

Variaciones recientes del lóbulo Zapata Sur, Glaciar Tyndall. Campo de Hielo Patagónico Sur (Chile)¹

José Araos², María Angélica Godoi³, Rubén Carvallo⁴

RESUMEN

Un grupo de investigadores del CEQUA y la Dirección de Programas Antárticos (DPA) de la UMAG, han realizado una serie de campañas glaciológicas en un sector del glaciar Tyndall denominado lóbulo Zapata Sur. Variaciones recientes de este sector podrían estar asociadas al cambio climático que experimenta la región.

Se reportan resultados obtenidos desde marzo de 2003 a la fecha. Mediciones con un sistema de radio-eco sondeo permitieron estimar espesores de hielo entre 63 m, cerca del margen E actual del glaciar, y 617 m hacia el centro del glaciar, a una distancia de 2,5 km del margen E. Mediciones GPS realizadas en 5 balizas permitieron estimar un adelgazamiento promedio del hielo de 2,63 m, entre marzo de 2002 y noviembre de 2003. En las inmediaciones del margen E del hielo se detectó una velocidad de 18 m a⁻¹, mientras que en un sector localizado aproximadamente a 3 km al W del margen la velocidad del flujo de hielo es del orden de 270 m a⁻¹.

Palabras Clave: Glaciar Tyndall, cambio climático, variaciones glaciares.

ABSTRACT

A working group of CEQUA and Dirección de Programas Antárticos (DPA) of Universidad de Magallanes, has made several glaciological campaigns in a sector of Tyndall glacier called Zapata Sur lobe. Recent variations of this sector could be associated to the climatic change detected in the region.

Results obtained since March of 2003 are reported. Ice thickness measurements with a radio-echo sounding system show thicknesses between 63 m, near the East present margin of the ice, and 617 m towards the center of glacier, at a distance of 2.5 km to the East margin.

GPS measurements made in 5 ablation stakes show an average ice thinning of 2.63 m, between March 2002 and November 2003. In the surroundings of the East ice margin a surface speed of 18 m a⁻¹ was detected, in a sector located approximately at 3 km to the West of the ice margin the speed of the surface ice flow is of the order of 270 m a⁻¹.

Key words: Tyndall glacier, climatic change, glacier variations.

¹ Se agradece el apoyo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) que facilitó el acceso de los investigadores al área de estudio y a la V División del Ejército de Chile, por el apoyo logístico brindado. El apoyo en terreno de los señores Marcelo Arévalo, John Emot y Rodrigo Traub fue fundamen-

tal para el desarrollo del trabajo. Las actividades de terreno fueron cofinanciadas por el Centro de Estudios del Cuaternario, la Universidad de Magallanes y la V División del Ejército de Chile. Artículo recibido el 11 de octubre de 2006 y aceptado el 3 de enero de 2007.

El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) representa el mayor cuerpo de hielo temperado de Sudamérica (Warren & Sudgen, 1993). Con un área de 13.000 km², puede considerarse como la tercera superficie cubierta de hielo del mundo, a la cual se le atribuye un importante rol en el sistema climático global (Nishida *et al.*, 1995).

La mayoría de los glaciares del CHPS han manifestado retrocesos de sus frentes desde el siglo pasado. Mediciones discretas de cambios de espesor en las zonas de ablación de algunos glaciares indican un rápido adelgazamiento (Aniya, 1999). Dichas variaciones pueden ser una respuesta al calentamiento atmosférico detectado en el sector austral de América del Sur en las últimas décadas (Carrasco *et al.*, 2002).

En la región patagónica las variaciones climáticas recientes están representadas principalmente por cambios en el comportamiento de la temperatura y las precipitaciones. Rosenblüth *et al.* (1995) señalan un incremento de la temperatura atmosférica de 0,4° C a 1,4° C al sur de los 46° S, registrado desde principios del siglo pasado. Un estudio posterior indica que para el periodo 1960-1992 la tendencia al calentamiento es especialmente significativa en las temperaturas mínimas, sobre todo en la ciudad de Punta Arenas (Rosenblüth *et al.*, 1997)

Por su parte, entre 1915 y 1985, las precipitaciones entre los 52° S y 53° S han presentado una disminución monotónica del orden de los 1.000 mm en islote Evangelistas y 1.400 mm en bahía Félix (Rosenblüth *et al.*, 1995), lo que representa una disminución de las precipitaciones del orden de 25% a 33% durante los últimos 100 años (Rivera *et al.*, 2002).

Con el ánimo de entender en forma clara la relación entre comportamiento glacial y cambio climático en la región patagónica, un grupo de investigadores del Centro de Estudios del Cuaternario de Fuego - Patagonia y Antártica (CEQUA) y la Universidad de Magallanes (UMAG) han desarrollado una serie de campañas glaciológicas en un sector de la zona de ablación del glaciar Tyndall, denominado lóbulo Zapata Sur (nombre no oficial). El trabajo de terreno desarrollado en este sector está orientado a estimar los espesores de hielo del glaciar, el balance de masa y la dinámica superficial.

