



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

**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**

VOLUMEN II

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTIFICOS (CECS)

S.I.T. N°166

Santiago, Diciembre del 2008

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

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

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar C.

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS (CECS)

Jefe de Proyecto
Dr. Andrés Rivera I.

Profesionales

Dr. Andrés Rivera I. (Coordinador de estudio)
MSc. Francisca Bown G.
Geógrafo Pablo Zenteno S.
Geógrafo Claudio Bravo L.

ACCION DE APOYO

**"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"**

VOLUMEN II

**"CATASTRO DE GLACIARES DE LA CUENCA DEL
RÍO ACONCAGUA Y DE LOS CENTROS
MONTAÑOSOS AL SUR DEL ESTRECHO DE
MAGALLANES"**

ORGANISMO RESPONSABLE:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTIFICOS (CECS)

TABLA DE CONTENIDOS

I.	RESUMEN	7
II.	INTRODUCCION	9
III.	OBJETIVOS	12
	Objetivo general	12
	Objetivos específicos	12
IV.	METODOLOGÍA	12
4.1	Adquisición y pre-procesamiento de datos satelitales (Figura 2)	12
4.2	Clasificación, interpretación y digitalización de divisorias de cuencas	19
4.3	Análisis de error	24
V.	RESULTADOS	25
5.1.	Catastro de glaciares de la cuenca superior del río Aconcagua (32°30'S), V Región, Chile central	25
<i>i)</i>	<i>Superficie neta y número de glaciares por sub-subcuencas (Sub-cuenca Aconcagua Alto)</i>	<i>25</i>
<i>ii)</i>	<i>Clasificación de glaciares</i>	<i>26</i>
5.2.	Catastro de glaciares al sur del Estrecho de Magallanes, XII Región, Chile austral	29
<i>i)</i>	<i>Cordillera Darwin</i>	<i>29</i>
<i>ii)</i>	<i>Otros centros montañosos y glaciares adyacentes</i>	<i>30</i>
VI.	CONCLUSIONES	35
VII.	REFERENCIAS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 superior.** Cuenca del río Aconcagua, Chile central. En color rojo se destaca el área cubierta por glaciares inventariada en este trabajo. **Figura 1 inferior.** Los cuatro centros montañosos inventariados al sur del Estrecho de Magallanes. Representación cartográfica de ambas regiones en base a modelo digital SRTM3. Localización de áreas en mapa de Chile general. **11**
- Figura 2.** Secuencia de pasos para la geo-referenciación y corrección de imágenes ASTER y Landsat ETM+. **14**
- Figura 3.** Cobertura de imágenes ASTER en la cuenca superior del río Aconcagua. **15**
- Figura 4.** Cobertura de imágenes Landsat ETM+ y Aster abarcando los cuatro principales centros englaciados del extremo austral de Chile. **16**
- Figura 5.** Imagen ASTER (30 Mar 2008) combinada de bandas 6 (infrarrojo) y 2-1 (visible-infrarrojo cercano) superpuesta sobre modelo SRTM3, logrando representar la morfología de glaciar de valle del Juncal Norte (sub-subcuenca río Juncal). Nótese el circo glaciar, la cascada de hielo y el frente recubierto rodeado por una topografía local abrupta. **17**
- Figura 6.** CFC de bandas ASTER 3-2-1 de 30 Marzo de 2008 mostrando la delimitación de glaciares rocosos. Curvas de nivel cada 50 m en base a modelo SRTM3. **21**
- Figura 7.** Subescena de imagen ASTER de 30 de Marzo de 2008 con bandas SWIR 6 y VNIR 2-1, mostrando la aplicación de filtros para lograr mapear hielo en zonas de sombras. El detalle de las escenas es de 2.5 * 2.5 km aproximadamente. **22**
- Figura 8.** Leyenda de cartografía del catastro de glaciares (basado en Müller *et al.*, 1977). **23**
- Figura 9.** Glaciares digitalizados en la parte sur de la cuenca del río Aconcagua. Notar Glaciar Juncal Norte, uno de los glaciares más importantes en la sub-subcuenca del mismo nombre. Mosaico ASTER de fondo (30 Mar 2008) y curvas de nivel SRTM3 cada 200 m. **28**
- Figura 10.** Polígonos glaciares digitalizados en el Oeste de Cordillera Darwin y en el Monte Sarmiento. Imagen ASTER de fondo (13 Feb 2004) y curvas de nivel SRTM3 cada 200 m. **32**
- Figura 11.** Polígonos glaciares digitalizados en la Isla Santa Inés. Imagen Landsat ETM+ de fondo (1 Marzo de 2005). Curvas SRTM3 cada 200 m. **33**
- Figura 12.** Polígonos glaciares digitalizados en la Isla Hoste. Imagen Landsat ETM+ de fondo (13 Febrero de 2004). Curvas SRTM3 cada 200 m. **34**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Imágenes satelitales y datos topográficos empleados en el inventario de la cuenca superior del río Aconcagua.	18
Tabla 2. Imágenes satelitales y datos topográficos empleados en el inventario de glaciares al sur del Estrecho de Magallanes.	19
Tabla 3. Número (n) y superficie (km ²) de glaciares en sub-subcuencas del río Aconcagua Alto distribuidos según rango de tamaño (km ²).	26
Tabla 4. Número (n) y superficie (km ²) de glaciares en sub-subcuencas del río Aconcagua Alto distribuidos por tipo de superficie.	27
Tabla 5. Número (n) y superficie (km ²) de glaciares de Cordillera Darwin por sub-subcuencas distribuidos según rango de tamaño (km ²).	30
Tabla 6. Número (n) y superficie (km ²) de glaciares en otros centros montañosos al sur del Estrecho de Magallanes distribuidos según rango de tamaño (km ²).	31

I. RESUMEN

Este catastro de glaciares tuvo por objetivo superar algunos de los vacíos de información glaciológica en las zonas central y sur del país. Aquellas regiones representan un enorme potencial hídrico en el largo plazo, sin embargo hasta ahora sólo se poseían estimaciones preliminares o inventarios no actualizados de las superficies de hielo allí existentes. Este trabajo emplea tecnologías satelitales, recientes, incluyendo el uso de datos topográficos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Las áreas catastradas son: i) Cuenca superior del río Aconcagua ($32^{\circ}30'S$), V Región de Valparaíso, donde existe un análisis previo elaborado por Valdivia (1984). El nuevo inventario fue realizado a partir de un conjunto de imágenes satelitales ASTER (resolución de 15 m) del año 2008 y datos SRTM del año 2000 (resolución de 90 m). La superficie de hielo de la cuenca del Aconcagua totalizó $121,49 \text{ km}^2$, encontrándose distribuida en 188 glaciares, una parte importante de los cuales son de tipo rocoso. ii) Glaciares al sur del estrecho de Magallanes ($53^{\circ}S$ al sur). Se utilizó un set de imágenes ASTER y Landsat ETM+ obtenidas a partir del año 2001 y la data SRTM, abarcando los cuatro principales centros montañosos y sus glaciares aledaños, a saber Isla Santa Inés, Monte Sarmiento, Cordillera Darwin e Isla Hoste. El área glaciar más importante se encuentra localizada en la Cordillera Darwin, con $2333,14 \text{ km}^2$ distribuido en 627 polígonos glaciares. La superficie total de hielo inventariada al sur de los $53^{\circ}S$ es de $3289,42 \text{ km}^2$, lo que es mucho mayor a las estimaciones previas para la región (Lliboutry, 1956; Casassa, 1995). A diferencia de Chile central, las superficies recubiertas no son significativas. Este trabajo presenta una completa determinación de superficies glaciares expuestas o parcialmente recubiertas sobre $0,01 \text{ km}^2$, sin embargo los datos y las técnicas aquí empleadas son insuficientes para la detección detallada de la totalidad de glaciares rocosos, los que son predominantes en algunas zonas específicas de las áreas catastradas.

ABSTRACT

The glacier inventory had the aim to overcome the glaciological gaps in central and southern Chile. Such regions represent an enormous hydric potential in the long-term, to date however, only preliminary or old estimations were available regarding the existing ice surfaces. This work is based upon the use of recent and state-of-the-art technologies currently available, including high resolution-satellite imagery and recent topographic data. The inventoried areas are: i) Aconcagua river upper basin ($32^{\circ}30'S$), V administrative Region of Valparaíso, where a former glacier study exists (Valdivia, 1984). The inventory was carried out upon a set of satellite ASTER scenes acquired in 2008, at 15 m resolution, and SRTM data from year 2000, at 90 m resolution. The total ice surface yields $121,49 \text{ km}^2$, being distributed in 188 glaciers, containing a significant proportion of rock glaciers. ii) Glaciers south of Magellan Strait (south of $53^{\circ}S$). A set of ASTER and Landsat ETM+ images collected from year 2001 and SRTM were employed, spanning the four main mountain centres and their surrounding glaciers, i.e. Isla Santa Inés, Monte Sarmiento, Cordillera Darwin and Isla Hoste. The main glacier area is located in Cordillera Darwin, with $2333,14 \text{ km}^2$ distributed in 627 glacier

polygons. The total inventoried ice surface south of 53°S yields 3289,42 km², which is much higher than previous estimations (Lliboutry, 1956; Casassa, 1995). This work is more accurate regarding the inventory of bare or partially-covered glacier surfaces, however, the employed data and techniques are not suitable enough for detection of all the rock glaciers, which are predominant in specific zones of the inventoried areas.

II. INTRODUCCIÓN

Los glaciares tienen una gran significancia para el país, siendo una de las razones fundamentales el constituir una importante reserva de recursos hídricos en la actualidad y en el largo plazo. Sin embargo, el conocimiento básico sobre la criósfera del país aún debe mejorarse. Gran parte de la investigación glaciológica durante los últimos años se concentró en los Campos de Hielo Norte y Sur de la Patagonia (Rignot *et al.*, 2003), donde los inventarios originales han sido actualizados y existe un mayor volumen de estudios sobre la dinámica y características de los glaciares. En cambio, otras regiones del país, especialmente en el extremo Sur, sólo poseen estimaciones preliminares de las superficies de hielo.

Debido a que la disminución de la superficie cubierta por glaciares necesariamente afectará la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro, este estudio tiene como objetivo completar y actualizar los inventarios de glaciares en áreas prioritarias del país, aprovechando el uso de nuevas tecnologías, incluyendo imágenes satelitales y data de topografía superficial reciente.

El río Aconcagua (32°30'S, **Figura 1 superior**), localizado en la V Región de Valparaíso, está caracterizado por una alta demanda de recursos hídricos para el consumo poblacional, actividades económicas y aprovisionamiento energético. Junto a las cuencas de los ríos Maipo, Cachapoal y Tinguiririca, constituye una importante reserva de agua en estado sólido en la macrozona central del país (Bown *et al.*, 2008). Estimaciones de varios autores durante las últimas décadas, empleando diversas fuentes de información (Valdivia, 1984; Marangunic, 1979; Caviedes, 1979; Noveroy, 1987; Bown *et al.*, 2008) permiten estimar hoy una superficie de hielo cercana a los 1000 km² entre los 32°S y los 35°S.

