

Caída de bloques de hielo en los frentes del glaciar de casquete de la isla Livingston (Archipiélago de las Shetland del Sur). Detección por métodos sísmicos. Influencia de las variables ambientales

Tidewater calving on Livingston Island ice cap (South Shetland Islands). Seismic detection and influence of environmental variables

F. TORCAL⁽¹⁾, J. CALVET⁽²⁾, LL. BROTONS⁽³⁾, J.M. VILAPLANA⁽²⁾, I. SERRANO⁽¹⁾ y J. ENRIQUE⁽⁴⁾

(1) Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. Campus Universitario de Cartuja. Granada.

(2) Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. Martí Franquès s/n. Zona Universitària de Pedralbes, 08028 Barcelona.

(3) Departament de Biologia Animal. Universitat de Barcelona. Av. Diagonal 645. 08028 Barcelona.

(4) Programa Nacional de Investigación en la Antártida, CICYT, Rosario Pino, 14, 28020, Madrid.

RESUMEN

Se han utilizado los datos procedentes de una red (*array*) sísmica situada en la isla Livingston para estudiar la evolución de las caídas de bloques de hielo en los frentes de los glaciares (*calving*). Partiendo de que la causa fundamental de las caídas de bloques es el flujo del hielo, se ha estudiado la influencia de la temperatura ambiental, la variación del nivel de la marea, la humedad y la velocidad del viento sobre este fenómeno.

Como principal conclusión se deduce que la temperatura ambiental es el factor que ejerce una mayor y más directa influencia sobre las caídas de los bloques de hielo.

Palabras clave: Calving. Sísmica. Casquete glacial. Antártida.

ABSTRACT

We used data from a seismic array to study the evolution of calving at Livingston Island. Starting with the idea that the flow is the main cause of calving, we examined the effect of temperature, tide, relative humidity and wind velocity on this phenomenon. Air temperature proved to be the most relevant parameter.

Keywords: Calving. Seismic array. Ice cap. Antarctica.

EXTENDED ABSTRACT

Although calving in tidewater and in fresh water glaciers has been studied by several authors, it is a poorly understood phenomenon (Warren et al., 1995; Van der Veen, 1996). Some studies deal with the mechanics of calving (Hughes, 1992), while others examine its correlation with local (ice velocity and water depth, Brown et al., 1982) and environmental parameters (subglacial meltwater discharge, Sikonia and Post, 1980; meteorological data, tidal stage, wind and wave action, Warren et al., 1995).

We studied calving in southern Livingston Island (Figs. 1 and 3). 90% of the island is covered by an ice cap that reaches the sea and forms ice cliffs between 30 and 70 m high. The area of Livingston Island ice cap decreased by 4.3% in the last 40 years and the ice thinned considerably. Both processes are still active (Corbera, 1996; Calvet et al., 1998; Calvet et al., this volume).

During the survey (29 austral summer days in 1996-97), calving events were detected by a seismic array installed near the Spanish station (Fig. 2 and Table 1). The events were classified according to their origin azimuth (Table 2 and Fig. 3). The mass mobilised in each calving event could not be calculated owing to the great number of records. However, also due to the abundance of events, we consider that the number of events for a given period is a reliable index of the masses mobilised.

Figure 4 shows the temporal distribution of the calving events registered. Periods of active calving alternate with inactive periods, and the frequency of events clearly tends to increase towards the end of the surveyed period.

We analysed the correlation between calving and several environmental parameters (Fig. 5): temperature, relative humidity, wind velocity and tide. Figure 6 shows the number of calving events per hour for each value of these parameters. This number tends to be directly correlated with temperature and, to a lesser extent, with relative humidity, although this may merely result from the concordance between temperature and relative humidity (compare Figs. 5 a and b). A better correlation is achieved when we relate calving events with the temperature recorded during the previous hour. Calving events show a slight inverse correlation with wind velocity. According to Warren et al (1995), the wind may have an indirect influence by controlling the turbulent-heat flux to the glacier. Tide has no bearing on calving, in accordance with Brown et al. (1982), Qamar (1988) and Warren et al. (1995).