Mediciones de espesor de hielo realizadas en la década de 1990 (Casassa, 1992; Casassa & Rivera, 1998) se efectuaron sobre la posición de las balizas instaladas el año 1985 por investigadores japoneses. En enero del año 2003 se realizaron por primera vez mediciones de espesor sobre una red de puntos que cubría un área aproximada de 5,5 km² en una zona cercana al margen del hielo.

Durante las campañas de terreno se han instalado balizas de PVC en la zona de ablación del glaciar. Utilizando receptores GPS se ha medido en dos oportunidades la posición y altura de las balizas. Esta metodología constituye el primer paso para el desarrollo de un monitoreo de las variaciones recientes del volumen de hielo de este sector del glaciar Tyndall.

Se presenta una recopilación de la información obtenida a la fecha sobre las características glaciológicas del lóbulo Zapata Sur. Parte de los resultados han sido publicados previamente por Godoi *et al.* (2003) y Carvallo (2005).

Características del área de estudio

El glaciar Tyndall es un glaciar temperado (Casassa, 1992) de 32 kilómetros de largo y que cuenta con un área de 340 km² (Aniya, 1995), por lo que representa al octavo glaciar más grande del CHPS, localizado al interior del Parque Nacional Torres del Paine en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

² Fundación CEQUA (Centro de Estudios del Cuaternario de Fuego - Patagonia y Antártica), (Chile).

E-mail: jose.araos@gmail.com

³ Dirección de Programas Antárticos (DPA). Universidad de Magallanes (Chile).

E-mail: mangel.godoi@umag.cl

⁴ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Magallanes (Chile).

E-mail: ruben.carvallo@umag.cl

La lengua principal del glaciar, orientada hacia el sur, presenta un frente de desprendimiento o calving en los lagos Tyndall y Geikie, los que se encuentran separados por un afloramiento rocoso. Ambos frentes están retrocediendo desde 1945 y han manifestado un incremento en las tasas de retroceso desde 1986 del orden de 2 m a^{-1} en el lago Tyndall y $2,5 \text{ m a}^{-1}$ en el lago Geikie (Rivera & Casassa, 2004).

En el margen Este del glaciar Tyndall y aproximadamente a 16 km aguas arriba desde el frente, se localiza una estribación lateral que se conoce como lóbulo Zapata Sur (Figura N° 1). Dicho sector recibe también el nombre de Lengua Este (Rivera & Casassa, 2004; Raymond *et al.*, 2005).

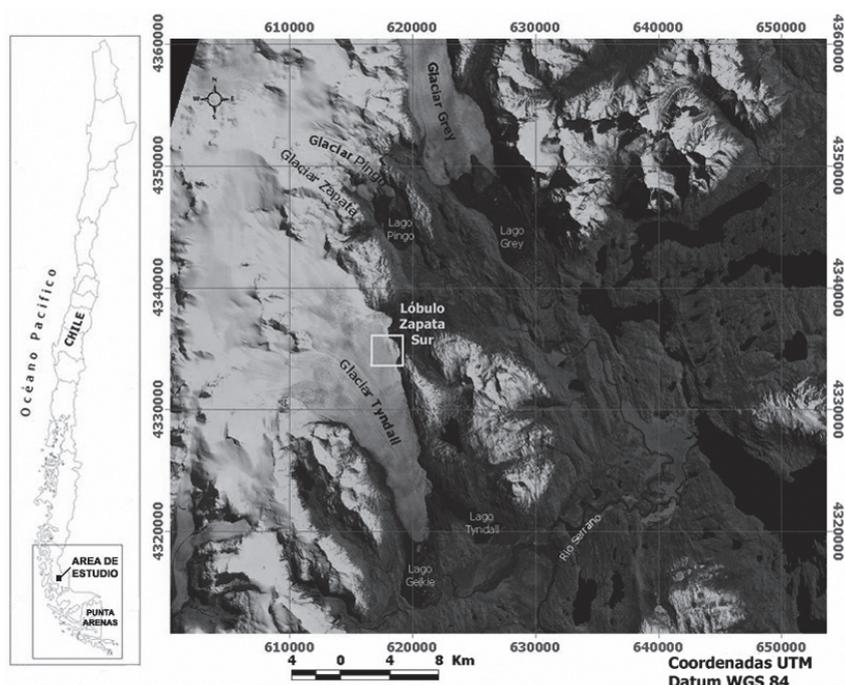
La topografía superficial del lóbulo Zapata Sur es de carácter plano, su elevación es cercana a los 700 m.s.n.m y difluye hacia el oriente (Godoi *et al.*, 2003). Este sector

del glaciar ha manifestado un claro retroceso durante los últimos 50 años, llegando a generar un pequeño lago lateral. Mediante una comparación de la posición de su margen en el año 2003 con cartografía regular del Instituto Geográfico Militar (I.G.M), basada en las fotografías aéreas de 1975, se detectó una pérdida de área de aproximadamente $1,3 \text{ km}^2$ (Godoi *et al.*, 2003).

