

CONDICIÓN ACTUAL DEL LÓBULO ZAPATA SUR,
EN LA ZONA DE ABLACIÓN DEL GLACIAR TYNDALL,
MEDIANTE RADIO-ECOSONDEO SOBRE LA SUPERFICIE GLACIAR.

CURRENT STATE OF THE SOUTHERN ZAPATALOBE,
IN THE ABLATION ZONE OF TYNDALL GLACIER,
BY USING ICE PENETRATING RADIO-ECHO SOUNDING ON THE GLACIER SURFACE

María Angélica Godoi^{2,4}, Rubén Carvallo^{3,4} & Marcelo Arévalo^{1,4}

RESUMEN

Existe clara evidencia de que el glaciar Tyndall, efluente del Campo de Hielo Patagónico Sur, ha estado perdiendo su masa glaciar continuamente en las últimas décadas. Este trabajo presenta estudios glaciológicos preliminares en un pequeño lóbulo glaciar que fluye hacia el este en la zona de ablación del glaciar Tyndall, aproximadamente a 16 km de su frente. Mediante radio-ecosondeo sobre la superficie y posicionamiento satelital, se ha construido un modelo digital de terreno del sector en estudio y se ha delimitado el borde actual del hielo. Por comparación con la cartografía vigente, se ha encontrado que en este sector ha desaparecido un área aproximada de 1,3 km² de hielo entre 1975 y 2003. El modelo 3D permite identificar el umbral de difluencia glaciaria que limita la cuenca del lóbulo que fluye hacia el este. De continuar la actual tendencia climática regional, este pequeño lóbulo desaparecerá en un período no lejano, estimándose que el volumen de hielo que se perderá está entre 35 y 70 millones de m³.

Palabras clave: Campo de Hielo Patagónico Sur, Glaciar Tyndall, RES, hielo temperado

ABSTRACT

There is compelling evidence showing that the Tyndall glacier, an effluent of the Southern Patagonia Icefield, has been shrinking continuously during the last decades. This work presents preliminary glaciological studies on a small glacial lobe flowing East from the ablation zone of the Tyndall glacier, at about 16 km from the frontal snout. By using surface-based radio-echo sounding and GPS, a DTM of the area of interest has been developed and the current ice border determined. Comparison of results with the existing cartography shows an ice loss of about 1.3 km², between 1975

1 Dirección de Programas Antárticos, Universidad de Magallanes, Casilla 113-D, Punta Arenas, Chile.

2 Instituto de la Patagonia, Universidad de Magallanes

3 Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Magallanes.

4 Centro de Estudios del Cuaternario (CEQUA), Casilla 113-D, Punta Arenas, Chile.

and 2003. The 3D model allows identification of the subglacial divide, setting the boundary of the lobe basin. Provided a continuous warming in the regional climate, this small lobe will disappear in a short period of time. In that case, the ice loss is estimated to be between 35 and 70 million of cubic meters.

Key words: Southern Patagonia Icefield, Tyndall glacier, RES, temperate ice.

INTRODUCCIÓN

Las características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) han sido descritas en varios trabajos (Aniya *et al.* 1997, Aniya 1999, Casassa *et al.* 2000, Rivera *et al.* 2000). Esta masa de hielo se extiende por 350 km, a lo largo de los Andes meridionales, entre las latitudes 48° 20' S y 51° 30' S, y tiene una superficie total aproximada de 13.000 km². Su gran extensión y carácter temperado (hielo al punto de fusión), hacen que las fluctuaciones de sus glaciares sean de relevancia en los estudios de cambio climático y variaciones del nivel del mar.

El glaciar Tyndall es efluente mayor del CHPS y se ubica en su extremo sur oriental (Fig. 1). Cubre un área de 331 km² y fluye hacia el sur a lo largo de 32 km (Casassa *et al.* 2000), terminando en el lago Geikie dentro del Parque Nacional Torres del Paine. En su margen este y aproximadamente 16 km glaciar arriba desde el frente, se ubica una estribación lateral que denominamos lóbulo Zapata Sur (nombre no oficial). La elevación de este pequeño lóbulo que difluye hacia el oriente es cercana a los 700 m s.n.m. (Figs. 1 y 2), y su borde ha estado retrocediendo claramente durante los últimos años, originando un pequeño lago proglaciar.

Las primeras mediciones de espesor de hielo en este sector fueron realizadas en 1990 por Casassa (1992), en un perfil transversal al flujo del glaciar y utilizando un sistema de radio-ecosondeo analógico. Casassa (1992) estimó un espesor máximo en el rango de 582-616 m, aproximadamente a 3 km del margen. Casassa & Rivera (1998), reportaron mediciones realizadas en 1993 usando un sistema digital, con el que obtuvieron espesores de entre 70 y 569 m para la misma transecta.