En la década de 1980 se completó un primer inventario de glaciares del río Aconcagua, realizado con fotografías aéreas verticales del vuelo Hycon obtenidas en 1955 (Valdivia, 1984), por lo que la actualización de este inventario permitiría una estimación de los cambios acaecidos en el último medio siglo. Aún considerando las diferencias metodológicas, se deduce una significativa reducción en la superficie total cubierta por los glaciares a esta latitud del país. Esta tendencia pone de realce las implicancias para la disponibilidad futura de recursos hídricos en una región donde la mayor parte del agua durante los veranos y períodos de estiaje proviene de los glaciares (Peña & Nazarala, 1987).

Al sur del estrecho de Magallanes hay pocos estudios glaciológicos pese a albergar una importante superficie cubierta por hielo (**Figura 1 inferior**), representando así un enorme potencial como reserva hídrica estratégica en el largo plazo. Uno de las áreas más importantes es la Cordillera Darwin, donde existen estimaciones previas de la superficie total contenida en los glaciares (Liboutry, 1956). Otros estudios más recientes en la Isla Santa Inés han examinado las variaciones frontales de los glaciares (Aravena, 2007), sin embargo hasta ahora no se habían realizado inventarios. 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, contribuyendo en último término a la determinación más precisa de la superficie total de hielo existente en Chile.

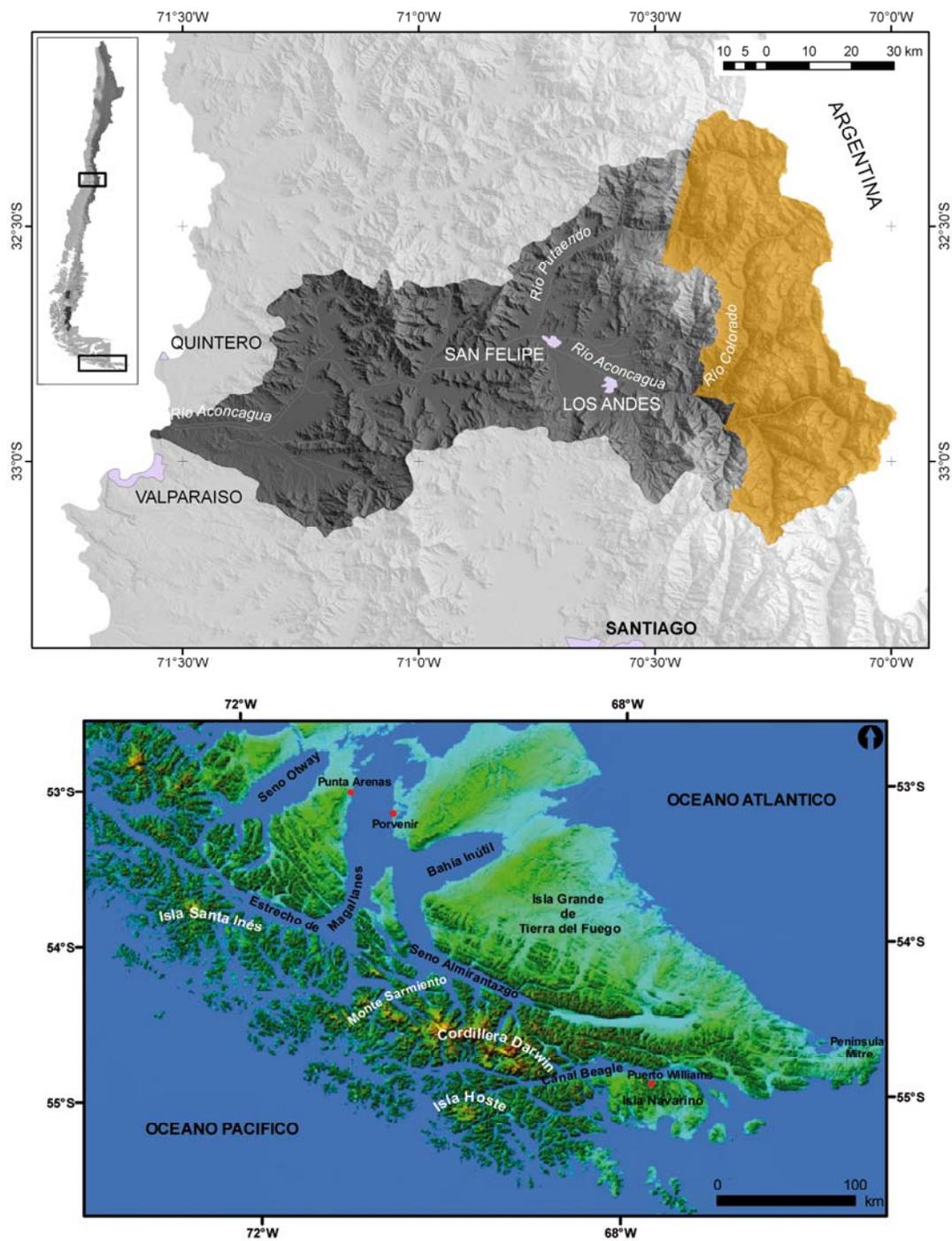


Figura 1 superior. Cuenca del río Aconcagua, Chile central. En color rojo se destaca el área cubierta por glaciares inventariada en este trabajo. **Figura 1 inferior.** Los cuatro centros montañosos inventariados al sur del Estrecho de Magallanes. Representación cartográfica de ambas regiones en base a modelo digital SRTM3. Localización de áreas en mapa de Chile general.

III. OBJETIVOS

Objetivo general:

Completar el catastro de glaciares en áreas prioritarias del centro y sur de Chile.

Objetivos específicos:

- Actualizar el catastro de glaciares de la cuenca superior del río Aconcagua, V Región de Valparaíso.
- Completar por primera vez, un inventario de glaciares de los centros montañosos englaciados al sur del Estrecho de Magallanes.
- Contribuir a la determinación más precisa de la superficie de hielo total del país.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Adquisición y pre-procesamiento de datos satelitales (Figura 2)

La información base empleada en la elaboración de los catastros es un set de imágenes de satélite ASTER y Landsat ETM+ de la década del 2000, todas cumpliendo con ciertas cualidades ópticas, de fechas de adquisición y condiciones para ser sometidas a distintos tipos de corrección.

En este sentido, el primer criterio de selección fue la ausencia total de nubosidad, o en su defecto, que la presencia de nubes no afectara severamente la observación de las áreas englaciadas. Ambos sensores proveen imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (15 m para ASTER y 28,5 para Landsat ETM+), seleccionándose finalmente las que presentaron nubosidad inferior al 5%. En el caso de la región central del país, estas escenas son frecuentes, sin embargo su ocurrencia en la zona austral es ocasional debido a la predominancia del mal tiempo atmosférico en esas latitudes del país.

El segundo criterio fue la fecha de captura de las imágenes, obteniéndose escenas preferentemente de fines del período de ablación; esto corresponde a los meses de Abril y Mayo para el hemisferio Sur (Kääb *et al.*, 2003). El motivo es minimizar la presencia de cubiertas estacionales de nieve que puedan confundirse con los contornos de los glaciares. Según Paul *et al.* (2002), la captura de imágenes a finales de este período favorece la distinción de las variaciones espaciales y espectrales de las zonas de nieve húmeda y hielo descubierto, permitiendo interpretarlas como cambios en la posición de la línea de nieve. De esta manera, la fecha de fin del verano (austral), en la mayoría de ellas, facilitó la

discriminación de las áreas cubiertas por hielo perenne de aquellos mantos de nieve estacional.

Luego, las imágenes consecutivas, en algunos casos del mismo día de toma, permitieron generar mosaicos abarcando íntegramente las cuencas de drenaje y centros montañosos de Chile central y austral (**Figuras 3 y 4**). Para ver algunas características de las imágenes seleccionadas en Chile central y austral consultar **Tablas 1 y 2**.

Todas las imágenes han sido corregidas geoméricamente. El primer paso es la geo-referenciación, en el cual se definieron diversos puntos de control terrestres (PCT) distribuidos en forma homogénea sobre las imágenes en base a la cartografía oficial del Instituto Geográfico Militar (escala nominal 1:50.000, intervalo de curvas de nivel de 50 m) y los datos topográficos SRTM3 (*Shuttle Radar Topography Mission*). En la zona austral no se tiene cartografía disponible a esa escala nominal, por lo tanto la geo-referenciación se basó en los parámetros orbitales de la imagen satelital junto al modelo de elevación o DEM SRTM3. Las series de imágenes fueron geo-referenciadas utilizando la proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (UTM-zona 19 Sur) y el *World Geodetic System 84* (WGS84) como datum de referencia.

A continuación se realizó un proceso de orto-rectificación, esto es, una corrección geométrica con el fin de contrarrestar distorsiones en los parámetros interpretados en la imagen que se producen a causa de múltiples factores, tales como las condiciones de iluminación al momento de la toma de la imagen, los errores de calibración de los sensores y el relieve superficial, entre otros. La orto-rectificación de los datos ASTER L1B (con radiancias calibradas en $w/m^2/sr/\mu m$) mediante el DEM SRTM3 ASTER consistió en la reducción de los errores geoméricos, principalmente los desplazamientos por el relieve. No se aplicaron correcciones topográficas en los valores de las radiancias espectrales (e.g. Modelos de reflexión Lambertiana) que son utilizados para normalizar las condiciones de iluminación del relieve y rectificar los valores de radiancia de aquellos píxeles afectados por sombra. Dichos métodos son necesarios cuando se efectúan comparaciones entre series de imágenes multitemporales.

Las correcciones geoméricas de las imágenes son transformaciones puntuales que consisten en cambiar de posición los píxeles originales de la imagen; esto sin alterar los valores originales de las radiancias espectrales (Iwasaki & Fujisada, 2005). Para ello, los datos fueron geo-referenciados entre sí mediante un remuestreo mediante el método del vecino más cercano debido a que éste no altera los valores originales de los niveles digitales DN (*digital numbers*), (Lillesand, & Kiefer, 1994). Finalmente se sobrepusieron las imágenes procesadas sobre los datos de elevación SRTM3 según los procedimientos descritos por Kääb *et al.* (2003), con el propósito de crear perspectivas tridimensionales que permitieron verificar la calidad de la orto-rectificación, basándose en la interpretación visual apoyada en criterios geomorfológicos, estructurales y glaciológicos relacionados con la topografía local (la **Figura 5** ilustra el resultado de este procedimiento).

La topografía SRTM3 tiene cobertura para todo el país (**Tabla 1**), entregando la mejor alternativa combinada de extensión espacial y precisión en el pre-procesamiento y análisis de imágenes si se le compara con otras tecnologías. Por ejemplo la altimetría láser o levantamientos GPS de calidad geodésica, si bien superan en precisión a la topografía SRTM (Rivera *et al.*, 2006), no presentan ese carácter extensivo.