Las primeras mediciones de espesor de hielo en el lóbulo Zapata Sur fueron realizadas en 1990 por Casassa (1992) en un perfil transversal al flujo del glaciar. Utilizando un sistema de radio eco-sondeo analógico estimó un espesor máximo en el rango de 586 - 616 metros, el máximo espesor se detectó aproximadamente a 3 km del margen del hielo. Posteriormente Casassa & Rivera (1998), reportaron mediciones realizadas en 1993, desarrolladas en la misma transecta de 1990, utilizando un sistema digital obtuvieron espesores entre 70 y 569 metros.

Figura N° 1

IMAGEN LANDSAT ETM PLUS DE NOVIEMBRE DE 1999. SE PUEDE APRECIAR PARTE DE LOS GLACIARES LOCALIZADOS EN EL PARQUE NACIONAL TORRES DEL PAINE Y EL ÁREA DE TRABAJO



Fuente: Elaboración propia.

Los primeros estudios acerca de las variaciones recientes del Lóbulo Zapata Sur del glaciar Tyndall fueron realizados por investigadores japoneses en la década de 1980. Estimaciones de adelgazamiento del hielo realizadas por Kadota *et al.* (1992) y Nishida *et al.* (1995), señalan pérdidas de masa del orden de 4 m a^{-1} entre 1985 y 1990 y $3,1 \text{ m a}^{-1}$ entre los años 1990 y 1993, respectivamente. Recientemente, Raymond *et al.* (2005) señalan una tasa de adelgazamiento de $3,6 \text{ m a}^{-1}$ entre los años 1993 y 2002.

Las características del flujo superficial del hielo fueron estudiadas por Naruse *et al.* (1987) quienes estimaron velocidades del orden de $36,5 \text{ m a}^{-1}$ ($0,1 \text{ m d}^{-1}$) cerca del margen del hielo y $693,5 \text{ m a}^{-1}$ ($1,9 \text{ m d}^{-1}$), en las inmediaciones de la morrena medial del glaciar. Kadota *et al.* (1992), indicaron velocidades del orden de $25,55 \text{ m a}^{-1}$ ($0,07 \text{ m d}^{-1}$) cerca del margen glaciar y $186,15 \text{ m a}^{-1}$ ($0,51 \text{ m d}^{-1}$) a $2,5 \text{ km}$ del margen. Recientes estimaciones de velocidad en la misma posición del transecto instalado por los japoneses en 1985 indican valores de $350 \text{ m a}^{-1} \pm 10 \text{ m}$ hacia el centro del glaciar (Raymond *et al.*, 2005).

Metodología

Datos GPS

En los meses de enero y noviembre del año 2003 se llevaron a cabo dos campañas de terreno en el lóbulo Zapata Sur. Entre los días 10 y el 24 de enero se georreferenciaron 70 mediciones puntuales en donde se utilizó un sistema de radio-eco sondeo (RES), de esta forma se obtuvieron cotas georreferenciadas tanto de la topografía superficial como del lecho rocoso bajo el glaciar. El Datum de referencia utilizado corresponde al WGS 84 y las coordenadas se expresaron en sistema UTM.

La posición de los puntos se midió utilizando un receptor GPS de calidad topográfica y frecuencia simple marca TRIMBLE modelo Geo-explorer II. La captura de datos en cada punto se realizó en modo estático, estimándose un error en la precisión de la posición del orden de 2 a 5 m, pues no se aplicó corrección diferencial en el posprocesamiento de los datos.

Entre los días 15 y 23 de noviembre se instalaron 8 balizas sobre un transecto de coordenadas conocidas (balizas instaladas por investigadores japoneses en 1985). Las balizas se posicionaron usando un receptor GPS topográfico marca JAVAD modelo Legacy. La captura de datos se realizó en modo estático, recopilando datos a intervalos de 5 segundos. Cada baliza fue medida por un período cercano a 30 minutos. Se utilizó como base un segundo receptor, de las mismas características, el que permaneció en funcionamiento en las cercanías del glaciar. Los datos fueron corregidos diferencialmente en posproceso, obteniéndose precisiones centimétricas para cada posición.