Otros estudios anteriores en este sector se enfocaron en la medición de velocidad de flujo superficial y elevación superficial a lo largo del mismo perfil transversal (Kadota *et al.* 1992; Nishida *et al.* 1995). Basados en la variación de

elevaciones superficiales, Nishida *et al.* (1995) detectaron un adelgazamiento promedio de 3,1 m/a entre 1990 y 1993, y Kadota *et al.* (1992) un adelgazamiento promedio de 4,0 m/a entre 1985 y 1990. Estos autores también destacaron que aproximadamente a 600 m del margen oriental la dirección del flujo cambia, de sur (en el tramo central del glaciar Tyndall) a este (en el lado oriental), identificando así la divisoria superficial que delimita la pequeña cuenca del lóbulo Zapata Sur.

Este trabajo presenta los resultados de estudios preliminares en el lóbulo Zapata Sur del glaciar Tyndall, con el objeto de caracterizar la condición glaciológica actual del sector y comenzar un monitoreo continuo que contribuya al entendimiento de los procesos involucrados en la desintegración de glaciares temperados, producto de cambios climáticos en conjunto con efectos dinámicos del hielo. Se realizaron mediciones de espesor de hielo mediante radio-ecosondeo y posicionamiento del borde actual del glaciar mediante GPS diferencial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Radio-ecosondeo

Las mediciones de espesor de hielo se realizaron en forma puntual sobre la superficie del glaciar, utilizando un sistema de radio-ecosondeo digital transportado a pie (en mochilas) por tres operadores. El sistema está conformado 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.

Teóricamente, la frecuencia (f en MHz) del pulso emitido queda determinada por la longitud del dipolo ($2L$, en metros), y está dada por la relación aproximada:

$$f = 52 / L$$

en donde L es el largo de un medio dipolo (en metros).

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

Se emplearon antenas de $L=8$ metros (frecuencia central de 6,5 MHz) en conjunto con un transmisor tipo Narod-Clarke (Narod & Clarke, 1994), lográndose buenos resultados para la mayoría de los puntos medidos. En ocasiones en las que, con este sistema, se dificultó la identificación del eco de retorno, se utilizaron antenas de 20 metros (frecuencia central de 2,6 MHz) en conjunto con un transmisor del tipo O.S.U. (Huffman 1993). La mayor potencia del transmisor O.S.U. (51.1 kW), comparado con la del transmisor Narod-Clarke (24,2 kW) permiten recuperar una señal de retorno más clara, en particular para los rangos de espesor mayores.

En cada punto se realizaron 2 mediciones, una con las antenas paralelas a las paredes del valle y otra con las antenas en forma transversal a éste. Con esto se logra una polarización paralela o perpendicular respecto del plano de incidencia, lo que permite superar problemas de retorno débil en aquellos casos en que las pendientes subglaciares son pronunciadas. La figura 3 muestra un oscilograma de referencia, registrado directamente en la memoria del osciloscopio, correspondiente al punto B25 (Fig. 4). En éste se observa claramente la señal de retorno, ubicada a 7,28 seg. de la señal aérea usada para sincronismo. El efecto de la polarización de las antenas y otras propiedades eléctricas del hielo que afectan la calidad de la señal de retorno también son materia de investigación.

Las señales capturadas e interpretadas se encuentran en el dominio del tiempo por lo que, si se conoce la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el hielo, pueden ser convertidas directamente a distancias o espesores para cada punto, aplicando la relación:

$$z = \sqrt{\left(\frac{v_{hielo} \left(t + \frac{D}{c_0} \right)}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2} \quad [\text{metros}]$$

en donde:

z es el espesor del hielo

v_{hielo} es la velocidad de propagación que corresponde a 168 m/seg.

D es la separación entre los centros geométricos de las antenas, según se use una disposición en paralelo o colineal.

T es el tiempo medido entre la llegada de la señal aérea y la señal de retorno (s).

c_0 es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente 300m/s).

Posicionamiento y referencia cartográfica

El posicionamiento de los puntos de medición sobre la superficie glaciar se realizó mediante un solo receptor GPS Trimble modelo Geo-Explorer II. Se trabajó en modo estático, y las lecturas se hicieron en coordenadas UTM, Datum WGS-84. Los puntos que delimitan el borde actual del lóbulo glaciar en estudio se posicionaron mediante GPS diferencial estático utilizando dos equipos Geo-Explorer II, de frecuencia simple (L1) y registro de portadora (fase), uno instalado como base fija y otro como móvil, con líneas bases inferiores a 3 km. Para esto se posicionaron 14 puntos sobre un recorrido de aproximadamente 1,5 km. Para la corrección de altitud se tomó como referencia el nivel del mar a orillas del seno Última Esperanza, Puerto Natales.

Como referencia para la variación del borde glaciar, se utilizó la carta "Río Serrano", escala 1:100.000, del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM), correspondiente a un levantamiento aerofotogramétrico del año 1975. Para ello, los datos de terreno fueron transformados a coordenadas UTM datum SAD 69.

