

Andrés RIVERA ^(*) ^(**) ^(***), Francisca BOWN ^(*) ^(**),
César ACUÑA ^(*) and Fernando ORDENES ^(*)

I ghiacciai del Cile come indicatori dei cambiamenti climatici

Chilean Glaciers as indicators of climate change

Riassunto

Questo lavoro presenta una sintesi del glacialismo attuale del Cile e delle sue più significative variazioni recenti. Sebbene l'andamento di alcuni ghiacciai sia da ricondurre anche a fattori non-climatici, la maggior parte degli apparati ha sperimentato un ritiro lineare e un generale smagrimento in risposta all'incremento delle temperature e alla diminuzione delle precipitazioni, come registrate in diverse stazioni meteorologiche. La riduzione delle superfici glaciali ha influenzato la disponibilità di risorse idriche nella regione del Cile centro-settentrionale, dove oltre il 70 % delle portate fluviali è dovuto alla fusione di neve e ghiaccio, in particolare durante le estati più secche. Il proseguimento dell'attuale tendenza di modificazione del clima produrrà una forte riduzione del volume di ghiaccio presente nel paese, la scomparsa dei piccoli ghiacciai del Cile centrale e l'accrescimento del contributo all'innalzamento globale del livello del mare da parte dei ghiacciai della Patagonia.

Abstract

This work presents a summary of Chile's present glacial environment and its most significant recent variations. Though the behaviour of some glaciers may be driven by non-climatic factors, the majority of them experienced a linear shrinkage and a generalized thinning as a result of both an increase of temperatures and a lower precipitations regime, as recorded by several meteo stations. The reduction of the area covered by glaciers has affected water availability in Chile's North-Central region, where 70 % of river-flows originates from snow and ice melting, particularly in the driest summers. The continuation of the present trend is bound to produce a dramatic reduction of ice throughout the whole Country, the disappearance of Central Chile's small glaciers and significantly increase the contribution of Patagonian glaciers to the global sea-level rise.

Introduzione

I ghiacciai cileni vivono una fase di generale ritiro, variabile dai pochi metri all'anno degli apparati del Nord agli oltre 900 m annui nel Cile meridionale (Rivera et al., 2002; Porter e Santana, 2003). Tale comportamento è dovuto principalmente al cambiamento climatico in atto, in particolare, all'incremento termico e alla diminuzione delle piogge registrate in varie stazioni meteorologiche (Rosenblüth et al., 1997; Quintana, 2004).

Tuttavia comportamenti asincroni sono determinati da fattori locali; in particolare, i *calving glaciers* possono sperimentare avanzate della fronte (Rivera et al., 1997) o veloci riduzioni che, avvicinando il ghiaccio al punto di galleggiamento, possono provocare collassi subitanei (Rivera e Casassa, 2004).

Introduction

Chilean glaciers are undergoing a generalized withdrawal, ranging from few m/yr in the northern area to over 900 m/yr in southern Chile (Rivera et al., 2002; Porter and Santana, 2003). This behaviour is mainly due to current climate changes and, more specifically, to the increase of air temperature and to the lesser precipitation recorded by several meteo stations (Rosenblüth et al., 1997; Quintana, 2007).

Nevertheless, there are some asynchronous behaviours caused by local factors: for instance *calving glaciers* may undergo rapid frontal advances (Rivera et al., 1997) or fast withdrawals that, bringing the ice close to its floating limit, may cause a sudden collapse (Rivera and Casassa, 2004).

For this reason, not all Chilean glaciers can be taken

^(*) Centro de Estudios Científicos (CECS), Valdivia, Chile.

^(**) Centro de Ingeniería de la Innovación del CECS, Valdivia, Chile.

^(***) Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Non tutti i ghiacciai cileni sono quindi buoni indicatori del cambio climatico, in particolare ove prevalgono fattori di controllo topografico (fiordi e laghi), di controllo “dinamico” o di influenza delle attività vulcaniche (Rivera et al., 2006a).

Anche se non esplicitamente riconosciute dalla legislatura cilena, le risorse idriche allo stato solido hanno una grande importanza per il Paese. Nella zona centrale e in quella settentrionale, la loro fusione contribuisce in maniera significativa ad alimentare i corsi d'acqua superficiali, con percentuali che nelle estati più secche possono raggiungere il 70 % (Peña e Nazarala, 1987). Altre implicazioni legate ai ghiacciai sono di tipo negativo: i rischi associati alla formazione di valanghe, lo svuotamento di tasche d'acqua sub-glaciali (Rivera e Casassa, 2004), la formazione di colate di fango durante le eruzioni vulcaniche (Naranjo e Moreno, 2004). Nella zona meridionale, i ghiacciai hanno svolto un ruolo geo-politico nella determinazione dei confini tra stati (Casassa e Rivera, 2001). I ghiacciai della Patagonia, infine, forniscono un importante contributo all'innalzamento del livello del mare (Rignot et al., 2003).

Metodi

In questa sede si sono riuniti diversi dati con l'obiettivo di determinare l'estensione dei ghiacciai cileni e le loro variazioni. Tra le fonti utilizzate: le carte topografiche elaborate dall'Istituto Geografico Militare del Cile (IGM, anni '60 e '70) con tecniche di restituzione aerofotogrammetriche; fotografie aeree verticali e immagini satellitari ad alta risoluzione (ASTER, Landsat), analizzate per determinare le caratteristiche dei ghiacciai in diversi momenti; documenti storici (cronache, appunti di viaggio, fotografie, carte ecc.) degli esploratori che visitarono numerosi ghiacciai sin dagli inizi del XIX secolo, specialmente nel Sud del Paese. Queste fonti sono state interpretate e confrontate con le informazioni attuali per la ricostruzione di tendenze secolari.

Impiegando immagini satellitari nello spettro del visibile si sono generate composizioni in falso-colore e, quindi, digitalizzazioni delle superfici glaciali e delle posizioni frontali in diverse epoche, permettendo così di confrontare direttamente i cambiamenti intervenuti. Inoltre, la generazione di DEM mediante l'uso di Sistemi Informativi Geografici ha permesso di determinare le modificazioni di quota del ghiaccio attraverso il confronto tra i modelli.

Inventario dei ghiacciai cileni

In Cile (fig. 1, tab. 1), con l'eccezione dell'area patagonica (18°-41°S), sono stati inventariati 1696 ghiacciai, per un'area complessiva di 1409 km². Nella zona Nord (18°-32°S), la superficie glacializzata è scarsa (112 km²); per quest'area è disponibile solo un inventario

as good indicators of climate changes, particularly where topographic (e.g. fiords or lakes) or dynamic factors or the influence of volcanic activities prevail (Rivera et al., 2006).

Although not explicitly addressed by Chile's legislation at present, these solid-state water resources are of the utmost importance for the whole Country. In central and northern regions, snow and ice runoffs feed the local streams contributing as much as 70 % in dry summers (Peña and Nazarala, 1987). Other implications connected with the presence of glaciers may have negative impacts, such as the risks of avalanches, the emptying of sub-glacial water pockets (Rivera and Casassa, 2004), or the formation of mud flows during volcanic eruptions (Naranjo and Moreno, 2004). In the southern regions, glaciers have represented an essential geo-political factor in the definition of border lines between states (Rivera and Casassa, 2001). At last, Patagonian glaciers play a key role as contributors to global sea-level rise (Rignot et al., 2003).

Methodology

This work has collected different sets of data in order to evaluate Chile's glaciers extension and evolution throughout different periods. The sources examined are: maps produced by Chile Military Geographic Institute (IGM) in the 1960s and 1970s based on aerial photogrammetric procedures, vertical aerial photographs and high resolution satellite images (ASTER, Landsat), from which were derived the characteristics of the glaciers in different moments; historical documents (chronicles, travel notes, photos, maps, etc.) by explorers who visited the glaciers since the early 19th century, mainly in the southern part of the Country. These sources have been interpreted and compared with present data to reconstruct long-period trends.

False-colour composites, derived from satellite images in the visible spectrum, have been used to produce digital pictures of ice-covered areas and the positions of the tongues in different periods thus prompting a direct comparison of all changes. Furthermore, overlap of different digital models (DEM) generated by means of a Geographic Information System (GIS) has allowed the evaluation of the ice elevation changes.

Inventory of Chilean Glaciers

Leaving aside the Patagonian region, 1,696 glaciers covering an area of 1,409 km² have been inventoried between 18° and 41°S (fig. 1, tab. 1). In the North (Lat.18°-32°S) the ice is scarce (112 km²) and only a preliminary inventory produced by Garin (1987) is

preliminare elaborato da Garin (1987). Per il Cile centrale (32°-36°S) i catastri sono stati compilati principalmente dalla Direzione Generale delle Acque del Ministero delle Opere Pubbliche ed elaborati da Marangunic (1979), Valdivia (1984) e Rivera (1989).

available for this area. For Central Chile (32°-36°S) glacier inventories compiled mostly by the General Direction of Water Resources (Ministry of Public Works) have been processed by Marangunic (1979), Valdivia (1984) and Rivera (1989).

