Masiokas *et al.*, (2008) presenta un estudio que considera algunos glaciares de la región fronteriza de la Zona Austral, donde vincula variaciones

meteorológicas y glaciares con los caudales de descargas de los principales ríos de la zona. Se propone un “índice climático” calculado en función de los registros de precipitaciones invernales y temperaturas de verano, utilizando medias anuales para estas variables, se observa que dicho índice reproduce de manera satisfactoria las características del retroceso de los glaciares estudiados y de los flujos medios regionales anuales de descarga durante el siglo XX.

Finalmente, un estudio más sistemático, encargado por la DGA, se realizó el año 2008 en la cuenca del Glaciar Nef con el propósito de obtener un balance hidrológico de la zona. Para ello se realizaron dos campañas de medición con un sistema LIDAR aerotransportado, obteniéndose modelos digitales de terreno de una porción del glaciar para Mayo y Octubre de 2008, infiriéndose de ellos el balance de masa de invierno de 11,2 m eq. a. entre la cota 960 m s.n.m. y la cota 1.800 m s.n.m. en la parte alta de la zona de acumulación. También se instalaron balizas en la zona de ablación del glaciar para su futura remediación. Se calculó la densidad de la nieve obteniéndose 507 kg m⁻³ a 1.135 m de altitud. Un aforo realizado el 5 de Noviembre de 2008 arrojó un caudal de 88,4 m³ s⁻¹.

4.3.9. Estudios integrados o revisiones sistemáticas

Zona Norte

Las únicas revisiones integradas de glaciares para esta región, son los trabajos históricos de Lliboutry (1956), USGS (1998), Rivera *et al.*, (2000) y más recientemente, Rivera *et al.*, (2008a) y Masiokas *et al.*, (2009). Todas estas revisiones mencionan las características elementales de la distribución geográfica de los glaciares de la Zona Norte y se presentan resultados de los inventarios existentes, pero en general se tratan tangencialmente los Andes áridos de Chile, por lo que se requiere una revisión mucho más exhaustiva, que incluya los glaciares descubiertos, y principalmente los rocosos de la zona. Es necesario destacar a Favier *et al.*, (2009), por su síntesis climática combinada con caudales y comportamiento de glaciares en el Norte Chico.

Zona Centro

La síntesis presentada en Rivera *et al.*, (2000) da cuenta de la situación actual de los estudios glaciológicos realizados en esta zona del país, tomando en cuenta los inventarios, las variaciones recientes, las mediciones de espesor y de velocidades.

En general se puede apreciar que hay pocos estudios y que la mayoría se concentra más al sur, donde las superficies glaciares son mucho mayores, pero los efectos de los cambios climáticos en los glaciares, pueden tener menores repercusiones para la población, que los que se esperan en Chile Central. Una revisión reciente de estudios sobre los Andes es presentada en Casassa *et al.*, (2007a).

Zona Sur

En esta zona no hay revisiones enfocadas a abarcar todos los aspectos glaciológicos, y sin duda cuenta con características glaciológicas muy diferentes a las encontradas en la alta cordillera central o en los extensos campos de hielo patagónicos. Sin embargo existen estudios sistemáticos que han considerado esta región glaciológica desde algunas perspectivas particulares, entre ellos se cuentan Bown & Rivera (2007), considerando los cambios climáticos de la región en conjunto con el comportamiento observado de sus glaciares, y en la misma línea se puede mencionar también a Zenteno (2008).

Zona Austral

Las revisiones más recientes abarcan temas como variaciones recientes (Aniya *et al.*, 2007a; Aniya *et al.*, 1997; Rivera *et al.*, 2000), glaciares con calving (Warren & Aniya, 1999; Skvarca & Naruse, 1997), contribución al aumento del nivel del mar (Aniya, 1999; Rivera *et al.*, 2002; Rignot *et al.*, 2003), a las que se suma la revisión de todos los aspectos glaciológicos de los Hielos Patagónicos presentada por Warren & Sugden (1993). Más recientemente, Masiokas *et al.*, (2009) contiene una recopilación de cambios históricos de glaciares del lado argentino y chileno de todos los Andes. Otras síntesis de la importancia de los glaciares patagónicos y los efectos de los cambios climáticos puede ser encontrada en Naruse (2006), Skvarca (2002), Skvarca & De Angelis (2002), Rivera *et al.*, (2002) y USGS (1998).

Sin duda hacen falta nuevas revisiones, que además de incorporar la gran cantidad de información generada en estos últimos años, consideren el nuevo enfoque dado por los avances en el estudio del cambio climático.

4.4. Análisis de las redes nacionales de monitoreo hidrometeorológico en cuencas con aportes glaciares.

En base a la información de los inventarios existentes, es posible establecer que en Chile existen 101 subcuencas (pertenecientes a 38 cuencas) con aporte glaciar en su escorrentía. Estas subcuencas suman un total de 262.921 km².

A continuación se presenta un análisis de las redes de monitoreo meteorológico y fluviométrico de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). El análisis considera las estaciones ubicadas en alguna de las subcuencas con aporte glaciar.

4.4.1. Red fluviométrica DGA

De las 101 subcuencas con aporte glaciar, sólo en 45 (44%) existen actualmente estaciones de monitoreo fluviométrico, las que llegan a un total de 130. Algunas de estas estaciones funcionan desde 1918 hasta la fecha, pero recién en la década de los 80's el 50% de ellas estaban ya en operación. La Tabla 4.6 muestra todas las subcuencas con aporte glaciar identificadas según los inventarios actuales, se indica también el código de la subcuenca y la cuenca correspondiente, así como el número de estaciones fluviométricas en cada subcuenca y los subtotales por zona.

Dado que el propósito de estas estaciones no corresponde al monitoreo glaciar, se tiene que de estas 130 estaciones, la gran mayoría se encuentra a una gran distancia de las fuentes glaciares, lo que reduce considerablemente la correlación entre los caudales medidos y el aporte real de los glaciares a la escorrentía, reduciéndose de manera importante la utilidad de estos datos para el modelamiento hidrológico de los glaciares.

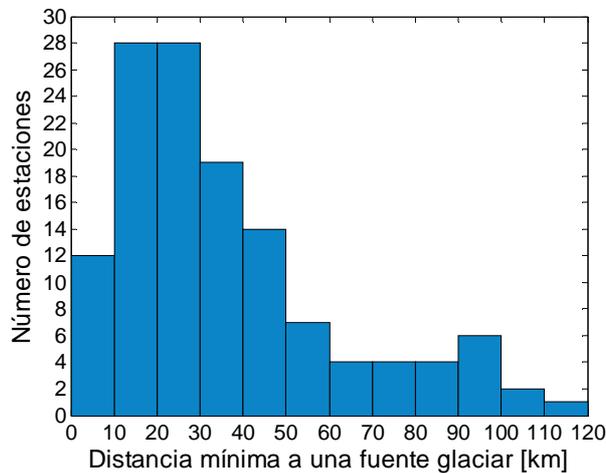


Figura 4.12: Histograma de distancias de las estaciones fluviométricas en subcuencas con aporte glaciar, a la masa de hielo más cercana.

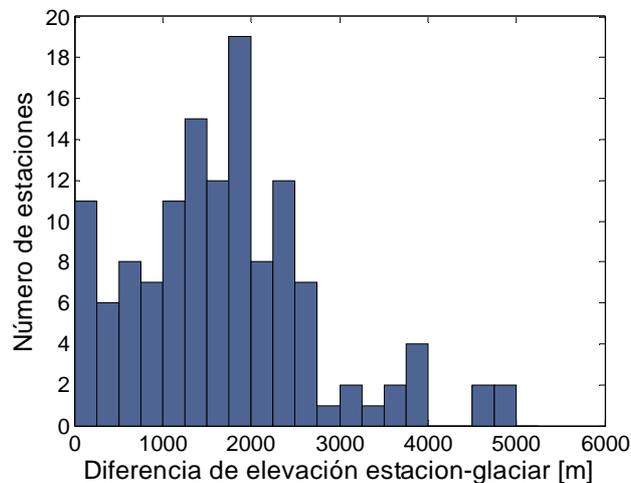


Figura 4.13: Histograma de diferencias de elevación entre las estaciones fluviométricas en subcuencas con aporte glaciar, a la masa de hielo más cercana.

Las Figuras 4.12 y 4.13, muestran histogramas con la distancia y diferencia de elevación entre las estaciones fluviométricas activas y las fuentes glaciares más cercanas, ahí se puede ver que sólo 12 de las 130 estaciones se encuentran a menos de 10 km del glaciar más cercano, y 119 (91%) se encuentran a más de 250 m de desnivel vertical, lo que afecta severamente las variables meteorológicas medidas, haciéndose imposible aplicar los valores medidos en las estaciones a modelos glaciológicos.

En el caso de las estaciones cercanas (menos de 10 km) a los glaciares, es también de suma importancia escoger locaciones en que los caudales provengan de una fuente mayoritariamente de origen glaciar, pues de lo contrario las series de tiempo de caudal se combinan con señales sin un origen en la dinámica glaciar.

La información disponible no permite la determinación de la componente glaciar en cada una de las estaciones, pero cabe destacar algunas en condiciones particularmente favorables para el estudio de la dinámica de la escorrentía de origen glaciar. Se lista a continuación (en orden de proximidad), las ocho estaciones fluviométricas del país que cuentan con fuentes de origen glaciar más próximas:

- Estero Glaciar Echaurren (BNA: 05703006-2): Operativa desde Diciembre de 1975, se encuentra a aproximadamente 1,1 km del Glaciar Echaurren Norte y a aproximadamente 500 metros de desnivel. Zona Centro.
- Río Ventisquero en Carretera Austral (BNA: 11130001-1): Operativa desde Septiembre de 1991, se encuentra a aproximadamente 5,4 km del Glaciar Queulat y a aproximadamente 450 metros de desnivel. Zona Sur B.
- Río Maipo en Las Hualtatas (BNA: 05701001-0): Funcionando desde Diciembre de 1979, a 6 kilómetros y 1.400 m de desnivel del glaciar más cercano (glaciar B-051 en la cabecera de la Quebrada Las Damas) y con otros numerosos glaciares aguas arriba. Zona Centro.
- Río Colorado antes junta Río Olivares (BNA: 05705001-2): Operativa desde Diciembre de 1977, con numerosos glaciares aguas arriba, como los de los Cerros Rabicano, Polleras, Alto, los volcanes Tupungato y Tupungatito y el Nevado de los Piuquenes. Encontrándose además a 8 km de distancia y 1.800 m de desnivel respecto del glaciar más cercano (F-001). Zona Centro.
- Río Caquena en Nacimiento (BNA: 01001001-2): Desde Enero de 1997, a 8 km y 760 m de desnivel de los glaciares de los Nevados de Payachata. Zona Norte A.
- Río Desaguadero Cotacotani (BNA: 01020002-4): Destaca por su larga data, siendo operativa desde Enero de 1961. Se encuentra a 9 km y 600 m de desnivel de los Nevados de Payachata. Zona Norte A.
- Río Olivares antes junta Río Colorado (BNA: 05706001-8): Funcionando desde Marzo de 1991, cuenta con numerosas masas glaciares aguas arriba, incluyendo los más extensos de la Zona Centro, como lo son los glaciares Juncal Sur, Olivares Alfa, Beta y Gama. Los glaciares más cercanos (G-001) se encuentran a 11 km y 1.800 metros de desnivel.
- Río Nef antes junta Estero el Rebalse (BNA: 11532000-9): Recientemente puesta en marcha (Mayo 2009), recibe aguas predominantemente de origen glaciar, estando el Glaciar Nef a 12 km y tan sólo 170 m de desnivel. Sin embargo ésta estación aún no está plenamente construida, careciendo aún de la estructura para realizar aforos. Zona Austral A.

Actualmente la red hidrométrica de la DGA cuenta con un total de 503 estaciones activas. La Figura 4.16 muestra la distribución y densidad de estas estaciones a lo largo del país, quedando en evidencia las 56 subcuencas con

aporte glaciar que actualmente no cuentan con ningún tipo de monitoreo fluviométrico, y que se concentran principalmente en las Zonas Sur B, Austral A y Austral B.

Tabla 4.6: Subcuencas con aporte glaciar

	Código Cuenca	Código Subcuenca	Número de estaciones	Nombre subcuenca
Norte A	10	100	2	Entre Limite Perú-Bolivia y Río Lauca
	10	101	0	Lago Chungara
	10	102	4	Río Lauca
	10	103	0	Salar de Surire
	20	200	0	Salar De Ollagüe
	20	201	0	Salar De Carcote
	20	202	0	Salar De Ascotán
	21	210	10	Río Loa Alto (bajo junta Río Salado)
	30	303	0	Cuencas al SE. cuenca Salar de Pedernales
	30	304	1	Salar de Maricunga
	4 cuencas	10 subcuencas	17 estaciones	SUBTOTAL
Norte B	34	341	1	Río Pulido
	34	342	1	Río Manflas
	38	380	3	Río Tránsito
	43	430	6	Río Turbio
	3 cuencas	4 subcuencas	11 estaciones	SUBTOTAL
N. C	45	450	3	Río Hurtado
	1 cuenca	1 subcuenca	3 estaciones	SUBTOTAL
Centro	54	540	3	Aconcagua Alto
	57	570	7	Río Maipo Alto
	57	572	5	Río Mapocho Alto
	60	600	5	Río Cachapoal Alto (Hasta bajo junta Río Claro)
	60	602	1	Río Tinguiririca Alto (Hasta bajo junta Río Claro)
	73	730	3	Río Maule Alto (Hasta antes junta Río Melado)
	73	731	2	Río Melado
	73	732	3	Maule Medio
	73	735	5	Río Loncomilla
4 cuencas	9 subcuencas	34 estaciones	SUBTOTAL	
Sur A	81	813	4	Itata Medio
	83	830	2	Río Bio-Bio Alto (Hasta después junta Río Lamin)
	83	831	6	Río Bio-Bio entre Río Ranquil y Río Duqueco
	83	832	2	Río Duqueco
	83	837	4	Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)
	91	912	3	Cautín Alto (hasta antes junta Río Quepe)
	91	913	3	Río Quepe
	94	940	2	Río Allipen
	94	941	2	Río Pucon
	94	942	1	Lago Villarica y Tolten Alto
	101	1010	1	Río Valdivia Alto (hasta desagüe Lago Panguipulli)
	101	1011	1	Río Sn. Pedro (Entre des. L. Panguipulli y Bajo R. Quinchilca)
	103	1030	3	Afluentes Lago Ranco
	103	1032	1	Río Pilmaiquen
103	1034	3	Río Rahue hasta antes junta Río Negro	

Tabla 4.6. Continuación.

	6 cuencas	15 subcuencas	38 estaciones	SUBTOTAL
Sur B	104	1041	1	Río Maullín
	104	1043	4	Río Chamiza
	104	1045	0	Río Petrohue
	105	1051	1	Río Puelo Alto
	105	1052	0	Río Puelo Bajo
	106	1060	0	Costeras entre Río Puelo y Punta Trentelhue
	106	1061	0	Costeras Entre Punta Tentelhue y Río Negro (incl.)
	106	1063	0	Costeras entre Río Negro y Río Vodudahue
	106	1066	0	Río Reñihue
	106	1068	0	Costeras Entre Río Negro (incl.) y Río Yelcho
	107	1071	0	Río Yelcho
	108	1080	0	Costeras entre Río Yelcho y Río Corcovado
	108	1081	0	Río Corcovado
	108	1082	0	Costeras entre Río Corcovado y Limite Región
	110	1103	0	Río Rosselot
	110	1104	0	Río Palena Bajo
	111	1110	0	Costeras entre Río Palena y Río Marchant (incl.)
	111	1113	1	Costeras entre Seno Ventisquero y Río Cisnes
	111	1114	1	Río Cisnes
	111	1115	0	Costeras entre Río Cisnes y Punta San Andrés
111	1116	0	Islas entre Canales Jacal y Puyuhuapi	
111	1117	0	Costeras entre Punta San Andrés y Río Aisen	
113	1133	1	Río Riesco	
	8 cuencas	23 subcuencas	9 estaciones	SUBTOTAL
Austral A	114	1141	0	Costeras entre Río Huemules y Río Exploradores
	114	1142	0	Río Exploradores
	114	1144	0	Costera y Ventisqueros entre Río Exploradores y Vent. Benito
	114	1146	0	Campo de Hielo Norte
	114	1148	0	Costeras entre Fiordo Julian y R. Baker
	115	1150	1	R. Ibañez
	115	1151	1	Vertiente N. Lago J. Miguel Carrera (Exc. R. Ibañez)
	115	1153	4	R. Baker entre Desagüe L. J. M. Carrera y R. de La Colonia
	115	1154	4	R. Baker entre arriba R. de La Colonia y Desembocadura
	117	1170	2	Lago O'Higgins
	117	1171	1	Río Pascua
	118	1180	0	Costeras entre Río Pascua y Limite Región
	119	1190	0	Río de Las Cuatro Vueltas (Archipiélago)
	120	1200	0	Costeras del Canal Mesier Entre Limite Reg. y Pen. Exmouth
	120	1201	0	Península Exmuoth
	120	1202	0	Costeras del Fiordo Eyre (exc. Península Exmouth)
	120	1203	0	Costeras del NE. del Fiordo Falcon
	120	1204	0	Costeras entre Fiordo Falcon y Fiordo Penguin
	120	1205	0	Costeras entre Fiordo Penguin y Fiordo Europa
	120	1208	0	Costeras entre fdo. Guilardi y Seno Andrew (exc. Pen. Wilcok)
122	1220	0	Costeras entre Seno Andrew y Fiordo Calvo	
122	1221	0	Costeras entre Fiordo Calvo y Fiordo Peel	
122	1223	0	Costeras e Islas entre fiordo Peel y Península Sta. Inés	
122	1225	0	Cordillera Sarmiento	
122	1227	0	Costeras entre Península Roca y Río Serrano	

Tabla 4.6. Continuación.

	122	1228	5	Río Serrano
	7	26		
	cuencas	subcuencas	18 estaciones	SUBTOTAL
Austral B	124	1241	0	Península Muñoz Gamero (Al N. Est. Excelsior)
	124	1242	0	Península Muñoz Gamero (Al S. Est. Excelsior)
	124	1244	0	Isla Riesco
	126	1260	0	Vertiente del Atlántico
	126	1260	0	Vertiente del Atlántico
	127	1273	0	Isla Santa Inés y Carlos III
	127	1276	0	Isla Capitán Aracena y adyacentes
	128	1283	0	Costeras entre R. Azopardo y Seno Serrano
	128	1284	0	Península Entre Senos Serrano y Ventisqueros
	128	1285	0	Costeras Canal Beagle (entre Seno Ventisquero y Frontera)
	128	1288	0	Cuencas Compartidas al Sur R. Azopardo y Cncas. Cerradas
	129	1291	0	Islas entre Brazos del Canal Beagle al NE de Bahía Cook
	129	1292	0	Isla Hoste y adyacentes
		5	13	
	cuencas	subcuencas	0 estaciones	SUBTOTAL
	38	101	130	TOTALES
	cuencas	subcuencas	estaciones	

4.4.2. Red meteorológica DGA

La red de estaciones meteorológicas de la DGA cuenta actualmente con 564 estaciones en funcionamiento, de las cuales 182 se encuentran en subcuencas con aporte glaciar, algunas de ellas funcionando desde 1916.

De estas estaciones, 46 se encuentran en la Zona Norte (30, 12 y 4 localizadas en las Subzonas A, B y C, respectivamente), 39 en la Zona Centro, 72 en la Zona Sur (56 en la Subzona A y 16 en la B) y 25 en la Zona Austral (23 en la Subzona A y 2 en la B)

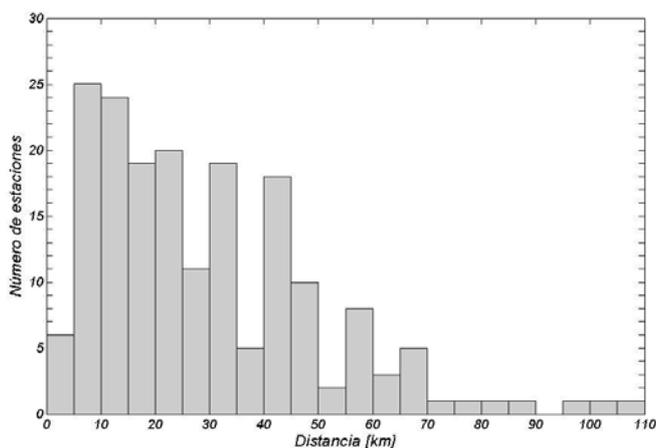


Figura 4.14: Histograma de distancia entre las estaciones meteorológicas DGA y sus glaciares más cercanos.

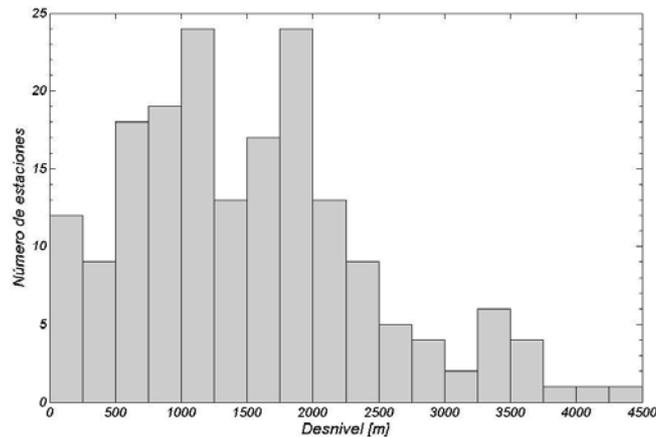


Figura 4.15: Histograma de desniveles entre las estaciones meteorológicas DGA y la cota mínima de sus glaciares más cercanos.

En las Figuras 4.14 y 4.15, se muestra a través de histogramas, la distribución relativa de las estaciones meteorológicas DGA ubicadas en subcuencas con aporte glaciar, en cuanto a su distancia y desnivel respectivamente a sus glaciares más cercanos. De este modo se puede ver que 31 estaciones se encuentran a menos de 10 km de un glaciar y 6 se encuentran a menos de 5 km. En relación a desniveles, 21 estaciones se encuentran a menos de 500 metros bajo la cota mínima del glaciar más cercano y 12 a menos de 250 m.

De este modo, si bien hay una proporción importante de estaciones a elevaciones adecuadas, ellas están por lo general demasiado lejos de los glaciares, lo que puede conducir a importantes variaciones meteorológicas, en particular en el caso de las precipitaciones, que son sumamente importantes y poseen fuertes controles topográficos.

La distribución espacial de las estaciones en el territorio nacional se puede apreciar en la Figura 4.16 Si bien el número de estaciones y distribución es bastante amplia y la cobertura de las subcuencas con aporte glaciar es buena en las Zonas Norte, Centro y Sur A, se observa un sesgo sobre la Zona Sur B, menor que en el caso de la red DMC pero persiste una escasez de estaciones y varias subcuencas están aún sin monitoreo meteorológico. Esta situación se agrava en la Zona Austral A, donde el margen occidental carece casi por completo de estaciones.

Finalmente en la Zona Austral B, la situación es precaria, quedando importantes extensiones de territorio sin monitoreo meteorológico, incluyendo zonas como Gran Campo Nevado y Cordillera de Darwin.

4.4.3. Red meteorológica DMC

Dentro de la red de estaciones meteorológicas de la DMC (Dirección Meteorológica de Chile), existen a la fecha un total de 280 estaciones, de las cuales 53 se encuentran en subcuencas con aporte glaciar, monitoreando un total de 16 cuencas y 22 subcuencas. Muchas de estas estaciones se encuentran a sólo unas decenas de kilómetros de distancia de los glaciares más cercanos, por lo que los datos recopilados por ellas serían representativos

de la situación en dichos glaciares. Sin embargo la mayor incertidumbre proviene de la variación vertical de los parámetros meteorológicos, pues la gran mayoría de las estaciones (48) se encuentran a más de 1.000 m bajo la cota donde están los glaciares más cercanos, lo que genera una incertidumbre importante en variables como la temperatura, la que es crucial conocer de manera precisa, pues variaciones de una fracción de grado pueden incidir de manera considerable en la proporción de nieve/lluvia que recibe el glaciar.

La Figura 4.17 y la Figura 4.18, muestran histogramas de distancia a intervalos de 10 km y de diferencia de elevación a intervalos de 250 m para todas las estaciones DMC en subcuencas con aporte glaciar. En ellas se hace evidente que incluso en los casos en que la distancia horizontal es suficientemente pequeña para ser representativa de las condiciones meteorológicas en el glaciar, la diferencia de elevación resulta en general demasiado grande. En la Figura 4.18 se puede ver que la mayoría de las estaciones se encuentra a desniveles en torno a los 1.500 m respecto al glaciar más cercano.

También es importante destacar que los glaciares se encuentran en zonas montañosas, donde los efectos topográficos sobre la distribución de la precipitación puede llegar a ser muy importante, por lo que es de suma importancia contar con estaciones meteorológicas cercanas a los glaciares y a una cota cercana a la de su base.

En la Figura 4.16 se puede observar también la escasez de estaciones meteorológicas en las cercanías de los glaciares de las Zonas Sur B y Austral, las que contienen la mayor parte de las masas glaciares del país.

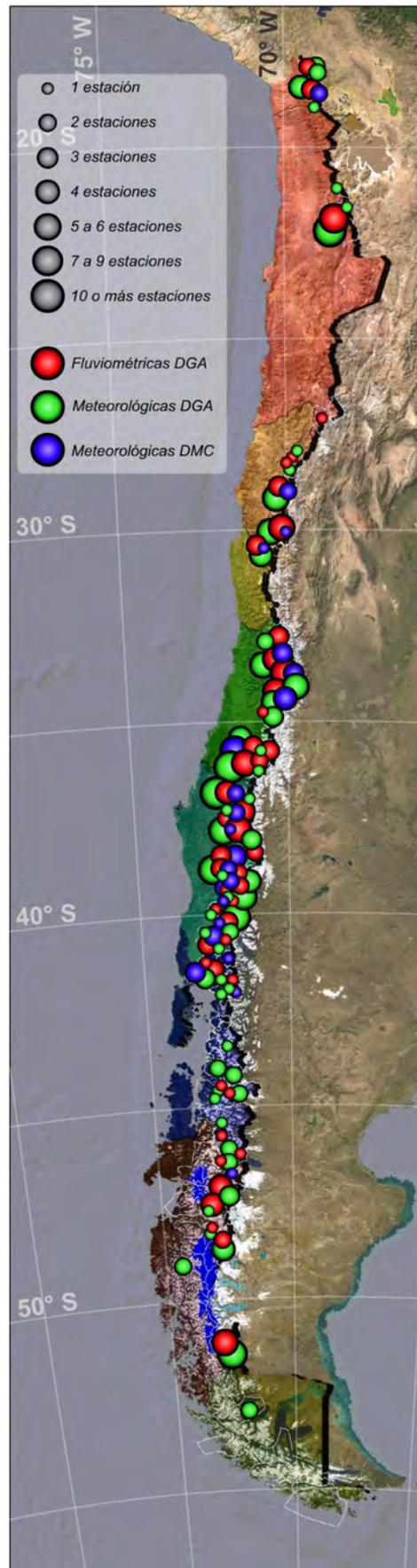


Figura 4.16: Mapa de densidad de estaciones fluiométricas DGA y meteorológicas DGA y DMC en subcuencas con aporte glaciar (subcuencas en líneas blancas finas).

Tabla 4.7: Resumen de distribución de estaciones meteorológicas de la red de la DMC que se encuentran en subcuencas con aporte glaciar.

Zona	Cuenca	Subcuenca	Estaciones	Nombre subcuenca
Norte A	10	100	2	Río Lauca
	1 cuenca	1 Subcuenca	2 estaciones	SUBTOTAL
Norte B	38	380	2	Río Transito
	43	430	1	Río Turbio
	2 cuencas	2 Subcuencas	3 estaciones	SUBTOTAL
Norte C	45	450	1	Río Hurtado
	1 cuenca	1 Subcuenca	1 estación	SUBTOTAL
Centro	57	572	3	R. Mapocho Alto
	57	570	3	Río Maipo Alto
	60	600	5	Río Cachapoal Alto (Hasta bajo junta Río Claro)
	73	735	9	Río Loncomilla
	3 cuencas	4 Subcuencas	20 estaciones	SUBTOTAL
Sur A	81	813	2	Itata Medio
	83	832	2	Río Duqueco
	83	831	1	Río Bio-Bio entre Río Ranquil y Río Duqueco
	91	912	5	Cautin Alto (hasta antes junta R. Quepe)
	91	913	2	Río Quepe
	94	940	2	Río Allipen
	94	942	2	Lago Villarica y Tolten Alto
	101	1010	1	Río Valdivia Alto (hasta desagüe Lago Panguipulli)
	103	1030	1	Afluentes Lago Ranco
	103	1032	3	Río Pilmaiquen
	6 cuencas	10 subcuencas	21 estaciones	SUBTOTAL
Sur B	104	1041	3	Río Maullin
	104	1045	1	Río Petrohue
	105	1051	1	R. Puelo Alto
	2 cuencas	3 Subcuencas	5 estaciones	SUBTOTAL
Austral A	115	1153	1	Baker entre Des. L. J.M. Carrera y R. Colonia
	1 cuenca	1 subcuenca	1 estación	SUBTOTAL
TOTAL	16 cuencas	22 subcuencas	53 estaciones	

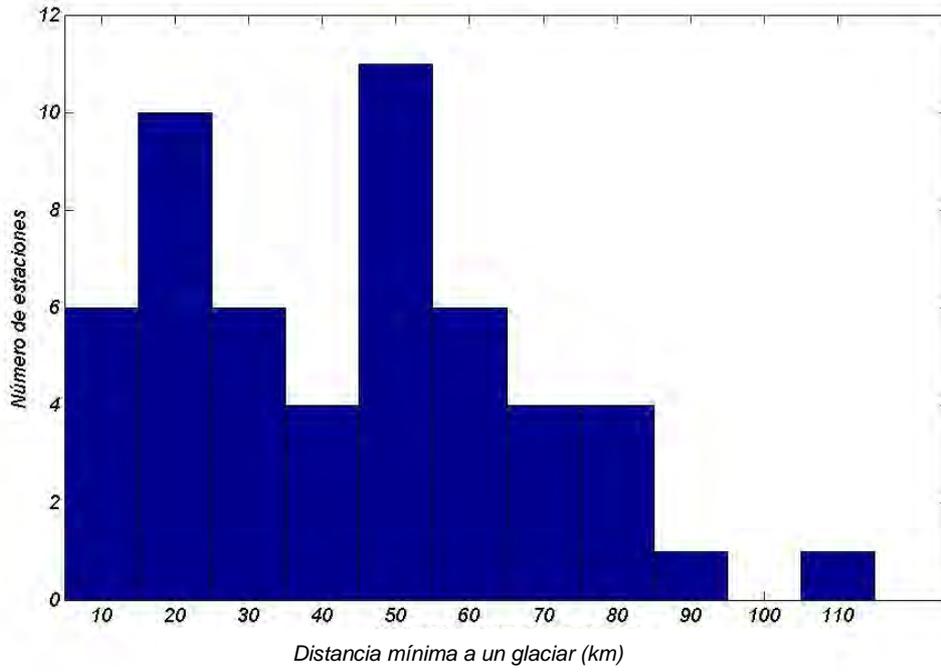


Figura 4.17: Histograma de distancias de las estaciones meteorológicas DMC en subcuencas con aporte glaciar, a la masa de hielo más cercana.

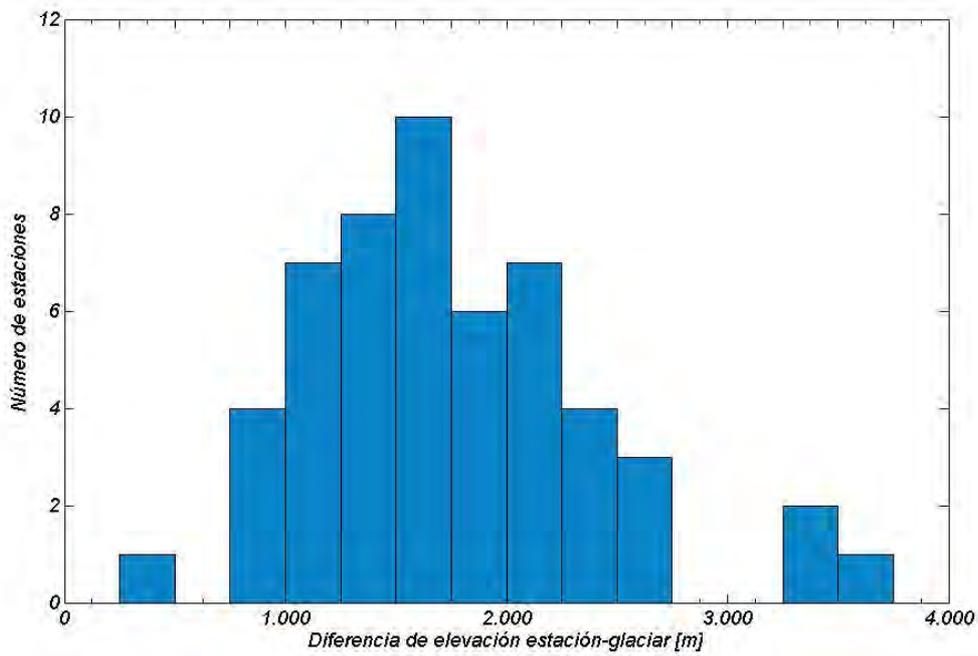


Figura 4.18: Histograma de diferencias de elevación entre las estaciones meteorológicas DMC en subcuencas con aporte glaciar, a la masa de hielo más cercana.

5. INTERRELACIÓN GLACIARES-ACTIVIDAD HUMANA

5.1. Análisis de la demanda y disponibilidad actual y futura de los recursos hídricos en cuencas seleccionadas con aportes glaciares

5.1.1. Descripción de cuencas seleccionadas



Figura 5.1: Cuencas relevantes de Chile. De norte a sur: Copiapó, Maipo, Tinguiririca, Maule, Bueno y Baker.

Este estudio se concentrará en seis cuencas relevantes y que cuentan con aporte glaciar, estas son las de los Ríos Copiapó, Maipo, Tinguiririca, Maule, Bueno y Baker, distribuidas de la III a la XI regiones (Figura 5.1), en las que se estudiará la interacción entre los glaciares y la actividad humana en todos sus aspectos, incluyendo su relación con los recursos hídricos, el clima, el turismo, etc.

En el presente informe se entrega una caracterización general de estas cuencas y del estado del conocimiento de los glaciares en ellas contenidos.

Cuenca del Río Copiapó

Con una superficie total de 18.704 km², esta cuenca está comprendida íntegramente en la III^a región (254.336 habitantes según censo 2002), de la que constituye un 14,8 % en área.

Los glaciares de esta cuenca fueron inventariados el año 2008 (Vivero, 2008) encontrándose en su cabecera un total de 23,04 ± 1,40 km² de hielo y nieves perennes (sólo considerando cuerpos de más de una hectárea) distribuidos en 92 glaciares individuales y tres subcuencas, siendo éstas las de los ríos Jorquera (1,81 km²), Pulido (14,37 km²) y Manflas (6,86 km²).

Cuenca del Río Maipo

Con una superficie total de 15.274 km², se encuentra comprendida principalmente en la Región Metropolitana (6.061.185 habitantes, equivalente a un 40,1% de la población nacional) de la que abarca el 90,3 % en área (13.908 km²), también cubre un 4,2 % de la V^a región (693,6 km²) y un 4,1 % de la VI^a región (672 km²).

Los glaciares de esta cuenca fueron inventariados el año 1979 (Marangunic, 1979) encontrándose en su cabecera un total de 647 glaciares que cubren un área de 421,90 km² de hielo y nieves perennes (61% en glaciares expuestos y 39% en glaciares cubiertos o

rocosos), y que están distribuidos en cinco subcuencas, siendo éstas las de los ríos Mapocho (5,3 %), Colorado (51,2 %) , Yeso (12,1 %), Volcán (15,2 %), Maipo superior (16,0 %), San José (< 0,2 %) y Angostura (<0,2 %).

Cuenca del Río Tinguiririca

Con una superficie total de 3.932,4 km², está comprendida principalmente en la VIª región (780.627 habitantes), abarcando el 23,1 % de su superficie (3.784,2 km²), también cubre un 0,5 % de la VIIª región (148,2 km²).

Está compuesta de dos subcuencas, la del Tinguiririca Bajo y la del Tinguiririca Alto, está última tiene un área de 1.843,18 km² (un 46,9 % del total), y es la que recibe todo el aporte glaciar que ingresa a la cuenca.

Los glaciares de esta cuenca fueron inventariados el año 1984 (Valdivia, 1984) encontrándose en su cabecera un total de 261 glaciares que cubren un área de 106,46 km² (97,0 % descubiertos y 3,0 % cubiertos), y que están distribuidos en 5 subcuencas, siendo éstas las de los ríos Damas (25,78 km²), Tinguiririca Alto (0,66 km²), San José (50,37 km²), Portillo (17,54 km²) y Azufre (12,10 km²).

Cuenca del Río Maule

Con una superficie total de 21.053,8 km², está comprendida principalmente en la VIIª región (908.097 habitantes), abarcando el 65,2 % de su superficie (19.734,3 km²), también cubre un 3,6 % de la VIIIª región (1.319,5 km²).

Los glaciares de esta cuenca fueron inventariados el año 2004 (Tapia, 2004) encontrándose en su cabecera un total 98 glaciares que cubren un área de 35,32 km² (80% descubierto, 20% cubierto).

Cuenca del Río Bueno

Con una superficie total de 15.366,8 km², esta dividida entre las regiones XVI (Los Ríos) y X (Los Lagos), con un 51 % y 49 % respectivamente. De este modo cubre el 42,4 % de la XIVª región (7.819,0 km²) y el 31,6 % de la Xª (7.547,8 km²).

Los glaciares de esta cuenca fueron inventariados el año 1989 (Rivera, 1989) encontrándose en su cabecera un total de 11 glaciares que cubren un área de 19,35 km² (98% descubiertos, 2% cubiertos), y que están distribuidos en tres subcuencas, siendo estas la de Afluentes del Lago Ranco (14,5 km²) y las de los ríos Pilmaiquén (2,4 km²) y Rahue (2,5 km²).

Cuenca del Río Baker

Con una superficie total de 20.946,9 km², se encuentra íntegramente dentro de la XIª región (91.492 habitantes), cubriendo un 19,3 % de su superficie.

Los glaciares de esta cuenca no han sido inventariados sistemáticamente, sin embargo varios estudios enfocados al Campo de Hielo Norte, incluyen múltiples glaciares pertenecientes a esta cuenca, incluyendo sin duda los de

mayor importancia. Rivera *et al.*, (2007) hace una revisión detallada de los glaciares de Campo de Hielo Norte, incluyendo 19 que contribuyen a la cuenca del Río Baker (U-6, Fiero, Mocho, Cristal, Leones, Hyades, Soler, U-7, Nef, U-5, Cachet Norte, Cachet, Colonia, Arco, Intermedio, U-4, Pared Norte, Pared Sur y Pissis) y que en conjunto cuentan con una superficie de 905,5 km². Sin embargo no existen aún inventarios de los glaciares del Volcán Hudson, Cerro Erasmo y Monte San Lorenzo entre otros muchos centros montañosos de la cuenca.

5.1.2. Importancia hídrica de los glaciares

Los glaciares interactúan de manera compleja con el clima y reaccionan además a múltiples factores no climáticos, por lo que su aporte hídrico dependerá de su superficie, de la meteorología, del balance de masa del glaciar, de sus condiciones de flujo y de controles topográficos.

Se aproximará con una estimación de la importancia hídrica de los glaciares, considerando que éstos impactan la hidrología de sus cuencas por cuatro motivos principales:

- Aportan escorrentía a la cuenca.
- Son reservorios de agua.
- Son los lugares donde la nieve puede preservarse a lo largo de todo el año.
- Pierden menos agua por evaporación/sublimación que el suelo descubierto.
- Afectan el microclima local.

Todos estos puntos son muy difíciles de cuantificar y no se cuenta actualmente con la información para hacerlo de manera precisa, sin embargo se los puede estimar en “orden de magnitud” de manera de poder ponerlos en contexto y comprender los posibles alcances de cada factor en la hidrología de las diferentes cuencas.

Aporte hídrico hacia las cuencas

Chile es sin duda un país privilegiado respecto de la abundancia de recursos hídricos y las formidables reservas de agua que constituyen los campos de Hielo Norte y Sur. Sin embargo presenta una extraordinaria heterogeneidad en la distribución natural del recurso, contando en la Zona Norte con uno de los desiertos más secos del planeta y en el sur con la mayor reserva de agua dulce fuera de Antártica y Groenlandia. Adicionalmente, la demanda de agua está concentrada en regiones que carecen de acceso a los abundantes recursos existentes en el extremo sur del país.

Esta heterogeneidad impone grandes desafíos al manejo de los recursos hídricos en particular en la perspectiva del pronunciado crecimiento poblacional, económico e industrial del país, además del incierto y precipitado cambio climático que está sufriendo el planeta.

Uno de estos desafíos es generar la capacidad de planificar apropiadamente el desarrollo, siendo la disponibilidad de agua un factor clave a tener en cuenta,

por ello es de gran importancia conocer el aporte de los glaciares a los regímenes hídricos.

Una primera aproximación para establecer el valor del aporte de los glaciares a la escurrentía, es estimar el porcentaje de los caudales mínimos de veranos secos que provienen de ellos, y de esta manera calcular el volumen de agua que ellos aportan en períodos de sequía, que es cuando el aporte relativo de los glaciares es más importante. El caudal acumulado en todo un verano, entregará además una idea del volumen de los embalses que serían necesarios para suplir el efecto de los glaciares en el régimen hidrológico.

Para esto se estudiarán en particular algunas subcuencas altas de las cuencas seleccionadas:

- Las subcuencas de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas en la cuenca del Río Copiapó, tomando como referencia los caudales medidos en la estación Río Copiapó en la Puerta (BNA: 03431003-7).
- La subcuenca del Río Maipo Alto en la Cuenca del Maipo, tomando como referencia los caudales medidos en la estación Río Maipo en El Manzano (BNA: 05710001-K).
- La subcuenca del Tinguiririca Alto en la Cuenca del Tinguiririca, tomando como referencia los caudales medidos en la estación Río Tinguiririca bajo Los Briones (BNA: 06028001-0).
- Y finalmente la subcuenca “Río Baker entre arriba Río de La Colonia y Desembocadura” en la cuenca del Río Baker, tomando como referencia los caudales medidos en la estación Río Baker en Colonia (BNA: 11542001-1).

Como referencia de caudal mínimo se tomará el caudal mínimo histórico medido durante el mes de febrero, el cual suele ser el más seco del año.

El punto de mayor incertidumbre es estimar qué porcentaje de dicho caudal proviene del derretimiento glaciar. Para esto se utilizarán algunos estudios de referencia.

Para el Norte Chico se tomará en cuenta el estudio realizado por Favier *et al.*, (2009), que estima el aporte glaciar entre un 5% a un 10% en los períodos secos, lo que se utilizará para la cuenca del Río Copiapó.

El valor de ~67% determinado por Peña & Nazarala (1987) para el Río Maipo, será usado en dicha cuenca y en la del Tinguiririca.

Dada la ausencia de estudios en la Zona Sur, no se realizarán estimaciones para la cuenca del Río Maule ni del Río Bueno.

En la Zona Austral existen algunos estudios como los de Saito & Kobayashi (1985), Fukami & Escobar (1987), Peña & Escobar (1987), Escobar *et al.*, (1992) y Matsumoto (2007, 2008). No hay estimaciones explícitas de qué porcentaje del caudal proviene de zonas glaciares y zonas no glaciares. Por

esto se utilizará el desglose de caudales mensuales del modelo aquí desarrollado para la cuenca del Río Nef. En el cual los caudales medidos se explican con un aporte de origen glaciar de entre el 10% y el 50%, siendo un 22% el valor típico para los meses más secos, los que suelen ser Junio y Julio con valores que pasan bajo los 3,2 m³/s (criterio definido en base a los 8 percentiles más secos entre Enero de 1977 y Diciembre de 2000).

En base a esto, la Tabla 5.1 muestra el volumen de agua estimativo que aportarían los glaciares en el caso hipotético de una sequía de dos meses de duración con caudales medios iguales al mínimo histórico para el mes de Febrero, excepto en el caso del Río Baker en donde se usó el mínimo diario entre los años 2004 y 2009 (324 m³/s en Julio 2009).

Tabla 5.1: Volumen de agua estimativo aportado por glaciares a las subcuencas seleccionadas en los meses de máxima sequía.

Cuenca	Caudal mínimo	Acumulado	Aporte glaciar estimado	Aporte glaciar estimado	Volumen aportado
	(m ³ /s)	(millones m ³)	(%)	(m ³ /s)	(millones m ³)
Copiapó	0,8	4,15	10	0,08	0,42
Maipo	63	326,59	67	42,21	218,82
Tinguiririca	29	150,34	67	19,43	1,22
Baker	324	1,68	22	71,28	369,52
TOTAL					690,69

El volumen aportado sería entonces equivalente a la capacidad que tendría que tener un embalse en una cuenca dada para realizar el mismo efecto regularizador que los glaciares realizarían actualmente en el régimen hídrico de estas subcuencas.

De esta manera se puede decir que con las demandas actuales de agua en las cuencas estudiadas, el rol de los glaciares sería fundamental, especialmente en los ríos Copiapó, Maipo y Tinguiririca. En las que el volumen de reserva entregado por glaciares en períodos de sequía llegaría a aproximadamente 220 millones de m³ según esta primera aproximación.

Reservorios de agua

Como se señala en la Política Nacional de Recursos Hídricos (DGA, 1999), la disponibilidad de agua por habitante varía dramáticamente a lo largo del país, siendo entre la Primera región y la Metropolitana, en general inferior a 1.000 m³/habitante alcanzando en algunas zonas 500 m³/habitante, valores considerados a nivel internacional como altamente restrictivos para el desarrollo del país.

Actualmente, la red de monitoreo de la DGA, permite tener un conocimiento continuo del volumen de agua disponible en el país, sin embargo se desconoce la posible evolución de dicha disponibilidad en el futuro, producto de variaciones naturales o del cambio climático global.

Los glaciares juegan un doble rol en esta disponibilidad de agua, por un lado preservan en estado sólido la precipitación de los meses más lluviosos para luego liberarla en los meses más secos, homogenizando la disponibilidad de agua en el tiempo y disminuyendo el riesgo de encontrar caudales excesivamente grandes en la época lluviosa o excesivamente pequeños en los períodos secos. Por otro lado, constituyen una importantísima reserva de agua, la que debido al retroceso glaciar sostenido de los últimos milenios ha sido y seguirá liberándose lentamente hacia las diversas cuencas que ellos alimentan. Actualmente se desconoce el valor real de la reserva de agua contenida en los glaciares del país, pero éste sin duda alcanza un valor importante en comparación con la disponibilidad y demandas actuales de agua.

Se puede estimar el valor de los glaciares como reservorios de agua calculando su volumen aproximado, lo que corresponde a su reserva de agua "fósil", lo que no tiene relación con su capacidad estacional de acumular agua en estado sólido, lo que dependerá del área de cada glaciar y del régimen de precipitaciones y temperaturas al que está sometido.

Dado que se desconocen los espesores de la mayor parte de los glaciares en las cuencas de interés, una primera aproximación es estimar el volumen en función del área. Una buena relación para hacerlo es la relación de Bahr *et al.*, (1997), que señala:

$$Volumen = V_0 (Área)^b$$

Donde la potencia b tiene un valor empírico válido en muchas regiones del mundo de 1,36 (Bahr *et al.*, 1997). El valor de V_0 depende de la región, un valor frecuentemente utilizado es $0,048 \text{ km}^3$, sin embargo si se busca el V_0 que mejor se ajusta a la tabla empírica que relaciona área y volumen para la cuenca del Río Maipo (Marangunic, 1979) se obtiene $V_0 = 0,056 \text{ km}^3$, valor que se utiliza en la Tabla 5.2 junto con la ecuación de Bahr para obtener los volúmenes referenciales de agua acumulada en glaciares en cada cuenca, asumiendo también una densidad del hielo de $0,9 \text{ kg m}^{-3}$.

Debido al procedimiento utilizado, el valor obtenido es muy probablemente una subestimación del valor real, puesto que se ha utilizado áreas promedio por zona, y dado que el exponente b es mayor que uno, dos glaciares de área A tendrán menor volumen total que uno de área $2A$, por lo que utilizando áreas promedio se estará subestimando el aporte de los grandes glaciares, los que contienen la mayor parte del agua.

Tabla 5.2: Primera aproximación al volumen de agua contenida en los glaciares de las cuencas seleccionadas, utilizando una fórmula empírica (Bahr *et al.*, 1997) para determinar el volumen como función del área.

Cuenca	Área glaciar (km ²)	Número de glaciares	Tamaño medio (km ²)	Volumen (millones de m ³)
Copiapó	23	92	0,3	707
Maipo	422	647	0,7	18.323
Tinguiririca	106	261	0,4	3.881
Maule	35	98	0,4	1.223
Bueno	19	11	1,7	1.171
Baker	905*	19	47,6	184.161

* Esto considera sólo los glaciares inventariados, quedando fuera muchos otros, entre ellos los del Volcán Hudson, Cerro Erasmo y Monte San Lorenzo.

En la Tabla 5.2 se puede ver que el total sólo para las cuencas seleccionadas supera los 200 kilómetros cúbicos, más de 25 veces la capacidad total de los embalses de Chile para la década 1990-1999, estimada en menos de 8 kilómetros cúbicos por la Dirección de Planeamiento (1990).

Sólo para visualizar la relación entre la disponibilidad actual de agua y las reservas glaciares en una primera aproximación a nivel país, se muestra en la Figura 5.2, la actual disponibilidad de agua por habitante por año de la Primera a la Décima región (DGA, 1999) en comparación con el volumen aproximado de agua por habitante contenida en los glaciares de cada región, calculada con la misma aproximación utilizada para las cuencas prioritarias. En ella se puede ver que desde la Primera a la Sexta regiones (lo que incluye las zonas del país con menor relación disponibilidad/demandas) la reserva de agua en glaciares supera con creces la actual disponibilidad anual de agua.

Esto grafica la enorme relevancia del estudio, monitoreo y manejo de los glaciares como recurso hídrico.

Disponibilidad de agua y reservas glaciares

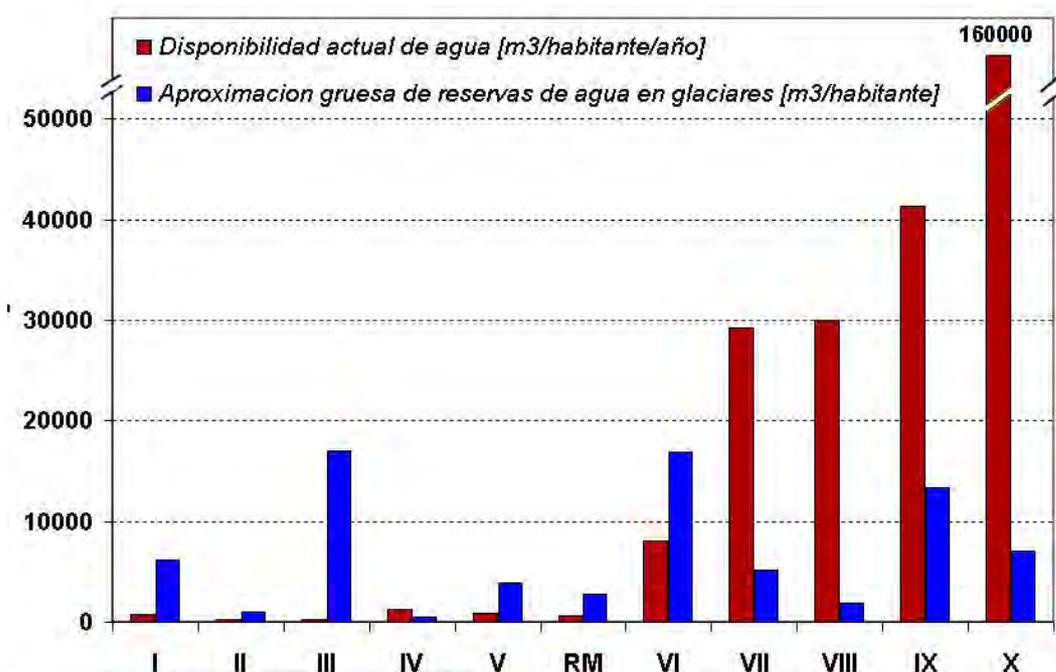


Figura 5.2: Disponibilidad de agua y reservas glaciares de algunas regiones en Chile.

Preservación de nieve durante el año

Un glaciar se generará de manera espontánea en todo lugar en que las condiciones topográficas y meteorológicas sean tales, que la precipitación sólida de un año pueda preservarse en ese estado hasta el año siguiente. De esta forma la nieve puede acumularse progresivamente hasta formar un glaciar que eventualmente empezará a fluir, moviendo esa masa acumulada de la zona de “preservación” (acumulación) a la zona de ablación, donde el agua preservada en estado sólido por años, se derrite y se integra a los caudales de los ríos.

De este modo, si el clima variase de forma tal de que desaparecieran por completo estas áreas, el régimen hídrico también cambiaría, aumentando los caudales de primavera y disminuyendo los de verano, poniendo en riesgo a los ecosistemas, poblaciones y desarrollos económicos que dependan de los limitados recursos hídricos del verano.

Un excelente indicador de cambios climáticos en este sentido, es la elevación de la línea de nieve, la que al ascender producto del calentamiento atmosférico, reduce de manera no lineal y dependiente de la hipsometría la superficie neta capaz de retener precipitaciones en forma de nieve.

Para tener una idea de la importancia que podría llegar a tener este fenómeno podemos estimar el volumen típico de precipitación sólida que puede llegar a ser almacenado de forma estacional por las áreas actualmente cubiertas por glaciares. Por ejemplo, en la cuenca del Río Baker, con más de 905 km² de superficie glaciar y precipitaciones del orden de los 8.000 mm, este valor podría

ser del orden de 7.240 millones de m³, del orden de magnitud de toda la capacidad de los embalses de Chile.

Pérdida de agua por evaporación/sublimación

Toda cuenca pierde agua hacia la atmósfera por evaporación, sublimación y transpiración según la cobertura que posea. De este modo una cuenca glaciar pierde menos agua que una cuenca con suelo rocoso descubierto, como el que se generaría tras la desaparición de los glaciares, debido a que éstos preservan eficientemente el agua producto de su baja temperatura y elevado albedo en relación a superficies rocosas.

Sin embargo esta diferencia depende fuertemente de las condiciones climáticas de la cuenca, encontrándose que en la Zona Norte A, un 94% del agua puede perderse por evaporación, mientras que en la Zona Sur este valor no alcanza el 14% (DGA, 1987).

Aún no existen en Chile estudios detallados que permitan estimar este efecto, de hecho estudios como los de Escobar *et al.*, (1992) y Matsumoto (2007) que involucran enormes superficies glaciares, usan aproximaciones empíricas para estimar la evapotranspiración que no consideran la naturaleza de la cobertura de la cuenca.