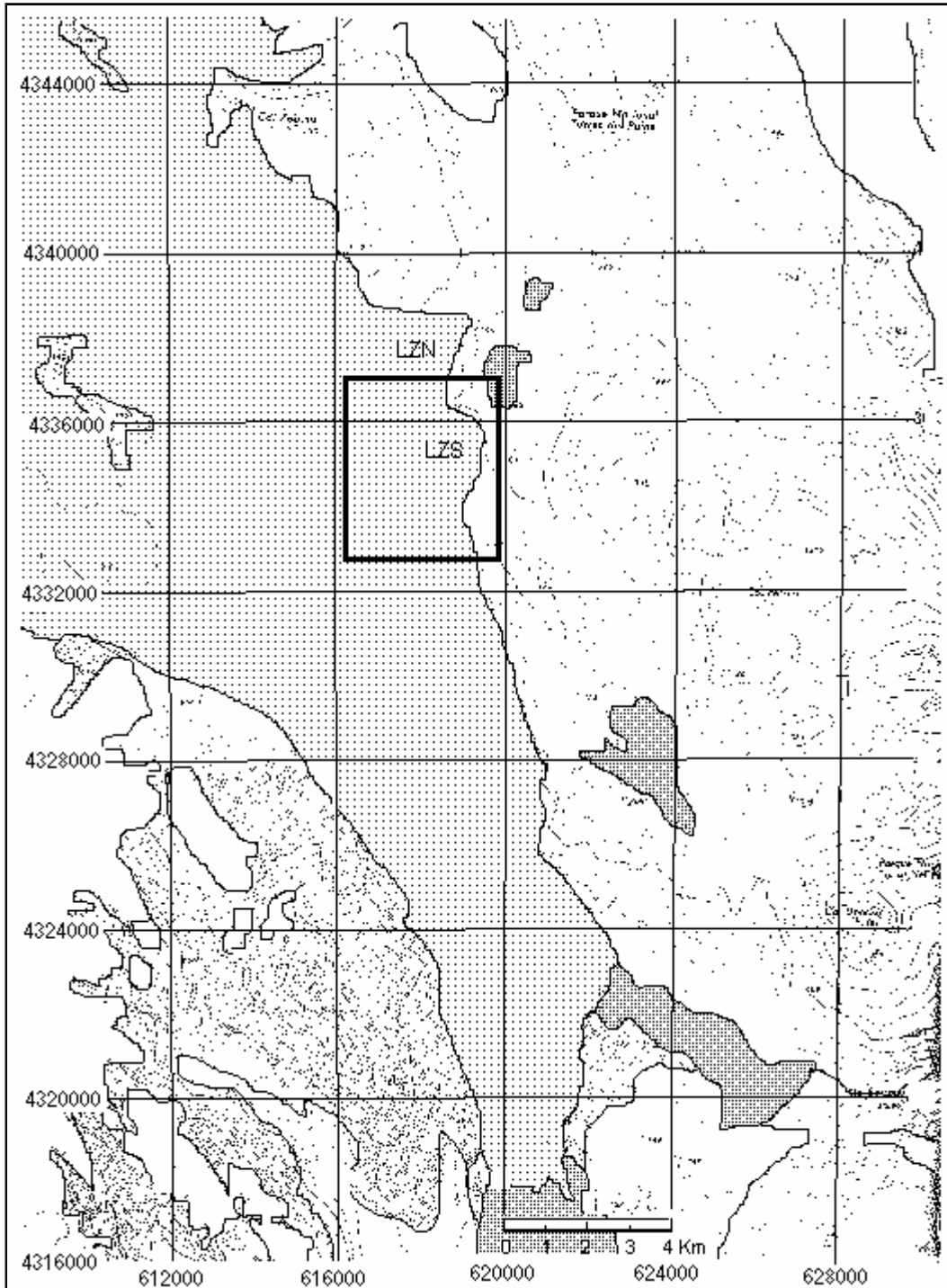


Fig. 1.- El recuadro muestra el área de estudio (LZS: lóbulo Zapata Sur) en la zona de ablación del glaciar Tyndall, Campo de Hielo Patagónico Sur. LZN es el lóbulo Zapata Norte.

Base cartográfica carta IGM "Río Serrano" de 1975 a escala 1:100.000



Fig. 2.- Fotografía de Enero de 2003 del lóbulo Zapata Sur del Glaciar Tyndall, tomada desde su borde nororiental.