Entre los días 1 y 10 de mayo de 2004 se realizó una tercera visita al sector donde se volvió a georreferenciar parte de las balizas instaladas el año 2003. El posicionamiento de las balizas se realizó utilizando un receptor TRIMBLE Geoexplorer II, siguiendo el mismo procedimiento de enero de 2003.

Radio-eco sondeo

Las mediciones de espesor de hielo se realizaron sobre una red de 70 puntos, espaciados entre sí por aproximadamente 200 m. Estos puntos conformaban 9 perfiles distribuidos sobre el glaciar, que cubrían un área aproximada de $5,5 \text{ km}^2$ (Figura N° 2).

Se utilizó un sistema de radio-eco sondeo digital transportado a pie (en mochilas) por tres operadores. El sistema estaba compuesto por un transmisor o generador de impulsos conectado a una antena tipo dipolo, que envía un pulso o señal electromagnética hacia el interior del hielo, y un receptor que recoge los ecos de retorno provenientes del fondo rocoso.

El receptor consiste de una antena dipolo adaptada, vía balun, a un osciloscopio digital Tektronix modelo THS-720A. Se obtuvieron 256 muestras estáticas y se calculó su promedio aritmético para mejorar la relación de la señal a ruido, procesamiento que realizó el mismo osciloscopio. Las "trazas" resultantes fueron transferidas y almacenadas en tiempo real en un computador portátil de terreno.

Para obtener registros precisos del lecho subyacente se emplearon dos tipos de transmisor: Narod-Clarke (Narod & Clarke, 1994) con antenas de 8 metros de largo (frecuencia central de 6,25 MHz) y O.S.U. (Huffman, 1993) con antenas de 20 metros de largo (frecuencia central de 2,5 MHz). La mayor potencia del transmisor O.S.U. permitió recuperar una señal de retorno más clara, en particular para los rangos de espesor mayores.

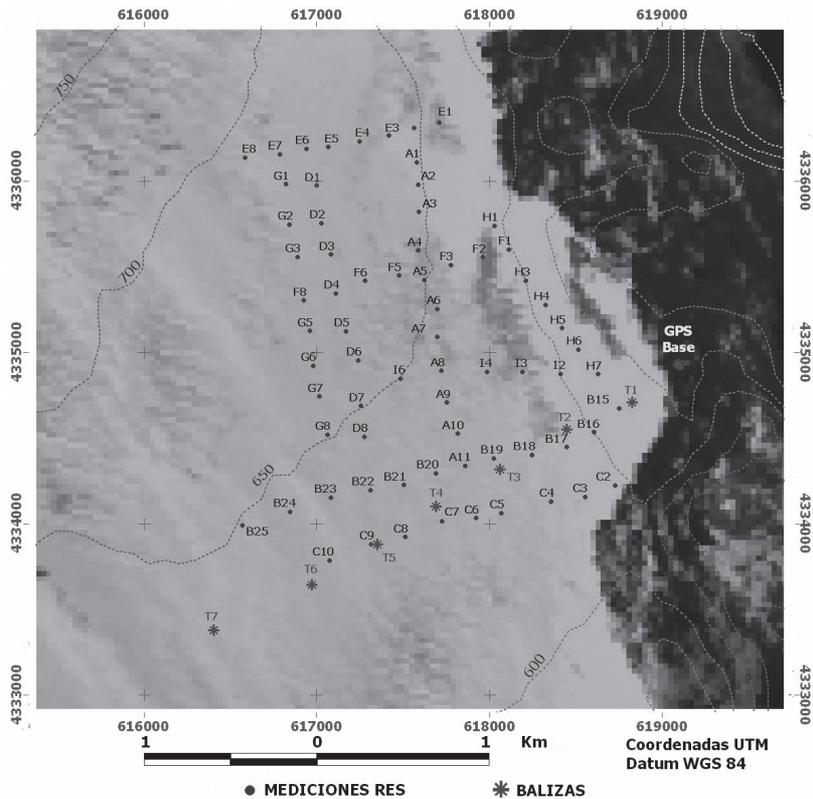
Caracterización de la topografía y dinámica del glaciar

Con el objeto de analizar las características de la topografía superficial y subglacial se elaboró un modelo digital de terre-

no. Las cotas de altura obtenidas mediante receptores GPS y el sistema RES fueron procesadas utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). El modelo del terreno se elaboró utilizando el algoritmo TIN (Triangulated Irregular Network), dicho modelo cubre un área aproximada de 4,4 km², abarcando la zona baja del lóbulo Zapata Sur.

La velocidad y orientación del flujo glaciar superficial se estimó llevando los datos GPS obtenidos en terreno a un SIG. Allí se desplegaron las posiciones iniciales (noviembre 2003) y finales (mayo 2004) de las balizas instaladas en terreno. La comparación de las posiciones permitió identificar la dinámica superficial del glaciar.