Efectos en el microclima local

Este es sin duda uno de los factores más difíciles de estimar debido a la complejidad de los fenómenos atmosféricos, y a la ausencia de estudios de detalle al respecto. Si bien en algunos lugares del mundo se ha detectado en tiempos históricos la desaparición de un glaciar, resulta extremadamente difícil separar los cambios climáticos locales producto de su desaparición, de otros vinculados a procesos de mayor escala.

Estudios climáticos de microcuencas similares que varíen notablemente en su cobertura glaciar, podrían entregar información extraordinariamente valiosa para estimar la magnitud del impacto de un glaciar en su entorno cercano y el clima que impera sobre su superficie.

5.1.3. Demandas actuales de agua por sector productivo

La creciente demanda de agua de los diferentes sectores productivos (mineros, agropecuario, industria, generación de energía), como también por el consumo de agua potable en los sectores urbanos y rurales, presentan competencias en su asignación (DGA, 1995) y ante la incertidumbre actual acerca de la disposición de los recursos hídricos en el futuro se han pronosticado conflictos en el uso del recurso.

Respecto de la actual situación de la demanda de agua por sector, en un estudio de la DGA (2007), realizado por la empresa consultora Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., se analizaron las estimaciones de demandas de agua y las proyecciones futuras en Chile proyectadas en horizontes de 10 y 25 años. Se ha tomado dicho estudio como referencia para analizar a nivel de subcuencas glaciares la demanda actual y futura de recursos hídricos, constatándose en

general un aumento sostenido en la demanda de recursos hídricos de los distintos sectores productivos.

Cuenca del Río Copiapó (subcuenca Copiapó alto)

Las demandas actuales de agua por sector productivo para las cuencas glaciares del Río Copiapó Alto (Manflas y Pulido) son: sector agropecuario 2,548 m³/s, sector minero 0,020 m³/s y caudal ecológico 0,280 m³/s. No se registran demandas para consumo de agua potable, sector forestal ni receptor de contaminantes.

Las proyecciones de la demanda a 10 años por sector productivo son: sector agropecuario 2,438 m³/s, sector minero 0,051 m³/s y caudal ecológico 0,280 m³/s. No se registran cambios en demandas de otros sectores.

Las proyecciones de la demanda a 25 años por sector productivo son: sector agropecuario 2,438 m³/s, sector minero 0,074 m³/s y caudal ecológico 0,280 m³/s. No se registran valores para otros sectores.

Cuenca del Río Maipo (subcuenca Maipo Alto)

Las demandas actuales de agua por sector productivo en la cuenca alta del Río Maipo son: sector agropecuario 0,426 m³/s, agua potable 0,037 m³/s, energía 50,4 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,309 m³/s y para caudal ecológico de 13,69 m³/s. No se registran valores para los otros usos.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 0,426 m³/s, para el sector agua potable es de 0,041 m³/s, sector energía de 50,4 m³/s, sector minero 0,091 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,309 m³/s y para caudal ecológico de 13,69 m³/s. No se registran valores para los otros sectores.

La proyección a 25 años sector agropecuario es de 0,426 m³/s, para el sector agua potable es de 0,044 m³/s, sector energía de 50,4 m³/s, sector minero 0,132 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,309 m³/s y para caudal ecológico de 13,69 m³/s. No se registran valores para los otros sectores.

Cuenca del Río Tinguiririca

La cuenca glaciar del Río Tinguiririca presenta una demanda actual del sector agropecuario de 37,992 m³/s, para consumo de agua potable de 0,244 m³/s, del sector minero de 2,044 m³/s, sector forestal de 0,043 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,167 m³/s y para caudal ecológico de 4,540 m³/s. No se registran valores para otros sectores.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 37,992 m³/s, para el consumo de agua potable es de 0,274 m³/s, para el sector minero es de 2,044 m³/s, sector forestal 0,072 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,167 m³/s y para caudal ecológico de 4,54 m³/s.

La proyección a 25 años para el sector agropecuario es de 37,992 m³/s, para el para consumo de agua potable es de 0,3 m³/s, para el sector minero es de

2,044 m³/s, sector forestal 0,072 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,167 m³/s y para caudal ecológico de 4,54 m³/s.

Cuenca del Río Maule

La cuenca glaciar del Río Maule Alto presenta una demanda actual del sector agropecuario de 13,033 m³/s, sector forestal de 0,007 m³/s y para caudal ecológico de 8,2 m³/s. No se registran demandas para los otros sectores.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 13,033 m³/s sector energía de 59 m³/s, sector forestal de 0,012 m³/s y para caudal ecológico de 8,2 m³/s. Los otros sectores no presentan valores y no hay cambios en la proyección a 25 años

La cuenca glaciar del Río Maule Medio presenta una demanda actual del sector agropecuario de 38,636 m³/s, para consumo de agua potable de 0,645 m³/s, sector industrial de 0,315 m³/s, sector energía de 1.342,4 m³/s, sector forestal de 0,029 m³/s, para uso de receptor de contaminantes 0,446 m³/s y para caudal ecológico de 6,830 m³/s.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 38,636 m³/s, agua potable 0,736 m³/s, industrial de 0,431 m³/s, energía 1.342,3 m³/s, forestal de 0,048 m³/s, receptor de contaminantes de 0,0446 m³/s y caudal ecológico 6,830 m³/s

La proyección a 25 años para el sector agropecuario es de 38,636 m³/s, agua potable de 0,887 m³/s, industrial de 0,690 m³/s, energía de 1.342,4 m³/s, forestal de 0,048 m³/s, receptor de contaminantes de 0,0446 m³/s y caudal ecológico 6,830 m³/s.

Para el río Loncomilla la demanda actual del sector agropecuario es de 38,943 m³/s, consumo de agua potable de 0,392 m³/s, uso industrial de 1,377 m³/s, uso forestal de 0,434 m³/s, receptor de contaminantes de 0,210 m³/s y caudal ecológico de 9,410 m³/s.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 44,556 m³/s, agua potable 0,496 m³/s, industrial de 1,883 m³/s, forestal de 0,724 m³/s, receptor contaminantes 0,210 m³/s y caudal ecológico de 9,410 m³/s.

La proyección a 25 años para el sector agropecuario es de 44,556 m³/s, agua potable 0,589 m³/s, industrial de 3,011 m³/s, forestal de 0,724 m³/s, receptor contaminantes 0,210 m³/s y caudal ecológico de 9,410 m³/s.

Cuenca del Río Bueno

La cuenca del Río Bueno presenta una demanda actual para el sector agropecuario de 0,399 m³/s, agua potable de 0,096 m³/s, industrial de 1,106 m³/s, para el sector energía de 8 m³/s y para el sector forestal 0,015 m³/s.

La proyección a 10 años presenta una demanda actual para el sector agropecuario de 0,627 m³/s, agua potable de 0,078 m³/s, industrial de 1,623 m³/s, para el sector energía de 8 m³/s, el sector forestal 0,026 m³/s, para el

sector turismo de 0,002 m³/s, para receptor de contaminantes de 0,04 m³/s y para caudal ecológico de 40,860 m³/s.

La proyección a 25 años presenta una demanda actual para el sector agropecuario de 0,627 m³/s, agua potable de 0,088 m³/s, industrial de 2,884 m³/s, para el sector energía de 8 m³/s, el sector forestal 0,026 m³/s, para el sector turismo de 0,003 m³/s, para receptor de contaminantes de 0,04 m³/s y para caudal ecológico de 40,860 m³/s.

En la cuenca del Río Pilmaiquén la demanda en el sector agropecuario es de 0,272 m³/s, para consumo de agua potable de 0,027 m³/s, para uso de energía de 150 m³/s, para el sector forestal de 0,007 m³/s y para caudal ecológico de 18,61 m³/s.

La proyección a 10 años en el sector agropecuario es de 0,273 m³/s, para consumo de agua potable de 0,032 m³/s, para uso de energía de 150 m³/s, para el sector forestal de 0,011 m³/s y para caudal ecológico de 18,61 m³/s.

La proyección a 25 años en el sector agropecuario es de 0,273 m³/s, para consumo de agua potable de 0,038 m³/s, para uso de energía de 150 m³/s, para el sector forestal de 0,011 m³/s y para caudal ecológico de 18,61 m³/s.

La cuenca del Río Rahue para el sector agropecuario tiene una demanda de 0,714 m³/s, para consumo de agua potable de 0,319 m³/s, para uso minero de 0,219 m³/s, para uso forestal de 0,016 m³/s y para receptor de contaminantes de 0,295 m³/s.

La proyección a 10 años para el sector agropecuario es de 0,733 m³/s, para consumo de agua potable de 0,275 m³/s, para uso industrial de 0,321 m³/s, forestal de 0,027 m³/s y para receptor de contaminantes de 0,295 m³/s.

La proyección a 25 años para el sector agropecuario es de 0,733 m³/s, para consumo de agua potable de 0,320 m³/s, para uso industrial de 0,571 m³/s, para uso forestal de 0,027 m³/s, para receptor de contaminantes de 0,295 m³/s.

Cuenca del Río Baker

La cuenca del Río Baker presenta una demanda actual de agua para el sector agropecuario de 0,311 m³/s, para agua potable de 0,026 m³/s, para el sector de minería de 19,915 m³/s, sector energía de 18 m³/s y para caudal ecológico de 97,51 m³/s.

La proyección a 10 años de agua para el sector agropecuario es de 0,311 m³/s, para agua potable de 0,026 m³/s, para el sector de minería de 19,96 m³/s, sector energía de 1.939 m³/s y para caudal ecológico de 97,51 m³/s.

La proyección a 25 años de agua para el sector agropecuario es de 0,311 m³/s, para agua potable de 0,028 m³/s, para el sector de minería de 19,981 m³/s, sector energía de 1.939 m³/s y para caudal ecológico de 97,51 m³/s.

5.1.4. Comparación y proyecciones

La importancia de hacer proyecciones de la evolución futura de los recursos hídricos se ha puesto en evidencia en múltiples instancias internacionales como el IPCC y nacionales, como el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático, la Política Nacional de Glaciares y la Política Nacional de Recursos Hídricos entre otras.

En este sentido el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático establece como línea de acción prioritaria el evaluar los efectos del cambio climático en las distintas fases del ciclo hidrológico, determinar la disponibilidad futura de agua para consumo humano, minería, agricultura y generación eléctrica y pronosticar los caudales futuros a partir de proyecciones de evolución del clima entre otras, estando las mencionadas a cargo de la DGA con participación de CONAMA.

De forma preliminar en la Tabla 5.3 se realizó una comparación entre las demandas de agua actuales y proyectadas (10 y 25 años y descritas en la sección 5.1.3.) y el aporte glaciar estimado. La comparación para cada cuenca muestra que el aporte glaciar estimado no cubre las demandas totales estimadas en DGA (2007a y 2007b).

La comparación en estas cuencas (Copiapó, Maipo, Tinguiririca y Baker) sólo se debe considerar como una estimación general debido a las limitaciones de la información que se presenta en DGA (2007a y 2007b), ya que la demanda por tipo de uso corresponde a un promedio anual, no existiendo valores estacionales de demanda, la cual varía a lo largo del año. Por otro lado, el aporte glaciar corresponde a una estimación para el periodo en que es más significativo, es decir en los meses de verano de los años más secos. En los meses de invierno el aporte glaciar en estas cuencas puede bajar considerablemente, hasta ser prácticamente nulo. Los mayores caudales que se presentan en los meses de invierno y primavera en estas cuencas se deben al aporte de la precipitación y al derretimiento nivo-glacial respectivamente (DGA, 2007a y 2007b). Por lo tanto, en la Tabla 5.3 se están comparando valores anuales de demanda de agua versus valores estacionales (verano de años secos) de aporte glaciar. Por ello es que deben considerarse las limitaciones de esta comparación y considerarlo sólo como una referencia. En el caso de las cuencas de Copiapó, Maipo, Tinguiririca y Baker, el aporte glaciar se encuentra entre el 10% y 67% del caudal mínimo (Tabla 5.3).

Se ha agregado en la Tabla 5.3 el valor del caudal ecológico, el que sólo en las cuencas del Maipo y Tinguiririca sería cubierto por el aporte glaciar.

Un análisis por tipo de uso, derivado de la sección anterior (5.1.3.), muestra que en la cuenca alta del Copiapó el aporte glaciar sólo es suficiente para cubrir la demanda del sector minero tanto en la actualidad como en la proyección a 10 y 25 años.

En el caso del Maipo el aporte glaciar es suficiente para satisfacer las demandas para los usos agropecuarios, agua potable, receptor de contaminantes y caudal ecológico. El uso energético, de mayor demanda en esta cuenca, no es cubierto por el aporte glaciar en los meses de verano.

En el caso de la cuenca del Tinguiririca el aporte glaciar cubre las demandas actuales de agua potable, minería, forestal, turismo, receptor de contaminantes y caudal ecológico. El sector agropecuario no alcanza a ser cubierto en su totalidad por el aporte glaciar de los meses de verano.

Por último, en la cuenca del Baker, la demanda para el uso actual en energía y la proyección a 10 y 25 años es mucho mayor al aporte glaciar a la cuenca. El aporte glaciar también es insuficiente para satisfacer el caudal ecológico de dicha cuenca.

En definitiva y ya que los caudales derivados de aporte glaciar son insuficientes para satisfacer en su totalidad las demandas de usos de agua de los distintos sectores, se puede estimar que durante los años de escasez de agua, se genere una gran presión sobre los caudales generados por los glaciares. Esta situación adquiere relevancia en las cuencas de Copiapó y Baker donde la demanda para uso como caudal ecológico no es cubierta por el aporte glaciar.

Tabla 5.3. Comparación de caudales aportados por glaciares y demandas

Cuenca	Caudal mínimo (m ³ /s)	Aporte glaciar estimado		Demanda de agua (m ³ /s)			Caudal Ecológico (m ³ /s)
		(%)	(m ³ /s)	Actual	10 años	25 años	
Copiapó	0,8	10	0,08	2,85	2,77	2,79	0,28
Maipo	63	67	42,21	64,86	64,96	65,00	13,69
Tinguiririca	29	67	19,43	45,03	45,09	45,12	4,54
Baker	324	22	71,28	135,77	2.056,81	2056,84	97,51

No existen en Chile estudios detallados que proyecten a largo plazo el aporte glaciar a las cuencas, pero existen algunos trabajos puntuales que han abarcado el tema de la demanda de agua en cuencas específicas, entre ellos podemos citar:

Figuroa, 2008; se aplicó en la cuenca del río Cachapoal para un horizonte de 30 años. Se concluye que los caudales medios mensuales de salida de la cuenca se verían afectados por un aumento en el período de deshielo y una disminución en el período invernal. Para los recursos hídricos subterráneos, no se obtuvieron cambios significativos. También, se evalúa el impacto en algunas actividades asociadas a dicha cuenca, encontrándose un cambio perjudicial para el riego, agua potable y centrales hidroeléctricas, mientras que la minería no se vería mayormente afectada.

López, 2001; se estudiaron los caudales de la cuenca del Río Mapocho. Se predice que dado un aumento de las temperaturas de 4,5°C, la escorrentía media de primavera se reduciría en un 34% y en verano un 10%, mientras que los caudales de otoño e invierno aumentarían en un 15% y 24% respectivamente.

Sin duda hace falta aún mucho trabajo para establecer los mejores modelos hidrológicos y climáticos adecuados para realizar proyecciones a nivel nacional, así como también, la medición y recopilación de los datos de entrada que son el factor crítico para la calibración y validación de los modelos.

5.2. Riesgos asociados a glaciares debido a causas naturales

5.2.1. Análisis global y teoría

En la actualidad, el retroceso de los glaciares proporciona una serie de procesos que genera potenciales peligros, donde cualquier característica o fenómeno de carácter glacial que afecte de forma negativa las actividades humanas, directa o indirectamente, puede ser considerado como un “riesgo glacial”. Además, dentro del actual y previsto escenario de cambio climático, se espera que la frecuencia, y en algunos casos la magnitud de los riesgos de origen glacial, aumenten (Reynolds Geo-Sciences Ltd, 2003). Así, los peligros asociados a glaciares y a lagos glaciales amenazan comunidades y actividades comerciales en muchas cordilleras del mundo (Quincey *et al.*, 2005), incluyendo a los Himalayas (Richardson & Reynolds, 2000), los Andes (Carey, 2005), los Alpes Europeos (Huggel *et al.*, 2004b & 2005), las North American Rockies (Clague & Evans, 2000) y las montañas del Cáucaso (Kääb *et al.*, 2003). Estos peligros están asociados a avalanchas de hielo, variaciones en la longitud de un glaciar, la desestabilización de paredes rocosas, repentinas descargas desde lagos glaciales, la combinación o reacción en cadena de varios de estos fenómenos (Kääb *et al.*, 2005b), entre otros.

Tabla 5.4: Tipos de peligros asociados a glaciares (Fuente: Modificado de Reynolds Geo-Sciences Ltd, 2003).

TIPOS DE PELIGROS		DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS	REFERENCIAS
REMOCIONES EN MASA	Avalanchas de Hielo	Repentinos movimientos en masa de hielo pendiente abajo. Clasificados como "ramp-type" o "cliff-type", dependiendo del área donde parten.	Cordillera Blanca, Perú. 1970. Cerca de 20,000 muertos en la ciudad de Yungay.	Plafker <i>et al.</i> , 1971
	Permafrost	Producto de las tendencias de calentamiento debiera producirse una degradación de los suelos congelados y permafrost, con una consiguiente inestabilidad de taludes y caída de roca.	Río Colorado, Santiago-Chile. 1987. Un aluvión, gatillado por una gran caída de rocas, durante un año cálido y de alta precipitación, dejó 29 muertos y graves daños en infraestructura.	Casassa & Marangunic, 1993
CAMBIOS DEL VOLUMEN Y EXTENSIÓN DE UN GLACIAR	Surge	Rápido y brusco avance de la posición terminal del glaciar, con velocidades muy elevadas y superiores a las normales.	Glaciar Horcones Inferior, Mendoza, Argentina. 1985.	Milana, 2004
	Colapso de frentes desprendentes de glaciares y colapso de plataformas de hielo	El frente desprende de un glaciar que termina en un lago o en un fiordo, un sector costero del hielo continental de Antártica o Groenlandia, o bien una plataforma flotante de hielo, puede repentinamente quebrarse y flotar a la deriva, pudiendo entorpecer la navegación y producir cambios ecológicos a nivel local.	Glaciar Grey, Chile. 1997. Colapso de 1,5 km ² del glaciar, lo que imposibilitó por tres temporadas la navegación por el lago.	Rivera y Cassasa, 2004
INUNDACIONES DE ORIGEN GLACIAL	Glacial Lake Outburst Flood (GLOF)	Evacuación violenta de gran cantidad de agua desde un lago proglacial, provocada particularmente por la ruptura de una barrera morrénica. Este término es comúnmente usado en las regiones del Himalaya, donde este fenómeno es recurrente.	Luggye Tsho, Bhutan, 1994. 26 muertos.	Richardson & Reynolds, 2000
	Ice Dammed Lake Outburst Flood (IDLOF)	Descarga de gran cantidad de agua desde lagos sub, intra o supraglaciales, producto de la ruptura del hielo que los represaba. Aunque, existen diferentes mecanismos desencadenantes.	Keyajir Lake, Xinjiang, China, cada 1-4 años.	Zhang, 1992
INTERACCIONES GLACIO-VOLCÁNICAS	Jökulhlaups	Descarga de gran cantidad de agua desde lagos situados en un glaciar, los que están asociados a la actividad volcánica.	Grimsvötn, Jökulhlaup Islandia, 1996. Peaks de descargas de 34,000 m ³ s ⁻¹ . Daños infraestructurales	Gudmundsson <i>et al.</i> , 1997
	Flujos Laháricos	Flujos hiperconcentrados, asociados a procesos de origen volcánico, generados como producto de la fusión de nieves y glaciares, por el calor geotermal desarrollado durante erupciones.	Nevado del Ruiz, Colombia. 1985. Más de 20,000 personas perdieron la vida.	Naranjo <i>et al.</i> , 1986; Huggel <i>et al.</i> , 2007; Thouret <i>et al.</i> , 2007

a. Avalanchas y deslizamientos de hielo glaciar.

Las avalanchas son deslizamientos de grandes masas de hielo, asociadas normalmente a glaciares en pendientes escarpadas, donde la geometría y la condición térmica del frente del glaciar, constituyen un factor clave de control en la estabilidad de estos cuerpos de hielo (Alean, 1985). Avalanchas de este tipo han sido las causantes de grandes catástrofes, sobretodo por los grandes volúmenes de material en movimiento y las distancias recorridas (Len & Asociados, 2001).

Completos estudios sobre este tipo de fenómenos, son escasos y con un limitado conocimiento del proceso (Huggel *et al.*, 2004a). Sin embargo, se sabe que las condiciones para que se inicie una avalancha, según Alean (1985), depende de dos tipos de áreas morfológicas (Figura 5.3): tipo-rampa (“ramp-type”) y tipo-acantilado (“cliff-type”). El primer tipo, son avalanchas desde glaciares situados en zonas con fuerte pendiente, donde el mecanismo

desencadenante es el deslizamiento de una masa de hielo por la superficie rocosa producto de una reducción en la adhesión (debido a la acción lubricante del agua de fusión, o bien por aumento de carga normal por incremento de la masa en la zona de acumulación). Mientras que, el segundo tipo son avalanchas desde glaciares colgantes donde ocurre algún quiebre fuerte en la pendiente, que debido a la fuerte tensión y presión dentro del frente del glaciar, se generan seracs. Así, glaciar abajo, en zonas más planas, el hielo depositado por las avalanchas puede constituir un cuerpo glaciar que se denomina glaciar reconstituido o glaciar regenerado.

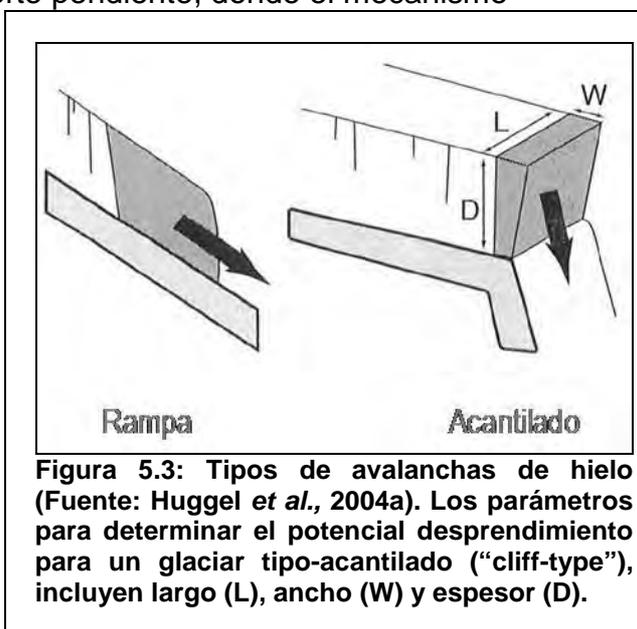


Figura 5.3: Tipos de avalanchas de hielo (Fuente: Huggel *et al.*, 2004a). Los parámetros para determinar el potencial desprendimiento para un glaciar tipo-acantilado (“cliff-type”), incluyen largo (L), ancho (W) y espesor (D).

Aunque las avalanchas de hielo son frecuentes y representan la evidencia palpable de flujo activo en un glaciar (Post & Lachapelle, 2000), como mecanismo natural de ablación, acumulación y/o de traspaso de masa entre ambas zonas (Salzmann *et al.*, 2004; Post & Lachapelle, 2000). En Chile no se han registrado casos catastróficos de este tipo, ya que estos fenómenos se manifiestan en lugares recónditos y despoblados; sin embargo, pueden generar un alto impacto en la población debido al incremento en el último tiempo de actividades humanas en estas zonas, por ejemplo personas que por deseos turísticos y/o recreativos se exponen a este proceso natural (Carrión, 2007).

b. Permafrost

El permafrost es suelo que ha estado bajo el punto de congelación de agua (0°C) durante uno o más años, donde la superficie superior llamada capa activa, usualmente se deshiela y congela por temporadas (Benn & Evans,

1998), lo cual podría provocar una inestabilidad en taludes y generar caídas de rocas.

c. Avance repentino de glaciares del tipo galopante (*surge*).

Un surge es un avance catastrófico y súbito de un glaciar, con velocidades muy elevadas y superiores a las normales debido a una inestabilidad intrínseca de los glaciares, que resulta en la rápida transferencia de masa desde la zona de acumulación a la de ablación (Paterson, 1994), lo cual provoca un avance extraordinario del glaciar, extensión longitudinal y fuertes cambios de elevación, agrietamientos y plegamiento de morrenas mediales. Este tipo de procesos puede repetirse cada cierta cantidad de años, pero no es estrictamente periódico. Quizás lo más particular de este hecho es que sólo está en conexión con ciertos glaciares, siendo la razón de estos avances, su ocurrencia y el mecanismo que explica ello, temas actuales de discusión (Paterson, 1994; Rivera *et al.*, 1997a; Rivera *et al.*, 1997b; Milana, 2004). Existen glaciares en surge en distintas cadenas montañosas del mundo: Norte América, Islandia, Svalbard, Asia, y en los Andes de Chile y Argentina. La mayoría de los glaciares en surge ocurren en cadenas montañosas relativamente jóvenes que están sometidas a una fuerte erosión (Paterson, 1994).

d. Colapso de frentes desprendentes de glaciares en fiordos o lagos y colapso de plataformas de hielo o de hielos continentales en el océano.

El frente desprendente de un glaciar que termina en un lago, fiordo o en un sector costero, puede repentinamente quebrarse y flotar a la deriva. En glaciares de montaña este fenómeno puede ocurrir debido al retroceso de un glaciar inducido inicialmente por un calentamiento, pero amplificado por factores geométricos como por ejemplo la pérdida de sustentación basal en aguas profundas (como está ocurriendo en el glaciar Columbia en Alaska).

En glaciares y en ice streams (grandes glaciares que drenan los hielos continentales) puede ocurrir también una aceleración del hielo por causas dinámicas que puede resultar en el fuerte retroceso y colapso de partes de su frente. Por ejemplo, el glaciar Jakobshavn, el más rápido del mundo, drena el 6,5% del hielo continental de Groenlandia y su velocidad se ha incrementado al doble en el período 1992-2003, con una tasa en 2003 de 12,8 km a⁻¹ (Joughin *et al.*, 2004).

En las plataformas flotantes de Ross y de Filchner-Ronne en la Antártica, que son las mayores del mundo, ocurren episódicamente grandes desprendimientos de témpanos, el mayor de los cuales ha sido B-15A, con una dimensión de 27 km x 122 km. Tales desprendimientos pueden entorpecer la navegación de buques, y producir por ejemplo, cambios ecológicos a nivel local (Arrigo *et al.*, 2002). Debido a la fusión del hielo por calentamiento atmosférico y oceánico, toda una plataforma flotante o parte de ella puede colapsar, lo cual normalmente ocurre por fracturamiento múltiple como ha ocurrido en la Península Antártica en décadas recientes (Scambos *et al.*, 2004).

e. Glacial Lake Outburst Flood (GLOF)

El "Glacial Lake Outburst Flood" no es un fenómeno nuevo ya que existe evidencia que la frecuencia de estos acontecimientos ha aumentado en el último tiempo, siendo un término comúnmente usado en los Himalayas para describir catastróficas inundaciones desde lagos proglaciales represados por

morrenas (Richardson & Reynolds, 2000). Aunque también se han registrado casos de estas características en la Cordillera de los Andes (Hauser, 1993; Huggel *et al*, 2002; Carey, 2005) y Norteamérica (Clague & Evans, 2000), entre otros. La posibilidad de ocurrencia de un colapso y la magnitud de una inundación dependen de variados factores: (a) volumen y tipo del material que conforman la barrera; (b) superficie de la hoya hidrográfica; (c) geometría de la ruta de descarga; (d) régimen hidrológico de la hoya; y, (e) dinámica glacial (Hauser, 1993).

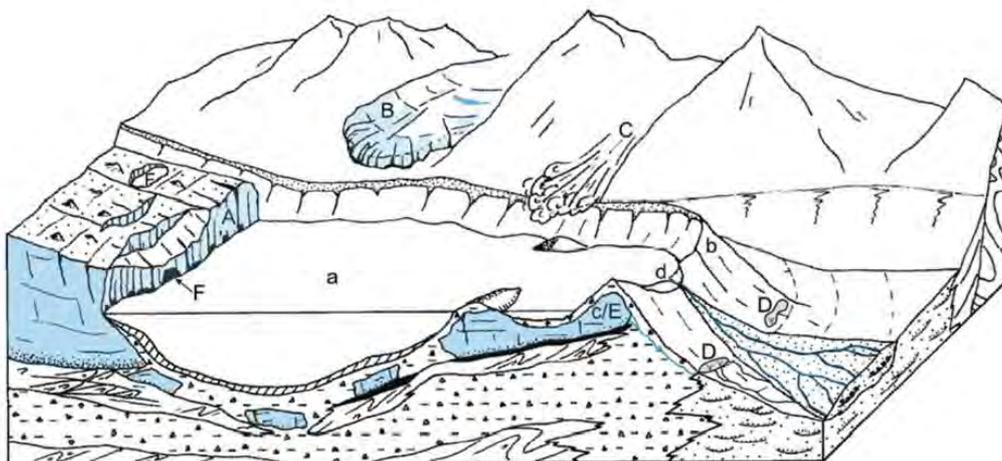


Figura 5.4: Tipos de avalanchas de hielo (Fuente: Huggel *et al.*, 2004a). Los parámetros para determinar el potencial desprendimiento para un glaciar tipo-acantilado (“cliff-type”), incluyen largo (L), ancho (W) y espesor (D).

Los componentes de un lago proglacial son presentados en la Figura 5.4 y este comprende dos partes: por un lado, las características del lago y, por otro, los procesos que puedan generar la ruptura de la barrera morrénica, tal como el rebalse de la morrena por una ola proveniente del desplazamiento del agua del lago producto de una avalancha de rocas o hielo (Richardson & Reynolds, 2000). Justamente las barreras morrénicas son estructuralmente débiles e inestables y experimentan constantes cambios debido a rupturas, desplomes etc. (Thomas & Chamling, 2005; Carey, 2005; Kääb *et al.*, 2005b), siendo muy susceptibles a los impactos de olas por una avalancha (de roca, nieve o hielo) o a la desintegración de núcleos de hielo dentro de ésta (Richardson & Reynolds, 2000; Huggel *et al.*, 2004b; Hubbard *et al.*, 2005).

f. Ice-Dammed Lake Outburst Flood (IDLOF)

El término “ice-dammed lake outburst flood” se refiere a inundaciones, que suelen ocurrir periódicamente, producto de una falla en una represa de hielo (Reynolds Geo-Sciences Ltd, 2003), siendo identificados varios tipos de mecanismos desencadenantes del drenaje en un lago (Clague & Mathews, 1973; Tweed & Russell, 1999).

Un lago represado por hielo puede ser definido como un cuerpo de agua significativo y permanente, localizado en, sobre, bajo o en los márgenes de un glaciar, tal que su existencia dependa de alguna manera del represamiento de un glaciar (Tweed & Russell, 1999). Estos lagos pueden efectuar cambios geomorfológicos considerables en ambientes glaciales por la liberación ocasional o recurrente del agua almacenada dentro de ellos, ya que tienen

características temporales: se expanden y contraen en respuesta de las fluctuaciones glaciales (Benn & Evans, 1998).

g. Jokúlhlaups

El término islándico “Jökulhlaups” fue usado inicialmente para describir un tipo de inundación asociada a erupciones volcánicas subglaciales (Thorarinsson, 1939), siendo usado posteriormente como sinónimo para cualquier inundación causada por la descarga repentina, y a veces catastrófica, de grandes cantidades de agua desde un lago de origen glacial (Maizels, 1997; Roberts, 2005). Sin embargo, en la actualidad se ha intentado volver a utilizar este término para describir inundaciones derivadas de la interacción glaciovolcánica, siendo Islandia el sitio más importante para estudiar este tipo de fenómenos, ya que actualmente el 10% (11.200 km²) de este lugar está cubierto de hielo y el 60% de esta cobertura se encuentra en zonas volcánicamente activas (Björnsson, 2002). En Islandia, estos eventos han generado pérdida de vidas, destruido campos y cultivos, devastado grandes áreas con vegetación, amenazado caminos, puentes y plantas hidroeléctricas, y generado grandes impactos geomorfológicos (Björnsson, 1992).

h. Lahar.

El término “lahar” adquiere la connotación de un flujo hiperconcentrado, vinculado a procesos de origen volcánico, cuyo comportamiento, energía, velocidad y producto difiere sustancialmente de cualquier otro tipo de flujos (Hauser, 1993). Stiefel (1962) propone una clasificación genética de éstos, donde sean llamados “lahares glaciovolcánicos”, aquéllos que obtienen el agua como resultado de la fusión de nieves y glaciares por la energía térmica de las erupciones, ya que se dispone de antecedentes respecto de lahares originados por precipitaciones intensas, denominados “lahares fríos” o “de lluvia”, como el ocurrido en el volcán Yate, sur de Chile, en 1896 (Hauser, 1985).

Las características y potencial destructivo de los lahares depende de sus respectivos procesos de iniciación y de cómo éstos cambian, en la medida del avance ladera abajo; incluyen contenido de agua y granulometría del flujo, así como su volumen, duración y caudal máximo (Hauser, 1993). La mayoría de los lahares y coladas de barro sigue la red de drenaje existente de los valles fluviales, por lo que es relativamente fácil predecir las áreas que puedan ser afectadas.

i. Combinación de procesos

Los ambientes glaciales y periglaciales representan sistemas altamente dinámicos (Figura 5.5), donde las interacciones generadas dentro de éstos son de gran importancia, debido al potencial sinérgico que tienen para causar grandes catástrofes, representando serios riesgos cuando interactúan con sistemas humanos (Huggel *et al.*, 2004b; Kääb *et al.*, 2005a; Kääb *et al.*, 2005b; Zemp *et al.*, 2007).

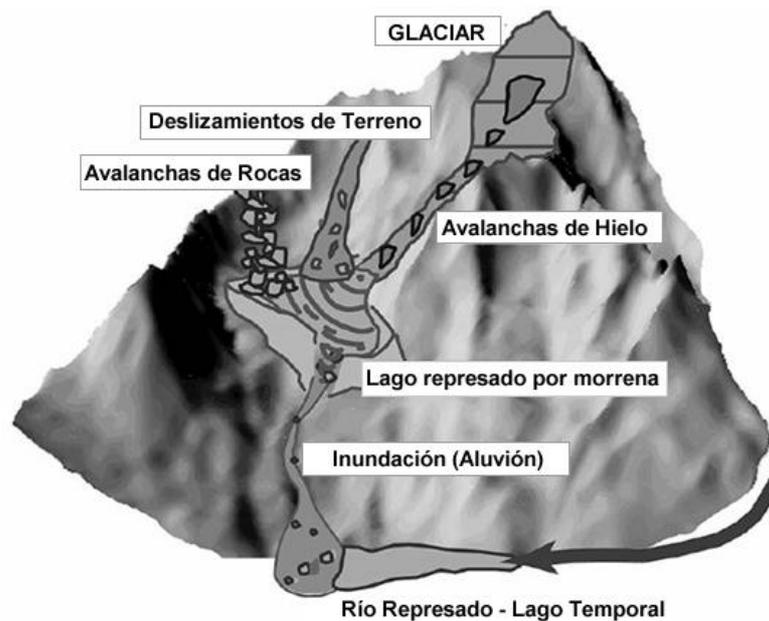


Figura 5.5: Esquema que muestra las potenciales interacciones de procesos en un ambiente glacial o periglacial (Fuente: Huggel *et al.*, 2004a).

5.2.2. Estudios de casos a nivel nacional

Carrión (2007) presentó recientemente una revisión de los eventos asociados a peligros de glaciares en Chile, donde se presentan eventos catastróficos asociados a la dinámica glacial en Chile, tales como avalanchas de hielo, “surges”, “ice dammed lake outburst flood” (IDLOF), “glacial lake outburst flood” (GLOF), “jökulhlaups” y flujos laháricos.

a. Avalanchas y deslizamientos de hielo glacial.

Aunque las avalanchas de hielo son frecuentes y representan la evidencia palpable de flujo activo en un glaciar (Post & Lachapelle, 2000), en Chile existen pocos registros de efectos destructivos de avalanchas de hielo, debido a que suceden normalmente en zonas remotas y despobladas (Carrión, 2007; Hauser, 1993). Uno de los pocos que ha sido estudiado es el Glaciar Soler del CHN (Kobayashi & Naruse, 1987; Izumi & Naruse, 2001), cuyas avalanchas sin embargo no han tenido efectos perjudiciales para la población. Otro caso fue detectado en glaciar Aparejo, Valle del Yeso, donde se produjo un deslizamiento de una parte relevante del glaciar, a fines de los 70's, sin daños a personas o infraestructura (Peña, 1980).

b. Permafrost

Un aluvión de aproximadamente $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ocurrió el 29 de noviembre de 1987 en el río Colorado, Andes Centrales, 100 km al este de Santiago, el cual fue gatillado por una gran caída de rocas en el estero Parraguirre, durante un año cálido y de alta precipitación que coincidió con un evento el Niño. El aluvión dejó 29 muertos y graves daños en parte de las instalaciones y equipamiento de las centrales hidroeléctricas El Alfalfal y Los Maitenes (Casassa & Marangunic, 1993).

c. Avance repentino de glaciares del tipo galopante (*surge*).

Los glaciares que han experimentado avances repentinos, similares a un surge, han sido descritos por Lliboutry (1956) para el Glaciar Nieves Negras Chileno ($33^{\circ} 49' \text{ S} - 69^{\circ} 54' \text{ W}$), el Glaciar del Río Museo ($33^{\circ} 31' \text{ S} - 69^{\circ} 55' \text{ W}$), el

Glaciar Juncal Sur (33°09' S – 70°07' W) y el Glaciar Universidad (34°41' S – 70°21' W). En Patagonia, uno de los glaciares que ha experimentado este proceso, o al menos se ha planteado dicha hipótesis, es el Glaciar Pío XI (Warren & Rivera, 1994; Rivera *et al.*, 1997a). Una de las consecuencias de este tipo de fenómenos, es la inundación de valles proglaciares, resultando en daños a la infraestructura y la propiedad, tal como ha ocurrido en el Pío XI en el pasado (Rivera, 1992).

d. Colapso de frentes desprendentes de glaciares en fiordos o lagos y colapso de plataformas de hielo o de hielos continentales en el océano.

Este tema, crucial y objeto de continuos estudios gubernamentales en el Ártico, nunca ha tenido mayor importancia en Chile, debido a que los témpanos rara vez dificultan la navegación. Sin embargo, la aceleración o desintegración de las lenguas de los glaciares que caen al mar en la vertiente occidental del Campo de Hielo Sur podría eventualmente dificultar o impedir la navegación en importantes rutas náuticas como lo son los canales Messier, Wide, Andrés, Pitt, Esteban y Sarmiento, entre otros.

Procesos de desintegración han sido observados, por ejemplo, en algunos glaciares que caen a los lagos que rodean Campo de Hielo Norte, como el Glaciar Grosse (Aniya & Wakao, 1997; Rivera *et al.*, 2007), a pesar de que ninguno de dichos lagos es navegable. La desintegración de la represa de hielo natural que contiene el recientemente embalsado Lago Greve en el Fiordo Eyre, frente norte del Glaciar Pío XI, hacen imaginar escenarios en que podría suceder una obstrucción de importantes vías de navegación. Hasta el momento no se ha realizado ningún estudio que evalúe la importancia y repercusiones que traerían fenómenos como el colapso del Glaciar Pío XI, por lo que es una especulación el plantearlo como un peligro, sin embargo no se puede dejar de tomar en cuenta ni tampoco negar la necesidad de evaluarlo debidamente.

En el lago navegable Grey ocurrió un colapso de 1,5 km² del glaciar en 1997 (Rivera & Casassa, 2004) que transformó el lago en lo que los locales llamaban un “cementerio de témpanos” los que imposibilitaron por tres temporadas la operación de la embarcación L/M Grey II que había sido recientemente adquirida por la Hostería Grey en esa época para llevar pasajeros a visitar el frente del glaciar. Tras periódicos intentos, finalmente en Enero 2002 se iniciaron los viajes al Glaciar, los que continúan ininterrumpidamente hasta el día de hoy.

En el caso del Lago O'Higgins, los lugareños recuerdan cómo en la década de los 70's, con un Glaciar O'Higgins sumamente activo en cuanto a desprendimientos, en ocasiones el acceso a la localidad de Candelario Mancilla se encontraba completamente bloqueado por numerosos témpanos, lo cual sin duda se debió al fuerte retroceso del Glaciar O'Higgins (Casassa *et al.*, 1997). En la actualidad se realizan viajes regulares por este lago y a pesar de la menor abundancia de témpanos con respecto a la década de los 70s, los de tamaño mediano y pequeño aún son considerados un peligro para la navegación debido a que en condiciones de tormenta éstos se confunden con las olas e incluso pasan desapercibidos a los radares. Por otra parte, en los últimos años, dos muelles en la zona de la Península Lago Chico han sido destruidos por témpanos impulsados por el viento.

e. Glacial Lake Outburst Flood (GLOF)

El vaciamiento de este tipo de lagos puede ser provocado, en primer lugar, por una falla o ruptura de la barrera morrénica, generando inundaciones aguas abajo como en los casos del río Engaño (46°27' S – 72°58' W) y el lago Arco (47°16' S – 73° 15' W), ambos en Campo de Hielo Norte, donde se pudo haber producido una rápida incisión en la barrera producto de la corriente del agua. Es decir, el agua acelera la erosión y amplía su salida, generando una reacción catastrófica que tiene como resultado la liberación rápida de grandes cantidades de agua y sedimento (Benn & Evans, 1998).



Figura 5.6: Vista aérea de la Laguna Cerro Largo, al día siguiente de su vaciamiento, donde se observa que el volumen de aguas remanentes corresponde, aproximadamente, al 20-25% del almacenamiento normal.

En segundo lugar, el vaciamiento puede ser provocado por la generación de olas debido a deslizamientos de terrenos o avalanchas de nieve/hielo, provocando que el agua sobrepase o disecte la morrena, y por lo tanto, se rompa la barrera, generando una inundación aguas abajo (Huggel, 2004; Thomas and Chamling, 2005), como es el caso del GLOF del Río Soler en 1989 que fue gatillado por el desprendimiento de bloques de hielo que cayeron sobre la laguna Cerro Largo (Figura 5.6), y causó grandes olas que rebalsaron y colapsaron la morrena por gradual erosión del estrecho canal de drenaje, causando serios daños aguas abajo, como pérdida de viviendas y ganado (Horvath, 1989; Hauser, 1993). De esta manera, las barreras morrénicas son, a menudo, particularmente susceptibles a los impactos de olas, producto particularmente de las paredes abruptas y la estrecha geometría del lago (Huggel *et al.*, 2004a).

f. Ice-Dammed Lake Outburst Flood (IDLOF)

Se puede establecer que la formación y permanencia de estos lagos está estrechamente conectada con las oscilaciones de los glaciares. Por ejemplo, el caso ocurrido en el Glaciar Río Seco de los Tronquitos (28°33' S – 69°43' W), Región de Atacama, donde el vaciamiento violento de un lago represado en el glaciar en 1985, provocó un aluvión de gran magnitud que afectó el embalse Lautaro (Peña & Escobar, 1987; Peña & Klohn, 1990). Y también se conoce el caso del glaciar Dickson (50°50' S – 73°09' W), donde el vaciamiento violento de un gran lago represado por el glaciar Dickson en el verano de 1982 y 1983, generó grandes crecidas que afectaron el normal flujo turístico en el Parque Nacional Torres del Paine, ya que se inundaron los caminos en el sector y varias instalaciones ribereñas sufrieron numerosos daños (Peña & Escobar, 1983). En el último tiempo, se han presentado dos mediáticos casos: (a) el primero se detectó en mayo del 2007 en Campo de Hielo Sur, en el lago Témpanos (Figura 5.7), ubicado en las cercanías de los glaciares Bernardo y

Témpanos (Rivera *et al.*, 2008c); y, (b) el segundo se desencadenó por primera vez en abril de 2008 en Campo de Hielo Norte, en el lago Cachet II, represado por el glaciar Colonia (Casassa *et al.*, 2008). La ocurrencia de estas recientes crecidas, son fenómenos de ocurrencia natural, pero afectados por el mayor derretimiento debido al retroceso glaciar en la zona (Casassa *et al.*, 2008; Rivera *et al.*, 2008c).



Figura 5.7: Lugar ocupado por el lago Témpanos, CHS, después de su vaciamiento (Fuente: Gentileza CONAF)

g. Jokülhlaups

Períodos de intensa actividad volcánica son responsables de cambios substanciales en el ambiente subglacial, formando grandes e inestables lagos (Benns and Evans, 1998), los cuales pueden vaciarse tal como ocurrió en 1973 en el volcán Hudson ($45^{\circ}54' S - 72^{\circ}58' W$), cuando se produjo el vaciamiento de un lago, ubicado en la caldera, debido al derretimiento del hielo provocado por un reactivamiento geotérmico (Urrutia & Lanza, 1993; Naranjo *et al.*, 1993; González-Ferrán, 1995).

h. Lahar

Existen numerosos casos de flujos laháricos en Chile gatillados por erupciones volcánicas (Carrión, 2007). Por ejemplo, el volcán Peteroa ($35^{\circ}14' S - 70^{\circ}31' W$) en la Región del Maule ha alcanzado fases eruptivas muy violentas con características catastróficas en algunos casos (Carrión, 2007), asociada a la generación de lahares (Urrutia & Lanza, 1993; González-Ferrán, 1995). Otros trabajos de este tipo para esta región, tienen carácter confidencial y no han sido revisados.

Lara (2004) hace una revisión de los riesgos volcánicos asociados al Volcán Villarrica, incluyendo lahares y señalando las poblaciones más propensas a ser afectadas por ellos. Existen muchos estudios para esta región volcánica, en especial para los volcanes Chillán, Llaima (Figura 5.8), Osorno, Copahue,

Villarrica y Calbuco. Entre muchos otros puede mencionarse a Moreno, 1993; Moreno, 2000; Moreno, 2004; Moreno & Clavero, 2006; Moreno *et al.*, 1994; Naranjo & Lara 2004; Naranjo & Moreno, 2004; Clavero & Moreno, 2004; Clavero *et al.*, 2008; Hauser, 1985; Hauser, 1993.

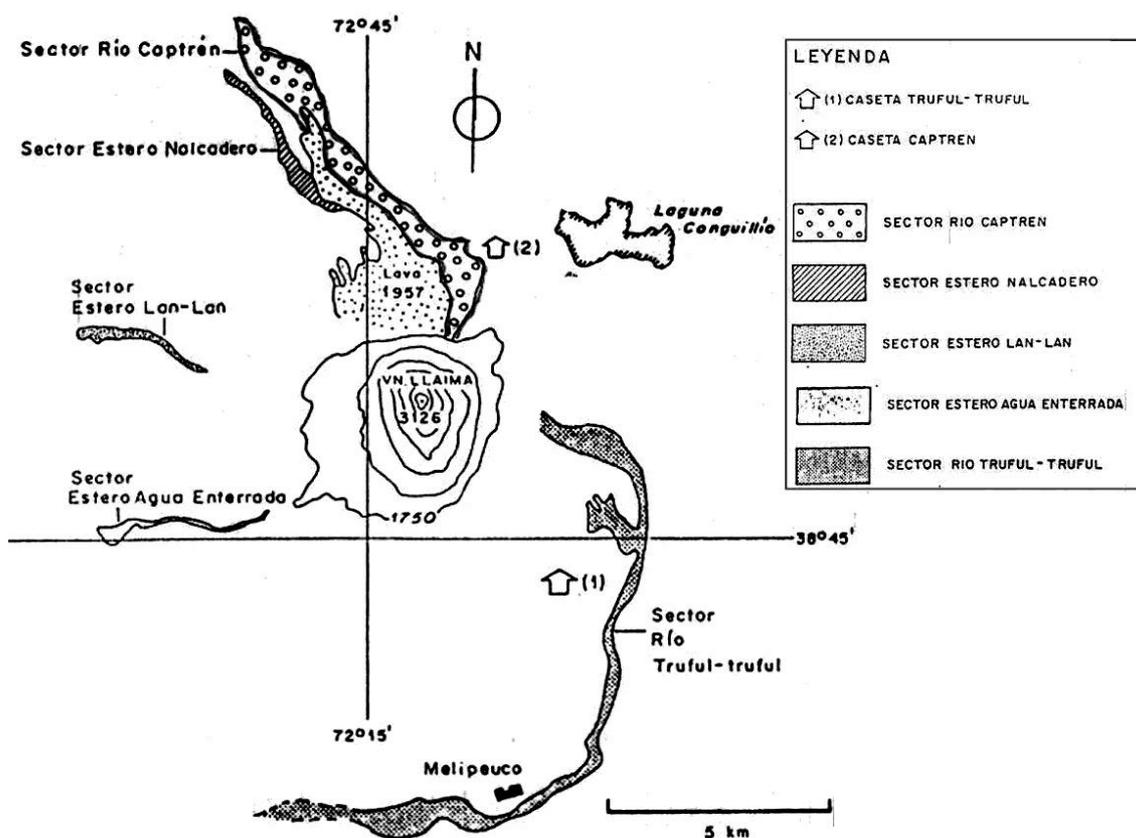


Figura 5.8: Mapa esquemático que muestra la distribución de los flujos laháricos del Volcán Llaima (Fuente: Quinteros, 1991).

Numerosos volcanes existen en los Andes Patagónicos, muchos de los cuales presentan cubierta glaciár, y que han tenido actividad reciente (González-Ferrán, 1995; USGS, 1998). No existe ningún trabajo sistemático que identifique todos los glaciares asociados a centros eruptivos y las poblaciones expuestas. González-Ferrán (1995), señala para algunos casos las poblaciones que serían probablemente afectadas por lahares en caso de erupción, pero no se han realizado aún trabajos que modelen los alcances reales que podrían tener estos eventos en los entornos volcánicos y en la población. Entre los estudios de detalle de volcanes patagónicos cubiertos por glaciares, destacan Rivera *et al.*, 2006c; Naranjo *et al.*, 1993; Naranjo & Stern, 1998; Orihashi *et al.*, 2004.

i. Combinación de procesos

Existe un importante número de casos registrados en Chile, donde varios fenómenos explicados anteriormente de forma separada se combinan, generando alguna catástrofe. Por ejemplo, ríos o fiordos pueden ser temporalmente represados por el avance de la lengua de un glaciár, como lo sucedido en el valle del río Olivares en 1954, donde el avance del glaciár Juncal Sur obstruyó el drenaje normal de los glaciares Olivares Alfa, Olivares Beta y Olivares Gamma (Figura 5.9), Andes Centrales, generando una pequeña laguna en la cabecera del valle del río Olivares, que posteriormente

se vació, interrumpiendo la operación de la central hidroeléctrica El Alfalfal (Lliboutry, 1956; Peña & Klohn, 1990; Carrión, 2007).

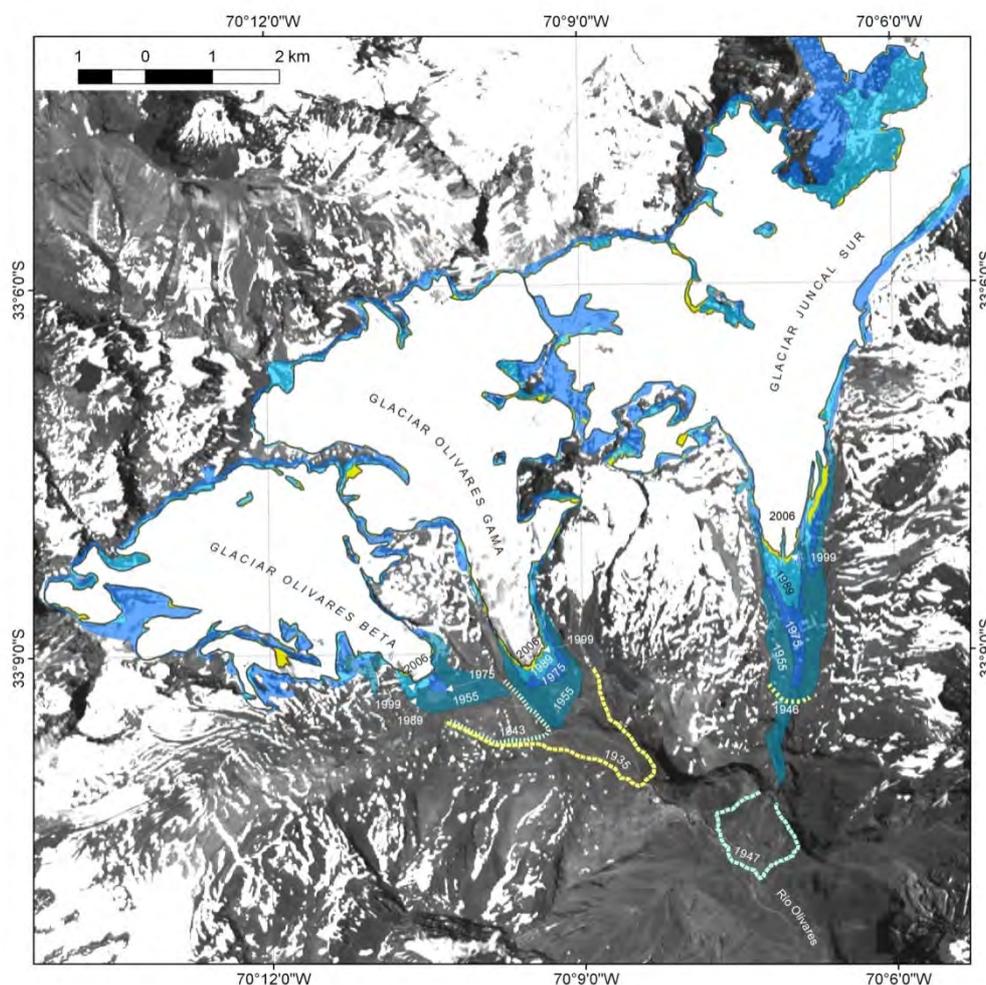


Figura 5.9: Variaciones frontales de los glaciares Olivares Beta, Olivares Gama y Juncal Sur, donde se aprecia el avance y posterior retroceso de éste último, que provocó el vaciamiento de una laguna. Fuente: Rivera *et al.*, 2008.

También se tiene el caso del lago Calafate (46°45' S – 73°02' W), en Campo de Hielo Norte, donde el GLOF ocurrido en el 2000 fue provocado por avalanchas de rocas que generaron el colapso de la barrera morrénica, generando un aluvión aguas abajo que formó una represa temporal de rocas y sedimentos en el inicio del valle del río Leones (Harrison *et al.*, 2006).

5.3. Identificación de potenciales efectos de actividades humanas en los glaciares

5.3.1. Actividades que pueden afectar glaciares

Aparte de los efectos generados en glaciares por el proceso de cambio climático, o la actividad volcánica, existen actividades antrópicas que los afectan directamente. Generalmente ligadas a actividades productivas, los glaciares se ven afectados por procesos invasivos en su superficie, que incluyen su destrucción y/o remoción como también por la depositación de material particulado, entre otras consecuencias.