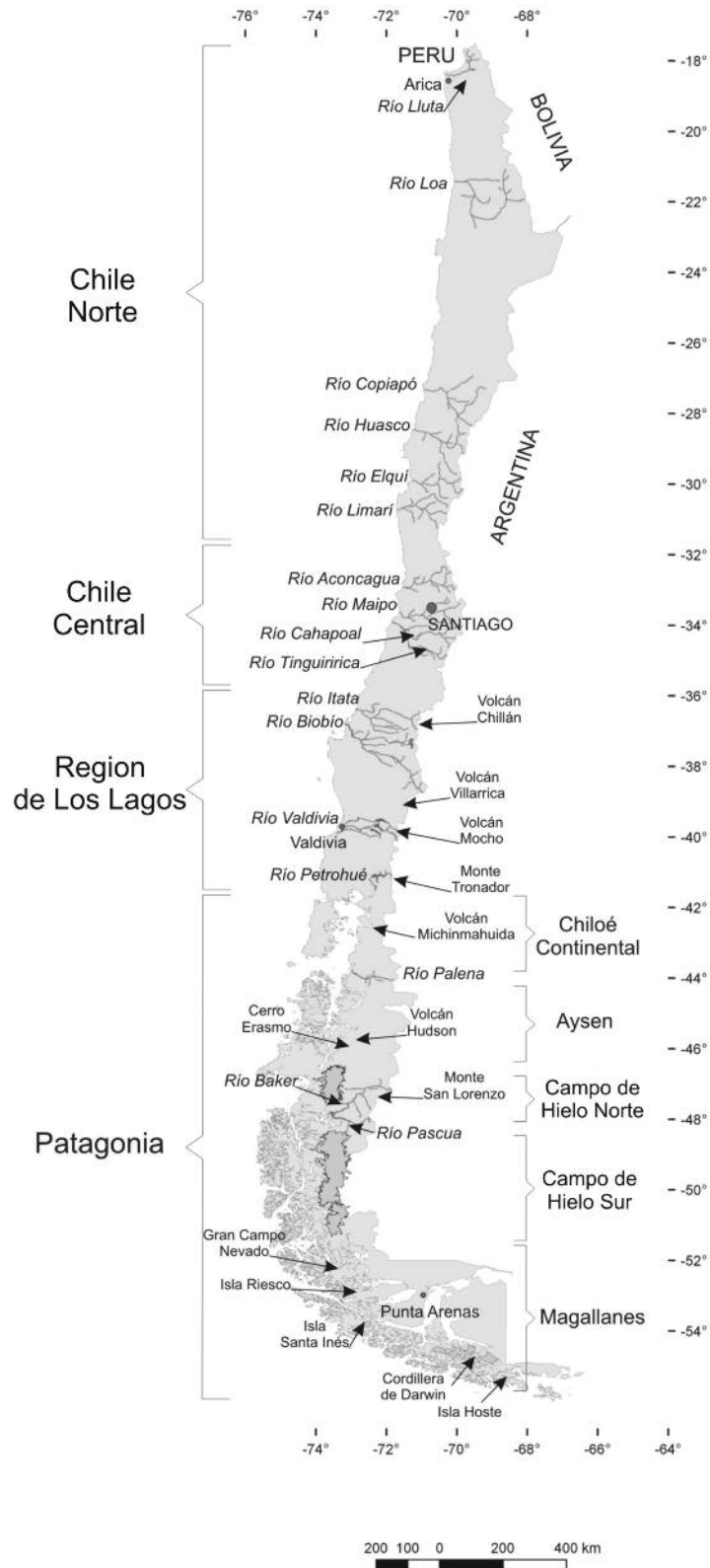


Figura 1 - Ubicazione dei ghiacciai cileni.

Figure 1 - Location of Chile's glaciers.

Tra il 41°S e il 56°S si concentra la maggior parte del ghiaccio del Cile (circa 19.000 Km²): l'inventario del Campo de Hielo Norte (CHN) è stato aggiornato da Rivera et al. (2007); quello del Campo de Hielo Sur (CHS) da Aniya et al. (1996); quello del Gran Campo Nevado (GCN) da Schneider et al. (2007) mentre l'area dell'Isla Riesco è stata analizzata da Casassa et al. (2002). Nonostante i recenti progressi, sono ancora scarse le informazioni disponibili sulla Chiloé continentale (41°-44°S) e su gran parte dell'Aysén e Magallanes, a eccezione del CHN e del CHS (Rivera et al., 2002), dove esistono altre aree glacializzate, come quelle della Cordigliera Darwin, che si ritiene possieda circa 2300 km² di ghiaccio (USGS, 1998), e dell'isola di Santa Inés. Considerando gli inventari e le ultime stime per le aree meridionali, la superficie coperta dai ghiacciai cileni è di 20.188 km².

Most ice fields in Chile are concentrated between latitude 41°S and 56°S (about 19,000 km²): the inventory of Campo de Hielo Norte (CHN) was updated by Rivera et al. (2007), that of Campo de Hielo Sur (CHS) by Aniya et al. (1996); that of Gran Campo Nevado (GCN) by Schneider et al. (2007), while the Isla Riesco area was analyzed by Casassa et al. (2002). In spite of recent progresses, scarce information is available for Continental Chiloé (Lat. 41°-44°S) and, with the exception of CHN and CHS (Rivera et al., 2002), for most of Aysén and Magallanes where some areas, such as the Cordillera Darwin - believed to hold around 2,300 km² of ice (USGS, 1998) - and the Santa Inés Island are still poorly surveyed. By adding the most recent estimates for the southern areas to what has already been mapped, Chile's overall ice-covered surface should amount to 20,188 km².

Glacier areas or basins		Number	Area (km ²)	Source	
Inventoried glaciers	Norte Grande*	14	29.70	Garín (1987)	
	Norte Grande*	14	12.13		
	Norte Chico*	49	66.83		
	Norte Chico *	11	7.02		
	Río Aconcagua	267	151.25	Valdivia (1984)	
	Río Maipo	647	421.9	Marangunic (1979)	
	Río Cachapoal	146	222.42	Caviedes (1979)	
	Río Tinguiririca	261	106.46	Valdivia (1984)	
	Río Mataquito	81	81.91	Noveroy (1987)	
	Río Maule	98	35.32	Tapia (2004)	
	Río Itata	21	8.3	Zenteno <i>et al.</i> , (2004)	
	Río Bio Bio	29	52.37	Rivera (1989)	
	Río Imperial	13	18.72		
	Río Tollén	14	68.48		
	Río Valdivia	6	42.33		
	Río Bueno	11	19.35		
	Río Petrohué	12	60.57		
	Río Maullín	1	2.84		
	Río Chamiza	1	1.05		
	Campo de Hielo Norte (CHN)	70	3,953	Rivera <i>et al.</i> (2007)	
Campo de Hielo Sur (CHS)	48	9,659**	Aniya <i>et al.</i> (1996)		
Península Muñoz Gomero and Gran Campo Nevado	75	252.5	Schneider <i>et al.</i> , (2007)		
Isla Riesco	45	215	Casassa <i>et al.</i> , (2002)		
Inventoried subtotal		1934	15,488.35		
Non-inventoried areas	Chiloé Continental	Volcanes Yate, Michinmahuida	n/i	250	Lliboutry (1956) Aniya <i>et al.</i> , (1996) USGS (1998) Rivera <i>et al.</i> (2002)
	Aysén	Volcan Hudson Cerro Erasmo Cerro San Lorenzo Cerro Blanco	n/i	550	
	Surroundings of the Patagonian Icefields	Many small glaciers	n/i	1,400	
	Magallanes	Volcán Burney Monte Sarmiento Isla Santa Inés Cordillera Darwin Isla Hoste	n/i	2,500	
	Estimated subtotal				
Total area of Chilean glaciers				20,188.35	

Tabella 1 - Aree glacializzate del Cile. (* Inventario provvisorio; ** Include i ghiacciai del CHS esclusi quelli di pertinenza principalmente argentina: Upsala, Agassiz, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino, Moreno e Frías).

Table 1 - Chile's glacial areas. (* preliminary cadastre; ** Including CHS glaciers but leaving out the mostly Argentinean ones i.e. Upsala, Agassiz, Onelli, Spegazzini, Mayo, Ameghino, Moreno e Frías).