A logistic regression has been performed in order to study the effect of these parameters on the probability of calving. The 53% of the total amount of events corresponds to an ice front located NNE of the seismic array (Fig. 3) and were considered separately from the rest.

When considering the NNE events only (Fig. 8a), the average temperature recorded the previous hour accounts for 73% of the variability in the probability of calving. The ordinal day number accounts for 9%, indicating that the frequency of calving tends to increase. We suggest that this increase results from the accumulative effect of above zero temperatures throughout the observed period. Relative humidity, wind velocity or tide level do not seem to be relevant factors.

For the remaining events (Fig 8b), the average temperature recorded during the previous hour and the wind velocity account for 68% and 19% of the variability in the probability of calving respectively. The ordinal day number, as well as tide level and relative humidity, are irrelevant.

INTRODUCCIÓN

Existe una bibliografía relativamente abundante sobre el proceso de *calving* o desprendimiento de bloques de hielo en los frentes acantilados de los glaciares que llegan al mar (*tidewater glaciers*) o a lagos (*fresh water glaciers*). No obstante, el conocimiento que se tiene sobre el proceso de *calving* es limitado, como se reconoce

en los trabajos recientes (Warren et al., 1995; Van der Veen, 1996). Diversos trabajos estudian fundamentalmente los aspectos mecánicos del *calving* (Hughes, 1989; Hughes y Nakagawa, 1989; Hughes, 1992), otros intentan establecer relaciones entre este proceso y la velocidad del glaciar y la batimetría de las aguas proglaciares a lo largo de varios años (Brown et al., 1982) y, otros, tienen en cuenta, también, la marea y las condi-

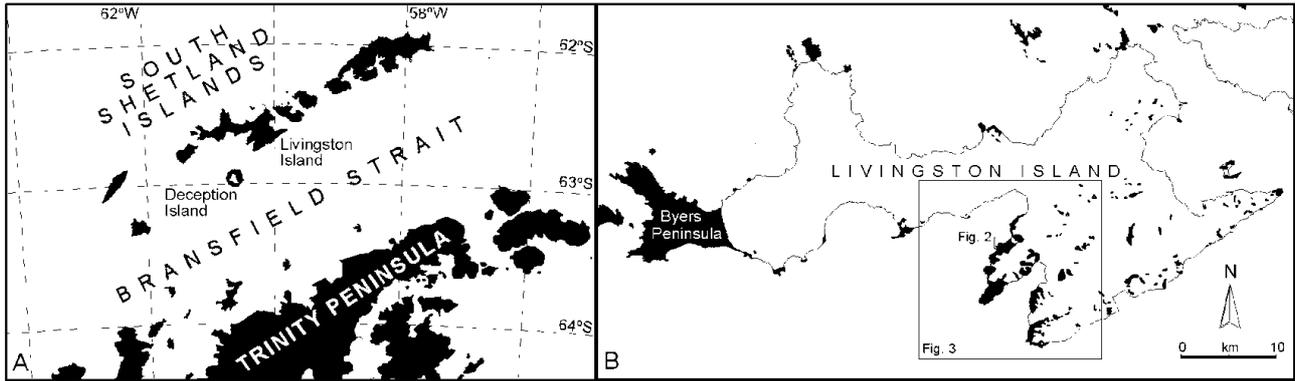


Figura 1. A) Situación de la Isla Livingston. B) Isla Livingston. En blanco se representa el casquete glaciar y en negro los afloramientos rocosos. Excepto donde hay afloramientos rocosos, el casquete alcanza el mar formando acantilados de hielo de 30 a 70 m de altura.

