

## IMPORTANCIA DE LOS GLACIARES DEL HIELO PATAGÓNICO SUR PARA EL DESARROLLO REGIONAL

PEDRO SKVARCA

Instituto Antártico Argentino, Cerrito 1248, (1010) Buenos Aires

### INTRODUCCIÓN

En la Patagonia Austral, extremo suroeste de América del Sur, existen dos grandes masas de hielo temperado, que desde el punto de vista morfológico reciben el nombre "campos de hielo". Por definición, el campo de hielo es una extensa masa de hielo terrestre compuesta por distintos tipos de glaciares, que abarca una región montañosa y cubre todo, excepto los cerros más altos (Bates y Jackson, 1980). A diferencia de las calotas de hielo, los campos de hielo tienden a presentar sus ejes longitudinales extendidos a lo largo de las cadenas montañosas. Por su ubicación geográfica, los campos de hielo de la Patagonia se denominan Campo de Hielo Patagónico Norte o simplemente Hielo Patagónico Norte (HPN) y Hielo Patagónico Sur (HPS). El HPN se encuentra totalmente en el territorio de Chile y tiene una superficie de 4.200 km<sup>2</sup>. El HPS se extiende casi 350 km entre los 48°15' y 51°40' de latitud Sur a lo largo del meridiano 73° 30' W (Figuras 1 y 2), entre Chile y Argentina. Con 13.000 km<sup>2</sup> de superficie, el HPS es la mayor extensión de hielo en el Hemisferio Sur, a excepción de Antártida. Por significar un recurso importante para la provincia de Santa Cruz nos ocuparemos solamente del HPS y del sector cuyos glaciares efluentes aportan agua a los grandes lagos piedemontes Viedma y Argentino, de origen netamente glaciario. Estos lagos desaguan respectivamente por los ríos La Leona y Santa Cruz al océano Atlántico (Fig. 1).

Para Williams (1986), el Hielo Patagónico Sur es uno de los clásicos campos de hielo de nuestro planeta. Sin embargo, aún en la actualidad y lamentablemente sólo en nuestro país se sigue utilizando el término "Hielo Conti-

ental" o "Hielos Continentales" para referirse a esta masa de hielo remanente en la Patagonia Austral. Aún durante la expansión del Pleistoceno el hielo se extendía en esta región unos 2000 km al sur del paralelo 36° S y tenía en promedio sólo 250 km de ancho (Hollin y Schilling, 1981). El reconocido glaciólogo francés Luis Lliboutry, uno de los padres de la glaciología moderna, escribe en su libro Nieves y Glaciares de Chile (1956), que es poco científico llamar "Hielo Continental" a la masa de hielo que se extiende al oeste de la provincia Santa Cruz y no excede los 80 Km de ancho. Según este autor, "*Hielo Continental* sólo puede designar el hielo que cubre la mayor parte de un continente". A tal efecto cabe recordar que actualmente solamente existen dos sábanas de hielo continentales, las de Antártida y Groenlandia, si bien en el Pleistoceno la Laurentida y Escandinavia rivalizaron en tamaño con la sábana de hielo Antártica (Embleton y King, 1975).

### *Breve reseña científica*

A pesar de la importancia científica, económica y el significado para el cambio global de los glaciares Patagónicos, su conocimiento glaciológico básico era aún muy limitado hasta comienzos de la década del 90. Aniya *et al.* (1996) atribuyen la falta de datos al hecho de que la región es poco poblada, relativamente bajo interés científico local y la ubicación de los campos de hielo en zonas remotas, de difícil acceso y clima inhóspito. Recién a partir de 1990, con el Proyecto de Investigación Glaciaria en Patagonia-1990 (GRPP-1990), entre Japón, Argentina y Chile (Naruse y Aniya, 1992), llevado a cabo por inicia-

tiva del primer país, comenzaron en el HPS los estudios glaciológicos sistemáticos. En el proyecto GRPP-1990 participa por parte de Argentina la División Glaciología del Instituto Antártico Argentino - Dirección Nacional del Antártico (DNA). Este proyecto marca sin duda alguna el punto de inflexión en el conocimiento glaciológico de la región. Cabe mencionar que recién ahora se dispone del único inventario de glaciares del HPS, que sigue las normas del Inventario Mundial de Glaciares (Aniya *et al.*, 1996). El inventario anterior (Bertone, 1960) es sumamente preliminar, con muy pocos e imprecisos datos, razón por la cual casi no es citado por la comunidad glaciológica internacional. En el mismo figuran solamente los glaciares de la vertiente Argentina con algunas fotografías, en las que lamentablemente no se indica la fecha de toma.

En 1994, a través del acuerdo de cooperación científica suscripto entre DNA-IAA y el Instituto de Meteorología y Geofísica de la Universidad de Innsbruck (IMGI), Austria, se intensifican los estudios en glaciares del HPS, con la aplicación de moderna tecnología de sensores remotos a investigaciones glaciológicas. El proyecto se concentra principalmente en el glaciar Moreno, si bien se realizaron también estudios en los vecinos glaciares Mayo y Ameghino (Skvarca *et al.*, 1999; Stuefer, 1999). Como parte del proyecto conjunto con IMGI se instala el 15 de Noviembre de 1995 la primer estación meteorológica automática al lado del glaciar Moreno (Estación Meteorológica Glaciar Moreno-EMGM (Figs. 6a y 7a), que funciona sin interrupción hasta el presente. En el glaciar Moreno se realizaron también por primera vez mediciones de espesores de hielo con método sísmico, sondajes de profundidad cerca de los frentes en canal de los Témpanos y en brazo Rico, entre otros. Los estudios llevados a cabo en este glaciar son sin duda alguna los más exhaustivos realizados a la fecha en Patagonia (Warren y Aniya, 1999). Entre 1999 y 2001 se amplía la red de monitoreo climático en la región periférica del HPS, con la instalación de registradores automáticos de temperatura en las cercanías de los glaciares Ameghino y Upsala. Los datos de estas estaciones permitirán conocer a largo plazo la existencia del cambio climático en la región.

#### *Area de drenaje del HPS*

Para calcular el área de drenaje del sector del HPS que aporta agua a la cuenca hídrica del río Santa Cruz, se han utilizado dos mosaicos de imágenes Landsat TM. Como datos base se utilizaron las áreas de Aniya *et al.* (1996), resultado del inventario de glaciares del HPS, confeccionado principalmente a partir del mosaico Landsat Thematic Mapper (TM) del 14 de Enero de 1986. De los 48 glaciares inventariados, sólo nueve corresponden a la cuenca del Atlántico. Las áreas de drenaje de hielo (se excluye roca expuesta) de los glaciares Upsala (902 km<sup>2</sup>), Agassiz (50 km<sup>2</sup>), Onelli (84 km<sup>2</sup>), Spegazzini (137 km<sup>2</sup>),

Mayo (45 km<sup>2</sup>), Ameghino (76 km<sup>2</sup>), Moreno (258 km<sup>2</sup>) y Frías (48 km<sup>2</sup>) suman 1.600 km<sup>2</sup>. Para el glaciar Viedma se consideró el valor de 978 km<sup>2</sup> suministrado por Skvarca *et al.* (1995c). Finalmente, como las zonas de hielo contiguas al campo de hielo propiamente dicho (pequeños glaciares de circo y de valle, etc.) no fueron tenidas en cuenta en el inventario mencionado, las mismas se midieron del mosaico Landsat TM del 12 de Marzo de 2001 (Fig. 2) y suman 599 km<sup>2</sup>. En total se calcula que unos 3.177 km<sup>2</sup> del HPS aportan agua al río Santa Cruz, ya sea por fusión superficial o por desprendimiento de témpanos. En la Figura 2, mosaico compuesto de dos imágenes satelitales Landsat TM de alta resolución (30 m), aparece por primera vez desde que existen los satélites diseñados para la observación de la tierra, casi todo el HPS libre de nubes.