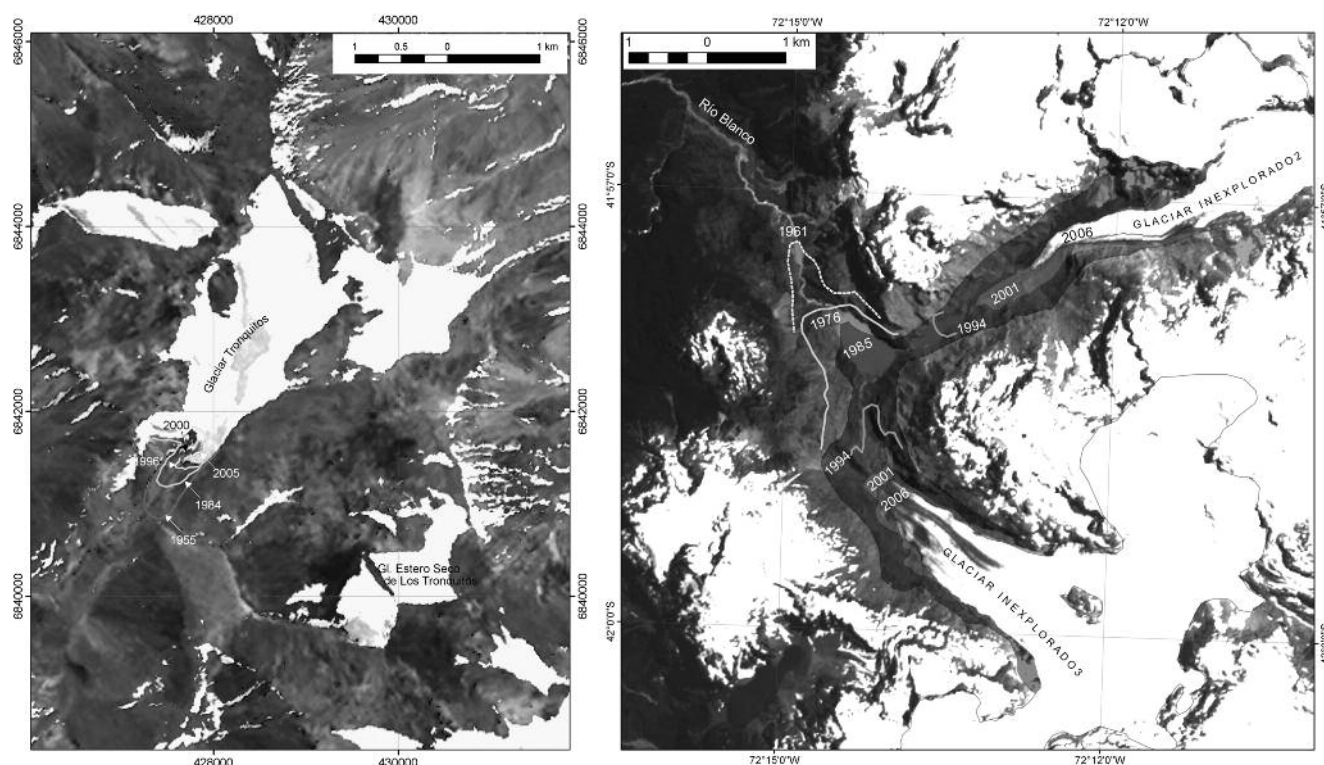


Figure 2, 3 - Variazioni del Ghiacciaio Tronquitos (sin.), Cile settentrionale, e del Ghiacciaio Inexplorado (dx), Cile continentale.
Figures 2, 3 - Fluctuations of the Tronquitos Glacier (left), Northern Chile, and of the Inexplorado Glacier (right), Continental Chile.

Le principali aree glacializzate del Cile

Zona Nord (18°-32°S)

Si tratta di un'area caratterizzata da condizioni desertiche, con un numero limitato di ghiacciai, molti dei quali rock-glaciers o *debris-covered glaciers*. Data la notevole elevazione delle Ande, in questo settore molti ghiacciai sono termicamente "freddi" e si ritirano con valori modesti legati principalmente a fenomeni di sublimazione (Rivera et al., 2000; Ginot et al., 2002).

Variazioni dei ghiacciai

Il Ghiacciaio Tronquitos (28°32'S, 69°43'W) è uno dei pochi studiati in dettaglio: ha perduto 2,7 km² di ghiaccio tra il 1955 e 2002 (Rivera et al., 2002) con un ritiro frontale di 916 m tra 1955 e 2005 (fig. 2). Un ghiacciaio vicino, l'Estero Seco del Rio Tronquitos, ha subito nel 1985 un fenomeno di *jokulhaupt*, con la rottura improvvisa di una tasca d'acqua sub-glaciale che ha provocato la piena del Manflas, lungo 83 km fino al bacino Lautaro, con il coinvolgimento di un volume d'acqua di 5 hm³ (Peña e Escobar, 1987). Un altro ghiacciaio oggetto di studio in quest'area è il Tapado (30°08'S, 69°55'W; Valle del Rio Elqui). Da esso proviene una carota di ghiaccio a tutto spessore grazie alla quale è stata determinata l'influenza de El Niño nei processi di accumulo (Ginot et al., 2002).

Chile's Main Glacial Areas

Northern Area (Latitude 18°-32°S)

This area is characterised by a mountain-desert climate and a limited number of glaciers, many of them rock glaciers or *debris-covered glaciers*. Thanks to the high altitude of the Andes, many glaciers of this sector are thermally "cold" and shrink at a modest rate, mainly through sublimation processes (Rivera et al., 2000; Ginot et al., 2002).

Glaciers' variations

The Tronquitos Glacier (28°32'S, 69°43'W), one of the few studied in details, has lost 2.7 km² of surface between 1955 and 2002 (Rivera et al., 2002), with a front withdrawal of 916 m between 1955 and 2005 (fig. 2). A nearby glacier, Estero Seco del río Tronquitos, underwent a *jokulhaupt* process in 1985, when a sudden breakdown of a sub-glacial water pocket caused a flood in *Manflas*, involving the overall discharge of a volume of 5 hm³ of water over a distance of 83 km until the Lautaro basin (Peña and Escobar, 1987). Another glacier being studied in this Region is the Tapado Glacier (30°08'S, 69°55'W), located in the *río Elqui* valley. An ice core drilled throughout it allowed a study of the influence of El Niño in the mass accumulation processes (Ginot et al., 2002).

Regione Centrale (32°-36°S)

In quest'area esistono più di 1000 km² di ghiaccio distribuiti in circa 1500 ghiacciai (Rivera et al., 2000). Nella regione si manifesta un forte conflitto tra i settori minerario, agricolo, urbano e industriale per l'utilizzo delle risorse idriche (Rosegrant et al., 2000), per lo più di origine nivale o glaciale (Masiokas et al., 2006).

Variazioni dei ghiacciai

Tra i ghiacciai di questa zona emerge lo Juncal Sur (33°05'S, 70°06'W), nella valle del Rio Maipo, con 22,7 km² nel 2006 e con il più elevato valore di ritiro (Rivera et al., 2000). Altri ghiacciai importanti sono l'Olivares Beta (33°08'S, 70°05'W) e l'Olivares Gamma (33°08'S, 70°10'W), rispettivamente con 9,9 e 12,8 km² nel 2006. Nel 1935, osservati durante un'ascensione al Cerro Risopatrón, i due ghiacciai si presentavano uniti (Lliboutry, 1956). Da allora, il processo di ritiro ha coinvolto soprattutto l'Olivares Beta, che ha perso oltre 3,9 km lineari in 71 anni. Nello stesso periodo, l'Olivares Gamma ha subito un ritiro frontale di 2 km e una riduzione di spessore di 0,7 m a⁻¹ tra il 1955 e il 1997 (Rivera et al., 2002).

Più a Sud, il Ghiacciaio Echaurren Norte (33°33'S, 70°08'W), oggetto di bilancio di massa dal 1975, fa anch'esso registrare chiare tendenze negative, altamente influenzato del fenomeno de El Niño – Oscillazione Sud (Escobar et al., 1995).

Un caso particolare è quello dello Juncal Norte (33°02'S, 70°06'W) che, rispetto ai suoi vicini, ha subito un ritiro moderato, dovuto alla localizzazione della fronte in una valle profonda raggiunta dalla radiazione solare solo per poche ore al giorno (fenomeno del “restringimento dell'orizzonte”) (Rivera et al., 2000). Il suo ritiro si aggira tra i 4 e i 20 m a⁻¹ fino al 2006, riguardando principalmente la fronte coperta. La perdita di superficie è stata di 0,21 km² nel periodo 1955-1997 (Rivera et al., 2002). Il Ghiacciaio Cipreses (34°33'S, 70°22'W), nella valle del Cachapoal, è tra quelli dotati di misure più antiche; il suo ritiro, dal 1842, si avvicina ai 5 km (Rivera et al., 2006b). Nella valle del Tinguiririca, il Ghiacciaio Universidad (34°42'S, 70°20'W), così denominato da Lliboutry (1956), ha realizzato un ritiro con valori costanti dal 1945 al 2004, per un totale di 2 km (Le Quesne et al., in stampa).

Regione di Los Lagos (36°-41°S)

In questa regione si osserva una riduzione del numero di unità glaciali, dovuto alla minor altitudine raggiunta dalla Cordigliera andina. La maggioranza dei ghiacciai è situata su coni vulcanici attivi: tra questi, i Nevados de Chillán (36°50'S, 71°25'W), un complesso formato da diversi coni vulcanici associati al Vulcano Chillán (González-Ferrán, 1995). Quella dei Nevados de Chillán è la principale zona glacializzata del bacino del-

Central Region (32°-36°S)

In this Region, approximately 1,500 glaciers account for more than 1,000 km² of ice (Rivera et al., 2000); heated conflicts for the exploitation of water resources are developing among mining, agriculture, urban and industrial sectors (Rosegrant et al., 2000); most of the Region's water is coming from snow or ice runoffs (Masiokas et al., 2006).

Glaciers' variations

Among the glaciers of this Region, one of the most prominent is the Juncal Sur (33°05'S, 70°06'W), in the *rio Maipo* Valley, with an extension of 22.7 km² in 2006 and the highest withdrawal rate (Rivera et al., 2000). Other important glaciers are Olivares Beta (33°08'S, 70°05'W) and Olivares Gama (33°08'S, 70°10'W), with a size of 9.9 and 12.8 km² in 2006 respectively. In 1935, as observed while climbing the the Cerro Risopatrón, the two glaciers were joined (Lliboutry, 1956). Since then, the shrinking process involved mainly the Olivares Beta Glacier, which lost over 3.9 linear km in 71 years. In the same period the Olivares Gama front withdrew 2 km while thinning by 0.7 m/yr from 1955 to 1997 (Rivera et al., 2002).

Further South, the Echaurren Norte Glacier (33°33'S, 70°08'W), subject to mass balance measurements since 1975, is also experiencing a clearly negative trend, highly influenced by El Niño – Southern Oscillation (Escobar et al., 1995).

A special case is that of Juncal Norte Glacier (33°02'S, 70°06'W) which, when compared with other glaciers of the same area, underwent a modest shrinkage as its tongue is confined in a deep valley where direct sun radiation strikes the ice only a few hours each day in a typical “horizon narrowing” phenomenon (Rivera et al., 2000). The withdrawal rate was measured between 4 and 20 m/yr until 2006, mostly involving the covered front. Total surface loss for the period 1955-1997 was 0.21 km² (Rivera et al., 2002). The Cipreses Glacier (34°33'S, 70°22'W), in the Cachapoal Valley, was one of the first to be measured; its withdrawal from 1842 to present day is approx. 5 km (Rivera et al., 2006b). In Tinguiririca Valley, the Universidad Glacier (34°42'S, 70°20'W), so named by Lliboutry (1956), recorded steady yearly withdrawals from 1945 to 2004, amounting to about 2 km (Le Quesne et al., in press).