En Chile existe poca información respecto a los impactos en los glaciares relacionados con actividades productivas, sin embargo, los potenciales efectos de actividades humanas sobre glaciares se pueden acotar en los siguientes puntos:

5.3.1.1. Actividad Minera: Exploración y Explotación

La exploración minera genera impactos en los glaciares principalmente asociados a la construcción de caminos sobre ellos, el consiguiente flujo vehicular, incluyendo maquinaria y camiones, y la realización de sondajes (Bórquez *et al.*, 2007). La construcción de caminos implica el despeje y nivelación de secciones sobre los glaciares (principalmente rocosos), lo cual genera impactos en el flujo hídrico de los glaciares. El tránsito de vehículos motorizados genera el levantamiento de polvo el cual posteriormente se deposita sobre la superficie de glaciares descubiertos aumentando el derretimiento por la absorción de calor de las partículas. Por último, la realización de sondajes, tanto cercanos a la superficie de un glaciar como sobre ella misma. Se ha llegado incluso a dinamitar la superficie de un determinado glaciar con el propósito de construir la infraestructura necesaria para los sondajes (Bórquez *et al.*, 2007).

En la etapa de explotación los impactos corresponden a la remoción de glaciares, la utilización de superficies glaciares (descubiertas y rocosas) como botaderos de material estéril, el aumento de la depositación de polvo sobre las superficies glaciares debido a las excavaciones, circulación de vehículos motorizados, chancado de material extraído y la contaminación generada por las fundiciones.

El ejemplo mas significativo corresponde al proyecto minero Pascua Lama en la Región de Atacama, donde en una primera instancia se proyectaba la remoción de parte de tres glaciares (Toro 1, Toro 2 y Esperanza) y su posterior traslado a otro glaciar (Guanaco) (Figura 5.10) (Golder Associates, 2005), situación que fue rechazada al tramitarse los permisos ambientales respectivos. Sin embargo, hasta la fecha el mayor impacto asociado a este proyecto corresponde a la etapa de prospección, la cual data del año 1977. Durante la década de los 90, se habilitaron caminos con superficies de gravas sobre glaciaretos. La modificación de los perfiles de los glaciaretos y la depositación de polvo sobre glaciares descubiertos debido al flujo de camiones y maquinaria pesada en estos caminos, corresponden a los mayores impactos asociados a este proyecto.

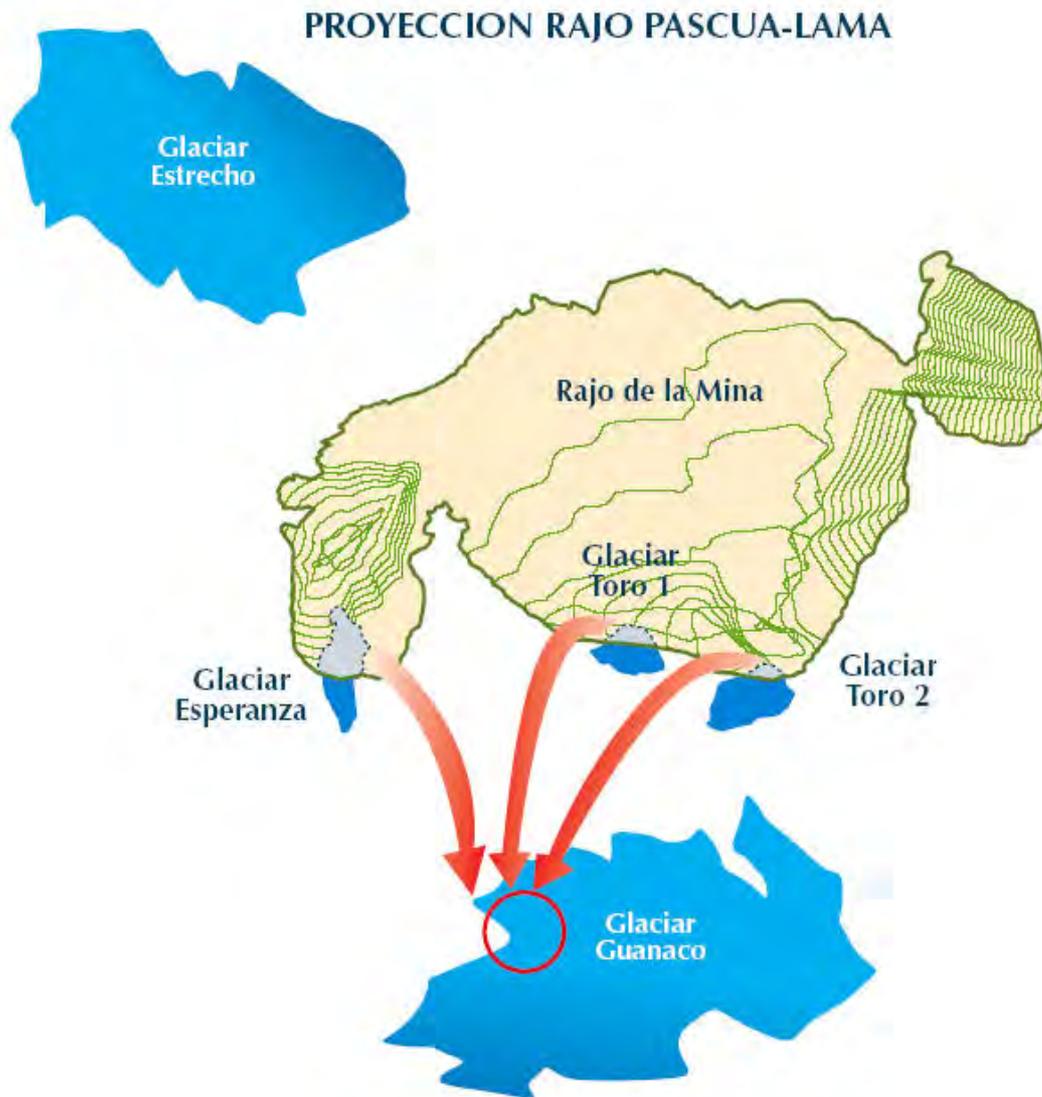


Figura 5.10: Proyecto de traslado de glaciares del proyecto minero Pascua Lama, finalmente no aprobado.

Otro caso significativo corresponde al proyecto minero Los Pelambres en la Región de Coquimbo en la cuenca superior del río Choapa ($31,6^{\circ}$ S y $70,5^{\circ}$ W, 2.000 m), la cual comenzó su actividad el año 1992. Azócar & Brenning (2008) detectaron, mediante técnicas de fotointerpretación y análisis de imágenes satelitales SPOT, la presencia de 15 glaciares rocosos de talud en su mayoría, en la cuenca superior del río Choapa y con áreas que fluctúan entre los 0,007 y 0,112 km². Estos glaciares han sufrido diversos impactos debido a la actividad de la mina desde la desaparición prácticamente total debido al avance de botaderos de material estéril, hasta la modificación de la superficie para la construcción de caminos (Figura 5.11). El hielo afectado por la actividad de Los Pelambres se estima en un volumen equivalente en agua líquida de entre 1,9 y 2,8 millones de m³ (Azocar & Brenning, 2008), estimación que por su amplio rango de valores evidencia las incertidumbres en los supuestos considerados, entre los que se cuenta que el contenido volumétrico de hielo del material afectado es de entre 40 y 60% y que el espesor del permafrost rico en hielo es de 30 metros.

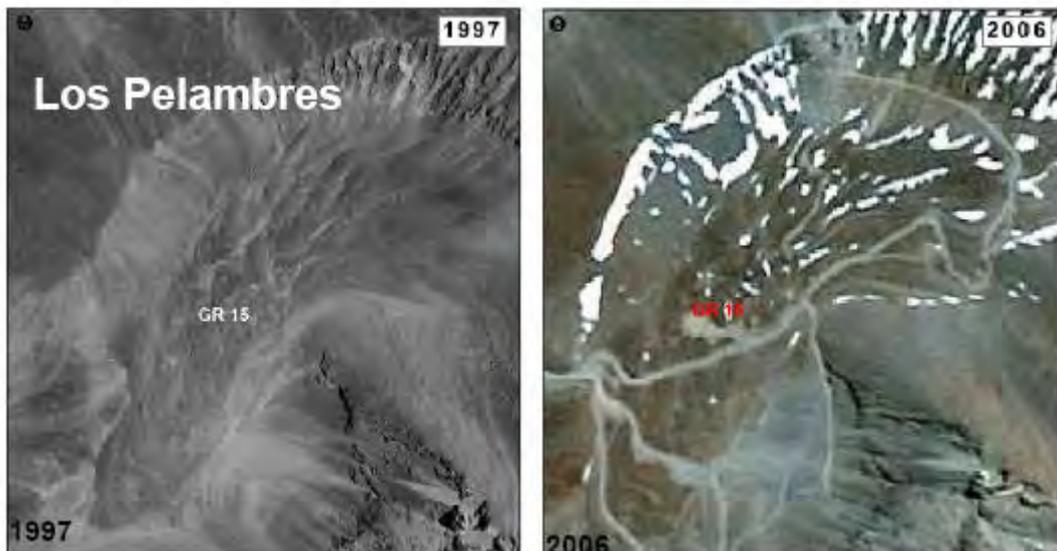


Figura 5.11: Construcción de caminos sobre superficie de glaciar rocoso asociado a proyecto minero Los Pelambres (Azocar & Brenning, 2008)

Diversos proyectos mineros han removido o afectado la superficie de glaciares rocosos para los cuales se ha estimado un volumen de 20 millones de m³. Entre ellos se encuentra la explotación minera en las minas División Andina (CODELCO) y Los Bronces (Compañía Minera Disputada de Las Condes) (Brenning, 2008).

5.3.1.2. Obras Hidráulicas

Las obras hidráulicas (canales, represas para generación de energía hidroeléctrica, turbinas, etc.) también pueden generar una serie de impactos directos e indirectos sobre los glaciares. Desde la fase de estudios para centrales hidroeléctricas, centrales de paso y bocatomas hasta la implementación, construcción y funcionamiento de las mismas.

Respecto al primer punto se destaca la realización de sondajes con explosivos cercanos a la superficie de un glaciar. Como ejemplo de estos casos se tiene la realización de obras para la construcción de una central de pasada en el Río San Andrés, cuenca del Río Tinguiririca, donde la DIA respectiva (Hydrochile, 2009) estima emisiones de ruido asociados principalmente a maquinaria pesada y tronaduras; emisiones atmosféricas de material particulado; efluentes líquidos (aguas servidas y residuos líquidos industriales); residuos sólidos (domésticos, industriales peligrosos y no peligrosos). La localización de esta obra es 1.200 m aguas abajo del frente del glaciar Universidad. En dicho DIA no se nombran impactos sobre la superficie del glaciar Universidad, sin embargo, es factible que las tronaduras efectuadas afecten a los pequeños glaciares que se encuentran en las paredes del valle San Andrés y mas cercanos a la zona de las obras, lo que podría generar avalanchas y desprendimiento de seracs.

En la etapa de implementación, existe la posibilidad de cambios asociados a la construcción de represas para generación de energía hidroeléctrica, que pueden afectar a los glaciares directa y/o indirectamente (Bogen, 1989). En el primer caso existen ejemplos en Noruega donde se han construido túneles bajo

glaciares (Clarke, 2005) y represas cerca de frentes glaciares, generándose un cambio de glaciar con frente sobre tierra a ser un glaciar con el frente en laguna proglaciar. Ello evidentemente aumentó la tasa de pérdida de masa debido a que comenzaron procesos de desprendimiento de hielo (calving). La presencia de lagos proglaciales puede ser un factor del aumento de la ablación en los glaciares (Raymond *et al.*, 2005).

Por otro lado, se pueden esperar cambios en los glaciares, si se construyen represas, aguas abajo de los glaciares. Estos nuevos cuerpos de agua podrían modificar la topoclimatología del valle, con lo que en definitiva se producirían cambios en el balance energético y de masa de los glaciares, por ejemplo debido al aumento de la humedad.

En Chile la construcción de dos represas en la zona del Río Baker y del Río Pascua (ríos con alimentación de glaciares) podrían afectar la dinámica de vaciamientos que ha ocurrido en tiempos históricos en las lagunas del glaciar Colonia y alrededores: el lago Arco (década de los 50) y el lago Cachet 2 (en los últimos dos años), lo cual en definitiva afecta la dinámica de los glaciares asociados a estos lagos.

Otro tipo de intervenciones aún no realizadas en Chile, es la realización de túneles en los glaciares para determinar la disponibilidad de agua. Podemos citar como ejemplo el caso del glaciar Svartisen en Noruega, donde se realizó un túnel con el objetivo de extraer agua y redirigirla hacia una represa, además de realizar estudios subglaciales.

Como caso aparte se tiene registro de que en el año 1968 se realizó una iniciativa por parte de la Empresa Nacional de Electricidad S.A., la cual consistía en acelerar artificialmente el derretimiento de los glaciares con el fin de aumentar los caudales. El método utilizado consistía en la aplicación de una tinte destinada a oscurecer la superficie aumentando la absorción de rayos de onda corta incidente (ENDESA, 1969). En este caso el experimento se realizó en la superficie del glaciar Cotón ($34^{\circ} 30' S - 70^{\circ} 22' W$) en la cuenca del Río Cachapoal. Preliminarmente se realizaron ensayos con distintos productos en diversos glaciares ubicados en la quebrada Morales en la Región Metropolitana y en el Volcán Antuco en la Región del Bio-Bio. En el glaciar Cotón se aplicó el producto de mejor rendimiento para los objetivos planteados. Este producto consistía en un colorante artificial elaborado por Químicas Hoechst en base a negro de humo con tamaño sobre 10 micrones y que fue aplicado con aviones fumigadores sobre la superficie del glaciar (ENDESA, 1969). Cabe destacar que esta experiencia fue catalogada en su época como exitosa (Marangunic, 2007).

5.3.1.3. Actividades Turísticas y Recreativas

Respecto a las actividades turísticas y recreativas realizadas en superficies glaciares, no existen estudios detallados que demuestren su real impacto. Las actividades realizadas a pie o en ski con fines deportivos, no deberían provocar impactos sobre el glaciar y su medio (Bórquez *et al.*, 2007). Sin embargo si este tipo de actividades es de carácter masivo en un determinado glaciar, debido a su cercanía, accesibilidad y belleza escénica, se esperaría algún tipo

de impacto en el glaciar, básicamente derivada de desechos provenientes de campamentos sobre la superficie.

Potencialmente se esperaría que una actividad intensiva sobre la superficie glaciar o en los alrededores (medios de transporte mecanizados, construcción de infraestructura) generaría grandes impactos en el corto y mediano plazo (Bórquez *et al.*, 2007). En Chile sólo se tienen antecedentes de la construcción del primer hotel de hielo en el glaciar del volcán Mocho en la Región de los Ríos (Diario Austral de Valdivia, 2003), el cual sin embargo no resultó ser exitoso debido a la velocidad del flujo de hielo en dicho glaciar. A este respecto no se tiene conocimiento de lo sucedido con la infraestructura que se construyó en la superficie del glaciar y bajo ella, ni de su impacto en la dinámica glaciar.

Por otro lado, si bien existen centros invernales de esquí en los volcanes Villarrica, Osorno, Lonquimay y Chillán entre otros, estos se encuentran sobre mantos nivosos estacionales. Sin embargo, en todos ellos, y muy particularmente en el Volcán Villarrica, operan empresas que llevan continuamente turistas a ascender a sus cumbres. La no utilización de medios mecánicos hace suponer que el impacto es menor, pero no existen estudios.

En la Patagonia, los impactos asociados al turismo se encuentran ligados a la navegación en fiordos con presencia de glaciares. En este caso se puede mencionar el estudio y evaluación preliminar presentada por Naviera y Turismos Skorpis S.A. a CONAF a solicitud de este último, para la operación y desembarco de pasajeros en el Glaciar Bernal, en el Canal de las Montañas. En este estudio se hace una línea base del estado del glaciar, se propone infraestructura y se especula sobre los posibles impactos de la actividad turística en el glaciar, los cuales, dado que se analiza sólo el turismo contemplativo, se consideran despreciables, siempre y cuando la infraestructura de puentes y senderos no altere el nivel del lago proglacial.

5.3.1.4. Actividad Científica

Las actividades con fines científicos realizadas en la superficie glaciar también presentan potenciales impactos sobre los cuerpos de hielo. De acuerdo a los objetivos de la investigación se pueden generar diversos impactos. Los desechos de los campamentos, balizas de distintos materiales que pueden perderse entre dos visitas al glaciar, el tránsito en vehículos motorizados (Pisten Bullis, Skidoos), el uso de químicos en la extracción de testigos de hielo, la realización de túneles para estudios de flujo de hielo y el vertimiento de químicos para estudios de hidrología subglacial, son algunos ejemplos de impactos derivados de actividades científicas.

En Chile no se tienen estudios del impacto de estas actividades. En la zona del glaciar Juncal se han vertido algunos kilos de sal en el escurrimiento que nace de este glaciar en el marco de las campañas de terreno de un equipo multidisciplinario del ETH de Suiza durante los años 2007 (Pellicciotti *et al.*, 2008) y 2009. Sin embargo en otras zonas del planeta se sabe de efectos dañinos para los glaciares. Por ejemplo en la extracción del testigo de hielo en Vostok, Antártica, se vertió parafina de igual densidad del hielo en la perforación realizada (3.623 m), con el objetivo de que esta no se cerrara debido al flujo de hielo.

En el Glaciar John Evans en la isla Ellsmere se han utilizado químicos para teñir el escurrimiento (Figura 5.12). Estos químicos se vierten a los molinos a fin de determinar la hidrología subglacial (Bingham *et al.*, 2005). Los químicos utilizados no tendrían impactos negativos para el glaciar y su entorno, aunque no se especifica su fórmula.



Figura 5.12: Vertimiento de tinta en molin en Isla Ellsmere para estudios de hidrología subglacial.

(De: <http://www.ggy.bris.ac.uk/personal/RobBingham/photopages/jeg20004.html>).

5.3.1.5. Contaminación de asentamientos humanos y otras actividades productivas

A parte de la contaminación generada por actividades productivas en las cercanías o sobre el glaciar, se esperaría la influencia indirecta de asentamientos humanos cercanos a glaciares, principalmente a través de la depositación de contaminantes proveniente de las grandes metrópolis. En Chile por ejemplo, los glaciares del cerro el Plomo y Paloma, se encuentran expuestos a ser contaminados por la polución urbana generada en Santiago y que pueden ser transportados por la circulación atmosférica. No se han realizados estudios tendientes a determinar este impacto en los glaciares de Chile.

En otras partes del planeta, se ha determinado a través de análisis químicos de testigos de hielo la influencia de ciertas actividades en los glaciares. Wang *et al.*, (2008) realizó análisis de testigos de hielo obtenidos del glaciar East Rongbuk del Monte Everest (Himalayas Central, China) determinando la tendencia temporal de la depositación de Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs) como DDT, hexaclorociclohexanos (HCHs) e

hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) relacionándolos con eventos históricos ocurridos en India. El peak de PAHs se detectó a fines de los años 90's, período que coincide con la entrada de India a un proceso de industrialización. Por otro lado el peak de HCHs fue observado durante los 70's, llegando a un nivel indetectable a fines de los 90s, donde India prohibió el uso de plaguicidas con esta sustancia. El DDT tiene su peak a mediados de los 70's, lo que coincide con el peak de casos de malaria en la India. Similar investigación se realizó en Los Alpes donde se detectaron concentraciones de POPs provenientes de un testigo de hielo extraído del glaciar Lys y donde se obtuvo la tendencia del uso de pesticidas desde el año 1959 al año 2000 (Villa *et al.*, 2003).

5.3.2. Estudios de caso

Barrick Gold - Pascua Lama

Uno de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en que se hace directa mención a glaciares se encuentra el proyecto Pascua Lama ubicado en la cabecera del Río Huasco en la frontera de Chile con Argentina, llevado a cabo por la compañía minera Nevada (EIA Pascua en referencias).

Se ha presentado ahí un plan de monitoreo de los glaciares del proyecto Pascua Lama para los glaciares Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco, Estrecho y Ortigas I (Barrick, 2008), con el cual se pretende llevar un seguimiento sistemático de la dinámica de estos glaciares durante la vida útil del proyecto. El plan de monitoreo presentado contempla las mediciones de acumulación de nieve, de la ablación, del balance de masa de las superficies cubiertas por hielo y del volumen de los glaciares y glaciaretos, vinculándolas con las variaciones climáticas y antrópicas asociadas a la actividad minera. El programa de monitoreo de los glaciares se ha basado en el manual de procedimientos para el estudio de efectos adversos sobre glaciares desde actividades industriales: Balance de masa, superficies, volumen de hielo, elaborado por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). Dicho plan de monitoreo que implementará la compañía minera Nevada, especifica los estudios necesarios para la resolución de temas indicados por la DGA, los que corresponden a mediciones de acumulación y ablación, estratigrafía de nieves, áreas y volúmenes de hielo, comparaciones con glaciares de referencia y mediciones con radar de penetración terrestre, entre otros.

Este plan incluye mediciones del balance de energía de los glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2, Guanaco, Estrecho y Ortigas I, las que se realizarán de manera puntual y distribuída sobre la superficie de los glaciares en zonas con y sin penitentes, enfocándose principalmente en los cambios de albedo producidos por el efecto de las partículas de polvo depositadas sobre la superficie de los glaciares y sus consecuencias en la velocidad de derretimiento del hielo (Vallon & Vincent, 2005).

Con el objeto de medir la energía disponible para la fusión y sublimación anual, se intentará medir y modelar los flujos radiativos y flujos turbulentos de calor (en nieve/hielo), calculándose el balance contable en función de estos parámetros. En forma complementaria el monitoreo considera la instalación de cámaras fotográficas digitales en las cercanías de los glaciares para realizar

una estimación distribuída del albedo de acuerdo a la metodología propuesta por Corripio (2004).

En el capítulo 5 de este estudio, se hace referencia, a los glaciares descubiertos ubicados en la zona norte y sur del área afectada, en relación a la formación de penitentes sobre la superficie de los glaciares. También se habla de los glaciares rocosos ubicados en la parte norte del área de estudio, en las inmediaciones del glaciar Estrecho. En un breve párrafo se mencionan las características genéticas y se establece un espesor de detritos sin matriz de neviza o de hielo del orden de 7 metros.

Respecto a las medidas de mitigación o de protección de los glaciares frente a las alteraciones que podrían experimentar por las faenas mineras, en la Resolución Exenta N°24 de COREMA III^a región, se establece que el ruido y vibraciones no tendrían efectos adversos sobre el glaciar, pero se reconoce posibles efectos significativos producto de la depositación de material particulado sobre éstos.

En este sentido se establecen numerosas medidas de protección y mitigación entre las que se cuentan:

- Ubicación subterránea del chancador primario con sistema de captación de polvo y uso de molienda húmeda.
- Confinamiento del punto de descarga de los camiones mineros
- Acopios de mineral grueso subterráneos.
- Instalación de estaciones de monitoreo de la superficie glaciar, con sistema de alarmas rápidas.
- Voladuras a realizarse preferentemente en periodos de calma ambiental.
- Implementación de un plan de mitigación de material particulado.
- Humedecimiento de caminos.
- Regadío cerca de los puntos de carga y descarga y voladuras eficientes.
- Utilización de camiones mayores (320 toneladas) para minimizar el número de viajes.

Como medida de compensación se establece que en caso de presentarse cambios de albedo irremediable se implementarán medidas artificiales destinadas a incrementar la acumulación de nieve en el período nival mediante la instalación de barreras de nieve o la generación de una cobertura detrítica artificial para proteger al glaciar entre nevadas.

También se realizan medidas del agua proveniente de los glaciares afectados, lo que genera datos de gran valor desde el punto de vista científico, lo que permitirá un mejor conocimiento para enfrentar casos similares.

Este plan de monitoreo de glaciares en la cuenca del Río Huasco fue presentado el 3 de Enero de 2008 a CONAMA por parte de la empresa minera Barrick Gold. El que fue comprometido y aprobado por la autoridad, y que analiza las principales características de la zona, así como las dinámicas de las diferentes masas de hielo, permitiendo identificar las particularidades físicas de éstas, sus contribuciones a los caudales de los ríos El Toro y El Estrecho y la relación con la actividad del proyecto minero. Este sistema de evaluación ambiental de los efectos de las actividades sobre los glaciares y de las medidas de protección y/o mitigación fueron elaborados por la misma empresa con el

apoyo del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) de la Universidad de La Serena y otros consultores internacionales. De forma general, Barrick Gold realizó compromisos para el control del levantamiento de polvo y posterior depositación sobre glaciares mediante diferentes técnicas, estimándose que con dichos procesos la tasa de sedimentación sobre la superficie de los glaciares no aumentaría significativamente (Barrick Gold, 2009). Así también, Barrick Gold estima que las tronaduras no debieran afectar a los glaciares ya que éstos se encuentran fuera del rango en el cual las ondas de vibración pueden deformar el hielo glaciar. Se pone especial énfasis en estudiar el efecto del polvo depositado sobre el albedo del glaciar, su balance de energía y finalmente las repercusiones en su balance de masa.

CODELCO - Andina

En el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de expansión de la división de la mina Andina perteneciente a CODELCO Chile, realizado por la consultora Arcadis Geotécnica el año 2005, se presenta una línea de base bastante completa de los glaciares presentes en el área afectada por las faenas mineras en las cabeceras de la cuenca alta del Río Blanco. El EIA establece que estas faenas mineras han venido interviniendo glaciares rocosos a partir del año 1982 y que aproximadamente un 38% de los glaciares de roca del área de influencia del proyecto han sido cubiertos por depósitos de estériles y otras áreas han sufrido la remoción de sus frentes. Se ha estimado que el aporte hídrico de estos glaciares rocosos ha disminuido $0,9 \text{ l s}^{-1}$ producto de las operaciones mineras.

Debido a la ampliación del rajo abierto, al aumento del volumen del botadero y a la construcción de nuevas obras de la planta Cordillera, se señala que en el área se llevará a cabo la alteración de $0,63 \text{ km}^2$ de glaciares de roca pero que no afectarán los mantos de hielo de las altas cumbres. Sin embargo en el capítulo acerca de las obras de mitigación no se hace referencia a ningún tipo de medidas de mitigación, compensación o seguimiento tendientes a proteger estos cuerpos de hielo ante la intervención producida por la actividad minera.

Anglo American – Los Bronces

Otro EIA disponible al público general es el presentado por la compañía minera Anglo American para el desarrollo del proyecto minero Los Bronces (EIA Bronces en referencias). En la línea de base entregada en el estudio se mencionan solamente la existencia de 37 glaciares rocosos en las cuencas San Francisco, Dolores y El Plomo. La línea de base presenta detallada información sobre este tipo de glaciares y se precisa que no habría intervención en ellos por parte de las faenas mineras.

Hydrochile

Se encuentra disponible también un DIA asociado a la construcción de una central de pasada en el río San Andrés. Solo se nombra como antecedente la cercanía de la obra respecto al glaciar Universidad (1.200 m aguas abajo) (Hydrochile SA, 2009).

Proyecto Hidroeléctrico Aysén

Si bien no se cuenta con una EIA aún, cabe mencionar el documento U. de Chile (2007), que contiene una “Línea de base del medio físico en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico Aysén”, en el que se catastra, los

glaciares orientales del CHN y CHS (en este último sólo del Glaciar O'Higgins al norte), delineando sus cuencas, calculando superficies y tasas de cambio en los períodos 1973-2001 y 2001-2004, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat. Lamentablemente este estudio es bastante básico, no incluye los vaciamientos recientes ni históricos del Colonia y no profundiza en las características glaciológicas de la región.

Parque Nacional Torres del Paine

Por otro lado, uno de los glaciares chilenos con más actividad turística corresponde al Glaciar Grey en el Parque Nacional Torres del Paine, respecto a esta actividad sólo se encuentra en el SEIA una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) relativa a la construcción de un embarcadero en el lago a 2,5 km del frente del glaciar, pero no hay EIAs ni DIAs relativas a la navegación en el Lago Grey (con la consecuente polución, cambio en la química y albedo del lago, etc.) ni a las caminatas turísticas sobre el glaciar.

6. REQUERIMIENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

6.1. Análisis crítico de información existente en Chile

Chile es el país con mayor abundancia y diversidad glaciológica de Sudamérica, y tal vez uno de los más diversos del mundo. Esto ha atraído el interés de científicos extranjeros y nacionales desde comienzos del siglo XX. De este modo Chile ha crecido significativamente en el conocimiento de sus glaciares, en particular durante las últimas décadas, y cuenta sin duda con el mayor número de estudios glaciológicos a nivel latinoamericano. Sin embargo, el estado del conocimiento glaciológico en Chile es aún deficiente, encontrándose vacíos de información básica y aplicada, en particular en áreas claves para abordar temas concretos como la disponibilidad actual y futura de fuentes de agua dulce en el escenario cambiante del cambio climático actual.

Si bien Chile cuenta con numerosos y completos estudios acerca de las variaciones de los campos de hielo en la Zona Austral, del comportamiento y características de sus glaciares más emblemáticos (San Rafael, Pío XI, O'higgins, Tyndall, etc.), la información aún está muy fragmentada como para poder extraer conclusiones a escala nacional y persisten vacíos claves que deben ser enfrentados en un futuro, en particular respecto de la valoración del recurso hídrico proveniente de los glaciares, su efecto en el clima y los peligros asociados a su dinámica.

De este modo, los puntos clave a enfrentar llevan relación con estudiar y definir metodologías para medir el balance de energía de los glaciares en función de variables meteorológicas, saber combinar dicho balance con las precipitaciones y vientos para entender y modelar el balance de masa y así conocer el caudal generado por nuestros glaciares bajo distintas condiciones meteorológicas y a largo plazo en función de escenarios climáticos. El desafío incluye también incorporar la dinámica glaciar como un elemento crucial para entender el comportamiento y modelar la evolución de nuestras masas de hielo.

6.1.1. Inventarios

Considerando la totalidad de los inventarios glaciológicos generados hasta la fecha y estimaciones preliminares en algunas latitudes, Chile cuenta con alrededor de 21.063 km² de su territorio cubierto por glaciares. Esto representa la reserva glaciar más importante en Sudamérica (Casassa *et al.*, 2007a).

Sin embargo, todavía subsisten importantes carencias e incertidumbres en la información, las que es fundamental subsanar en pos de un tratamiento adecuado de la realidad chilena en el tema. Algunas regiones sencillamente no disponen de catastros glaciológicos otras cuentan con ellos pero requieren actualizaciones debido al extenso tiempo transcurrido desde su realización y/o al uso de fuentes de consulta de muy larga data, las que en algunos casos son de menor precisión y no directamente comparables con la información actual. Estas situaciones aplican especialmente a las Zonas Norte, Centro y Sur, previniendo la estimación precisa de las actuales superficies de hielo para todo Chile continental. Aquella información es vital para determinar los cambios

experimentados por los glaciares en las décadas recientes y en base a ellos desarrollar modelos que permitan anticipar su comportamiento futuro.

Recientemente la DGA publicó en el Diario Oficial de la República de Chile con fecha 17 de Julio de 2009 la resolución en la cual se establece la información relativa al inventario público de glaciares, en el cual se entregan los parámetros que deben contener los inventarios para ser incluidos en dicho registro. La información solicitada por inventario se divide en dos grupos; primero aquella información básica que debe tener cada inventario (Tabla 6.1) donde se incluyen: el código de cada glaciar (norma WGI), el nombre, la clasificación primaria (norma WGI), la región y comuna a la cual pertenece el glaciar, el datum, huso y coordenadas UTM, la fuente de digitalización y su año, el año en que fue realizado el inventario, el código del Banco Nacional de Aguas y el área total del glaciar. En segundo lugar se solicita como información complementaria (Tabla 6.2) algunos parámetros principalmente de índole física de cada glaciar, entre ellos: área cubierta, ancho y largo promedio, orientación, altitudes máximas y mínimas, espesor, largo, etc. Es importante hacer notar que los parámetros o variables solicitadas por glaciar en cada inventario corresponden básicamente a la información solicitada por la WGI y GLIMS y que ha sido utilizada en un gran número de inventarios realizados en Chile. Esta información se complementa con parámetros administrativos. La importancia de esta resolución radica en la estandarización que de ahora en adelante deberán tener los inventarios para ser públicos y por ende ser utilizados con diversos fines y segundo en que la información solicitada se adapta a estándares internacionales publicados en la literatura científica. Por lo tanto se está dando validez desde un servicio público a la información generada sobre la base de sólidos fundamentos científicos.

Tabla 6.1: Formato básico del Inventario Público de Glaciares según resolución 1.851 de la Dirección General de aguas.

CAMPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
COD_GLA	Código del Glaciar definido según normas del World Glacier Inventory (WGI)	
NOMBRE	Nombre del Glaciar (en el caso que posea un nombre)	
CLASIFICA	Primer dígito de clasificación glaciar según normas UNESCO/WGI	
REGIÓN	Número de región de Chile donde se sitúa el glaciar	1 a 15
COMUNA	Nombre de comuna donde se sitúa el glaciar	
DATUM	Sistema de referencia	
HUSO	Zona cartográfica en la que se sitúa el glaciar	
ESTE	Coordenada Este UTM (centroide del polígono)	Metros
NORTE	Coordenadas Norte UTM (centroide del polígono)	Metros
FUENTE_DIG	Fuente digitalización (mapa, foto, imagen satelital)	
FUENTE_FECHA	Fecha de la fuente utilizada para la digitalización	dd/mm/aa
INVENT_FECHA	Año de realización del inventario	4 dígitos
COD_BNA	Código Banco Nacional de Aguas	
AREA_KM ²	Área total del glaciar	Km ²

Tabla 6.2: Información complementaria del Inventario Público de Glaciares según resolución 1.851 de la Dirección General de aguas.

CAMPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
N_CUENDRE	Número de cuencas de drenaje que posee el glaciar	
CARTO	Cartografía que se utilizó para digitalización	
ESCALA_MAP	Escala del mapa empleado en la digitalización	
FECHA_MAPA	Año del mapa empleado en la digitalización	4 dígitos
PRECM	Precisión de la medida (resolución espacial de la base de imágenes utilizada)	Metros ²
AREA_EXP	Área expuesta del glaciar	Km ²
AREA_CUB	Área cubierta del glaciar	Km ²
AREA_ABLAC	Área de ablación del glaciar	Km ²
ANCHO_PROM	Ancho promedio del glaciar	Km
LARGO_PROM	Largo promedio del glaciar	Km
LMAXTOTAL	Largo máximo del glaciar	Km
L_MAX_EXP	Largo máximo expuesto del glaciar	Km
LMAXABLAC	Largo máximo de ablación	Km
ORIENACUM	Orientación del área de acumulación	N-S-E-W
ORIENABLAC	Orientación del área de ablación	N-S-E-W
ORIENTA	Orientación principal del glaciar	N-S-E-W
HMAX	Altitud máxima del glaciar	m.s.n.m.
HMEDIA	Altitud media del glaciar	m.s.n.m.
HMINTOTAL	Altitud mínima total	m.s.n.m.
HMINEXP	Altitud mínima del área expuesta	m.s.n.m.
HMEDABLAC	Altitud media del área de ablación	m.s.n.m.
CLASIFICA_WGI	Clasificación completa del glaciar según normas UNESCO/WGI	
ESP_MED	Espesor medio del glaciar	Metros
LATITUD	Coordenadas geográficas	grados/min/seg
LONGITUD	Coordenadas geográficas	grados/min/seg
ID	Campo interno GIS	
SHAPE	Tipo de vector utilizado (punto, línea, polígono)	

En cuanto a la metodología para realizar los inventarios, ésta ha evolucionado enormemente en los últimos cincuenta años, trayendo como consecuencia una mejora significativa en la cobertura espacial y temporal de los estudios a la vez de nuevos desafíos en el manejo e interpretación de la información generada. Desde el uso tradicional de levantamientos aerofotogramétricos y de terreno se ha pasado al aprovechamiento de la tecnología satelital mediante el tratamiento de imágenes en diferentes rangos espectrales -mucho más accesibles ahora que en el pasado- en combinación con fuentes topográficas de gran precisión.

Los nuevos avances en sensores remotos y los métodos asociados permiten una mayor exactitud en la estimación de la superficie glaciar y son la base para iniciativas a nivel mundial para la estandarización de las bases de datos de inventarios de glaciares (por ej. los programas GLIMS, en EE.UU. y el WGI en Suiza). Los inventarios realizados en Chile a partir de la mitad de los noventa utilizan las imágenes satelitales como principal fuente de información, lo que representa un mayor alcance, en especial en áreas sin buena cobertura en mapas topográficos o sin fotografías aéreas actualizadas. Sin embargo se deben considerar algunas limitaciones en la aplicación de estas metodologías, la cual requiere la utilización de imágenes con escasa o nula cobertura nival estacional y con escasa o nula presencia de nubes, lo que permite una mayor precisión en la delimitación de cuerpos de hielo, de lo contrario se generarán superficies glaciares sobreestimadas o con gran incertidumbre. Por lo tanto la fecha ideal varía de temporada en temporada, pero usualmente corresponde al verano tardío o a los primeros meses de otoño (febrero, marzo, abril y mayo), donde la selección debe buscar imágenes que tengan igual o menor cobertura de nieve que las utilizadas en inventarios anteriores y que además presenten la menor cobertura posible de nubes. Un ejemplo de este tipo de dificultades se observa en la comparación de los inventarios para Campo de Hielo Norte, donde existe una disparidad entre las áreas estimadas por Aniya (1988) y Rivera *et al.*, (2007). Esta discrepancia se debería a que no existían imágenes satelitales libres de cobertura nubosa al momento en que Aniya (1988) realizó su inventario (Rivera *et al.*, 2007). Por otro lado en el caso del inventario de la Cordillera Darwin y alrededores (DGA, 2008a) fue necesario ocupar imágenes satelitales (tanto ASTER como Landsat) de diversos años con el fin de obtener un mosaico de imágenes que abarcara toda el área de estudio con escasa cobertura nival y nubosa. En consecuencia, se tiene un inventario multitemporal (con un rango entre los años 2001 y 2006), pudiéndose encontrar de forma explícita en la base de datos, el año de la imagen que se utilizó para delimitar cada glaciar particular.

Debe considerarse además que las imágenes Landsat y ASTER no siempre permiten la identificación con claridad de glaciares rocosos, como en el caso del inventario del Aconcagua (DGA, 2008a), donde debido a la resolución de dichas imágenes (30 y 15 m respectivamente) no se pudieron detectar muchos glaciares de este tipo. Es por ello que se hace necesario realizar la identificación y delimitación de glaciares rocosos complementándola con métodos geomorfométricos y utilización de imágenes de mayor resolución (por ej. fotografías aéreas, imágenes Quickbird, SPOT o IKONOS) que permiten el adecuado reconocimiento de los glaciares rocosos respecto a otras geofomas. Por lo tanto, al no haber sido aplicados estos métodos complementarios, existe una ambigüedad en dicho inventario respecto a la cantidad de glaciares rocosos detectados.

Por otra parte, los modelos digitales de terreno que acompañan al análisis de las imágenes satelitales se utilizan también para determinar diversos parámetros glaciológicos (exposición, altitud mínima y máxima, pendiente, etc.), los que no son posibles de identificar ópticamente en una imagen. Sin embargo, estos modelos no deberían tener una data con más de 10 años de diferencia respecto de la imagen satelital, con el fin de evitar la determinación de parámetros topográficos erróneos, sobre todo en regiones con importantes cambios de elevación (adelgazamientos/engrosamientos) de glaciares (Paul *et al.*, 2009). Estos inconvenientes se han hecho evidentes en estudios recientes de inventarios chilenos, cuando se han tomado como referencia, por ejemplo, bases cartográficas confeccionadas con dos o tres décadas de antelación a la fecha de las imágenes satelitales utilizadas (Vivero, 2008).

Así también se reconoce cierto grado de incertidumbre y un tratamiento no sistemático del error asociado a la realización de los inventarios, existiendo diversas aproximaciones en su análisis. Si bien varios estudios lo han incorporado en forma tácita, éste se ha abordado tanto desde la perspectiva de que se trata de un sesgo recurrente, como así también que obedece a condiciones aleatorias o particulares de las fuentes utilizadas o de la región de estudio tales como el tipo de superficie, la pendiente del terreno, la cobertura nival o nubosidad a la fecha de la toma de la imagen, etc. En varios otros casos no se entregan mayores indicaciones, sin embargo es posible inferir que una parte importante de dichos inventarios registran errores debido al uso de fotografías aéreas sin ortorrectificación. Una prueba de ello es la similitud de resultados en términos de superficie englaciada de Garín (1987) respecto a Vivero (2008) pese a realizarse con datos topográficos generados con casi 50 años de diferencia y en pleno proceso de cambio climático, por lo cual se desprende que la ausencia de un adecuado preprocesamiento pudo ocasionar en el primer estudio, superficies glaciares imprecisas o subestimadas respecto a la realidad. En consecuencia los inventarios realizados en los setenta y ochenta deben ser revisados y actualizados, no descartándose la necesidad de repetirlos, mediante un reanálisis con métodos modernos y técnicas estandarizadas de las mismas fuentes cartográficas o fotográficas utilizadas en su confección original.

6.1.2. Variaciones frontales y areales

Son pocos los trabajos sobre variaciones glaciares en las Zonas Norte, Centro y Sur del país (Figura 6.1), pues éstas se han concentrado especialmente en la Zona Austral (Figura 6.2), comprobándose como tendencias generales los retrocesos, las pérdidas de superficie y la reducción de los volúmenes de hielo. Lo anterior es una respuesta inequívoca a las fluctuaciones climáticas, principalmente el aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación que ha sido registrada en varias estaciones meteorológicas de la zona.

A pesar de la abundancia de estudios en la Zona Austral, sin duda hace falta reproducir el trabajo hecho sobre los glaciares del CHN y CHS, pero esta vez sobre una muestra de glaciares escogidos cuidadosamente para lograr representatividad de todos los ambientes glaciológicos de la zona y en número

suficiente para que su estudio tenga peso estadístico y permita generar predicciones válidas para toda la región como un conjunto.

Esto es válido también para las demás zonas del país donde además del sesgo por estudios en algunas áreas específicas, existe una escasez general de estudios.

En los estudios relativos a variaciones frontales y areales, se ha aplicado predominantemente la comparación de fotografías aéreas, cartografía e imágenes satelitales. Las fuentes utilizadas son principalmente la cartografía I.G.M. y su base fotográfica (1974/75), las fotografías aéreas Trimetrogon de los EE.UU. tomadas en 1944/45, imágenes satelitales Landsat MSS, TM y ETM+ y Terra ASTER. Existen escasos usos de imágenes SPOT, Landsat RBV y Salyut-6 (Williams, 1987; Denisov *et al.*, 1987), y existen algunas experiencias aisladas con imágenes del radar a bordo del satélite RADARSAT (Aniya *et al.*, 1999 y 2000). El uso de ERS 1 y 2 ha sido aplicado para medir variaciones frontales en glaciares del Campo de Hielo Sur gracias a los trabajos de Skvarca *et al.*, (1995a y 1995b).

Estos productos satelitales han sido complementados con fotografías aéreas oblicuas, fotografías terrestres, registros, mapas y bosquejos históricos, así como con fotografías tomadas por astronautas. Es muy escasa o inexistente la utilización de imágenes militares desclasificadas (1963 en adelante) o de satélites más modernos de alta resolución (IRS, IKONOS, QuickBird, etc.) las cuales sirven para hacer estudios de detalle y así evaluar errores de los estudios hechos a resoluciones menores. Además en los sectores frecuentemente cubiertos de nubes, donde son escasas las imágenes de cualquier tipo, estas podrían aportar valiosa información de haber capturas bajo condiciones meteorológicas favorables. Actualmente se están allanando los accesos a imágenes rusas, indias, militares y experimentales. Lo que llama a hacer una nueva revisión sistemática de las fuentes de información disponible con el fin de aumentar la densidad y extensión de las series de tiempo de variaciones.

Por otro lado, si bien, las imágenes de radar han sido utilizadas para la determinación de topografías y velocidades superficiales (ver Variaciones volumétricas y Mediciones geofísicas en el capítulo 4.3), también la exploración de su uso resulta atractiva para determinar variaciones frontales de manera más sistemática, dada la capacidad de las señales de radar de atravesar las nubes y que el registro de imágenes es bastante denso y se inicia en los 80's. Esto es particularmente ventajoso en la vertiente occidental de Campo de Hielo Sur, donde el registro de imágenes es marcadamente más pobre debido a la persistente cobertura de nubes.

Otra técnica disponible que tampoco se ha visto utilizada en la literatura es la altimetría láser satelital (ICESat), cuyos datos son de acceso público y gratuito.

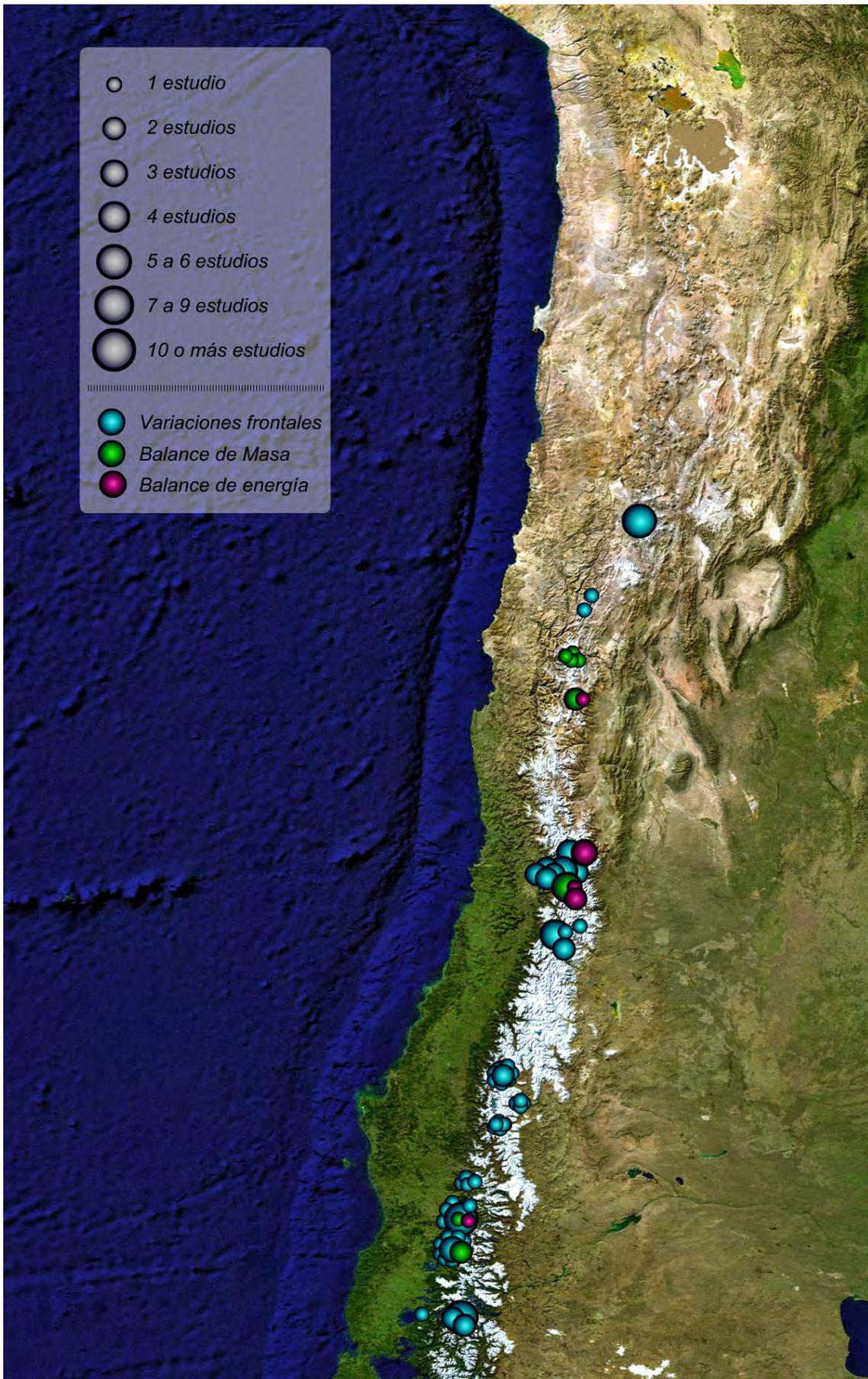


Figura 6.1: Densidad de estudios de variaciones areales, balances de masa y balances de energía para las Zonas Norte, Centro y Sur A.

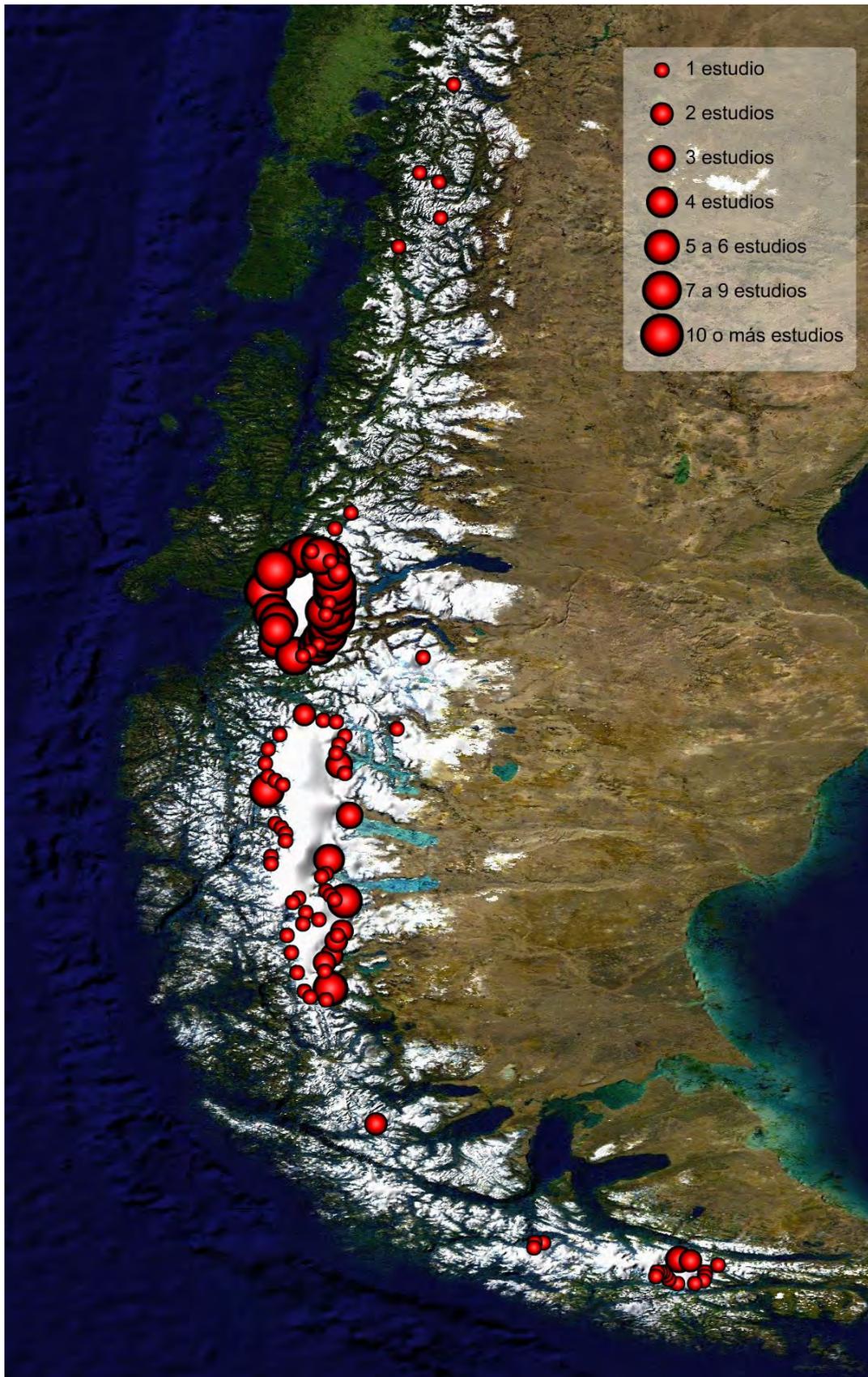


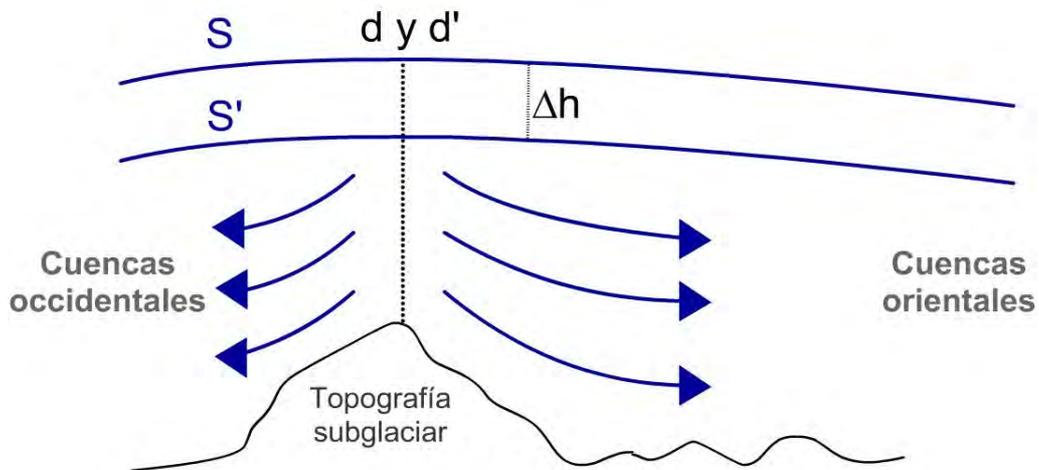
Figura 6.2: Densidad de estudios de variaciones frontales y areales realizados en glaciares en las Zonas Sur B y Austral.

6.1.3. Variaciones volumétricas

Los estudios sobre cambios volumétricos son más escasos y aún más concentrados en los glaciares pertenecientes a las principales masas de hielo del país (Figura 6.5), principalmente Campo de Hielo Sur (Glaciar Tyndall) y Gran Campo Nevado, sin embargo hay una completa ausencia de esta investigación por ejemplo en Cordillera Darwin y los numerosos glaciares menores de las regiones de Aysén y Magallanes, la que es extensiva a prácticamente todo el país (Figura 6.4 y Figura 6.5). Por otro lado, los estudios de detalle que incluyen mediciones en terreno, cubren sectores muy limitados y casi siempre en las zonas de ablación, por lo que no son representativos de toda el área glaciar al dejar fuera las zonas de acumulación.