Figura N° 2
ZONA DE ABLACIÓN DEL GLACIAR TYNDALL, SE APRECIA EL ÁREA DE ESTUDIO COMPRENDIDA EN LAS CAMPAÑAS GLACIOLÓGICAS. LAS CURVAS DE NIVEL FUERON EXTRAÍDAS DEL MODELO SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION)



Fuente: Elaboración propia.

Resultados del trabajo en terreno

Topografía superficial y espesores de hielo

La topografía superficial del lóbulo Zapata Sur no presenta grandes accidentes en el terreno. De carácter más bien plano, este sector se caracteriza principalmente por la presencia de gran cantidad de grietas. No fue posible localizar con exactitud la posición actual de una divisoria superficial de aguas, esto debido a la desaparición de algunas de las balizas entre noviembre de 2003 y mayo de 2004.

La Figura N° 3 muestra los principales rasgos de la topografía bajo el glaciar. Es posible apreciar un umbral subglacial (Godoi *et al.*, 2003), que coincide aproximadamente con el perfil más cercano al margen del hielo (perfil H en Figura N° 2). Dicho umbral podría considerarse como una divisoria subglacial, que determina la cuenca del lóbulo que fluye hacia el este, terminando en un lago lateral.

Hacia el oeste la profundidad aumenta en forma aproximadamente hiperbólica. En

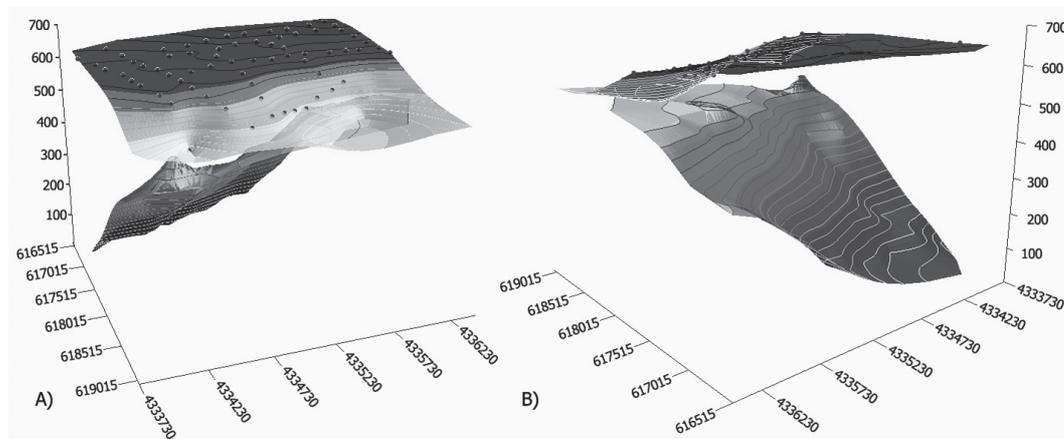
las inmediaciones del margen del lóbulo Zapata Sur el mínimo espesor de hielo detectado correspondió a 63 metros (F1 en Figura N° 2). En un sector localizado aproximadamente a 2,5 km del margen del hielo del año 2003 se detectó un espesor máximo de 617 metros (B25 en Figura N° 2), la cota de altura de este sector del lecho es de 22 m.s.n.m. El Cuadro N° 1 detalla los registros obtenidos en el área de estudio.

Adelgazamiento de marzo de 2002 a noviembre de 2003

La comparación de la elevación de la superficie del hielo en 5 mediciones puntuales (balizas) permitió estimar un valor de adelgazamiento promedio de 2,63 m para este periodo (Cuadro N° 2).

El adelgazamiento es mayor en la zona marginal del hielo. Hacia el centro del glaciar el adelgazamiento disminuye en casi un 50% (Figura N° 4). El mayor adelgazamiento se detectó en la baliza T1 y corresponde a 4,25 m. Hacia el centro del glaciar, en las balizas T2, T4 y T5, el adelgazamiento promedio corresponde a 2,4 m. Finalmente, en la baliza T6, aproximadamente a 2,4 km del margen E del glaciar, se presenta un adelgazamiento del orden de 1,69 m.