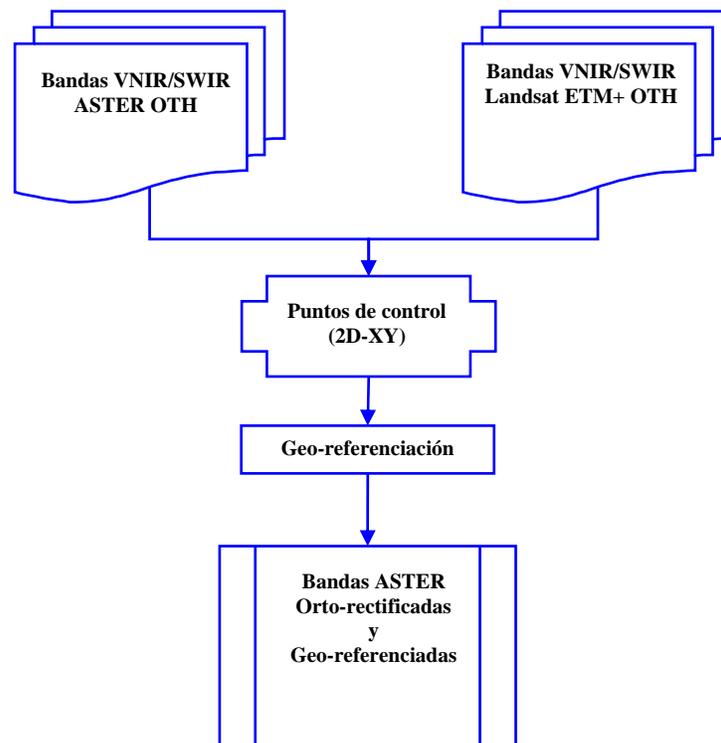


Figura 2. Secuencia de pasos para la geo-referenciación y corrección de imágenes ASTER y Landsat ETM+.

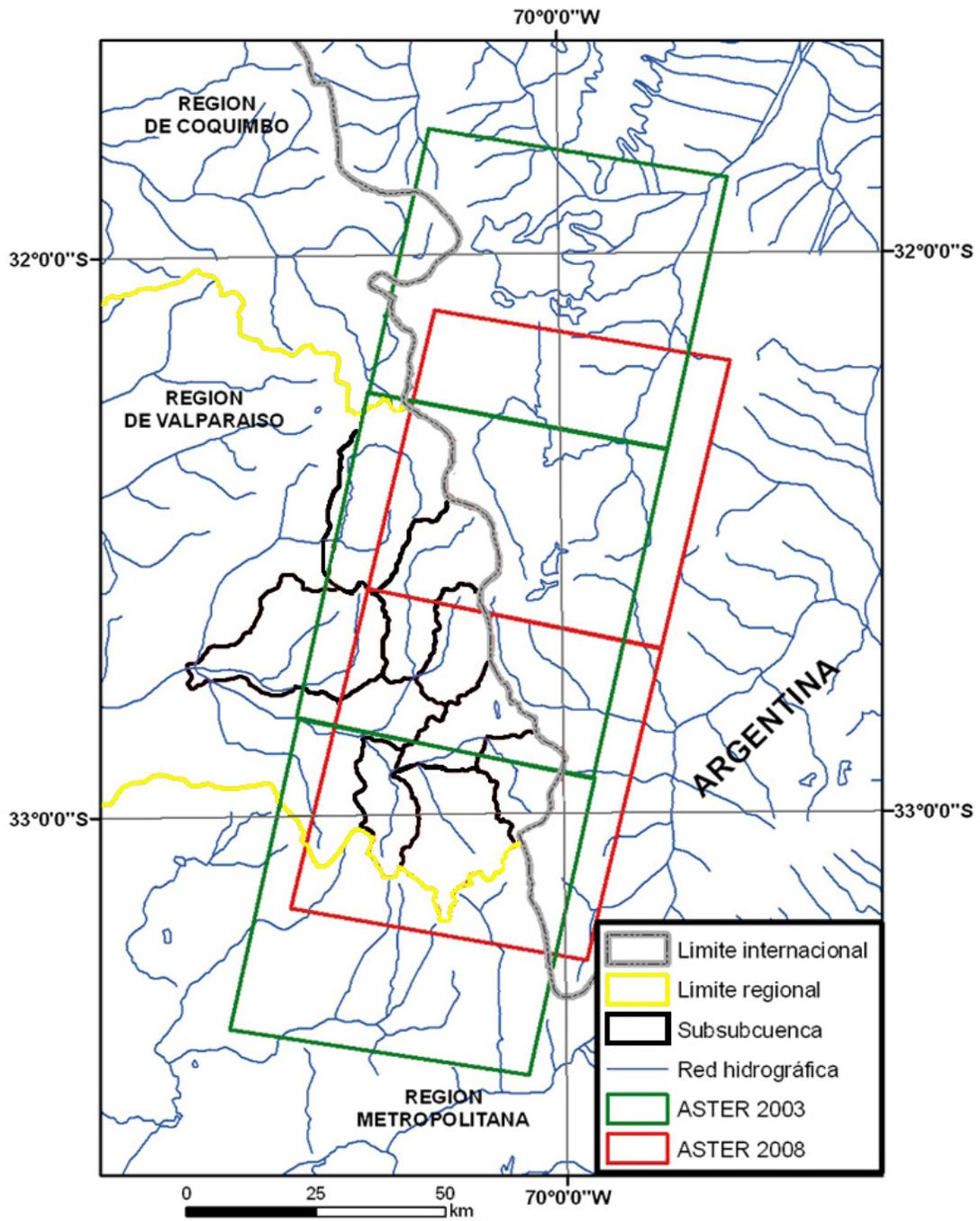


Figura 3. Cobertura de imágenes ASTER en la cuenca superior del río Aconcagua.

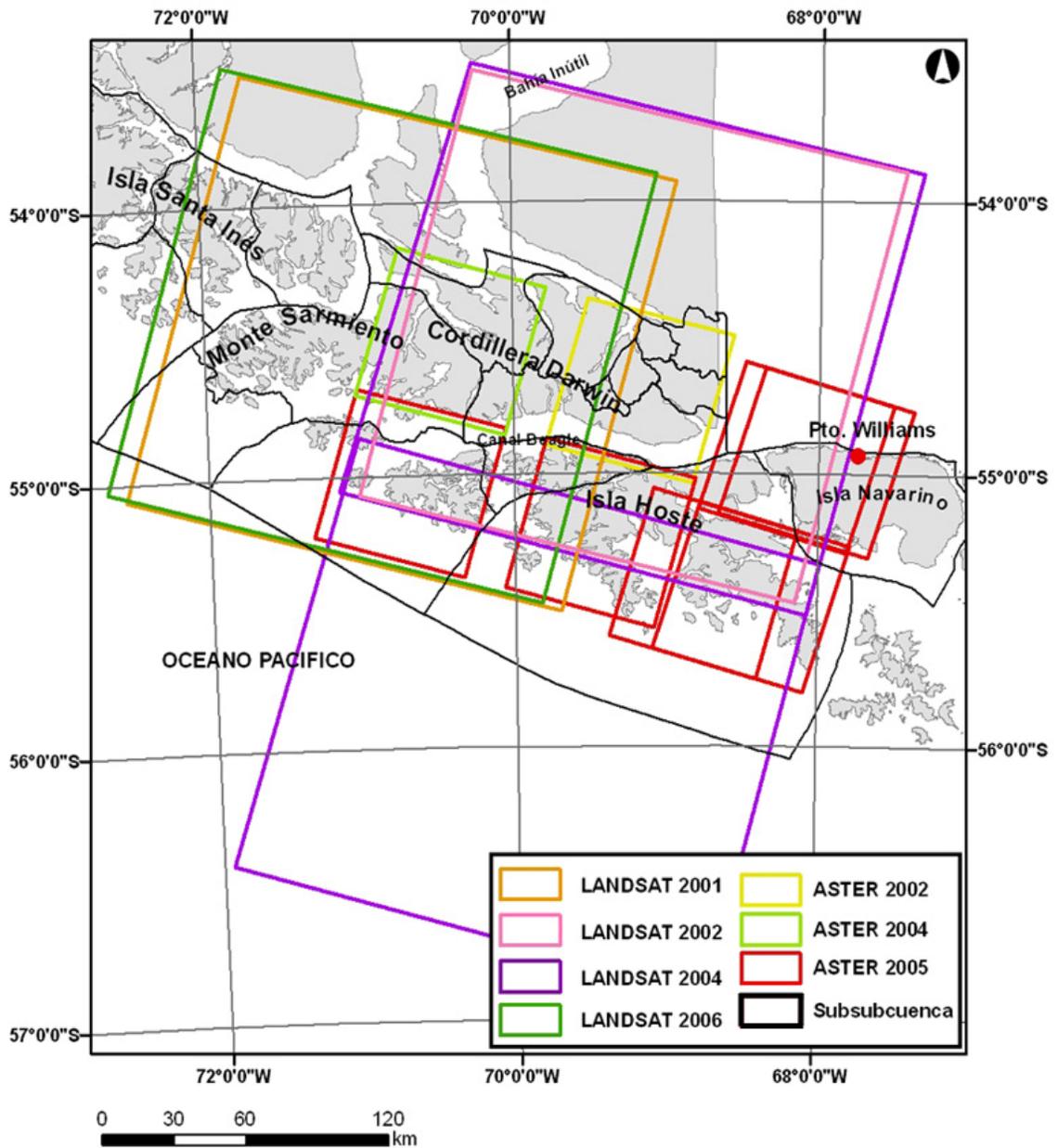


Figura 4. Cobertura de imágenes Landsat ETM+ y Aster abarcando los cuatro principales centros englaciados del extremo austral de Chile.

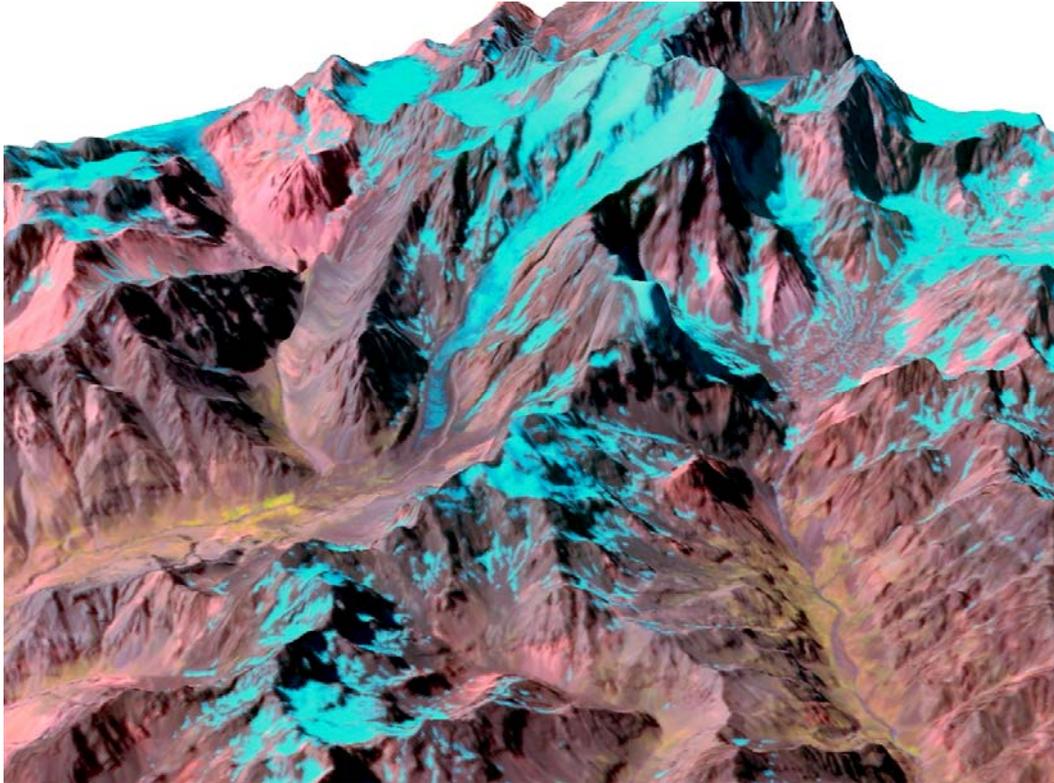


Figura 5. Imagen ASTER (30 Mar 2008) combinada de bandas 6 (infrarrojo) y 2-1 (visible-infrarrojo cercano) superpuesta sobre modelo SRTM3, logrando representar la morfología de glaciar de valle del Juncal Norte (sub-subcuenca río Juncal). Nótese el circo glaciar, la cascada de hielo y el frente recubierto rodeado por una topografía local abrupta.