Figure 1. A) Location of the Livingston Island. B) Livingston Island. In white, the ice cap and in black, the rocky outcrops. Where the ice reaches the sea it forms ice walls between 30 and 70 m high.

ciones meteorológicas en observaciones detalladas durante periodos de algunos días (Warren et al., 1995). Warren (1992) da una visión detallada de los conocimientos actuales sobre el *calving* y sobre su relación con las fluctuaciones de los glaciares y los parámetros climáticos. Van der Veen (1996) aporta una visión crítica sobre los conocimientos actuales, resaltando que en los glaciares en equilibrio pueden encontrarse relaciones entre el *calving* y parámetros medioambientales sin que haya una relación causal de estos parámetros sobre el *calving*. Según este autor, se trataría de un equilibrio general entre los diferentes procesos y parámetros que afectan al glaciar; en cambio sostiene que en glaciares sometidos a cambios rápidos sí que podrían establecerse relaciones de causalidad.

En nuestro trabajo, el estudio del *calving* se lleva a cabo en la isla Livingston (Fig. 1), en la que se ha detectado una disminución de la extensión del casquete glaciar del 4,3% en los últimos 40 años, acompañada de una importante reducción de espesor (Corbera, 1996; Calvet et al., en este volumen). Además, las observaciones y medidas que se están realizando *in situ* desde 1994-95 muestran claramente que la reducción de espesor continúa en la actualidad (Calvet et al., 1998) y que hay un notable incremento de la velocidad del hielo, en el sector estudiado (Ximenis et al., en este volumen). Todo ello demuestra que este casquete no se encuentra en equilibrio.

Uno de los problemas que se presentan al estudiar el *calving* es disponer de un buen registro de los desprendimientos. En nuestro trabajo aportamos un sistema de registro sísmico que es fiable y relativamente simple. En di-

versas localidades se han instalado redes sísmicas parecidas a la propuesta aquí con buenos resultados en la detección de *calving* en los frentes de los glaciares. Destacamos el trabajo de Qamar (1988) que estudia las señales sísmicas de baja frecuencia producidas por el *calving* en el Glaciar Columbia de Alaska.

Partiendo de que la causa fundamental de las caídas de bloques de hielo al mar es el flujo del hielo, consideramos cuál puede ser la influencia de la temperatura ambiental, la variación del nivel de la marea, la humedad y la velocidad del viento en la caída de bloques.

LOS ACANTILADOS DE HIELO DEL CASQUETE GLACIAL DE LA ISLA LIVINGSTON

El casquete de hielo que cubre, en un 90%, la isla Livingston, descrito por Martínez de Pisón et al. (1992), alcanza el mar formando acantilados cuya altura varía normalmente entre 30 y 70 metros. La mayor parte de la costa de la isla Livingston está constituida por estos acantilados de hielo (Fig. 1).

En los acantilados se pueden observar tres situaciones distintas:

- 1.- El hielo reposa sobre una playa, siendo la parte inferior del acantilado de hielo batida por las olas en marea alta.
- 2.- El hielo reposa sobre un substrato, roca o playa, situado a muy poca profundidad por debajo del nivel del

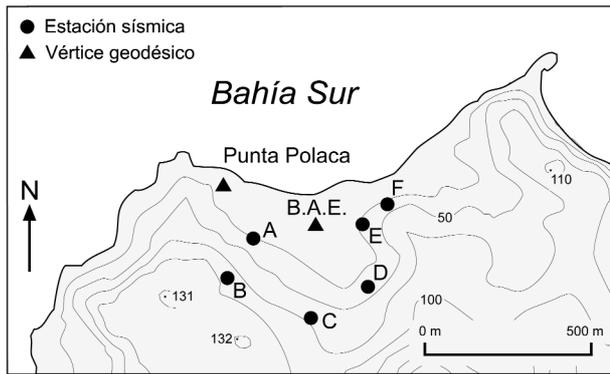


Figura 2. Situación de las estaciones de la red sísmica. La Base Antártica Española se sitúa junto al vértice geodésico B.A.E.