Fue necesario esperar 29 años desde el inicio del programa Landsat para obtener una imagen óptica completamente sin nubes. El mosaico anterior, del 14 de Enero de 1986 (Naruse y Aniya, 1992), presenta nubes en el sector del Cordón Mariano Moreno y en la zona de ablación del glaciar Viedma. Con línea roja se ha indicado la divisoria de hielos desde lago del Desierto, en el norte, hasta el glaciar Frías, en el sur, que constituye el área de drenaje de la cuenca del Atlántico. El trayecto con línea de rayas en la zona del plateau central, denominado Meseta de los Cuatro Glaciares, significa que la divisoria es preliminar, a definir probablemente con interferometría.

El estudio de los glaciares que forman esta área de drenaje es muy importante desde el punto de vista hídrico, ya que el mayor aporte de agua a los lagos Viedma y Argentino y luego al río Santa Cruz proviene de la ablación de los mismos. El término "ablación" comprende todos los procesos que intervienen en la pérdida de masa de un glaciar, tales como fusión de hielo (muy importante en glaciares Patagónicos), evaporación y desprendimiento de témpanos o *calving*. Casi toda la ablación tiene lugar en la superficie del glaciar o en su frente, en el caso de desprendimientos (Paterson, 1994).

Durante el siglo pasado ha sido notorio el retroceso de glaciares del HPS. Desde 1944/45 hasta 1986 su superficie se ha reducido en unos 500 km<sup>2</sup> (Naruse y Aniya, 1992). Sin embargo hay excepciones, como el glaciar Perito Moreno que se halla en estado de equilibrio (Aniya y Skvarca, 1992; Skvarca y Naruse, 1997; Stuefer, 1999), y el glaciar Pío XI (en Chile), que avanza. Desde 1945 este glaciar atravesó el fiordo Eyre hasta alcanzar la orilla opuesta y dividirse en dos frentes, con un aumento neto de 60 km<sup>2</sup> (Aniya *et al.*, 1996). El glaciar Pío XI, que se conoce también con el nombre de glaciar Brüggén, es con 1.265 km<sup>2</sup>, el de mayor extensión del HPS y de América del Sur (Aniya *et al.*, 1996). Es muy probable que su enigmático comportamiento esté influenciado por la actividad geotérmica del Volcán Lautaro, que origina inundaciones o *jökulhlaups*, similares a los que ocurren



para glaciares que desprenden en agua dulce. Si a los 0.6 km<sup>3</sup>/año de ablación superficial se suman los 0.4 km<sup>3</sup>/año provenientes de la fusión de témpanos desprendidos, se obtiene estimativamente 1.0 km<sup>3</sup> de aporte hídrico anual del glaciar Moreno. Si se tiene en cuenta que los glaciares Viedma y Upsala tienen una extensión cuatro veces mayor a la del glaciar Moreno, se comprende la importancia que representan los glaciares del HPS como reguladores del nivel de los lagos Viedma y Argentino y en consecuencia, de los caudales de descarga de sus efluentes (Fig. 10).

Por sus caudales medios anuales los ríos La Leona (250 m<sup>3</sup>/s) y Santa Cruz (684 m<sup>3</sup>/s) (Estadística Hidrológica 1994, actualizada), son los ríos de mayor importancia para el aprovechamiento de las zonas semidesérticas de la provincia Santa Cruz. El caudal del río Santa Cruz es del mismo orden de magnitud que el de río Limay (736 m<sup>3</sup>/s, en paso Limay). La importancia de estos ríos resulta muy notoria si se tiene en cuenta que la precipitación media en toda la estepa patagónica apenas supera los 200 mm por año, según datos de las estaciones meteorológicas Lago Argentino, San Julián, Puerto Deseado y Río Gallegos. Los registros de las cuatro estaciones denotan una gran variabilidad interanual en la precipitación anual y temperatura. Por ejemplo, en lago Argentino los valores oscilan entre un máximo de 364 mm (año 1963) y un mínimo de 60 mm (año 1988) (Ibarzábal *et al.*, 1996). Hasta 1990, la tendencia de la precipitación era negativa en lago Argentino, casi estable en Río Gallegos y Puerto Deseado y levemente positiva en Puerto San Julián. A causa de la baja precipitación combinada con intensos vientos dominantes del oeste, toda la biomasa de la región se halla en condiciones muy críticas de subsistencia. El perfil de las precipitaciones desde Pacífico al Atlántico (oeste–este) presenta un gradiente extremo. En la estación meteorológica Bahía Félix (52.5 °S; 74 °W), ubicada en los canales de Chile, se han medido valores anuales de 4.000 milímetros. Para la parte alta de la meseta central del HPS, el mapa de la Dirección General de Aguas (1987) indica la isolinia de 8.000 mm/año, valor confirmado por Escobar *et al.* (1992) a partir del balance hídrico. En la vertiente este del HPS, más específicamente muy cerca del frente del glaciar Moreno (50.5 °S; 73 °W), las mediciones del totalizador dan un valor promedio estimado en 1.300 mm para el período 1990-1997. Sólo 40 Km hacia el este, a la salida del Parque Nacional Los Glaciares, la precipitación cae abruptamente a valores inferiores a 300 mm por año, lo cual se nota por un cambio brusco en la vegetación.

### **Riesgos potenciales**

El 5 de Marzo de 1999 ocurrió un evento extraordinario en la región del lago Viedma. Se produjo el desborde del río La Leona que inundó el hotel Paso La Leona, cer-

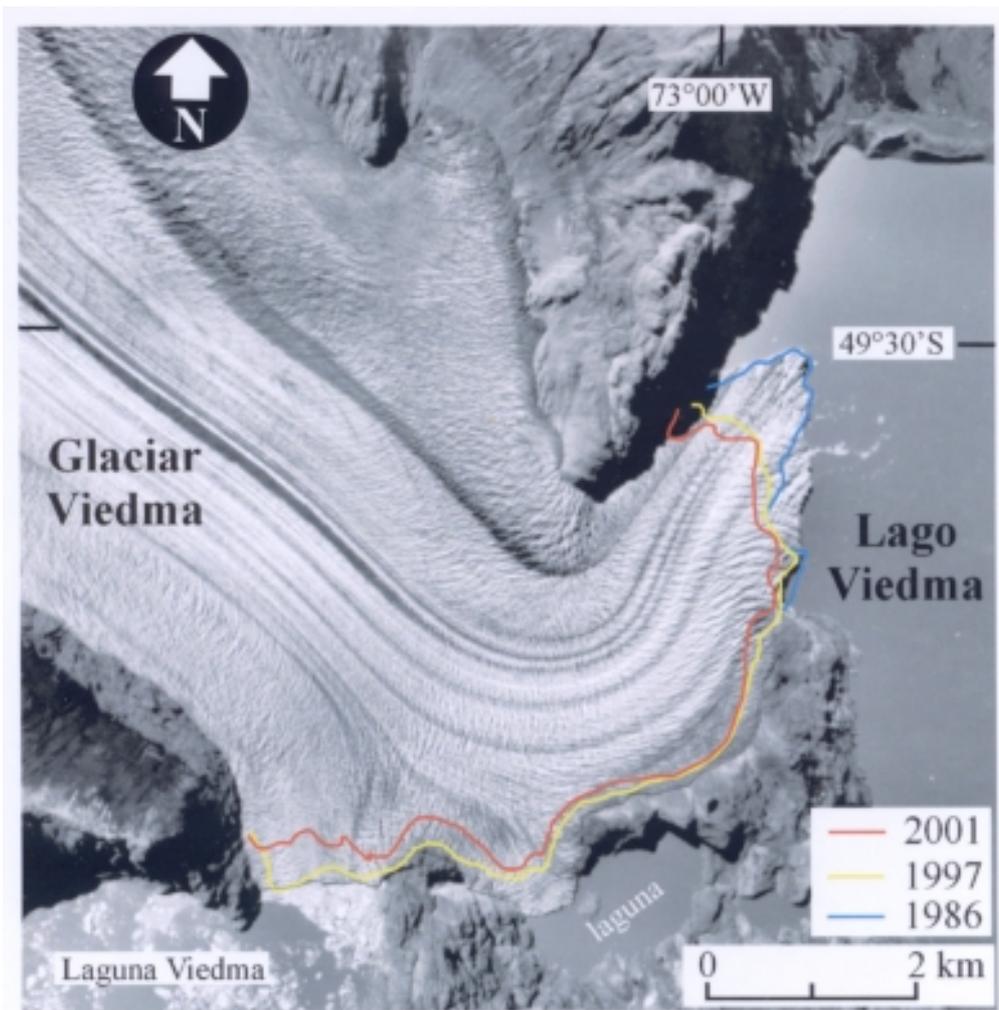
cano a la desembocadura del lago (Rene Reibel, comunicación personal). El hidrograma del paso La Leona no exhibe ningún pico de caudal similar en los registros disponibles durante el período 1985-2000. Se plantearon varias hipótesis para explicar este fenómeno. Una de ellas es la ocurrencia de intensas lluvias en el interior del campo de hielo, que combinadas con fuertes vientos cálidos del noroeste podrían haber intensificado la ablación superficial, suministrando un aporte extraordinario de agua. Otra posibilidad sería el vaciamiento brusco de la laguna Viedma (Fig. 3), ya que el exceso de agua calculado sobre el promedio de los caudales diarios entre el período 23-2-99 y 4-4-99 (41 días) es del mismo orden de magnitud que el volumen de agua estimado para laguna Viedma. Se consideró también posible que la actividad geotérmica del volcán Lautaro, cuya ubicación se indica en Figura 2, podría haber formado un lago subglacial en las nacientes del glaciar Viedma y su posterior drenaje o *jökulhlaup* al lago Viedma, dando origen a las inundaciones mencionadas. Este fenómeno extraordinario merece un análisis mucho más detallado, basado en registros de distintos parámetros ambientales de la zona, para poder obtener conclusiones ciertas y valederas. Lamentablemente ni siquiera existen datos meteorológicos de la región para ayudar a esclarecer este fenómeno. Sin embargo, informaciones provenientes de lago San Martín/O'Higgins mencionan para esa época la existencia de fumarolas al oeste del lago, donde está ubicado el volcán Lautaro. Se trata de un riesgo potencial que debería tenerse en cuenta en el futuro, especialmente en caso de construirse represas hidroeléctricas en ríos La Leona y/o Santa Cruz.