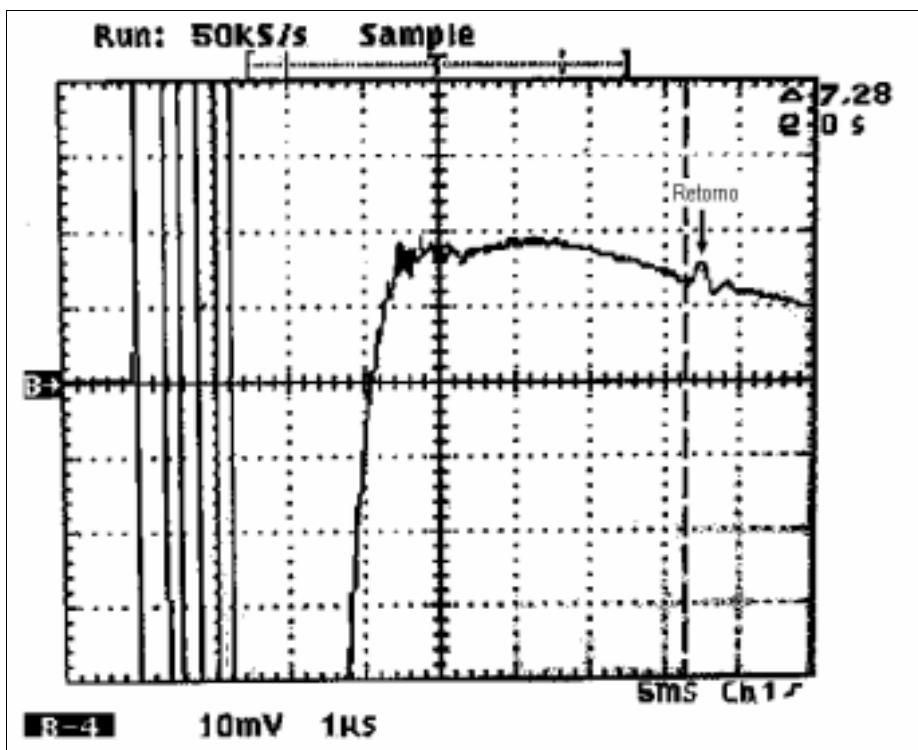


Fig. 3.- Oscilograma capturado en el punto B25 (Fig. 4) que muestra la señal de retorno a 7,28 microsegundos desde la llegada del pulso aéreo resultando en un espesor de hielo de 617 metros. Cada división vertical corresponde a 10 mV y cada división horizontal equivale a 1 μ seg.

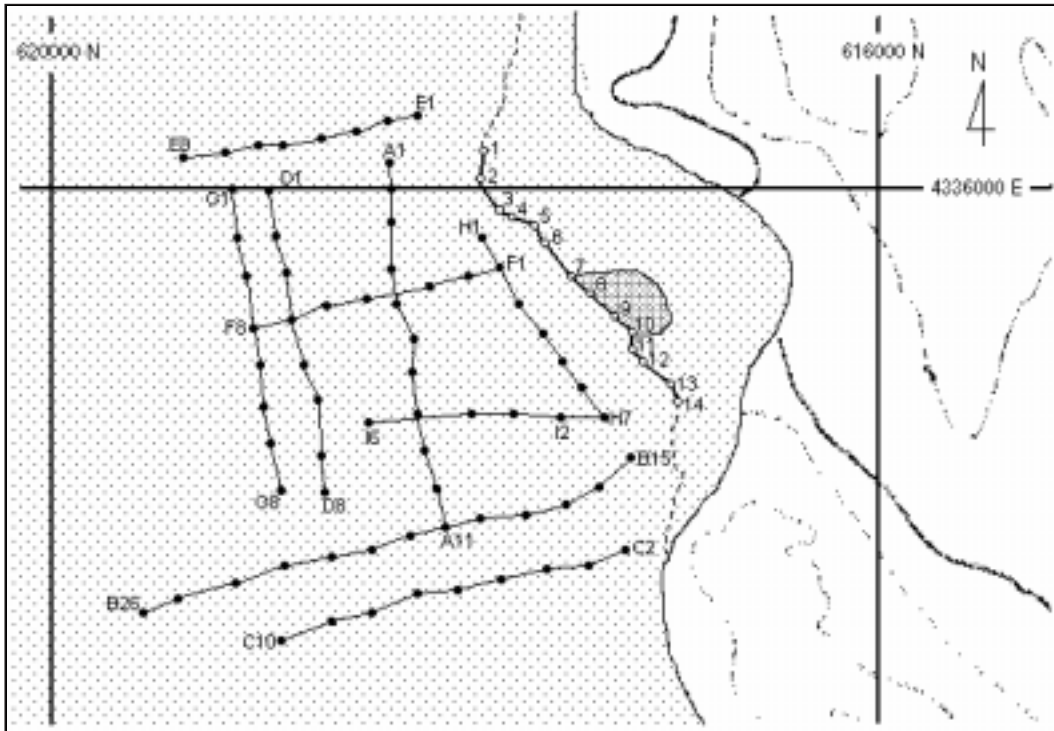


Fig. 4.- Transectas de radio-eco sondeo sobre la superficie glaciar en el lóbulo Zapata Sur. La línea numerada 1-14 indica el margen actual del lóbulo glaciar.

Base cartográfica carta IGM "Río Serrano" de 1975, escala 1:100.000. Coordenadas UTM expresadas en metros.

RESULTADOS

Para caracterizar la condición actual del denominado lóbulo Zapata Sur se realizaron mediciones de espesor de hielo en 70 puntos, con un espaciado promedio de 200 m, cubriendo el área del pequeño lóbulo glaciar. Estos puntos corresponden al recorrido sobre 9 perfiles, distribuidos según se indica en la figura 4. Los espesores medidos oscilaron entre un mínimo de 63 m en el punto F1 y un máximo de 617 m en el punto B25, uno de los puntos ubicados en el margen oeste del área en estudio. Los resultados se entregan en la Tabla 1 y los perfiles de elevación y espesor se muestran en las figuras 5a y 5b.