Figure 2. Location of the seismic stations. The Spanish station is located next to the geodesic vertex B.A.E.

mar. Las olas baten constantemente la parte baja del acantilado.

3.- La base del hielo está a varios metros por debajo del nivel del mar.

En los tres casos el glaciar reposa sobre el sustrato (*grounded glacier*).

Sería posible esperar que en los acantilados del tipo 3 la acción de la marea tuviese una cierta influencia en la caída de bloques, ya que la lengua glaciar soporta un empuje vertical variable con la marea. Más adelante se aportan datos bibliográficos y propios sobre esta posible influencia.

La distinción entre los distintos tipos es a menudo difícil, ya que en muchos casos sólo se dispone de observaciones lejanas, en las que no es posible ver adecuadamente las características de la base del frente del glaciar.

Hughes y Nakagawa (1989) dan una descripción muy similar a la nuestra para los acantilados de hielo de la isla Decepcion, situada unos 20 km al Sur de la isla Livingston.

A lo largo de toda la costa, la parte del glaciar próxima al frente está extraordinariamente fragmentada por grietas muy abiertas. El mismo frente está constituido por bloques de hielo inestables que van cayendo al mar. Las caídas pueden involucrar a unos cuantos bloques o a todo un sector del frente (entre 30 y 70 metros de altura, varios metros de anchura y varias decenas de metros de longitud) que se desmorona y se fragmenta en bloques que

quedan flotando en el mar constituyendo el *brash*. Sobre estos procesos hay buenas descripciones en los trabajos de Hughes y Nakagawa (1989) y Warren et al. (1995).

LAS CAÍDAS DE BLOQUES: REGISTRO DE CAÍDAS, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

Durante la campaña de investigación antártica desarrollada en la isla Livingston, entre Diciembre de 1996 y Febrero de 1997, estuvo operando, al igual que en campañas anteriores, el array sísmico de registro digital del Instituto Andaluz de Geofísica, situado en los entornos de la Base Antártica Española (BAE) (Fig. 2). Esta pequeña red de registro sísmico digital estaba formada por seis estaciones. Cinco de ellas tenían un único sensor Mark L25B de componente vertical, cuyo rango de respuesta dinámica estaba comprendido entre 1 y 50 Hz, y la estación restante, (B en la Fig. 2), tenía tres sensores Mark L4C (componentes vertical, horizontal N-S y horizontal E-W) cuyo rango de respuesta dinámica estaba comprendido entre 0,1 y 50 Hz.

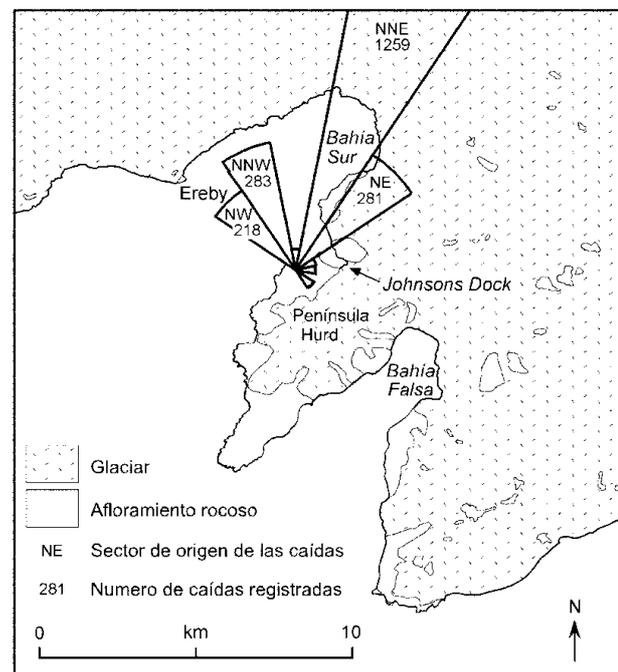


Figura 3. Distribución de las caídas registradas, según su dirección de origen.