Los posibles riesgos para navegación; así como inconvenientes para el turismo son ocasionados por los desprendimientos extraordinarios que suelen producirse en el frente de la lengua principal del glaciar Upsala, que desprende en el brazo Upsala, lago Argentino. Tal es el caso del evento ocurrido a mediados del año 1994, que bloqueó durante un período prolongado la entrada de embarcaciones de turismo al brazo Upsala y bahía Onelli. El autor tuvo la oportunidad de sobrevolar y fotografiar la zona en Diciembre 1994, observando los 15 Km de extensión del brazo Upsala cubiertos de témpanos y hielo de escombros (Fig. 5).

Otro riesgo potencial son las inundaciones producidas en el brazo sur del lago Argentino a causa de los endicamientos del glaciar Moreno ocurridos en el pasado. Los diques naturales de hielo cierran esporádicamente el canal que permite el pasaje de agua del brazo Rico al canal de los Témpanos (Figs. 7a y b). Cuando se producen las rupturas, por cierto entre las más espectaculares del mundo, ocurren típicos *jökulhlaup* o descargas repentinas y rápidas del lago endicado (Paterson, 1994). En el hidrograma de Charles Fuhr (Fig. 10), que abarca desde el año 1955 hasta 2000, se pueden observar claramente las rupturas de los años 1960, 1963, 1966, 1972, 1980,



**Figura 2:** Mosaico de imágenes Landsat 5 TM (bandas 1, 2 y 3), compuesto de dos escenas tomadas el 12 de Marzo de 2001, que muestra por primera vez todo el HPS libre de nubes. La línea roja marca la divisoria de hielos del HPS, que forma parte de la cuenca hídrica del río Santa Cruz. V: glaciar Viedma; U: glaciar Upsala y M: glaciar Moreno. PLL: estación de aforo Paso La Leona. En la margen sur del lago Argentino se indica la localidad de El Calafate, punto de partida de las excursiones al Parque Nacional Los Glaciares (cortesía de la Comisión Nacional de investigaciones Espaciales-CONAE, Argentina).



**Figura 3:** Fotografía aérea de la parte terminal del glaciar Viedma, tomada el 11 de Abril de 1968 por el Instituto Geográfico Militar (IGM), Argentina. Se indican las posiciones en 1986 (visible sólo el sector que desprende en lago Viedma), 1997 y 2001.

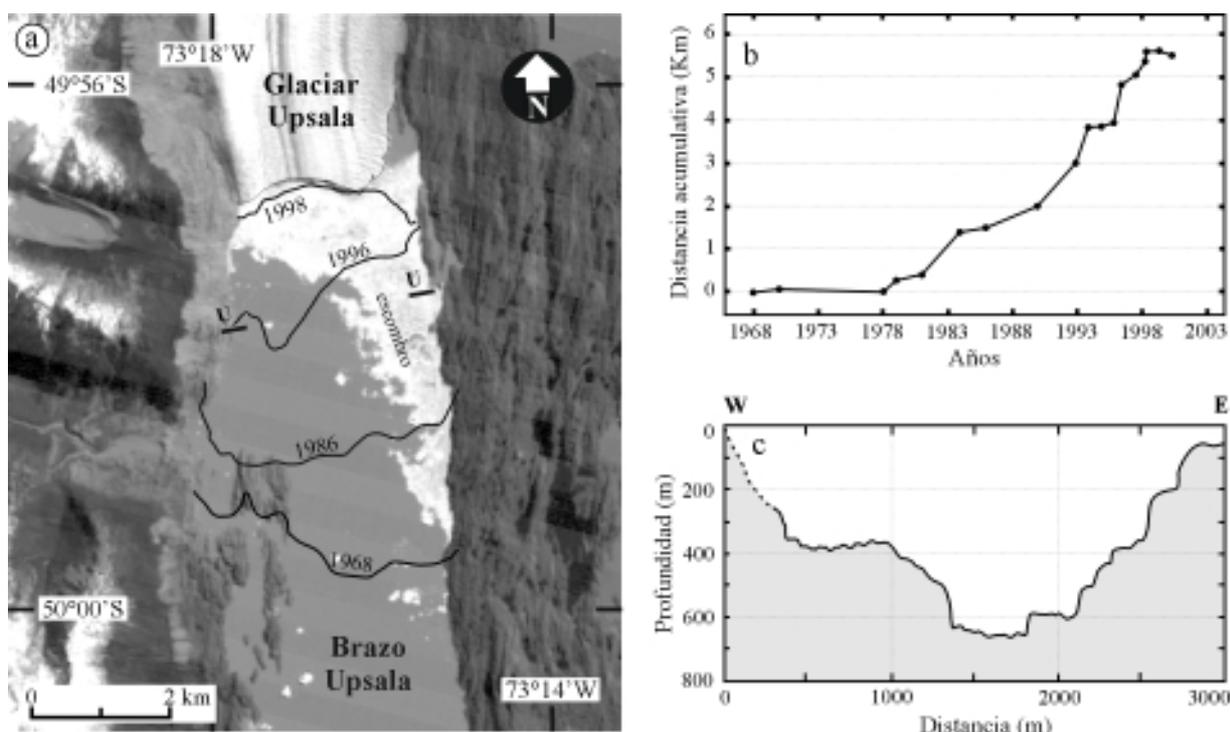
1984 y la última ocurrida en Febrero de 1988. Debido a los cierres, que a veces duran varios años, el nivel de agua del lago (brazo) Rico llegó a crecer hasta 23.5 m, valor máximo medido entre el nivel del brazo Rico (con canal abierto) y la línea de erosión de la costa brazo Rico-brazo Sur o límite inferior de la vegetación (Fig. 7b). Este valor se contradice con los datos previos publicados por Raffo *et al.* (1953), que dan una altura superior a los 26 metros para lago Rico en 1956. Por otra parte, Liss (1970) reporta una altura todavía mayor (28 m) para el nivel de lago Rico en Enero 1966. Las observaciones realizadas en 1997 indican que previo a la ruptura de 1988 la altura del lago Rico tenía 19 m (Stuefer, 1999), según el desnivel medido desde un relicto identificable de vegetación (Luciano Pera, comunicación personal).