Los datos superficiales medidos y las cotas subglaciares calculadas a partir de los espesores fueron procesados con programas de diseño asistido, obteniéndose un modelo digital de terreno (MDT) 3D de la zona en estudio (Fig. 6). Las curvas de nivel superficial y de cota

subglaciar se muestran en las figuras 7 y 8 respectivamente, con un intervalo de 25 metros.

El análisis e interpretación del modelo 3D permite apreciar un umbral subglaciar que coincide aproximadamente con el perfil H. Esta divisoria determinaría la cuenca del lóbulo que fluye hacia el Este terminando en un lago proglaciar. Hacia el oeste la profundidad aumenta en forma aproximadamente hiperbólica, encontrándose que bajo el punto B25 la cota subglaciar se encuentra a 22 m s.n.m. muy cercana al nivel del mar.

El borde actual del hielo en el lóbulo Zapata Sur se compara, en la figura 4, con el de la cartografía IGM basada en fotos aéreas de 1975. Se estima que el claro retroceso evidenciado en este período corresponde a una pérdida de área de aproximadamente 1,3 km². De continuar la ablación, este pequeño lóbulo desaparecerá en un período no lejano, estimándose que el volumen de hielo que se perderá está entre 35 y 70 millones de m³.

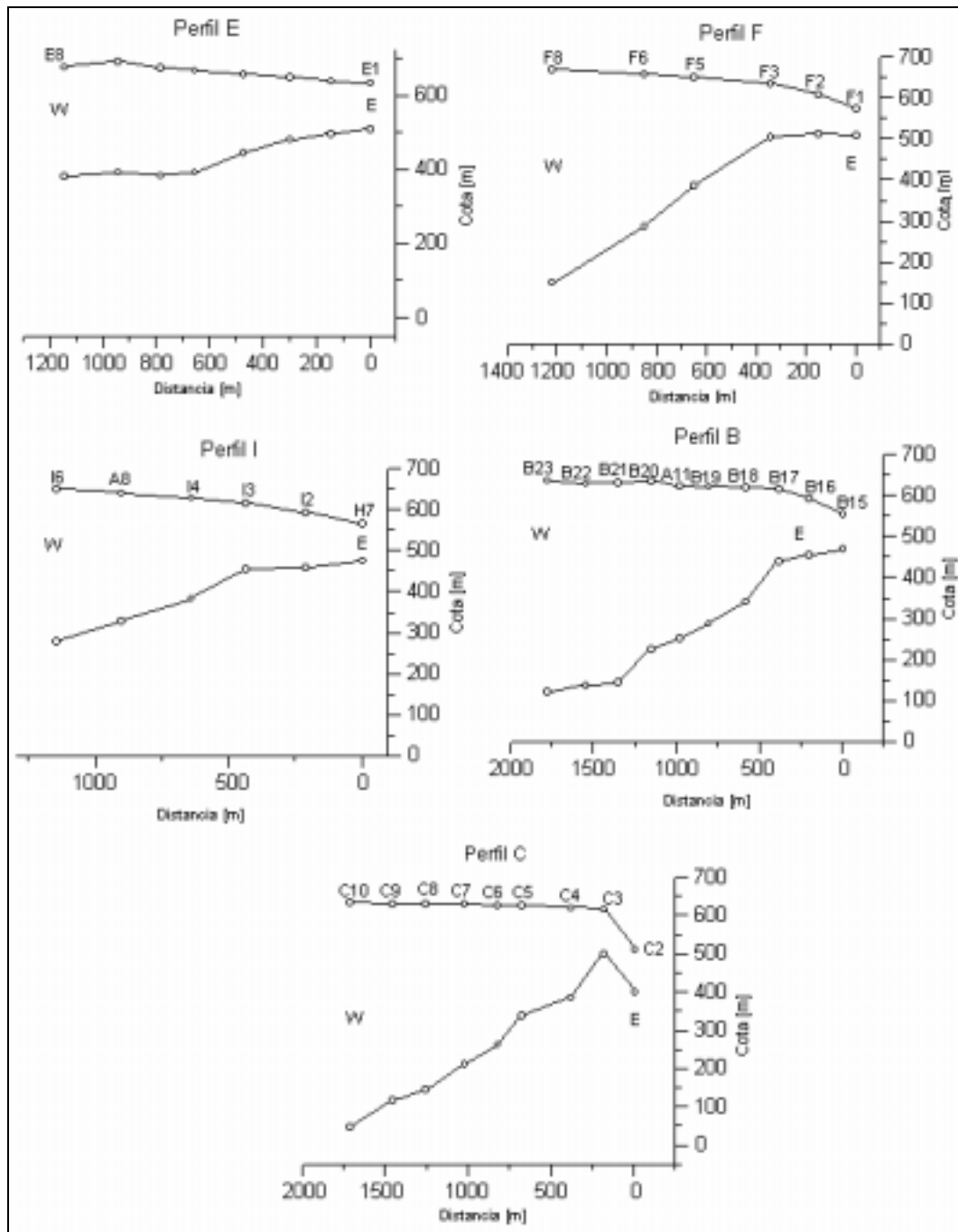


Fig. 5a.- Perfiles transversales al flujo del glaciar Tyndall, ubicados según la figura 4.