A ello se suma la variabilidad de las técnicas utilizadas para la determinación de la topografía en diferentes épocas, por lo cual resulta necesario realizar un trabajo de normalización y evaluación de errores con el fin de establecer con mayor certeza la magnitud de los cambios topográficos a partir de fuentes susceptibles de comparación, considerando factores como el área cubierta por la medición y su hipsometría, la técnica utilizada y sus errores asociados (errores en la correlación estereoscópica en los DEM generados por radar así como la penetración del radar en zonas nevadas, etc.). Este proceso generará también una plataforma para la incorporación de nuevas mediciones, las que serán cada vez más frecuentes, extensivas y precisas. Además de lo anterior, es necesario determinar las variaciones en las delimitaciones de las cuencas o al menos acotar su magnitud; en la Figura 6.3, se puede ver como, cuando existen asimetrías entre la topografía superficial y subglaciar, el descenso de la superficie glaciar (S) debido a un adelgazamiento del mismo (dh), hasta un nuevo nivel (S'), puede producir una migración de la divisoria de cuencas (d) hasta una nueva posición (d'), lo que podría explicar, por ejemplo, anomalías en el comportamiento de glaciares vecinos. Esto puede ser particularmente relevante en los grandes campos de hielo, donde podría generar importantes cambios en las áreas de acumulación, y con ello modificar la dinámica glaciar, como podría ser por ejemplo una dinámica asimétrica entre glaciares contiguos resultando en que un glaciar retroceda mucho más rápidamente que sus vecinos o bien que avance. Este tipo de fenómenos se han postulado para explicar por ejemplo el comportamiento anómalo de avance del Glaciar Pío XI en conjunto con el dramático retroceso del Glaciar O'Higgins. Estudiar este tipo de cambios requiere de un monitoreo extensivo y con tecnologías de precisión en las zonas de acumulación, en particular las de las grandes cuencas glaciares.

a. Simetría topográfica



b. Asimetría topográfica - Migración de divisorias

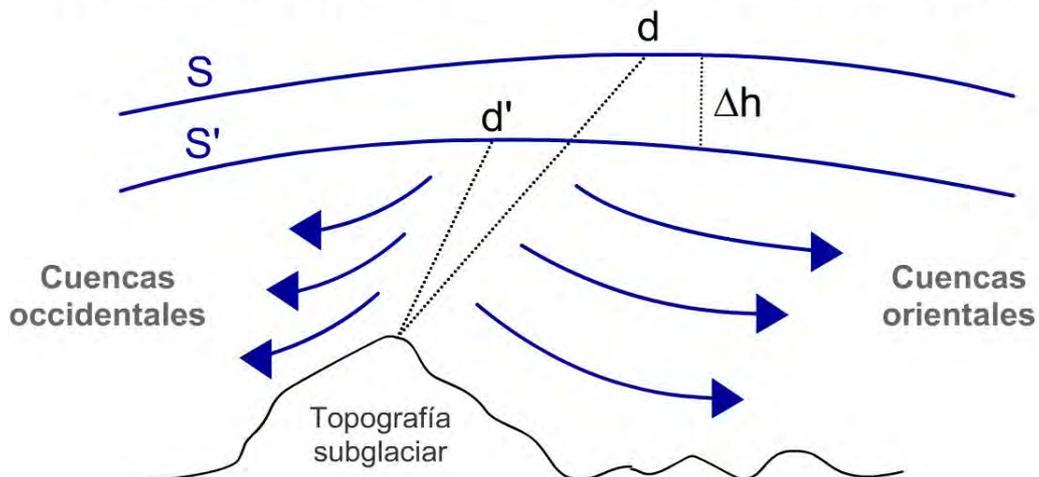


Figura 6.3: (a) Cuando los máximos de la topografía superficial de un glaciar coinciden con los de la topografía subglaciar, un adelgazamiento del glaciar (Δh) con la consecuente disminución de su superficie (S') respecto de la superficie original (S), no produce un cambio en la divisoria de cuencas. (b) Sin embargo cuando dichas topografía no coinciden, el adelgazamiento puede producir una migración significativa de la divisoria de las cuencas. Fuente: Modificado de Paterson, 1994.

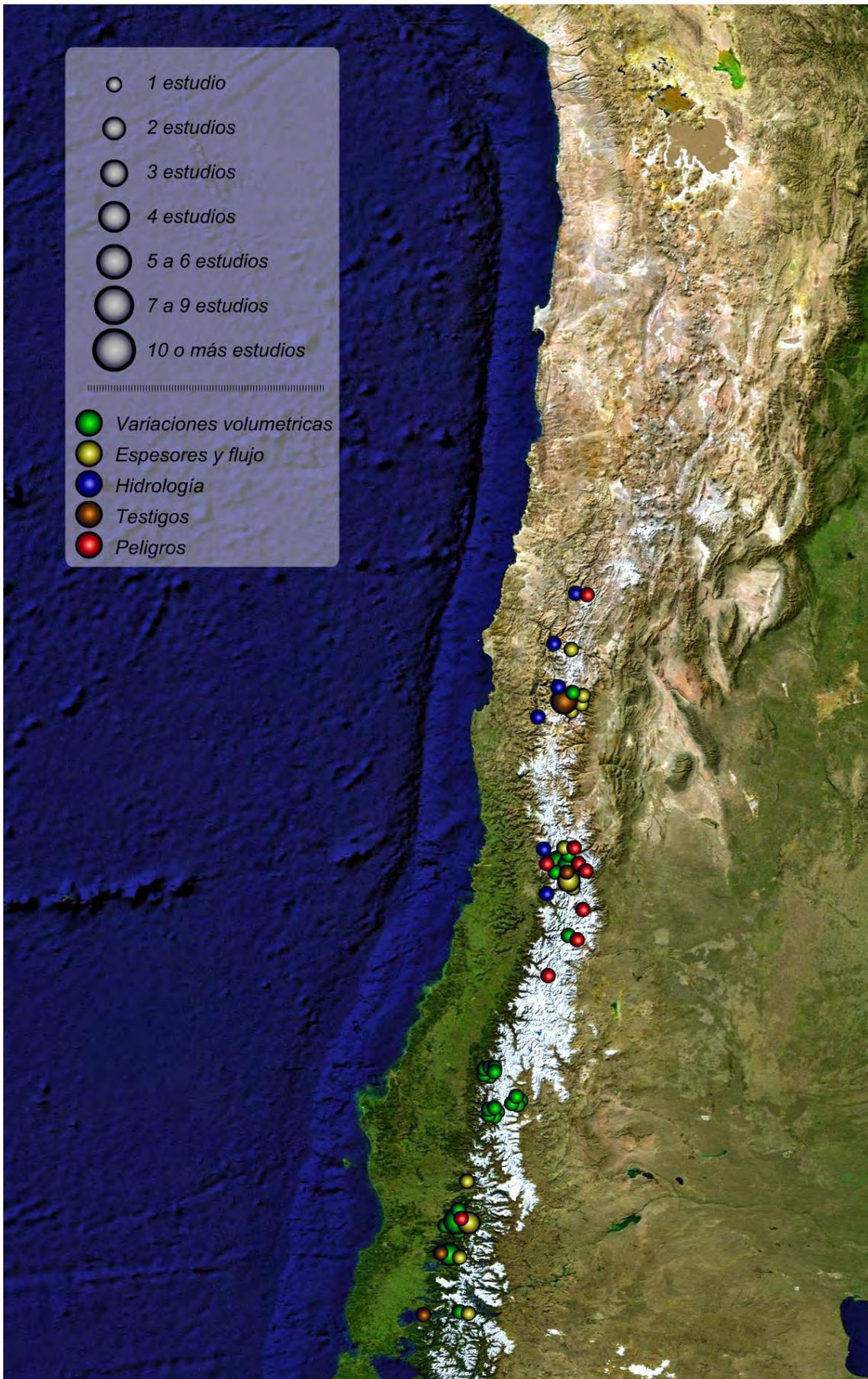


Figura 6.4: Densidad de estudios de variaciones volumétricas, espesores de hielo, flujo de hielo, hidrología glaciaria, testigos de hielo y peligros asociados a glaciares para las Zonas Norte, Centro y Sur A.

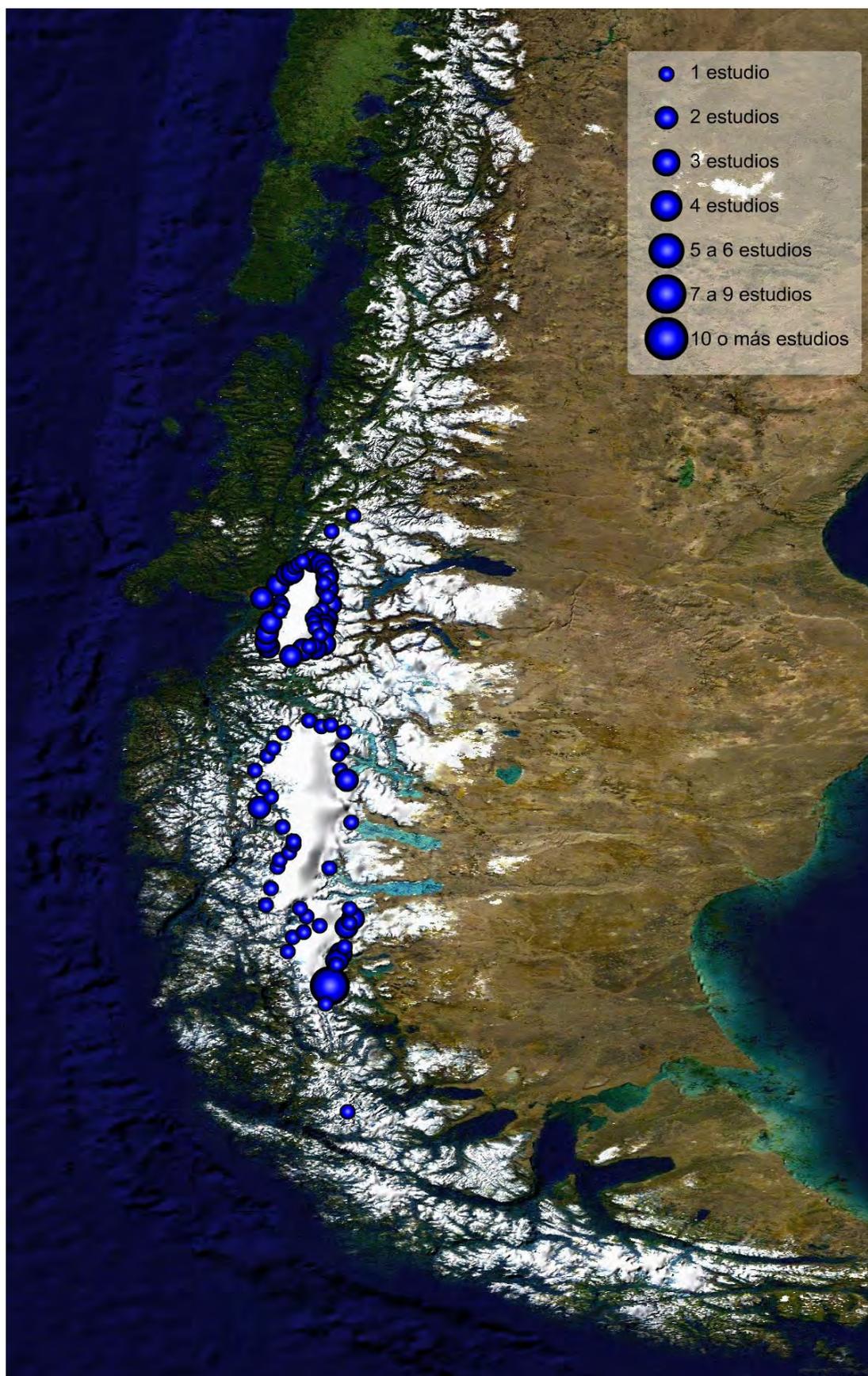


Figura 6.5: Densidad de estudios de variaciones volumétricas realizados en glaciares en las Zonas Sur B y Austral.

6.1.4. Balances de masa y testigos de hielo

Los estudios que se conocen hasta ahora en el país sobre balances de masa y energía o bien el análisis de los pocos testigos de hielo recuperados de algunos glaciares principalmente de las Zonas Norte y Austral (Figura 6.1, Figura 6.4 y Figura 6.6), han demostrado fehacientemente la relación de los glaciares con el clima y las claras asociaciones por ejemplo, entre la acumulación neta de masa y las fluctuaciones interanuales del Índice del Niño/Oscilación del Sur (ENOS), que tiene relación con los valores acumulación y ablación totales. Sin embargo, los programas de monitoreo intensivos de glaciares son todavía escasos y por lo mismo, algunos parámetros reconocidamente complejos tales como los balances de masa o las características glaciodinámicas han sido poco explorados, pese a lo cual se observa una relación directa pero retardada de las respuestas glaciares a la variabilidad climática.

En la Figura 6.1 se puede observar que los balances de masa son sumamente escasos, destacándose en la Zona Norte B los estudios recientes involucrados a proyectos mineros; en la Zona Sur, unos pocos estudios en los volcanes Villarrica y Mocho; y, finalmente, en la Zona Centro, el balance de masa del Glaciar Echaurren, que a cargo de la DGA es el único que cuenta con datos a escala de décadas y constituye un precedente a nivel internacional. Sin embargo, estos datos tienen escaso peso estadístico, pues es un solo glaciar, el que además es muy pequeño en términos absolutos y relativos a los demás de la zona, lo que lo hace poco representativo y reaccionando además de manera muy marcada a variaciones interanuales o efectos locales.

La escasez de estudios de balance de masa que se extiende también a la Zona Austral, donde se concentra gran parte de los estudios glaciológicos del país, se puede explicar en parte por el difícil acceso, la enorme acumulación y las duras condiciones climáticas de las grandes superficies de hielo Patagónicas, debido a lo cual se han podido realizar muy pocos balances de masa exitosos. De la Figura 6.6, resulta evidente la ausencia absoluta de este tipo de estudios en extensas áreas del país, incluyendo los Campos de Hielo, Gran Campo Nevado, Cordillera Darwin, todos sus glaciares periféricos y los glaciares menores en Aysén, a pesar de que muchos de estos últimos tienen condiciones de acceso que permitirían un monitoreo sistemático.

Los balances de masa a través del método glaciológico, entregan un conocimiento detallado de la dinámica de acumulación y ablación en el glaciar y sus variaciones año a año, por lo que son de gran relevancia y complementarios al método geodésico, el que entrega además de información acerca del balance de masa, otras referidas a la variación volumétrica total del glaciar. Para un correcto estudio de estos parámetros, es necesario establecer una red de monitoreo glaciológico representativa y con condiciones de acceso favorables, que permita la realización periódica de balances de masa. Una alternativa a la aplicación de métodos clásicos con intensas actividades de terreno y que puede tener éxito en todo Chile y particularmente en la Zona Austral, es la comparación de modelos digitales de terreno de diferentes fechas obtenidos desde plataformas satelitales o aéreas, lo que ha sido descrito por Bamber & Rivera (2007), en ellos el error existente en mediciones puntuales (píxel a píxel) se compensa por la disponibilidad de miles de estas mediciones

(píxeles), transformándolos en una técnica útil para la determinación de variaciones volumétricas y balances de masa a nivel de cuenca.

Dada la vital importancia de los balances de energía y la determinación de sus parámetros para el modelamiento del comportamiento glaciar, es importante aplicar en este tipo de estudios, las mismas consideraciones señaladas para los balances de masa, atendiendo a la realización de estudios sistemáticos de una muestra representativa de los glaciares de cada zona. Este monitoreo puede ser sustancialmente mejorado, y extendido, mediante una red de estaciones meteorológicas en glaciares, incluyendo en ellas sensores de flujo de energía, que permitan dilucidar claramente la magnitud y dinámica a lo largo del tiempo, de los diferentes factores que afectan el balance de energía glaciar.

Como se menciona en el capítulo 5, en otras partes del planeta, se ha determinado a través de análisis químicos de testigos de hielo la tendencia temporal de la depositación de Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs) como DDT, HCHs y PAHs. También en Los Alpes donde se detectaron concentraciones de POPs provenientes de un testigo de hielo extraído del glaciar Lys y donde se obtuvo la tendencia del uso de pesticidas desde el año 1959 al año 2000 (Villa *et al.*, 2003).

La realización de este tipo de investigaciones en glaciares en Chile sería de importancia para determinar la influencia de contaminantes asociados a asentamientos humanos, actividades productivas e incluso la ocurrencia de incendios forestales.

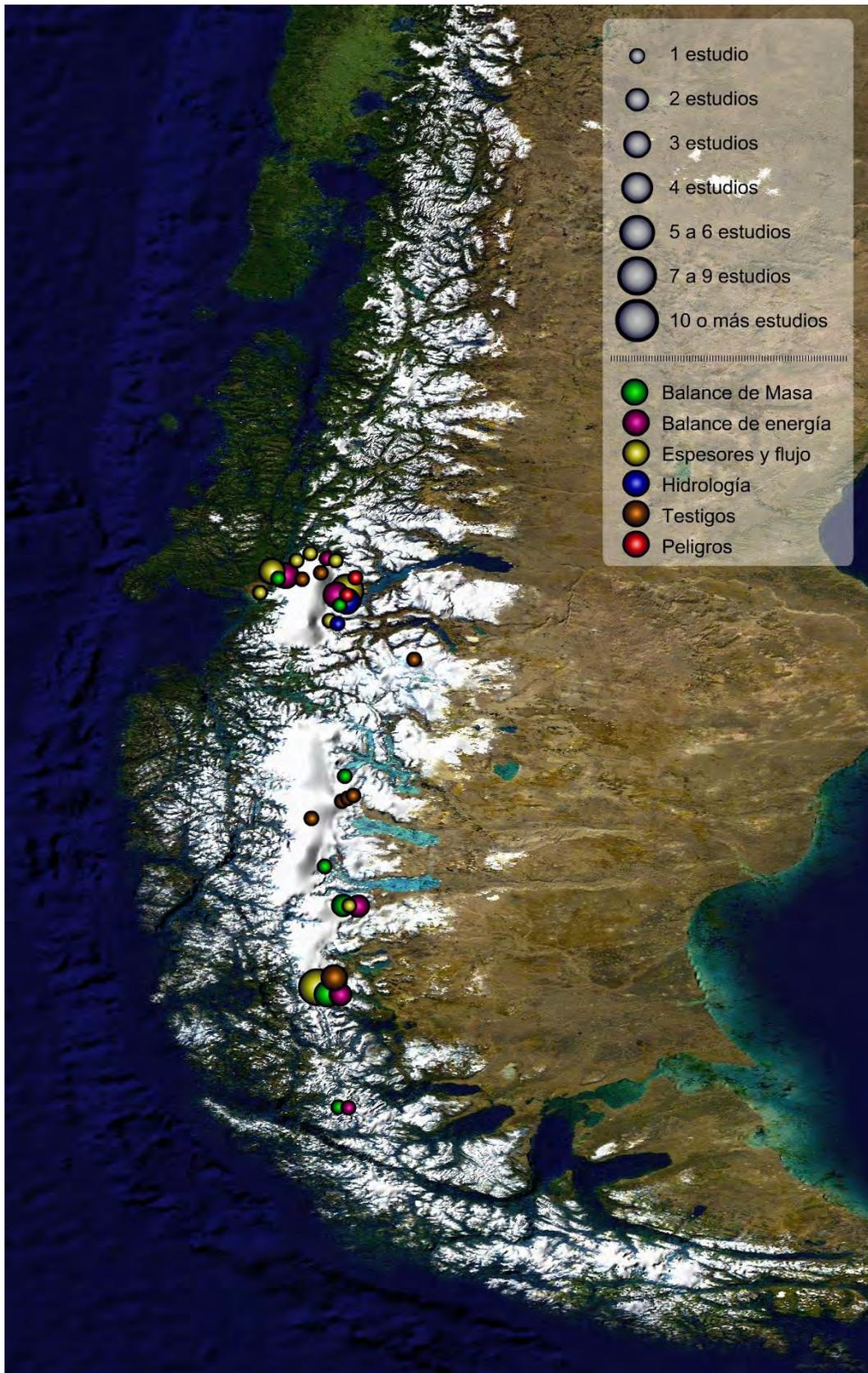


Figura 6.6: Densidad de estudios de balance de masa, energía, espesor y flujo de hielo, hidrología, testigos de hielo y peligros asociados a glaciares, realizados en las Zonas Sur B y Austral.

6.1.5. Mediciones geofísicas

La realización de mediciones geofísicas en terreno, como también el uso de sensores activos, han probado ser valiosas herramientas para la determinación de importantes parámetros glaciológicos tales como los espesores o las velocidades de hielo. En el caso del cálculo de espesores no es posible con el análisis óptico o la percepción remota pasiva mientras que las velocidades sí podrían ser determinadas utilizando la técnica de feature tracking (seguimiento de objetos) la que no ha sido utilizada aún en Chile para determinar velocidades glaciares, y dadas las características de esta técnica y del terreno, es posible que se obtengan resultados positivos pero sólo en algunos casos, como por ejemplo en los grandes glaciares de la Zona Centro, los que poseen superficies heterogéneas, tamaño suficiente y que en verano tienen un clima que favorece la adquisición de imágenes sucesivas a intervalos de tiempo adecuados para detectar el flujo sin perder la correlación entre imágenes. También podrían obtenerse buenos resultados en las áreas de ablación de los grandes glaciares de la Zona Austral, pero sólo en los casos excepcionales en que el clima permita la obtención de imágenes sucesivas a intervalos apropiados.

Respecto de la interferometría de radar, a pesar de las actuales dificultades para su uso, se perfila como una herramienta clave para el estudio y monitoreo de la dinámica glacial, perspectiva que se ve alimentada por nuevas plataformas satelitales que producirán este tipo de datos en el futuro cercano, esperándose la implementación de instrumentos que permitan realizar InSAR de una pasada (mediciones equivalentes a las realizadas por el transbordador espacial en la producción del SRTM, pero continuas. Considérese que la misión SRTM duró tan sólo 12 días) o configuraciones como “la rueda interferométrica”, dos soluciones que resuelven los problemas de coherencia. Sin duda en Chile se requiere la aplicación sistemática de este tipo de estudios y por lo tanto de capital humano capacitado para realizar análisis interferométricos de manera ágil y sistemática.

El cálculo de espesores es una de las tareas indispensables en la estimación de las reservas hídricas en forma de glaciares en Chile, a este respecto, se han registrado grandes avances con el advenimiento de los sistemas de GPR y diversas técnicas de radar que han permitido conocer las características subglaciales de variados tipos de glaciares en el país. No obstante lo anterior, aún es necesario el desarrollo de mejores instrumentos de manera de realizar estudios de espesores y estratigrafía interna (la que permite una mejor estimación de los equivalentes en agua y además puede dar información acerca de los balances de masa año a año durante las últimas décadas). Estos estudios deben ser extendidos a las principales superficies englaciadas de Chile y especialmente a la Zona Austral, donde se concentra la mayor reserva de hielo. Una buena alternativa, es el desarrollo de plataformas aéreas, las que permiten medir vastas regiones en muy poco tiempo. Este tipo de sistemas, a pesar de ser mucho más costosos, lo compensan con su extraordinaria eficiencia y rapidez.

Una de las dificultades importantes encontradas durante la determinación de espesores de hielo en Chile continental, es su carácter temperado, lo que está

siendo superado con el desarrollo de sistemas experimentales recientes (Casassa *et al.*, 2001; Zamora *et al.*, 2009).

En los últimos años, se ha avanzado de manera importante en el desarrollo de radares aerotransportados, los que en los primeros intentos no dieron buenos resultados en la Zona Austral (Casassa *et al.*, 2001; Keller *et al.*, 2007; Casassa *et al.*, 2003) debido a las ya mencionadas características temperadas del hielo y las capas de agua líquida existentes en su interior. Sin embargo, CECS en colaboración con la Armada de Chile, desarrolló un radar de características ideales para la penetración en hielo temperado, el cual se convirtió en el primer instrumento aerotransportado exitoso en detección de espesores de hielo en la Zona Austral, tras detectar espesores de hasta 670 m metros en el Glaciar Tyndall (Zamora *et al.*, 2009).

Un programa de medición de espesores en glaciares representativos de las distintas cuencas del país, podría mejorar la evaluación del recurso hídrico, permitiendo un seguimiento en el tiempo de las variaciones y respuestas glaciales frente a los cambios climáticos que están afectando actualmente al país.

Métodos sísmicos de refracción han sido útiles en la estimación de proporciones de hielo en el permafrost en el Norte de Chile, presentándose como una herramienta efectiva para estudios de reservas hídricas y de carácter geotécnico (Milana & Güell, 2008).

La determinación de topografías superficiales de precisión es también fundamental para la determinación de balances de masa, modelamiento dinámico, modelamiento de balances de energía, etc.

Por este motivo, se ha desarrollado en Chile un sistema láser aerotransportado que permite un ancho de barrido de 300 a 400 m con una resolución espacial aproximada de 1 m, con el que se han realizado topografías superficiales de precisión en las Zonas Austral, Centro y Sur. El sistema fue desarrollado a la medida y montado por el CECS, disminuyendo los costos y optimizando sus especificaciones para las mediciones en hielo, para lo cual se desarrolló un sistema particularmente robusto que opera en una longitud de onda de 900 nm que maximiza los retornos en hielo y nieve, permitiéndole medir hasta 600 metros por sobre la superficie, cuenta además con un buen ancho de barrido y frecuencia de muestreo.

Actualmente estas tecnologías podrían hacerse más accesibles puesto que algunas empresas privadas han comenzado a ofrecer levantamientos LIDAR. Una experiencia pionera al respecto fue el levantamiento realizado por la DGA en los glaciares de La Paloma (Diciembre 2008) y Echaurren Norte (Abril 2009), por medio de las empresas DIGIMAPAS S.A. y Terra Remote Sensing Ltda. respectivamente.

6.1.6. Hidrología glaciar

Los estudios de hidrología asociada a glaciares son escasos, concentrándose en las Zonas Centro (Peña & Nazarala, 1987; Pellicciotti *et al.*, 2007) y Austral (Saito & Kobayashi, 1985; Fukami & Escobar, 1987; Peña & Escobar, 1987; Escobar *et al.*, 1992; Aniya & Naruse, 2001; DGA, 2008a; Aniya *et al.*, 2007a; Aniya *et al.*, 2007b), debido a su mayor importancia hídrica para la población o el mayor interés glaciológico de sus hielos, sin embargo se hace necesario una red de monitoreo extensiva a todo el país, para poder alimentar futuros modelos físicos y/o empíricos y contrastar sus resultados en todas las zonas del país. En este sentido hace falta un mejor monitoreo de las variables meteorológicas en los glaciares y de los caudales provenientes de ellos, de manera de conocer la magnitud de dichos caudales y con ellos su importancia relativa para la zona. Estos datos utilizados en conjunto a los meteorológicos, permitirán calibrar modelos que entreguen información acerca de la posible evolución de los caudales bajo diferentes escenarios de cambio climático.

En la Zona Sur A, la escasez de glaciares en combinación con la actual abundancia de recursos hídricos, han producido ahí una particular carencia de estudios, sin embargo es necesario establecer realmente cual es el aporte de estos glaciares a las cuencas hidrográficas de esta región, en particular en los períodos de sequía. Lo que se hace particularmente relevante dado que son glaciares pequeños y por lo tanto frágiles, muy susceptibles a cambios en los regímenes de precipitación y temperatura, además, su estrecha relación con volcanes puede eventualmente producir la desaparición acelerada o repentina de algunas de estas masas de hielo.

Cabe destacar que la DGA ha establecido una amplia red de monitoreo fluviométrico, la que incluye 130 estaciones en subcuencas con aporte glaciar. Esta red aporta valiosa información, pero para poder estudiar el comportamiento glaciar se requiere aislar el aporte de las masas de hielo al caudal, por lo que resulta imprescindible la instalación de nuevas estaciones fluviométricas en posiciones más altas, cerca de los glaciares y antes de que las aguas de origen glaciar se combinen con las provenientes de cuencas con regímenes nivales y/o pluviales. Así también es prioritario realizar una clasificación de cuencas con aporte glaciar, evaluando su importancia hidrológica, para la población, actividades económicas asociadas, el estado actual de sus glaciares, su sensibilidad a variaciones climáticas, etc. Lo que permitirá un mejor diseño de las redes de monitoreo y una guía para identificar las prioridades de los nuevos estudios.

Por otro lado la red de monitoreo meteorológico de la DMC y DGA deberá ser complementada o ampliada con el propósito principal de monitorear las condiciones a mayores cotas, también será necesario instalar nuevas estaciones en las cercanías de los glaciares, en particular en las Zonas Sur B y Austral, cuyos glaciares cuentan con escasa cobertura de la red de monitoreo DMC y DGA. Finalmente se requiere una recopilación sistemática de las series climatológicas históricas actualmente dispersas entre organismos estatales y privados, las que de forma segmentada hasta ahora han permitido analizar las tendencias recientes de temperaturas y precipitaciones, subsanando al menos los vacíos geográficos más amplios, con esto se podrá proyectar de mejor

manera los cambios futuros que gobernarán los patrones de la hidrología glaciar.

6.1.7. Peligros asociados a glaciares

Se han identificado variados peligros asociados a glaciares, sin embargo uno de los más relevantes para el caso chileno es probablemente el relativo a las erupciones volcánicas y la generación de lahares debido al gran número de cuerpos de hielo localizados sobre volcanes que pueden interactuar con el material magmático durante eventos eruptivos. Pese a lo anterior, no existen estudios sistemáticos que evalúen el riesgo asociado a lahares producto de erupciones volcánicas a nivel nacional. Este tipo de estudios es necesario en orden de determinar la real magnitud de los riesgos involucrados y así establecer planes de acción de magnitud y nivel de prioridad adecuados.

Por otra parte, los recientes fenómenos de crecidas de origen glaciar ocurridos en la Zona Austral han generado una gran preocupación nacional tanto por la ocurrencia de aluviones o enormes crecidas de ríos como por su asociación al difundido proceso actual de cambio climático. Si bien los factores que en la Zona Austral hacen frecuentes estos fenómenos han sido estudiados (Peña & Klohn, 1990; Peña & Escobar, 1987), a la luz de ellos es evidente la necesidad de hacer un catastro de los cuerpos de agua actualmente embalsados por glaciares y de las cuencas susceptibles a ser embalsadas en el futuro, identificando los casos que representen un riesgo posible para la población o infraestructura. Este tipo de análisis, o un excelente primer acercamiento, sería perfectamente posible mediante el uso de imágenes satelitales, mapas y modelos de elevación actualmente disponibles, por lo que su realización es algo de suma importancia y fácil ejecución.

6.1.8. Glaciares Rocosos

Los glaciares rocosos de nuestro país suscitan particular preocupación dada la enorme incertidumbre existente en términos de su número, superficie, contenido de agua e importancia en los caudales de esorrentía.

La enorme abundancia de estos cuerpos en algunas cuencas (DGA, 2008c) y la escasa información que se tiene de ellos, deja espacio a la posibilidad de que constituyan un elemento gravitante del balance hídrico de las cuencas andinas, del que no sabríamos prácticamente nada.

En este sentido es imperante que se realice un inventario nacional de glaciares que implemente metodologías capaces de detectar glaciares rocosos, las que consisten básicamente en la identificación visual de las geoformas que los caracterizan en imágenes satelitales y fotografías aéreas de alta resolución.

Este primer inventario constituirá un desafío importante, pues requerirá el análisis de bastas porciones de territorio con probabilidad de ocurrencia de glaciares rocosos. Subsecuentes inventarios se podrán limitar a seguir la evolución de los cuerpos previamente identificados.

Una vez identificados, será fundamental crear una tipología para su clasificación, estudiar los valores típicos de contenido de agua en función de

parámetros externos como superficie, pendiente, latitud, altitud, etc. Y realizar estudios para entender como interaccionan con la meteorología externa, los procesos que determinan su dinámica y muy especialmente su aporte hídrico a la cuenca que los alberga.

El estudio de glaciares rocosos es altamente complejo, debido a su extraordinaria variabilidad en contenido de agua, las dificultades en su detección y la incapacidad de aplicar en ellos los métodos glaciológicos tradicionales. Es por esto primordial determinar en primera instancia su importancia potencial para los recursos hídricos del país y en función de ello establecer la magnitud de los esfuerzos y recursos a designar para su estudio, el que corresponde a una nueva rama de la glaciología con problemáticas y técnicas específicas para este tipo de glaciares.

6.1.9. Evaluación ambiental

A pesar del gran número de glaciares con que cuenta nuestro país, hasta ahora existen en Chile muy pocos estudios o declaraciones de impacto ambiental que consideren los impactos del desarrollo de proyectos en áreas cercanas a glaciares. Esto ha comenzado a cambiar gracias a la modificación del SEIA, la que obliga a emitir declaraciones o estudios de impacto ambiental en el caso de que glaciares puedan verse afectados. Esto ha producido un aumento generalizado de la atención sobre éstos cuerpos en los EIA y DIA en general.

Sin embargo, dada la diversidad glaciológica del país, las múltiples formas en que estos pueden ser afectados y el grado de desconocimiento que existe respecto de los procesos que controlan su dinámica, puede ser muy difícil determinar de manera certera si un proyecto dado afecta o no un glaciar, o si dichos efectos son significativos o no, discusión que puede ser polémica y encontrar escaso consenso, incluso tal vez dentro de la comunidad científica.

Por esto, es prioritario definir una metodología que determine de manera inequívoca que grado de alteración y/o intervención del ambiente glaciar debe estar sujeto a autorización de las autoridades ambientales. Y esta metodología ha de ser amplia e inclusiva, en particular en vista de que no se cuenta aún con los conocimientos para estimar o predecir con precisión los efectos que tendría una intervención dada.

De este modo la limitación de los conocimientos no debe ser un impedimento para el desarrollo de esta metodología, dado que la prontitud de su puesta en vigencia es prioritaria.

Esta urgencia se acentúa por el desconocimiento general del tema glaciar, por lo que muchos proyectos de inversión podrían no incorporar a los glaciares en su planeamiento y evaluaciones de impacto ambiental por mero desconocimiento de su existencia o de los efectos que sobre éstos puede tener el material particulado u otros procesos que pueden afectarlos a distancia sin mediar un contacto directo con el glaciar.

6.1.10. Consideraciones generales

En conclusión, estudios integrados y sistemáticos serán vitales para compilar toda la información, tal vez con la ayuda de una plataforma digital, de amplio acceso y constante actualización, de manera de generar una herramienta que permita compartir, analizar y evaluar continuamente el estado de los estudios en los temas mencionados, además de facilitar el manejo del volumen cada vez mayor de información con que se cuenta acerca de la glaciología, hidrología y meteorología de todo Chile.

Esta evidente necesidad de centralizar y homogenizar todos los datos recopilados cobra especial sentido para datos de carácter geográfico, en donde en una plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica) común es prioritaria, pues permitiría visualizar y comparar los estudios existentes, realizar su evaluación crítica y estimar sus errores. Esta plataforma ayudaría también a la incorporación de nuevas mediciones, facilitando así el desarrollo de un sistema de monitoreo continuo.

En síntesis, tomar en consideración todos estos aspectos relativos al tratamiento de la información básica, los antecedentes legislativos y administrativos mencionados en este documento, las demandas actuales de recursos de agua de las principales actividades que soportan la economía nacional y sus proyecciones, como también los escenarios de cambio climático futuro, será fundamental para el desarrollo de una estrategia de glaciares acorde al crecimiento sostenible al que aspira el país.

6.2. Análisis crítico de situación latinoamericana

Los glaciares de los Andes han sido reconocidos por ser una fuente esencial de recursos hídricos en Latinoamérica, por su vital rol como testigos del cambio climático pasado y presente y su contribución al aumento del nivel del mar. También son conocidos por una serie de aspectos negativos ya tratados anteriormente en este documento (crecidas repentinas de caudales, vaciamientos de represas glaciares, avalanchas, generación de lahares, etc.). En la actualidad, sin embargo, persisten importantes vacíos en la información glaciológica a lo largo de la región, donde las mediciones son poco sistemáticas para la mayoría del continente, menoscabando la comprensión global del comportamiento reciente de todos los glaciares latinoamericanos.

Respecto de la distribución de glaciares en Latinoamérica, el mayor porcentaje se concentra en Chile, con un 76,36 %, seguido por Argentina con 15,04 %, luego Perú con un 6,00 %, Bolivia con un 2,13 % y finalmente Ecuador, Colombia y Venezuela con un 0,26 %, 0,21 % y 0,01 % respectivamente. Lo que pone a Chile en una posición de destacada responsabilidad en el tema, al contar con la mayor proporción de superficie glaciar. Proporción que muy probablemente aumentaría si se realizara en relación a los volúmenes de hielo, pues Chile alberga la mayor parte de los grandes glaciares.

El Grupo de Trabajo de Nieves y Hielos (GTNH PHI-LAC), creado en Valdivia en el 2003, buscó mejorar esa situación mediante un programa de monitoreo

glacio-hidrológico integrado de la región para lograr entre otros aspectos, homogeneizar las técnicas de medición, propiciar la colaboración recíproca entre los países miembros, superar vacíos metodológicos, compilar toda la información regional existente y realizar publicaciones científicas conjuntas. En una de las recientes reuniones de este grupo se han destacado los avances alcanzados en los últimos cinco años, en gran parte gracias al apoyo recibido por parte del Programa Hidrológico Internacional de UNESCO que ha posibilitado su financiamiento durante este tiempo. No obstante los logros alcanzados que incluyen la consolidación de la red de monitoreo de glaciares y la implementación de un sitio Web, aún existen líneas de trabajo por desarrollar y es necesario incrementar la producción de resultados especialmente en materia de elaboración de documentación de divulgación, teniendo en cuenta la importante productividad que presentan las unidades de trabajo.

Cinco años después de la creación de este grupo, la evidencia para todos los países andinos y México apunta al dramático retroceso glaciar como consecuencia directa del calentamiento atmosférico. Este se manifiesta con mayor intensidad desde las últimas tres décadas donde se ha advertido un aumento de las tasas de retroceso frontal, disminución de espesores de hielo y reducción e incluso desaparición de glaciares, donde los remanentes más pequeños se han reducido en este período a menos de un 50% de sus superficies originales. Los glaciares de los Andes tropicales son sin duda los más vulnerables frente al actual cambio climático y en particular a la ocurrencia del Fenómeno del Niño. De hecho numerosos glaciares tropicales andinos pequeños desaparecieron: son 145 casos registrados sólo en la Cordillera Blanca del Perú entre 1970 y 2003, traduciéndose en una reducción del 26% de la superficie glaciar y en Bolivia ya desaparecieron pequeños glaciares como el Chacaltaya y hay preocupación ante una suerte similar para glaciares que son imprescindibles en la mantención de las fuentes de agua potable y la generación de hidroenergía que actualmente sostiene a la ciudad de la Paz. Un breve análisis país por país muestra la actual situación:

En México, dos centros montañosos dan cuenta de las tendencias de los glaciares, los que presentaron una reducción superior al 20% en 50 años. Se han realizado grandes avances en la instrumentación de glaciares locales. Se ha instalado una estación meteorológica automática sobre el glaciar Orizaba y otra en su morrena glaciar. Asimismo está en etapa de implementación la instalación de estaciones meteorológicas en el glaciar del volcán Iztaccíhuatl y continúan los trabajos basados en mediciones radiométricas de espesor de hielo, que en el glaciar Iztaccíhuatl indican un adelgazamiento de 30 m en apenas 5 años.

En Colombia se han obtenido valiosos resultados a partir del balizamiento del nevado de Santa Isabel. Las actividades glaciológicas se realizan conjuntamente entre dos instituciones nacionales de ese país, INGEOMINAS y el IDEAM.

En Ecuador se realiza el balance de masa de tres glaciares. Se realizó un relevamiento radiométrico en el casquete glaciar del Cotopaxi que permitió actualizar la información obtenida en el año 2003. Además ya se sabe que la superficie ocupada por glaciares en Ecuador, que era de 90 km² en 1997 se redujo a 70 km² en 2006.

En Perú se encuentra en marcha el Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas Altoandinas, que se suma al proyecto glaciológico que está en ejecución en la Cordillera Blanca. Hay tareas sistemáticas de monitoreo y una ampliación de la red prevista a corto plazo, incluyendo un nuevo glaciar piloto en el Nevado Salkantay de la Cordillera Vilcabamba, Región de Cusco.

Brasil no cuenta con glaciares, sin embargo glaciólogos de ese país colaboran en la investigación paleoclimática en otros países de la región y cuentan con programas satelitales útiles para el monitoreo de glaciares de algunos países de Latinoamérica a alta resolución espacial.

En Bolivia se controla de manera continua el balance de masa de 4 glaciares: Zongo, Charquini Sur, Charquini Norte y Chacaltaya, este último en etapa de extinción. Se ha comenzado la implementación de estudios glaciológicos en la Cordillera Condoriri por requerimiento del Gobierno Nacional. El Grupo de trabajo ha obtenido además el aval del Gobierno, reconociéndolo como el organismo entendido en monitoreo de glaciares. Adicionalmente, mediante un proyecto financiado por el Banco Mundial, se está planificando el inventario de glaciares de la Cordillera Real, los cuales son muy importantes en materia de disponibilidad de agua, tanto para consumo como producción de energía hidroeléctrica. Cabe mencionar también los estudios de flujos turbulentos en el glaciar Zongo.

En Argentina operan tres grupos de trabajo en Glaciología: El IANIGLA (Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales), que lo hace especialmente en la Cordillera Central, la Dirección de Recursos Hídricos de Tierra del Fuego en la región Austral Argentina, y el Instituto Antártico Argentino (IAA), que realiza actividades específicas en la Antártica y Patagonia. Actualmente se mantiene el monitoreo del glaciar Piloto y observaciones en el glaciar Horcones Superior. En Tierra del Fuego se ha mejorado la instrumentación del Glaciar Martial instalándose una estación automática próxima al ambiente glaciar y tres estaciones hidrométricas en la cuenca, en el marco del proyecto EPIC FORCE financiado por la Unión Europea. Se mejoró también la cobertura de balizamiento del glaciar piloto Vinciguerra y se ha instalado una estación hidrológica.

En la Patagonia Argentina, se continúa con las mediciones en la zona de ablación del Glaciar Perito Moreno. Se dispone de datos climáticos locales recabados por una estación automática desde el año 1995 y se ha realizado la correlación con los datos de la estación de El Calafate. Se dispone asimismo de un registro de 10 años de datos de temperatura correspondientes a la zona de ablación del glaciar Upsala. En proximidades del glaciar de los Tres se opera una estación que colecta datos de temperatura en cota 1.300 m.

Sintetizando la información recabada por los grupos de investigación de estos países, puede señalarse que existe actualmente evidencia inequívoca de un retroceso glaciar, el que está magnificado en el período más reciente y caracterizado por extinción de los pequeños glaciares en horizontes de corto plazo. En otras palabras, en escenarios futuros de cambio climático se prevé que muchos de los glaciares pequeños, especialmente los ubicados a baja altitud, desaparecerán en una o dos décadas. La magnitud de los retrocesos es

tal, que el supuesto tradicional de que los recursos hídricos provenientes de glaciares se mantendrán en el futuro sencillamente no es válida, siendo en muchos casos necesario reevaluar, a la luz de la investigación en curso y la información emanada, las proyecciones hidrológicas futuras en pos de una planificación y toma de decisiones adecuada e informada en relación al desarrollo económico y al uso racional de los recursos hídricos a lo largo de toda la región. Esta recomendación se enfatiza por el hecho de que las tasas de retroceso observadas hoy son mayores a las esperadas.

Los países en vías de desarrollo, como muchos de los que existen en la región, son más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático debido a su menor capacidad de adaptación por múltiples factores, siendo uno de ellos la mayor limitación para generar procesos energéticos eficientes y tecnologías limpias. Asimismo, se presenta un notable desequilibrio geográfico en los datos y literatura científica disponible sobre los cambios climáticos observados, con marcada escasez precisamente en aquellos países. Por lo tanto es indispensable fortalecer y propiciar los estudios de nieves y hielos a nivel regional y nacional. Frente a las consecuencias del cambio climático en la región, será necesaria una mayor toma de conciencia por parte de todos los actores y en todos los niveles para desarrollar una cultura de prevención, preservación, mitigación y adaptación, considerando que los gobiernos deben establecer estrategias de carácter inmediato y que la ciudadanía debe tener un rol activo, adoptando un uso más racional y eficiente de sus fuentes hídricas y energéticas.

Pese a que Chile no es de los países más vulnerables de la región debido a su mayor nivel de desarrollo relativo, necesariamente se verá afectado de manera directa o indirecta a través de sus países vecinos y deberá adaptarse a los desafíos presentados por el cambio climático, por lo cual es necesario continuar la colaboración en este programa internacional y mejorar la investigación glaciológica en curso, en concordancia con los objetivos del presente estudio. En especial, deberá fortalecer y reestructurar la estrategia de estudio en base a las capacidades humanas y tecnológicas ya instaladas y por instalar, la experiencia anteriormente ganada y el desarrollo de una metodología renovada que integre toda su diversidad glacio-climática, lo que representa un desafío de magnitud que requerirá una organización compleja y una estrategia eficaz y coordinada.

6.3. Propuesta metodológica para definición de requerimientos

En el marco de la Estrategia de Glaciares, las metodologías de estudio deben ser aplicables a todo Chile considerando los vacíos existentes en el actual conocimiento, como también la gran diversidad glaciológica y las diversas problemáticas ambientales a lo largo del país.

Como ya se ha analizado anteriormente, la Zona Norte se caracteriza por una gran aridez por lo cual los glaciares a esa latitud son escasos y pequeños; su contribución a la escorrentía de ríos y quebradas se considera potencialmente importante, sin embargo los pocos estudios existentes no detallan interacciones climáticas. En tanto en Chile Central se presentan numerosas cuencas cuya escorrentía tiene un fuerte respaldo nivoglaciario y de rol significativo en el abastecimiento de recursos hídricos a la región durante la temporada estival o

en los períodos de sequía. Pese a lo anterior, aún permanecen desactualizados los inventarios de la mayor parte de las cuencas englaciadas dentro de esta zona del país. Más al sur se localiza un número importante de glaciares sobre conos volcánicos activos, no obstante aún es muy escasa la investigación sobre las interacciones glaciovolcánicas y el riesgo ambiental en caso de ocurrencia de eventos eruptivos. Por su parte, en la Zona Austral se ha concentrado la mayor parte de la investigación glaciológica del país pero no existen modelos complejos sobre los impactos de los escenarios climáticos futuros en las grandes masas de hielo ahí albergadas.

En síntesis, dado el gran número de glaciares y su enorme diversidad glacioclimática, en Chile se identifica una dicotomía dada la imposibilidad de analizar absolutamente todos sus glaciares, debiéndose elegir entre los estudios de detalle de unos pocos glaciares sin peso estadístico o los estudios generales de muchos glaciares, con valor estadístico pero sin cabal comprensión de la naturaleza de los fenómenos en curso. En este contexto, se cuenta actualmente con un gran volumen de los estudios disponibles i) regionalmente concentrados, y ii) careciendo de análisis de detalle, complejidad o modelos de impacto en los recursos hídricos que ellos generan.

El WGMS, servicio encargado de administrar el inventario mundial de glaciares, ha desarrollado una estrategia de observación aplicable a cualquier región del mundo en base al aprovechamiento de las últimas tecnologías y la aplicación de sistemas escalonados de estudio o “niveles” (del inglés “Tier”) (Haeberli *et al.*, 2002), los que varían en complejidad y extensión espacial pasando desde las fases sencillas de monitoreo (Nivel 5) hasta estudios locales de gran detalle (Nivel 1). La fundamentación y explicación de este modelo es establecida por Haeberli *et al.*, (2002), Haeberli *et al.*, (2000) y Casassa *et al.*, (2007a).

6.3.1. Experiencias internacionales en el uso de sistemas de monitoreo jerárquico

Un ejemplo extranjero exitoso en la actualidad de su aplicación es el de la Red Global de Observación del Permafrost (Global Terrestrial Network for Permafrost GTN-P) en funcionamiento sobre todo el territorio ártico, sub-ártico y montañas del hemisferio norte, incluyendo Islandia, Groenlandia (Dinamarca), Canadá, Alaska (EE.UU.), Rusia, Mongolia, Kirgyzstan, Suecia, Suiza y Austria entre otros.

Así también se conoce de una adaptación adecuada de este modelo para la validación de productos satelitales del programa Earth Observing System (EOS) de NASA. Un proceso de validación de este tipo debía incluir necesariamente un amplio rango de superficies, condiciones atmosféricas y climas existentes en el planeta y por razones obvias de costos, éste tuvo que realizarse bajo un esquema jerárquico. En este sentido, el Goddard Space Flight Center de NASA desarrolló un sistema consistente en la recolección de una gran cantidad de parámetros de terreno y su comparación con datos de los mismos sitios pero arrojados por los productos EOS, destacando una red de 24 sitios de mediciones in situ intensivas (Privette *et al.*, 1999, Figura 6.7), lo que provee a un potencial usuario de EOS de una extensa base de datos terrestres, aéreas y satelitales. En la actualidad los resultados de esta validación son de libre acceso a la comunidad a través de literatura especializada y en archivos

complementarios a las bases de datos satelitales. La validación de datos EOS se realiza mediante diversas vías, incluyendo su comparación directa con los datos de terreno, con datos de sensores aerotransportados y otras plataformas satelitales, a través de análisis de tendencias y modelos. En Privette *et al.*, (1999) se señala que la validación se consideraría exitosa en la medida que la información del producto EOS estuviera disponible para el usuario al cabo de dos años del lanzamiento de la plataforma Terra. A casi diez años de su lanzamiento, los productos EOS y sus metadatos asociadas se continúan entregando de manera sistemática.

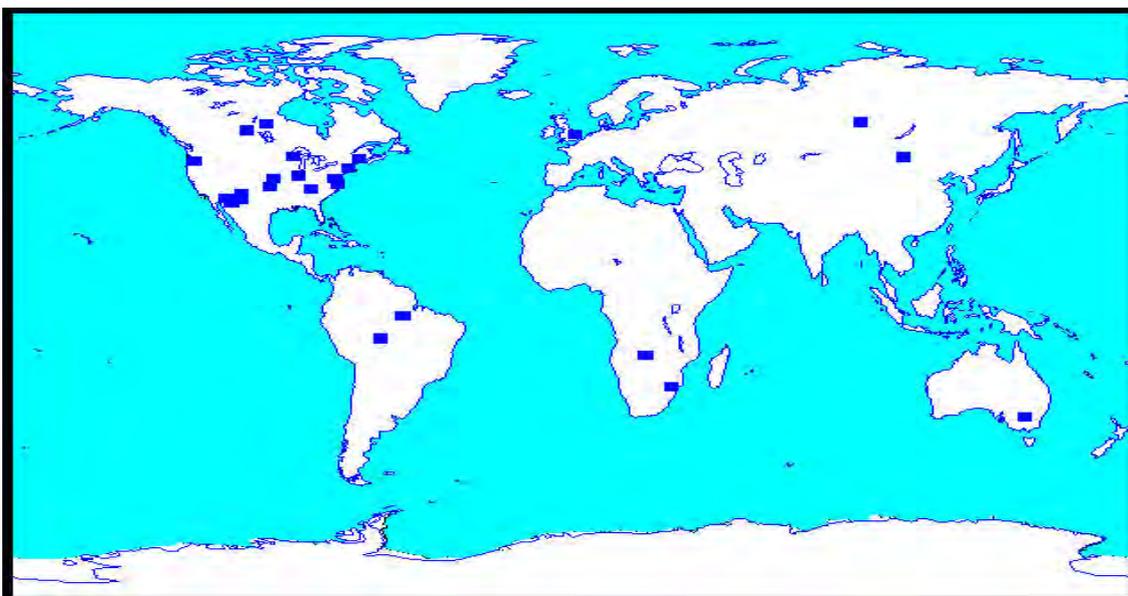


Figura 6.7: Ubicación de los 24 sitios de validación del programa EOS.

Por otro lado, este sistema jerárquico se ha aplicado para mejorar el programa global de vigilancia del clima. Al reconocerse que en el pasado, el sistema de monitoreo climático tradicional omitió la consideración de importantes consideraciones y variables se decidió adoptar un "sistema de observación escalonado" o "cascada de redes" complementarias (GCOS, 2007) formado por cuatro niveles (indicados por sus nombres originales en inglés): (i) benchmark network, ii) GCOS Reference Upper-Air Network, iii) GCOS Upper-Air Network y iv) comprehensive network (Figura 6.8). Cada uno abarca diferentes aspectos del monitoreo y la investigación climática. Todos los niveles se complementan y el sistema funciona de manera óptima si todos ellos están implementados. El primero consiste en el monitoreo en aproximadamente una decena de estaciones con mediciones de gran precisión; siendo la serie de datos de concentraciones de CO₂ en Mauna Loa un ejemplo de este nivel. El sistema GRUAN corresponde al punto de anclaje de sistema de monitoreo global que tiene como objetivo la medición de la columna atmosférica en varias decenas de sitios, GUAN provee observaciones de larga data y gran amplitud de cambios en temperaturas, humedad, vientos y otras variables a nivel hemisférico y global en una red de más de 100 estaciones alrededor del mundo y finalmente la red comprensiva de todo el sistema provee para caracterizar características dinámicas y climatología regional.

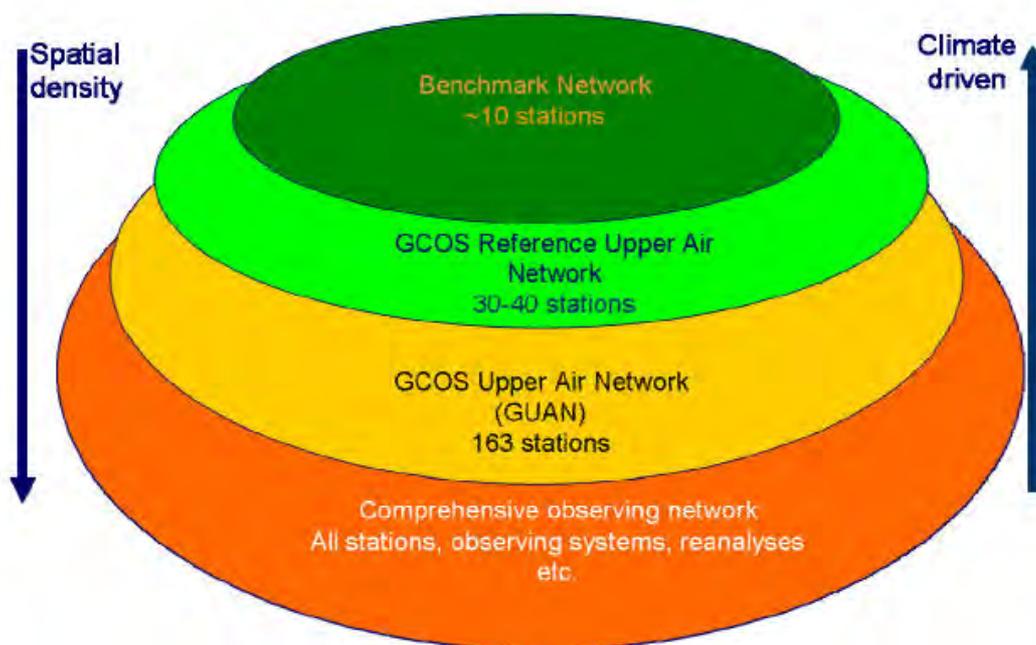


Figura 6.8: Sistema escalonado de observación del sistema climático.