Figura N° 3
MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LA TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL Y SUBGLACIAL,
(A) VISTA DESDE EL SE, (B) VISTA DESDE EL NW. LA ELEVACIÓN ESTÁ EXPRESADA EN M.S.N.M
(METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR)



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 1
COTAS SUPERFICIALES, COTAS SUBGLACIALES Y ESPESORES DE HIELO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Punto	Cota Sup.	Cota Subgl.	Espesor	Punto	Cota Sup.	Cota Subgl.	Espesor
A1	637,0	493,7	143,3	D5	646,0	220,0	426,0
A2	638,0	493,0	145,0	D6	643,0	213,0	430,0
A3	637,0	461,7	175,3	D7	637,0	174,0	463,0
A4	635,0	442,9	192,1	D8	639,0	180,0	459,0
A5	636,0	407,0	229,0	E1	632,0	506,0	126,0
A6	637,0	408,8	228,2	E2	637,0	494,0	143,0
A7	638,0	361,7	276,3	E3	647,0	479,0	168,0
A8	639,0	327,6	311,4	E4	657,0	443,0	214,0
A9	632,0	301,3	330,7	E5	666,0	390,0	276,0
A10	627,0	284,2	342,8	E6	672,0	382,0	290,0
A11	622,0	251,0	371,0	E7	688,0	390,0	298,0
B15	552,0	469,0	83,0	E8	675,0	381,0	294,0
B16	592,0	454,5	137,5	F1	571,0	508,0	63,0
B17	613,0	437,7	175,3	F2	606,0	510,0	96,0
B18	617,0	340,9	276,1	F3	633,0	502,0	131,0
B19	620,0	286,8	333,2	F5	650,0	385,0	265,0
B20	632,0	223,2	408,8	F6	656,0	286,0	370,0
B21	630,0	142,2	487,8	F8	667,0	149,0	518,0
B22	627,0	135,9	491,1	G1	673,0	342,0	331,0
B23	635,0	118,7	516,3	G2	665,0	288,0	377,0
B24	634,0	85,0	549,0	G3	667,0	251,0	416,0
B25	639,0	22,0	617,0	G5	668,0	160,0	508,0
C2	509,0	400,0	109,0	G6	654,0	124,0	530,0
C3	614,0	497,0	117,0	G7	646,0	125,0	521,0
C4	618,0	385,0	233,0	G8	641,0	101,0	540,0
C5	623,0	337,0	286,0	H1	583,0	483,0	100,0
C6	624,0	261,0	363,0	H3	563,0	459,0	104,0
C7	628,0	210,0	418,0	H4	545,0	469,0	76,0
C8	630,0	145,0	485,0	H5	552,0	474,0	78,0
C9	628,0	117,0	511,0	H6	559,0	477,0	82,0
C10	634,0	46,0	588,0	H7	565,0	475,0	90,0
D1	666,0	354,0	312,0	I2	592,0	458,0	134,0
D2	660,0	304,0	356,0	I3	614,0	454,0	160,0
D3	655,0	250,0	405,0	I4	627,0	382,0	245,0
D4	649,0	213,0	436,0	I6	648,0	278,0	370,0

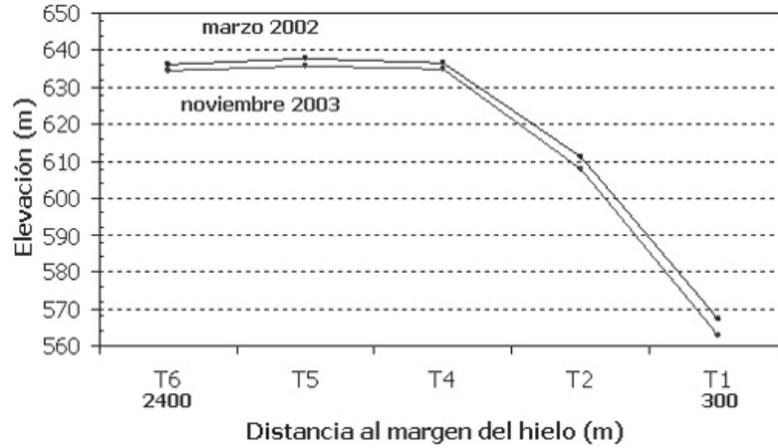
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 2
ALTURA DEL HIELO ENTRE MARZO DE 2002 Y NOVIEMBRE DE 2003

ID	ESTE	NORTE	Cota marzo 2002 (m)*	Cota noviembre 2003 (m)**	Diferencia (m)
T1	618.832,26	4.334.709,26	567,3	563,05	4,25
T2	618.449,53	4.334.551,72	611,0	608,00	3,00
T4	617.695,42	4.334.100,84	636,7	634,76	1,94
T5	617.355,02	4.333.882,46	637,8	635,55	2,25
T6	616.977,54	4.333.642,89	636,2	634,51	1,69

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Raymond *et al.*, 2005.

Figura N° 4
 ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL HIELO A LO LARGO DEL PERFIL SITUADO SOBRE EL LÓBULO ZAPATA SUR. LA DISTANCIA ENTRE T1 Y T6 CORRESPONDE APROXIMADAMENTE A 2,4 KM.