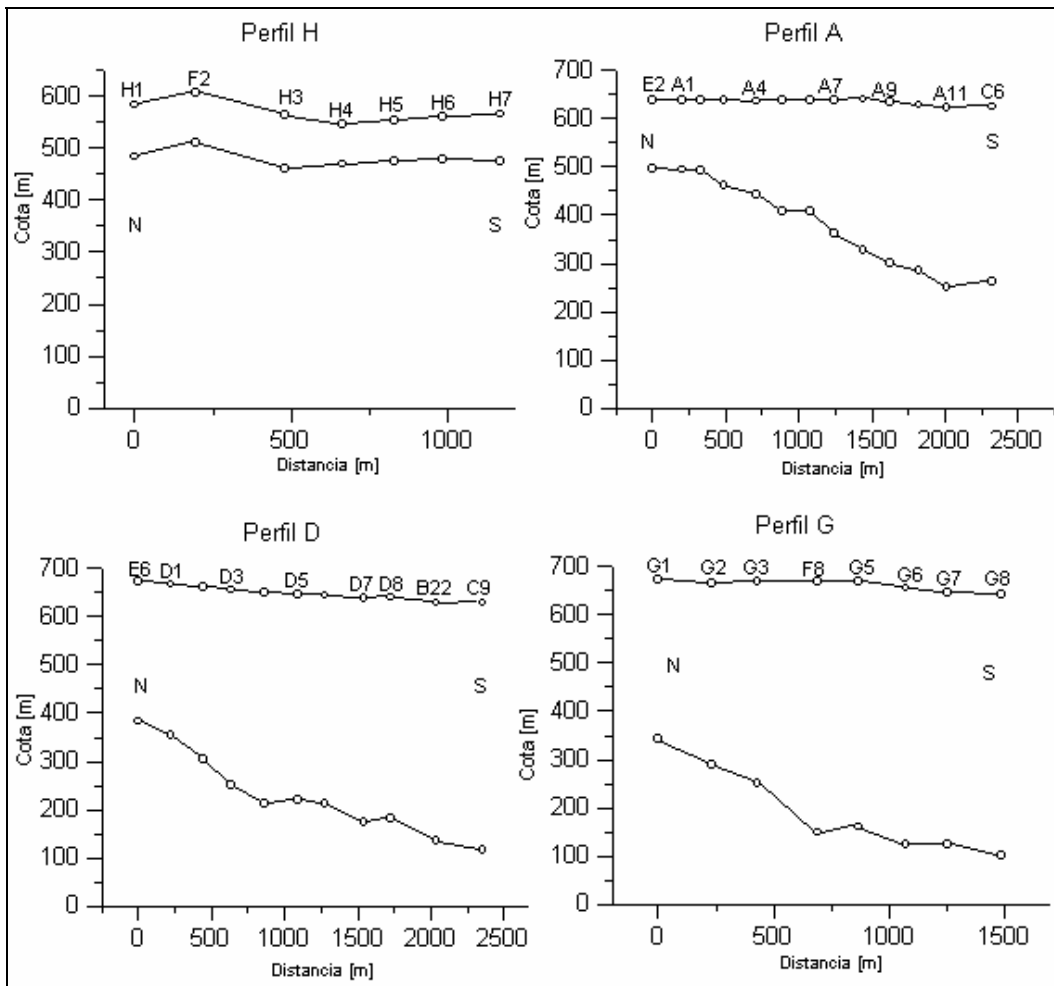


Fig. 5b.- Perfiles paralelos al flujo del Glaciar Tyndall, ubicados según la figura 4.

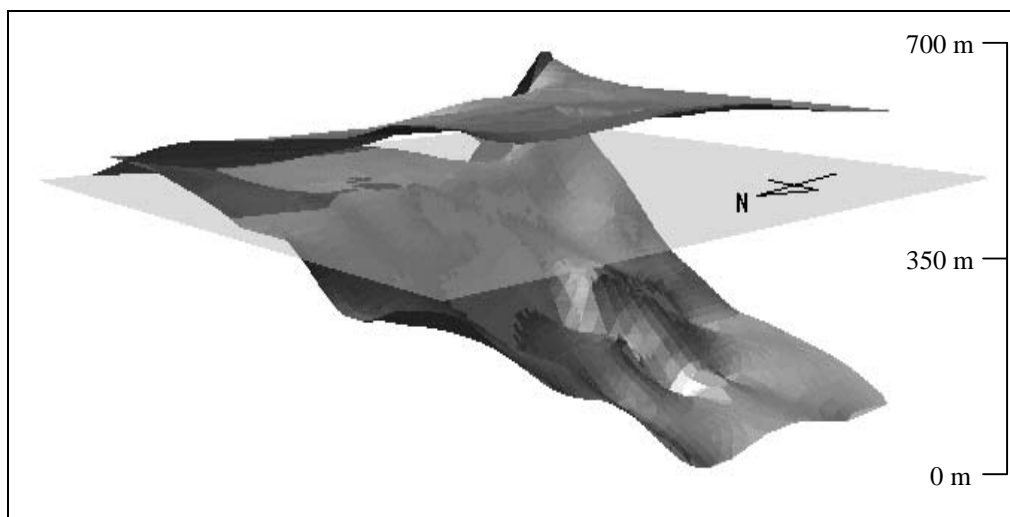


Fig. 6.- Imagen 3D de la topografía superficial y subglaciar del área de estudio.