6.3.2. El caso de Chile

Para el caso de Chile, donde se desea superar las limitantes en el conocimiento glaciológico del país en su conjunto, se propone la implementación de un modelo de éste tipo, con una estrategia de observación jerárquica de todos los glaciares del país que cumpla con los siguientes requerimientos: i) que combine observaciones de terreno con técnicas de percepción remota, ii) incluya y relacione procesos glaciares locales con problemas globales gracias al empleo de métodos validados internacionalmente, iii) emplee técnicas tradicionales que han sido exitosas en el pasado en combinación con técnicas modernas sofisticadas, iv) que se base en el principio de un sistema escalonado e integrado de estudios desglosado en “niveles” donde en su conjunto se tendrá un grupo pequeño de glaciares que se estudiarán con gran detalle, y a la inversa, un volumen grande de glaciares que se estudiarán con baja intensidad, v) cada nivel tendrá una intensidad, frecuencia, representatividad, número de estudios y número de glaciares a estudiar determinados, lo que permitirá tener una visión glaciológica general de todo Chile sin necesidad de monitorear todos los glaciares del país al mismo nivel de detalle, y vi) que se definan glaciares representativos de estudio por cada nivel de estudio y por cada zona glaciológica del país de manera de lograr obtener la visión glaciológica general y no una idea particular de glaciares específicos.

Para dar una visión general de los niveles propuestos para la estrategia nacional de monitoreo glaciar, podemos caracterizarlos en base a la pregunta clave de la problemática a resolver en cada nivel:

Nivel 5: ¿Cuántos glaciares hay en Chile y que superficie tienen?

Nivel 4: ¿Cómo varía la superficie de los glaciares en Chile?

Nivel 3: ¿Qué volumen de agua contienen los glaciares de Chile y como es la topografía bajo ellos?

Nivel 2: ¿Qué parámetros físicos rigen el comportamiento de los distintos tipos de glaciares presentes en Chile?, ¿Cuanto aportan a la escorrentía de los ríos de Chile?

Nivel 1: ¿Cómo reaccionan los glaciares frente a las condiciones meteorológicas y cómo lo harán bajo los escenarios climáticos futuros?

Tabla 6.3: Cuadro de resumen de los cinco niveles de estudio propuestos.

NIVEL 1	
Tipo de estudios	Combinación balances de masa, energía e hídricos Modelación hidrológica y proyección de dinámica glaciar frente a escenarios de cambio climático Análisis isotópicos y paleoclimáticos Topografía superficial de precisión Estructura interna del hielo y estudio de flujo
Métodos	Red de balizas, pozos stratigráficos Instalación de AWS y estaciones fluviométricas Análisis satelital termal, y cámaras infrarrojas aerotransportadas Altimetría láser, GPS geodésico, fotogrametría terrestre y teodolitos GPR Testigos de hielo, neviza y nieve
Precisión	Métrico a sub-métrico
Escala espacial	Local
Número de glaciares	4 (uno por zona glaciológica)
Frecuencia	Mensual

NIVEL 2	
Tipo de estudios	Balance de masa y de energía Balance hidrológico Modelación flujo de hielo Análisis biológicos, químicos y físicos. Modelación de parámetros para proyección de caudal
Métodos	Red de balizas, pozos estratigráficos y equipo Monte Rosa Instalación de AWS y termocuplas Sistema de aforo en cabeceras de cuencas con aporte glaciar Extracción de testigos de nieve superficiales Uso de GPS geodésicos en perfiles y balizas Extrapolación de datos discretos a toda la superficie glaciar
Precisión	Métrico
Escala espacial	Local
Número de glaciares	14 (3 a 5 por zona glaciológica)
Frecuencia	Bimensual a semestral

NIVEL 3	
Tipo de estudios	Cambios volumétricos Generación de modelos digitales de elevación Determinación de topografía subglacial
Métodos	Comparación datos topográficos distintas fechas Escáner láser aerotransportado Uso de sistemas de radar
Precisión	Métrico
Escala espacial	Regional
Número de glaciares	50 (10 a 18 por zona glaciológica)
Frecuencia	Anual

NIVEL 4	
Tipo de estudios	Variaciones frontales Variaciones areales
Métodos	Consulta de fuentes históricas, Análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales
Precisión	Métrica a decamétrica
Escala espacial	Zonas glaciológicas
Número de glaciares	100 (15 a 37 por zona glaciológica)
Frecuencia	Interanual (~5 años)

NIVEL 5	
Tipo de estudios	Realizar inventarios en zonas no inventariadas Inventarios de glaciares de roca Actualización de inventarios al año 2000
Métodos	<i>Band Ratio</i> de imágenes satelitales Digitalización manual Clasificación automática
Precisión Escala espacial	Decamétrica Nacional
Número de glaciares	Todos los glaciares de Chile deben ser inventariados
Frecuencia	Decadal

6.4. Propuesta de requerimientos a 5, 10 y 20 años

Debido a limitación de recursos, de capital humano y la necesidad de aprendizaje, los estudios propuestos en cada nivel deberán necesariamente ser implementados de manera gradual, en particular en aquellos de mayor detalle, esta gradualidad será tanto en intensidad como en cobertura, utilizando experiencias piloto para lograr procedimientos eficaces y eficientes al momento de extender los estudios a todo el país. En ese sentido se propone en líneas generales:

6.4.1. A 5 años

- Nivel 5: Completar los inventarios para todo el país, para las épocas 2000 y 2010, con buena capacidad de detección de glaciares de roca y por sobre todo una cuantificación precisa de los errores y sesgos de localización, delimitación y detección.
- Nivel 4: Realizar el primer estudio sistemático de variaciones areales a nivel país.
- Nivel 3: Levantar topografías superficiales de precisión con frecuencia anual y una topografía subglaciar en al menos un glaciar piloto por subzona.
- Nivel 2: Realizar estudios continuos de balance de masa y energía, mediciones meteorológicas e hidrológicas en al menos un glaciar piloto por zona. Identificación de todas las subcuencas a nivel nacional expuestas a peligros de origen glaciar.
- Nivel 1: Realizar un estudio de detalle multidisciplinario en al menos un glaciar de la Zona Centro e iniciar el modelamiento de las variables hidrológicas y glaciológicas.

6.4.2. A 10 años

- Nivel 5: Completar los inventarios para todo el país, para la época 2020, con inclusión de todos los glaciares de roca, actualización del inventario 2010 para incorporar todos los glaciares de roca.
- Nivel 4: Realizar el estudio actualizado de variaciones areales a nivel país y el primero incluyendo la totalidad de los glaciares de roca.
- Nivel 3: Levantar topografías superficiales de precisión con frecuencia anual y una topografía subglaciar de todos los glaciares seleccionados para el nivel. Realizar el primer estudio sistemático de variaciones volumétricas a nivel país.
- Nivel 2: Realizar estudios continuos de balance de masa y energía, mediciones meteorológicas e hidrológicas en todos los glaciares seleccionados para el nivel y determinar el aporte real en escorrentía de todos los glaciares estudiados. Primer mapa nacional de riesgo de origen glaciar.
- Nivel 1: Realizar estudios de detalle multidisciplinario en todos los glaciares seleccionados, establecer los modelos óptimos por zona y producir las primeras proyecciones para todo el siglo XXI.

6.4.3. A 20 años

- Nivel 5: Completar los inventarios para todo el país, para la época 2030
- Nivel 4: Actualizar el estudio de variaciones areales a nivel nacional.
- Nivel 3: Actualizar topografías superficiales de precisión con frecuencia anual y actualizar una topografía subglaciar de todos los glaciares seleccionados para el nivel. Actualizar estudios de variaciones volumétricas a nivel país.
- Nivel 2: Continuar estudios continuos de balance de masa y energía, mediciones meteorológicas e hidrológicas, actualizar los aportes en escorrentía. Y establecer los parámetros óptimos para el modelamiento de cada subzona.
- Nivel 1: Continuar estudios de detalle, validar y mejorar tras la aplicación los modelos por zona y subzona, producir nuevas proyecciones para todo el siglo XXI con un detallado manejo y cuantificación de las incertidumbres asociadas a dichas predicciones.

6.5. Motivación del monitoreo y costo alternativo

Es válido cuestionar la necesidad del país de estudiar y monitorear el estado de sus glaciares. Cuestionamiento razonable si se entiende que el estudio y monitoreo no tienen ninguna influencia directa que impida o disminuya el derretimiento y eventual desaparición de un glaciar, y que por el contrario, el estudio en sí, puede tener algunos efectos nocivos menores sobre las masas de hielo (contaminación, efectos de exploración, construcción de caminos, etc.).

Es importante entender que el estudio y monitoreo de los glaciares no tiene como objetivo principal su protección o conservación, si no que generar información precisa y actual, que permita conocer lo que ocurre con los glaciares y los ecosistemas, comunidades y actividades dependientes de ellos. Para ello, la recopilación de datos y el diseño de modelos, permitirá tomar decisiones informadas y con la debida anticipación, favoreciendo una planificación y desarrollo sustentable de dichos ecosistemas, comunidades y actividades. Este apoyo a la planificación, debiera incluir la proposición de medidas de adaptación y mitigación, respecto de los posibles efectos o consecuencias que pudiera tener la dinámica glaciar.

No obstante lo anterior, la generación de información sobre glaciares, permitirá en muchos casos ayudar a protegerlos de daños o intervenciones nocivas, así como hacerlos parte integral del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental – SEIA, lo que beneficiará su conservación y la de su entorno.

Por ejemplo, la correcta identificación y valoración de los glaciares permitirá determinar y regular alteraciones mayores como las producidas por la exploración y explotación minera, la que puede construir caminos sobre o dentro de los glaciares, removerlos o destruirlos (Azocar & Brenning, 2008), afectando con ello los recursos hídricos de la cuenca y los caudales ecológicos de los que dependen ecosistemas cercanos.

De este modo, el objetivo de la estrategia será identificar las influencias de los glaciares sobre el medio natural y humano, para luego estimar su dinámica futura y los efectos que dicha dinámica tendrá en los ecosistemas, comunidades y actividades dependientes o relacionadas a ellos.

6.5.1. El valor de la información y costo alternativo

A continuación se argumentará y mostrará con ejemplos, cómo la información que se obtendrá de la ejecución de la estrategia nacional de glaciares aquí presentada, beneficiará al país, incluyendo tanto a su medio natural, a sus habitantes y a su sistema económico.

6.5.1.1. Recursos hídricos

Puesto de manera sencilla, un escenario climático dónde un glaciar tiene un balance de masa negativo de manera sostenida a lo largo del tiempo, necesariamente conducirá en algún momento a la desaparición de dicho glaciar. Lo que en términos de recursos hídricos se traduce en que el glaciar aportará a la escorrentía de su cuenca de manera probablemente creciente en el corto plazo (Pouyaud *et al.*, 2005), pero que en el mediano o largo plazo, el caudal aportado por el glaciar tenderá a disminuir hasta desaparecer del todo, en la medida que el glaciar desaparezca.

Conocer cual es el aporte de una masa de hielo a la escorrentía de su cuenca, como variará en el futuro y cuando cesará, son preguntas fundamentales para planificar la asignación de derechos de agua y realizar medidas de adaptación como:

- Cambio del uso de suelo
- Cambios en los tipos de cultivo
- Mejoras en las técnicas de riego
- Mejora en la reutilización de las aguas
- Construcción de tranques y embalses

De este modo, el costo alternativo de la carencia de información para realizar estas medidas de forma anticipada sería:

- Pérdida de cosechas en años de sequía
- Disminución de la productividad de las cosechas
- Conflictos por el uso del agua
- Racionamiento de agua en años de sequía
- Desaprovechamiento del recurso hídrico por falta de capacitación o tecnología
- Daño ecológico producto de caudales extremadamente bajos o nulos

Este tipo de efectos se exacerbarían en las Zonas Norte y Centro, pues en ellas gran parte de los glaciares son pequeños, por lo que tienen tiempos de reacción menores y pueden cambiar su comportamiento más rápidamente, en términos de su aporte a la escorrentía.

Estudios realizados en la Cordillera Blanca de Perú (Pouyaud *et al.*, 2005; Suarez *et al.*, 2008) y otros lugares del mundo (Casassa *et al.*, 2009a), muestran que el derretimiento de un glaciar consta de dos fases. Durante la primera, el caudal aportado aumenta producto de una mayor tasa de derretimiento lo que mejora la disponibilidad de recursos hídricos, situación que se sostiene hasta un punto crítico que da inicio a la segunda etapa, en la que el caudal proveniente del glaciar disminuye a tasas en incremento hasta la desaparición total de la masa de hielo.

Figura 6.9 muestra el modelamiento para cuatro glaciares de la Cordillera Blanca de Perú, en los que se observa claramente el aumento inicial del caudal (expresado en función de la lámina escurrida) el que cesa en el punto de inflexión para dar paso a una etapa de disminución acelerada del aporte de agua hasta que éste desaparece, contando la cuenca sólo con el caudal basal. El modelo simula la escorrentía para el período 2000-2300 para 4 cuencas glaciares, bajo un escenario de calentamiento atmosférico. El aumento de la escorrentía se produce en el corto-mediano plazo a medida que aumenta el derretimiento glaciar. Luego de algunas décadas los glaciares se reducen bajo un cierto umbral crítico, y la escorrentía comienza a disminuir hasta alcanzar un nivel base cuando desaparecen totalmente los glaciares. El glaciar más pequeño es el Yanamarey (1 km²), el cual se predice que desaparezca el año 2175, mientras que el glaciar más grande, Llanganuco (33,7 km²), se predice que desaparezca hacia 2250 (Pouyaud *et al.*, 2005)

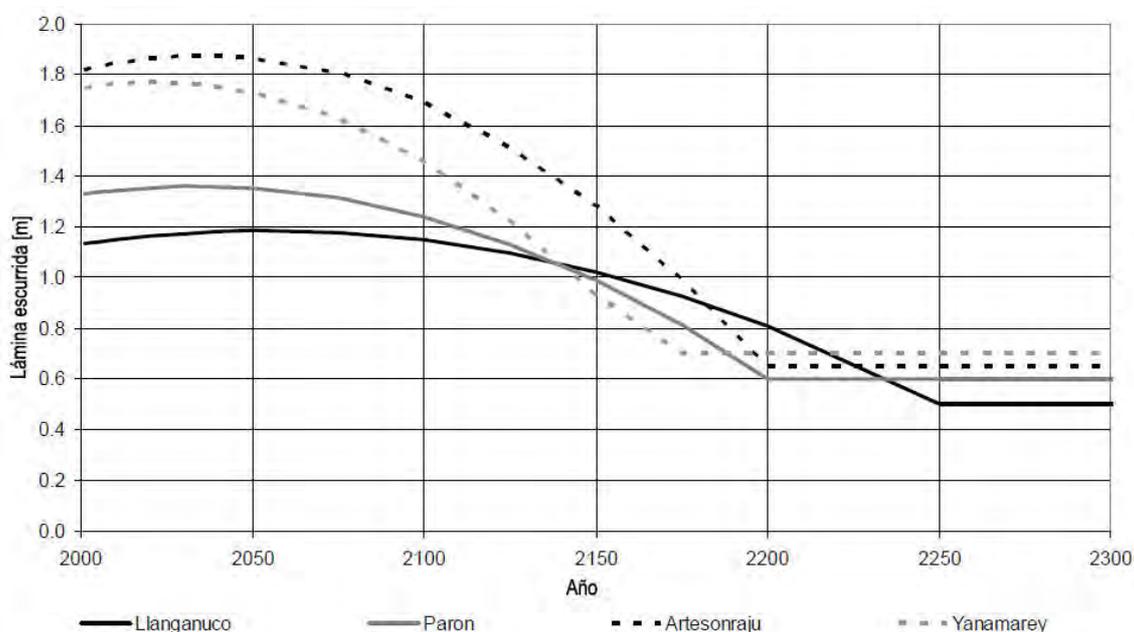


Figura 6.9: Modelo de la evolución futura de la escorrentía en cuatro cuencas glaciares en la Cordillera Blanca en Perú (adaptado de Pouyaud *et al.*, 2005).

Desconocer el posible comportamiento de los glaciares, o no llevar ese conocimiento a los tomadores de decisión, puede conducir a situaciones paradójicas, como una ampliación de la infraestructura agropecuaria o industrial en vista de un recurso hídrico abundante de manera transitoria, producto del derretimiento acelerado de los glaciares. Pero una vez que estos alcancen el tamaño crítico o simplemente desaparezcan, se produciría una caída rápida de la oferta de agua en meses secos, dejando la nueva infraestructura desabastecida de los recursos que precisa para su funcionamiento.

6.5.1.2. Recursos turísticos

Los glaciares son actores principales de algunos de los principales atractivos turísticos del país, como lo son la Laguna San Rafael, las Torres del Paine, los cruceros por los Canales de Magallanes (Figura 6.10), entre otros.

De continuar la tendencia al retroceso, los pequeños glaciares de montaña de las Torres del Paine desaparecerán, el Glaciar San Rafael retrocederá hasta que su frente quede varado en tierra y ya no producirá más témpanos ni desprendimientos espectaculares, que son uno de los grandes atractivos de la Laguna San Rafael. También podrían repetirse fenómenos como el sucedido en el glaciar Grey el año 1997, donde una porción de la lengua colapsó, produciendo tantos témpanos, que la navegación turística se vio suspendida por cuatro años.

La industria de los cruceros en Aysén y Magallanes factura del orden de USD\$100 millones anuales; el principal atractivo es el Glaciar San Rafael, glaciar que está retrocediendo sistemáticamente (Masiokas *et al.*, 2009). En este caso la información generada por una estrategia nacional de glaciares, permitirá a esta industria anticiparse a los cambios futuros informadamente, pues conocer que el Glaciar pudiera dejar de producir témpanos en 10, 30 o 50 años puede ser fundamental para decidir el manejo de dicha industria.

Colapso de frentes como del Glaciar Grey o desprendimiento de glaciares completos como sucedió en el Glaciar Aparejo (Peña, 1980), son fenómenos cuya factibilidad se podría determinar de existir estudios de detalle de su topografía subglaciar y superficial.

De este modo el costo alternativo de la no realización de la estrategia nacional de glaciares para este sector, sería la incapacidad de alertarse o prepararse adecuadamente a los cambios paulatinos o repentinos que pudieran sufrir los glaciares de las distintas zonas turísticas del país.



Figura 6.10: M/N Skorpions III en el frente del Glaciar Pío XI.

6.5.1.3. Peligros glaciares

Predecir cuando se vaciará un lago represado por un glaciar, cuando se desprenderá un glaciar o cuando se producirá un lahar en un volcán, son problemas sumamente complejos y que en muchos casos están fuera de los alcances de la estrategia propuesta. Sin embargo la información generada por ésta, es fundamental para estimar la magnitud, alcances y factibilidad de cada uno de estos fenómenos, para la elaboración de mapas de peligro y de riesgo.

El costo alternativo de la falta de esta información será el desconocimiento de los peligros que podrían afectar determinados territorios, lo que podría conducir a la edificación en zonas vulnerables, lo que podría traducirse en pérdidas humanas y materiales en caso de ocurrir eventos catastróficos.

Con o sin estrategia nacional de glaciares, por inquietudes propias de la población y los inversionistas, se pueden elaborar mapas de riesgo de lahares y de inundación. Luego la inexistencia de información fidedigna respecto del tamaño y volumen de los glaciares llevará a la subestimación de las zonas afectadas, lo que podría conducir a pérdidas humanas y materiales, o bien a la sobreestimación de dichas zonas, lo que producirá la devaluación innecesaria y desaprovechamiento de los terrenos erróneamente catalogados como peligrosos. Ambos fenómenos serían parte del costo alternativo de esta estrategia.

6.5.1.4. Aumento del nivel del mar

El derretimiento de los glaciares es uno de los factores gravitantes en el aumento del nivel del mar global, dando cuenta actualmente del 38% de la tasa de aumento (IPCC, 2007) participación que probablemente aumentará en el futuro. Los glaciares chilenos realizan una significativa contribución a él, participando aproximadamente con el 8% de la contribución de los glaciares del mundo (Rivera *et al.*, 2007; Lemke *et al.*, 2007). Si bien este tema parece digno de estudio para la glaciología nacional desde un punto de vista estrictamente científico, su investigación se constituye en algo necesario por sus potenciales repercusiones socioeconómicas, políticas y ambientales.

El estudio y modelamiento del nivel futuro del mar es un esfuerzo multinacional, debido al carácter global de sus efectos. La información generada por la estrategia nacional de glaciares permitirá mejorar la calidad de estos estudios y mostrará el compromiso de Chile con las problemáticas ambientales globales.

Chile sin duda se beneficiará de los modelos de nivel futuro del mar y de cualquier medida de mitigación que se lleve a cabo al respecto. En particular dada su especial configuración geográfica con más de 4.200 km de borde costero desde el límite con el Perú hasta los 56° S ur, contando por ello con numerosos puertos y ciudades costeras.

El costo de no contar con información precisa y actualizada, puede resultar en pérdidas materiales de infraestructuras costeras por inundación, en la devaluación por daños o mera especulación de territorios situados en la orilla

del mar y sin duda, en una planificación urbana desinformada y potencialmente ineficaz.

Sin investigación al respecto, la actual Política Nacional de Uso del Borde Costero se verá relativizada producto de la carencia de información relevante para sus objetivos, entre los que se cuenta el desarrollo armónico y la protección medio-ambiental del borde costero. Por el mismo motivo, el Estado no dispondrá de las herramientas necesarias para equilibrar con criterios adecuados, los recursos fiscales asignados al desarrollo de las actividades en el sector costero a lo largo del territorio nacional.

No investigar implicará además desconocer impactos ambientales en áreas susceptibles de inundación, lo que a su vez podría alterar el normal desarrollo de las múltiples actividades turísticas y de recreación que se desarrollan en las playas, las que podrían experimentar balances sedimentarios más negativos, alteración de dunas, etc.

6.5.1.5. Aspectos geopolíticos

En las regiones australes del país, los glaciares representan un factor esencial en la definición de la línea fronteriza entre Chile y Argentina, la que aún no ha sido mapeada íntegramente. Ello ha implicado que el Ministerio de Relaciones Exteriores haya recurrido a fines del siglo pasado a la asesoría de un grupo de expertos en el estudio de las características topográficas y la dinámica del hielo en las áreas donde hay que mapear el límite internacional.

El costo alternativo de no realizar estudios glaciológicos en zonas fronterizas podrían conducir a conflictos diplomáticos producto de acuerdos bilaterales desinformados o tardíos, mayor vulnerabilidad en la soberanía nacional por desconocimiento del terreno, publicaciones imprecisas o arbitrarias en la cartografía y en último término a la pérdida del territorio nacional en caso de litigios.

6.5.1.6. Efectos secundarios

El conocimiento derivado de la realización de la estrategia nacional de glaciares, sacará a la luz muchas de las problemáticas que afectan los glaciares, generará conciencia y permitirá valorarlos en su justa medida. Además será una de las iniciativas que aporten a la política del país respecto de la sustentabilidad y la conservación.

De este modo, indirectamente favorecerá la creación de medidas de regulación de las emisiones de gases de invernadero, de la polución en torno a glaciares y generará una conciencia ambiental que se verá reflejada en múltiples aspectos del accionar de la población en pos de una vida sustentable.

Con esto se puede entender que al largo plazo, esta estrategia está favoreciendo la conservación de los glaciares y muchos otros ecosistemas que serán afectados por los efectos del cambio climático, cuya magnitud en alguna medida dependerá del actuar del ser humano.

7. PLAN NACIONAL DE MONITOREO GLACIAR

La determinación del estado actual de los glaciares chilenos y los impactos en los regímenes de las cuencas hidrológicas asociadas, constituirá un antecedente de suma relevancia en el marco de una futura Estrategia Nacional, por lo que debe obtenerse una muestra representativa de todas las regiones climáticas del país en distintos niveles de detalle siendo prioritario planificar un programa de monitoreo extensivo y sistemático.

Aquí se propone un programa de monitoreo a ser aplicado en todas las zonas del país, una vez que la Estrategia Nacional esté en marcha. Este considerará desde análisis mediante el uso exclusivo de técnicas de percepción remota para los estudios más generales hasta la instrumentación en terreno con variados sensores permanentes y mediciones puntuales periódicas para los estudios de mayor detalle a realizar en algunos lugares cuidadosamente seleccionados.

7.1. Nivel 5: Monitoreo extensivo nacional

Estudio nacional extensivo de inventarios, con el detalle necesario para reconocer todas las masas glaciares del país.

En Chile se han inventariado los glaciares a lo largo de un extenso rango latitudinal. No obstante lo anterior, persiste una serie de vacíos de información que se sintetiza en lo siguiente: i) existen porciones del territorio chileno todavía no-inventariadas, ii) existen inventarios en base a fuentes consultadas hace 4 o más décadas; iii) los métodos, tecnologías y precisiones de cada estudio son variables; y iv) los glaciares pequeños, especialmente alrededor de los campos de hielo más extensos, han sido sistemáticamente no-inventariados v) los glaciares de roca no han sido incluidos en los inventarios o sólo de manera parcial. Para superar lo anterior se propone el desarrollo de un “monitoreo extensivo nacional” que requerirá incluir los siguientes aspectos:

7.1.1. Líneas de estudio y metodologías

Inventarios de Glaciares: Creación de inventarios decadales (2010, 2020...) y actualización de inventarios de glaciares a la década del año 2000 para todo Chile, especialmente en aquellas regiones donde los estudios originales tengan dos o más décadas de antigüedad. Será necesario realizar inventarios con fuentes, tecnología y trabajo de terreno tales que permitan eliminar los sesgos existentes en la detección de glaciares de roca, con el fin de incorporar estos cuerpos de manera integral a los nuevos inventarios.

La metodología incluirá:

- Uso predominante de imágenes satelitales con antigüedad de adquisición no superior al año 2000, preferentemente de los sensores ASTER y Landsat ETM+, que entregan escenas con óptima resolución espacial para este análisis (15 m y 28,5 m respectivamente en el espectro visible e infrarrojo). Su adquisición es gestionada en línea a través del programa mundial de monitoreo satelital de glaciares “GLIMS”

(Global Land Ice Measurements from Space) para los respectivos centros regionales en Chile (mayor información en www.glims.org).

- Para las zonas con ocurrencia de glaciares rocosos (Norte y Centro) se deben incorporar imágenes satelitales de alta resolución (IKONOS, QuickBird, GeoEye, SPOT), apoyados por el empleo complementario de técnicas tradicionales y datos análogos (levantamientos aerofotogramétricos) a escala nominal no inferior a 1:70.000 traspasados a formato digital.

Los inventarios consistirán en archivos Shapefile (un estándar en aplicaciones GIS), con polígonos digitalizados manualmente (con eventual ayuda de técnicas automáticas en etapas preliminares) delineando los límites del glaciar a la máxima resolución permitida por la base fotográfica y con múltiples atributos siguiendo la norma de clasificación establecida por GLIMS. Siempre se incluirán los cuatro archivos obligatorios exigidos por esta norma para cada inventario, siendo estos:

- o Session: Contiene información acerca de cuando y quien realizó el análisis, así como información general de las fuentes utilizadas, tanto imágenes como topografía.
- o Glaciers: Especifica las coordenadas del centro del glaciar y su código de identificación. Información adicional no obligatoria puede ser incluida como el nombre del glaciar (se incluirá siempre que exista), características del frente, ancho y largos representativos, área, área de ablación, velocidad, etc.
- o Segments: Archivo principal que contiene los polígonos que delimitan el contorno del glaciar (aunque pueden incluirse líneas de nieve, rocas internas, lagos proglaciares o supraglaciares, coberturas de sedimentos, etc.), incluye la identificación del glaciar, el tipo de glaciar al que corresponde e incertidumbres asociadas a su delimitación.
- o Images: Polígono que delimita la cobertura de la imagen utilizada, así como también establece con que sensor fue generada, su ID original, fecha y hora de captura y posición central de la imagen, se puede incluir opcionalmente la cobertura de nubes, elevación y azimut solar, etc.

Utilizando como base la norma GLIMS, se establecerá un uso estándar y obligatorio de los campos de información adicional de cada archivo, de manera que éstos contengan cada uno de los campos básicos y complementarios (Tabla 6.1 y Tabla 6.2) del Inventario Nacional de Glaciares según lo estableció la Resolución 1.851 de 22 de Junio de 2009 de la Dirección General de Aguas.

Tabla 7.1: Variables físicas a monitorear en estudios de Nivel 5 y los errores máximos requeridos en el valor final de las variables una vez aplicadas todas las correcciones o ajustes pertinentes.

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal	Error máximo (requerido)	Método
Topografía superficial	< 90 m	10 años	<15 m	ASTER DEM, SRTM.
Delimitación de glaciares descubiertos	15 m	10 años	<15 m	Imágenes ASTER y LANDSAT, Topografía.
Delimitación de glaciares rocosos	<10 m	10 años	<15 m	Imágenes Quickbird, SPOT y aéreas.

7.1.2. Número de glaciares y metodología de selección

Este nivel incorporaría la totalidad de los glaciares existentes y que concuerden con la definición operativa de glaciar definida en este documento, para cada zona glaciológica del país.

7.1.3. Estudios recientes en Nivel 5

- Inventario de glaciares descubiertos de la cuenca del río Copiapó y variaciones recientes en sus frentes (Vivero, 2008).
- Balance glaciológico e hídrico del glaciar Nef, Campo de Hielo Norte, y catastro de glaciares de algunas cuencas de la Zona Centro y Sur del país (DGA, 2008a).

7.1.4. Estudios prioritarios

- Actualizar inventarios de las Zonas Norte y Centro que datan de los años setenta y ochenta, realizar dichas actualizaciones con técnicas capaces de detectar glaciares de roca.
- Realizar el primer inventario de la Zona Sur B.
- Realizar el primer inventario integrado de la Zona Austral, enfocándose en las zonas no estudiadas aún (básicamente todo a excepción de CHN, CHS, Cordillera de Darwin e islas al sur del Estrecho de Magallanes).
- Para zonas prioritarias de las Zonas Norte y Centro, utilizando imágenes y cartografía antigua, realizar nuevos inventarios o repetir los ya existentes, mejorándolos en la medida de lo posible y homogenizando la metodología.

7.1.5. Línea de base glaciológica y seguimiento

Nivel mínimo de estudios para proyectos sometidos al SEIA relacionados a desarrollo de actividades turísticas y recreativas en cuencas englaciadas. También constituiría un nivel de estudio necesario pero no suficiente para proyectos mineros e hidroeléctricos en cuencas glaciares, los que deberán incluir también estudios de mayor detalle. En todos los casos se requerirá inventarios con datos no anteriores a tres años.

7.2. Nivel 4: Análisis de fluctuaciones glaciares

Estudio nacional extensivo, orientado a establecer los parámetros básicos de la dinámica glaciar a nivel país.

En el país se han medido variaciones frontales históricas para una proporción reducida del total de glaciares inventariados en el territorio nacional, estando la mayor parte de las regiones del país representadas sólo marginalmente en estos casos de estudio, los que han sido realizados a intervalos irregulares de tiempo y donde además se identifican factores de tipo local en las fluctuaciones glaciares. Para superar estas limitantes es necesario el desarrollo de un análisis de fluctuaciones glaciares de carácter “extensivo” incluyendo los siguientes aspectos:

7.2.1. Líneas de estudio y metodologías

Variaciones frontales y de área: Cálculo de cambios frontales y de área a escala de años, para una proporción significativa de glaciares de cada una de las regiones glaciológicas definidas.

Tabla 7.2: Variables físicas a monitorear en estudios de Nivel 4 y los errores máximos requeridos en el valor final de las variables una vez aplicadas todas las correcciones o ajustes pertinentes.

Variable	Resolución temporal	Error máximo (requerido)	Método
Variaciones frontales	2 años	< 15 m	Imágenes satelitales, fotos aéreas, documentos históricos.
Variaciones de área	5 años	< 1%	Imágenes satelitales, fotos aéreas, documentos históricos.
Variaciones volumétricas	5 años	< 1%	Datos disponibles de niveles de mayor detalle y otras fuentes extrapolados a escala nacional.

Comparación de inventarios: Uso de inventarios en intervalos de diez años en combinación con otras fuentes de información y datos de mayor frecuencia de los glaciares incorporados en este nivel y los de mayor detalle. Para derivar fluctuaciones glaciares actuales e históricas estableciendo tendencias dinámicas a nivel nacional. Esto se logrará mediante:

- Empleo de diversas técnicas de análisis digital y software geográficos (SIG) para cálculo de tasas anuales de variación lineales expresadas en metros ($m a^{-1}$) y variación de área en kilómetros cuadrados ($km^2 a^{-1}$).
- Análisis de otras fuentes de información, las que deben georreferenciarse y llevarse a formato digital para su comparación directa con los datos satelitales recientes: documentación histórica (litografías, bitácoras, fotografías terrestres), fotografías aéreas verticales, mediciones en terreno (posicionamiento de frentes y

márgenes glaciares con sistemas GPS) y mapas topográficos a escala nominal en el mismo orden de magnitud que la data satelital.

7.2.2. Número de glaciares y metodología de selección

Debido a que es un tipo de estudio extensivo, se deben estudiar varias decenas de glaciares por zona glaciológica, y la selección en este caso debe priorizar una cobertura espacial homogénea más que un particular foco en zonas con prioridad económica o poblacional, ya que será información clave para el modelamiento de la respuesta futura de los glaciares. Sin embargo, dada la enorme heterogeneidad glaciológica y de densidad poblacional a lo largo del país, se hace necesario considerar también la importancia de los glaciares en cada zona en términos económicos, hidrológicos y de superficie relativa.

Dado que existen 101 subcuencas identificadas con aporte glaciar en Chile, y que de seguro se identificarán más en futuros inventarios, se propone la selección de aproximadamente un glaciar por subcuenca (i.e. un total de 100 glaciares), de haber más de uno en una subcuenca dada, se escogerá aquel que muestre características típicas de la subcuenca en términos de exposición, tamaño y rango altitudinal.

Tabla 7.3: Resumen por zona glaciológica de superficie total, glaciar y población con respecto de los totales nacionales.

Zona	Superficie (% del total nacional)	Superficie glaciar (% del total nacional)	Fracción glaciar (%)	Población aprox. (% del total nacional)
Norte	40,7%	0,53%	0,04%	12%
Centro	10,0%	4,46%	1,25%	62%
Sur	22,9%	2,63%	0,32%	25%
Austral	27,0%	92,38%	9,54%	1%

Tomado en cuenta la población (Tabla 7.3), se propone dar mayor peso a la Zona Centro, que concentra más de la mitad de la población nacional a costo de la Zona Austral, que cuenta sólo con un 1% de la población nacional aproximadamente y que posee además el mayor número de subcuencas con aporte glaciar del país. De este modo se propone establecer la red de monitoreo a Nivel 4 incorporando 100 glaciares, desglosados como sigue:

- 13 en la Zona Norte (8 en la Norte A, 4 en Norte B y 1 en Norte C).
- 20 en la Zona Centro.
- 34 en la Zona Sur (14 en la Sur A y 20 en la Sur B).
- 33 en la Zona Austral (23 en la Austral A y 10 en la Austral B).

7.2.3. Estudios recientes en Nivel 4

- Estudio de fluctuaciones glaciares de largo plazo en los Andes centrales inferido con registros históricos y anillos de crecimiento de árboles (Le Quesne *et al.*, 2008).

- Variaciones recientes en la Cuenca del Aconcagua, Chile Central (Bown *et al.*, 2008).
- Cambios de elevación y de área en Campo de Hielo Norte (Rivera *et al.*, 2007).

7.2.4. Estudios prioritarios

- Ordenamiento y sistematización de los estudios disponibles de variaciones, tanto en inventarios como en estudios puntuales, evaluación de confiabilidad de las fuentes y estimación de errores. Selección de las fuentes confiables para su incorporación a las series de tiempo a generar mediante los estudios propuestos.
- La realización del primer análisis de variaciones glaciares con la extensión, densidad y sistematicidad propuesta.

7.2.5. Línea de base glaciológica y seguimiento

Nivel mínimo de estudios para diversos tipos de inversiones (turísticas, hidroeléctricas, agrícolas, etc.) en cuencas con aporte glaciario, incluyendo el análisis de riesgos (crecidas glaciares, erupciones volcánicas en áreas de glaciares). Los estudios de variaciones deben cubrir un período de al menos 5 años, teniendo las fechas de comparación más recientes una antigüedad no superior a dos años.

7.3. Nivel 3: Monitoreo glaciario de mediana intensidad

Estudio local de mediana intensidad, orientado a determinar detalles de la dinámica glaciaria en número suficiente para proveer indicadores a escala nacional.

Una de las deficiencias más serias en el conocimiento glaciológico del país es la escasa cobertura espacial de los estudios de mayor detalle, los que están concentrados principalmente en los Campos de Hielo de la Zona Austral y realizados principalmente mediante herramientas y datos satelitales. Un análisis más intenso requiere el uso de técnicas modernas y de mayor precisión en la adquisición de datos en combinación con técnicas tradicionales.

7.3.1. Líneas de estudio y metodologías

Cambios volumétricos: Determinación de los cambios volumétricos, mediante comparación de datos topográficos derivados de técnicas y fechas variables, incluyendo sistemas de medición terrestres y aerotransportados. Las metodologías incorporarán:

- Generación de modelos digitales de terreno con fotografías aéreas, datos topográficos aéreos, imágenes satelitales y datos satelitales SAR (del acrónimo inglés para Radar de Apertura Sintética).
- Levantamiento extensivo de la topografía superficial con Escáner Láser Aerotransportado o ALS (del inglés Airborne Laser Scanner) y sistemas aerofotogramétricos.

- Compilación de diversas fuentes topográficas (datos satelitales, levantamientos aerofotogramétricos, cartografía oficial, GPS terrestre de calidad geodésica) para la generación de modelos comparables de la topografía glaciaria, permitiendo la determinación de los cambios.
- Redes de balizas para validación y estimación de variaciones estacionales de la cobertura de nieve entre levantamientos.

Determinación de topografía subglacial y estructura interna: Estudios del hielo mediante la aplicación de mediciones geofísicas, incluyendo principalmente sistemas de radar para mediciones puntuales y perfiles de espesores de hielo (topografía subglacial), estructura interna y características termales.

Los estudios de topografía subglacial permitirán conocer la reserva real de agua y modelar el comportamiento de los glaciares. Mientras que los estudios de estructura interna permitirán estudiar los patrones de acumulación y ablación en las últimas décadas, conocer las características físicas del glaciar y establecer las características de su flujo entre otras cosas.

Tabla 7.4: Variables físicas a monitorear en estudios de Nivel 3 y los errores máximos requeridos en el valor final de las variables una vez aplicadas todas las correcciones o ajustes pertinentes.

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal	Error máximo (requerido)	Método
Acumulación y Ablación	< 2 km (mínimo 4 balizas)	6 meses	< 1 cm	Balizas
Topografía superficial	5 m	5 años	< 1 m	LIDAR
Topografía subglacial	30 m	10 años	< 10 m	Radar terrestre o aerotransportado
Posición del frente	5 m	1 año	< 15 m	GPS diferencial o imágenes satelitales
Balance de masa neto	-	1 año	< 5 cm eq. A.	Combinado (geodésico y glaciológico).
Perfiles de densidad	1 km (mínimo un perfil)	5 años	< 0,1 kg/m ³	Radar GPR
Perfiles bioquímicos	20 km (mínimo un perfil)	5 años	-	Testigos someros de hielo y neviza

7.3.2. Número de glaciares en estudio y metodología de selección

El método de selección consistirá en una subselección de los 100 glaciares seleccionados para estudios de Nivel 4, de estos la mitad serán seleccionados para estudios de Nivel 3, proponiéndose la siguiente proporción.

- 7 glaciares en la Zona Norte
- 10 glaciares en la Zona Centro
- 17 glaciares en la Zona Sur
- 16 glaciares en la Zona Austral

La selección se realizará basándose en los siguientes criterios:

- Representatividad a nivel de Subzona (se buscarán glaciares con características de exposición, tamaño y rango altitudinal típicos de la Subzona o capaces de representar su variabilidad interna).
- Disponibilidad de información histórica meteorológica e hidrológica local, y de variaciones.
- Infraestructura disponible (o a implementar) para mediciones meteorológicas e hidrológicas actuales y futuras.
- Población o actividades económicas dependientes, ya sea a través su aporte a recursos hídricos o su valor turístico.
- Lugares posibles de impactar o más resistentes a los impactos producto del monitoreo.

7.3.3. Estudios recientes en Nivel 3

- Cambios volumétricos en los glaciares de volcanes de la Zona Centro-sur (Rivera *et al.*, 2006b) y análisis de vaciamiento de lagos proglaciares.
- Cambios de elevación y de área en Campo de Hielo Norte (Rivera *et al.*, 2007).
- Levantamiento láser aerotransportado en el glaciar Tyndall (Keller *et al.*, 2007).

7.3.4. Estudios prioritarios

- Estimación del volumen absoluto equivalente en agua de los glaciares estudiados en este nivel.
- Estimación preliminar del volumen absoluto equivalente en agua de Campo de Hielo Norte, Sur y Cordillera de Darwin, como indicador del aporte máximo al aumento del nivel del mar.
- Cálculo del balance de masa de cada glaciar estudiado en este nivel, respecto a topografías IGM y SRTM, para ser extrapolado a escala nacional en el Nivel 4.

7.3.5. Línea de base glaciológica y seguimiento

Nivel mínimo de estudios para todos los proyectos de inversión y evaluaciones de impacto ambiental que consideren remoción masiva de material en zonas peri-glaciares (i.e. construcción de infraestructura permanente, caminos, diques, bocatomas, etc.) o la alteración sustancial del contenido atmosférico de material particulado. Los estudios en estos casos deberán considerar un período de tiempo no inferior a diez años, teniendo las fechas de comparación más recientes una antigüedad no superior a un año.

7.4. Nivel 2: Monitoreo de detalle

Estudio local intensivo orientado al monitoreo de detalle y desarrollo y optimización de técnicas y parámetros.

En Chile existen sólo dos casos de monitoreo regular de glaciares; en el Glaciar Echaurren Norte (33° S), Maipo Superior; y en el Glaciar Sureste del Volcán Mocho (40° S), cuenca del Río Valdivia; realizándose en ambos la medición del balance de masa anual. En el primero, la tarea la realiza la Dirección General de Aguas (Escobar *et al.*, 1995b) desde el año 1975, registrándose una tendencia negativa a lo largo del período acumulado; sin embargo, su representatividad estaría limitada por su reducido gradiente y superficie. En el segundo caso (Volcán Mocho), los estudios tienen data más reciente, habiéndose iniciado el año 2003 por parte del Centro de Estudios Científicos CECS (Rivera *et al.*, 2005; Bown *et al.*, 2007). De manera de obtener un nivel avanzado de información, es necesario implementar un sistema de monitoreo glaciar de detalle que supere las limitantes metodológicas y logísticas de programas anteriores, integre áreas de trabajo complementarias entre sí y mejore la representatividad espacial y temporal.

7.4.1. Líneas de estudio y metodologías

Balance de masa: Mediciones de acumulación y ablación para determinar el balance de masa anual de glaciares, (utilizando el método glaciológico).

- Despliegue de red de balizas de ablación sobre la superficie del glaciar, pozos estratigráficos de acumulación y muestreo de densidad del manto nival con tubos de muestreo Monte Rosa. Extrapolación de resultados discretos de balances de masa a toda el área glaciar mediante técnicas digitales y empleo de softwares geográficos (SIG).

Balance de energía: Medición de los flujos de energía y fusión glaciar en diferentes tipos de superficie de glaciares (nieve, hielo y hielo cubierto). Puesta a prueba de métodos simplificados de correlación entre condiciones meteorológicas y balance de masa (modelos grado-día).

- Instalación de estaciones Meteorológicas Automáticas (AWS) para la medición de diversos parámetros meteorológicos generales en interfaz

- atmósfera-glaciar a resolución horaria. Medición de temperaturas de hielo descubierto y recubierto mediante el uso de termocuplas.
- Simulación de fusión y flujos energéticos mediante uso de modelos empíricos simples y complejos con bajos requerimientos de datos de entrada.

Balance hidrológico: Mediante el monitoreo de caudales a la salida de glaciares. A través de sistemas de aforo mediante transductores de presión y reglas instalados bajo la columna de agua en cabeceras de cuencas englaciadas. Modelación hidrológica de caudales de escorrentía futuros buscando modelos de buen desempeño en base a pocas variables de entrada (para posibles aplicaciones a escala nacional) y calibrando los parámetros glaciológicos, glacio-dinámicos e hídricos de dichos modelos para proyecciones de caudal.

Dinámica glaciar: Determinación de velocidades de flujo de hielo, velocidades y topografía de precisión mediante aplicación de técnicas geofísicas en perfiles y balizas mediante receptores GPS de calidad geodésica, imágenes tándem de interferometría SAR y técnicas de “feature tracking” o análisis de patrones morfológicos en imágenes satelitales en el rango visible. La obtención de velocidades por medio de distintas técnicas permitirá por un lado obtener mejores series de tiempo de velocidades (y extenderlas al pasado con técnicas validadas hoy) y por otro validar y perfeccionar las metodologías para así poder determinar cual es la técnica idónea para cada zona evaluando factibilidad, precisión y costo.

Delimitación de zonas de riesgo: Considerando los estudios de este nivel y de los niveles 3, 4 y 5, se identificarán las cuencas expuestas a riesgos de origen glaciar y en base a la dinámica y características de cada masa de hielo en particular se realizarán mapas de riesgo para las zonas más vulnerables. Los modelos utilizados para la generación de los mapas se actualizarán en la medida de que se perfeccionen los modelos utilizados.

Testigos superficiales de nieve: Extraídos para análisis biológicos y físicos en las zonas de acumulación, practicándose en ellos estudios estructurales y de trazadores biológicos (polen y algas), con el propósito entre otras cosas, de determinar valores de acumulación y ablación en años previos y entender la estructura estratigráfica del glaciar para mejorar la interpretación de los datos históricos provenientes de testigos profundos.

Tabla 7.5: Variables físicas a monitorear en estudios de Nivel 2 y los errores máximos requeridos en el valor final de las variables.

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal	Error máximo (requerido)	Método
Temperatura 2 m	1 /glaciar	10 min	< 0,1 °C	Termómetro AWS
Temperatura superficial	1 /glaciar	10 min	< 0,1 °C	Termocupla AWS
Humedad relativa	1 /glaciar	10 min	< 0,1 %	Higrómetro AWS
Velocidad y dirección del viento	1 /glaciar	10 min	< 1 km/h	Anemómetro y veleta AWS
Presión atmosférica	1 /glaciar	10 min	< 0,1 mb	Barómetro AWS
Acumulación / Ablación	1 /glaciar	10 min	< 5 mm	Sensor ultrasónico AWS
Acumulación / Ablación neta	5 km (mínimo 4 balizas)	4 meses	< 1 cm	Balizas
Densidad de la nieve	500/1.000 m (mínimo 8 muestras)	4 meses	<0,1 kg/m ³	Tubo Monte Rosa / Pozo estratigráfico
Topografía superficial	10 m	4 años	< 1 m	LIDAR aerotransportado
Topografía subglaciar	30 m	Una vez	< 20 m	Radar aerotransportado o terrestre
Posición del frente	5 m	Un año	< 2 m	GPS diferencial cinemático
Radiancia superficial (térmica)	5 m / 90 m	4/2 años	< 0,3 W/m ²	Imágenes termales aéreas/ satelitales
Escorrentía	*	10 min	< 1%	Estación pluviométrica
Precipitación	1 /glaciar	10 min	< 1 mm	Pluviómetro AWS
Velocidad de flujo GPS	5 km (mínimo 4 balizas)	8 meses	< 0,2 m/año	Balizas GPS diferencial estático
Velocidad de flujo InSAR	60 m	2 años	< 0,2 m/año	InSAR satelital
Velocidad de flujo fotogramétrica	10 m	6 horas	< 0,2 m/día	Fotografía terrestre secuencial de alta resolución
Perfiles de densidad	100 m	5 años	< 0,1 kg/m ³	Radar GPR
Perfiles bioquímicos y datación	5 km (mínimo un perfil)	5 años	-	Testigos someros y profundos de hielo y neviza

* El número de estaciones variará en función de la complejidad del sistema hidrológico de cada glaciar

7.4.2. Número de glaciares y metodología de selección

De acuerdo a las recomendaciones de los organismos internacionales especializados (Haeberli, 2004 y 2006), los glaciares que se seleccionen para Nivel 2 deben representar en primer lugar la diversidad glaciológica del país. Esto se logrará incluyendo en el Nivel 2 una sub-selección de aquellos incluidos en el Nivel 3 (50 glaciares), la que tendrá como criterio limitante la logística, puesto que este nivel a diferencia de los anteriores, incluye intensas actividades de terreno. De este modo se propone estudiar 14 glaciares distribuidos en las cuatro zonas glaciológicas, incluyendo:

- 3 glaciares en la Zona Norte
- 4 glaciares en la Zona Centro
- 2 glaciares en la Zona Sur
- 5 glaciares en la Zona Austral

Dado que este nivel busca la determinación de los parámetros físicos que permitirán extrapolar los modelos desarrollados en el Nivel 1 a todo el territorio nacional, se prioriza en este nivel la representatividad glaciológica de los cuerpos seleccionados, por sobre su importancia directa sobre poblaciones o actividades económicas, las que si son consideradas en los niveles 1 y 3.

De este modo, para la selección de los glaciares piloto de una estrategia nacional de monitoreo, donde se pretenda realizar un análisis propio del Nivel 2, se deben contemplar los siguientes aspectos:

- Representatividad espacial, en términos de tamaño y controles topográficos.
- Representatividad de la diversidad glaciológica a nivel país (glaciares pequeños, medianos, grandes y al menos uno en los CHS o CHN, con frentes no desprendentes, desprendentes, un glaciar rocoso y uno asociado a volcanismo activo).
- Condiciones de acceso y seguridad para la operación en las zonas de ablación y acumulación del glaciar, tanto en invierno como en verano.
- Situación legal (procurando se asegure el acceso futuro a escala de décadas).
- Disponibilidad de información histórica, meteorológica e hidrológica local y de imágenes históricas aéreas, satelitales (ópticas y de radar).
- Lugares posibles de impactar o más resistentes a los impactos producto del monitoreo.

A continuación se explica la relevancia de aspectos como el tamaño, los controles topográficos, la accesibilidad y los permisos.

Tamaño

Los glaciares que se seleccionen deben tener un área que permita estimar respuestas glaciares (a cambios climáticos por ejemplo) de corto, mediano y largo plazo. Para ello, de preferencia, deberán seleccionarse glaciares pequeños (inferiores a 1 km^2), medianos (entre 1 y 10 km^2) y grandes (sobre 10 km^2). Esta segmentación es factible de lograr en Chile gracias a la diversidad glaciológica del país. Sin embargo este criterio deberá ser flexible en función de compatibilizarse con los demás requerimientos expuestos.

Los glaciares pequeños ubicados en circos o en laderas montañosas (inferiores a 1 km^2), como el glaciar Echaurren en Chile Central, tienen en general una baja tasa de deslizamiento basal, respondiendo directamente a las variaciones interanuales de balances de masa anuales y a las oscilaciones de las líneas de nieve en particular en los márgenes, donde se produce el derretimiento/depositación de la nieve y neviza. Lo anterior podría generar interpretaciones erróneas acerca de las respuestas glaciares frente a los cambios de mediano o largo plazo, sin embargo estos no se deben descartar para su monitoreo debido a que entregan información relevante sobre como opera un glaciar ante las variaciones interanuales en los montos de acumulación y ablación. Las líneas de equilibrio (ELA) en estos glaciares, pueden estar completamente fuera de los límites del glaciar, ubicándose por encima del glaciar en un año seco y/o cálido (La Niña en Chile central por ejemplo), mientras que en un año húmedo y/o frío (El Niño por ejemplo en Chile Central), puede determinar una ELA totalmente por debajo de la cota mínima del glaciar. En estos casos, el glaciar no tiene capacidad de “amortiguar” los cambios interanuales y presenta una curva acumulada “ruidosa”.

Los glaciares de tamaños medianos (entre 1 y 10 km^2), como el glaciar SE del volcán Mocho, fluyen en general con tasas más altas de deslizamiento basal, y reaccionan dinámicamente a variaciones de balances de masa a escala de décadas, en una forma suavizada y retardada. En este sentido, las ELAs de los glaciares medianos suelen moverse dentro de la amplitud altitudinal de estos glaciares, rescatándose las respuestas de mediano plazo.

Los glaciares de tamaño grande (sobre 10 km^2) como el Glaciar Universidad en Chile Central, registran señales climáticas mucho más suavizadas, con respuestas de mediano a largo plazo (seculares), no así a cambios interanuales bruscos, que no quedan registrados inmediatamente, debido a que tiene tiempos de respuesta de varias décadas. El tiempo de respuesta de un glaciar depende del largo del glaciar y su espesor, de acuerdo a la formulación de Paterson (1994).

Los glaciares muy grandes (sobre 100 km^2) como los existentes en la Zona Austral, se generan a partir de plateaus o altiplanicies de nieve/hielo en altura, éstos responden a condiciones climáticas de mediano y largo plazo, como también a factores dinámicos relacionados con calving, migración de divisorias, aceleramiento de flujo, etc. Por ello, para seleccionar este tipo de glaciares se debe considerar además de su tamaño, las características de sus frentes y su dinámica.

Controles topográficos

Producto de controles topográficos, los glaciares pueden tener distintos tipos de comportamientos, desde respuestas aceleradas a los cambios climáticos hasta respuestas altamente no-climáticas. El tipo de control topográfico más tradicional es la hipsometría, que define la proporción de áreas por rango altimétrico de un glaciar y que en relación con la posición de la línea de equilibrio, puede generar un glaciar muy sensible a fluctuaciones climáticas o uno relativamente estable frente a dichas fluctuaciones en el corto plazo (Rivera & Casassa, 1999). Otro control relevante es el tipo de frente terminal que tiene un glaciar (Warren & Aniya, 1999), el que puede ser no-desprendente (frente normal que está posado en roca y que da origen a un río), desprendente en tierra (o dry calving en literatura inglesa) y que denota frentes con desprendimientos de bloques que pueden caer en avalanchas o cascadas; desprendente en fiordos (tidewater glacier); y desprendente en lagos (freshwater glacier), todos estos tipos pueden ser encontrados a lo largo del país. En la Zona Norte se encuentran mayormente no desprendentes, en la Zona Centro se hacen más frecuentes los desprendentes en tierra y aparecen los desprendentes en lagos, ya en la Zona Austral, se encuentran de todos los tipos, incluyendo grandes glaciares desprendentes en lagos y fiordos. Entre las relaciones topográficas con los cerros/montañas que albergan glaciares y que pueden tener un control importante para la definición de las respuestas glaciares (Warren, 1991) destacan por ejemplo condiciones típicas de plateaus, o lenguas con resistencias laterales o basales particulares (lateral o basal drag), y condiciones especiales de recubrimiento del hielo por material detrítico, como por ejemplo los glaciares rocosos y sobre conos volcánicos activos, entre otras.

Accesibilidad

Un criterio sin duda relevante a considerar es la factibilidad logística, esto es adecuadas condiciones de acceso, seguridad, operación, equipamiento y medición que posea cada glaciar. Hay muchos cuerpos de hielo que pueden tener características ideales desde el punto de vista conceptual, pero su acceso es muy remoto, peligroso y cambiante, lo que impide una operación glaciológica frecuente. Hay que seleccionar glaciares a los que se pueda acceder tanto a las zonas de acumulación como a las de ablación y que dichos accesos no requieran expediciones muy costosas, de logísticas complejas o peligrosas, que impidan realizar mediciones de manera intensa y frecuente.