Figure 3. Distribution of calving events according to their origin azimuth.

27/01/97 15:20 a 24/02/97 22:00		
	Eventos	%
Caídas de bloques	2343	75,63
Ruido natural	697	22,50
Ruido electrónico	41	1,32
Terremotos	17	0,55
TOTAL	3098	100,00

Tabla 1. Distribución, por tipos, de los eventos registrados sísmicamente.

Table 1. Distribution of the events detected by seismic methods.

El análisis de los registros sísmicos permitió distinguir diferentes tipos de fenómenos generadores de las señales, tales como terremotos, caídas de bloques de hielo al mar en el frente de los glaciares, ruidos electrónicos y ruidos naturales. Se comprobó que los ruidos electrónicos eran debidos a interferencias radioeléctricas producidas por la estación de radio de la Base Antártica Española.

Los ruidos naturales eran debidos a la actividad humana o al viento, que puede llegar a 60 nudos. Durante el periodo de estudio se anotaron todas las caídas vistas u oídas constatándose que todas fueron registradas por la red sísmica.

El interés glaciológico de poseer un buen registro de caídas de bloques de hielo indujo a modificar algunos parámetros del sistema de adquisición de datos sísmicos con el objetivo de aumentar su sensibilidad. Desde el 27 de enero hasta el 24 de febrero de 1997, se obtuvieron 2.343 registros de buena calidad correspondientes a caídas de bloques (Tabla 1).

Estos registros fueron analizados y clasificados según la dirección de origen de la caída (Tabla 2 y Fig. 3)

La distribución por sectores es relativamente fácil de explicar.

- Las caídas en los sectores NW y NNW corresponden a acantilados de una porción del casquete con un área de drenaje de 11,4 km² y un frente de 6 km longitud. Es

Dirección de origen	n° de caídas	% de caídas		C n° de caídas	% de caídas	A Area km ²	F Frente km	A / F	C / F	C / A	C / (A/F)
NW	218	9,3	Ereby	547	23,3	11,4	6,0	1,9	91,7	47,8	285,2
NNW	283	12,1									
N	46	2,0									
NNE	1259	53,7	Bahía Sur	1540	65,7	49,4	3,3	14,8	462,9	31,2	103,7
NE	281	12,0									
ENE	41	1,7	Johnsons Dock	78	3,3	5,3	0,6	9,4	139,3	14,8	8,3
E	37	1,6									
ESE	6	0,3	Bahía Falsa	51	2,2	53,3	3,2	16,8	16,1	1,0	3,0
SE	45	1,9									
SSE	0	0,0	Península Hurd								
S	4	0,2									
SSW	1	0,0									
SW	1	0,0									
WSW	1	0,0									
W	6	0,3									
WNW	5	0,2									
Origen ?	109	4,7									
Total	2343	100,0									

Tabla 2. Número de caídas detectadas según su dirección y origen. Se indica también la superficie (A) y longitud del frente (F) de la cuenca glaciar en la que se producen.

Table 2. Number of ice falls detected according to their direction azimuth. The area (A) and the length (F) of the front in each ice basin are also indicated.