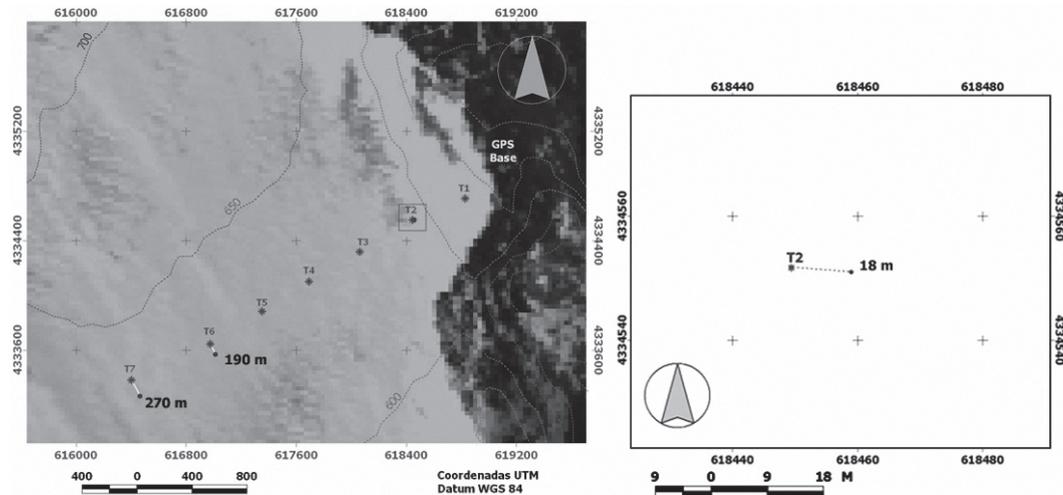
Fuente: Elaboración propia.

Velocidad del glaciar

Durante la campaña de los días 1 al 10 de mayo de 2004 solo se encontraron y midieron las balizas T2, T6 y T7. Se presume que las balizas restantes se desprendieron y cayeron a las grietas producto de la ablación del hielo.

La baliza T7, localizada aproximadamente a 3 km del margen del glaciar, muestra un desplazamiento de 134 m entre noviembre de 2003 y mayo de 2004. Para el mismo periodo de tiempo, las balizas T6 y T2 muestran un desplazamiento de 96 m y 9 m, respectivamente. Cabe destacar que la baliza T2 estaba localizada aproximada-

Figura N° 5
 DESPLAZAMIENTO DE LAS BALIZAS T2, T6 Y T7 ENTRE NOVIEMBRE DE 2003 Y MAYO DE 2004.



Fuente: Elaboración propia.

mente a 600 m del margen del glaciar (Figura N° 5).

Extrapolando los datos obtenidos a un periodo de 365 días, se estima que las tasas anuales de velocidad hacia el centro del glaciar podrían ser del orden de 270 m a^{-1} , mientras que cerca del margen del hielo la velocidad no debería superar los 18 m a^{-1} .

Las balizas T6 y T7 muestran un desplazamiento predominante hacia el SE. Por su parte, la baliza T2 se desplaza hacia el E. El flujo divergente del hielo cerca del margen de este sector del glaciar concuerda con la situación reportada por Kadota *et al.* (1992) y con la presencia del umbral subglacial sugerido por Godoi *et al.* (2003).

Discusión y conclusión

Los resultados presentados en este trabajo corresponden a mediciones directas sobre el terreno utilizando diferentes receptores GPS y distintos métodos de captura de datos. Hasta ahora dificultades técnicas y logísticas no han permitido la aplicación de una metodología estándar para la captura de datos en terreno. No obstante, se considera que la calidad de los datos obtenidos a la fecha es aceptable, y en términos generales estos han sido útiles para la caracterización de las variaciones recientes de este sector de la zona de ablación del glaciar Tyndall.

El análisis de los datos obtenidos a la fecha indica que el lóbulo Zapata Sur esta sujeto a un continuo proceso de adelgazamiento del hielo, además es posible estimar un aumento gradual en la velocidad del flujo superficial de esta sección del glaciar. Ambos procesos posiblemente han sido favorecidos por una tendencia al calentamiento atmosférico y la disminución de las temperaturas en el CHPS (Carrasco *et al.*, 2002). No obstante, es necesario considerar el efecto que ejercen sobre el clima, la latitud y en especial la topografía, que determina la existencia de un claro contraste climático en el sentido W-E (Aniya, 1999).

Recientes investigaciones desarrolladas por Raymond *et al.* (2005) y Rivera & Casassa (2004) sugieren que el calentamiento atmosférico detectado en la región no ha sido lo sufi-

cientemente extenso para explicar las altas tasas de adelgazamiento en las zonas de ablación de algunos glaciares del CHPS. Considerando este escenario, la implementación de un plan de monitoreo glaciológico sistemático del lóbulo Zapata Sur, representa una excelente oportunidad para estimar las variables que ejercen mayor influencia en las variaciones recientes de esta sección del glaciar.