De acuerdo a Raffo *et al.* (1953) la superficie inundada en 1952 era de 66.7 km<sup>2</sup>, afectando a todas las estancias y chacras de la zona, pero no sus construcciones. Aparte de inundarse más de un tercio de la superficie del suelo de las chacras, se anegaron también los cultivos y lavaron los suelos. El relevamiento topográfico efectuado

en 1952 indica que la cota para el desagüe natural en la zona es de 30.8 m con respecto al cero hidrométrico del brazo Rico de la época. De alcanzarse ese valor se hubieran inundado más del 50% de las casas. Como anécdota cabe mencionar que en 1939, con el propósito de impedir la primera inundación, el Ministerio de Marina lanzó explosivos sobre el frente del glaciar Moreno, para producir artificialmente la ruptura del dique de hielo y abrir el canal de drenaje. Como es de imaginar el intento no tuvo éxito. Los hidrogramas de brazo Rico de las rupturas ocurridas en 1952 y 1953 (Raffo *et al.*, 1953), son muy parecidos al hidrograma de descarga repentina (*jökulhlaup*) de Grimsvötn, en Islandia (Paterson, 1994).

#### **Variaciones glaciarias**

Se analizan y presentan las variaciones glaciarias de las últimas tres décadas de los tres glaciares mayores de las cuencas hídricas La Leona y Santa Cruz: glaciar Viedma, glaciar Upsala y glaciar Moreno. A largo plazo el comportamiento de estos glaciares influirá sin duda al-



**Figura 4:** a) Sector de imagen Landsat TM del 12 de Marzo del 2001 de la lengua principal del glaciar Upsala, que desprende en brazo Upsala. Las sucesivas posiciones del frente, desde 1968 hasta 2001, muestran el dramático retroceso de este glaciar. U-U: posición de sección batimétrica medida en Diciembre 1998. La gran cantidad de hielo de escombros es resultado de intensos desprendimientos (cortesía de CONAE).

b) Retroceso acumulativo promedio de la lengua principal desde 1968 hasta 2001 (actualizado de Naruse y Skvarca, 2000). Nótese los significativos retrocesos causados por grandes desprendimientos ocurridos en 1994 (Figura 5) y 1997.

c) Perfil transversal de profundidades en brazo Upsala medido con sonda hidrográfica. Se observa el canal muy profundo de más de 600 m, donde el glaciar se hallaba probablemente en flotación (Naruse y Skvarca, 2000).

guna en los caudales de ambos ríos, pues se trata de áreas de drenaje de hielo con mayor aporte de agua.

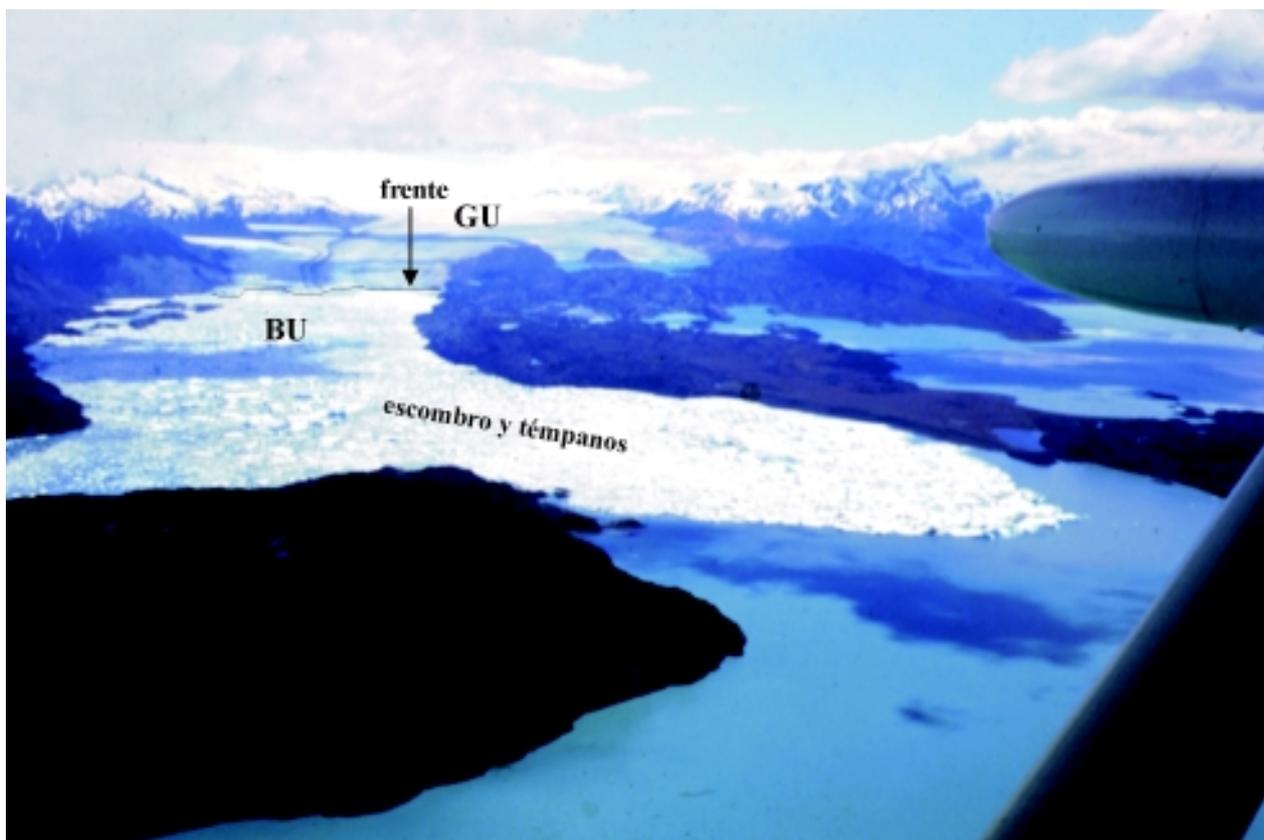
#### a) Glaciar Viedma

De los glaciares del HPS que aportan agua al río Santa Cruz el glaciar menos estudiado y conocido es el Viedma (Fig. 2), a pesar de ser el segundo más grande de Sudamérica. Skvarca *et al.* (1995c) obtuvieron para este glaciar un área total de hielo de 978 km<sup>2</sup> a partir del análisis de la imagen Landsat TM del 27 de Septiembre 1986. Los mismos autores midieron para toda la cuenca de drenaje del glaciar una superficie de 1.126 km<sup>2</sup>, que incluye las áreas libres de hielo, pero excluye la cuenca de laguna Viedma. En forma independiente, Aniya *et al.* (1996), utilizando el mosaico Landsat TM del 14 de Enero de 1986, obtienen para este glaciar un área de 945 km<sup>2</sup> en su alternativa de máxima.

La expedición científica más relevante que realizara investigaciones preliminares sobre geología, glaciología, meteorología, etc. en la zona del glaciar Viedma fue llevada a cabo por la Sociedad Científica Alemana en verano 1915-16 (Kölliker *et al.*, 1917). Uno de los principales logros de esa expedición fue el cruce del glaciar Viedma hasta alcanzar la divisoria de hielos Viedma-Pío XI el 9 de Marzo de 1916, además de producir el croquis de la

región Centro-Andina al oeste del lago Viedma a Escala 1:150.000. Recién muchos años después, Llibouty (1956) suministra algunos datos preliminares sobre este glaciar, estimativos por la dificultad de delimitar su cuenca de alimentación. Este autor fue también el primero en mencionar y describir las tres bandas de ceniza volcánica que aparecen debajo de la línea de equilibrio en la zona de ablación de la mayoría de los glaciares efluentes de la zona central del HPS. Estas tres bandas son también un rasgo muy distintivo del glaciar Viedma. Llibouty (1956; 1957; 1998) las definió como bandas de fusión de ceniza volcánica, originadas por tres erupciones mayores del Volcán Lautaro (3.380 m S.M.), ubicado en la cabecera del glaciar Viedma, a los 49° S y 73°30' W (Fig. 2).