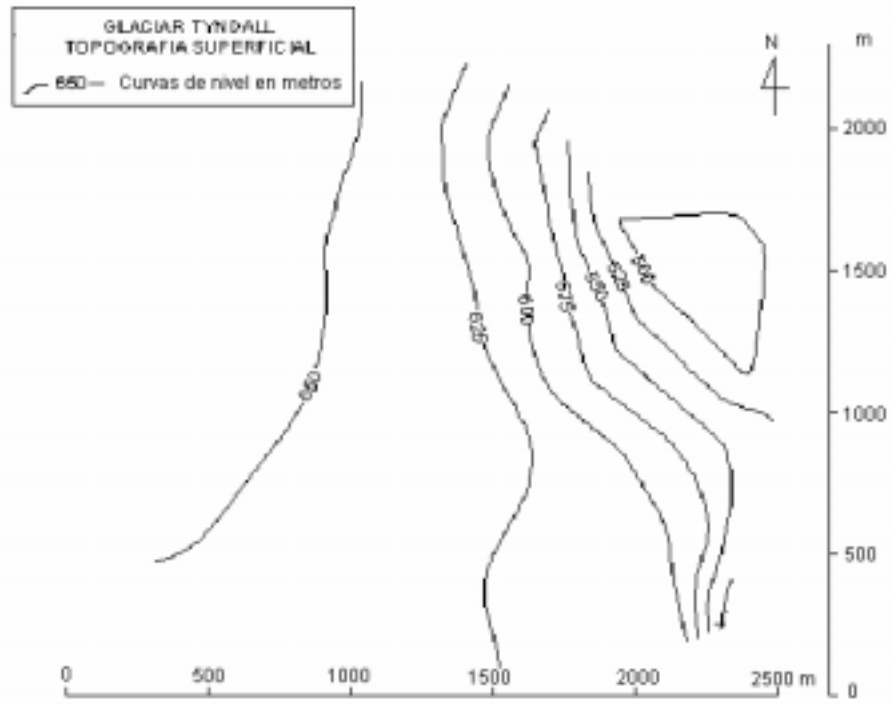


Fig. 7.- Cotas superficiales medidas con GPS topográfico.

GLACIAR TYNDALL
TOPOGRAFIA SUBGLACIAL

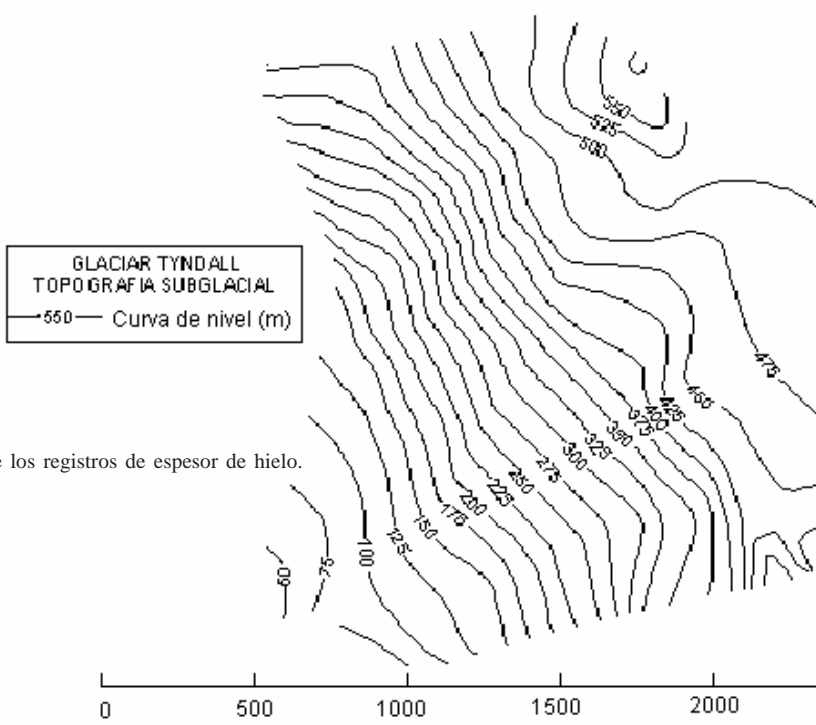


Fig. 8.- Curvas subglaciares determinadas a partir de los registros de espesor de hielo.

TABLA 1.- Cotas superficiales, resultados de los cálculos de espesor y cotas subglaciares obtenidas a partir de los datos de radio-ecosondeo.