Los Lagos Region (36°-41°S)

This Region holds a limited number of glacial units because of the reduced altitude of this stretch of the Cordillera. Most glaciers are located on active volcanoes, such as the Nevados de Chillán (36°50'S, 71°25'W), a massif consisting of several volcanic cones associated with the Chillán Volcano (González-Ferrán, 1995). This is the main glacial area of the Itata basin and its glaciers were mapped for the first time

l'Itata e i suoi ghiacciai furono rilevati per la prima volta nella carta del naturalista tedesco R. Philippi (1863). Rispetto a quei rilievi si può apprezzare una perdita areale di diversi km² (Zenteno et al., 2004). Negli ultimi anni, gli studi si sono concentrati sui vulcani Villarica e Mocho-Choshuenco (Rivera et al., 2006a); su quest'ultimo, dal 2003, è attivo un bilancio di massa (Rivera et al., 2005).

Altri ghiacciai di questa regione sono situati sul Monte Tronador, dove il Ghiacciaio Casa Pangué (41°08'S, 71°52'W) presenta una lingua coperta di detriti. Le sue fluttuazioni sono state ricostruite già per la PEG grazie all'analisi dendroclimatologica degli alberi che crescono nella zona. Dalla fine del XIX secolo il ghiacciaio è stato visitato e descritto da diversi esploratori durante i loro viaggi attraverso la zona del lago Nahuel Huapi: tra questi, dal naturalista Hans Steffen e dall'italiano Padre Alberto Agostini. Dal 1961 ha subito una forte riduzione accelerata negli ultimi anni (Bown e Rivera, 2007).

Variazioni dei ghiacciai

Nella carta di Philippi (1863) il Ghiacciaio di Los Nevados de Chillán (36°50'S, 71°25'W) presenta un'area di 30 km² ca. Nel 2004 essa era di soli 5 km² (Zenteno et al., 2004). Più a Sud, nella Sierra Velluda, è presente un apparato visitato da E. Poepfig nel 1828. Dal confronto dei suoi disegni con le fotografie degli anni '50 di Carlos Keller emerge una significativa riduzione di superficie (Poepfig, 1960). Per il Ghiacciaio sud-orientale del Vulcano Mocho (39°55'S, 72°02'W) il bilancio di massa netto nel 2003-04 è stato di $-0,88 \pm 0,18$ m w.e. a⁻¹, dovuto principalmente alle condizioni di siccità di quel periodo (Rivera et al., 2005). L'anno seguente il ghiacciaio si è però avvantaggiato dell'aumento delle precipitazioni (Bown et al., 2007), dimostrando le forti variazioni interannuali che interessano i bilanci di massa. Il ghiacciaio ha perso il 17 % della sua superficie tra 1976 e 2004 (Rivera et al., 2006a). Per il Ghiacciaio Pichillancahue-Turbio del Vulcano Villarica (39°25'S, 71°56'W) si stima un ritiro di $-0,81 \pm 0,45$ m a⁻¹ nel periodo 1961-2004 e una perdita d'area del 13 % tra 1979 e 2005. Si ritiene che l'influenza geotermica del vulcano produca una forte ablazione alla base del ghiacciaio mentre il deposito di ceneri in superficie svolgerebbe un ruolo positivo, proteggendo il ghiaccio dalla radiazione solare (Brock et al., 2007). Le misurazioni radar indicano spessori massimi di 190 m per il Pichillancahue-Turbio e di 270 m per il Mocho (Rivera et al., 2006a).

by the German naturalist R. Philippi (1863). Based on his drawings, a surface loss of several km² can be assumed (Zenteno et al., 2004). In recent years, the studies have been focussed upon Villarica and Mocho-Choshuenco Volcanoes (Rivera et al., 2006), the latter being subject to mass balance measurements since 2003 (Rivera et al., 2005).

Other glaciers in this Region are located on Monte Tronador, where the Casa Pangué Glacier (41°08'S, 71°52'W) exhibits a debris-covered tongue. A dendroclimatologic analysis of the trees growing in this area has yielded a map of its fluctuations from the Little Ice Age to present day. Since the end of the 19th century, the glacier has been visited and described by many explorers wandering through the Lake Nahuel Huapi area; among them the naturalist Hans Steffen and the Italian Father Alberto Agostini. Since 1961 this glacier is undergoing a marked reduction in the ice thickness, further accelerated in the last years (Bown and Rivera, 2007).

Glaciers' variations

In the Philippi's map (1863), Los Nevados de Chillán Glacier (36°50'S, 71°25'W) is drawn with a surface of about 30 km². In 2004 its surface amounted to 5 km² only (Zenteno et al., 2004). Further South, in Sierra Velluda, there is a glacier visited by E. Poepfig in 1828. His drawings, compared with photographs taken in the 1950s by Carlos Keller, testimony a significant surface reduction (Poepfig, 1960). The net 2003-2004 mass balance for the South-Eastern Glacier of the Mocho Volcano (39°55'S, 72°02'W), was -0.88 ± 0.18 m w.e./yr, mainly due to the dry conditions of this period (Rivera et al., 2005). The following year the glacier was positively influenced by an increase of precipitation (Bown et al., 2007), proving that its mass balance is prone to marked variations from year to year. Overall, the glacier lost 17 % of its surface between 1976 and 2004 (Rivera et al., 2006a). The Pichillancahue-Turbio Glacier on the Villarica Volcano (39°25'S, 71°56'W), was estimated to have lost 0.81 ± 0.45 m/yr between 1961 and 2004, with a 13 % surface loss between 1979 and 2005. It is believed that a strong geothermal flux causes a marked ablation at the glacier's base while, near the summit, ash deposits protect the ice from solar radiations (Brock et al., 2007). Radar measurements show a maximum ice thickness of 190 m and 270 m for the Pichillancahue-Turbio and for the Mocho Glaciers respectively (Rivera et al., 2006a).

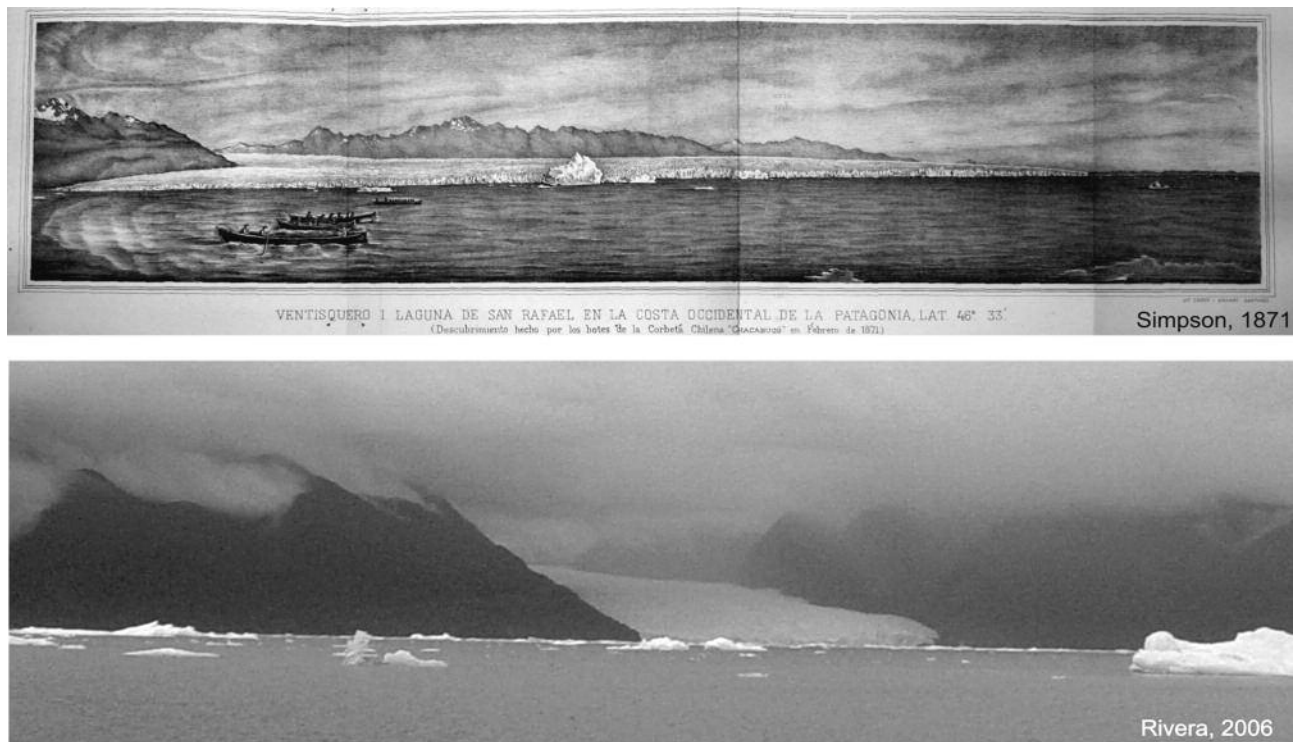


Figura 4 - Il Ghiacciaio di San Rafael in una litografia del 1871 (Simpson, 1875, sopra) e in una fotografia del 2007 (sotto).
Figure 4 - San Rafael Glacier from a 1871 lithograph (Simpson, 1875) (above) and in a 2006 picture (below).