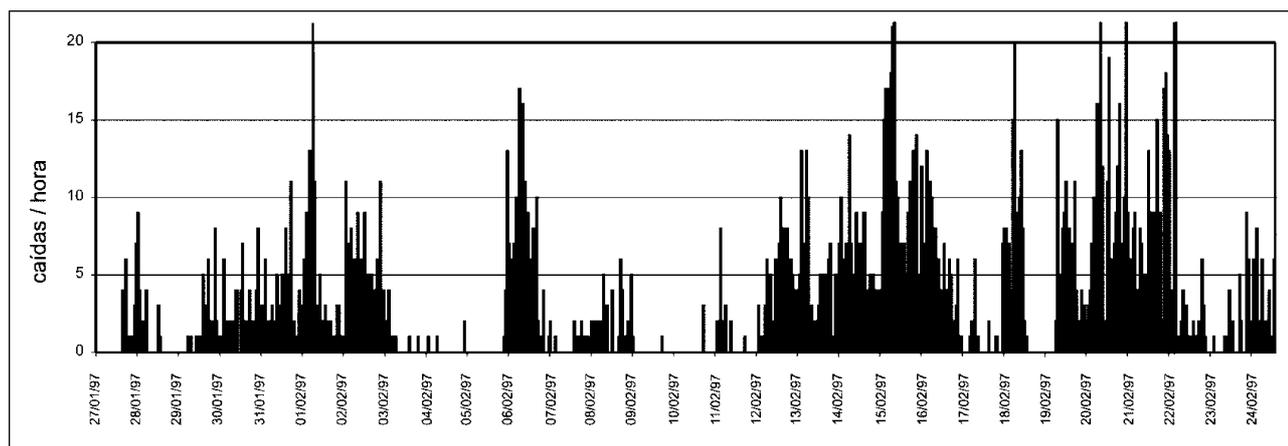


Figura 4. Caídas de bloques por hora, registradas sísmicamente, desde el 27 de enero hasta el 24 de febrero de 1997.

Figure 4. Calving events per hour recorded by the seismic array between January the 27th and February the 24th 1997.

difícil de comprender la baja actividad del sector N que, a partir de las observaciones de campo, se supone debería tener una actividad similar a la de los sectores NW y NNW. Este hecho puede ser debido, en parte, a la distribución de los sensores de la red sísmica que, debido a la configuración de la playa donde está ubicada (Fig. 2), carece de una estación situada más al norte que las estaciones A, E y F, que hubiera facilitado discernir con mayor precisión la dirección estrictamente N de las caídas de bloques de hielo. Por lo tanto es posible que algunas caídas englobadas dentro del grupo NNW tuvieran una procedencia más cercana a la dirección N. Es menos probable encontrar estas caídas en el grupo que engloba la procedencia NNE ya que la colocación de la estación F permite discernir que es la primera estación a la que llega la señal sísmica de las caídas procedentes del NNE.

- Al fondo de Bahía Sur (sector NNE y quizás también NE) llega una lengua glaciar muy activa, de unos 3,3 km de frente, que drena una área importante (49,4 km²). Las observaciones de campo muestran claramente un *calving* muy activo.
- Los sectores ENE y E detectan, posiblemente, las caídas del fondo de la pequeña ensenada situada en esta dirección (Johnsons Dock), con 78 caídas (3,3%).
- Las 51 caídas (2,2%) registradas en los sectores ESE y SE pueden atribuirse a la actividad del frente (3,2 km) de Bahía Falsa, que drena una superficie de 53,3 km². La longitud del frente y la extensión del área drenada son comparables a las del frente del fondo de Bahía

Sur; las observaciones de campo muestran también una dinámica similar, por lo que, en principio, cabría esperar un número de caídas del mismo orden de magnitud, y sin embargo en el fondo de Bahía Sur se han detectado 1540 caídas y en Bahía Falsa tan solo 51. Siendo las distancias a la red sísmica similares para estos dos frentes, es posible que la atenuación de la señal sísmica desde Bahía Falsa hasta la red sea mayor de lo esperado.

- La escasez de caídas en los sectores SSE, S, SSW, SW, WSW y W es debida a que corresponden a la costa de Península Hurd en la que la importancia de los frentes glaciares es escasa.
- En el sector WNW hay muy pocas caídas identificadas (5). Por las características del frente glaciar correspondiente a este sector, consideramos que se podría esperar una actividad similar a la de los sectores NW y NNW. Cabría pensar en inexactitudes en la determinación de la dirección del origen, a partir de los registros sísmicos.