Sólo recientemente este glaciar fue objeto de estudios más detallados (Skvarca *et al.* 1995c; Aniya *et al.*, 1996). Skvarca *et al.* (1995c) analizaron los cambios ocurridos desde 1968 hasta 1993 sobre la base de fotografías aéreas, imágenes Landsat y de radar (ERS-1 y X-SAR). Observaron una notable estabilidad del frente principal, en contraste con la mayoría de los glaciares restantes del HPS. Sin embargo, se han detectado cambios significativos en la margen sur del glaciar, que desprende en laguna Viedma y el vaciamiento de esta última. El análisis de las imágenes SIR-C/X-SAR, tomadas durante los vuelos del



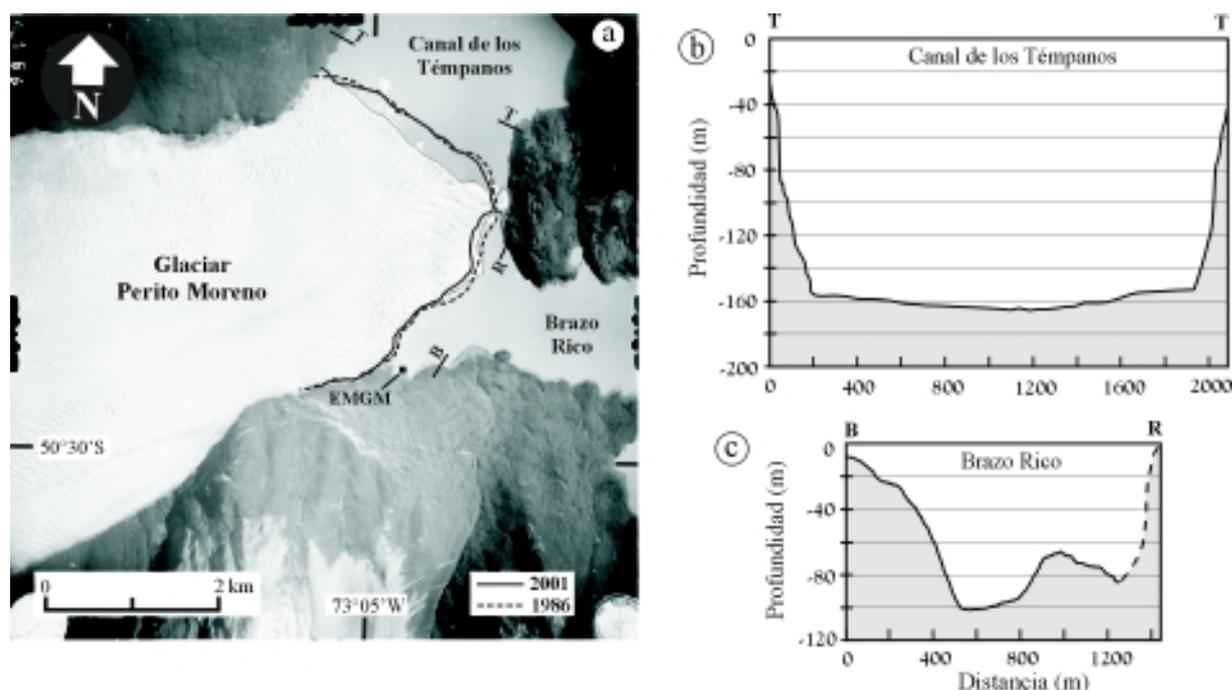
**Figura 5:** Fotografía aérea oblicua tomada desde el avión Porter Pilatus de Gendarmería Nacional el 9 de Diciembre de 1994. El brazo Upsala se encuentra completamente tapado por témpanos y hielo de escombros, producto de uno de los mayores eventos de desprendimiento. GU: glaciar Upsala. BU: brazo Upsala (Foto: P. Skvarca).

trasbordador *Endeavour* en Abril y Octubre 1994, revelaron el drenaje de laguna Viedma durante ese período: su superficie disminuyó de 7.0 km<sup>2</sup> a 1.5 km<sup>2</sup>. La observación de las fotografías tomadas por el autor durante el vuelo de reconocimiento aéreo realizado el 8 de Enero de 1993 muestra esta laguna también sin agua, lo cual permite afirmar que se trata de una laguna que se vacía esporádicamente. Esta hipótesis es confirmada por imagen Landsat TM del 12 de Enero del 2001 que muestra la laguna Viedma con agua, pero llena de témpanos y hielo de escombros frente a su desembocadura, que podrían ocasionar su taponamiento. En la Figura 3 se pueden observar cambios más pronunciados en el período Marzo 1997-Marzo 2001 en toda la margen sur, hasta laguna Viedma. El análisis de los datos permite concluir que el glaciar Viedma perdió desde 1968 hasta 2001 tanto en su frente como en su margen sur hasta laguna Viedma (Fig. 3), un total de 3.6 km<sup>2</sup>, de los cuales 2.2 km<sup>2</sup> corresponden al retroceso en agua y el resto (1.4 km<sup>2</sup>) en tierra.

#### b) Glaciar Upsala

Con sus 902 km<sup>2</sup> de superficie (Aniya *et al.*, 1996), el glaciar Upsala (Figs. 2 y 4) es el tercero en extensión del HPS y de América del Sur. Su área de acumulación es de 611 km<sup>2</sup> y la de ablación de 290 km<sup>2</sup>. La altura de la línea de equilibrio ha sido estimada en 1.150 m (Aniya y

Skvarca, 1992). El glaciar fluye del campo de hielo, de norte a sur, a lo largo de 60 km de longitud desde la divisoria de hielos Viedma-Upsala. Desemboca en su parte este en lago Guillermo y con su lengua principal (oeste) en el brazo Upsala del lago Argentino (Figs. 2 y 4). La lengua principal sufrió significativos retrocesos entre 1981 y 1984 (Aniya y Skvarca, 1992), en 1990-1993 (Skvarca *et al.*, 1995a) y a mediados de 1994 (Skvarca *et al.*, 1995b). Durante el mismo período, también la parte este que desprende en lago Guillermo retrocedió rápida y notoriamente (Warren *et al.*, 1995). El retroceso disminuyó luego de 1994, para acelerar nuevamente a inicios de 1997 (Aniya *et al.*, 2000; Skvarca *et al.*, en prensa). Recientes estudios detallados indican que las altas tasas de pérdida de área, como la máxima ocurrida entre Marzo y Mayo de 1997 (5.78 km/año), se debe a un evento extraordinario de desprendimiento (Skvarca *et al.*, en prensa). Desde 1978 hasta el presente, la lengua principal (Figs. 4a y b) retrocedió casi 6 km y la tasa de retroceso aumentó cuatro veces entre 1997 y 2000. En sincronismo con el fuerte retroceso se ha detectado un pronunciado descenso de la superficie glaciar de 11 m/año en promedio, medido entre 1990 y 1993 (Skvarca *et al.*, 1995a). Se trata de la mayor tasa de adelgazamiento glaciar medida hasta el presente en el HPS y, una de las mayores registradas en el mundo, causada en parte por el mejoramiento climático regional



**Figura 6:** a) Glaciar Perito Moreno en 1947. Para mostrar la estabilidad de este glaciar se indican también las posiciones del frente en 1986 y 2001. Si bien existe un avance neto de +0.61 km<sup>2</sup> entre 1947 y 2001, el frente del glaciar estuvo oscilando durante el pasado medio siglo entre esas dos posiciones. El avance neto ocurre principalmente en el canal de los Témpanos. B-R: ubicación del perfil de profundidad en brazo Rico (Fig. 6c); T-T: indica la posición donde se midió la sección de profundidad en canal de los Témpanos (Fig. 6b); EMGM: Estación Meteorológica Glaciar Moreno (Fotografía aérea de IGM, Argentina).

b) y c) Perfiles de profundidad en brazo Rico (B-R) y canal de los Témpanos (T-T), medidos con sonda Echotrack, Modelo DF3200 MKII. En brazo Rico la topografía del fondo es bastante más irregular que en el canal de los Témpanos, que presenta una forma de U casi perfecta. Puesto que la altura de la pared tiene unos 50 m, estas profundidades indican a las claras que el glaciar, por el principio de exceso de flotación, se encuentra totalmente apoyado a lo largo de ambos frentes.

y en parte por la reducción de tensiones como resultado del rápido retroceso (Naruse *et al.*, 1997). Estudios muy recientes basados en imágenes secuenciales Landsat TM y mapeos GPS de terreno, indican una aceleración en el retroceso de la lengua oeste del glaciar Upsala, con una pérdida de área de 4.8 km<sup>2</sup> entre Diciembre 1996 y Junio 2000 (Skvarca *et al.*, en prensa).