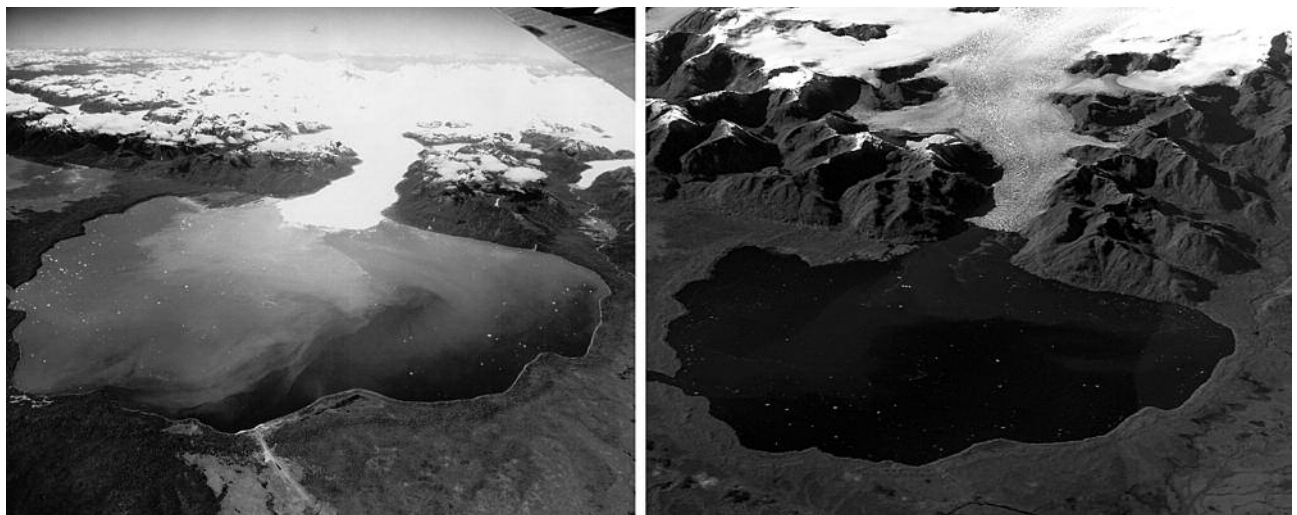


Figura 5 - Il Ghiacciaio San Rafael in un'immagine aerea TRIMETROGON del 1944/45 (sinistra) e in una ripresa satellitare ASTER 2003 (destra).

Figure 5 - San Rafael Glacier from a 1944/1945 TRIMETROGON aerial picture (left) and from a 2003 ASTER satellite image (right).

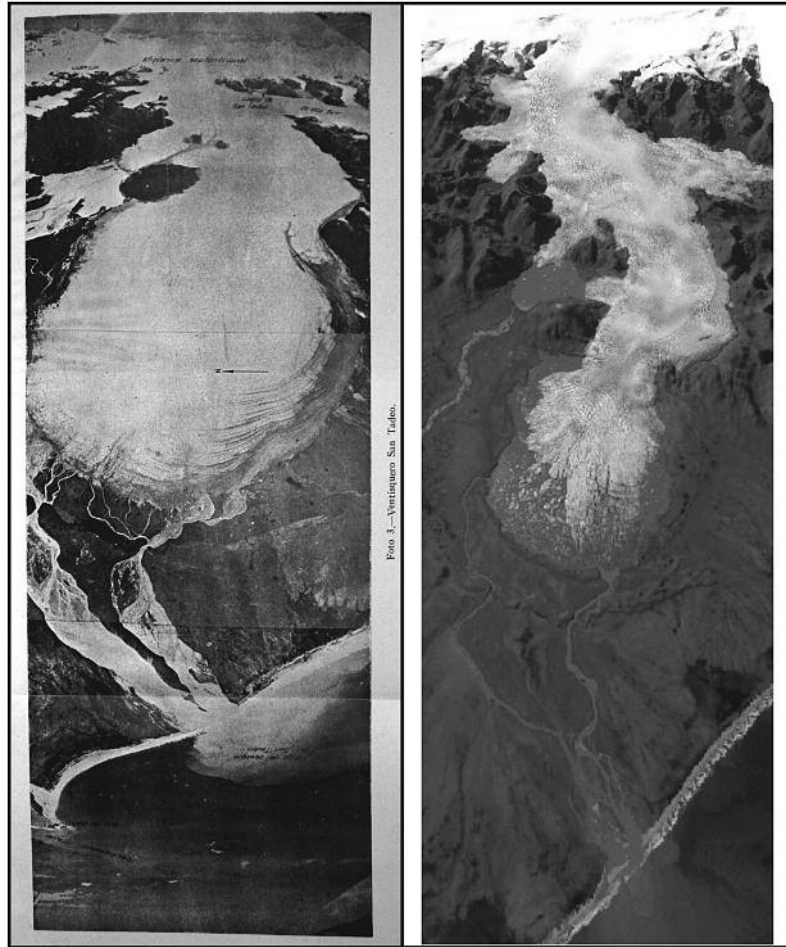


Figura 6 - Il Ghiacciaio San Quintín: in una fotografia aerea TRIMETROGON del 1944/45 (Keller, 1947, sinistra) e nell'immagine satellitare ASTER del marzo 2003 (destra).

Figure 6 - San Quintin Glacier from a 1944/1945 TRIMETROGON aerial picture (Keller, 1947, left) and from a 2003 ASTER satellite image (right).

Patagonia (41°-56°S)

Questa zona ospita la maggior parte del ghiaccio temperato dell'emisfero australe, conservato specialmente nel CHN e nei CHS (Naruse e Aniya, 1992): insieme si estendono su circa 17.000 km². Nonostante i numerosi studi (Aniya et al., 1996; Rivera e Casassa, 2004), a oggi non esistono programmi sistematici di bilanci di massa, non si conoscono con certezza i volumi di ghiaccio immagazzinati e le componenti dinamiche che spiegano il comportamento dei diversi ghiacciai (Warren e Sugden, 1993).

Variazioni dei ghiacciai

Il volume di ghiaccio perso in Patagonia negli ultimi anni è raddoppiato rispetto alle tendenze in atto dal 1975 (Rignot et al., 2003). Circa il 9 % del contributo dei ghiacciai montani all'innalzamento del livello dei mari si deve ai due grandi ghiacciai di questa regione. La perdita di superficie del CHN tra 1979 e 2001 si è stimata in 140 km², dovuta per il 62 % al ritiro dei ghiacciai occidentali (Rivera et al., 2007). Nella zona del Chiloé continentale (41°-44°S), i ghiacciai più

Patagonia (41°-56°S)

This region hosts most of the temperate ice of the southern hemisphere, mostly preserved in CHN and CHS (Naruse and Aniya, 1992) which, all together, cover approximately 17,000 km². In spite of the many important studies (Aniya et al., 1996; Rivera and Casassa, 2004), there are still no systematic projects to investigate the mass balance; also not precisely defined are the total volume of ice and possible dynamic components that may explain the different behaviour of the glaciers (Warren and Sugden, 1993).

Glaciers' variations

The ice volume lost in Patagonia over the last few years is twice that of the mean value calculated since 1975 (Rignot et al., 2003). Approximately 9 % of the contribution of mountain glaciers to sea level increase comes from the two big ice fields of this Region. The surface loss of CHN between 1979 and 2001 is estimated to have reached 140 km², with the western glaciers representing 62 % of that figure (Rivera et al., 2007). In the Continental Chiloé area (41°-44°S), the

dinamici, nei pressi del Lago Inexplorado (41°58'S), indicano valori di ritiro elevati dal 1961. Il Ghiacciaio Inexplorado copriva quasi interamente la valle superiore del Río Blanco, ma dal 1985 le sue due lingue principali si sono separate e, da allora, retrocedono senza sosta (fig. 3). I calving glaciers seguono questa tendenza: il Ghiacciaio Rafael (46°41'S, 73°51'W, figg. 4 e 5), ad esempio, ha subito un ritiro frontale di 2550 m (84 m a⁻¹) negli ultimi 30 anni. Tra i ghiacciai con più elevati valori di ritiro vi è il San Quintín, con una perdita di 33 km² di ghiaccio (Rivera et al., 2007); in particolare, lungo la sua fronte settentrionale si è formata, in luogo della sua fronte, una laguna pro-glaciale (46°52'S, 74°05'W, fig. 6).

Tra i ghiacciai del CHS risalta il Ghiacciaio O'Higgins (48°55'S, 73°08'W) che ha subito un ritiro di 15 km dal 1900 (Casassa et al., 1997), dovuto in parte al galleggiamento della sua fronte nell'area più profonda del fiordo del lago (più di 800 m di profondità; G. Casassa, comunicazione personale). Nello stesso lago, ma insinuato in un altro fiordo, molto meno profondo, il Ghiacciaio Chico (49°00'S, 73°04'W) registra un ritiro di soli 2,6 km nello stesso periodo (Rivera, 2004). Poco a Sud il Ghiacciaio Viedma (49°31'S, 73°01'W), venne visitato nel 1915-16 (Kölliker et al., 1917) allo scopo di confermare la presenza di un campo di ghiaccio dal Viedma al Lago O'Higgins / San Martín (scoperto nel 1877 da Francisco Moreno). Dal 1900 a oggi il ghiacciaio ha subito un ritiro moderato (fig. 7).

Nel *Parque Nacional Torres del Paine*, dove esistono numerosi corpi glaciali, si distingue il Ghiacciaio Grey (51°01'S, 73°12'W, fig. 9), ritiratosi di circa 4 km dal 1937; in un singolare episodio di calving, durante il quale gli iceberg generati bloccarono totalmente l'omonimo lago, ha perduto una superficie di 1 km² ca. Questo singolare evento è riconducibile in parte alla batimetria del lago, ma come nella maggior parte dei casi in Patagonia è soprattutto l'aumento delle temperature atmosferiche a spiegare i mutamenti del ghiacciaio (Rivera e Casassa, 2004).