Tabla 1. Imágenes satelitales y datos topográficos empleados en el inventario de la cuenca superior del río Aconcagua.

Sensor/ Origen	Fecha	Resol. (m)/Esc. nominal	Coordenada s centrales (lat/long)	Area /cobertura	Fuente*
ASTER	24 Mar 2003	15	-32,10°/ -70,02°	Río Rocín	GLIMS
ASTER	24 Mar 2003	15	-32,63°/ -70,16°	Río Rocín/Río Colorado	GLIMS
ASTER	24 Mar 2003	15	-33,16°/ -70,30°	Río Juncal/Río Blanco	GLIMS
ASTER	30 Mar 2008	15	-32,42°/ -70,01°	Río Colorado	GLIMS
ASTER	30 Mar 2008	15	-32,95°/ -70,17°	Río Juncal/Río Blanco	GLIMS
Carta topográfica	1977	1:50.000	-33,00°/ -70,00°	Río Rocín/Leones/ Piuquenes/Disputada/ Río Colorado//Río Blanco	IGM
SRTM3	10 Feb 2000	90 (3seg/arco)	-	Todo Chile Sudamericano	JPL

Tabla 2. Imágenes satelitales y datos topográficos empleados en el inventario de glaciares al sur del Estrecho de Magallanes.

Sensor/ Origen	Fecha	Resol. (m)/Esc. nominal	Coordenada s centrales (lat/long)	Area /cobertura	Fuente*
Landsat ETM+	31 Mar 2001	28,5	-54.50°/ -70.70°	Cordillera Darwin	GLCF
Landsat ETM+	07 Feb 2002	28,5	-54.50°/ -69.21°	C. Darwin oriental/Est. Yendegaia	GLCF
ASTER	07 Feb 2002	15	-54.70°/ -69.19°	C. Darwin oriental/Est. Yendegaia	GLIMS
Landsat ETM+	13 Feb 2004	28,5	-54.50°/ -70.70°	Cordillera Darwin	USGS
ASTER	13 Feb 2004	15	-54.98°/ -70.46°	Cordillera Darwin	GLIMS
Landsat ETM+	8 Ene 2006	28,5	-54.50°/ -70.70°	Cordillera Darwin	USGS
ASTER	14 Nov 2005	15	-54.41°/ -71.02°	Monte Sarmiento	GLIMS
ASTER	15 Feb 2003	15	-53.78°/ -73.32°	Isla Santa Inés	GLIMS
Landsat ETM+	1 Mar 2005	28.5	-54.41°/ -72.43°	Isla Santa Inés	USGS
Landsat ETM+	13 Feb 2004	28,5	-55.83°/ -70.11°	Isla Hoste	USGS
SRTM3	10 Feb 2000	90 (3 seg/arco)	-	Todo Chile	JPL

* GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space Project-NSIDC, IGM: Instituto Geográfico Militar, GLCF: Global Land Cover Facility, JPL: Jet Propulsion Laboratory. USGS: United States Geological Survey.

4.2 Clasificación, interpretación y digitalización de divisorias de cuencas

Diversos programas computacionales (Sistemas de Información geográficos, SIG) disponibles en sus versiones más recientes fueron empleados en las distintas etapas del análisis digital, tales como el despliegue de imágenes en pantalla, el procesamiento, la interpretación, digitalización y mapeo de productos del inventario. Este método se ha apoyado en las metodologías desarrolladas en el nuevo inventario de glaciares de Suiza (Kääb *et al.*, 2002; Paul *et al.*, 2002) y por el grupo de desarrollo de algoritmos para el mapeo semi automatizado de glaciares del programa GLIMS.

Una vez terminada la fase de pre-procesamiento, se aplicó un proceso de clasificación o combinación de bandas espectrales para obtener imágenes multibanda o “Combinaciones

Falso Color (CFC)” con el software ArcGis 9.2. El procedimiento aplicado sigue los criterios de Paul *et al.* (2002), en que se definen las clasificaciones más óptimas para la delimitación de glaciares mediante la relación de bandas Landsat.

De esta manera, se obtuvieron CFC con las bandas Landsat 5-4-3 y 1-4-5 para su despliegue en los canales RGB. Las bandas del sensor ASTER utilizadas fueron las de los subsistemas VNIR 321 (visible-infrarrojo cercano) y SWIR 4 (infrarrojo), creándose CFC 3 (0.80 μm)/2 (0.66 μm)/1 (0.55 μm). Con el objetivo de utilizar las características espectrales del infrarrojo cercano de onda corta del subsistema SWIR, se procedió a transformar la resolución espacial de la banda 4 (2.20 μm) de 30 m a 15 m. De esta forma fue posible generar una CFC 4/3N/1 desplegada en los canales *RGB*. Este proceso es el que permitió distinguir visualmente, los cambios de facies y texturas, los tipos de superficie observables en la escena satelital. Las superficies identificadas de esta manera fueron básicamente: i) glaciar (hielo descubierto), ii) glaciar recubierto (hielo parcialmente recubierto por detritos), iii) glaciar rocoso (hielo y roca integrados), iv) nieve y v) las restantes superficies que quedan excluidas del inventario (roca, bosques, lagos, ríos, esteros, mar, etc).

La relación de bandas ASTER 3/4 es particularmente útil para destacar las superficies de hielo descubierto y nieve, sin embargo la detección de glaciares rocosos es más compleja y se realizó mediante observación manual de bandas compuestas. En esta relación se utilizaron valores de radiancia ($\text{w}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) dado que los datos ASTER L1B vienen calibrados a valores de radiancias. Según Kääb *et al.* (2002), para la aplicación de este algoritmo no es necesario realizar correcciones topográficas ni de tipo atmosféricas. Los glaciares rocosos de la cuenca del Aconcagua fueron mapeados utilizando la combinación 3 2 1 en modo RGB. La delimitación de sus contornos se realizó mediante la interpretación visual de las imágenes apoyadas de criterios geomorfológicos basándose en el modelo de elevación digital de los datos SRTM3. Un ejemplo de esta clasificación empleando escenas ASTER se muestra en la **Figura 6**.

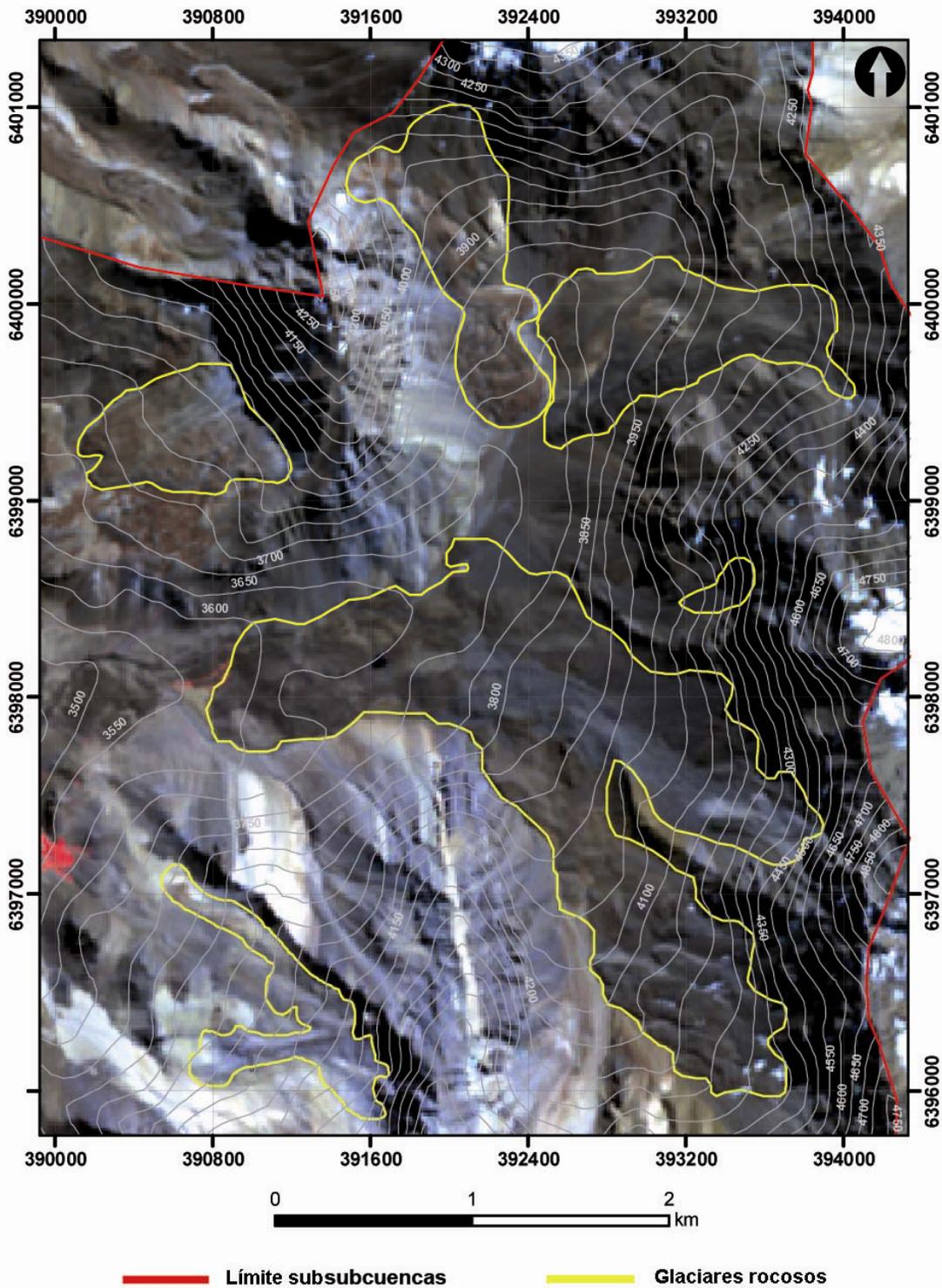


Figura 6. CFC de bandas ASTER 3-2-1 de 30 Marzo de 2008 mostrando la delimitación de glaciares rocosos. Curvas de nivel cada 50 m en base a modelo SRTM3.