Punto	Cota Sup. (m)	Espesor (m)	Cota Subgl. (m)	Punto	Cota Sup. (m)	Espesor (m)	Cota Subgl. (m)
A1	637	143	494	D5	646	426	220
A2	638	145	493	D6	643	430	213
A3	637	175	462	D7	637	463	174
A4	635	192	443	D8	639	459	180
A5	636	229	407	E1	632	126	506
A6	637	228	409	E2	637	143	494
A7	638	276	362	E3	647	168	479
A8	639	311	328	E4	657	214	443
A9	632	331	301	E5	666	276	390
A10	627	343	284	E6	672	290	382
A11	622	371	251	E7	688	298	390
B15	552	83	469	E8	675	294	381
B16	592	138	455	F1	571	63	508
B17	613	175	438	F2	606	96	510
B18	617	276	341	F3	633	131	502
B19	620	333	287	F5	650	265	385
B20	632	409	223	F6	656	370	286
B21	630	488	142	F8	667	518	149
B22	627	491	136	G1	673	331	342
B23	635	516	119	G2	665	377	288
B24	634	549	85	G3	667	416	251
B25	639	617	22	G5	668	508	160
C2	509	109	400	G6	654	530	124
C3	614	117	497	G7	646	521	125
C4	618	233	385	G8	641	540	101
C5	623	286	337	H1	583	100	483
C6	624	363	261	H3	563	104	459
C7	628	418	210	H4	545	76	469
C8	630	485	145	H5	552	78	474
C9	628	511	117	H6	559	82	477
C10	634	588	46	H7	565	90	475
D1	666	312	354	I2	592	134	458
D2	660	356	304	I3	614	160	454
D3	655	405	250	I4	627	245	382
D4	649	436	213	I6	648	370	278

CONCLUSIONES

Un modelo digital de terreno, generado con los resultados del radio-ecosondeo llevados a cabo sobre una grilla de 70 puntos en enero de 2003 en el lóbulo Zapata Sur, zona de ablación del glaciar Tyndall, aproximadamente a 16 km del frente glaciar y a una elevación próxima a los 700 m s.n.m, ha permitido establecer el umbral subglaciar que lo separa del flujo natural, hacia el sur del glaciar Tyndall.

Existe evidencia de que el área total del glaciar Tyndall se ha reducido continuamente desde 1975 (Rivera & Casassa in prep)¹ y se han reportado adelgazamientos del orden de 3 y 4 m por año (Nishida *et al.* 1995, Kadota *et al.* 1992). Esto ha provocado que el lóbulo Zapata Sur experimente un continuo retroceso, originando un pequeño lago proglaciar, lo que podría acelerar su retroceso por desprendimiento de témpanos. La comparación del borde actual con la cartografía IGM basada en fotos aéreas de 1975, permite establecer que el área hasta ahora perdida en este sector corresponde a aproximadamente 1,3 km² (Fig. 4).

Si las condiciones ambientales evolucionan como hasta ahora, se espera que el hielo que en este sector aún fluye hacia el este desaparezca en un período no lejano, descubriendo el relieve subglaciar presentado en el MDT (Fig. 6). De ser así, se presentaría una oportunidad única para evaluar la exactitud del método de medición de espesor de hielo mediante radio-ecosondeo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo logístico brindado por la V División de Ejército y las facilidades otorgadas por la Corporación Nacional Forestal dentro del Parque Nacional Torres del Paine. En particular se agradece al Cabo Primero Sr. John Emmott Silva por su colaboración en actividades de terreno, y a los geógrafos Sres. José Araos y Daniel Antúnez por su ayuda en el procesamiento de los datos de terreno. Estas actividades de terreno fueron cofinanciadas por el Centro de Estudios del Cuaternario

(CEQUA), la Universidad de Magallanes y la V División de Ejército de Chile.

LITERATURA CITADA

- Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P. Skvarca & G. Casassa 1997. Recent 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 and Alpine Research*, 31(2): 165-173.
- Casassa, G., A. Rivera, M. Aniya & R. Naruse 2000. Características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur. *Anales Inst. Patagonia*, Serie Cs. Nat. (Chile) 28: 5-22.
- Casassa, G., & A. Rivera 1998. Digital radio-echo sounding at Tyndall glacier, Patagonia. *Anales Inst. Patagonia*, Serie Cs. Nat. (Chile) 26: 129-135.
- Casassa, G. 1992. Radio-echo sounding of Tyndall glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research* 10, Japanese Society of Snow and Ice: 39-44.
- Huffman, F. E. 1993. "Marx Generator for Ice Frequency Ice Radar System". Geological Sciences Dept. The Ohio State University, Columbus OH USA.
- Kadota, T., R. Naruse, P. Skvarca, & M. Aniya. 1992. Ice flow and surface lowering of Tyndall glacier, Southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research* 10: 63-68.
- Narod, B.B. & G.K.C. Clarke 1994. Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding. *Journal of Glaciology* 40 (134):190-194.
- Nishida, K., K. Satow, M. Aniya, G. Casassa & T. Kadota 1995. Thickness change and flow of Tyndall glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research* 13: 29-34.
- Rivera, A., G. Casassa, C. Acuña & H. Lange 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista Investigaciones Geográficas* 34: 29-60.

¹ Rivera, A. & G. Casassa. En preparación. Ice elevation, areal and frontal change of glaciers from Torres del Paine National Park, Southern Patagonia Icefield.