Un'eccezione alla generalizzata tendenza al ritiro è rappresentata dal Ghiacciaio Pio XI (49°S, 73°W) che è avanzato di oltre 9 km dal 1945 (Rivera e Casassa, 1999); se si sommano però le variazioni intervenute dal momento della prima cartografia risalente alla spedizione di King (1839), il ghiacciaio è avanzato per complessivi 19 km, caso assolutamente anomalo in Cile e assai raro sull'intero pianeta.

Nella zona del Magallanes, oltre al CHS vi sono diversi corpi glaciali poco studiati: tra questi, importante, il Gran Campo Nevado che registra riduzioni delle porzioni inferiori e incrementi di quelle superiori (Möller et al., 2007). Per la vicina area glacializzata del Monte Sarmiento (54°27'S, fig. 8), sono disponibili tra le altre le antiche descrizioni prodotte durante il viag-

most dynamic glaciers are located near the Inexplorado Lake (41°58'S) and show high shrinkage values since 1961. The Inexplorado Glacier was covering most of the upper Río Blanco Valley but, in 1985, its two main tongues parted and have since continued to withdraw (fig. 3). The calving glaciers follow the same trend: the Rafael Glacier (46°41'S, 73°51'W, figs. 4 and 5) for instance, receded by 2,550 m over the last 30 years (84 m/yr). Among the glaciers with the highest withdrawal rate, the San Quintín has lost 33 km² of its ice surface (Rivera et al., 2007); more specifically, along its northern front an area previously covered by a portion of the terminal tongue has turned into a pro-glacial lake (46°52'S, 74°05'W, fig. 6).

Among CHS glaciers, the O'Higgins Glacier (48°55'S, 73°08'W) stands out; since 1900 it withdrew 15 km (Casassa et al., 1997), partly due to its front floating in the deepest part of the lake fiord (over 800 m deep; G. Casassa, personal communication). In the same lake but in a different, much shallower fiord, Chico Glacier (49°00'S, 73°04'W) experienced a withdrawal of only 2.6 km for the same period (Rivera, 2004). Further South one finds the Viedma Glacier (49°31'S, 73°01'W), visited in 1915-1916 (Kölliker et al., 1917) to verify the existence of an ice field from Viedma to O'Higgins/San Martín Lake (discovered in 1877 by Francisco Moreno); from 1900 to present day the Viedma Glacier suffered a moderate withdrawal (fig. 7).

In *Parque Nacional Torres del Paine*, where numerous glacial bodies exist, the Grey Glacier (51°01'S, 73°12'W, fig. 9) stands out: it has withdrawn approximately 4 km since 1937 and has lost an area of 1 km² in a single calving episode, when its ice-floats totally blocked the Grey Lake. This rare event may have been favoured by the lake's bathymetry but, as for most Patagonian glaciers, the main causes can be traced to the increasing atmospheric temperature (Rivera and Casassa, 2004).

The Pio XI Glacier (49°S, 73°W) is an exception from the general shrinking trend of Patagonian glaciers: it has advanced more than 9 km since 1945 (Rivera and Casassa, 1999); however, if one computes the variations from its first mapping by King (1839) to present day, the glacier shows a total advance of 19 km, which is an absolutely anomalous episode and quite a rare event for the whole planet too.

In the Magallanes Region several, little known ice bodies exist besides CHS: among these, the Gran Campo Nevado is important: while its lower portion is shrinking, the upper one is expanding (Möller et al., 2007). For the nearby Monte Sarmiento glacial area (54°27'S, fig. 8) one can refer, among others, to the descriptions from the 1836 Beagle expedition (King, 1839).

In the southern end of Tierra del Fuego, the

gio del Beagle del 1836 (King, 1839).

Nel Sud della Terra del Fuoco, la Cordigliera Darwin presenta ghiacciai in ritiro lungo la fascia Nord e in avanzata in quella meridionale (Holmund e Fuenzalida, 1995). Uno degli apparati in più forte ritiro a livello nazionale è il Marinelli, la cui lingua terminale è recentemente collassata (Porte e Santana, 2003). Più vicino a noi, gli scriventi hanno constatato il prosieguo dell'avanzata di diversi ghiacciai del lato Sud, in particolare quelli di Bahía Pía e Seno Garibaldi.

Cordillera Darwin has retreating glaciers along the Northern limit and expanding glaciers along the Southern end (Holmund and Fuenzalida, 1995). The Marinelli Glacier, whose tongue has recently collapsed, is among the ice-bodies recording the highest withdrawal rate of the entire country (Porte and Santana, 2003). More recently, the Authors were able to confirm that the advancing trend shown by several glaciers in the southern end, among them the Bahía Pía and the Seno Garibaldi glaciers, is still continuing.

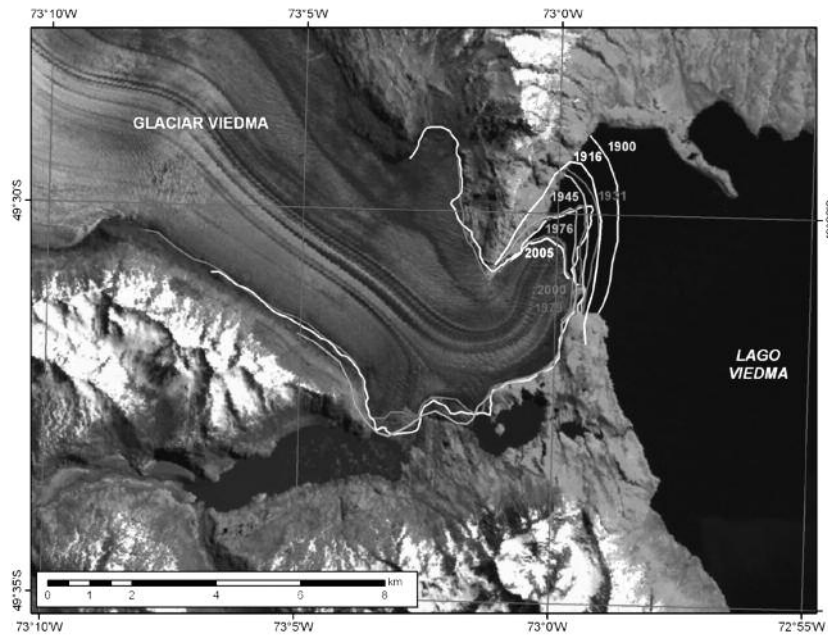


Figura 7 - Variazioni frontali del Ghiacciaio di Viedma (1900-2005).

Figure 7 - Frontal variations of the Viedma Glacier (1900-2005).

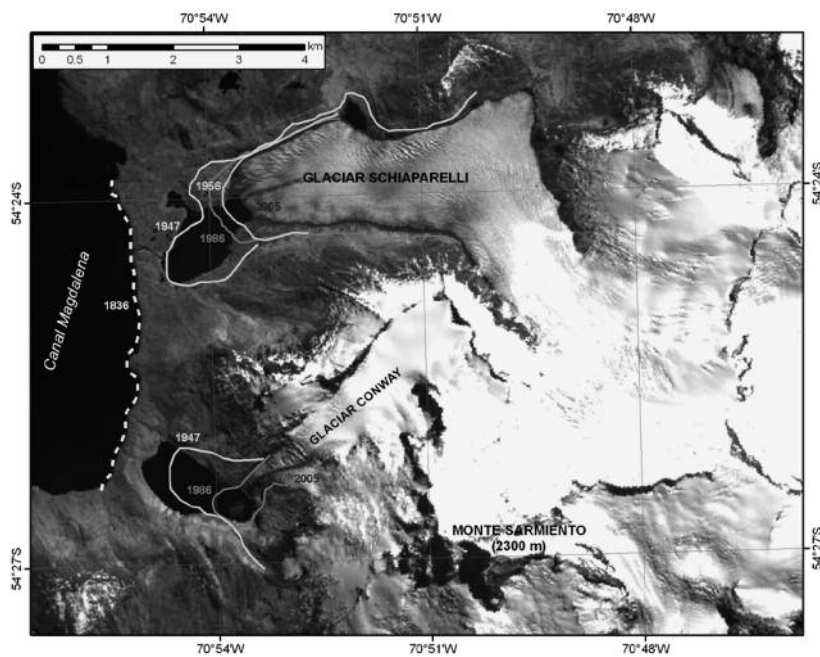


Figura 8 - Variazioni dei ghiacciai sul lato occidentale del Monte Sarmiento.

Figure 8 - Fluctuations of the western glaciers of Mt. Sarmiento.