Para atenuar el problema de la no-detección de hielo en zonas de sombra se utilizaron diversos filtros en las imágenes (linear 2%, Gaussian, Square root), ver **Figura 7**. Dichos filtros también se aplicaron en las imágenes pero de forma inversa en zonas de alta saturación del sensor con el objetivo de disminuir la intensidad del brillo de las imágenes.

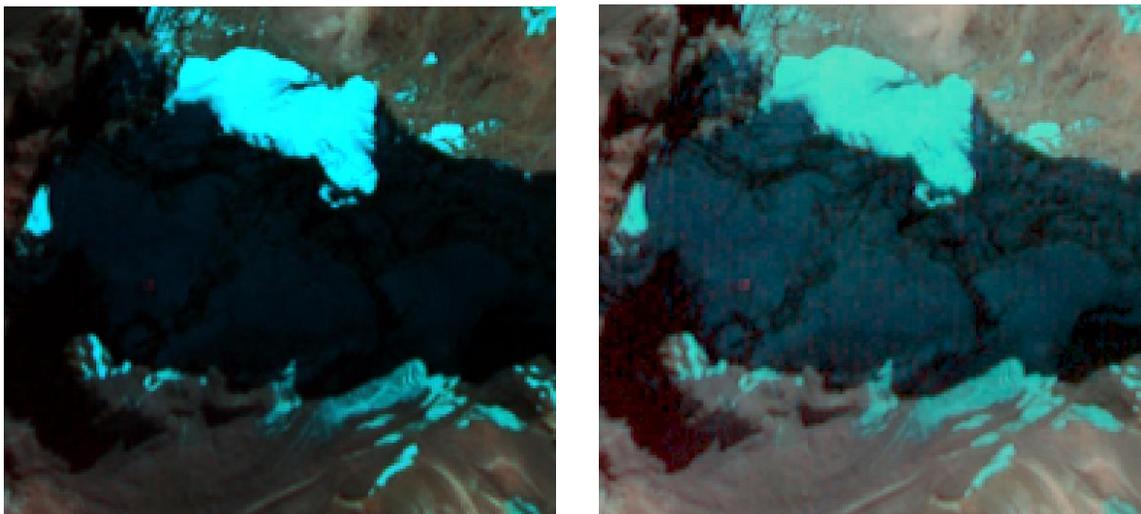


Figura 7. Subescena de imagen ASTER de 30 de Marzo de 2008 con bandas SWIR 6 y VNIR 2-1, mostrando la aplicación de filtros para lograr mapear hielo en zonas de sombras. El detalle de las escenas es de 2.5 * 2.5 km aproximadamente.

En la región austral, las imágenes obtenidas poseen mayor nubosidad, ésta última presentando respuestas espectrales similares a la del hielo glaciar. Esta situación hizo necesario la superposición de escenas de ambos sensores y probar diferentes CFC para la correcta interpretación de las áreas de los glaciares.

Sobre las CFC se realizó el procedimiento de digitalización manual de todos los polígonos identificados en las imágenes como glaciares, ya sea descubiertos, recubiertos o rocosos. La divisoria de cuencas de los glaciares se realizó en base a los datos SRTM3 superpuestos como formato vectorial (equidistancia de 25 m), con lo cual se generó una tabla de atributos de puntos (o identificadores) de polígonos glaciares asociados. Terminada la digitalización, las bases de datos fueron editadas, incluyendo características tales como superficies netas y número de glaciares (cuenca, subcuencas), tipos de superficie, coordenadas, altura, largo y ancho de glaciares, etc. Las bases de datos son presentadas en base a criterios definidos en el World Glacier Inventory (WGI) (Müller *et al.*, 1977) y el programa GLIMS. La clasificación de cuencas adoptada es la de Benítez (1980). Ver **Figura 8**.

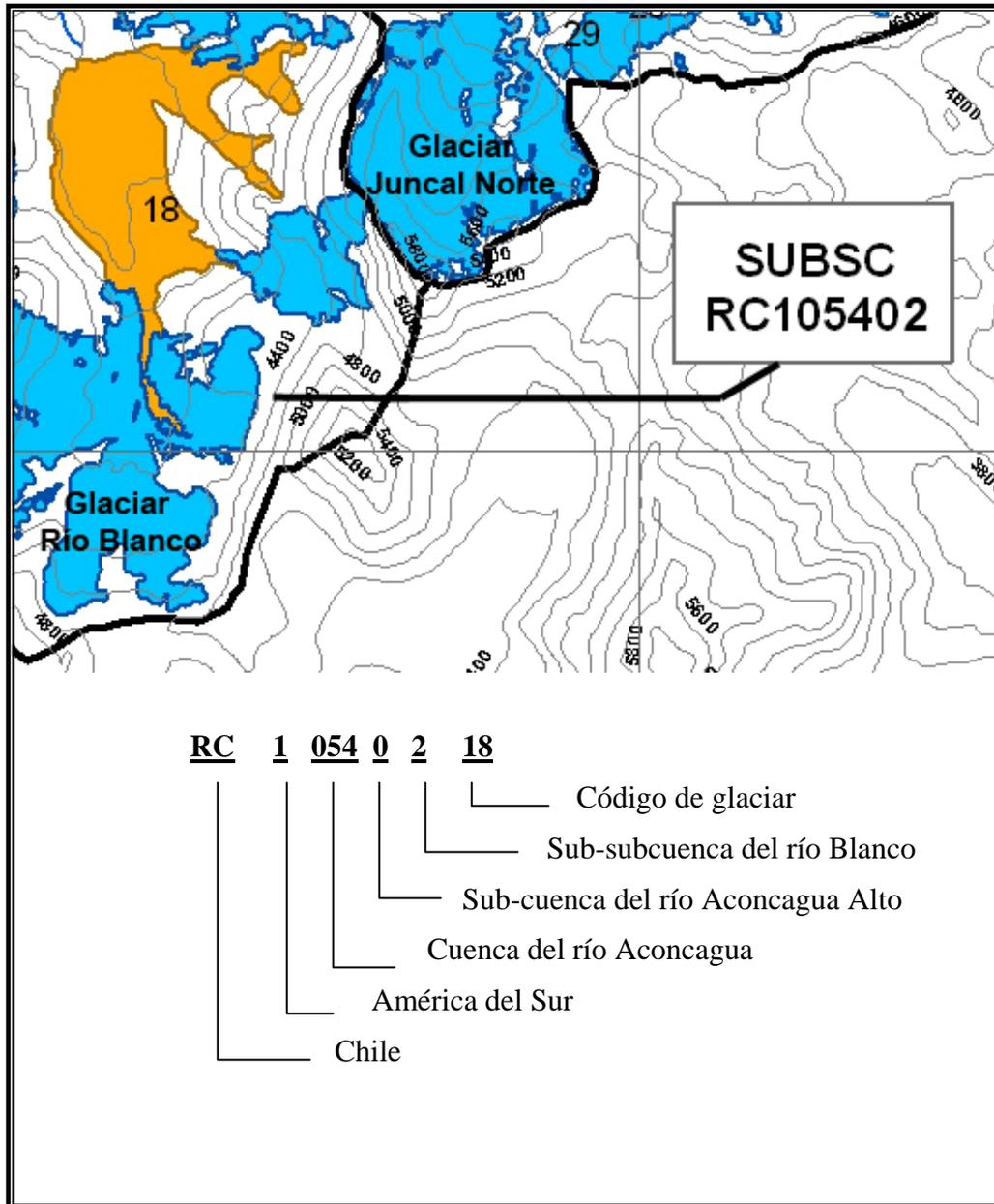


Figura 8. Leyenda de cartografía del catastro de glaciares en base a Müller *et al.* (1977) y Benítez (1980).

4.3 Análisis de error

El error del método aplicado para inventariar un polígono glaciar se ha calculado según criterios definidos en Williams *et al.* (1997), en que el tamaño lineal o resolución de píxel es multiplicado por el perímetro del polígono digitalizado:

$$E_{Ar} = \alpha \times P$$

donde:

E_{Ar} es el error en la medición de área del polígono glaciar en m².

α es la resolución espacial de la imagen satelital o tamaño de píxel en m

P es el perímetro del área que ha sido digitalizada en m.

El promedio de este producto es considerado el error del inventario, el que se asume como error “sistemático” y que es de 0,2 km² para glaciares descubiertos y parcialmente recubiertos, y de aproximadamente el triple para glaciares rocosos.

V. RESULTADOS

5.1. Catastro de glaciares de la cuenca superior del río Aconcagua (32°30'S), V Región, Chile central.

i) *Superficie neta y número de glaciares por sub-subcuencas (Sub-cuenca Aconcagua Alto)*

El inventario de la sub-cuenca del Aconcagua Alto está basado en el set de imágenes ASTER del año 2008 (**Figura 9**).

El área glaciaria total inventariada es de 121,49 km², encontrándose distribuida en 188 glaciares (ver **Tabla 3**). Anteriormente, Bown *et al.* (2008) también indicaron una superficie de 121 km² para esta misma zona basándose en imágenes ASTER del 2003, donde sin embargo no se mapearon todos los glaciares rocosos ni se logró diferenciar a plenitud cuerpos de nieve temporal respecto de glaciares, debido a que la escena del 2003 presentaba mucha más nieve que la del 2008 empleada en este catastro.

La importancia de las ocho sub-subcuencas se incrementa en dirección al sur, con las del Juncal y Río Blanco como las más significativas tanto en número de cuerpos de hielo como las superficies totales (**Tabla 3**, ver sección **Anexos**). La **Tabla 3** ha sido organizada según rangos de tamaño siguiendo la clasificación estándar del WGMS (Müller *et al.*, 1977). Existe un importante número de glaciares pequeños y glaciaretos, pero la segunda clase es la más frecuente, con más del 60% del total de glaciares. Los glaciares superiores a 1 km² son mucho menos frecuentes, de manera similar a otras cuencas de las zonas Norte y Centro donde tienden a predominar los glaciares pequeños de montaña.

Los dos principales glaciares del Aconcagua son: Glaciar Juncal Norte (sub-subcuenca R. Juncal antes junta E. Juncalillo (sur), 9,88 km²) y Glaciar del Río Blanco (sub-subcuenca río Blanco, 21,86 km²), siendo éste último el único que se encuentra en el rango sobre los 10 km² (ver **Tabla 3** y **Anexos**). Este glaciar corresponde a una cuenca compuesta por varias zonas de acumulación y un área de ablación común.

Otra característica es la orientación de las laderas, siendo predominantemente S-SW, lo que favorece la mantención de los glaciares al recibir mayores montos de precipitación durante el período de acumulación.

Tabla 3. Número (n) y superficie (km²) de glaciares en sub-subcuencas del río Aconcagua Alto distribuidos según rango de tamaño (km²).