Analizado el comportamiento de la lengua principal del glaciar desde mediados del siglo pasado hasta el presente, se calcula que entre 1945 y 1986 Upsala perdió 11.9 km<sup>2</sup> y retrocedió a una tasa de 0.29 km<sup>2</sup>/año (Aniya *et al.*, 1997); durante el período 1986-96 la pérdida fue de 7.77 km<sup>2</sup> a una tasa promedio de 0.71 km<sup>2</sup>/año, alcanzando la misma 4.78 km<sup>2</sup> (a una tasa de 1.36 km<sup>2</sup>/año) entre 1996 y 2000. Los números indican que las tasas de retroceso se duplicaron y cuadruplicaron en comparación con el período 1945-1986. Las Figuras 4a ; b) muestran claramente el dramático retroceso de la lengua principal del glaciar durante los últimos 30 años. Se concluye que durante la mitad del siglo pasado sólo la lengua principal del glaciar Upsala disminuyó su área en 24.5 km<sup>2</sup>. Simultáneamente la superficie del mismo descendió bruscamente unos 130 m desde 1968 hasta 1990, según estimaciones del autor. Este dato ha sido corroborado por la tasa promedio de descenso de 11 m/año medida entre 1990 y 1993, mencionada anteriormente. Los resultados de estudios

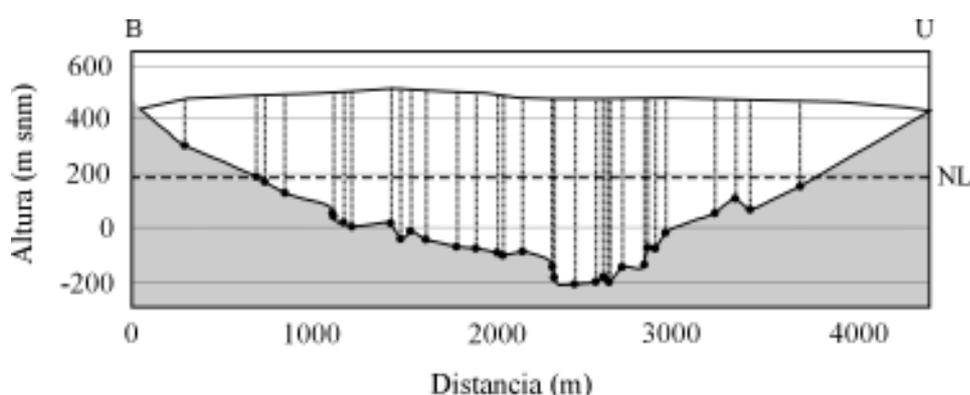
recientes demuestran que las variaciones de la lengua principal del glaciar Upsala durante la década del '80, fueron controladas por la topografía del lago, y que los glaciares temperados que terminan en agua dulce pueden flotar (Naruse y Skvarca, 2000).

### c) Glaciar Moreno

Mucho se ha escrito sobre este glaciar, muy conocido por sus endicamientos (cierres), seguidos por espectaculares rupturas ocurridas en el pasado, la primera en 1917 y la última en 1988. Hauthal (1904) midió en 1899 por primera vez la posición del frente que se hallaba distanciado unos 750 m de la península Magallanes. De acuerdo a la información disponible, el glaciar estuvo avanzando desde fines del siglo pasado hasta el año 1917, cuando se produce el primer cierre seguido de ruptura. Desde esa fecha hasta hoy el glaciar Moreno se halla en estado estacionario, con fluctuaciones máximas registradas del orden de los 500 m (Aniya y Skvarca, 1992). Sin embargo, es muy común escuchar que el glaciar Moreno es el único glaciar que avanza, confundiendo el movimiento del mismo causado por la fuerza de la gravedad, con la posición de su frente que se halla relativamente estable. Como el glaciar termina (apoyado) en el lago, sus variaciones son reguladas no sólo por los cambios en la precipitación y temperatura sino también, por las condiciones



**Figura 7:** a) Fotografía del glaciar Moreno tomada desde cerro Buenos Aires el 5-12-1996. Hacia el oeste se observan las montañas, que forman la divisoria de hielos que fluyen al lago Argentino (cuenca del Atlántico) y al oeste en fiordos del Pacífico (no visibles). El cerro Pietrobelli (P), de 2950 m s.n.m. es la montaña más alta de la región. A la izquierda brazo Rico, a la derecha canal de los Témpanos, y entre ambos la punta de la península Magallanes, donde se forma el dique de hielo. En primer plano se observa el camino que conduce al “Mirador” turístico. EMGM: Estación Meteorológica Glaciar Moreno (Foto: P. Skvarca).  
 b) Lengua terminal del glaciar Perito Moreno desde el cerro F. P. Moreno. A la izquierda canal de los Témpanos, a la derecha brazo Rico. BA: cerro Buenos Aires; M: Mirador; Fecha de toma: 24 de Febrero, 2000. Nótese la altura de la línea de vegetación y la costa del brazo Rico erosionada por el ascenso del nivel de agua a causa de endamicientos pasados.



**Figura 8:** Sección transversal del glaciar Moreno en la transecta Buscaini (B-U en Fig. 7a), donde se midieron los espesores de hielo con sismica de reflexión en Noviembre 1996 (modificado de Stuefer, 1999).

del agua (temperatura, profundidad, circulación, topografía). A pesar de su extraordinario comportamiento y relativamente fácil acceso, si se compara con otros glaciares del HPS, recién en la década pasada el glaciar Moreno fue objeto de estudios glaciológicos sistemáticos, si bien concentrados en su parte inferior o zona de ablación. Para hacer investigaciones en la zona de acumulación, al igual que en el resto de los glaciares del HPS, habría que contar con el apoyo de helicópteros o aviones equipados con esquís. En contraste con la mayoría de los glaciares del HPS que retrocedieron entre 1 y 13 km desde 1944/45 (Aniya *et al.*, 1992; Naruse *et al.*, 1995b), el glaciar Perito Moreno se halla en estado de equilibrio. El comportamiento contrastante del glaciar Moreno resulta de una respuesta diferente de los glaciares al cambio climático y a la naturaleza compleja de los glaciares que desprenden en el agua.

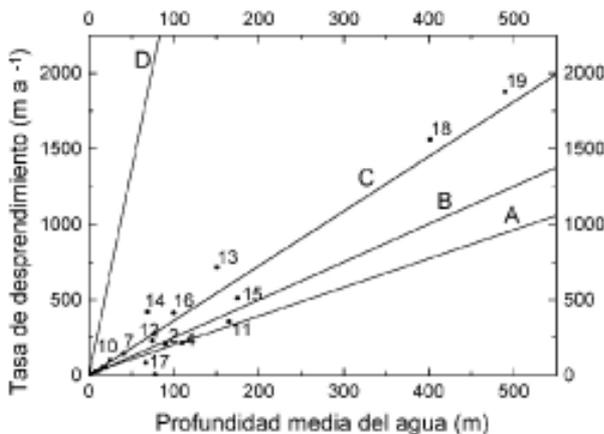
En el glaciar Moreno se llevaron a cabo campañas de campo desde fines de 1990 hasta 2001, en el marco de proyectos de cooperación internacional en los que participan Argentina, Austria, Chile y Japón. El resultado de estos esfuerzos científicos conjuntos son numerosos trabajos de investigación presentados en simposios internacionales y publicados en revistas especializadas, como también la primer tesis doctoral de un glaciar argentino, que trata sobre comportamiento dinámico y balance de masa del glaciar Moreno (Stuefer, 1999).