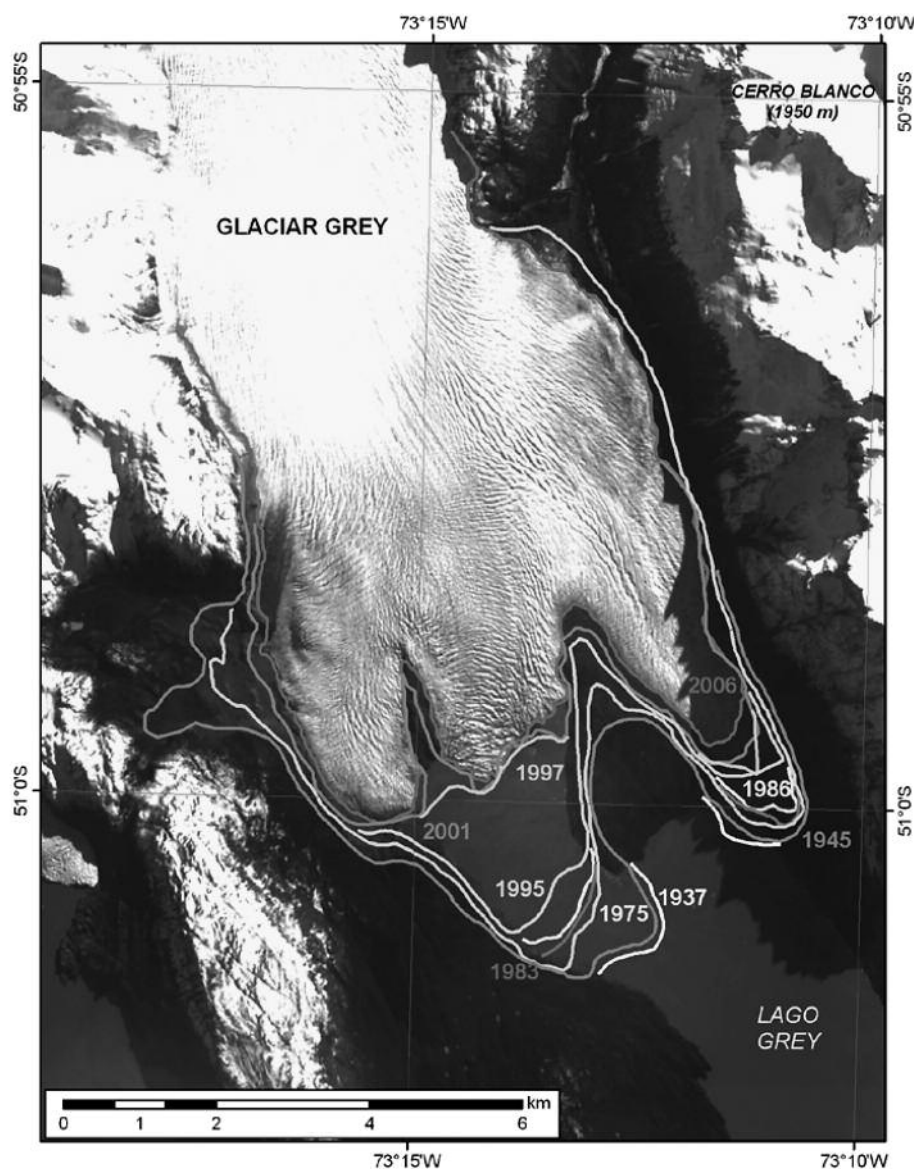


Figura 9 - Variazioni recenti del Ghiacciaio Grey, Parco Nazionale Torres del Paine, Campo de Hielo Patagonico Sur, Cile (variazioni dal 1937 al 2001 secondo Rivera e Casassa, 2004).

Figure 9 - Recent fluctuations of the Grey Glacier, Torres del Paine National Park, Campo de Hielo Patagónico Sur, Chile (changes from 1937 to 2001, according to Rivera and Casassa, 2004).

Discussione e conclusioni

Dalle prime osservazioni disponibili a oggi, la maggior parte dei ghiacciai cileni si è ritirata e le superfici si sono ridotte. Molti mostrano un'accelerazione di tali tendenze, specialmente in Patagonia, dove il ritmo di ritiro è raddoppiato nell'ultimo decennio. Ciononostante, alcuni ghiacciai hanno fatto registrare fasi di avanzata, sebbene i soli in tale stato agli inizi del XXI secolo siano il Pio XI (Rivera e Casassa, 1999), il Garibaldi nella Cordigliera Darwin e il Perito Moreno, nel lago argentino del CHS (Skvarca e Naruse, 2006).

I cambiamenti climatici osservati in superficie e in libera atmosfera (radiosondaggi) indicano un riscaldamento (Carrasco et al., 2005), specialmente sopra gli

Comments and Conclusions

Since their first observations, most Chilean glaciers have withdrawn and lost part of their surface. Many of them show an acceleration of this trend, particularly in Patagonia, where the recorded values have doubled over the last ten-year period. In spite of this general situation, a few glaciers are advancing, though the only ones still maintaining this trend in the 21st century are the Pio XI (Rivera and Casassa, 1999), the Garibaldi in the Darwin Cordillera and the Perito Moreno, located in the Argentinean side of the CHS where is calving into Lago Argentino (Skvarca and Naruse, 2006).

Climate changes recorded by ground-based meteorological stations and in the free atmosphere (radio soundings)

850 hPa (1500 m s.l.m.), che rappresenta il principale fattore di fluttuazione dei ghiacciai. Un secondo ordine di fattori ha però giocato in certi casi un ruolo importante nei movimenti dei ghiacciai: la topografia, ad esempio, in particolar modo nei calving glaciers, predominanti in Patagonia (Naruse e Skvarca, 2000). Anche l'attività vulcanica risulta importante per molti apparati, determinando un aumento della fusione di neve e ghiaccio o, viceversa, in presenza di sufficienti spessori di materiali vulcanici sulla superficie, isolandoli (Rivera et al., 2006a). In altre zone, le perdite, pur minori rispetto a quelle del Cile meridionale, potranno avere grandi ripercussioni sulla disponibilità idrica futura, in particolare alla luce dei forti conflitti esistenti per l'acquisizione e l'uso delle acque (Rosegrant et al., 2000). Nel Cile centrale già si osserva un aumento delle portate (Pellicciotti et al., 2007; Casassa, 2004) dovuto al maggior contributo delle acque di fusione glaciale, in risposta alla risalita dell'isoterma degli 0 °C (Carrasco et al., 2005). Proseguendo il riscaldamento in atto, tale dato potrebbe invertirsi, per la riduzione di massa dei ghiacciai, come già accade nelle Ande tropicali (Coudrain et al., 2005), e per la contrazione delle precipitazioni solide che detengono un ruolo chiave negli scorrimenti superficiali (Masiokas et al., 2007).

Nuovi e più dettagliati studi saranno necessari in futuro, soprattutto laddove proseguisse la tendenza al riscaldamento in corso e i volumi totali di ghiaccio continuassero a diminuire, influenzando così la disponibilità idrica e contribuendo in maniera significativa all'aumento del livello globale dei mari.

Ringraziamenti

Si ringraziano il FONDECYT 1061269 e il *Centro de Estudios Científicos* (CECS) per il sostegno fornito. CECS è finanziato attraverso *Iniciativa Científica Milenio* e *Center of Excellence Base Financing Program of Conicyt*. CECS è anche supportato da un gruppo di società private che al momento include: Antofagasta Minerals, Arauco, Empresas CMPC, Indura, Naviera Ultragas e Telefónica del Sur. CIN è finanziato dal Conicyt e dal Gobierno Regional de Los Ríos. Il presente studio gode dell'accesso gratuito alle immagini satellitari dei progetti GLIMS e GLCF.

Acknowledgements

We express our thanks to FONDECYT 1061269 and *Centro de Estudios Científicos* (CECS) for their active support. CECS is financed by *Iniciativa Científica Milenio* and the *Center of Excellence Base Financing Program of Conicyt*. CECS is also supported by a group of private companies which at present includes Antofagasta Minerals, Arauco, Empresas CMPC, Indura, Naviera Ultragas and Telefónica del Sur. CIN is funded by Conicyt and the Gobierno Regional de Los Ríos. The present study qualifies for free access to the satellite images of GLIMS and GLCF projects.

point to an atmospheric warming, particularly above 850 hPa (1,500 m a.s.l.), believed to be the main responsible for glaciers' fluctuation (Carrasco et al., 2005). Beside this one, other second order factors sometime play an important part in glaciers' dynamics, such as the local topography. The latter may influence the fluctuation of the tongues, particularly for calving glaciers whose number is predominant in Patagonia (Naruse and Skvarca, 2000). Volcanic activity is also important for a great number of glaciers, forcing snow and ice to melt or, viceversa, shielding snow and ice under a sufficiently thick cover of volcanic material (Rivera et al., 2006a). In other areas, net surface losses, though less severe than those recorded in Southern Chile, may dramatically affect the future availability of water resources, especially if present conflicts over water acquisition and usage are taken into consideration (Rosegrant et al., 2000). Indeed, Central Chile is experiencing increasing water flows (Pellicciotti et al., 2007; Casassa, 2004), due to the additional contribution of ice melting processes resulting from the rising 0 °C isotherm (Carrasco et al., 2005). For the future, should the present warming continue, this trend could reverse: a) because of the shrinking ice masses, a fact that has occurred in tropical Andes already (Coudrain et al., 2005); b) for the reduction of solid precipitation that play a major role in superficial flows (Masiokas et al., 2007).

New and more detailed studies will be required for the future, especially if present warming trends will be maintained and total ice volumes shall continue to diminish, thus affecting water availability while adding to the global sea level rise.

*Italian translation: Ascensión Romero Fernández
English translation: Francesco Serracchioli*

Corresponding author address:

Andrés Rivera, Centro de Estudios Científicos (CECS), Av. Arturo Prat 514, Valdivia, Chile.