Sub-subcuenca	Rango de tamaño (km ²)							
	0,01-0,09		0,10-0,99		1,00-9,99		>10,00	
	n	km ²	n	km ²	n	km ²	n	km ²
R. Putaendo bajo junta R. Hidalgo	1	0,05	11	3,73	2	3,49		
R. Colorado antes junta E. Riecillos	4	0,25	20	9,43	5	8,82		
R. Riecillos	1	0,04	9	3,27	5	6,50		
E. Quilpué			5	1,67				
R. Juncal antes junta E. Juncalillo (norte)	9	0,29	10	3,25	3	8,78		
R. Juncal antes junta E. Juncalillo (sur)	8	0,42	31	11,06	7	19,09		
R. Blanco	12	0,62	32	9,52	5	7,36	1	21,86
R. Aconcagua entre R. Blanco y R. Colorado			7	1,99				
Total	35	1,67	125	43,92	27	54,04	1	21,86

ii) Clasificación de glaciares

Otro aspecto que se ha determinado es la distribución de áreas recubiertas a lo largo del Aconcagua Alto. La presencia de glaciares rocosos en la mitad norte es mucho más significativa debido a condiciones climáticas más áridas, además de no observarse glaciares parcialmente recubiertos y existir sólo unos pocos casos de superficies descubiertas (ver **Anexos**). Por el contrario, más al sur predominan los glaciares descubiertos (~63%), sin embargo existen glaciares recubiertos importantes como es el caso de Juncal Norte, cuya lengua terminal se encuentra completamente cubierta de detritos, y el Glaciar del Río Blanco (**Tabla 4**).

Tabla 4. Número (n) y superficie (km²) de glaciares en sub-subcuencas del río Aconcagua Alto distribuidos por tipo de superficie.

Sub-subcuenca	Tipo de superficie				Area total (km ²)
	n	Hielo descubierto (km ²)	Hielo recubierto (km ²)	Glaciares rocosos (km ²)	
R. Putaendo bajo junta R. Hidalgo	14	0,05		7,22	7,27
R. Colorado antes junta E. Riecillos	29	0,74		17,74	18,48
R. Riecillos	15	0,80		9,01	9,81
E. Quilpué	5			1,66	1,66
R. Juncal antes junta E. Juncalillo (norte)	22	2,50		9,82	12,32
R. Juncal antes junta E. Juncalillo (sur)	46	20,57	0,78	9,25	30,60
R. Blanco	50	27,95	6,50	4,91	39,36
R. Aconcagua entre R. Blanco y R. Colorado	7			1,99	1,99
Total	188	52,61	7,28	61,60	121,49

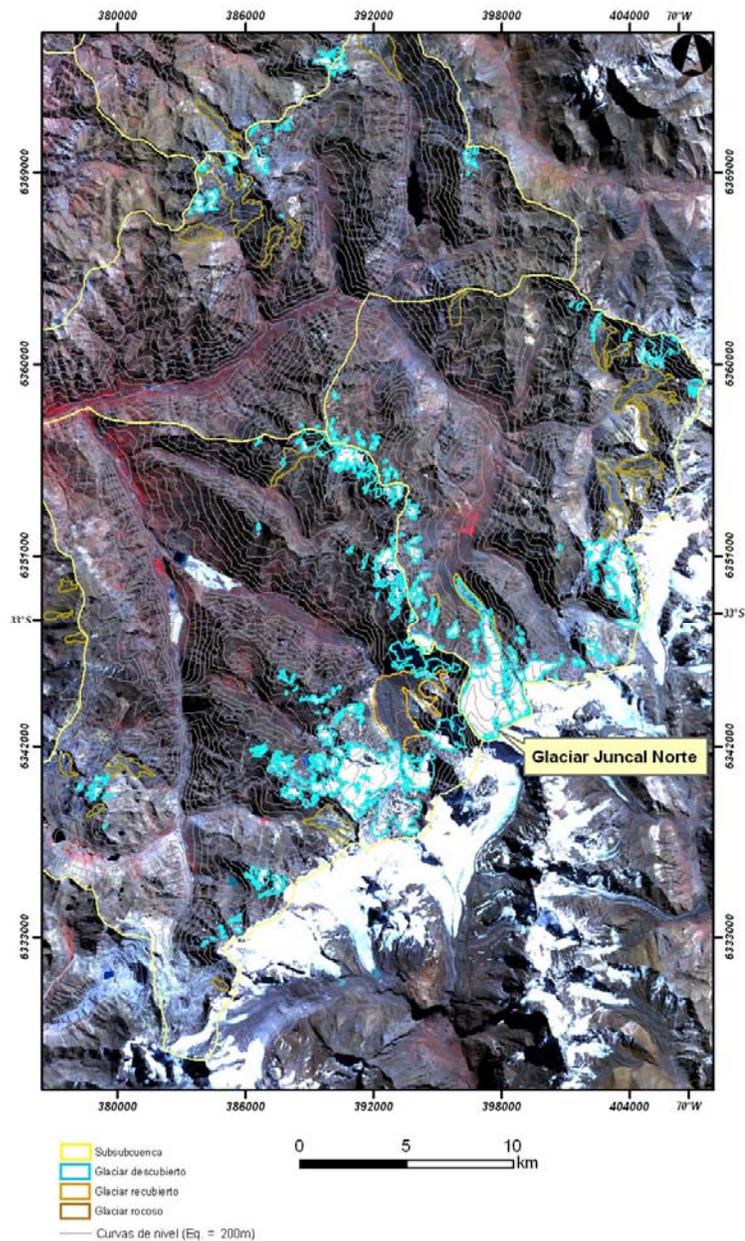


Figura 9. Glaciares digitalizados en la parte sur de la cuenca del río Aconcagua. Notar Glaciar Juncal Norte, uno de los glaciares más importantes en la sub-subcuenca del mismo nombre. Mosaico ASTER de fondo (30 Mar 2008) y curvas de nivel SRTM3 cada 200 m.

Para ver detalle por cada glaciar, referirse a Tabla de atributos en Archivo digital de proyecto adjunto a este documento. Consultar mapas de inventario por sub-subcuencas en sección **Anexos** de este documento.

5.2. Catastro de glaciares al sur del Estrecho de Magallanes, XII Región, Chile austral.

i) *Cordillera Darwin*

El inventario de la Cordillera Darwin fue realizado gracias a una serie multi-temporal de imágenes ASTER y Landsat ETM+ (2001, 2002, 2004, 2006, ver **Tabla 1**), abarcando todas las áreas y minimizando los errores de interpretación por efecto de la nubosidad.

Cordillera Darwin registra la superficie de hielo más importante al sur del Estrecho de Magallanes. El total inventariado aquí es de 2333,14 km² distribuidos en 627 polígonos glaciares, el que incluye los glaciares del casquete principal y de áreas aledañas al oeste de Bahía Filton y del Cordón Central (Homlund & Fuenzalida, 1995). La mayor parte de los glaciares se encuentra en las clases 2 y 3, con una superficie promedio de 3,72 km². Los glaciares pequeños (inferiores a 0,1 km²) son poco frecuentes, característica que lo diferencia de la cuenca del Aconcagua. Para ver la clasificación de glaciares ordenados por división de sub-subcuencas, referirse a la **Tabla 5**. La **Figura 10** muestra una sección del inventario en la parte occidental de Cordillera Darwin (consultar mapa completo del inventario en sección **Anexos**).

Al norte del casquete principal destaca la sub-subcuenca costera aledaña al Seno Almirantazgo, con un total de 364,52 km² de hielo distribuidos en 69 glaciares. El glaciar Marinelli es el de mayor extensión con 133,02 km², el cual ha sido afectado por un dramático retroceso frontal en las últimas décadas (Porter & Santana, 2003), lo que ha sido observado para la mayoría de los glaciares de esta sección de la Cordillera Darwin (Homlund & Fuenzalida, 1995).

La superficie de glaciares más significativa de Cordillera Darwin se encuentra localizada en el margen Sur, en la sub-subcuenca del Beagle, con casi 1000 km², donde la mayoría de los glaciares ha exhibido avances en las últimas décadas (Homlund & Fuenzalida, 1995), destacando el Glaciar Garibaldi, que en Enero del 2007 estaba destruyendo árboles (Rivera *et al.*, 2008). En el margen sur hay varios glaciares que superan los 100 km², tales como los glaciares del Cerro Mayo, Roncagli y Stopanni.

En el sureste de Cordillera Darwin, particularmente al norte del Glaciar Roncagli, se localizan algunos glaciares con frentes parcialmente recubiertos, sin embargo las superficies no son significativas y por lo tanto no son consideradas en la clasificación por rango de tamaño. Aquí también se encuentra uno de los lagos proglaciares embalsados por hielo, más grandes del país, el lago Martinic de 8,7 km² de superficie.

Para ver características en detalle por cada glaciar referirse a Tabla de Atributos en archivo digital adjunto al documento. Mapas del inventario en sección **Anexos**.

Tabla 5. Número (n) y superficie (km²) de glaciares de Cordillera Darwin por sub-subcuencas distribuidos según rango de tamaño (km²).

Sub-subcuenca	Rango de tamaño (km ²)							
	0,01-0,09		0,10-0,99		1,00-9,99		>10,00	
	n	km ²	n	km ²	n	km ²	n	km ²
B. Brookes-S. Serrano	8	0,57	44	20,62	27	88,80	8	240,01
V. Marinelli	4	0,30	32	14,08	26	91,84	7	258,29
V. Cuevas-V. Marinelli	1	0,08	4	1,25	5	17,04	2	90,74
V. Viuda-V. Cuevas			9	3,54	12	26,89	3	88,17
R. Azopardo-V. Viuda	4	0,32	24	6,69	3	4,53		
R. Azopardo	5	0,34	23	7,35	6	13,13		
R. Lapatahia	14	0,68	38	11,59	20	52,91		
C. Beagle	22	1,19	90	34,62	54	182,29	21	773,81
P. entre S. Serrano y S. Ventisqueros	4	0,22	52	23,10	47	151,23	8	126,95
Total	62	3,72	316	122,83	200	628,64	49	1577,96

ii) Otros centros montañosos y glaciares adyacentes

Las imágenes satelitales empleadas en las restantes áreas datan de los años 2003, 2004 y 2005 (ver **Tabla 2**).

El área correspondiente al Monte Sarmiento, al W de Cordillera Darwin, presenta 273,06 km² y un total de 165 glaciares, los que se concentran principalmente en este centro montañoso y en el sector de la Península Rolando. Los glaciares decrecen tanto en número como en superficie respecto de Cordillera Darwin, y sólo unos pocos casos superan los 10 km² (**Tabla 6**). El principal glaciar es el Glaciar Schiaparelli (24,78 km²), el que fue observado por Darwin durante su viaje a bordo del Beagle (King, 1839) con su frente desprendente en el Canal Magdalena, que ha retrocedido varios kms hasta años recientes (Rivera *et al.*, 2008). En el extremo izquierdo de la **Figura 10** se muestra parte de los glaciares digitalizados en el Monte Sarmiento.