Una de las tareas más difíciles que se hayan realizado en el glaciar Moreno se relaciona con las mediciones de espesores de hielo mediante sismica de reflexión. Para tal fin se contó con un sismógrafo de 24 canales. Para registro de las señales se utilizaron dos ristras de 12 geófonos cada una, espaciados 10 m entre sí y alineados a lo largo de los perfiles. Se utilizaron en total 100 Kg de explosivo plástico, en cargas de 2 Kg por disparo. Los resultados del perfil transversal B-U (Fig. 8), ubicado a unos 8 Km de El Mirador (Fig. 7a), indican que el lecho rocoso tiene una forma aproximadamente parabólica con la máxima

profundidad de 684 m (Stuefer, 1999), desplazada del centro del glaciar hacia el norte (Fig. 8). Es sumamente interesante observar que la parte más profunda del glaciar se halla casi 200 m por debajo del nivel del mar, o sea unos 400 m por debajo del nivel de lago, cuya altura es de 184 m S.M.). Es decir, que en ese sector el glaciar ha excavado profundamente el lecho rocoso, que se eleva hacia el frente, donde se conocen los espesores a partir de los datos de profundidades de lago y alturas de la pared de hielo expuesta.

Finalmente, como tarea rutinaria que forma parte de los proyectos mencionados, se mide cada tres años el nivel de la superficie glaciar en una transecta ubicada unos 4 km del frente. Los datos medidos en 1999 indican un ligero aumento en el nivel de la superficie en comparación con el período 1990-96, dato que permite sugerir la posibilidad de futuros cierres y posteriores rupturas, de mantenerse esta tendencia.

Si bien es notorio el retroceso generalizado de los glaciares del HPS desde mediados de la década del 40 hasta el presente, algunos presentan comportamientos distintos, ya que el avance o retroceso de los glaciares que terminan en agua no está directamente vinculado al cambio climático, sino depende también de la dinámica del desprendimiento, características topográficas, profundidad del agua, etc. Para estudios de dinámica de desprendimiento, los glaciares del HPS revisten especial importancia por tratarse de glaciares que presentan altas tasas (velocidades) de desprendimiento en aguas (dulces) muy profundas. Funk y Röthlisberger (1989) encontraron una relación empírica lineal entre la velocidad de desprendimiento y la profundidad media del agua al estudiar glaciares en Suiza que terminan en lagos artificiales, formados por represas. Esta ley ha sido actualizada por Warren *et al.* (1995), que incorporaron nuevos datos de Patagonia, entre los que figura la lengua este del glaciar Upsala que desprende en lago Guillermo. Sin embargo, muy recientemente esta ley empírica se hace más univer-



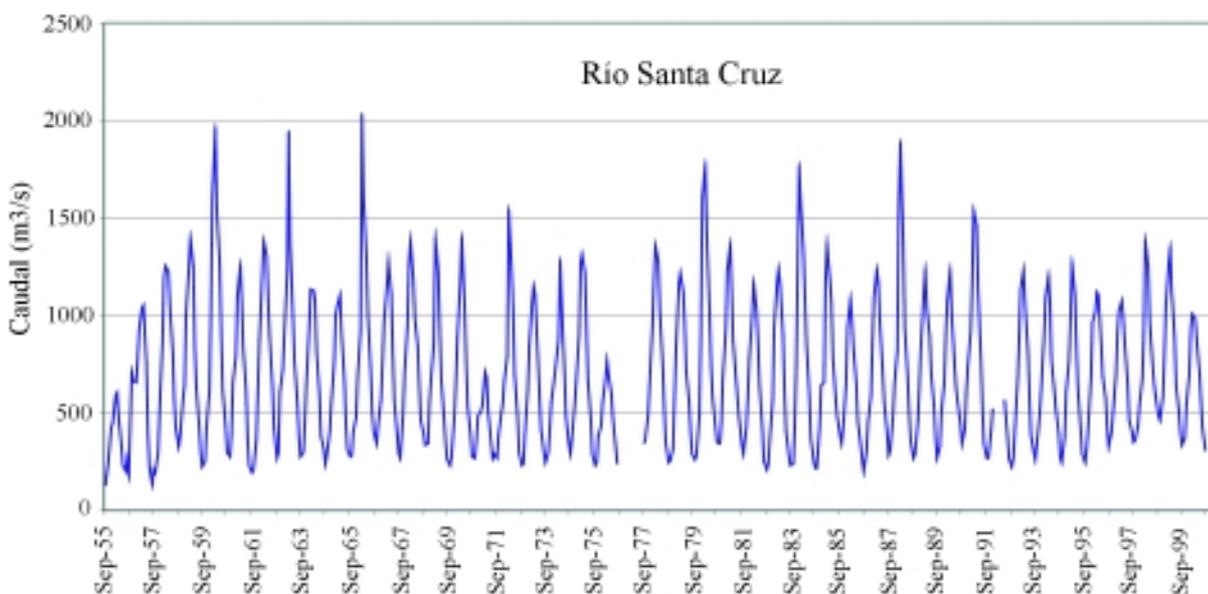
**Figura 9:** Relación empírica entre la velocidad de desprendimiento (*calving*) ( $V_c$ ) y la profundidad media del agua ( $H_w$ ). La recta C representa la versión propuesta por Skvarca et al. (en prensa), que incorpora por primera vez datos de glaciares que desprenden muy rápido en agua muy profunda. Reproducido de *Annals of Glaciology*, Vol. 34, con permiso de la Sociedad Glaciológica Internacional; Skvarca et al., en prensa).

sal con el aporte de datos novedosos provenientes de glaciares que presentan muy altas tasas de desprendimiento en aguas muy profundas (Skvarca et al., en prensa). Entre ellos se pueden mencionar los glaciares Moreno, Ameghino y especialmente la lengua principal (oeste) del glaciar Upsala, que presenta tasas récord de desprendimiento en aguas sumamente profundas, cercanas a los 700 m, como en el brazo Upsala (Fig. 4c). Para esta nueva ley experimental se han utilizado los valores de las secciones de agua obtenidas durante los relevamientos batimétricos realizados en conjunto con el Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

en 1998 y 1999, que se presentan en Figura 4c y Figuras 6b,c. Las velocidades de desprendimiento ( $V_c$ ) se obtuvieron de mediciones GPS de campo y de imágenes satelitales secuenciales. Para la lengua principal del glaciar Upsala se obtuvo una velocidad de desprendimiento de 1.880 m/año para el período de 3.5 años que va desde fines de 1996 hasta mediados del 2000. La expresión lineal actualizada que relaciona la velocidad de desprendimiento (*calving*) con la profundidad media del agua ( $H_w$ ) se muestra en la Figura 9. La recta A representa la relación original de Funk y Röthlisberger (1989), B es la versión mejorada de Warren et al. (1995), que combina los datos anteriores con adicionales de Patagonia y, C es la nueva relación que amplía la base de datos existentes con el aporte de nuevos valores provenientes de los glaciares Upsala, Moreno y Ameghino, que desprenden en aguas profundas, con un coeficiente de proporcionalidad  $k = 3.62$  (Skvarca et al., en prensa). La recta D (Brown et al., 1982) corresponde a “glaciares de marea”, como se denomina a aquéllos cuyos frentes desprenden en el mar. La información presentada permite concluir que el estudio de los glaciares del HPS aporta nuevos e importantes datos para una mejor comprensión de la dinámica de desprendimiento de glaciares en agua dulce.

### Conclusiones

De lo antedicho se desprende la importancia que representan los glaciares del Hielo Patagónico Sur para la provincia de Santa Cruz. En consecuencia resulta imperioso incrementar las investigaciones científicas en la región de los glaciares, fuente de recurso hídrico y turístico. Para lograr este objetivo es necesario contar con más



**Figura 10:** Hidrograma (descarga promedio mensual) del río Santa Cruz en la estación de aforo Charles Fuhr, desde año 1955 hasta 2000 (Estadística Hidrológica 1994, actualizada por Subsecretaría de Recursos Hídricos). Se notan claramente los picos de descarga ocasionados por la ruptura del glaciar Moreno en 1960, 1963, 1966, 1972, 1980, 1984 y 1988.

apoyo de los organismos nacionales, pero fundamentalmente de la provincia y de las instituciones comerciales de El Calafate. Las mismas deben promover, incentivar y ayudar a financiar las investigaciones científicas en la región del HPS, inversión que en definitiva resultará en su beneficio.

### AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su más sincero agradecimiento a todos aquellos, particulares e instituciones, que de una manera u otra apoyaron desinteresadamente las actividades glaciológicas y contribuyeron de este modo a incrementar el conocimiento científico de la región. Especial

agradecimiento corresponde al Destacamento Naval Reforzado Lago Argentino, Prefectura Naval Argentina, que apoyó durante toda la década del 90 con personal y medios las difíciles tareas llevadas a cabo en la zona del glaciar Upsala, al Escuadrón N° 42 de Gendarmería Nacional, a la Intendencia del Parque Nacional Los Glaciares y guardaparques de las Seccionales Moreno, Roca, Mitre y Punta Bandera, que acompañaron y ayudaron al autor en todo tipo de tareas científicas, a la Compañía Hielo y Aventura y sus guías de montaña por su compañerismo, aliento y ayuda. Enumerar a cada uno de ellos sería muy largo y podía dar lugar a omisiones. Se agradece al Lic. H. De Angelis su valioso aporte en la preparación de las figuras.

### TRABAJOS CITADOS

- Aristarain, A.J. y Delmas, R.J. 1993. Firm-core study from the southern Patagonia ice cap, South America. *Journal of Glaciology*, **39**(132), 249-254.
- Aniya, M. y Skvarca, P. 1992. Characteristics and variations of Upsala and Moreno glaciers, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **10**, 39-53.
- Aniya, M., Naruse, R., Shizukuishi, M., Skvarca, P. y Casassa, G. 1992. Monitoring recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, utilizing remote sensing data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **29**(B7), 87-94.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P. y Casassa, G. 1996. The use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. **62**, No. 12, 1361-1369.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P. y Casassa, G. 1997. Recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, **29** (1), 1-12.
- Aniya, M. 1999. Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31**(2), 165-173.
- Aniya, M., Park, S., Dhakal, A.M. y Naruse, R. 2000. Variations of Patagonian glaciers, South America, using RADARSAT and Landsat images. *Canadian Journal of Remote Sensing* **26** (6), 501-511.
- Bates, R.L. y Jackson, J.A. (Eds.). 1980. Glossary of Geology, 2nd edition. American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 749 pp.
- Bertone, M. 1960. Inventario de los glaciares existentes en la vertiente Argentina entre los paralelos 47° 30' y 51° S. *Instituto Nacional del Hielo Continental Patagónico*. Publicación No. 3, Buenos Aires, 101 pp.
- Brown, C.S., Meier, M.F. y Post, A. 1982. Calving speed of Alaska tidewater glaciers, with application to Columbia Glacier. *USGS Professional Paper*, 1258-C.
- Dirección General de Aguas. 1987. *Balance hídrico de Chile*. Santiago, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile, 59 pp.
- Embleton, C. y King, C.A.M. 1975. *Glacial Geomorphology*. Edwards Arnold (Publishers) Ltd., 573 pp.
- Escobar, F., Vidal, F., Garín, C. y Naruse, R. 1992. Water balances in the Patagonia Icefield. In Naruse, R. and M. Aniya, eds.: *Glaciological Researches in Patagonia, 1990*. Sapporo, Japanese Society of Snow and Ice, 109-119.
- Estadística Hidrológica. 1994. Secretaría de Energía, Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Tomo II, Buenos Aires (actualizada por Subsecretaría de Recursos Hídricos).
- Funk, M. y Röthlisberger, H. 1989. Forecasting the effects of a planned reservoir which will partially flood the tongue of Unteraargletscher in Switzerland. *Annals of Glaciology*, **13**, 76-81.
- Hauthal, R. 1904. Gletscherbilder aus den Argentinischen Cordillere. *Zeitschrift des deutschen und österreichischen Alpenvereins*, **35**, 30-56.
- Hollin, J.T. y Schilling, D.H. 1981. Late Wisconsin-Weichselian mountain glaciers and small ice caps. In Denton, G.H. and T.J. Huges, eds.: *The Last Great Ice Sheets*. John Wiley, New York, 179-206.
- Ibarzábal y Donángelo, T., Hoffmann, J.A.J. y Naruse, R. 1996. Recent climate changes in southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **14**, 29-36.
- Kölliker, A., Hicken, C., Kuhn, F., Reichert, F., Tomsen, A. y Witte, L. 1917. Patagonia. Resultados de las expediciones realizadas en 1910 a 1916. *Sociedad Científica Alemana*, Buenos Aires, Tomo 2, 329-376.
- Liss, C. 1970. Der Morenogletscher in der Patagonischen Kordillere. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, VI(1-2), 161-180.
- Lliboutry, L. 1956. Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología. *Ediciones de la Universidad de Chile*, Santiago, 471 pp.
- Lliboutry, L. 1957. Banding and volcanic ash on Patagonian glaciers. *Journal of Glaciology*, **3**, No. 21, 20-25.
- Lliboutry, L. 1998. Glaciers of South America-Glaciers of Chile and Argentina. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World, R.S. Williams and J.G. Ferrigno (ed.), *USGS Professional Paper* 1386-I-6, 1109-1206.
- Naruse, R. y Aniya, M. 1992. Outline of Glacier Research Project in Patagonia, 1990. *Bulletin of Glacier Research*, **10**, 55-62.
- Naruse, R., Skvarca, P., Satow, K., Takeuchi, Y. And Nishida, K. 1995a. Thickness change and short-term flow variation of Moreno Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **13**, 21-28.
- Naruse, R., Aniya, M. Skvarca, P. y Casassa, G. 1995b. Recent variations of calving glaciers in Patagonia, South America, revealed by ground surveys, satellite-data analyses and numerical experiments. *Annals of Glaciology*, **21**, 297-303.
- Naruse, R., Skvarca, P. y Takeuchi, Y. 1997. Thinning and retreat of Glacier Upsala, and an estimate of annual ablation changes in southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, **24**, 38-42.
- Naruse, R. y Skvarca, P. 2000. Dynamic features of thinning and retreating Glacier Upsala, a lacustrine calving glacier in Southern Patagonia. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **32**(4), 485-491.
- Paterson, W.S.B. 1994. *The Physics of Glaciers* (3rd ed.), Pergamon Press, Oxford, 480 p.
- Raffó, J.M., Colqui, B.S. y Madejski, M.E. 1953. Glaciar Moreno. *Revista Meteoros*, **3**(4), 293-341. Buenos Aires. Dirección Gral. Servicio Meteorológico Nac., Publicación 9.
- Rott, H., Stuefer, M. Rack, W., Skvarca, P. y Eckstaller, A. 1998. Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield. *Geophysical Research Letters*, **25** (9), 1407-1410.

- Skvarca, P., Satow, K., Naruse, R. y Leiva, J.C. 1995a. Recent thinning, retreat and flow of Upsala Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research* **13**, 11-20.
- Skvarca, P., Rott, H. y Nagler, T. 1995b. Drastic retreat of Upsala Glacier, Southern Patagonia, revealed by ERS-1 images and field survey. *SELPER*, **11**(1-2), 51-55.
- Skvarca, P., Rott, H. y Stuefer, M. 1995c. Sinergy of ERS-1 SAR, Landsat TM imagery and aerial photography for glaciological studies of Viedma Glacier, Southern Patagonia. *Actas, VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, SELPER, Puerto Vallarta, México, 7-11 Noviembre 1995, 674-682.
- Skvarca, P. y Naruse, R. 1997. Dynamic behavior of Glaciar Perito Moreno, southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, **24**, 268-271.
- Skvarca, P., Stuefer, M. y Rott, H. 1999. Temporal changes of Glaciar Mayo and Laguna Escondida, southern Patagonia, detected by remote sensing data. *Global and Planetary Change* **22**, 245-253.
- Skvarca, P., De Angelis, H., Naruse, R., Warren, C.W. y Aniya, M. (en prensa). Calving rates in freshwater: new data from southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, **34**.
- Stuefer, M. 1999. Investigations on mass balance and dynamics of Moreno Glacier based on field measurements and satellite imagery. *PhD thesis*. University of Innsbruck, Austria, 173 pp.
- Warren, C.R., Greene, D.R. y Glaser, N.F. 1995. Glaciar Upsala, Patagonia: rapid calving retreat in fresh water. *Annals of Glaciology*, **21**, 311-316.
- Warren, C. y Aniya, M. 1999. The calving glaciers of southern South America. *Global and Planetary Change*, **22**, 59-77.
- Williams, R.S. Jr. 1986. Glaciers and Glacial Landforms. In Short, N.M. and R.W. Blair, Jr. eds, *Geomorphology from space, A global overview of regional landforms*. NASA SP-486.