Propiedad y permisos

Pueden existir en algunos casos limitaciones legales definidas por la propiedad del predio donde se ubica un glaciar o del control de los accesos. Esta limitación no debiera incidir mayormente en la definición de un glaciar piloto, puesto que los propietarios de predios que deban cruzarse y donde deban instalarse estaciones de monitoreo glaciar debieran dar plenas facilidades de acceso, lo que si bien es deseable, no es una norma, por lo que las negociaciones y autorizaciones deben gestionarse por adelantado. Por ello, hay que considerar con antelación los permisos respectivos, con el fin de evitar conflictos de interés o restricciones indeseadas en la operación glaciológica,

que impidan por ejemplo acceder a un glaciar debido a caminos cerrados o prohibiciones particulares como por ejemplo normas de seguridad a que están sujetas algunas empresas que controlan los accesos en zonas de alta montaña.

Disponibilidad de información previa

Con el propósito de obtener en cortos plazos estadísticas significativas a escalas temporales de décadas o siglos. Se debe privilegiar aquellos lugares donde exista información histórica en forma de mapas, dibujos, fotografías, registros meteorológicos, descripciones, registros biológicos o dendrocronológicos, imágenes satelitales, imágenes de radar, etc.

Posibilidad de impacto

Dado que este nivel de monitoreo interviene de manera significativa el glaciar, se evitarán cuerpos de hielo particularmente frágiles, con ecosistemas altamente dependientes, con uso turístico intensivo o protegidos por algún motivo o figura legal particular.

7.4.2.1. Procedimiento de selección

Los procedimientos utilizados para la selección de glaciares deben considerar los siguientes pasos:

- Empleo de sensores remotos (preselección)
- Definición de áreas prioritarias por zona y subzona glaciológica
- Definición de representatividad versus especificidad
- Prefactibilidad logística, técnica, administrativa, legal, científica
- Visita inspectiva

El levantamiento preliminar de áreas piloto mediante percepción remota se refiere al análisis de imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución espacial y de fechas recientes (Landsat ETM+ y ASTER principalmente). Se deberán identificar las extensiones de los glaciares distinguiendo nieve, hielo y detritos, en comparación a otros tipos de coberturas tales como vegetación, roca, cursos de agua, etc. Una técnica adecuada para estos propósitos, es la segmentación de razón de bandas para obtener una óptima clasificación de glaciares (Paul *et al.*, 2002).

También debe realizarse la hipsometría de un número representativo de los glaciares de la subzona y compararla con las de los glaciares candidatos, para determinar si su distribución altitudinal de superficie glaciar es representativa. Para esto el modelo digital de terreno SRTM en su tercera versión sería una base topográfica adecuada.

Para identificar tendencias medias y comportamientos anómalos, se deben obtener las variaciones frontales de los años más recientes en los glaciares candidatos.

7.4.2.2. Búsqueda preliminar de alternativas por zona

Zona Norte

En la Zona Norte de Chile se presentan aquí ocho candidatos para los tres glaciares a seleccionar para la zona.

Partiendo por el extremo norte, los glaciares de los nevados Payachatas (Parinacota y Pomerape) ($18^{\circ} 17' S$, $69^{\circ} 07' W$) resu ltan candidatos interesantes, por ser los mayores de la Subzona Norte A (10,88 y 13,13 km² respectivamente), contar con condiciones de acceso favorables y un variado rango altitudinal y de exposición.

Más al sur, otro candidato es El Potro ($28^{\circ}23' S$, $69^{\circ}36' W$), ubicado en la cuenca del Copiapó (III región de Atacama) y de 4,88 km², representando el mayor cuerpo de hielo de la macrozona (Vivero, 2008).

Otros glaciares con posibilidades de monitoreo son los glaciares El Toro y Guanaco, ubicados en la cuenca del Río Huasco (III región de Atacama), dentro del proyecto minero Pascua Lama, de la Minera Nevada. Un candidato pequeño es el del Cerro Los Tronquitos ($28^{\circ}31' S$, $69^{\circ}44' W$), ubicado en la cuenca del Copiapó, con un área de 0,68 km² hacia el año 2002 (Vivero, 2008), si bien cuenta con algunos estudios previos, lamentablemente se han presentado algunas complicaciones relativas a los permisos de acceso.

Se destaca luego el glaciar Tapado ($30^{\circ}08' S$, $69^{\circ}55' W$), ubicado en las proximidades de la llamada "Diagonal árida de los Andes" (Messerli *et al.*, 1998), en la cuenca del Elqui (IV Región), con un área descubierta de 3,6 km² (Rivera *et al.*, 2000) además de una considerable zona con hielo recubierto por detritos en su lengua terminal.

En este sentido, también debiera considerarse el monitoreo de un glaciar rocoso de tamaño mediano de la IV Región de Coquimbo, como por ejemplo alguno ubicado dentro de las faenas de la mina Los Pelambres o los existentes en torno al Glaciar Tapado.

Todos los glaciares candidatos presentan facilidades y logística, sin embargo se debe tener en cuenta que hay muchos ubicados en cercanías de faenas o propiedades mineras, por lo que habría que gestionar los permisos legales correspondientes.

Zona Central

Para la Zona Central se consideran aquí 7 candidatos para los tres glaciares a seleccionar en esta zona.

Como candidatos están el glaciar Juncal Norte ubicado en la cuenca del Aconcagua (V Región de Valparaíso), que tiene excelente acceso a la zona de ablación pero muy difícil a la de acumulación. Para acceder al glaciar hay que pasar por un predio privado (Comunidad Kenrick Lyon). El tamaño es mediano

(7,6 km²) Bown *et al.*, (2008), tiene una zona de cascadas muy activas y la parte baja es recubierta. Este glaciar ha sido estudiado en detalle por un consorcio de universidades suizas y chilenas, por lo que ya existe un programa de monitoreo infrecuente (Pellicciotti *et al.*, 2008). Con el fin de evitar duplicidades con esta iniciativa internacional de investigación científica, se sugiere buscar otras alternativas dentro de la zona.

En esta zona, ya existe el programa de monitoreo en el Glaciar Echaurren Norte (0,4 km²), ubicado en la cuenca del Maipo (Región Metropolitana). Este programa es el único con carácter sistemático y de largo plazo existente en Chile, el cual es llevado a cabo por la DGA.

En la cuenca del Cachapoal un buen candidato es el glaciar Cipreses, donde existe una larga data de registros históricos de sus fluctuaciones (Rivera *et al.*, 2006a). Sin embargo, después de la visita en helicóptero realizada durante la selección de los glaciares piloto, se constataron problemas de acceso que deberán ser tomados en cuenta.

En la cuenca del Tinguiririca probablemente el mejor candidato es el glaciar Universidad (34°41' S, 70°21' W) de tamaño grande (31,8 km²), de fácil acceso a la parte baja y facilidades logísticas (secciones planas) para la zona de acumulación. Este glaciar es actualmente uno de los glaciares pilotos de la Estrategia Nacional de Glaciares y ya se inició su monitoreo, el cual es detallado en los anexos.

Otros buenos candidatos, pero que presentan algunas dificultades logísticas y de dificultad de acceso, son los glaciares del Juncal Sur, Bello y Cerro Marmolejo.

El Glaciar San Francisco, en el Cajón de Morales es también una alternativa interesante, aunque la abundante afluencia de público puede constituir un peligro para los equipos permanentes.

Glaciares rocosos interesantes de estudiar por sus características y fácil acceso, son los del Cajón del Casa de Piedra, inmediatamente aguas arriba del Embalse el Yeso en la cuenca del Río Maipo, el del Cajón de Navarro, en la parte alta de la cuenca del Río Aconcagua y el de la cabecera del Río San Andrés, más arriba del Glaciar Universidad en la cuenca del Río Tinguiririca.

Zona Sur

La totalidad de los glaciares candidatos dentro de la Zona Sur del país se encuentran localizados sobre conos volcánicos activos. Aquí se presentan cinco posibilidades para los tres glaciares a seleccionar.

Como glaciares pequeños, buenos candidatos son los localizados en los Nevados de Chillán (36°51' S, 71°22' W) en la cuenca del Itata, los que cuentan con un importante registro histórico, algunos estudios previos y sobre un edificio volcánico activo. Además tiene una cercana relación con actividad productiva representada por el centro de esquí Termas de Chillan.

Como glaciares medianos los ubicados al SE del Volcán Mocho (39°55' S, 72°01' W) de 4,1 km² son buenos candidatos, ahí, y en el marco de esta estrategia se está apoyando el plan de monitoreo ya existente, lo que lo hace un candidato aún mejor para estudios de Nivel 2 o 1.

Para los de tamaño grande, se preseleccionó el Pichillancahue-Turbio (17,3 km²) del Volcán Villarrica (39°25' S, 71°56' W), con buen acceso y abundantes estudios previos. Además representa una alternativa extraordinaria para estudiar las interacciones glaciovolcánicas, dadas las características del cono volcánico en que se emplaza. Todos estos glaciares cuentan con excelentes facilidades de acceso. Otras alternativas de monitoreo glaciológico en esta zona, son otros glaciares del Volcán Villarrica hacia el valle de Challupén y los glaciares del volcán Osorno.

Más al sur, los glaciares del Volcán Michimahuida presentan accesos y características apropiadas y suman más de 80 km². Entre sus glaciares, el Amarillo puede ser una alternativa preferente. Resulta además de particular interés debido a la interacción con el material depositado por la erupción del Volcán Chaitén.

Otros glaciares susceptibles de monitoreo pero con dificultades de acceso son los del Volcán Melimoyu, los del Nevado Queulat y Volcán Macá,

Zona Austral

Se presentan aquí 9 candidatos para los cinco glaciares a ser seleccionados para la Zona Austral.

Los glaciares en esta macro región presentan en su mayoría severas complicaciones de logística, requiriendo de expediciones costosas y que necesitan de bastante tiempo en poder acceder a los glaciares. En Campo de Hielo Norte se presenta factible el glaciar Nef (47°06' S, 73°11' W) de 130 km², en el cual ya se han realizado mediciones por parte del DGA y CECS y su acceso es menos dificultoso en comparación a otros glaciares más australes.

En Campo de Hielo Sur un posible candidato es el glaciar Tyndall (51°15' S, 73°15' W) de 331 km², con acceso medianamente expedito, en particular a su lóbulo Zapata, donde se han desarrollado ya bastantes estudios (por parte de la DGA, UMAG y CECS, entre otros), los que proveerían una buena base para el monitoreo.

Dentro de esta zona pero fuera de los Campos de Hielo Patagónicos, un candidato es el glaciar Moscos, ubicado cerca del poblado de Villa O'Higgins (48°27' S, 72°26' W), con un área de 13,98 km², es una alternativa interesante por encontrarse en el sector Oriental de la zona y en las cercanías del poblado más austral con acceso terrestre.

En la Cordillera Darwin, un buen candidato es el glaciar Conway en el Monte Sarmiento (54°26' S, 70°51' W) de 8,46 km² de superficie, aunque al igual que todos los glaciares del sector requiere un acceso por vía marítima.

Otros glaciares cuyo estudio es factible en el CHS son los glaciares Grey en el Parque Nacional Torres del Paine y O'Higgins. En el CHN, los glaciares Colonia, San Rafael y Exploradores representan alternativas interesantes.

En la región más septentrional los glaciares en los Cerros Erasmo y San Lorenzo o en el Volcán Hudson son cuerpos importantes independientes de los grandes campos de hielo, de los tres, el Cerro San Lorenzo presenta condiciones de acceso favorables en comparación a las demás alternativas.

7.4.3. Estudios recientes en Nivel 2

- Cálculos de balance de masa en el glaciar sureste del Volcán Mocho (Rivera *et al.*, 2005; Bown *et al.*, 2007) y balance de energía en el Volcán Villarrica (Brock *et al.*, 2007).
- Contribución de los Campos de Hielo Patagónicos al aumento del nivel del mar (Casassa *et al.*, 2009).
- Balance glaciológico e hídrico del Glaciar Nef, Campo de Hielo Norte (DGA, 2008a).
- Velocidades de los principales glaciares de los Campos de Hielo Patagónicos utilizando TerraSAR-X (Floricioiu *et al.*, 2008).

7.4.4. Estudios prioritarios

- Determinación del aporte real en escorrentía de los glaciares estudiados en cada zona.
- Obtención de balances de masa (integrando técnicas geodésicas y glaciológicas) y de energía en glaciares seleccionados, lo que constituiría el primer estudio sistemático y metodológicamente homogéneo con cobertura nacional.
- Determinación por subzona de los parámetros físicos y relaciones características necesarias para la integración de datos de balance de masa, energía, información meteorológica local y datos hidrológicos en un modelo físico que permita establecer las relaciones entre las distintas variables y validar dichas relaciones con las series de tiempo observadas.

7.4.5. Línea de base glaciológica y seguimiento

Nivel mínimo de estudios para proyectos de inversión con intervención directa en glaciares (ej. minería extractiva) o con actividades cercanas a glaciares que puedan afectar de manera substancial la tasa de acumulación de material particulado en su superficie. Será también el nivel de detalle necesario para obras hidráulicas o hidroeléctricas que puedan afectar el ambiente proglaciar cambiando su dinámica o las características del frente, donde para reducir los posibles impactos son necesarios estudios de detalle como es descrito por Thomsen *et al.*, (1989) donde topografía superficial, subglaciar y ecosondajes son necesarios para establecer la red hidrológica interna del glaciar, su estabilidad, las microcuencas superficiales y subglaciares y la posible existencia o factibilidad de reservorios intra o subglaciares, los cuales afectan

el régimen hidrológico y son eventualmente susceptibles a vaciamientos súbitos.

En estos casos los estudios deberán extenderse por un mínimo de dos años con mediciones in-situ, incorporando datos preexistentes abarcando un período de estudio de al menos diez años. Las series de tiempo meteorológicas, hidrológicas, de variaciones frontales y de área, deberán estar actualizadas hasta 60 días antes de la presentación del estudio.

7.5. Nivel 1: Monitoreo de detalle intensivo y multidisciplinario.

Estudio local intensivo y multidisciplinario de fenómenos a escala temporal de años, meses y días. Utilizando múltiples metodologías y alta resolución espacial y temporal.

A pesar de la existencia de muchos modelos del comportamiento glaciar tanto en aspectos dinámicos como hidrológicos, muchos de ellos son empíricos y basados en suposiciones cuya validez está restringida a casos puntuales, por lo que es de vital importancia el estudio en gran detalle de algunos glaciares con el propósito de desarrollar modelos físicos de los problemas de interés, los que contando con la apropiada complejidad se adaptarán a la enorme diversidad glaciológica nacional.

Este tipo de estudios busca entender el glaciar como un todo, buscando las interrelaciones entre clima, dinámica, estructura e hidrología.

El monitoreo intensivo del Nivel 1, es también fundamental para evaluar la precisión de los métodos utilizados en los demás niveles, de este modo se podrá saber con certeza hasta que punto son confiables por ejemplo los datos de superficies o de radiancias obtenidos desde imágenes satelitales. También permitirá determinar cuáles son las variables claves a monitorear, de manera de concentrar los esfuerzos en dichas variables en los niveles de menor detalle.

7.5.1. Líneas de estudio y metodologías

A continuación se describen las líneas de estudio y metodologías a utilizar en los estudios de máximo nivel de detalle. La Tabla 7.6 muestra un resumen de las variables físicas que se medirán y los requerimientos técnicos respecto de su precisión y resolución.

Balance de energía:

Radiómetros netos (o albedómetros) permitirán tener valores absolutos de la energía radiante que ingresa y sale del glaciar, mediante un arreglo de piranómetros y pirgeómetros orientados hacia el cielo y hacia el glaciar, los que responden a un amplio rango de longitudes de onda correspondiente a la ventana espectral que es responsable del mayor flujo de energía radiante. Este tipo de mediciones de precisión se realizarán en puntos discretos (estaciones meteorológicas) y permitirán la calibración de mediciones de amplia cobertura, realizadas por medio de imágenes en los rangos visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico, obtenidas desde plataformas terrestres, aéreas o satelitales.

Termómetros, higrómetros y anemómetros permitirán medir la transferencia de energía por conducción, y finalmente pluviómetros permitirán determinar la cantidad de energía aportada al sistema por las precipitaciones recibidas.

Balance de masa:

Mediciones continuas de ablación y acumulación serán realizadas en las estaciones meteorológicas mediante distanciómetros electrónicos, las que en conjunto a mediciones periódicas de balizas y de nieve con tubos de muestreo Monte Rosa, permitirán determinar el balance de masa del glaciar con alta precisión y resolución temporal.

Utilizando el método geodésico mediante mediciones LIDAR se calculará también el balance de masa neto entre estaciones secas cada dos años. Permitted evaluar la equivalencia entre distintos métodos y a su vez determinar las densidades de muestreo óptimas a ser aplicadas en estudios a menor nivel de detalle.

Tabla 7.6: Variables físicas a monitorear en estudios de Nivel 1 y los errores máximos requeridos en el valor final de las variables una vez aplicadas todas las correcciones o ajustes pertinentes.

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal	Error máximo (requerido)	Método
Temperatura 2 m y superficial	3 a 4 estaciones	10 min	< 0,1 °C	Termómetro y termocupla AWS
Velocidad y dirección del viento	3 a 4 estaciones	10 min	< 1 km/h	Anemómetro y veleta AWS
Presión atmosférica y humedad rel.	3 a 4 estaciones	10 min	< 0,1 mb	Barómetro e higrómetro AWS
Radiación onda corta incidente/reflejada	3 a 4 estaciones	10 min	< 0,5 W/m ²	Radiómetro neto AWS
Radiación onda larga incidente	3 a 4 estaciones	10 min	< 0,5 W/m ²	Radiómetro neto AWS
Radiación onda larga emitida/reflejada	3 a 4 estaciones	10 min	< 0,5 W/m ²	Radiómetro neto AWS
Acumulación / Ablación	3 a 4 estaciones	10 min	< 5 mm	Sensor ultrasónico AWS
Acumulación / Ablación neta	2 km (mín. 12 balizas)	3 meses	< 1 cm	Balizas
Densidad de la nieve	500 m (mín. 24 muestras)	3 meses	<0,1 kg/m ³	Tubo Monte Rosa / Pozo stratigráfico
Topografía superficial	5 m	2 años	< 1 m	LIDAR aerotransportado
Topografía subglaciar	30 m	10 años	< 10 m	Radar aerotransportado o terrestre
Posición del frente	1 m	4 meses	< 2 m	GPS diferencial cinemático
Reflectancia superficial	1 m	1 hora	< 5 W/m ²	Fotografía terrestre secuencial de alta resolución
Radiancia superficial (térmica)	1 m / 90 m	24/6 meses	< 0,2 W/m ²	Imágenes termales aéreas/satelitales
Escorrentía	**	10 min	< 1%	Estación fluviométrica
Precipitación	3 a 4 estaciones	10 min	< 1 mm	Pluviómetro AWS
Velocidad de flujo GPS	2 km (mín. 12 balizas)	3 meses	< 0,1 m/año	Balizas GPS diferencial estático
Velocidad de flujo InSAR	30 m	2 años	< 0,1 m/año	InSAR satelital
Velocidad de flujo fotogramétrica	2 m	6 horas	< 0,1 m/día	Fotografía terrestre secuencial de alta resolución
Perfiles de densidad	100 m	5 años	< 0,1 kg/m ³	Radar GPR
Perfiles bioquímicos y datación	5 km (mínimo 2 perfiles)	5 años	-	Testigos someros y profundos de hielo y neviza

** El número de estaciones variará en función de la complejidad del sistema hidrológico de cada glaciar.

Balance hidrológico:

Estaciones fluviométricas a la salida del glaciar y en los eventuales cauces que aporten agua a su flujo interno, así como pluviómetros en las estaciones meteorológicas, permitirán tener un detallado registro del flujo de agua que entra y sale del glaciar, permitiendo determinar con precisión el caudal aportado por la masa de hielo.

Dinámica glaciar:

Mediciones GPS periódicas de balizas, en combinación con fotografías terrestres secuenciales (utilizando la técnica de “feature tracking” o seguimiento automático de objetos y cámaras de fotografía secuencial en cada glaciar) permitirán determinar el campo de velocidades de flujo superficial, con lo que se puede estimar el valor de los parámetros físicos que controlan la dinámica del glaciar, posibilitando a su vez estimar la magnitud del transporte mecánico de masa en la cuenca y el balance de masa neto necesario para que el glaciar se mantenga en equilibrio.

Estructura interna:

Testigos de hielo y neviza, someros y profundos en distintos puntos del glaciar, permitirán determinar su composición, estructura interna e inferir las condiciones climáticas y tasas de acumulación/ablación en el pasado, las que podrán en el futuro ser contrastadas con las medidas obtenidas por métodos directos.

Igualmente se podrá determinar el contenido real de agua del glaciar, así como sus propiedades térmicas y dinámicas en profundidad.

Un escalamiento de la estructura de detalle observada en los testigos a nivel de todo el glaciar se logrará con radares GPR a distintas frecuencias para el cálculo de parámetros internos del hielo, tales como potencias de reflexión de fondo (BRP) relacionable a calor geotermal basal, potencia de reflexión interna (IRP) para detección de isócronas, detección de grietas sub-superficiales y acumulación anual de nieve.

Modelamiento:

Conociendo el balance de energía, la masa, el estado dinámico, estructura, propiedades plásticas del glaciar y su aporte a la escorrentía, se podrá crear y validar un modelo físico que permita correlacionar todas estas variables de forma certera, permitiendo así también modelar el comportamiento del glaciar bajo un escenario climático dado.

Se podrán también contrastar los resultados de modelos simples y complejos, en busca de aquel que mejor se ajuste a las necesidades de monitoreo y planificación a nivel país.

El modelamiento a desarrollar seguirá la línea de lo desarrollado por Huss *et al.*, (2008), el cual corresponde a un modelo hidrogliaciológico denominado Glacier Evolution Runoff Model (GERM), el que tiene la particularidad de incluir los cambios producidos en los glaciares, incorporando al sistema: el balance de masa glaciar, la evaporación, el caudal, y el cambio en la topografía superficial.

7.5.2. Número de glaciares y metodología de selección

Uno por zona glaciológica, con lo que se tendrá un total de cuatro glaciares a lo largo del país (Zonas Norte, Centro, Sur y Austral).

Siguiendo el esquema de integración de los estudios en cada nivel de detalle, los cuatro glaciares a estudiar serán sub-seleccionados de aquellos incluidos en los estudios de Nivel 2. Los principales criterios a considerar serán:

- Representatividad a nivel de cuenca, en términos de área, rango altitudinal y exposición.
- Disponibilidad de información histórica, meteorológica e hidrológica local, de imágenes históricas aéreas, satelitales y de Radar y de registros históricos anteriores al desarrollo de la percepción remota.
- Relevancia para la subsistencia de poblaciones, actividades productivas o ecosistemas dependientes.
- Zona alta de acumulación con características morfológicas y térmicas propicias para la extracción de testigos profundos con adecuada conservación de la información y extensión de registro.
- Factibilidad logística para la instalación de infraestructura permanente para dar soporte a las frecuentes actividades de monitoreo en terreno.
- Lugares posibles de impactar o más resistentes a los impactos producto del monitoreo.

En base a los criterios ya ampliamente expuestos para el Nivel 2 y enfatizando en los criterios aquí señalados, posibles candidatos para estudios de Nivel 1 serían:

- Glaciares Tronquitos y El Potro (Zona Norte).
- Glaciares Universidad y Juncal Norte (Zona Centro).
- Glaciares Mocho-Choshuenco y Pichillancahue (Zona Sur).
- Glaciares Tyndall y Nef (Zona Austral).

Los que ya han sido descritos en el Nivel 2 y que deberán seguir el mismo proceso de selección descrito, considerando las mayores exigencias logísticas y en particular el mayor impacto a realizarse producto de las labores de monitoreo, las cuales implican la

instalación de numerosas estructuras permanentes como estaciones meteorológicas, fluviométricas y refugios de montaña.

Los glaciares Universidad y Mocho-Choshuenco son actualmente los glaciares piloto de esta estrategia, por lo que ya se ha iniciado en ellos el monitoreo y se ha instalado la instrumentación piloto, lo cual es detallado en los anexos.

7.5.3. Estudios recientes en Nivel 1

No hay casos de estudio de este nivel en Chile.

7.5.4. Estudios prioritarios

- Comparar y establecer la efectividad de los posibles modelos integrados (glaciológico e hidrológico) a aplicarse para el manejo de cuencas en cada zona del país.
- Confección de series de tiempo climáticas, de balances de masa y variaciones frontales de larga data (más de dos siglos) para ser utilizadas como referencias a nivel de zona.
- Validar y establecer los errores de las metodologías utilizadas en los estudios de menor detalle.

7.5.5. Línea de base glaciológica y seguimiento

Nivel de estudios para proyectos de inversión con intervención directa y extensiva en áreas de localización de glaciares. O con intervención directa o indirecta de glaciares particularmente frágiles o con sistemas humanos o naturales altamente dependientes y/o asociados al glaciar. También en casos de alteración sustancial del contenido de polvo en las cercanías de glaciares descubiertos o de alteración de la calidad del agua de origen glaciar en zonas en que esta pudiera representar una parte significativa del caudal de verano. Otro elemento a considerar, serían altos niveles de ruido y vibración en las cercanías de glaciares con frentes desprendentes.

En estos casos los estudios directos en terreno deberán extenderse por un mínimo de cuatro años y considerar un período de estudios en base a datos preexistentes de al menos quince años. Las series de tiempo meteorológicas, hidrológicas y de variaciones frontales deberán estar actualizadas hasta 60 días antes de la presentación del estudio.

7.6. Diseminación de la información

La información producida por estudios de los distintos niveles, debe relacionarse de manera estrecha con la vía oficial administrada por la DGA a través del Inventario Nacional de Glaciares (Nivel 5), al que debe aportarse toda la información generada para su actualización año a año como estipula la ley. Si bien se dará acceso a la

información de manera abierta, se utilizará la vía oficial escogida por la DGA para el Inventario Nacional.

Para estudios más específicos y de amplia cobertura (Niveles 4 y 3), la información deberá ser organizada en una base de datos digital para un manejo confiable y ágil, a la cual se dará acceso público vía Web.

Para todos los niveles y en particular aquellos de más detalle (Niveles 2 y 1) se generarán Series de Estudios Técnicos (SIT) asociados a la Dirección General de Aguas.

Con el propósito de dar un acceso expedito a la información, se generará una plataforma Web pública de donde se puedan descargar todos los datos, informes técnicos, análisis, datos preprocesados en forma de planillas de cálculo, documentos o archivos SIG vectoriales o raster. Se ofrecerá también una cobertura dinámica en Google Earth para facilitar la visualización geográfica de los datos y resultados, utilizando un estándar de amplio alcance, manejo público y características avanzadas que la hacen también una herramienta útil para la visualización, interpretación e intercambio de datos científicos.

La Web también ofrecerá acceso a las líneas base, seguimientos ambientales y llevará un registro de las Evaluaciones y Declaraciones de impacto ambiental, indicando como acceder a ellas desde su fuente oficial (CONAMA).

La Web contará también con artículos breves de difusión general, actualizados mensualmente a modo de noticias o informes simples de los resultados más relevantes que vaya generando la red nacional de monitoreo glaciar.

Se presenta un análisis de costos estimativos para este sistema de difusión.

En el ámbito científico, posibles publicaciones futuras serán realizadas en boletines de corriente principal como *Annals of Glaciology*, *Hydrological Sciences Journal*, *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, *Geophysical Research Letters*, *IAHS Red Book Series*, *Hydrological Processes*, *Global and Planetary Change*, *Science* y *Nature*.

7.7. Análisis de costos estimativos

El Plan Nacional de Monitoreo Glaciar es un proyecto sin precedentes en Chile, el cual se verá enfrentado a múltiples desafíos. Producto de su carácter novedoso, existen múltiples fuentes de incertidumbre a la hora de estimar costos, tales como la vida útil de equipos, las tasas de éxito de las campañas, los tiempos necesarios para cada tipo de medición, etc.

Sin embargo, se presenta a continuación un presupuesto estimativo, que considerando estas incertezas busca obtener una estimación del costo total de la estrategia de monitoreo, sin pretender evaluar cada punto con el nivel de detalle necesario para su implementación final.

A cada subtotal se le ha sumado un 5% de imprevistos, sobre lo que se ha aplicado un 5% extra para gastos de administración, la que se externalizará y no se considera como tarea del personal señalado.

Cada Nivel de estudio tendrá una logística distribuída por zona y para cada nivel y zona habrá un profesional a cargo, el cual se espera que cuente con experiencia y estudios avanzados de nivel de magíster y PhD en áreas afines a la glaciología tales como Geografía, Geología, Geofísica, Ingeniería Hidráulica entre otras.

Cotizaciones en dólares y pesos fueron llevadas a UF, las tablas presentan valores redondeados por motivos de visualización, sin embargo los totales y subtotales fueron calculados considerando todas las cifras significativas.

7.7.1. Costos Nivel 5

Para calcular los costos presentados a continuación, se utilizó la subdivisión por zonas presentada en esta estrategia, además se consideró para cada zona una cuenca tipo, con las características típicas de la zona en términos de área, tamaño de los glaciares, altitud, accesibilidad, etc. Luego el costo calculado para dicha cuenca se multiplicó por el número de cuencas con cobertura glaciaria en cada zona. El análisis de costo incluye todos los materiales y personal para inventariar los glaciares descubiertos y rocosos de una cuenca tipo. La duración del tiempo de trabajo (considerando dedicación exclusiva del personal) es de seis meses.

Se incluye también el presupuesto para algunas campañas de terreno con el propósito de validar los inventarios, evaluar el desempeño de distintas técnicas de procesamiento de la información satelital, evaluar la sensibilidad de las diversas imágenes utilizadas, etc. La designación de los recursos se ha dividido en tres ítems que se describen a continuación para este nivel. La Tabla 7.7 muestra el detalle.

Personal

Se estima un total de ocho personas por zona para el trabajo, todos ellos trabajando media jornada durante seis meses durante los años de elaboración de inventarios que corresponden al primer, décimo y veinteavo año. Sin embargo se agrega un año más entre el segundo y quinto año con propósito de generar/actualizar el inventario del año 2000 en concordancia a los objetivos expresados en la propuesta de requerimientos (sección 6.4). El equipo se constituiría de un jefe de proyecto responsable y a la vez supervisor del trabajo realizado, un PhD altamente calificado que realice labores de

procesamiento de imágenes satelitales y responsable de analizar los resultados obtenidos y verificar la calidad y precisión de los procedimientos. Dos profesionales, o estudiantes de magíster, realizando labores de digitalización (manual y automática), procesamiento de imágenes satelitales, generación de cartografía, etc. en las que serán apoyados por cuatro estudiantes de pregrado. Finalmente un técnico informático apoyará en la mantención de los equipos y desarrollo de software o scripts de automatización.

Bienes de capital

Los bienes de capital básicamente consisten en las estaciones de trabajo de los equipos encargados de cada zona para las que se considera un costo anual de mantención del 5% de su valor. Estas estaciones contarán con el soporte necesario para el procesamiento de imágenes satelitales y la digitalización de glaciares.

Gastos de operación

Los gastos de operación son los más variables ya que incluyen las imágenes satelitales base de los inventarios, las que dependen de las características de cada cuenca a inventariar. Por ejemplo la superficie de la cuenca definirá la cantidad de imágenes satelitales, fotografías aéreas y cartografía. Por otro lado la presencia de glaciares rocosos de difícil identificación requerirá el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales de mayor resolución espacial o bien realizar levantamientos aerofotogramétricos especiales en zonas de difícil interpretación o cobertura persistente de nubes. La Tabla 7.8 muestra el desglose de los requerimientos de topografía e imágenes satelitales por zona.

Se estima que los softwares necesarios son al menos dos, uno para el procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS o PCI Geomatics) y el otro para realizar la digitalización (ArcMap). Se incluyen en este ítem los gastos de los terrenos tales como vestimenta, equipos de seguridad en montaña, arriendo de vehículos, mulas, pasajes, viáticos y seguros personales. Además se incluyen equipos personales necesarios para la realización de los terrenos de manera segura.

Se propone para cada zona 15 días de terreno al año con los propósitos de validación ya mencionados, dichos terrenos se realizarán todos los años y consideran la participación de 6 personas en cada uno.

Tabla 7.7: Tabla de costos Nivel 5 en UF, el costo real estimativo (incluyendo la gradualidad propuesta) se muestra en forma de totales acumulados a 5, 10 y 20 años. El nivel 5 se encontraría 100% operativo a partir del primer año. Las cantidades son anuales, por inventario o las necesarias al momento de la implementación, según corresponda.

	Precio unitario	Cantidad	Costos (UF)			Total acumulado a		
			Inicial	Adicional por inventario	Fijo anual	5 años	10 años	20 años
Personal								
Profesional a cargo - media jornada	75 / mes	4	0	0	3.600	18.000	36.000	72.000
PhD - media jornada	56 / mes	4	0	0	2.688	13.440	26.880	53.760
Profesional o estudiante Msc. media jornada	38 / mes	8	0	0	3.648	18.240	36.480	72.960
Estudiantes de pregrado - media jornada	30 / mes	16	0	0	5.760	28.800	57.600	115.200
Técnico informático - media jornada	30 / mes	4	0	0	1.440	7.200	14.400	28.800
Bienes de capital								
Computadores de oficina	24,8 c/u	32	794	0	40	992	1.190	1.587
Gastos de operación								
Imágenes satelitales (ASTER, Landsat)	2,5 escena	202	0	505	0	1.010	1.515	2.020
Imágenes satelitales alta resolución (Ikonos, QuickBird)	0,25 /km ²	4.020	0	1.005	0	2.010	3.015	4.020
Cartografía y datos topográficos	0,5 c/u	140	0	70	0	140	210	280
Fotografías aéreas	5 c/u	194	0	970	0	1.940	2.910	3.880
Vuelo aerofotogramétrico (zonas sin cobertura satelital)	1.805 c/u	1	0	1.805	0	3.610	5.415	7.220
Software (GIS, modelamiento, procesamiento de datos)	25 paquete	18	450	0	45	675	900	1.350
Arriendo de vehículos de terreno	2,3 /día	60	0	0	138	690	1.380	2.760
Equipos personales de terreno	100 /año	4	0	0	400	2.000	4.000	8.000
Mulas y otros soportes logísticos	15 /terreno	4	0	0	60	300	600	1.200
Pasajes para transporte de personal	37 /año	4	0	0	148	740	1.480	2.960
Viáticos terrenos de validación (6 personas por terreno)	1,4 /día	360	0	0	504	2.520	5.040	10.080
Seguros personales	1,5 /año	32	0	0	48	240	480	960
Seguros de equipos (3% del valor)	37,3 /año	1	0	0	37	187	373	746
Literatura y acceso a publicaciones internacionales	124,1 /año	1	0	0	124	621	1.241	2.482
SUBTOTAL			1.244	4.355	18.680	103.354	201.109	392.265
Imprevistos			62	218	934	5.168	10.055	19.613
Overhead administración			65	229	981	5.426	10.558	20.594
TOTAL			1.371	4.801	20.595	113.948	221.723	432.472

Tabla 7.8: Desglose de requerimiento bases cartográficas (imágenes satelitales, cartografía, fotografías aéreas, etc.) por zona glaciológica para el Nivel 5. Los totales fueron calculados estableciendo las necesidades de una cuenca tipo por zona, para luego multiplicarlas por el número de cuencas a estudiar por zona.

	Precio unitario (UF)		Cantidad por cuenca tipo por inventario				Total Nacional	
			Norte	Centro	Sur	Austral		
Imágenes satelitales (ASTER, Landsat)	2,5	escena	4	4	7	8	202	escenas
Imágenes satelitales alta resolución (IKONOS, QUICKBIRD)	0,25	/km ²	150	150	80	100	4020	km ²
Cartografía y datos topográficos	0,5	c/u	4	4	4	4	140	unidades
Fotografías aéreas	5	c/u	5	5	6	6	194	unidades
Vuelo aerofotogramétrico	1.805	c/u	0	0	0	0,2	1	unidades
Número de cuencas			8	8	14	5	35	
Total por cuenca tipo (UF)			75	75	70	438		
Total zona (UF)			596	596	973	2.190	4.355	
Porcentaje nacional			14	14	22	50	100	

7.7.2. Costos Nivel 4

El análisis de costo se basa en las características geográficas de los 100 glaciares a estudiar. Se ha estimado el costo estableciendo una sectorización de la logística por zona.

De acuerdo a la propuesta de requerimientos (sección 6.4), se propone realizar al comienzo de la implementación un estudio de variaciones a nivel nacional utilizando toda la información disponible a la fecha, luego, en base a los inventarios de los años 2000 y 2010, completar para el año 2010 o 2011 el primer estudio de variaciones a escala nacional.

Es importante destacar que si bien los datos adquiridos para los estudios de Nivel 5 o producidos por ellos serán utilizados en los estudios de Nivel 4, los costos aquí considerados son adicionales a los de Nivel 5, e incluyen un monitoreo más detallado y de mayor frecuencia para los 100 glaciares incluidos en este nivel.

La designación de los recursos se ha dividido en tres ítems que se describen a continuación para este nivel, el detalle se muestra en la Tabla 7.9.

Personal

Se estima un total de cinco personas por zona para el trabajo, todos ellos trabajando media jornada durante todo el año y todos los años. El equipo se constituiría de un jefe de proyecto responsable y a la vez supervisor del trabajo realizado, un PhD altamente calificado que realice labores de procesamiento de imágenes satelitales y responsable de analizar los resultados obtenidos y verificar la calidad y precisión de los procedimientos. Dos profesionales, o estudiantes de magíster, realizando labores de digitalización (manual y automática), procesamiento de imágenes satelitales, generación de cartografía, etc. El equipo capacitará y será apoyado por un estudiante de pregrado.

Bienes de capital

Los bienes de capital básicamente consisten en las estaciones de trabajo de los profesionales, PhD y estudiantes de magíster, para las que se considera un costo anual de mantención del 5% de su valor. Estas estaciones contarán con el soporte necesario para el procesamiento de imágenes satelitales y análisis de datos científicos.

Gastos de operación

Los gastos de operación incluyen las imágenes satelitales base de los estudios, para las que se considera un costo de implementación para la obtención de la información base de cada glaciar y luego un costo anual igual a un quinto del monto de

implementación, puesto que la resolución temporal de las variaciones a estudiar será de 5 años.

Se estima que los softwares necesarios son al menos tres, uno para el procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS o PCI Geomatics), otro para realizar la digitalización (ArcMap) y uno para el análisis de datos científicos (Matlab u Octave).

Se incluyen en este ítem los seguros de los equipos (equivalentes anualmente al 3% de su valor) y el acceso a literatura y publicaciones internacionales ya sea mediante suscripciones a las ediciones impresas o electrónicas.

Tabla 7.9: Tabla de costos estimativos para el Nivel 4 en UF, los costos de implementación total y anuales son de referencia, el costo real estimativo (incluyendo la gradualidad propuesta) se muestra en forma de totales acumulados a 5, 10 y 20 años. El nivel 4 se encontraría 100% operativo a partir del primer año.

	Precio unitario	Cantidad	Costo (UF)		Total acumulado a		
			Inicial	Fijo anual	5 años	10 años	20 años
Personal							
Profesional a cargo - media jornada	75 / mes	4	0	3.600	18.000	36.000	72.000
PhD media jornada	56 / mes	4	0	2.688	13.440	26.880	53.760
Profesional o estudiante Msc. media jornada	38 / mes	8	0	3.648	18.240	36.480	72.960
Estudiantes de pregrado - media jornada	30 / mes	4	0	1.440	7.200	14.400	28.800
Bienes de capital							
Computadores de oficina	24,8 c/u	16	397	20	496	595	794
Gastos de operación							
Imágenes satelitales (ASTER, Landsat, Alos, Formosat, etc.)	6,7 escena	12	0	80	402	804	1.608
Imágenes satelitales alta resolución (IKONOS, QUICKBIRD)	0,25 /km ²	100	0	25	125	250	500
Cartografía y datos topográficos	0,5 c/u	10	0	5	25	50	100
Fotografías aéreas	0,5 c/u	20	0	10	50	100	200
Software (GIS, modelamiento, procesamiento de datos)	37,20 paquete	2	74	0	74	74	74
Seguros de equipos (3% del valor)	11,9 /año	1	0	12	60	119	238
Literatura y acceso a publicaciones internacionales	124,1 /año	1	0	124	621	1.241	2.482
SUBTOTAL			471	11.652	58.732	116.994	233.516
Imprevistos			24	583	2.937	5.850	11.676
Overhead administración			25	612	3.083	6.142	12.260
TOTAL			519	12.847	64.752	128.985	257.451

7.7.3. Costos Nivel 3

El análisis de costo se basa en las características geográficas típicas de los 50 glaciares a estudiar y la gradualidad expuesta en la propuesta de requerimientos a 5, 10 y 20 años (sección 6.4), donde sólo 8 glaciares son estudiados al quinto año de monitoreo, alcanzándose la totalidad de la cobertura el décimo año. De este modo se desglosa el costo de implementación y el costo anual para las etapas de implementación parcial y total. Se ha estimado el costo estableciendo una sectorización de la logística por zona.

El análisis de costo incluye todos los materiales, personal, arriendo de equipos y servicios para realizar los estudios correspondientes al Nivel 3.

Se incluye también presupuesto para las campañas de terreno con el propósito de recolectar datos, validar estudios y mediciones, evaluar el desempeño de distintas técnicas, etc.

Los datos satelitales y fotografías aéreas incorporadas en este presupuesto son adicionales a las incorporada en los niveles 4 y 5, las que tendrán como fin aumentar la resolución temporal y/o espacial de las series de datos acorde a las necesidades de este nivel de detalle.

La designación de los recursos se ha dividido en tres ítems que se describen a continuación para este nivel, el detalle se muestra en la Tabla 7.10.

Personal

Se estima un total de seis personas por zona para el trabajo, todos ellos trabajando media jornada a excepción del profesional a cargo de cada zona, quien trabajará a jornada completa. Este número se toma constante independiente del número de glaciares estudiados (8 en los primeros años para luego pasar a 50), considerando que en los primeros glaciares el trabajo será más intenso producto de la falta de experiencia y también el trabajo adicional que implica el proceso de implementación del monitoreo en cada nuevo glaciar. El equipo se constituiría de un jefe de proyecto responsable y a la vez supervisor del trabajo realizado, un PhD altamente calificado que realice labores de procesamiento de imágenes satelitales y responsable de analizar los resultados obtenidos y verificar la calidad y precisión de los procedimientos, un profesional o estudiante de magíster realizando labores de desarrollo y análisis de datos, en lo que será apoyado por un estudiante de pregrado. Finalmente dos técnicos apoyarán en la mantención de los equipos y logística de los terrenos.

Bienes de capital

Los bienes de capital consisten en las estaciones de trabajo para los PhD, profesionales y estudiantes de cada zona, para las que se considera un costo anual de mantenimiento del 5% de su valor. Estas estaciones contarán con el soporte necesario para el procesamiento de imágenes satelitales y análisis de datos científicos.

Un equipo portátil de terreno se incluye también en cada zona para tareas de configuración de equipos y recolección de datos.

Gastos de operación

Los gastos de operación incluyen la contratación de levantamientos terrestres y aéreos de topografía superficial y subglaciar, arriendo de equipos de GPS geodésicos, imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Se estima que los softwares necesarios son al menos seis, uno para el procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS o PCI Geomatics), otro para realizar la digitalización (ArcMap), uno para el análisis de datos científicos (Matlab u Octave), uno para el manejo de datos LIDAR (Inertial Explorer), otro para el manejo de datos de GPS (GrafNav, GeoGenius) y finalmente uno para el manejo de datos de radar.

Se incluyen en este ítem los seguros de los equipos (equivalentes anualmente al 3% de su valor) y el acceso a literatura y publicaciones internacionales ya sea mediante suscripciones a las ediciones impresas o electrónicas.

Este ítem también considera los gastos de los terrenos tales como arriendo de vehículos, mulas, pasajes, viáticos y seguros personales. Además se incluyen algunos equipos personales necesarios para la realización de los terrenos de manera segura.

Se propone para cada zona, tres terrenos anuales de 15 días de duración y con la participación de 6 personas en cada uno. Durante los primeros cinco años, se propone realizar la mitad de los terrenos, a pesar de que se estén estudiando menos de la mitad de los glaciares.

Tabla 7.10: Tabla de costos Nivel 3 en UF, los costos de implementación total y anuales son de referencia, el costo real estimativo (incluyendo la gradualidad propuesta) se muestra en forma de totales acumulados a 5, 10 y 20 años. El nivel 3 se encontraría 100% operativo a partir del décimo año.

Precio unitario	Cantidad	Costo (UF)				Total acumulado a		
		Inicial	Fijo anual		5 años	10 años	20 años	
			Años 1 a 5	Años 6 a 20				

Personal

Profesional a cargo - jornada completa	150 / mes	4	0	7.200	7.200	36.000	72.000	144.000
PhD media jornada	56 / mes	4	0	2.688	2.688	13.440	26.880	53.760
Profesional o estudiante MSc, media jornada	38 / mes	4	0	1.824	1.824	9.120	18.240	36.480
Estudiantes de pregrado - media jornada	30 / mes	4	0	1.440	1.440	7.200	14.400	28.800
Técnico media jornada	30 / mes	8	0	2.880	2.880	14.400	28.800	57.600

Bienes de capital

Computador de terreno	99 c/u	4	396	20	20	495	594	792
Computadores de oficina	30 c/u	16	480	24	24	600	720	960

Tabla 7.10. Continuación.

	Precio unitario	Cantidad anual		Inicial	Costo		Total acumulado a		
		Años 1 – 5 (*)	Años 6 – 20		Fijo anual	5 años	10 años	20 años	
									Años 1 a 5
Gastos de operación									
Vuelos LIDAR	59,6 /km ²	16	100	0	960	6.000	4.800	34.800	94.800
Levantamiento GPR - topografía subglaciar y estructura	49,7 / día	4	21	0	200	1.050	1.000	6.250	16.750
Arriendo GPS diferencial	3,0 / día	90	180	0	270	540	1.350	4.050	9.450
Imágenes satelitales ASTER	2,0 escena	8	50	0	16	100	80	580	1.580
Imágenes satelitales (Landsat, Alos, Formosat, etc.)	6,7 escena	8	50	0	53,6	335	268	1.943	5.293
Cartografía y datos topográficos	0,5 c/u	8	50	0	4	25	20	145	395
Fotografías aéreas	0,5 c/u	32	200	0	16	100	80	580	1.580
Software (GIS, modelamiento, procesamiento de datos)	124,1 paquete	0	0	124	6,2	6,2	155,1	186,2	248,2
Arriendo de vehículos de terreno	2,3 /día	90	180	0	207	414	1.035	3.105	7.245
Equipos personales de terreno	99,3 /año	2	4	0	200	400	1.000	3.000	7.000
Mulas y otros soportes logísticos	14,9 /terreno	6	12	0	90	180	450	1.350	3.150
Pasajes para transporte de personal	37,2 /año	2	4	0	74,4	148,8	372,0	1.116,0	2.604,0
Viaticos terrenos (6 personas por terreno)	1,4 /día	540	1080	0	756	1.512	3.780	11.340	26.460
Seguros personales	1,5 /año	24	24	0	36	36	180	360	720
Seguros de equipos (3% del valor)	30,0 /año	1	1	0	30	30	150	300	600
Literatura y acceso a publicaciones internacionales	198,6 /año	1	1	0	198,6	198,6	993,0	1.986,0	3.972,0

(*) En los primeros 5 años se hará sólo la mitad de terrenos.

SUBTOTAL	1.000,1	19.193,6	27.151,4	96.968,1	232.725,2	504.239,2
Impevistas	50,0	959,7	1.357,6	4.848,4	11.636,3	25.212,0
Overhead administración	52,5	1.007,7	1.425,4	5.090,8	12.218,1	26.472,6
TOTAL	1.102,6	21.160,9	29.934,4	106.907,4	256.579,5	555.923,7

7.7.4. Costos Nivel 2

El análisis de costo se calcula sobre la base del tipo de estudios a efectuar y el número de glaciares involucrados, el que en función de la gradualidad expuesta en la propuesta de requerimientos a 5, 10 y 20 años (sección 6.4), será de 4 glaciares hasta el quinto año de monitoreo, para luego al décimo año alcanzar el total de 14. De este modo se desglosa el costo de implementación y el costo anual para las etapas de implementación parcial y total. Se ha estimado el costo estableciendo una sectorización de la logística por zona.

El análisis de costo incluye todos los materiales, personal, arriendo de equipos y servicios para realizar los estudios correspondientes al Nivel 2 de detalle.

Se incluye también presupuesto para las campañas de terreno con el propósito principal de recolectar datos y validar los estudios.

Los datos satelitales y fotografías aéreas incorporadas en este presupuesto son adicionales a las incorporadas en los niveles 3, 4 y 5, las que tendrán como fin aumentar la resolución temporal y/o espacial de las series de datos acorde a las necesidades de este nivel de detalle.

La designación de los recursos se ha dividido en tres ítems que se describen a continuación para este nivel, el detalle se muestra en la Tabla 7.11.

Personal

Se estima un total de seis personas por zona para el trabajo, todos ellos trabajando media jornada a excepción del profesional a cargo de cada zona, quien lo hará a jornada completa. El número de personas se toma constante independiente del número de glaciares estudiados cada año, considerando que en los primeros glaciares el trabajo será más intenso producto de la falta de experiencia y también el trabajo adicional que implica el proceso de implementación del monitoreo en cada nuevo glaciar el que incluye la instalación de estaciones meteorológicas y fluviométricas. El equipo se constituiría de un jefe de proyecto responsable y a la vez supervisor del trabajo realizado, un PhD altamente calificado encargado de analizar los resultados obtenidos y verificar la calidad y precisión de los procedimientos, dos profesionales o estudiantes de magíster, realizando labores de desarrollo y análisis de datos, en lo que serán apoyados por un estudiante de pregrado. Finalmente un técnico apoyará en la mantención de los equipos y la logística de los terrenos.

Bienes de capital

Los bienes de capital consisten en las estaciones de trabajo para los PhD, profesionales y estudiantes de magíster de cada zona, equipos portátiles de terreno, en particular un taladro Heucke y un tubo Monte Rosa por zona. Para los que se considera un costo anual de mantención del 5% de su valor. Las estaciones de trabajo contarán con el soporte necesario para el procesamiento de imágenes satelitales, análisis de datos científicos y modelamiento matemático básico.

Gran parte del costo en este ítem corresponde a las estaciones meteorológicas (14) y pluviométricas (14) para las que se estimó un costo anual de un 10% de su valor, con el que se pretende cubrir tanto la mantención como el posible reemplazo de equipos destruidos.

En el caso de las estaciones meteorológicas, dado su difícil acceso y el largo período de recurrencia de las visitas de terreno a cada glaciar, se las equipará con un sistema de transmisión de datos, o que permitirá salvaguardar la información recopilada y hacer más oportunas las campañas de mantenimiento.

Gastos de operación

Los gastos de operación incluyen la contratación de levantamientos terrestres y aéreos de topografía superficial y subglaciar, vuelos aerofotogramétricos, arriendo de equipos de GPS geodésicos, imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Se estima que los softwares necesarios son al menos seis, uno para el procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS o PCI Geomatics), otro para realizar la digitalización (ArcMap), uno para el análisis de datos científicos y modelamiento matemático (Matlab u Octave), uno para el manejo de datos LIDAR (Inertial Explorer) otro para el manejo de datos de GPS (GrafNav, GeoGenius) y finalmente uno para el manejo de datos de radar.

Se incluyen en este ítem los seguros de los equipos (equivalentes anualmente al 3% de su valor) y el acceso a literatura y publicaciones internacionales ya sea mediante suscripciones a las ediciones impresas o electrónicas.

Este ítem también considera los gastos de los terrenos tales como arriendo de vehículos, mulas, pasajes, viáticos y seguros personales. Además se incluyen equipos personales necesarios para la realización de los terrenos de manera segura.

Para la instalación y mantención de estaciones se incorporan algunas horas de vuelo de helicóptero.

Se propone para cada zona seis terrenos anuales de 10 días de duración y con la participación de 4 personas en cada uno.

El número anual de terrenos se reducirá a la mitad durante los primeros cinco años.

Tabla 7.11: Tabla de costos Nivel 2 en UF, los costos de implementación total y anuales son de referencia, el costo real estimativo (incluyendo la gradualidad propuesta) se muestra en forma de totales acumulados a 5, 10 y 20 años. El nivel 2 se encontraría 100% operativo a partir del décimo año.

	Precio unitario	Cantidad	Inicial	Costo (UF)		Total acumulado a			
				Fijo anual		5 años	10 años	20 años	
				Años 1 a 5	Años 6 a 20				
Personal									
Profesional a cargo - jornada completa	150 / mes	4	0	7.200	7.200	36.000	72.000	144.000	
PhD - media jornada	56 / mes	4	0	2.688	2.688	13.440	26.880	53.760	
Profesional o estudiante MSc, - media jornada	38 / mes	8	0	3.648	3.648	18.240	36.480	72.960	
Estudiantes de pregrado - media jornada	30 / mes	4	0	1.440	1.440	7.200	14.400	28.800	
Técnico - media jornada	30 / mes	4	0	1.440	1.440	7.200	14.400	28.800	
Bienes de capital									
Estaciones meteorológicas (con transmisión de datos)	645 c/u	14	9.030	903	903	13.545	18.060	27.090	
Heucke (taladro de hielo a vapor)	112 c/u	4	448	22,4	22,4	560	672	896	
Tubo Monte Rosa (muestreo de nieve)	20 c/u	4	80	4	4	100	120	160	
Estaciones pluviométricas (con instalación)	546 c/u	14	7.644	764,4	764,4	11.466	15.288	22.932	
Computador de terreno	100 c/u	4	400	20	20	500	600	800	
Computadores de oficina	30 c/u	16	480	24	24	600	720	960	

Tabla 7.11. Continuación.