El proceso de adelgazamiento del hielo en el lóbulo Zapata Sur del glaciar Tyndall sería de carácter continuo y más pronunciado hacia el margen del hielo. El proceso de pérdida de masa, asociado al flujo divergente del hielo y las características de la topografía subglacial, eventualmente generaría una situación de inestabilidad que podría traducirse en la pérdida de una parte o una sección importante del volumen de hielo.

Las variaciones recientes que han operado en esta sección de la zona de ablación del glaciar Tyndall podrían ser el resultado del calentamiento atmosférico y la reducción de las precipitaciones que han afectado a la región de la Patagonia durante el último siglo. Sin embargo, es necesario el desarrollo de estudios sistemáticos en terreno orientados a estimar el balance de masa, energía e hidrológico del glaciar, además de la aplicación de métodos indirectos para el estudio de las variaciones glaciares recientes, con objeto de determinar cuáles son los factores preponderantes sobre los cambios que presenta este sector del glaciar.

Referencias Bibliográficas

ANIYA, M. Holocene glacial chronology in Patagonia: Tyndall and Upsala glaciers. *Arctic and Alpine Research*, 1995, Vol. 27, N° 4, p. 311-322.

ANIYA, M. Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, south America, and their contribution to sea-level change. *Arctic and Alpine Research*, 1999, Vol. 31, N° 2, p. 165-173.

CARVALLO, R. Comportamiento electromagnético del hielo temperado del glaciar Tyndall obtenido a partir de los datos de radar. *Revista Austro Ingeniería*, 2005, Vol. 9, N° 1, p. 5-11.

- CARRASCO, J.; CASASSA, G. & RIVERA, A. Meteorological and climatological aspects of the Southern Patagonian Ice Fields. In CASASSA, G.; SEPÚLVEDA, F. & SINCLAIR, R. *The Patagonian Ice Fields, a unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002, p. 29-41.
- CASASSA, G. Radio-echo sounding of Tyndall glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 1992, N° 10, p. 69-74.
- CASASSA, G & RIVERA, A. Digital radio-echo sounding at Tyndall glacier, Patagonia. *Anales Instituto Patagonia*, 1998, N° 26, p. 129-135.
- GODOI, M.; CARVALLO, R. y ARÉVALO, M. Condición actual del lóbulo Zapata Sur, en la zona de ablación del glaciar Tyndall, mediante radio-ecosondeo sobre la superficie del glaciar. *Anales Instituto Patagonia*, 2003, N° 31, p. 5-15.
- HUFFMAN, F. *Marx generator for high frequency ice radar system. Technical Report*. Columbus: Geological Sciences Dept. - The Ohio State University, 1993.
- KADOTA, T.; NARUSE, R.; SKVARKA, P. & ANIYA, M. Ice flow and structure of Tyndall glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 1992, N° 10, p. 63-68.
- NAROD, B. & CLARKE, C. Miniature high power impulse transmitter for radio-echo sounding. *Journal of Glaciology*, 1994, Vol. 134, N° 40, p. 190-194.
- NARUSE, R.; PEÑA, H.; ANIYA, M. & INOUE, J. Flow and structure of Tyndall glacier, the Southern Patagonian Ice Field. *Bulletin of Glacier Research*, 1987, N° 4, p. 133-140.
- NISHIDA, K.; SATOW, K.; ANIYA, M.; CASASSA, G. & KADOTA, T. Thickness change and flow of Tyndall glacier, Patagonia. *Bulletin of Glaciological research*, 1995, N° 13, p. 29-34.
- RAYMOND, C.; NEUMANN, T.; RIGNOT, E.; ECHELMAYER, K.; RIVERA, A. & CASASSA, G. Retreat of glaciar Tyndall, Patagonia, over the last half-century. *Journal of Glaciology*, 2005, Vol. 51, N° 173, p. 239-247.
- RIVERA, A.; ACUÑA, C.; CASASSA, G. & BOWN, F. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 2002, N° 34, p. 367-372.
- RIVERA, A. & CASASSA, G. Ice Elevation, Areal and frontal changes of glaciers from national park Torres del Paine, Southern Patagonia Ice Field. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 2004, Vol. 36, N° 4, p. 379-789.
- ROSEMBLÜTH, B; CASASSA, G. & FUENZALIDA, H. Recent climate change in western Patagonia. *Bulletin of Glaciological Research*, 1995, N° 13, p.127-132.
- ROSEMBLÜTH, B; FUENZALIDA, H. & ACEITUNO, P. Recent temperature variations in southern south America. *International Journal of Climatology*, 1997, Vol. 1, N° 17, p. 67-85.
- WARREN, C. & SUDGEN, D. The Patagonian Icefields: a glaciological review. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 1993, Vol. 4, N° 25, p. 316-331.