Al NW de la Cordillera Darwin se ha inventariado un área de 273,76 km² distribuido en 258 glaciares; éstos se encuentran principalmente en las Islas Santa Inés y Carlos III (**Tabla 6**). Las variaciones frontales de los glaciares Alejandro (8,70 km²) y Beatriz (6,92 km²), en el este de Santa Inés, han sido estudiadas por Aravena (2007). El glaciar más grande tiene una

superficie de 47,66 km². La **Figura 11** muestra el ejemplo de la digitalización de glaciares en la Isla Santa Inés.

Al sur-este de Cordillera Darwin se encuentra Isla Hoste, con una superficie de 409,46 km² en un total de 631 glaciares. La mayor parte de ellos están localizados en la Península Clove, pero también existen otros sectores aledaños importantes como las islas Gordon y Londonberry. La superficie del glaciar más grande es de 54,80 km² (**Tabla 6**, ver **Figura 12**).

Al igual que en Cordillera Darwin, no se observan superficies recubiertas significativas en ninguna de estas áreas. Para ver mayores detalles por glaciar de todas las regiones, referirse a tablas en archivo digital de proyecto adjunto a este documento. Mapas de inventario en sección **Anexos**.

Tabla 6. Número (n) y superficie (km²) de glaciares en otros centros montañosos al sur del Estrecho de Magallanes distribuidos según rango de tamaño (km²).

Area	Rango de tamaño (km ²)							
	0,01-0,09		0,10-0,99		1,00-9,99		>10,00	
	n	km ²	n	km ²	n	km ²	n	km ²
Mte. Sarmiento	15	0,90	87	35,65	56	126,01	7	110,49
Isla Santa Inés	51	3,00	163	55,49	40	103,47	4	111,80
Isla Hoste	181	9,46	385	124,03	61	141,92	4	134,05
Total	247	13,36	635	215,17	157	371,40	15	356,34

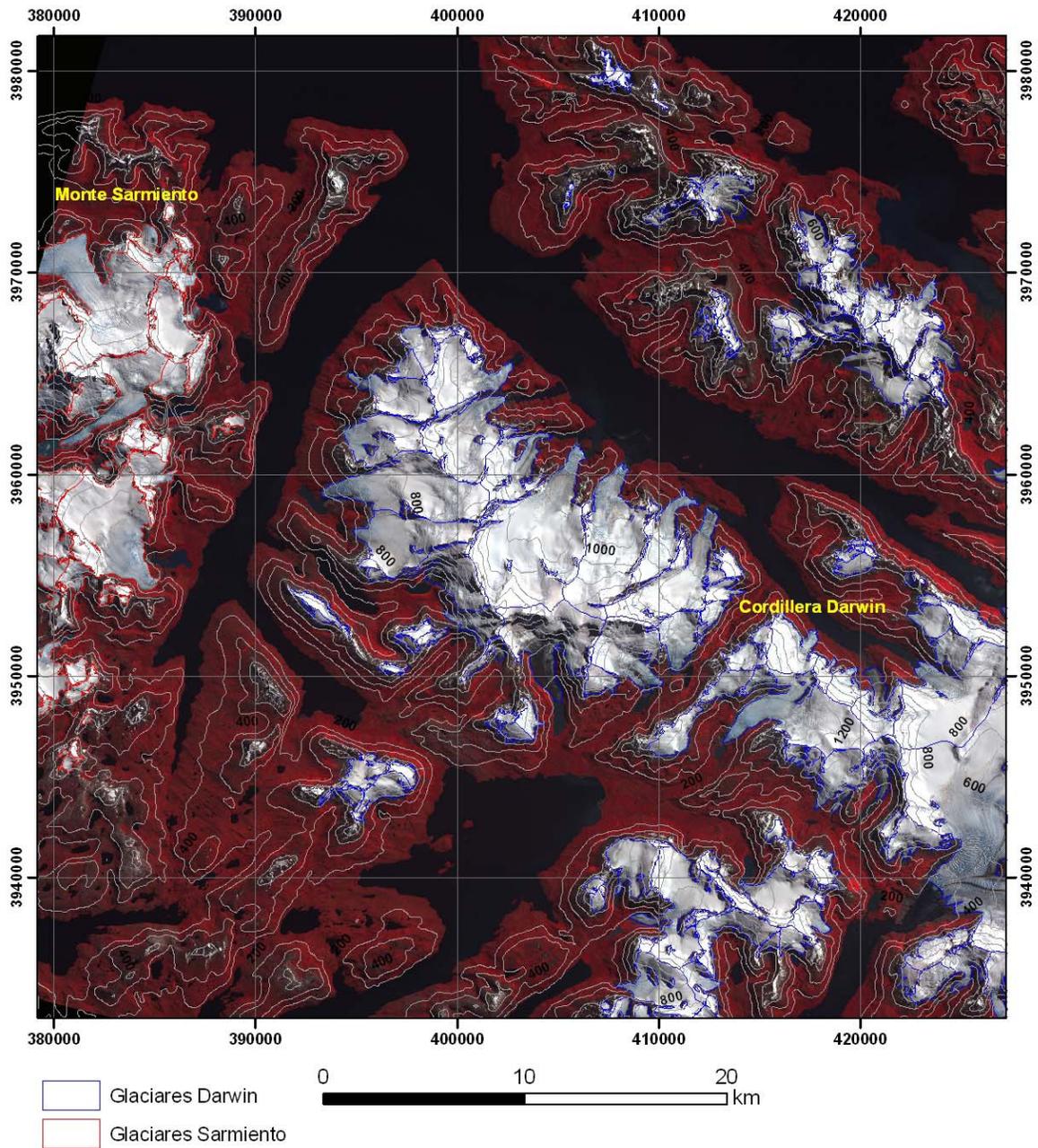


Figura 10. Polígonos glaciares digitalizados en el Oeste de Cordillera Darwin y en el Monte Sarmiento. Imagen ASTER de fondo (13 Feb 2004) y curvas de nivel SRTM3 cada 200 m.

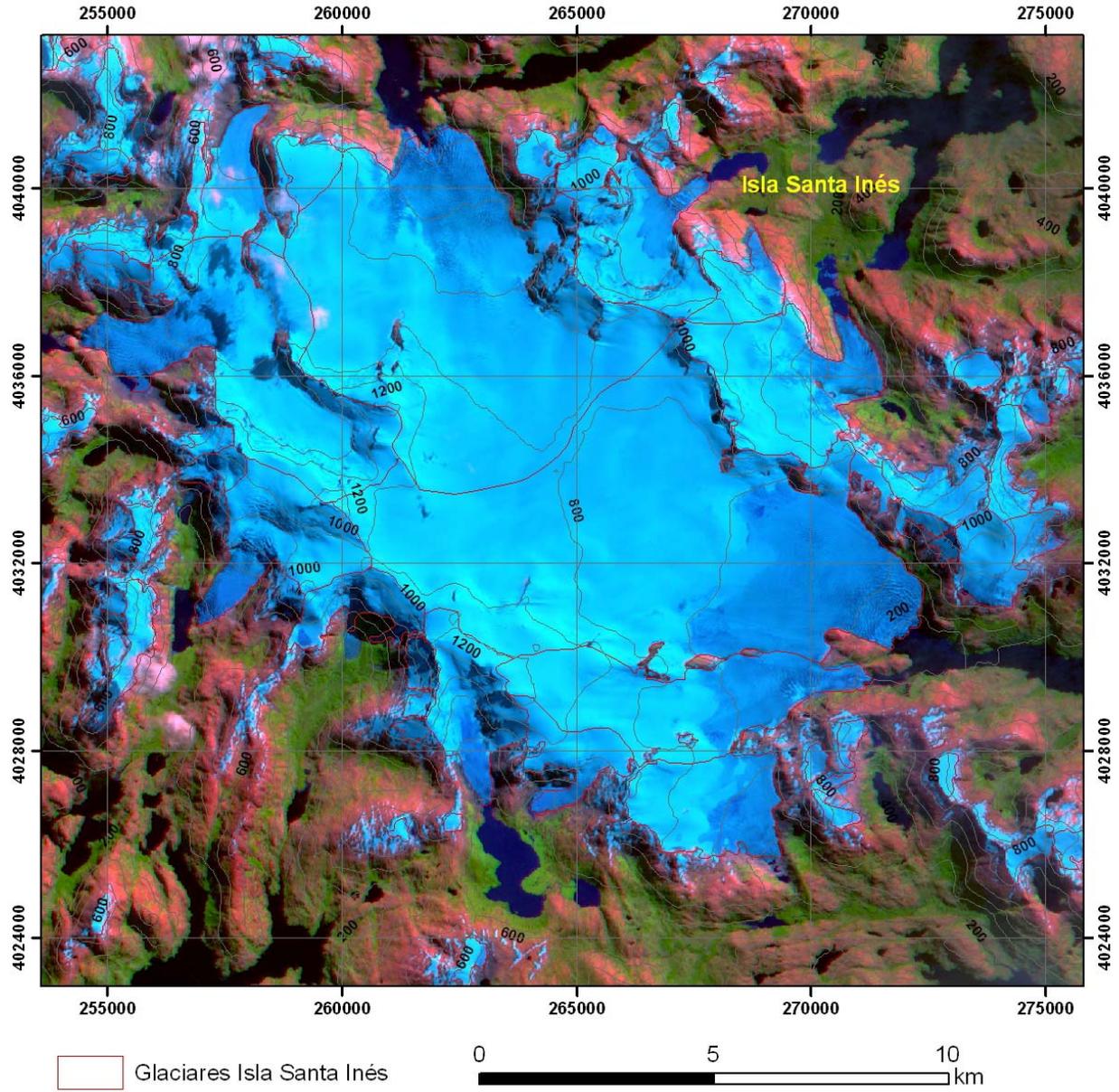


Figura 11. Polígonos glaciares digitalizados en la Isla Santa Inés. Imagen Landsat ETM+ de fondo (1 Marzo de 2005). Curvas SRTM3 cada 200 m.