	Precio unitario	Cantidad anual		Inicial	Fijo anual		5 años	10 años	20 años
		Años 1 – 5 (*)	Años 6 - 20		Años 1 a 5	Años 6 a 20			
Gastos de operación									
Vuelos LIDAR + Fotografía termal	60 /km ²	34	120	0	2.040	7.200	10.200	46.200	118.200
Levantamiento GPR - topografía subglaciar y estructura	50 / día	6	20	0	300	1.000	1.500	6.500	16.500
Arriendo GPS diferencial	3 / día	120	240	0	360	720	1.800	5.400	12.600
Imágenes satelitales (Landsat, Alos, Formosat, Kompsat)	6,70 escena	8	28	0	54	188	268	1.206	3.082
Imágenes satelitales alta resolución (Ikonos, QuickBird)	0,25 /km ²	116	400	0	29	100	145	645	1.645
Cartografía y datos topográficos	0,50 c/u	6	20	0	3	10	15	65	165
Extracción de testigos de nieve	5 /m	20	70	0	100	350	500	2.250	5.750
Análisis de testigos de nieve	50 /año	1	1	0	50	50	250	500	1.000
Vuelo aerofotogramétrico 1:20.000	1.805 c/u	1	1	0	1.805	1.805	9.025	18.050	36.100
Software (GIS, modelamiento, procesamiento de datos)	124 paquete	4	4	496	24,8	24,8	620	744	992
Horas de vuelo de Helicóptero	15 /hora	5	10	0	75	150	750	1.500	3.000
Arriendo de vehículos de terreno	2 /día	120	240	0	240	480	1.200	3.600	8.400
Equipos personales de terreno	100 /año	2	4	0	200	400	1.000	3.000	7.000
Herramientas varias	30 paquete	2	4	0	60	120	300	900	2.100
Pasajes para transporte de personal	25 /mes	12	24	0	300	600	1.500	4.500	10.500
Viáticos terrenos (4 personas por terreno)	1,40 /día	600	1200	0	840	1.680	4.200	12.600	29.400
Seguros personales	1,50 /año	24	24	0	36	36	180	360	720
Seguros de equipos (3% del valor)	557 /año	1	1	0	557	557	2.785	5.570	11.140
Literatura y acceso a publicaciones internacionales	248 /año	1	1	0	248	248	1.240	2.480	4.960

(*) En los primeros 5 años se hará sólo la mitad de terrenos.

SUBTOTAL		18.578,0	25.475,2	33.872,2	145.954,0	315.315,0	654.037,0
Impevistos		928,9	1.273,8	1.693,6	7.297,7	15.765,8	32.701,9
Overhead administración		975,3	1.337,4	1.778,3	7.662,6	16.554,0	34.336,9
TOTAL		20.482,2	28.086,4	37.344,1	160.914,3	347.634,8	721.075,8

7.7.5. Costos Nivel 1

El análisis de costos de este nivel de detalle máximo se calcula sobre la base del tipo de estudios a efectuar, muchos de los cuales son pioneros por lo que requieren de desarrollo, y el número de glaciares involucrados, el que en función de la gradualidad expuesta en la propuesta de requerimientos a 5, 10 y 20 años (sección 6.4), será de uno durante el primer quinquenio, para luego al décimo año alcanzar el total de 4. Se propone que el primer glaciar en estudio para este nivel corresponda a la Zona Centro.

De este modo se desglosa el costo de implementación y el costo anual para las etapas de implementación parcial y total. Se ha estimado el costo estableciendo una sectorización de la logística por zona.

El análisis de costo incluye todos los materiales, personal, arriendo de equipos, servicios y desarrollo, para realizar los estudios correspondientes al Nivel 1 de detalle. Incluye además la infraestructura permanente necesaria y su instalación, la cual es importante para lograr mediciones periódicas. También incorpora la necesaria mantención de las estaciones meteorológicas y fluviométricas. Es así necesario emplazar instalaciones que permitan almacenar el material y den abrigo temporal a quienes realicen el trabajo. De este modo un refugio de alta montaña será instalado y equipado, permitiendo la operación de manera eficiente y segura.

Se incluye también presupuesto para las campañas de terreno con el propósito principal de recolectar datos de detalle y validar los modelos.

Los datos satelitales, fotografías aéreas, estaciones meteorológicas y fluviométricas incorporadas en este presupuesto, son adicionales a las ya incorporadas en los niveles 2, 3, 4 y 5, las que tendrán como fin aumentar la resolución temporal y/o espacial de las series de datos acorde a las necesidades de este nivel de detalle.

La designación de los recursos se ha dividido en tres ítems que se describen a continuación para este nivel, el detalle se muestra en la Tabla 7.12.

Personal

Se estima un total de seis personas por zona para el equipo de trabajo, el que se constituiría de un jefe de proyecto a jornada completa, responsable de la zona y a la vez supervisor del trabajo realizado, un PhD altamente calificado a media jornada, encargado de analizar los resultados obtenidos y verificar la calidad y precisión de los procedimientos, dos profesionales o estudiantes de magíster a jornada completa, realizando labores de desarrollo y análisis de datos, en lo que serán apoyados por un estudiante de pregrado a media jornada. Finalmente un técnico a jornada completa apoyará en la recolección de datos, la mantención de los equipos y la logística de los terrenos.

Bienes de capital

Los bienes de capital por zona son: Estaciones de trabajo (para los profesionales, PhD y estudiantes de magíster), equipos portátiles de terreno incluyendo un taladro Heucke, un tubo Monte Rosa, dos cámaras para fotografía secuencial y dos GPS diferenciales. Para éstos equipos se considera un costo anual de mantención igual al 5% de su valor. Las estaciones de trabajo contarán con el soporte necesario para el procesamiento de imágenes satelitales, análisis de datos científicos y modelamiento matemático avanzado.

Gran parte del costo en este ítem corresponde a las estaciones meteorológicas (12) y fluviométricas (8) para las que se estimó un costo anual de un 10% de su valor, con el que se pretende cubrir tanto la mantención como el posible reemplazo de equipos destruidos.

En el caso de las estaciones meteorológicas, dado el corto período de recurrencia de las visitas de terreno a cada glaciar, no se las equipará con un sistema de transmisión de datos como en las del Nivel 2. Se incorpora también un container por zona, adaptado a modo de refugio de montaña, el cual contará con el amoblado necesario para servir de área de trabajo y habitaciones de los investigadores y técnicos en terreno.

Gastos de operación

Los gastos de operación incluyen la contratación de levantamientos terrestres y aéreos de topografía superficial, subglaciar y de estructura interna de detalle, extracción y análisis de testigos de hielo, imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Se estima que los softwares necesarios son al menos seis, uno para el procesamiento de imágenes satelitales (ENVI, ERDAS o PCI Geomatics), otro para realizar la digitalización (ArcMap), uno para el análisis de datos científicos y modelamiento matemático (Matlab u Octave), uno para el manejo de datos LIDAR (Inertial Explorer) otro para el manejo de datos de GPS (GrafNav, GeoGenius) y finalmente uno para el manejo de datos de radar.

Se incluyen en este ítem los seguros de los equipos (equivalentes anualmente al 3% de su valor) y el acceso a literatura y publicaciones internacionales ya sea mediante suscripciones a las ediciones impresas o electrónicas. Este ítem también considera los gastos de los terrenos tales como arriendo de vehículos, mulas, pasajes, viáticos y seguros personales. Además se incluyen equipos personales necesarios para la realización de los terrenos de manera segura.

Para la instalación y mantención de estaciones se incorporan también horas de vuelo de helicóptero. Se propone para cada zona doce terrenos anuales de 8 días de duración y con la participación de 5 personas en cada uno.

Tabla 7.12: Tabla de costos Nivel 1 en UF, los costos de implementación total y anuales son de referencia, el costo real estimativo (incluyendo la gradualidad propuesta) se muestra en forma de totales acumulados a 5, 10 y 20 años. El nivel 1 se encontraría 100% operativo a partir del décimo año.

Precio unitario	Cantidad	Costo (UF)				Total acumulado a		
		Implementación		Fijo anual		5 años	10 años	20 años
		Primer año	Sexto año	Años 1 a 5	Años 6 a 20			

Personal

Profesional a cargo - jornada completa	150 / mes	4	0	0	1.800	7.200	9.000	45.000	117.000
PhD - media jornada	56 / mes	4	0	0	672	2.688	3.360	16.800	43.680
Profesional o estudiante MSc, - jornada completa	75 / mes	8	0	0	1.800	7.200	9.000	45.000	117.000
Estudiantes de pregrado - media jornada	30 / mes	4	0	0	360	1.440	1.800	9.000	23.400
Técnico - jornada completa	60 / mes	4	0	0	720	2.880	3.600	18.000	46.800

Bienes de capital

Refugio (container) 2,5x6 metros (con instalación)	813 c/u	4	813	2.439	40,7	162,6	1.016,3	4.268,3	5.894,3
Amoblado refugio	34 c/u	4	34	102	3,4	13,6	51	221	357
Estaciones meteorológicas (sin transmisión)	497 c/u	12	1.491	4.473	149,1	596,4	2.236,5	9.691,5	15.655,5
GPS diferenciales	323 c/u	8	646	1.938	32,3	129,2	807,5	3.391,5	4.683,5
Cámaras de fotografía secuencial	50 c/u	8	100	300	10	40	150	650	1.050
Heucke (taladro de hielo a vapor)	112 c/u	4	112	336	5,6	22,4	140	588	812
Tubo Monte Rosa (muestreo de nieve)	20 c/u	4	20	60	1	4	25	105	145
Estaciones pluviométricas (con instalación)	546 c/u	8	1.092	3.276	109,2	436,8	1.638	7.098	11.466
Computador de terreno	99 c/u	4	99	297	4,95	19,80	123,75	519,75	717,75
Computadores de oficina	30 c/u	16	120	360	6	24	150	630	870

Tabla 7.12. Continuación.

	Precio unitario		Cantidad anual		Costo				Total acumulado a		
					Implementación		Fijo anual		5 años	10 años	20 años
					Primer año	Sexto año	Años 1 a 5	Años 6 a 20			
Años 1 - 5	Años 6 - 20										
Gastos de operación											
Vuelos LIDAR + Fotografía termal	60,0	/km ²	10	30	0	0	600	1.800	3.000	12.000	30.000
Levantamiento GPR - topografía subglaciar	50,0	/ día	6	18	0	0	300	900	1.500	6.000	15.000
Levantamiento GPR - estructura interna	50,0	/ día	4	12	0	0	200	600	1.000	4.000	10.000
Imágenes satelitales ASTER	2,0	escena	6	18	0	0	12	36	60	240	600
Imágenes satelitales (Landsat, Alos, etc.)	6,7	escena	2	6	0	0	13,4	40,2	67	268	670
Imágenes satelitales alta resolución (Ikonos, QuickBird)	0,25	/km ²	15	45	0	0	3,75	11,25	18,75	75,00	187,5
Imágenes de radar Terra-SAR X, ASAR	244,0	escena	1	2	0	0	244	488	1.220	3.660	8.540
Extracción de testigos de hielo	25,0	/m	50	150	0	0	1.250	3.750	6.250	25.000	62.500
Análisis de testigos de hielo	497,0	/año	1	3	0	0	497	1.491	2.485	9.940	24.850
Horas de vuelo de Helicóptero	15,0	/hora	48	108	0	0	720	1.620	3.600	11.700	27.900
Software (GIS, modelamiento, etc.)	150	paquete	1	3	150	450	7,5	30	187,5	787,5	1.087,5
Arriendo de vehículos de terreno	2,3	/día	96	288	0	0	220,8	662,4	1.104	4.416	11.040
Equipos personales de terreno	100,0	/año	1	3	0	0	100	300	500	2.000	5.000
Herramientas varias	37,2	paquete	1	3	0	0	37,2	111,6	186	744	1.860
Mulas y otros soportes logísticos	12,4	/terreno	12	36	0	0	148,8	446,4	744	2.976	7.440
Pasajes para transporte de personal	12,4	/mes	60	180	0	0	744	2.232	3.720	14.880	37.200
Viaticos terrenos (4 personas por terreno)	1,4	/día	480	1.440	0	0	672	2.016	3.360	13.440	33.600
Seguros personales	1,5	/año	24	24	0	0	36	36	180	360	720
Seguros de equipos (3% del valor)	140,0	/año	1	1	0	0	140	140	700	1.400	2.800
Literatura y acceso a publicaciones internacionales	248,0	/año	1	1	0	0	248	248	1.240	2.480	4.960
SUBTOTAL					4.677,0	14.031,0	11.908,7	39.815,7	64.220,3	277.329,5	675.486,0
Impevisos					233,9	701,6	595,4	1.990,8	3.211,0	13.866,5	33.774,3
Overhead administración					245,5	736,6	625,2	2.090,3	3.371,6	14.559,8	35.463,0
TOTAL					5.156,4	15.469,2	13.129,3	43.896,8	70.802,8	305.755,8	744.723,3

7.7.6. Cronograma de actividades

A continuación se presenta un cronograma tentativo del desarrollo de las actividades a lo largo de los primeros 10 años de funcionamiento de la Estrategia Nacional de Glaciares. Sin embargo la definición precisa de dicho cronograma debe necesariamente tomar en cuenta la fecha exacta de inicio de las actividades, de manera de organizar las acciones según la mejor época del año para su realización.

Año	Resultado				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
1	Determinación del glaciar a estudiar en la Zona Centro, instalación de instrumentos e infraestructura y recopilación de antecedentes	Determinación e instrumentación de los glaciares a estudiar y recopilación de antecedentes	Determinación de los glaciares a estudiar y validación de técnicas a utilizar	Determinación de los glaciares a estudiar e inicio del estudio de variaciones 2000-2010	Inicio del primer inventario nacional con información del año 2000
2	Monitoreo, análisis de datos e informe parcial	Monitoreo, análisis de datos e informe parcial	Levantamientos, análisis de datos e informe parcial	Finalización y validación del análisis de variaciones 2000-2010	Informe preliminar inventario año 2000
3	Monitoreo, análisis de datos e informe parcial integrado niveles 1 y 2		Levantamientos, análisis de datos e informe parcial	Inicio del estudio de variaciones 2010 en adelante	Inventario 2000 final
4	Monitoreo, análisis de datos e informe parcial	Monitoreo, análisis de datos e informe parcial	Levantamientos, análisis de datos e informe parcial	Informe nacional de variaciones	Inicio inventario 2010
5	Primer informe nacional integrado e inventarios 2000 y 2010				
6	Selección de glaciares a estudiar en Zonas Norte, Sur y Austral. Monitoreo e informe parcial Zona Centro.	Selección de la red completa de glaciares e instrumentación	Selección de la red completa de glaciares e inicio del primer levantamiento nacional	Análisis continuo de variaciones e informe	Validación inventario 2010
7	Instrumentación, instalación de infraestructura y recopilación de antecedentes.	Monitoreo, análisis de datos e informe nacional	Levantamiento, análisis de datos e informe nacional	Análisis continuo de variaciones e informe	Revisión de inventarios, desarrollo y validación de metodologías
8	Monitoreo, análisis de datos e informe nacional	Monitoreo, análisis de datos e informe nacional	Levantamiento, análisis de datos e informe nacional	Análisis continuo de variaciones con inclusión de los glaciares rocosos e informe	Revisión de inventarios, desarrollo y validación de metodologías
9	Monitoreo, análisis de datos e informe nacional	Monitoreo, análisis de datos e informe nacional	Levantamiento, análisis de datos e informe nacional	Análisis continuo de variaciones con inclusión de los glaciares rocosos e informe	Actualización del inventario nacional
10	Segundo informe nacional integrado e inventario actualizado. Establecimiento de modelos óptimos por zona y primeras proyecciones para todo el siglo XXI.				

7.7.7. Diseminación de la información

A continuación se presenta un análisis estimativo de costos asociado a la difusión de la información vía Web y la creación de una plataforma para su intercambio y manejo como se menciona en la sección 7.6.

Tabla 7.13: Presupuesto estimativo del plan de distribución de datos vía Web.

	Costo acumulado a			
	Primer año	5 años	10 años	20 años
	UF	UF	UF	UF
Diseño del sitio Web	95	222	381	698
Programación del sitio Web	571	1.332	2.284	4.187
Hosting y dominio	24	119	238	476
Creación de contenidos de difusión general	400	1.998	3.997	7.993
Mantenimiento y supervisión	400	1.998	3.997	7.993
Difusión en medios de comunicación	400	1.998	3.997	7.993
TOTAL	1.889	7.668	14.892	29.340

7.7.8. Resumen de costos

La Tabla 7.14 muestra un resumen de los costos de implementación y los acumulados a 5, 10 y 20 años, para los cinco niveles de estudios a escala nacional.

A diez años, lo que constituye un horizonte para el cual la nueva información disponible probablemente requerirá una modificación sustancial de la estrategia, el costo total sería de aproximadamente 51 millones de dólares estadounidenses, lo que constituye una primera aproximación y no considera los cambios de los costos futuros no incluidos en la variación del valor de la UF.

Tabla 7.14: Análisis de costos totales acumulados a 5, 10 y 20 años siguiendo la estrategia nacional de monitoreo glaciar propuesta basada en el sistema jerárquico de cinco niveles de detalle.

	Costo acumulado a			
	Primer año	5 años	10 años	20 años
	UF	UF	UF	UF
Nivel 1	\$ 5.110	\$ 70.539	\$ 304.484	\$ 741.713
Nivel 2	\$ 20.482	\$ 161.328	\$ 348.048	\$ 721.489
Nivel 3	\$ 1.103	\$ 110.057	\$ 259.729	\$ 559.074
Nivel 4	\$ 519	\$ 64.752	\$ 128.985	\$ 257.451
Nivel 5	\$ 1.371	\$ 113.948	\$ 221.723	\$ 432.472
Difusión	\$ 3.724	\$ 18.619	\$ 37.238	\$ 372.378
Web y distribución de datos	\$ 1.889	\$ 7.668	\$ 14.892	\$ 29.340
TOTAL	\$ 34.198	\$ 546.911	\$ 1.315.100	\$ 3.113.917

8. REFERENCIAS

- ACIA. 2005. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, 1042 pp.
- Apablaza, R., Farías, E., Morales, R., Díaz, J. and A. Karzulovic. 2001. The Sur Sur mine of Codelco's Andina division. En: W. A. Hustrulid, M. K. McCarter & D. J. A. van Zyl (eds.), Slope stability in surface mining, Society for Mining Metallurgy and Exploration, 171-175.
- Acuña, C. 2001. Variaciones recientes de los glaciares entre 28° y 41° de Latitud Sur y su relación con cambios climáticos. Memoria de título. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía, 90 pp.
- Adam, J.C., Clark, E.A. and D.P. Lettenmaier. 2006. Correction of global precipitation products for orographic effects. *Journal of Climate*, 19, 15-38.
- Alean, J. 1985. Ice avalanches: some empirical information about their formation and reach. *Journal of Glaciology*, 31109, 324-333.
- Ammann, C., Jenny, B., Kammer, K. and B. Messerli. 2001. Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 172, 313-326.
- Amstrup, S.C., Stirling, I., Smith, T.S., Perham, C. and G.W. Thiemann. 2006. Recent observations of intraspecific predation and cannibalism among polar bears in the southern Beaufort Sea. *Polar Biology*, 29, 997-1002.
- Aniya, M. 1988. Glacier inventory for the Northern Patagonia Icefield, Chile, and variations 1944/45 to 1985/86. *Arctic and Alpine Research*, 20(2), 179-187.
- Aniya, M. 1992. Glacier Variation in the Northern Patagonia Icefield Chile between 1985/86 and 190/91. *Bulletin of Glaciar Research*, 10, 83-90.
- Aniya, M. 1999. Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 31(2), 165-173.
- Aniya, M. 2001. Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chilean Patagonia, since 1944/45, with special reference to variations between 1995/96 and 1999/2000. *Bulletin of Glacier Research*, 18, 55-63.
- Aniya, M. 2007. Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, for 1944/45-2004/05. *Bulletin of Glaciological Research*, 24, 59-70.
- Aniya, M. and H. Enomoto. 1986. Glacier Variations and their Causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine research*, 18(3), 307-316.
- Aniya, M. and P. Skvarca. 1992. Characteristics and Variations of Upsala and Moreno glaciers, Southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10, 39-53.

- Aniya, M., Naruse, R., Shisukushi, M., Skvarca, P. and G. Casassa 1992. Monitoring recent glacial variations in the Southern Patagonia Icefield utilizing remote sensing data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXIX, Commission VII Part B7, 87-94
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P. and G. Casassa. 1996. The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonian Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1361–1369.
- Aniya, M. and Y. Wakao. 1997. Glacier Variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, Between 1944/45 and 1995/96. *Bulletin of Glacier Research*, 15, 11-18.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, N., Skvarca, P., and G. Cassasa. 1997. Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, 29 (1), 1-12.
- Aniya, M., Naruse, R., Casassa, G., and A. Rivera. 1999. Variations of Patagonian glaciers, South America, utilizing RADARSAT images. *Proceedings of the International Symposium on RADARSAT Application Development and Research Opportunity (ADRO)*, Montreal, Canada, October 13-15, 1998. CD-ROM.
- Aniya, M., Dhakal, A., Park, S. and R. Naruse. 2000. Variations of Patagonian Glaciers, South America, Using RADARSAT and Landsat Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(6), 501-511.
- Aniya, M. and R. Naruse. 2001. Overview of glaciological research project in Patagonia in 1998 and 1999: Holocene glacier variations and their mechanisms. *Bulletin of Glaciological Research*, 18, 71-78.
- Aniya, M., Naruse, R. and S. Yamaguchi. 2002. Utilization of 6 x 6 cm format vertical aerial photographs for repetitive mapping of surface morphology and measurement of flow velocities of a small glacier in a remote area: Glaciar Soler, Hielo Patagónico Norte, Chile. *Annals of Glaciology*, 34, 385-390.
- Aniya, M., Kazuhide, S., Skvarca, P., Anma, R., Auki, T., Sawagaki, T., Tanikawa, T., Naruse, T., Glaserry, R. and S. Harrison. 2005. Overview of glaciological Research Project in Patagonia 2003. *Bulletin of Glaciological Research*, 22, 109-119.
- Aniya, M., Barcaza, G., and S. Iwasaki. 2007a. Recent glacier advances at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, Chile. *Bulletin of Glaciological Research*, 24, 49-57
- Aniya, M., Enomoto, H., Aoki, T., Matsumoto, T., Skvarca, P., Barcaza, G., Suzuki, R., Sawagaki, T., Sato, N., Isenko, E., Iwasaki, S., Sala, H., Fukuda, A., Satow, K. and R. Naruse. 2007b. Glaciological and geomorphological studies at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, and Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, South America, during 2003-2005 (GRPP03-05). *Bulletin of Glaciological Research*, 24, 95-107.

- Aðalgeirsdóttir, G., Jóhannesson, T., Björnsson, H., Pálsson, F. and O. Sigurðsson. 2006. Response of Hofsjökull and southern Vatnajökull, Iceland, to climate change. *Journal of Geophysical Research*, 11, F03001, doi:10.1029/2005JF000388
- Araneda, A., Torrejón, F., Aguayo, M., Torres, L., Cruces, F., Cisternas, M., and R. Urrutia. 2007. Historical records of San Rafael Glacier advances (North Patagonian Icefield): another clue to “Little Ice Age” timing in southern Chile? *The Holocene*, 17(7), 987-998.
- Araos, J., Godoi, M. A. and R. Carvallo. 2007. Variaciones recientes del lóbulo Zapata Sur, Glaciar Tyndall. Campo de Hielo Patagónico Sur (Chile). *Revista de Geografía Norte Grande*, 37, 75-84.
- Aravena, J. 2007. Reconstructing climate variability using tree rings and glacier fluctuations in the southern Chilean andes. PhD Thesis, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 220.
- Aravena, J. C., Lara, A., Wolodarsky-Franke, A., Villalba, R., and E. Cuq. 2002. Tree-ring growth patterns and temperature reconstruction from *Nothofagus pumilio* (Fagaceae) forests at the upper tree line of southern Chilean Patagonia. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 361-376.
- Aravena, J.C., and B. Luckman 2008. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1761.
- Aristarain, A.J. and R.J. Delmas. 1993. Firn-core study from the southern Patagonia ice cap, South America. *Journal of Glaciology*, 39(132), 249-254.
- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., Ainley, D.G., and M.A. Fahnestock. 2002. Ecological impact of a large Antarctic iceberg. *Geophysical Research Letters*, 29(7), doi:10.1029/2001GL014160.
- Atkinson, A., V. Siegel, E. Pakhomov and P. Rothery, 2004: Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432, 100-103.
- Azócar, G., and A. Brenning. 2008. Intervenciones de glaciares rocosos en minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile. Informe técnico, Department of Geography and Environmental Management of Waterloo, Ontario, Canada, 14 pp.
- Azócar, G., and A. Brenning. 2009. Los Glaciares Rocosos en los Andes Chilenos entre los 27° y 33°S. Department of Geography and Environmental Management of Waterloo, Ontario, Canada, 55 pp.
- Bahr, D., Meier, M. and S. Peckham. 1997. The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 102 (B9), 20355-20362.
- Baker, D., Escher-Vetter, H., Moser, H. and H. Oerter. 1982. A glacier discharge model based on results from field studies of energy balance, water storage and flow. *IAHS Publication*, 138, 103-112.

- Bamber, J.L., Layberry, R.L. and S.P. Gogineni. 2001. A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet, 1. Measurement, data reduction, and errors. *Journal of Geophysical Research*, 106, 33733-33780.
- Bamber, J.L. and A. Rivera. 2007. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59, 138-148.
- Barrick, 2008. Respuestas a las consultas de las autoridades sobre Plan de monitoreo de glaciares, versión 2 de Marzo 2007 y Plan de monitoreo glaciares, Revisión 3. 211 pp.
- Barrick Gold. 2009. Pascua Lama. Minería Responsable. e-book, pagina web Barrick Gold. http://www.barrick.cl/proyectos/libro_digital/index.html revisada en Mayo de 2009.
- Beaugrand, G. and P.C. Reid, 2003: Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Glob. Change Biol.*, **9**, 801-817.
- Benítez, A. 1980. Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile. Santiago, Dirección General de Aguas.
- Benn, D. and D. Evans. 1998. *Glaciers and Glaciation*. Arnold, London, 734.
- Berthier, E., Arnaud, Y., Vincent C. and F. Rémy. 2007. Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geophysical Research Letters*, 33, L08502, doi: 10.1029/2006GL025862.
- Bingham, R., Nienow, P., Sharp, M. and S. Boon. 2005. Subglacial drainage processes at a High Arctic polythermal valley glacier. *Journal of Glaciology*, 51(172), 15-24.
- Björnsson, H. 1992. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology*, 16, 95-106.
- Björnsson, H. 2002. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, 35, 255-271.
- Bogen, J. 1989. Glacial Sediment Production and Development of Hydro-Electric Power in Glacierized Areas. *Annals of Glaciology*, 13, 6-11.
- Bolius, D., Schwikowski, M., Rufibach, B., Jenk, T., Casassa, G. and A. Rivera. 2006. A first shallow firn core record from La Ollada Glacier on Cerro Mercedario in the Central Argentinean Andes. *Annals of Glaciology*, 43, 14-22.
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R., and J. Urquidí. 2006. Glaciares chilenos. Reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía. Chile Sustentable, LOM ediciones, Santiago, 124.
- Bowen, N. 2002. Canary in a coalmine. *Climbing News*, 208, 90-97, 138-139.
- Bown, F. 2004. Cambios climáticos en la Región de Los Lagos y respuestas recientes del Glaciar Casa Pangue (41°08'S). Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía. Universidad de Chile, Chile. 131 pp.

- Bown, F., Rivera, A., Acuña C. and G. Casassa. 2007. Recent glacier mass balance calculations at Volcán Mocho-Choshuenco (40°S), Chilean Lake District. *IAHS*, 318, 143-152.
- Bown, F. and A. Rivera. 2007. Climate changes and recent glacier behaviour in the Chilean Lake District. *Global and Planetary Change*, 59, 79-86.
- Bown, F., Rivera, A. and C. Acuña. 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, 43-48.
- Boyd, B., Anderson, J., Wellner, J. and R. Fernández. 2008. The sedimentary record of glacial retreat, Marinelli Fjord, Patagonia: Regional correlations and climate ties. *Marine Geology*, 255, 165-178.
- Bravo, C., Rivera, A. and J. Clavero. 2006. Reconstrucción de sistemas paleo-glaciares de los Volcanes Villarrica y Mocho en la Región de Los Lagos, Chile. En: *Reconstrucciones regionales de las variaciones climáticas en América del Sur durante el Holoceno tardío: Una nueva iniciativa de PAGES*, Argentina, Malargüe, 3-8 Octubre 2006.
- Brenning, A. 2003. La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la cordillera de Santiago: Fundamentos y primeros resultados. *Revista de Geografía Norte Grande*, 30, 7-22.
- Brenning, A. 2005. Geomorphological, Hydrological and Climatic Significance of Rock Glaciers in the Andes of Central Chile (33–35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16, 231–240.
- Brenning, A. and D. Trombotto. 2006. Logistic regression modelling of rock glacier and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes. *Geomorphology*, 81, 141-154.
- Brenning, A. 2008. The impact of Mining on Rock Glaciers and Glaciers. Examples from Central Chile. En: *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science and Society*, University of California Press, USA, 196-205.
- Brock, B.W. and N.S. Arnold. 2000. A spreadsheet-based (Microsoft Excel) point surface energy balance model for glacier and snow melt studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 649-658.
- Brock, B., Rivera, A., Casassa, G., Bown, F. and C. Acuña. 2007. The surface energy balance of an active ice-covered volcano: Volcán Villarrica, southern Chile. *Annals of Glaciology*, 45, 104-114.
- Broecker, W. S. and G. H. Denton. 1990. What drives glacial cycles?: *Scientific American*, 262(1), 48-56.
- Brüggen, J. 1928. La glaciación actual y cuaternaria de la cordillera de los Andes. En: *Anales de la Universidad de Chile*, tercer trimestre, 601–684.
- Bunn, A. G. and S. J. Goetz. 2006. Trends in circumpolar satellite observed gross photosynthesis from 1982-2003: The role of cover type and vegetation density. *Earth Interactions*, 10(12):1-19.

- Carey, M. 2005. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 47, 122 – 134.
- Carrasco, J., Casassa, G. and A. Rivera. 1998. Climatología actual del Campo de Hielo Sur y posibles cambios por el incremento del efecto invernadero. *Anales Instituto de la Patagonia*, 26, 119–128.
- Carrasco, J., Casassa, G. and A. Rivera. 2002. Meteorological and Climatological aspects of the Southern Patagonia Icefields. En: Casassa, G., Sepúlveda, F., Sinclair, R. (eds.), *The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 29–41.
- Carrasco, J., Casassa, G. and J. Quintana. 2005. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933–948.
- Carrasco, J., Osorio, R. and G. Casassa. 2008. Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538 – 550.
- Carrión, D. 2007. Riesgos Naturales Asociados a Glaciares en Chile. Informe final de práctica profesional, DGA/UCHile, Santiago, 79 pp.
- Casassa, G. 1987. Ice Thickness Deduced from Gravity Anomalies on Soler Glacier, Nef Glacier and the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 43-57.
- Casassa, G. 1992. Radio-echo Sounding of Tyndall Glacier, Southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10, 69-74.
- Casassa, G. 1995. Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, 21, 317–322.
- Casassa, G. and C. Marangunic. 1987. Exploration history of the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 163-175
- Casassa, G. and C. Marangunic. 1993. The 1987 Río Colorado rockslide and debris flow, central Andes, Chile. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, XXX (3), 321 330.
- Casassa, G., Brecher, H., Rivera, A. and M. Aniya. 1997. A Century-long recession record of Glaciar O'Higgins, Chilean Patagonia. *Annals of Glaciology*, 24, 106-110.
- Casassa, G. and A. Rivera. 1998. Digital Radio-Echo Sounding at Tyndall Glacier, Patagonia. *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 26, 129-135.

- Casassa, G. and Rivera, A. 1999. Topographic mass balance model for the Southern Patagonia Icefield. Abstract International Symposium on the Verification of Cryospheric models, Bringing data and modelling scientists together, 16-20 August 1999, Zürich, p. 44.
- Casassa, G. and A. Rivera. 2001. Campo de Hielo Sur: Su historia. Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Humanas, 29, 29-78.
- Casassa, G., Damm, V., Eisenburger, E., Jenett, M., Cárdenas, C., Acuña, C., Rivera, A. and H. Lange. 2001. Estudios glaciológicos en Patagonia y Chile central utilizando un sistema aerotransportado de radio eco sondaje. Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales, 29, 25-44.
- Casassa, G., Smith, K., Rivera, A., Araos, J., Schnirch, M. and C. Schneider. 2002. Inventory of glaciers in Isla Riesco, Patagonia, Chile, based on aerial photography and satellite imagery. Annals of Glaciology, 34, 373-378.
- Casassa, G., Rivera, A., Escobar, F., Acuña, C., Carrasco J. and J. Quintana. 2003. Snow line rise in central Chile in recent decades and its correlation with climate. EAE03-A-14395, CR8-1TH2O-007, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 Abril 2003, CD-ROM.
- Casassa, G., Acuña, C., Zamora, R., Schliermann E. and A. Rivera. 2004. Ice thickness and glacier retreat at Villarrica Volcano. En: Lara L. and Clavero, J. (Eds.), Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile. SERNAGEOMIN, 61, 53-60.
- Casassa, G., Rivera, A., and M. Schwikowski. 2006. Glacier mass balance data for southern South America (30 °S - 56 °S). En: Knight, P.G. (Ed.), Glacier Science and Environmental Change, Blackwell, Oxford, UK, 239-241.
- Casassa, G., Rivera, A., Haeberli, W., Jones, G., Kaser, G., Ribstein, P. and C. Schneider. 2007a. Editorial. Current status of Andean glaciers. Global and Planetary Change, 59, 1-9.
- Casassa, G., Kilian, R., Arévalo, M., Dietrich, R., Wendt, J., Wendt, A., Pouyaud, B., Ordenes, F., Oyarzún, D., Veloso M. and A. Rivera. 2007b. Lago O'Higgins, Patagonia: glacial overdeepening and glacier retreat in a freshwater fjord. En: GEOSUR, An International Congress on the Geology and Geophysics of the Southern Hemisphere. 18-20 Noviembre 2007. Book of Abstracts, p. 27.
- Casassa, G., Leidich, J., Rivera, A., Wendt, J., Ordenes, F., Escobar, F., Guzmán, F., Carrasco, J. and P. López. 2008a. Sudden Drainage of Glacial Lake Cachet 2, Patagonia. En: Fourth EGU Alexander von Humboldt International Conference The Andes: Challenge for Geosciences FCFM Universidad de Chile, Santiago, Chile, 24-28 Noviembre 2008, p. 74.
- Casassa, G., Rivera, A., Wendt, J., Leidich, J., Ordenes, F., Escobar, F., Guzmán, F., Carrasco, J. y P. López. 2008b. Vaciamiento súbito de los lagos glaciales Cachet 2 y Témpanos, Patagonia, Chile. En: VII Encuentro Internacional de Investigadores del Grupo de Trabajo de Nieves y Hielos de América Latina del PHI-UNESCO, Manizales, Colombia, 26-30 Agosto 2008.

- Casassa, G., López, P., Pouyaud B. and F. Escobar. 2009a. Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes. *Hydrological Processes*, 23, 31–41.
- Casassa, G., Krabill, W., Rivera, A., Wendt, J., Bohn, F., Rignot, E., Thomas, R., Yungel, J., Sonntag, J., Frederick, E., Russell, R., Linkswiler, M., Arendt, A. and K. Steffen. 2009b. The Patagonian icefields: an updated assessment of sea level contribution. En: *Climate Change Global Risks, Challenges and Decisions Congress*, Copenhagen, 10-12 Marzo 2009.
- Castruccio, A., Clavero, J. and A. Rivera. 2005. Lahares Generados por la Erupción de 1971 en el Flanco Oeste del Volcán Villarrica, Andes del Sur (39,5°S). En: *Actas del XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, Tomo III. 4 pp.
- Caviedes, J. 1979. Inventario de glaciares en la hoya del río Cachapoal y predicción de la escorrentía de deshielo; Andes Centrales. *Memoria, Escuela de Geología, Universidad de Chile*, 217 pp.
- Clague, J. and Mathews, W. 1973. The magnitude of jökulhlaups. *Journal of Glaciology*, 12, 501-504.
- Clague, J. and S. Evans. 2000. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Review*, 19, 1763-1783.
- Clarke, G. 2005. Subglacial processes. *Annual Reviews of Earth Planetary Sciences*, 33, 247-276.
- Clavero, J. and H. Moreno. 2004. Evolution of Villarrica Volcano. En: L. Lara and J. Clavero (Eds.), *Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile*, Sernageomin, 61, 17-27.
- Clavero, J., Roche, O. and A. Rivera. 2008. Recent unusual fines-depleted and highly-mobile andesitic pyroclastic flows from Mocho-Choshuenco volcano, southern Andes. En: *IAVCEI General Assembly*, 18-22 Agosto, Reykjavik, Iceland.
- COCHILCO. 2007. Anuario estadístico del cobre y de otros minerales no metálicos, 1998 - 2007. Comisión Chilena del Cobre, 154. <http://www.cochilco.cl/productos/anuario.asp>
- Coe, M. 2000. Modeling Terrestrial Hydrological Systems at the Continental Scale Testing the Accuracy of an Atmospheric GCM. *Journal of Climate*, 13, 686-704.
- CONAMA. 1998. Plan de acción nacional de cambio climático 2008 – 2012. CONAMA, 86.
- Condom, T., Coudrain, A., Sicart, J.E. and S. Théry. 2007. Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10° N–50° S latitude). *Global and Planetary Change*, 59, 189–202.
- Contreras, A. and J.L. Illanes. 1992. Depósito de lastre glaciar Infiernillo Sur, mina Los Bronces. En: *Minería en altura; Proceedings, 43a Convención del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile*, La Serena, Octubre 1992, vol. 1, 18 pp. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Santiago, Chile.

- Corripio, J. 2003. Modelling the energy balance of high altitude glacierised basins in the Central Andes. PhD thesis, University of Edinburgh, 154 pp.
- Corripio, J.G. 2004. Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24): 5705-5729.
- Corripio, J. and R. Purves. 2005. Surface energy balance of high altitude glaciers in the Central Andes: the effect of snow penitents. En: de Jong, C., Collins, D., Ranzi, R. (Eds), *Climate and Hydrology in Mountain Areas*, Wiley, London, UK, Chapter 3, 15–27.
- Corripio, J, Purves, R. and A. Rivera. 2008. Modeling climate-change impacts on mountain glaciers and water resources in the Central Dry Andes". In: Orlove, B., Wiegandt, E. and Luckman, B. (Eds.), *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science and Society*, University of California Press, USA, 126-135.
- Corte, A. E. 1976. The hydrological significance of rock glaciers. *Journal of Glaciology*, 17,157–58.
- Daly, C., Gibson, W. P., Taylor, G.H., Johnson, G. L. and P. Pasteris. 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, 22, 99-113
- Denisov, L., Nosenko, G., Grechko, G., Ivanchenko, A. and V. Kotlyakov. 1987. Glaciological studies and experiments from Salyut-6 Orbital Space Station. *Polar Geography and Geology*, 11(1), 12-24.
- Diario Austral de Valdivia. 2003. Pagina web del Diario Austral de Valdivia.<http://www.australvaldivia.cl/site/edic/20030908224008/pags/20030908224822.html>revisada en Abril de 2009.
- DGA. 1975. Glaciar Echaurren Norte. Informe Interno.
- DGA (Dirección General de Aguas). 1987. Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile, 59 pp.
- DGA (Dirección General de Aguas). 1996. Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile: informe final / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, IPLA, S,I,T26.
- DGA (Dirección General de Aguas). 1999. Política Nacional de Recursos Hídricos. Documento de Discusión. Ministerio de Obras Públicas/Dirección General de Aguas.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2007a. Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras, Zona I, Regiones I a IV, Resumen ejecutivo, Ayala, Cabrera y Asociados Ltda, Ingenieros Consultores, S,I,T122.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2007b. Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras, Zona II, Regiones V a XII y Región Metropolitana, Resumen ejecutivo, Ayala, Cabrera y Asociados Ltda, Ingenieros Consultores, S,I,T 123.

- DGA (Dirección General de Aguas). 2008a. Balance glaciológico e hídrico del glaciar Nef, Campo de Hielo Norte, y catastro de glaciares de algunas cuencas de la zona central y sur del país. Serie de Informes Técnicos 166 (1-2).
- DGA (Dirección General de Aguas). 2008b. Informe derechos, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero regiones centro - norte de Chile / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Proust Consultores, S.I.T. 146.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2008c. Identificación de glaciares de roca Vol.1. Serie de Informes Técnicos 167.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2008d. Dinámica de la cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué utilizando imágenes satelitales. Serie de Informes Técnicos 169.
- DGF (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile). 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para CONAMA, 71 pp.
- Downing, T., Santibáñez, F., Romero, H., Peña, H., Gwyne, M., Ihl, M., and A. Rivera. 1994. Climate Change and Sustainable Development in the Norte Chico, Chile: Climate, Water Resources and Agriculture. Occasional paper (N°35) of the School of Geography, University of Birmingham and Research Report (N°6) of the Environmental Change unit, University of Oxford.
- Dyurgerov, M., and M.F. Meier. 2005. Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot. Occasional Paper 58, Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, CO, 118 pp.
- Eagles, P.F.J., 2004: Trends affecting tourism in protected areas. Policies, Methods and Tools for Visitor Management: En: Proceedings of the Second International Conference on Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas, Rovaniemi, Finland, 16–20 Junio, 2004, T. Sievanen, J. Erkkonen, J. Jokimaki, J. Saarinen, S. Tuulentie and E.Virtanen (Eds.), Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 2, 17-25.
- Echegaray, J. 2005. Evolución geológica y geoquímica del centro volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur, 40°S. Santiago, Chile, Universidad de Chile.
- EIA_Andina (Estudio Impacto Ambiental _ Andina). 2005. Obras Complementarias Proyecto Expansión División Andina para Ampliación Intermedia a 92 ktpd. Arcadis Geotécnica.
- EIA_Bronces (Estudio Impacto Ambiental_ Bronces). Proyecto Desarrollo Los Bronces. Arcadis Geotécnica.
https://www.eseia.cl/expediente/expedientes.php?modo=fichaandid_expediente=127andidExpediente=127.

- EIA_Pascua (Estudio Impacto Ambiental_Pascua). Modificaciones Proyecto Pascua-Lama. Arcadis Geotécnica. https://www.eseia.cl/expediente/expedientes.php?modo=fichaandid_expediente=1048260andidExpediente=1048260.
- ENDESA. 1969. Derretimiento artificial de glaciares. Informe de las experiencias realizadas en el Glaciar Coton. Informe NCC/MESV2.6.69, Santiago, 45 pp.
- Escobar, F., Vidal, F., Marín C. and R. Naruse. 1992. Water balance in the Patagonia icefield. En: *Glaciological Researches in Patagonia, 1990*. Bulletin of Glacier Research, 19, 109-119.
- Escobar, F., Casassa, G. and V. Pozo. 1995a. Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile central en las últimas dos décadas. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 24(3), 683-695.
- Escobar, F., Pozo, V., Salazar, A. and M. Oyarzo. 1995b. Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte, 1975 a 1992. Dirección General de Aguas, publicación interna, H.A. y G., 95(1), 70 pp.
- Escobar F. and P. Aceituno. 1998. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile Central durante el invierno. *Bulletin de l'Institut Francais d'Études Andines*, 27(3), 753–759.
- Escobar, F., Casassa, G. and C. Garín. 2000. 25-Year record of mass balance of Echaurren glaciar, Central Chile, and its relation with ENSO events. En: *Sixth Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. 3-7 Abril, Santiago, Chile.
- Escobar, I. 2008. Comportamiento de la precipitación y temperatura en la zona de los lagos de Chile y su relación con el retroceso de glaciares. Tesis para postular al título de Meteorólogo, Universidad de Valparaíso, 155 pp.
- Falvey, M. and R. Garreaud. 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the Southeast Pacific and along the West Coast of Subtropical South America (1979 – 2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J. and J. Umland. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review of Geophysics*, 45: RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E. and D. López 2009. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high altitude areas of Chile's Norte Chico region (26°S-32°S). *Water Resources Research*, 45, W02424.
- Fernández, A., Rivera A. and C. Ramirez. 2006. Variaciones recientes de glaciares entre 41° S y 49° S y su relación con los cambios climáticos. *Revista Geográfica*, 139, 10-34.

- Ferrando, F.J. 2003. Aspectos conceptuales y genético-evolutivos de los glaciares rocosos: Análisis de caso en los Andes semiáridos de Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 48, 43-74.
- Figueroa, R. 2008. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca - Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Chile, 285 pp.
- Floricioiu, D., Eineder, M., Rott, H. and T. Nagler. 2008. Velocities of Major Outlet Glaciers of the Patagonia Icefield Observed by TerraSAR-X. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, 4(IV), 347-350
- Forster, R., Rignot, E., Isacks B. and K. Jezek. 1999. Interferometric Radar Observations of Glaciares Europa and Penguin, Hielo Patagónico Sur, Chile. *Journal of Glaciology*, 45(150), 325 -337.
- Foster, J. 2008. A look at seasonal snow cover and snow mass in the Southern Hemisphere from 1979-2006 using SMMR and SSM/I passive microwave data. En: Fourth EGU Alexander von Humboldt International Conference "The Andes: Challenge for Geosciences", Universidad de Chile, Santiago, Chile, 24-28 Noviembre, 2008.
- Fountain, A. and J. Walder. 1998. Water flow through temperate glaciers. *Review of Geophysics*, 36, 299-328.
- Fuenzalida, H., Rütllant, J. and P. Ulriksen. 1978. Mediciones micrometeorológicas para determinar el balance de energía del glaciar Echaurren Norte: febrero-marzo 1978; CLIMDATA Ingenieros Consultores; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología.
- Fukami, H and F.Escobar. 1987. Hydrological characteristics of Soler Glacier drainage, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 91-96.
- Fukami, H. and R. Naruse. 1987. Ablation of ice and heat balance on Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 37-42.
- Gallois, L. 1901. Les Andes de Patagonie. *Annales de Géographie*, 10 (51), 232-259.
- Garín, C. 1987. Inventario de glaciares de los Andes Chilenos desde los 18° a los 32° de latitud sur. *Revista de Geografía Norte Grande*, 14, 34-48.
- Garreaud, R. and J. Rütllant. 1996. Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el período 1991-1993. *Atmósfera*, 9, 251-271.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R. and J. Marengo. 2009. Present-day South America Climate. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 281, 180-195. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

- Global Climate Observing System (GCOS), 2007. GCOS REFERENCE UPPER-AIR NETWORK (GRUAN): Justification, requirements, siting and instrumentation options, April 2007, Report GCOS 112 (World Meteorological Organization Technical Document N°1379), 25 pp.
- Giese, B.S., Urizar, S.C. and N.S. Fuckar. 2002. Southern Hemisphere origins of the 1976 climate shift. *Geophysical Research Letters*, 29(2), 1014. DOI: 10.1029/2001GL013268.
- Gilbert, J., Stasiuk, M., Lane, S., Adam, C., Murphy, M., Sparks, S. and J. Naranjo. 1996. Non-explosive, constructional evolution of the ice-filled caldera at Volcán Sollipulli, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 58, 67-83.
- Ginot, P., Kull, C., Schwikowski, M., Schotterer, U., Pouyaud, B. and H.W. Gaeggeler. 2001. Effects of post-depositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes). *Journal of Geophysical Research*, 106, 32375–32386.
- Ginot, P., Schwikowski, M., Gaggeler, H., Schotterer, U., Kull, C., Funk, M., Rivera, A., Stampfli, F. and W. Stichler. 2002. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology Atmospheric Chemistry and Climate records from Cerro Tapado glacier, Norte Chico, Chile. En: Casassa, G., F. Sepúlveda and R. Sinclair (Eds.), *The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 157-167.
- Ginot, P., Kull, C., Schotterer, U., Schwikowski, M. and H.W. Gaggeler. 2006. Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past*, 2, 21–30.
- Glasser, N.F., Jansson, K.N., Harrison, S. and A. Rivera. 2005. Geomorphological evidence for variations of the North Patagonian Icefield during the Holocene. *Geomorphology*, 71, 263-277.
- Godoi, M.A., Shiraiwa, T., Kohshima, S. and K. Kubota. 2002. Firn-core drilling operation at Tyndall glacier, Southern Patagonia Icefield. En: G. Casassa, F. Sepúlveda and R. Sinclair (Eds.), *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 149-156.
- Godoi, M.A., Carvallo, R. and M. Arevalo. 2003. Condición actual del lóbulo Zapata sur, en la zona de ablación del glaciar Tyndall, mediante radio-ecosondeo sobre la superficie glaciar. *Anales Instituto Patagonia*, 31, 5-15.
- Golder Associates. 2005. Viabilidad de manejo de los Glaciares. Proyecto Pascua Lama, Chile. Compañía Minera Nevada S. A. Santiago, 173 pp.
- Golder Associates. 2005. Informe final: Revisión geotécnica depósito de hielo Toro 1. Proyecto Pascua Lama. 30 pp.
- González-Ferrán, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile, 635 pp.

- Grosjean, M., Messerli, B. and H. Schreier. 1991. Seehochstände, Bodenbildung und Vergletscherung im Altiplano Nordchiles: Ein interdisziplinärer Beitrag zur Klimageschichte der Atacama. Erste resultate. Bamberger Geographische Schriften, 11, 99-108.
- Grosjean, M., Nuñez, L.A., Cartajena, I. and B. Messerli. 1997. Mid-Holocene climate and culture change in the Atacama desert. Northern Chile. Quaternary Research, 48, 239 - 246.
- Grove, J. 1987. Glacier fluctuations and hazards. The Geographical Journal, 153 (3), 351-367.
- Gspurning, J., Lazar, R. and Sulzer, W. 2006. Regional Climate and Snow/Glacier Distribution in Southern Upper Atacama (Ojos del Salado) - an integrated statistical, GIS and RS based approach. En: Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Austria, 56 -70.
- Gudmundsson, M., Sigmundsson, F. and H. Björnsson. 1997. Ice-volcano interaction of the 1996 Gjálp subglacial eruption, Vatnajökull, Iceland. Nature, 389, 954-957.
- Haeberli, W. 1998. Historical evolution and operational aspects of worldwide glacier monitoring. En: Haeberli, W., Hoelzle, M., Suter, S. (Eds.), Into the Second Century of Worldwide Glacier Monitoring: Prospects and Strategies. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO, Paris, 35– 51.
- Haeberli, W. 2004. Glaciers and ice caps: historical background and strategies of worldwide monitoring. En: Bamber, J.L. and Payne A.J. (eds), Mass Balance of the Cryosphere, Cambridge University Press, Cambridge, 559-578.
- Haeberli, W. 2006. Integrated perception of glacier changes: a challenge of historical dimensions. En: Knight, P. G. (ed), Glacier Science and Environmental Change, Blackwell, Oxford, 423-430.
- Haeberli, W., Frauenfelder, R., Hoelzle, M. and M. Maisch. 1999. On rates and acceleration trends of global glacier mass changes. Geografiska Annaler, 81A, 585-591.
- Haeberli, W., Cihlar, J. and R. Barry. 2000. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System. Annals of Glaciology, 31, 241-246.
- Haeberli, W., Maisch, M. and F. Paul. 2002. Mountain glaciers in global climate-related observation networks. WMO Bulletin, 51(1), 18-25.
- Hamon, W. 1961. Estimating potential evapotranspiration. Journal of the Hydraulics Division-ASCE, 87(HY3), 107-120.
- Harrison, S. and V. Winchester. 2000. Nineteenth- and twentieth-century Glacier Fluctuations and Climatic Implications in the Arco and Colonia Valleys, Hielo Patagónico Norte, Chile. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 32(1), 55-63.
- Harrison, S., Warren, C. R., Winchester, V. and M. Aniya. 2001. Onset of rapid calving and retreat of Glaciar San Quintín, Hielo Patagónico Norte, southern Chile. Polar Geography, 25(1), 54 – 61.

- Harrison, S., Glasser, N., Winchester, V., Haresign, C. W. E. and K. Jansson. 2006. A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *The Holocene*, 16(4), 611 – 620.
- Harrison, S., Winchester, V. and N. Glasser. 2007. The timing and nature of recession of outlet glaciers of Hielo Patagónico Norte, Chile, from their Neoglacial IV (Little Ice Age) maximum positions. *Global and Planetary Change*, 59, 67–78.
- Harrison, S., Glasser, N., Winchester, V., Haresign, E., Warren, C., Duller, G.A.T., Bailey, R., Ivy-Ochs, S., Jansson, K. and P. Kubik. 2008. Glaciar León, Chilean Patagonia: late-Holocene chronology and geomorphology. *The Holocene*, 18(4), 643–652.
- Hauser, A. 1985. Flujos Aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la Ladera Norte del Volcán Yates, X Región: su Implicancia en la Evaluación de Riesgos Naturales. *Revista Geológica de Chile*, 25-26, 125-133.
- Hauser, A. 1993. Remociones en Masa en Chile. Boletín no. 45. Servicio Nacional de Geología y Minería, Gobierno de Chile, 75 pp.
- Heusser, C. 1960. Late-Pleistocene Environments of the Laguna de San Rafael area, Chile. *The Geographical Review*, L(4), 555-577.
- Heusser, C. J., 1964. Some pollen profiles from the Laguna de San Rafael area, Chile. En: *Ancient Pacific Floras*, University of Hawaii Press, 95(1), 15.
- Hock, R. 2003. Temperature index modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282, 104-115.
- Holmlund, P. and H. Fuenzalida. 1995. Anomalous Glacier Responses to 20th Century Climatic Changes in Darwin Cordillera, Southern Chile. *Journal of Glaciology*, 41(139), 465-473.
- Hubbard, A. 1989. Aluvión del valle del Soler. Informe preliminar (inédito). Secretaría Ministerial de Obras Públicas, XI Región, Coyhaique. 14 pp.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J., Quincey, D., Richardson, S., Zapata, M., Santillan, N. and M. Hambrey. 2005. Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Perú. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1251-1264.
- Huggel, C., Haeberli, W., Käab, A., Heolzle, M., Ayros, E. and C. Portocarrero. 2002. Assessment of glacier hazards and glacier runoff for different climate scenarios based on remote sensing data: a case study for a hydropower plant in the Peruvian Andes. *Proceedings of EARSeL - LISSIG - Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Berna, March 11 – 13. *EARSeL eProceedings*, 2, 22-33.
- Huggel, C. 2004. Assessment of Glacial Hazards based on Remote Sensing and GIS Modeling. *Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie Und Geomorphodynamik*, Geographisches Institut der Universität Zürich, 87 pp.

- Huggel, C., Kääh, A. and N. Salzmann. 2004a. GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery. *Norwegian Journal of Geography*, 58(2), 61-73.
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääh, A., Bieri, D. and S. Richardson. 2004b. An assessment procedures for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1068-1083.
- Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeberli W., Kääh, A., Polkojov, A., Galushkin, I. and S. Evans. 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. European Geosciences Union. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5,173-187.
- Huggel, C., Ceballos, J., Pulgarín, B., Ramírez, J. and J.C. Thouret. 2007. Review and reassessment of hazards owing to volcano–glacier interactions in Colombia. *Annals of Glaciology*, 45: 128-136.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. and M. Funk. 2008. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22, 3888-3902.
- Hydrochile SA. 2009. Declaración de Impacto Ambiental. Optimización de Obras en la Central Hidroeléctrica San Andrés. SEIA, Documento número 3721340, <https://www.e-seia.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3721340>.
- IGOS. 2007. Integrated Global Observing Strategy Cryosphere Theme Report - For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth. Geneva: World Meteorological Organization. WMO/TD, 1405, 100.
- IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change. Glossary.
- IPCC. 2007. Synthesis Report. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2008. Climate Change and Water Technical Paper. IPCC Working Group II. Draft April 2008. www.ipcc.ch/meetings/session28/doc13.pdf.
- Iribarren, P. 2008. Glaciares rocosos en el semiárido chileno. Su significado climático y geomorfológico. Análisis de caso. Cuenca superior del río La Laguna. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile, Santiago, 94 pp.
- Ivins, E. R. and T. James. 2004. Bedrock response to Llanquihue Holocene and present-day glaciation in southernmost South America, *Geophysical Research Letters*, 31, L24613, doi:10.1029/2004GL021500.
- Izumi, K. and R. Naruse. 2001. Observations of ice avalanches at Soler Glaciar, northern Patagonia, November – December, 1998. In: Aniya, M. and Naruse, R. (Eds.). *Glaciological and Geomorphological Studies in Patagonia, 1998 and 1999*, 45-50.

- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. and D. Zhang. 2007. Palaeoclimate. En: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jansson, P., Hock, R. and T. Schneider. 2003. The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, 282, 116-129.
- Jenny, B., and K. Kammer. 1996. Jungquartäre Vergletscherungen. En: Amman, C., Jenny, B., Kammer, K., (Eds.), *Climate Change in den trockenen Anden*. Geographisches Institut Universität Bern, *Geographica Bernensia* G46, 1–80.
- Jones, G.A. and G.H.R. Henry, 2003: Primary plant succession on recently deglaciated terrain in the Canadian HighArctic. *Journal of Biogeography*, 30, 277-296.
- Juen, I., Kaser, G. and C. Georges. 2007. Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 37-48.
- Kääb, A., Wessels, R., Haeberli, W., Huggel, C., Kargel, J. S. and S. Khalsa. 2003. Rapid ASTER imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 84(13), 117 – 121.
- Kääb, A., Huggel, C., Gueux, S., Pual, F., Salzmann, N., Schmutz, K., Schneider, D. and Y. Weidmann. 2005a. Glacier hazard assessment in mountains using satellite optical data. *EARSel eProceedings*, 4, 79-93.
- Kääb, A., Reynolds, J. and W. Haeberli. 2005b. Glacier and Permafrost Hazards in High Mountains. En: *Global Change and Mountain Regions – A State of Knowledge Overview*. The Mountain Research Initiative. Kluwer. Vol. 23. pp 225 - 234.
- Kadota, T., Naruse, R., Skvarcam P. and M. Aniya. 1992. Ice Flow and Surface lowering of Tyndall Glacier, Southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10, 63-68.
- Keller, K., Casassa, G. and A.Rivera. 2007. Airborne laser altimetry survey of Glacier Tyndall, Patagonia. *Global and Planetary Change*, 59,101-109.
- Kilian, R., Schneider, C., Koch, J., Fesq-Martin, M., Biester, H., Casassa, G., Arevalo, M., Wendt, G., Baeza, O. and J. Behrmann. 2007. Palaeoecological constraints on late Glacial and Holocene ice retreat in the Southern Andes (53°S). *Global and Planetary Change*, 59, (1-4), 49-66.
- Kobayashi, B.S. and T. Saito. 1985. Heat Balance on Soler Glacier. *Bulletin of Glaciological Research*, 3, 46-51.
- Kobayashi, S. and R. Naruse. 1987. Ice avalanches on Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 87-90.

- Koboltschnig, G., Schöner, W., Zappa, M., Kroisleitner, C. and H. Holzmann. 2008. Runoff modelling of the glacierized Alpine Upper Salzach basin (Austria): multi-criteria result validation. *Hydrological Processes*, 22, 3950-3964.
- Kohshima, S., Yoshimura, Y. and N. Takeuchi. 2002. Glacier ecosystem and biological ice-core analysis. En: G. Casassa, F. Sepulveda and R.M. Sinclair (Eds.), *The Patagonian Icefields: A Unique Laboratory for Environmental and Climate Change Studies*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1-8.
- Kohshima, S., Takeuchi, N., Uetake, J., Shiraiwa, T., Uemura, R., Yoshida, N., Matoba, S. and M.A. Godoi. 2007. Estimation of net accumulation rate at a Patagonian glacier by ice core analyses using snow algae. *Global and Planetary Change*, 59, 236-244
- Koppes, M., Sylwester, R. and A. Rivera. 2009. Sediment yields over an advance-retreat cycle of a calving glacier, Laguna San Rafael, North Patagonian Icefield. *Quaternary research*.
- Koppes, M., Hallet, B. and J. Anderson. 2009. Synchronous acceleration of ice loss and glacial erosion, Glaciar Marinelli, Chilean Tierra del Fuego. *Journal of Glaciology* 55(190), 207-220.
- Kull, C., Grosjean, M. and H. Veit. 2000. Modeling modern and late Pleistocene glacio-climatological conditions in the north Chilean Andes (29° - 30° S). *Climatic Change*, 52, 359 – 381.
- Lara, L. 2004. Overview of Villarrica Volcano. En: Lara, L.E. and J. Clavero (Eds.), *Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile* Santiago, Sernageomin, 61, 5-12.
- Lara, A., Wolodarasky-Franke, A., Aravena, J.C., Villalba, R., Solari, M., Pezoa, L., Rivera, A. and C. LeQuesne. 2005. Climate fluctuations derived from tree-rings and other Proxy-records in the Chilean Andes: State of the art and future prospects. En: Huber, H., H. Gugman and M. Reasoner (Eds), *Global Change and Mountain Regions - A State of Knowledge Overview*. Advances in global change research, The Netherlands, 145 – 159.
- Lara, A., Villalba, R. and R. Urrutia. 2008. A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change*, 86, 331 – 356.
- Lawrence, D. B. And E.G. Lawrence. 1959 Recent glacier variations in southern South America. *American Geographical Society Southern Chile Expedition 1959, Technical Report*, 1, 1-39.
- Lawrence, D.M. and A.G. Slater, 2005: A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 32, L24401, doi:10.1029/2005GL025080.
- Leiva, J.C., Cabrera, G.A. and L. Lenzano. 1986. Glacier mass balances in the Cajón del Rubio, Andes Centrales Argentinos. *Cold Regions Science and Technology*, 13, 83–90.

- Leiva, J. and G. Cabrera. 1996. Glacier Mass Balance Analysis and Reconstruction in the Cajón del Rubio, Mendoza, Argentina. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 101-107.
- Leiva, J. C. 1999. Recent fluctuations of the Argentinian glacier. *Global and Planetary Change*, 22, 169-177.
- Leiva, J.C., Cabrera, G.A., and L. Lenzano. 2007. 20 years of mass balances on the Piloto glacier, Las Cuevas river basin, Mendoza, Argentina. *Global and Planetary Change*, 59, 10–16.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. and T. Zhang. 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Ed: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- LEN and Aasociados, Ingenieros Consultores. 2001. Manual de Carreteras, Vol. 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Departamento de Estudios, Subdirección de Desarrollo. Dirección de Vialidad. Dirección General de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas. Republica de Chile, 127-162.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J.A., Rivera, A. and J. Barichivich. 2008. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi:10.1016/j.palaeo.2008.01.039.
- Lliboutry, L. 1956. Nieves y glaciares de Chile. *Fundamentos de Glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile, 471.
- Lliboutry, L. 1958. Studies of the shrinkage after a sudden advance, blue bands and wave ogives on glacier Universidad (Central Chilean Andes). *Journal of Glaciology* 3(24) 261-270.
- Lliboutry, L. 1961. Phénomènes cryoniques dans les Andes de Santiago (Chili). *Biuletyn Peryglacjalny*, 10, 209–24.
- Lliboutry, L. 1986. Rock glaciers in the dry Andes. In *Proceedings, International Symposium 'Glacier mass balance, fluctuations and runoff'*, Alma-Ata, 30 September–5 October 1985. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy [Data on glaciological studies]* 58, 18–25, 139–144.
- Lliboutry, L., Gonzalez, O. and J. Simken. 1958. Les Glaciers du Desert Chilien. Extrait des *Comptes Rendus et Rapports, Assemblée Generale de Toronto 1957 (Gentbrugge 1958)*, IV, 291–300.
- López, P. 2007. Impact de la variabilité climatique sur la cryosphere du Campo de Hielo Norte: Apport de la télédétection. *Ecole Doctorale: Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences, Environnement*. Montpellier, Université de Montpellier 2: 143.

- Lopez, P., Sirguey, P., Arnaud, Y., Pouyaud, B. and P. Chevallier. 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). *Global and Planetary Change*, 61(3-4), 103-116.
- López R. 2001. Impactos sobre recursos hídricos de Chile central producto de los cambios climáticos. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Chile. 84.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. and T.F. Stocker. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453, 379-382.
- Lythe, M.B., Vaughan, D.G. and the BEDMAP Group. 2001. BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 106(B6), 11335-11351.
- Maizels, J. 1997. Jökulhlaups deposits in proglacial areas. *Quaternary. Science Reviews*, 16, 793-819.
- Makhlouf, Z. 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique. Paris, France, Université Paris XI Orsay, 434 pp.
- Marangunic, C. 1964. Observaciones glaciológicas y geológicas en la zona del Paso de los Cuatro Glaciares, Hielo Patagónico Sur. Tesis para optar al título de Geólogo. Santiago: Universidad de Chile, 125 pp.
- Marangunic, C. 1976. El glaciar de roca Pedregoso, río Colorado, V Región. In *Actas Congreso Geológico Chileno*, 1, D71–D80.
- Marangunic, C. 1979. Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo. Dirección General de Aguas, Publicación G-2, Santiago.
- Marangunic, C. 2007. Recomendaciones para la formación de la Unidad de Nieves y Glaciares. Dirección General de Aguas, S.I.T., 111.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Le Quesne, C., and J. Aravena. 2006. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate*, 19, 6334-6352.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Lascano, M., Delgado, S. and P. Stepanek. 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 60, 85-100.
- Masiokas, M., Rivera, A., Espizúa, L., Villalba, R., Delgado S., and J.C. Aravena. 2009. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*. doi:10.1016/j.palaeo.2009.08.006

- Matsuoka, K. and R. Naruse. 1999. Mass Balance Features Derived from a Firn Core at Hielo Patagónico Norte, South America. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 31(4), 333-340.
- Mercer, J.H. 1967. Southern Hemisphere Glacier Atlas. Technical report 67-76-ES, Earth Science laboratory, US Army Natick Lab., Mass., 325.
- Mercer, J. H. 1968. Variations of some Patagonian glaciers since the Late-Glacial. *American Journal of Science*, 266, 91-109.
- Mercer, J. 1970. Variations of some Patagonian glaciers since late-Glacial II. *American Journal of Science*, 269, 1-25.
- Messerli, B., Ammann, C., Geyh, M., Grosjean, M., Jenny, B., Kammer, K., and M. Vuille. 1998. The problem of the “Andean dry diagonal”: current precipitation, Late Pleistocene snow line, and lake level changes in the Atacama Altiplano (18°S 28°S/29°S). *Bamberger Geographische Schriften*, 15, 17–34.
- Messerli, B., Grosjean, M., Hofer, T., Nuñez, L., and C. Pfister. 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary Science Review*, 19, 459 – 479.
- Milana, J. 2004. Modelización de la deformación extensional causada por el avance catastrófico (surge) del glaciar Horcones Inferior, Aconcagua, Mendoza”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(2), 167-1.
- Milana, J. P. and A. Güell. 2008. Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de roca glaciogénicos y criogénicos, obtenidas de datos sísmicos en El Tapado, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (3), 310 – 325.
- Mohr, J.J. and R. Forsberg. 2002. Remote sensing: searching for new islands in sea ice: coastlines concealed in polar seas are nowmore accessible to cartography. *Nature*, 416, 35-35.
- Molg, T., Hardy, D.R., Cullen, N. and G. Kaser, 2005: Tropical glaciers in the context of climate change and society: focus on Kilimanjaro (East Africa). *Contribution to Mountain Glaciers and SocietyWorkshop*. California University Press, Wengen, 28 pp.
- Möller, M., Schneider, C. and R. Killian. 2007. Glacier change and climate forcing in recent decades at Gran Campo Nevado, southernmost Patagonia. *Annals of Glaciology*, 46, 136-144.
- Montecinos, A., Diaz, A. and P. Aceituno. 2000. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America base don Tropical Pacific SST. *Journal of Climate*, 13, 746 – 758.
- Montecinos, A. and P. Aceituno. 2003. Seasonality of the ENSO-Related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16, 281–296.

- MOP. 2005. Resolución N° 743, Fija tabla de equivalencias entre caudales de agua y usos que refleja las prácticas habituales en el país en materia de aprovechamiento de agua, [http://www.dga.cl/otros/documentos/res743 .pdf](http://www.dga.cl/otros/documentos/res743.pdf)
- Moreno, H. 1993. Volcán Villarrica: Geología y Riesgo Volcánico, Regiones IX y X, 39° 25' S. Mapa geológico 1:50,000 y mapa de riesgo volcánico 1:50,000, SERNAGEOMIN e INTENDENCIA IX REGIÓN, 116.
- Moreno, H. 2000. Mapa de Peligros Volcánicos del volcán Villarrica. Documentos de trabajo #17, Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:75.000.
- Moreno, H. 2004. Osorno and Calbuco volcanoes. IAVCEI General Assembly 2004 Field Guide, C4, 14.
- Moreno, H. and J. Clavero. 2006. Geología del área del Volcán Villarrica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, Carta Geológica de Chile, No. 98, escala 1:50.000.
- Moreno, H., Clavero, J., and L. Lara. 1994. Actividad explosiva postglacial del volcán Villarrica, Andes del Sur. Abstracts VIIth Chilean Geological Congress, Concepción.
- Müller, F., Caflisch, T. and G. Müller. 1977. Instructions for a compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory. Temporal Technical Secretariat for the World Glacier Inventory (TTS/WGI), Zürich, 28.
- Muñoz, J. 1994. El código de aguas de La República de Chile, en el marco de una economía social de mercado. In: Garduño, H. and F. Arreguin-Cortés. eds. *Uso Eficiente del Agua*, Montevideo, UNESCO/ ORCYT, 1994, 323-332.
- Musy, A., Favre, A., Gillardin, A., Higy, C., Picouet, C. and S. Pugin. 2002. *E-drologie, Cours d'Hydrologie Générale*. Lausanne, Département de Génie Rural. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement (IATE/HYDRAM)
- Nakajima, C. 1985. Glaciological studies in Patagonia Northern Icefield 1983-1984. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, Japan, 133.
- Naranjo, J.A. and L. Lara. 2004. August-September 2003 small vulcanian eruption at the Nevados de Chillán Volcanic Complex (36°50'S), Southern Andes (Chile). *Revista Geológica de Chile*, 31(2), 359-366.
- Naranjo, J.A. and H. Moreno. 2004. Laharic debris-flows from Villarrica Volcano. En: Lara, L.E. and J. Clavero (Eds), *Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile*, Santiago, Sernageomin, 61, 28-45.
- Naranjo, J., Moreno, H. and N. Bamks. 1993. La erupción del Volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aysén, Chile. *SERNAGEOMIN*, 44, 1-50.
- Naranjo, J.L., Sigurdsson, H., Carey, S.N. and W. Fritzl. 1986. Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233(4767), 961-963.

- Naruse, R. 1985. Flow of Soler and San Rafael Glacier. In: *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, Japan, 64-69.
- Naruse, R. 1987. Characteristics of Ice Flow of Soler Glacier, Patagonia, *Bulletin of Glacier Research*, 4, 79-85.
- Naruse, R., Peña, H., Aniya, M. and J. Inoue. 1987. Flow and Surface Structure of Tyndall Glacier, the Southern Patagonia Icefield, *Bulletin of Glacier Research*, 4, 133-140.
- Naruse, R., Aniya, M., Skvarca, P. and G. Casassa. 1995. Recent Variations of Calving Glaciers in Patagonia, South America, Revealed by Ground Surveys, Satellite-data Analyses and Numerical Experiments, *Annals of Glaciology*, 21, 297-303.
- Naranjo, J. and C. Stern. 1998. Holocene explosive activity of Hudson volcano, southern Andes. *Bulletin of Volcanology*, 59, 291-306.
- Naruse, R. 2006. The response of glaciers in South America to environmental change. In: Knight, P. (Ed.), *In Glaciers and Earth's Changing Environment*. Blackwell, Oxford, UK, 231-238.
- Nash, J. and J. Stedinger. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1-a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282 - 290.
- Naudon C. 2004. Análisis probabilístico del efecto del cambio climático global en los caudales medios diarios de una cuenca pluvial. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Chile, 105.
- Nogami, M. 1976. Altitude of the modern snowline and Pleistocene snowline in the Andes. *Geographical Reports of the Tokyo Metropolitan University*, 11, 71 - 86.
- Noveroy, C. 1987. Inventario de glaciares de la Hoya del río Mataquito. Dirección General de Aguas, Publicación interna, EH 87/1, 38.
- Novoa, JE. 2008. Cambio Climático del Ecosistema Semiárido Transicional en Chile (IV Región de Coquimbo), mediante Análisis de Tendencia de Caudales Naturales. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional de Cuyo, 1-119.
- Nichols, R.L. and M.M. Miller 1951. Glacial geology of Ameghino Valley, Lago Argentino, Patagonia. *Geographical Review*, 4(1), 274-294.
- Nichols, R.L. and M.M. Miller 1952. Advancing glaciers and nearby simultaneously retreating glaciers. *Journal of Glaciology*, 2(11), 41-50.
- Nicholson, L., Marin, J., Lopez, D., Rabatel, A., Bown, F. and A. Rivera. 2009. Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison to central Chile. *Annals of Glaciology* 50(53): 111-118.
- Nishida, K., Satow, K., Aniya, M., Casassa, G. and T. Kadota 1995. Thickness Change and Flow of Tyndall Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 13, 29-34.

- Nuñez, L., Grosjean, M. and I. Cartagena 2002. Human occupations and climate change in the Puna de Atacama, Chile. *Science*, 298, 821– 824.
- Oerlemans, J. and E. Klok 2002. Energy balance of a glacier surface: analysis of Automatic Weather Station data from the Morteratschgletscher, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 34(4), 477-485.
- Ohata, T., Enomoto, H. and H. Kondo 1985. Characteristics of ablation at San Rafael Glacier. *Bulletin of Glaciological Research*, 3, 37-45.
- Ohata, T., Kobayashi, S., Enomoto, H., Kondo, H., Saito, T. and C. Nakajima 1985 b. The east-west contrast in meteorological conditions and its effect on glacier ablation. *Bulletin of Glaciological Research*, 3, 52-56.
- Ohmura, A. 2004. Cryosphere during the twentieth century. In: *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics* [Sparks, R.S.J. and C.J. Hawkesworth (eds.)]. Geophysical Monograph 150, International Union of Geodesy and Geophysics, Boulder, CO and American Geophysical Union, Washington, DC, 239-257.
- Orihashi, Y., Naranjo, J., Motoki, A., Sumino, H., Hirata, D., Anma, R. and K. Nagao 2004. Quaternary volcanic activity of Hudson and Lautaro Volcanoes, Chilean Patagonia: new constraints from K–Ar ages. *Rev. Geol. Chile*, 31, 207–224.
- Østrem, G. and M. Brugman 1991. Glacier mass-balance measurements: a manual for field and office work, NHRI Science Report.
- Paskoff, R. 1993. Geomorfología de Chile semiárido. Universidad de La Serena, Chile, 321.
- Paterson, W.S.B. 1994. *The Physics of Glaciers*. Pergamon Press, London, 480.
- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T. and W. Haeberli. 2002. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory I: Methods. *Annals of Glaciology*, 34, 355-362.
- Paul, F., Kääb, A., Rott, H., Shepherd, A. and T. Strozzi 2008. GlobGlacier: A new ESA project to map the worlds glaciers from space. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-10444.
- Paul, F., Barry, R., Cogley, G., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., Ommanney, S., Raup, B., Rivera, A. and M. Zemp. 2009. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology* 50 (53).
- Paskoff, R. 1967. Notes de morphologie glaciaire dans la haute vallée du Rio Elqui (Province de Coquimbo, Chili). *Bull. Ass. Géog. Français*, 350(351), 44-55
- Payne, D. 1998. Climatic implications of rock glaciers in the arid Western Cordillera of the Central Andes. *Glacial Geology and Geomorphology*. rp03/1998 <http://ggg.qub.ac.uk/ggg/papers/full/1998/rp031998/rp03.htm>.

- Pellicciotti, F., Burlando, P. and K. Van Vliet. 2007. Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, central Chile. In: Glacier Mass Balance Changes and Meltwater Discharge (ed. by P. Ginot and J. E. Sicart) IAHS, 318, 17-38.
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J.-E. and M. Carenzo 2008. A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*, 22, 3980-3997.
- Peña, H. 1980. Situación de los glaciares del estero Aparejo, río Yeso. Informe Interno, Dirección General de Aguas, Centro de Información Recursos Hídricos, Área de Documentación, GLA-4+4' c.1, 9 pp.
- Peña, H. and F. Escobar 1983. Análisis de las Crecidas del Río Paine, XII Región. Publicación Interna N° 83/7, Estudios Hidrológicos, Departamento Hidrología, DGA, Santiago.
- Peña H., Vidal F. and F. Escobar. 1985a. Estimación de tasas de derretimiento de nieve, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, VII Congreso Nacional 1985.
- Peña H., Escobar F. and F. Vidal. 1985b. Procedimiento para la estimación de crecidas en cuencas nivales, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, VII Congreso Nacional 1985.
- Peña, H., Vidal, F. and F. Escobar 1986. Caracterización del manto nival y mediciones de ablación y balance de masa glaciario en glaciar Echaurren Norte. In: Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur. Programa Hidrológico Internacional, UNESCO.
- Peña, H. and F. Escobar 1987. Análisis del Aluvión de Mayo de 1985 del río Manflas cuenca del río Copiapó. Publicación Interna N° 87/3 Estudios Hidrológicos, Departamento de Hidrología, DGA, Santiago.
- Peña, H. and N. Nazarala 1987. Snowmelt-runoff Simulation Model of a Central Chile Andean Basin with Relevant Orographic Effects. In: Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. Proceedings of the Vancouver Symposium, IAHS Publications, 166, 161-172.
- Peña, H. and W. Klohn 1990. Hidrología de desastres en Chile: crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(1), 21-38.
- Perrin, C., Michel, C. and V. Andréassian 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Paris, France, Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16.
- Pezoa, L. 2003. Recopilación y análisis de la variación de las temperaturas (período 1965 – 2001) y las precipitaciones (período 1931 – 2001) a partir de la información de estaciones meteorológicas de Chile entre los 33° y 53° de latitud Sur. Tesis de Grado presentada como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral, Chile, 146.

- Philippi, R. 1863. Exkursion nach den Bädern und dem Neuen Vulkan von Chillan in Chile, im Spätsommer 1862 gemacht. Petermann's Geographische Mittheilungen, 241-257.
- Pisano, E. 1978. Establecimiento de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Blume (coigüe de Magallanes) en un valle en proceso de desglaciación. Anales Instituto Patagonia (Chile), 9,107-128.
- Plafker, G., Ericksen, G.E. and J. Fernández Concha. 1971. Geological aspects of the May 31, 1970, Perú earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 61(3), 543-578.
- Poeppig, E. 1960. Un testigo en la alborada de Chile (1826-1829). Santiago: Zig-Zag, Versión castellana, notas e ilustraciones de Carlos Keller, 507.
- Popovnin, V., Danilova, T. and D. Petrakov. 1999. Pioneer mass balance estimate for a Patagonian glacier: Glaciar de los Tres, Argentina, Global and Planetary Change, 22, 255-267.
- Porter, C. and A. Santana. 2003. Rapid 20th century retreat of Ventisquero Marinelli in the Cordillera Darwin Icefield. Anales del Instituto de la Patagonia, 31, 17-26.
- Post, A., Richardson, D., Tangborn, W.V. and F.L. Rosselot. 1971. Inventory of glaciers in the North Cascades, Washington. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper , 705-A.
- Post, A. and E. Lachapelle. 2000. Glacier Ice in Association with the International Glaciological Society, Cambridge-England. Revised Edition. University of Washington Press, Seattle. pp. 108-110.
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gómez, J., Rosas, G., Suarez, W. and P. Ribstein 2005. Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. Hydrological Sciences Journal, 50, 999-1022.
- Privette, J. L., J.T. Morrisette, C. Justice & D. Starr. 1999. EOS Global Land Validation Network. Proc. Int. Geosci. Remote Sens., Symp. (IGARSS '99), Hamburg, Germany, 28 June- 2 July.
- Puig, A. and P. Valdivia. 1977. Estudio geomorfológico y glaciológico en la zona de la Laguna Negra. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Taller de Título, GL 697-GL 698.
- Quincey, D., Lucas, R., Richardson, S., Glasser, N., Hambrey, M. and J. Reynolds. 2005. Optical remote sensing techniques in high-mountain environments: application to glacial hazards. Progress in Physical Geography, 29(4), 475–505.
- Quintana, J. 2004. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias. Departamento de Geofísica. Santiago, Universidad de Chile, 93.
- Quintana, J. and P. Aceituno. In press. Changes in the rainfall regime in Central Chile (30°S – 43°S). Journal of Climate.

- Quinteros, C. 1991. Estudio de los lahares del Volcán Llaima, IX Región de la Araucanía. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 103 pp.
- Rabassa, J., Rubulis, S. and J. Suarez 1981. Moraine in-transit as parent material for soil development and the growth of valdivian rain forest on moving ice: Casa Pangué glacier, Mount Tronador (Lat. 41°10'S), Chile. *Annals of Glaciology*, 2, 97-102.
- Rasmussen, L., Conway, H. and C. Raymond 2007. Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. *Global and Planetary Change*, 59, 203-216.
- Raymond, C., Neumann, T., Rignot, E., Echelmeyer, K., Rivera, A. and G. Casassa. 2005. Retreat of Tyndall Glacier, Patagonia, over the last half century. *Journal of Glaciology*, 51(173), 239-247.
- Reid, P.C., M. Edwards, H.G. Hunt and A.J. Warner, 1998: Phytoplankton change in the North Atlantic. *Nature*, 391, 546-546.
- Reynolds, J.M. 1999. Glacial hazard assessment at Tsho Rolpa, Rolwaling, Central Nepal. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 32(3), 209-214.
- Reynolds Geo-Sciences Ltd. (RGSL). 2003. Development of glacial hazard and risk management protocols in rural environments – Guidelines for the management of glacial hazards and risks. RGSL, Mold, United Kingdom. 62 pp.
- Richardson, S.D. and J.M. Reynolds. 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quatern. Int.*, 65/66, 31-47.
- Rignot, E., Foster, R. and B. Isacks. 1996. Interferometric radar observations of Glaciar San Rafael, Chile. *Journal of Glaciology*, 42(141), 279-291.
- Rignot, E., Foster, R. and B. Isacks. 1996. Mapping of glacial motion and surface topography of Hielo Patagónico Norte, Chile, using satellite SAR L-Band interferometry data. *Annals of Glaciology*, 23, 209-216.
- Rignot, E., Rivera, A. and G. Casassa 2003. Contribution of the Patagonia icefields of South America to global sea level rise. *Science*, 302, 434-437.
- Rignot, E., Bamber, J.L., van den Broeke, M.R., Davis, C., Li, Y., van de Berg, W.J. and E. van Meijgaard. 2008. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modeling. *Nature Geoscience*, 1, 106-110, doi:10.1038/ngeo102.
- Rivera, A. 1989. Inventario de glaciares entre las cuencas de los ríos Bio Bio y Petrohué. Su relación con el volcanismo activo: Caso del volcán Lonquimay. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile, Santiago, 201.
- Rivera, A. 1992. El Glaciar Pío XI: avances y retrocesos, el impacto sobre su entorno durante el presente siglo. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 36, 33-62.

- Rivera, A. 2004. Mass balance investigations at Glaciar Chico, Southern Patagonia Icefield, Chile. PhD thesis, University of Bristol, UK, 303.
- Rivera, A., Aravena, J. and G. Casassa 1997a. Recent Fluctuations of Glaciar Pío XI, Patagonia: Discussion of a Glacial Surge Hypothesis. *Mountain Research and Development*, 17(4), 309-322.
- Rivera, A., Lange, H., Aravena, J. and G. Casassa. 1997b. The 20th Century Advance of Glaciar Pío XI, Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, 24, 66-71.
- Rivera, A. and G. Casassa. 1999. Volume changes on Pío XI glacier, Patagonia: 1975–1995, *Global and Planetary Change*, 22, 233–244.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C. and H. Lange. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista de Investigaciones Geográficas*, 34, 29–60.
- Rivera, A., Casassa, G. and C. Acuña. 2001. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. *Revista Investigaciones Geográficas*, 35, 67-100.
- Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G. and F. Bown. 2002. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, 367–372.
- Rivera, A. and G. Casassa. 2002. Detection of Ice Thickness using radio echo sounding on the Southern Patagonia Icefield. In: G. Casassa, F. Sepúlveda and R. Sinclair (Eds.) *The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 101-115.
- Rivera, A. and G. Casassa. 2004. Ice elevation, areal, and frontal changes of glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(4), 379-389.
- Rivera A. and J. Wendt. 2008. Historical Fluctuations and geophysical airborne survey of western glaciers, Chilean Patagonia (48-54°S)". Fourth EGU Alexander von Humboldt International Conference "The Andes: Challenge for Geosciences". Chile, Santiago, November 24-28.
- Rivera, A., Bown, F., Casassa, G., Acuña, C. and J. Clavero. 2005. Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S). *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 963-974.
- Rivera, A., Acuña, C. and G. Casassa. 2006a. Glacier variations in central Chile (32°S–41°S). In: Knight, P.G. (ed.), *Glacier Science and Environmental Change*. Blackwell, Oxford, UK, 246–247.
- Rivera, A., Bown, F., Mella, R., Wendt, J., Casassa, G., Acuña, C., Rignot, E., Clavero, J. and B. Brock. 2006b. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111–122.
- Rivera, A., Bown, F., Wendt, J., Acuña, C., Clavero, J., Naranjo J.A. and E. Rignot. 2006c. Volcán Hudson glacier responses after recent plinian eruptions, Southern Chile. IGS International Symposium on Earth and Planetary ice - volcano interactions. 19-23 June, Reykiavik, Iceland.

- Rivera, A., Benham, T., Casassa, G., Bamber, J., and J. Dowdeswell. 2007. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia icefield, Chile. *Global and Planetary Change*, 59, 126-137.
- Rivera, A., Bown, F., Acuña, C. and F. Ordenes. 2008a. Chilean glaciers as indicators of climate change. *Terra Glacialis*, 11, 193-207.
- Rivera, A., Corripio, J. G., Brock, B., Clavero, J. and J. Wendt 2008b. Monitoring ice capped active Volcán Villarrica in Southern Chile by means of terrestrial photography combined with automatic weather stations and GPS. *Journal of Glaciology*, 54(188), 920–930.
- Rivera, A., Aravena, J. C. and J. Wendt. 2008c. Historical fluctuations and geophysical airborne survey of western glaciers, Chilean Patagonia (48°-54°S). En: 4th Alexander von Humboldt International Conference handbook, Santiago, Chile, 24-28 Noviembre 2008, 44.
- Roberts, M. 2005. Jökulhlaups: a reassessment of floodwater flow through glaciers. *Reviews of Geophysics*, 43, 1-21.
- Rosenblüth, B., Casassa, G. and H. Fuenzalida. 1995. Recent climate changes in Western Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 13, 127-132.
- Rosenblüth, B., Fuenzalida, H. and P. Aceituno. 1997. Recent Temperature Variations in South America. *International Journal of Climatology*, 17, 67-85.
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T.L., Seguin, B. and P. Tryjanowski. 2007. Assessment of Observed Changes and Responses in Natural and Managed Systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131.
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., Menzel, A., Root, T.L., Estrella, N., Seguin, B., Tryjanowski, P., Liu, C., Rawlins, S. and A. Imeson. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453, 353-358.
- Rott, H., Stuefer, M., Siegel, A., Skvarca, P. and A. Eckstaller. 1998. Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield. *Geophysical Research Letters*, 25(9), 1407-1410.
- Rütlant, J. and H. Fuenzalida. 1991. Synoptic aspects of the Central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11, 63-76.
- Saito, T. and S. Kobayashi. 1985 Hydrological observations at Soler Glacier. *Bulletin of Glaciological Research*, 3, 57-63.

- Sanguinetti, R. 1994. Anomalías térmicas: su relación con la pluviometría regional y con el efecto invernadero en Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geofísica. Universidad de Chile, 103.
- Salzmann, N., Kääb, A., Huggel, C., Allgöwer, B. and W. Haeberli. 2004. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling. *Norsk Geografisk Tidsskrift—Norwegian Journal of Geography*, 58, 74–84.
- Santana, A. 1984. Variación de las precipitaciones de 97 años en Punta Arenas como índice de posibles cambios climáticos. *Anales del Instituto de la Patagonia, Ser. Cs. Nat.*, 15, 51-60.
- Santibañez, P., Kohshima, S., Scheihing, R., Jaramillo, J., Shiraiwa, T., Matoba, S., Kanda, D., Labarca, P. and G. Casassa. 2008. Glacier mass balance interpreted from biological analysis of firn cores in the Chilean Lake District. *Journal of Glaciology*, 54(186), 452-462.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M. & Musy, A. 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 95-109.
- Schläppi, M., Casassa, G., Rivera, A., Grauel, A. and M. Schwikowski. 2008. First results of the ice core from Pío XI, Southern Patagonian Ice Fields. Paul Scherrer Institut, Annual Report 2008.
- Schneider, C., and D. Gies. 2004. Effects of El Niño-Southern Oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP-NCAR reanalysis and weather station data. *International Journal of Climatology*, 24, 1057–1076.
- Schneider, C., Schnirch, M., Acuña, C., Casassa, G. and R. Kilian. 2007a. Glacier inventory of the Gran Campo Nevado Ice Cap in the Southern Andes and glacier changes observed during recent decades. *Global and Planetary Change*, 59, 87-100.
- Schneider, C., Kilian, R., Glaser, M. 2007b. Energy balance in the ablation zone during the summer season at the Gran Campo Nevado Ice Cap in the Southern Andes. *Global and Planetary Change*, 59: 175-788.
- Schröder, H. 1999. Vergleichende Periglazialmorphologie im Sommerregengebiet der Atacama. *Erdkunde*, 53, 119-135.
- Schröder, H. 2001. Vergleichende Periglazialmorphologie im Winterregengebiet der Atacama. *Erdkunde*, 55, 311-326.
- Schotterer, U., Grosjean, M., Stichler, W., Ginot, P., Kull, C., Bonnaveira, H., Francou, B., Gäggeler, H. W., Gallaire, R., Hoffmann, G., Pouyaud, B., Ramírez, E., Schwikowski, M. and J. D. Taupin 2003. Glaciers and climate in the Andes between the Equator and 30°S: What is recorded under extreme environmental conditions? *Climatic Change*, 56, 157-175.

- Schworer, D.A. 1997. Bergfuhrer und Klimaänderung: eine Untersuchung im Berninagebiet über mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Bergfuhrerberuf (Mountain guides and climate change: an inquiry into possible effects of climatic change on the mountain guide trade in the Bernina region, Switzerland). Diplomarbeit der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- Schuler, T. 2002. Investigation of water drainage through an alpine glacier by tracer experiments and numerical modelling. PhD thesis, University of Freiburg, Germany, 140 pp.
- Schwikowski, M., Brütsch, S., Saurer, M., Casassa, G. and A. Rivera. 2003. First shallow firn core record from Gorra Blanca, Patagonia. EAE03-A-01427;CR8-1TU1P-1594; Poster, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April 2003, CD-ROM.
- Schwikowski, M., Brütsch, S., Casassa, G. and A. Rivera. 2006. A potential high-elevation ice core site at Hielo Patagónico Sur. *Annals of Glaciology*, 43, 8-13.
- Schwikowski, M., Jenk, T., Rufibach, B., Casassa, G., Rivera, A., Rodriguez, M., and J. Wendt. 2007. A new 50 m long ice core from the Southern Patagonian Icefield. Annual Report of the Paul Scherrer Institute, Villigen.
- Session, M. 1999. Report on Glacier Benito. Joint Services expedition Chilean Patagonia 1972-1973.
- Shipton, E. 1959. Explorations in Patagonia. *Geographical Journal*, 125, 312-325.
- Shipton, E. 1962. Across the Patagonian Icecap. (O'Higgins) *American Alpine Journal*, 13, 119-128.
- Shipton, E. 1963. *Land of Tempest: Travels in Patagonia 1958-1962*. London: Hodder and Stoughton, 224 pp.
- Shipton, E. 1964. Crossing the North Patagonian ice cap. *Alpine Journal*, 69(309), 183-190.
- Shiraiwa, T., Kohshima, S., Uemura, R., Yoshida, N., Matoba, S., Uetake, J. and M. Godoi. 2002. High net accumulation rates at the Campo de Hielo Patagónico Sur, South America, revealed by analyses of a 45.97m long ice core. *Annals of Glaciology*, 35, 84-90.
- Singh, P., Kumar, N. 1996. Determination of snowmelt factor in the Himalayan region. *Hydrological Sciences Journal*, 41(3), 301-310.
- Singh, P., Kumar, N., Arora, M. 2000a. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas. *Journal of Hydrology*, 235, 1-11.
- Singh, P., Kumar, N., Ramasastri, K.S., Singh, Y. 2000b. Influence of a fine debris layer on the melting of snow and ice on a Himalayan glacier. In: Nakawo, M., Raymond, C.F., Fountain, A. (Eds.), *Debris-covered Glaciers, Proceedings of the Workshop on Debris-covered Glaciers, Seattle, 2000: IAHS Publ. 264*, 63-69.

- Skvarca, P., Rott, H. and T. Nagler. 1995a. Drastic retreat of Upsala Glacier, Southern Patagonia, revealed by ERS-1 images and field survey. *SELPER*, 11(1-2), 51-55.
- Skvarca, P., Rott, H. and M. Stuefer. 1995b. Sinergy of ERS-1 SAR, Landsat TM imagery and aerial photography for glaciological studies of Viedma Glacier, Southern Patagonia. *Actas, VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, SELPER, Puerto Vallarta, México, 7-11 Noviembre 1995, 674-682.
- Skvarca, P. and R. Naruse 1997. Dynamic behaviour of Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, 24, 268-271.
- Skvarca, P. 2002. Importancia de los glaciares del hielo patagónico sur para el desarrollo regional. XV Congreso Geológico Argentino (El Calafate, 2002) *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz - M.J. Haller (Editor), Relatorio*, 1, 1-14
- Skvarka, P. and H. De Angelis. 2002. Fifteen Year Changes of Southern Patagonia Icefield Glaciers, Argentina-Chile, Detected from Landsat TM Mosaics. *Proceedings 29th International Simposium on Remote Sensing of Environment (29th ISRSE)*, 8-12 April 2002, Buenos Aires, Argentina (on CD-ROM).
- Skvarca, P., Naruse, R. and H. Angelis. 2004. Recent thickening trend of Glaciar Perito Moreno, southern Patagonia. *Bulletin Glaciological Research*, 21, 45-48.
- Stieffel, J. 1962. Lahares glaciovolcánicos recientes y depósitos comparables del pleistoceno chileno. *Revista Geológica de Chile*, 1-II. Santiago, Chile. pp. 8 – 15.
- Stowhas, L. 1986. Crecidas de deshielo. *Jornadas de Hidrológica de Nieves y Hielos en América del Sur*. In: Programa Hidrológico Internacional, UNESCO.
- Stern, N. 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cabinet Office - HM Treasury. Cambridge University Press, Cambridge.
- Straile, D., K. Johns and H. Rossknecht. 2003: Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. *Limnol. Oceanogr.*, 48, 1432-1438.
- Strelin, J., Casassa, G., Rosqvist, G. and P. Holmlund. 2008. Holocene “GLACIATIONS” in the Ema Glacier valley, Monte Sarmiento Massif, Tierra del Fuego. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260(3-4), 299-314.
- Strelin, J., Iturraspe, R. 2007. Recent evolution and mass balance of Cordón Martial glaciers, Cordillera Fueguina Oriental. *Global and Planetary Change*, 59 (1-4), 17-26.
- Stuefer, M. 1999. *Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based on Field Measurements and Satellite Imagery*. PhD dissertation, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck, 173.
- Suarez, W. 2007. *Le bassin versant du fleuve Santa (Andes du Pérou): dynamique des écoulements en contexte glacio-pluvio-nival*. Thèse, Université Montpellier 2, Terre Solide, Géodynamique des Enveloppes Supérieures, Paléobiosphère, 285.

- Suarez, W., Chevallier, P., Pouyaud, B. and P. Lopez. 2008. Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin. (White Cordillera, Peru). *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 266-277.
- Takeuchi, Y., Naruse, R. and K. Satow. 1995. Characteristics of heat balance and ablation on Moreno and Tyndall glaciers, Patagonia, in the summer 1993/94. *Bulletin of Glacier Research*, 13, 45-56.
- Takeuchi, Y., Naruse, R. and P. Skvarca. 1996. Annual air-temperature measurement and ablation estimate at Moreno Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 14, 23-28.
- Tanaka, K. 1961. Geographical Contribution to a Periglacial Study of the Hielo Patagónico Norte with Special Reference to the Glacial Outburst Originated from Glacier-Dammed Lago Arco, Chilean Patagonia. Faculty of Economics, Kobe University. Japan, 109.
- Tapia, G. 2004. Inventario de Glaciares del Río Maule. Unpublished report, DGA/MOP, Santiago, 41.
- Thomas, J. and Chamling, S. 2005. An overview of glaciers, glacier retreat, and subsequent impacts in Nepal, India and China. WWF Nepal Program. 79 pp.
- Thomsen, H.H., Thorning, L. and Olesen O.B. 1989. Applied glacier research for planning hydro-electric power, Ilulissat/Jakobshavn, West Greenland, *Annals of Glaciology*, 13, 257-261.
- Thorarinsson, S. 1939. The ice-dammed lakes of Iceland, with particular reference to their value as indicators of glacier oscillations. *Geografiska Annaler*, 21A, 216-242.
- Thornthwaite, C. and J. Mather. 1955. The water balance. *Climatology* 8: 1 - 104.
- Thouret, J., Ramírez, J., Gibert-Malengraeu, B., Vargas, C., Naranjo, J., Vandemeulebrouck, J., Valla A, F. and M. Funk. 2007. Volcano–glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology*, 45, 115-127.
- Trombotto, D. 2002. El ambiente criogénico actual y el paleopermafrost en el extremo austral de América del Sur. En IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales. Darío Trombotto y Ricardo Villalba, editores, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Mendoza, Argentina, 65-69.
- Trombotto, D. 2006. Argentina (and South American partners). *News from Members. Frozen Ground*, 30, 19.
- Tweed, F. and A. Russell. 1999. Controls on the formation and sudden drainage of glacier-impounded lakes: implications for jökulhlaup characteristics. *Progress in Physical Geography*, 23(1), 79-110.
- UCHILE (Universidad de Chile). 2007. Línea de base del medio físico en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico Aysén. Santiago, Chile.

- UNEP. 2007. Global Outlook for Ice and Snow. UNEP/GRID-Arendal, Norway, 235.
- UNESCO. 1982. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Estudios e informes en hidrología. UNESCO, Montevideo, Uruguay, 130 pp.
- Urrutia, R. and L. Lanza. 1993. Catástrofes en Chile: 1541-1992. 1a. ed. Editorial La Noria. Santiago, 440.
- USGS (United States Geological Survey). 1998. Glaciers of South America. Satellite Image Atlas of glaciers of the world. In: Williams, R.S., Ferrigno, J.G. (Eds.), United States Geological Survey (USGS) Professional Paper, 1386-I, 1206.
- Vallon, M. and C. Vincent. 2005. Balance invernal 2005 de los glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco. Proyecto Pascualama, tercera región, Chile. Informe preparado para la junta de vigilancia de la cuenca del río Huasco y sus afluentes, 18 pp.
- Van der Veen, C. 1999. Fundamentals of Glacier dynamics. Balkema, Rotterdam, 462.
- Valdivia, P. 1984. Inventario de Glaciares, Andes de Chile Central (32°-35° lat. S). Hoyas de los ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal y Tinguiririca. In: Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur. Programa Hidrológico Internacional, Santiago de Chile, 1, 6.1–6.24.
- Veit, H. 1993. Upper Quaternary landscape and climate evolution in the Norte Chico (Northern Chile): an overview. Mountain Research and Development, 13(2), 139–144.
- Villa, S., Vighi, M., Maggi, V., Finizio, A. and E. Bolzacchini. 2003. Historical trends of organochlorine pesticides in an Alpine Glacier. Journal of Atmospheric Chemistry, 46, 295 – 311.
- Villalba, R., Cook, E., Jacoby, G., D'Arrigo, R., Veblen, T. and P. Jones. 1998. Tree-ring based reconstructions of northern Patagonia precipitation since ad 1600. The Holocene, 8 (6), 659 – 674.
- Vimeux, F., de Angelis, M., Ginot, P., Magand, O., Casassa, G., Pouyaud, B., Falourd, S. and S. Johnsen. 2008. A promising location in Patagonia for paleoclimate and paleoenvironmental reconstructions revealed by a shallow firn core from Monte San Valentín (Northern Patagonia Icefield, Chile). Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 113, 16, D16118, DOI: 10.1029/2007JD009502.
- Vincent, W.F., J.A.E. Gibson and M.O. Jeffries. 2001: Ice-shelf collapse, climate change and habitat loss in the Canadian high Arctic. *Polar Rec.*, 37, 133-142.
- Vivero, S. 2008. Inventario de glaciares descubiertos de la cuenca del río Copiapó y variaciones recientes en sus frentes. Informe final de práctica profesional. DGA/Universidad de Chile, 51 pp.
- Wada, Y. and M. Aniya. 1995. Glacier Variations in the Northern Patagonia Icefield between 1990/91 and 1993/94. Bulletin of Glacier Research, 13, 111-119.

- Walder, J. R. Lahusen, J. Vallance and S. Schilling. 2007. Emplacement of a silicic lava dome through a crater glacier: Mount St. Helens, 2004-06. *Annals of Glaciology*, 45, 14-20.
- Wang, X., Xu, B., Kang, S., Cong, Z. and T. Yao. 2008. The historical residue of DDT, hexachlorocyclohexanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in an ice core from Mt. Everest, central Himalayas, China. *Atmospheric Environment*, 42, 6699–6709.
- Warren, C. 1991. Terminal environment, topographic control and fluctuations of West Greenland glaciers. *Boreas*, 20(1), 1 – 15.
- Warren, C. 1993. Rapid recent fluctuations of the calving San Rafael Glacier, Chilean Patagonia: climatic or non-climatic? *Geografiska Annaler*, 75A(3), 111–125.
- Warren, C. and D. Sugden. 1993. The Patagonian icefields: a glaciological review. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 25(4), 316-331.
- Warren, C. and A. Rivera. 1994. Non linear climatic response of calving glaciers: A case study of PIO XI Glacier, Chilean Patagonia. *Revista chilena de Historia Natural*, 67, 385-394.
- Warren, C., Glasser, N., Harrison, S., Winchester, V., Kerr, A. and A. Rivera. 1995. Characteristics of tide-water calving at Glaciar San Rafael, Chile. *Journal of Glaciology*, 41(138), 273-289.
- Warren, C., Rivera, A. and A. Post. 1997. Greatest Holocene Advance of Glaciar Pío XI, Chilean Patagonia: Possible causes. *Annals of Glaciology*, 24, 11-15.
- Warren, C. and M. Aniya. 1999. The calving glaciers of South America. *Global and Planetary Change*, 22(1-4), 59-77.
- Warren, C., D. Benn, V. Winchester and S. Harrison (2001). "Buoyancy-driven lacustrine calving, Glaciar Nef, Chilean Patagonia." *Journal of Glaciology* 47(156): 135 - 146.
- Watson, R.T. and W. Haeberli. 2004. Environmental threats, mitigation strategies and high mountain areas. *Mountain Areas: A Global Resource. Ambio*, 13, 2-10.
- Waylen, P. and G. Poveda. 2002. El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South America hydro-climatology. *Hydrological Processes*, 16, 1247–1260.
- WGMS. 2008. Global Glacier Changes: facts and figures. World Glacier Monitoring Service, UNEP. ISBN: 978-92-807-2898-9.
- Williams, R. 1987. Background to the soviet Glaciological studies from Salyut-6 Orbital Space Station. *Polar Geography and Geology*, 11(1), 1-11.
- Winchester, V. and S. Harrison. 1996. Recent oscillations of the San Quintín and San Rafael glaciers, Patagonian Chile. *Geografiska Annaler*, 78a (1), 35–49.
- Winchester, V., and S. Harrison. 2000. Dendrochronology and Lichenometry, an investigation into colonization, growth rates and dating on the east side of the North Patagonian Icefield, Chile. *Geomorphology*, 34, 181-194.

- Winchester, V., Harrison, S. and C Warren. 2001. Recent retreat Glaciar Nef, Chilean Patagonia, dated by Lichenometry and Dendrochronology. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 33(3), 266-273.
- Yamaguchi, S., Naruse, R. Matsumoto, T. and H. Ohno. 2003. Multiday variations in flow velocity at Glaciar Soler, Northern Patagonia, Chile. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35(2), 170-174.
- Yamada, T. 1987. Glaciological Characteristics Revealed by 37.6 m deep core drilled at the Accumulation area of San Rafael Glacier, the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 59-68.
- Ye, B., Ding, Y. Liu, F. and C. Liu. 2003. "Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climatic change". *Journal of Glaciology*, 49(164), 1-7.
- Zamora, R., Casassa, G., Neira, G., Araya, L., Rivera, A. and R. Mella. 2007. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of Ground Penetrating Radar. *IAHS Publ.*, 318, 153-162.
- Zamora R., Ulloa D., García G., Mella R., Uribe J., Wendt J., Rivera A., Gacitúa G., and G. Casassa. 2009. Airborne radar sounder for temperate ice: initial results from Patagonia, *Journal of Glaciology*, 55(191) 507-512.
- Zemp, M., Haeberli, W., Bajracharya, S., Chinn, T.J., Fountain, A.G., Hagen, J.O., Huggel, C., Kääb, A., Kaltenborn, B.P., Karki, M., Kaser, G., Kotlyakov, V.M., Lambrechts, C., Li, Z.Q., Molnia, B.F., Mool, P., Nellesmann, C., Novikov, V., Osipova, G.B., Rivera, A., Shrestha, B., Svoboda, F., Tsvetkov D.G. and T. Yao. 2007. Glaciers and ice caps. Part I: Global overview and outlook. Part II: Glacier changes around the world. In: UNEP: Global outlook for ice and snow. UNEP/GRID-Arendal, Norway, 115–152.
- Zenteno, P., Rivera, A. and R. García 2004. Glacier inventory of the Itata basin derived from satellite imagery: Historical trends and recent variations at Nevados de Chillan volcano (36°56'S-71°20'W). VIII Congreso Internacional De Ciencias De La Tierra, Santiago, Chile, 18-28 Octubre.
- Zenteno, P. 2008. Variaciones recientes de los glaciares en la zona centro sur de Chile y su relación con los cambios climáticos y la actividad volcánica. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile, Santiago, 288 pp.
- Zhan, W. 1992. Identification of glaciers with surge characteristics on the Tibetan Plateau. *Annals of Glaciology*, 16, 168-172.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A. and J. Brown. 1999. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 23(2), 132-154.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F., and Armstrong, R. L. 2003. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In: Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland [Phillips, M., S.M. Springman, and L.U. Arenson (eds.)]. A.A. Balkema, Lisse, the Netherlands, 1289-1294.
- Zimov, S.A., E.A. Schuur and F.S. Chapin III, 2006: Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 312, 1612-1613.

GLOSARIO DE GLACIARES MENCIONADOS Y SUS CUENCAS ASOCIADAS

Se han asociado cada uno de los glaciares mencionados en el texto de esta Estrategia a las cuencas hidrográficas de la división de Benítez (1980). Esta división, incluye cuencas y subcuencas, las que en general no presentan dificultades de definición en la mayoría del país, sin embargo, en la Zona Sur y Austral, particularmente en la zona costera y en los alrededores de los Campos de Hielo Patagónicos, se producen una serie de agrupaciones de subcuencas por islas y sectores costeros aledaños. Estas agrupaciones son en muchos casos arbitrarias y no consideran las divisorias de cuencas glaciares publicadas hasta ahora. Por ejemplo, la cuenca del Glaciar Jorge Montt, está dividida por la mitad de la lengua glaciar entre dos agrupaciones de cuencas.

	GLACIAR	SUBZONA	CUENCA	CÓDIGO
1	Tronquitos	Norte B	Copiapó	34
2	Nevado Tres Cruces	Norte B	Copiapó	34
3	El Potro	Norte B	Copiapó	34
4	Guanaco	Norte B	Huasco	38
5	Toro 1	Norte B	Huasco	38
6	Toro 2	Norte B	Huasco	38
7	Esperanza	Norte B	Huasco	38
8	Tapado	Norte B	Elqui	43
9	Cerro Volcán	Norte C	Limarí	45
10	Juncal Norte	Centro	Aconcagua	54
11	Juncal Sur	Centro	Maipo	57
12	Olivares Beta	Centro	Maipo	57
13	Olivares Gamma	Centro	Maipo	57
14	Museo	Centro	Maipo	57
15	Colina	Centro	Maipo	57
16	Echaurren Norte	Centro	Maipo	57
17	Aparejo	Centro	Maipo	57
18	San Francisco	Centro	Maipo	57
19	Esmeralda	Centro	Maipo	57
20	Palomo Norte	Centro	Rapel	60
21	Cipreses	Centro	Rapel	60
22	Universidad	Centro	Rapel	60
23	Captrén	Sur A	Imperial	91
24	Sureste Volcán Mocho	Sur A	Valdivia	101
25	Pichillancahue-Turbio	Sur A	Valdivia	101
26	Casa Pangué	Sur B	Cuencas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo	104

27	Erasmus	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
28	Reicher	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
29	Gualas	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
30	San Rafael	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
31	San Quintín	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
32	Steffen	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
33	Exploradores	Austral A	Costeras e Islas entre Río Aysén y Río Baker y Canal Gral. Martinez	114
34	Arroyo San Lorenzo	Austral A	Baker	115
35	Fiero	Austral A	Baker	115
36	Leones	Austral A	Baker	115
37	Soler	Austral A	Baker	115
38	Nef	Austral A	Baker	115
39	Colonia	Austral A	Baker	115
40	Arco	Austral A	Baker	115
41	Cerro Blanco	Austral A	Pascua	117
42	Bravo	Austral A	Pascua	117
43	O'Higgins	Austral A	Pascua	117
44	Jorge Montt	Austral A	Costeras entre Río Pascua Límite Región Archipiélago Guayeco	118
45	Ofhidro	Austral A	Costeras entre Río Pascua Límite Región Archipiélago Guayeco	118
46	Bernardo	Austral A	Costeras entre Río Pascua Límite Región Archipiélago Guayeco	118
47	Témpano	Austral A	Costeras entre Río Pascua Límite Región Archipiélago Guayeco	118
48	Occidental	Austral A	Costeras entre Límite Región y Seno Andrew	119
49	Pio XI	Austral A	Costeras entre Límite Región y Seno Andrew	119
50	HPS12	Austral A	Costeras entre Límite Región y Seno Andrew	119
51	Amalia	Austral A	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	122
52	Tyndall	Austral A	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	122
53	Grey	Austral A	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	122
54	Dickson	Austral A	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	122
55	Marinelli	Austral B	Tierra del Fuego	127