E.mail : arivera@cecs.cl

Bibliografía / References

- Aniya M., Sato H., Naruse R., Skvarca P. and Casassa G. (1996) - *The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glacier of the Southern Patagonia Icefield, South America*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62, pp. 1361-1369.
- Bown F. and Rivera A. (2007) - *Climate Changes and Glacier Responses During Recent Decades in the Chilean Lake District*. Global and Planetary Change, 59, pp. 79-86.
- Bown F., Rivera A., Acuña C. and Casassa G. (2007) - *Recent glacier mass balance calculations at Volcán Mocho-Chosbuenco (40°S), Chilean Lake District*. In: IAHS Publication, 318, pp. 143-152.
- Brock B., Rivera A., Casassa G., Bown F. and Acuña C. (2007) - *The surface energy balance of an active ice-covered volcano: Volcán Villarrica, southern Chile*. Annals of Glaciology, 45, pp. 104-114.
- Carrasco J.C., Quintana J. and Casassa G. (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), pp. 933-948.
- Casassa G. (2004) - *Increased runoff in basins with negative glacier mass balance: Examples from the Chilean Andes*. In: Second Symposium on Mass Balance of Andean Glaciers “Glacier Shrinkage in The Andes Consequences for Water Resources”, Huaraz, Perú.
- Casassa G. and Rivera A. (2001) - *Campo de Hielo Sur: Su historia*. Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Humanas, 29, pp. 29-78.
- Casassa G., Brecher H., Rivera A. and Aniya M. (1997) - *A century-long record of glacier O'Higgins, Patagonia*. Annals of Glaciology, 24, pp. 106-110.
- Casassa G., Smith K., Rivera A., Araos J., Schnirch M. and Schneider C. (2002) - *Inventory of glaciers in Isla Riesco, Patagonia, Chile, based on aerial photography and satellite imagery*. Annals of Glaciology, 34, pp. 373-378.
- 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).
- Coudrain A., Francou B. and Kundzewicz Z.W. (2005) - *Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources* - Editorial. Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques, 50, pp. 925-932.
- Escobar F., Pozo V., Salazar A. and Oyarzo M. (1995) - *Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte, 1975 a 1992*. Dirección General de Aguas, publicación interna, H.A. y G. 95/1.
- 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, pp. 34-48.
- Ginot P., Schwikowski M., Gággeler H., Schotterer U., Kull C., Funk M., Rivera A., Stampfli F. and Sticher W. (2002) - *First results of a paleoatmospheric chemistry and climate study of Cerro Tapado glacier, Chile*. In: Casassa, G., Sepúlveda F. and Sinclair R. (Eds.), “The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies”. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 157-167.
- González-Ferrán O. (1995) - *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- Holmlund P. and Fuenzalida H. (1995) - *Anomalous Glacier responses to 20th century climatic changes in Darwin Cordillera, Southern Chile*. Journal of Glaciology, 41(139), pp. 465-473.
- Keller C. (1947) - *La región del Hielo Continental frente al lago Buenos Aires*. Revista Chilena de Historia y Geografía, 110, pp. 309-335.
- King P. (1839) - *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. Proceedings of the first expedition, 1826-30, under the command of Captain P. Parker King*. Volume I, Henry Colburn, London.
- Kölliker A., Kühn F., Reichert F., Tomsen A. and Witte L. (1917) - *Patagonia. Resultados de las expediciones realizadas en 1910 a 1916*. Sociedad Científica Alemana. Tomos I y II, Buenos Aires, Argentina.
- Le Quesne C., Acuña C., Boninsegna J. and Rivera A. (in press) - *Historical glacier variations in the central Andes of Chile and Argentina and long-term precipitation variability reconstructed from tree-rings*. PALAEO.
- Lliboutry L. (1956) - *Nieves y glaciares de Chile*. Fundamentos de Glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago.
- Marangunic C. (1979) - *Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo*. Dirección General de Aguas, Publicación G-2, Santiago.
- Masiokas M.H., Villalba R., Luckman B.H., Le Quesne C. and Aravena J. C. (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, pp. 6334-6352.
- Masiokas M., Villalba R., Luckman B., Lascano M., Delgado S. and Stepanek P. (2007) - *20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia*. Global and Planetary Change, 60(1-2), pp. 85-100.
- Möller M., Schneider C. and Killian R. (2007) - *Glacier change and climate forcing in recent decades at Gran Campo Nevado, southernmost Patagonia*. Annals of Glaciology, 46, pp. 136-144.
- Naranjo J.A. and Moreno H. (2004) - *Labaric debris-flows from Villarrica Volcano*. In Lara, L.E. and Clavero J. (eds.), “Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile”. Santiago, Sernageomin, Boletín 61, pp. 28-45.
- Naruse R. and Aniya M. (1992) - *Outline of Glacier Research Project in Patagonia, 1990*. Bulletin of Glacier Research, 10, pp. 31-38.
- Naruse R. and Skvarca P. (2000) - *Dynamic features of thinning and retreating Glaciar Upsala, a lacustrine calving glacier in Southern Patagonia*. Arctic, Antarctic and Alpine Research 32(4), pp. 485-491.
- Noveroy C. (1987) - *Inventario de glaciares de la Hoya del río Mataquito*. Dirección General de Aguas, Publicación interna, EH 87/1.

- Pellicciotti F., Burlando P. and Van Vliet K. (2007) - *Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, central Chile*. IAHS Publ. 318, pp. 17-38.
- Peña H. and Escobar F. (1987) - *Análisis del aluvión de Mayo de 1985 del glaciar Tronquitos, río Manflas. Cuenca del río Copiapó*. Publicación interna DGA/MOP.
- Peña H. and Nazarala N. (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 Symp.)". IAHS Publ. 166, pp. 161-172.
- Philippi R. (1863) - *Exkursion nach den Bädern und dem Neuen Vulkan von Chilian in Chile, im Spätsommer 1862 gemacht*. Petermann's Geographische Mittheilungen, pp. 241-257.
- Poeppig E. (1960) - *Un testigo en la alborada de Chile (1826-1829)*. Santiago: Zig-Zag, Versión castellana, notas e ilustraciones de Carlos Keller.
- Porter C. and Santana A. (2003) - *Rapid 20th century retreat of Ventisquero Marinelli in the Cordillera Darwin Icefield*. Anales del Instituto de la Patagonia, 31, pp. 17-26.
- Quintana J. (2004) - *Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal*. Unpublished M Sc. thesis, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago.
- Rignot E., Rivera A. and Casassa G. (2003) - *Contribution of the Patagonia icefields of South America to global sea level rise*. Science, 302, pp. 434-437.
- Risopatrón L. (1905) - *La Cordillera de los Andes, entre las latitudes 46° I 50°s*. Imprenta Cervantes, Santiago.
- Rivera A. (1989) - *Inventario de glaciares entre las cuencas de los ríos Bío Bío y Petrobué. Su relación con el volcanismo activo: Caso del volcán Lonquimay*. Unpublished undergraduate thesis, University of Chile, Santiago.
- Rivera A. (2004) - *Mass balance investigations at Glaciar Chico, Southern Patagonia Icefield, Chile*. PhD thesis, Univ. of Bristol, UK.
- Rivera A., Aravena J. and Casassa G. (1997) - *Recent fluctuations of Glaciar Pío XI, Patagonia: discussion of a glacial surge hypothesis*. Mountain Research and Development, 17(4), pp. 309-322.
- Rivera A. and Casassa G. (1999) - *Volume changes on Pío XI glacier, Patagonia: 1975-1995*. Global and Planetary Change, 22, pp. 233-244.
- Rivera A. and Casassa G. (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., Casassa G., Acuña C. and Lange H. (2000) - *Variaciones recientes de glaciares en Chile*. Revista de Investigaciones Geográficas, 34, pp. 29-60.
- Rivera A., Acuña C., Casassa G. and Bown F. (2002) - *Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea level rise*. Annals of Glaciology, 34, pp. 367-372.
- Rivera A., Bown F., Casassa G., Acuña C. and Clavero J. (2005) - *Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S)*. Hydrological Sciences Journal, 50(6), pp. 963-974.
- Rivera A., Bown F., Mella R., Wendt J., Casassa G., Acuña C., Rignot E., Clavero J. and Brock B. (2006a) - *Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile*. Annals of Glaciology, 43, pp. 111-122.
- Rivera A., Acuña C. and Casassa G. (2006b) - *Glacier variations in central Chile (32°S-41°S)*. In: Knight, P.G., (Ed.). *Glacier Science and Environmental Change*, Blackwell, Oxford, UK, pp. 246-247.
- Rivera A., Benham T., Casassa G., Bamber J. and Dowdeswell J. (2007) - *Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia icefield, Chile*. Global and Planetary Change, 59, pp. 126-137.
- Rosegrant M., Ringler C., McKinney D., Caia X., Keller A. and Donoso G. (2000) - *Integrated economic-hydrologic water modelling at the basin scale: the Maipo river basin*. Agricultural Economics 24, pp. 33-46.
- Rosenblüth B., Fuenzalida H. and Aceiturno P. (1997) - *Recent temperature variations in Southern South America*. International Journal of Climatology, 17, pp. 67-85.
- Schneider C., Schnirch M., Acuña C., Casassa G. and Kilian R. (2007) - *Glacier inventory of the Gran Campo Nevado Ice Cap in the Southern Andes and glacier changes observed during recent decades*. Global Planetary Change, 59, pp. 87-100.
- Simpson E. (1875) - *Exploraciones hechas por la Corbeta Chacabuco en los archipiélagos de Guaitecas, Cbonos i Taitao*. Anuario Hidrográfico de la Marina de Chile, 1, pp. 3-166.
- Skvarca P. and Naruse R. (2006) - *Overview of the ice-dam formation and collapse of Glaciar Perito Moreno, southern Patagonia, in 2003/04*. Journal of Glaciology, 52(178), pp. 476-478.
- Tapia G. (2004) - *Inventario de Glaciares del Río Maule*. Unpublished report, DGA/MOP, Santiago.
- USGS (1998) - *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: South America*. Williams R. and Ferrigno J. (Eds.) - U.S. Geological Survey Professional paper 1386-I. Washington DC, USA.
- 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.
- Warren C. and Sugden D. (1993) - *The Patagonian icefields: a glaciological review*. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 25(4), pp. 316-331.
- Zenteno P., Rivera A. and García R. (2004) - *Glacier inventory of the Itata basin derived from satellite imagery: Historical trends and recent variations at Nevados de Chilian volcano (36°56'S-71°20'W)*. VIII Congreso Internacional De Ciencias De La Tierra, Santiago, Chile, 18-28 Octubre.