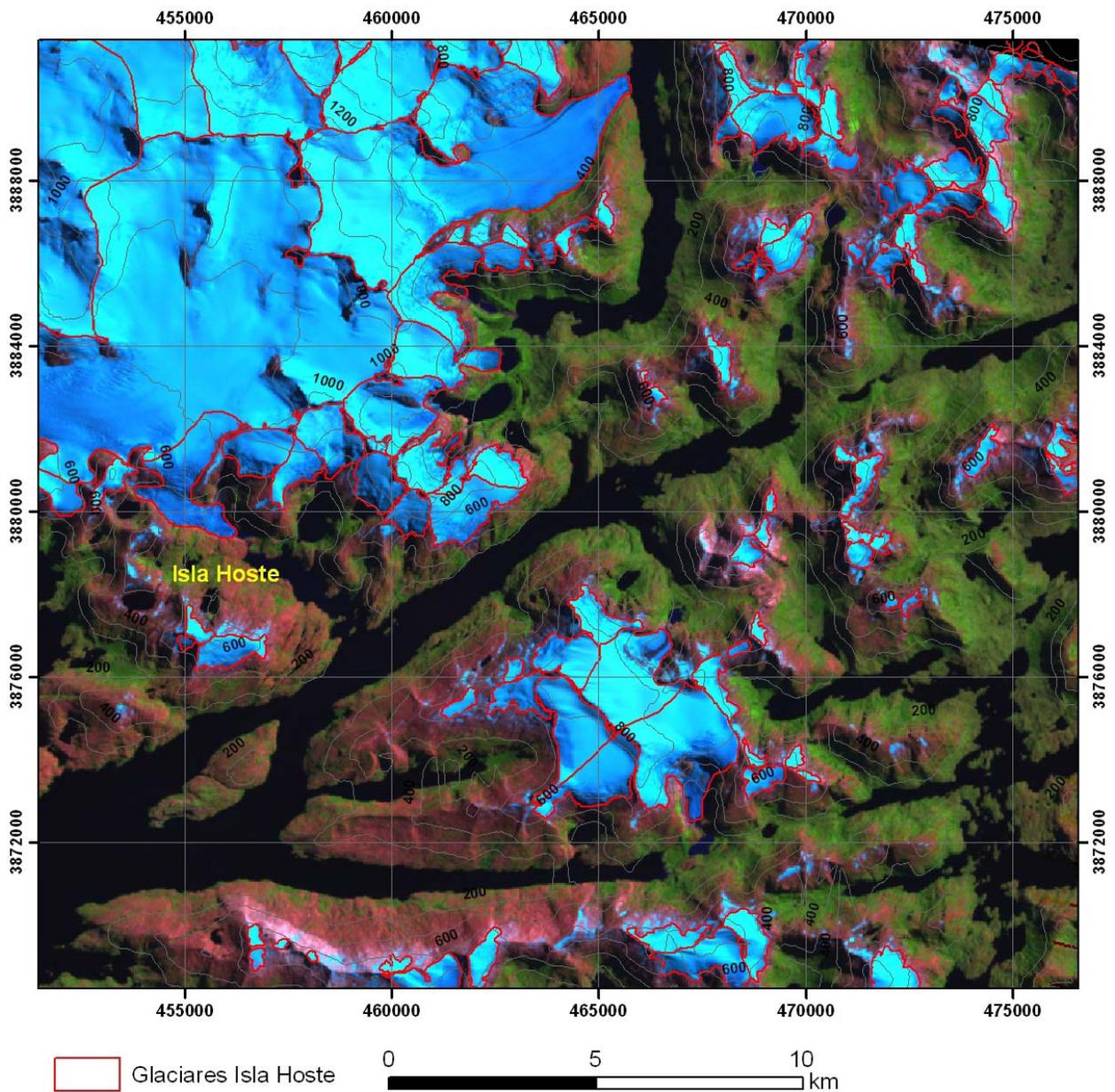


Figura 12. Polígonos glaciares digitalizados en la Isla Hoste. Imagen Landsat ETM+ de fondo (13 Febrero de 2004). Curvas SRTM3 cada 200 m.

VI. CONCLUSIONES

El catastro de glaciares de la cuenca superior del Aconcagua (32°S) es una contribución significativa en el conocimiento glaciológico en Chile central. Sin embargo, para estimar con mayor precisión las reservas totales de hielo en esta región aún es necesario actualizar los inventarios de otras importantes cuencas tales como las de los ríos Maipo (33°S), Cachapoal (34°S), Tinguririca (35°S) y Mataquito (35°S). Tomando en cuenta la información disponible hasta ahora (Rivera *et al.*, 2000), la cuenca del Aconcagua representaría alrededor de un 15% de la superficie total de glaciares entre los 32°S y los 35°S.

La diferencia en el área inventariada en el Aconcagua respecto al estudio original (Valdivia, 1984) es de aproximadamente -20%. Si esta situación es asociada a la tendencia de retroceso actualmente en curso (Rosenblüth *et al.*, 1997; Quintana, 2004; Carrasco *et al.*, 2005) y es replicada en las restantes cuencas englaciadas al sur de los 32°S, la reducción de glaciares en Chile central puede considerarse altamente significativa. No obstante lo anterior, los resultados aquí presentados reflejan la situación del Aconcagua en particular, donde factores locales potencialmente afectando los glaciares deben ser evaluados en detalle. Por otra parte, tanto los métodos como los datos utilizados en los catastros deben ser considerados como un factor, al menos parcial, en la variabilidad de los resultados. Más aún, los glaciares descubiertos o parcialmente cubiertos han sido inventariados con gran precisión, sin embargo se estima que la resolución de las imágenes satelitales empleadas no es suficiente para detectar la totalidad de los glaciares rocosos localizados en la parte norte del Aconcagua.

El catastro al sur del Estrecho de Magallanes es información inédita para los glaciares localizados en Chile austral. Se sabe que algunos glaciares de la Cordillera Darwin están experimentando importantes retrocesos durante las últimas décadas (Porter & Santana, 2003), por lo cual los futuros catastros a realizar en el siglo XXI serán fundamentales para comprobar si aquellas tendencias de retroceso son generalizadas para el extremo sur del país. En esta etapa se realizó un catastro de los principales centros montañosos (Cordillera Darwin, Monte Sarmiento, Isla Santa Inés e Isla Hoste) con un valor total de 3290 km² de superficie de glaciares al sur de los 53°S, lo que es mucho mayor a las estimaciones previas para la región austral (Lliboutry, 1956; Casassa, 1995). Sin embargo, en el futuro será necesario realizar análisis de mayor profundidad respecto a las características morfológicas y locales de las áreas inventariadas.

Los cambios experimentados por los glaciares pueden tener importantes consecuencias para los recursos hídricos presentes y futuros debido por ejemplo, a la competencia creciente por demandar derechos de agua entre distintos usuarios como resultado del crecimiento económico en décadas recientes (Rosegrant *et al.*, 2000). En concreto, esto es actualmente aplicable al caso de la cuenca del Aconcagua, la que abastece de reservas hídricas a una serie de actividades económicas y una parte importante de la población, donde la tendencia decreciente de caudales ya observada en algunos afluentes de la cuenca superior puede ser en gran medida justificada por la reducción en la contribución de los glaciares allí existentes (Pellicciotti *et al.*, 2007). Por ello, es necesario un mayor conocimiento que mejore las

predicciones a futuro respecto a la tendencia glaciológica y las implicancias en los recursos hídricos.

VII. REFERENCIAS

1. ARAVENA, J.C. 2007. Reconstructing climate variability using tree rings and glacier fluctuations in the Southern Chilean Andes. Tesis doctoral (Universidad de Western Ontario), London, 220 p.
2. BENITEZ, A. 1980. Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile. Santiago, Dirección General de Aguas.
3. BOWN, F.; RIVERA, A.; ACUÑA, C. 2008. Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, **48**, 43-48.
4. CARRASCO, J.F.; CASASSA, G.; QUINTANA, J. 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.
5. CASASSA, G. 1995. Glacier inventory in Chile: Current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, **21**, 317-322.
6. CAVIEDES, J. 1979. Inventario de Glaciares en la Hoya del río Cachapoal y Predicción de la Escorrentía del Deshielo, Andes Centrales. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 216 p.
7. HOMLUND, P.; FUENZALIDA, H. 1995. Anomalous glacier responses to 20th century climatic changes in Darwin Cordillera, southern Chile. *Journal of Glaciology*, **41**(139), 465-474.
8. IWASAKI, A.; FUJISADA, H. 2005. ASTER geometric performance. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, **43**(12), 2700-2706.
9. KÄÄB, A.; PAUL, F.; MAISH, M.; HOELZE, M.; HAEBERLI, W. 2002. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: II. First results. *Annals of Glaciology*, **34**, 362-366.
10. KÄÄB, A.; HUGGEL, C.; PAUL, F.; WESSELS, R.; RAUP, B.; KIEFFER, H.; KARGEL, J. 2003. Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and application. *EARSeL eProc.*, **2**(1), 43–53.
11. KING, P. 1939. Narrative of the surveying voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe. London, Proceedings of the first expedition, 1826-30, under the command of Captain P. Parker King, Volume I, Henry Colburn.
12. LILLESAND, T.; KIEFER, R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. J. Wiley & Sons, New York, 721 p.
13. LLIBOUTRY, L. 1956. Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología. Santiago, Ediciones de la Universidad de Chile, 471 p.
14. MARANGUNIC, C. 1979. Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo. Santiago, DGA, Publicación G-2, 5 v.
15. MÜLLER, F.; CAFLISCH, T.; MÜLLER, G. 1977. Instructions for compilation and assemblage of data for TTS/WGI. Zürich, UNESCO, 28 p.

16. NOVEROY, C. 1987. Inventario de Glaciares de la hoya del río Mataquito. Santiago, DGA, Publicación Interna, EH 87/1, 38 p.
17. PAUL, F.; KAAB, A.; MAISCH, M.; KELLENBERGER, T.; HAEBERLI, W. 2002. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory. I. Methods. *Annals of Glaciology*, **34**, 355–361.
18. PELLICCIOTTI, F.; BURLANDO, P.; VAN VLIET, K. 2007. Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, central Chile. *IAHS Publ.*, **318**, 17-38.
19. PEÑA, H.; NAZARALA, N. 1987. Snowmelt-runoff Simulation Model of a Central Chile Andean Basin with Relevant Orographic Effects. *IAHS Publ.*, **166**, 161-172.
20. PORTER, S.C.; SANTANA, A. 2003. Rapid 20th century retreat of Ventisquero Marinelli in the Cordillera Darwin Icefield. *Anales del Instituto de la Patagonia*, **31**, 17–26.
21. QUINTANA, J. 2004. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis de Magíster (Universidad de Chile.), Santiago, 93 p.
22. RIGNOT, E.; RIVERA, A.; CASASSA, G. 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Global Sea Level Rise. *Science*, **302**, 434-437.
23. RIVERA, A.; CASASSA, G.; ACUÑA, C.; LANGE, H. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista Investigaciones Geográficas*, **34**, 29-60.
24. RIVERA, A.; BOWN, F.; MELLA, R.; WENDT, J.; CASASSA, G.; ACUÑA, C.; RIGNOT, E.; CLAVERO, J.; BROCK, B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, **43**, 111–122.
25. RIVERA, A.; BOWN, F.; ACUÑA C.; ORDENES, F. 2008. Chilean glaciers as indicators of climate change. *Terra Glacialis*, 11, 193-207.
26. ROSEGRANT, M.W.; RINGLER, C.; MCKINNEY, D.C.; CAI, X.; KELLER, A.; DONOSO, G. 2000. Integrated economic–hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. *Agric. Econ.*, **24**(1), 33–46.
27. ROSENBLÜTH, B.; FUENZALIDA, H.A.; ACEITUNO, P. 1997. Recent temperature variations in southern South America. *Int. J. Climatol.*, **17**(1), 67–85.
28. VALDIVIA, P. 1984. Inventario de glaciares Andes de Chile central (32°–35° lat. S). Hoyas de los ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal y Tinguiririca. En: Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur, Santiago, 3 al 8 de Diciembre 1984, p.6.1–6.24.
29. WILLIAMS, R.S.; HALL, JR D.K.; CHIEN, J.Y.L. 1997. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973–92. *Annals of Glaciology*, **24**, 72–80.