No se excluye la posibilidad de que algunas de las caídas registradas correspondan a derrumbes o avalanchas de hielo dentro de la isla, pero no hay datos para poder diferenciar este tipo de caídas.

Admitiendo, en una primera aproximación, condiciones similares de topografía y alimentación del glaciar, el número de caídas de cada frente glaciar debe ser proporcional al área drenada. Observando la columna C/A de la Tabla 2 (despreciamos Bahía Falsa) vemos que el número de caídas por cada kilómetro cuadrado de área drenada es de 47,8 en Ereby, 31,2 en Bahía Sur y 14,8 en Johnsons

Dock. Los dos primeros valores son comparables pero el tercero es claramente inferior; ello implica condiciones diferentes de este frente. Posiblemente ese valor inferior sea debido a que el área drenada en Johnsons Dock tiene, proporcionalmente, menor superficie por encima del nivel de equilibrio entre acumulación y ablación que en Ereby y en Bahía Sur. Así, la alimentación será menor en Johnsons Dock y, por tanto, también será menor el *calving*. El número de caídas por kilómetro lineal de frente depende del flujo de hielo que haya en el frente, es decir de la relación entre el área drenada y el frente. Obsérvese (columnas A/F y C/F de la Tabla 2) que en Ereby, donde la relación área/frente es baja (1,9 km²/km) el número de caídas por kilómetro de frente es también baja (91,7 caídas/km). El caso opuesto es Bahía Sur con valores altos (14,8 km²/km y 462,9 caídas/km).

El gran número de registros obtenidos ha hecho imposible un análisis detallado de la distancia a que se ha producido cada una de las caídas de bloques, así como el cálculo de la energía liberada en cada caída. Esto último nos permitiría tener una idea de la masa de hielo involucrada en cada evento. Aunque para un estudio del proceso de *calving* sería necesario conocer las masas afectadas en las caídas, al no disponer de este dato y dado que el número de caídas es elevado, podemos admitir que el número de caídas es bastante representativo de las masas movilizadas.

Por el tipo de datos recogidos, el periodo de observación y las correlaciones que se intentan, el trabajo de Warren et al. (1995) es, de todos los consultados, el más comparable al nuestro. En su trabajo sobre el *calving* en el glaciar San Rafael (Hielo Patagónico Norte, Chile) realizaron observaciones visuales del frente del glaciar, lo que les permitió determinar las características de cada caída y tener una apreciación volumétrica de la masa desprendida. Sin embargo sus observaciones sólo pudieron realizarse en las horas de luz diurna (de 8:00 a 22:00 hora local).

En la figura 4 se presenta la distribución temporal de caídas registradas por nuestra red sísmica, agrupadas por horas. Se observa que el ritmo de caídas es variable, que hay periodos de uno o dos días sin apenas caídas y que hay una tendencia general a aumentar el número de caídas desde el inicio al final del periodo estudiado.

Esta tendencia al aumento de caídas puede ser debida a dos causas:

- En primer lugar, la tendencia de las temperaturas a lo largo del periodo estudiado se mantiene estable y la

media es positiva (ver más adelante). Es lógico suponer que el glaciar sufre un “calentamiento” progresivo que puede explicar el aumento del número de caídas.

- En segundo lugar, las medidas de las velocidades del glaciar Johnsons, durante un periodo que comienza un mes antes del inicio de los registros sísmicos y termina al mismo tiempo, muestran una aceleración en el sector más próximo al frente. Cabe pensar que esta aceleración puede ser debida al “calentamiento” progresivo del glaciar. Así pues, este “calentamiento” podría ser la causa del aumento de velocidad, que a su vez lo sería del aumento de caídas.

RELACIONES ENTRE LAS CAÍDAS DE BLOQUES Y LOS FACTORES AMBIENTALES

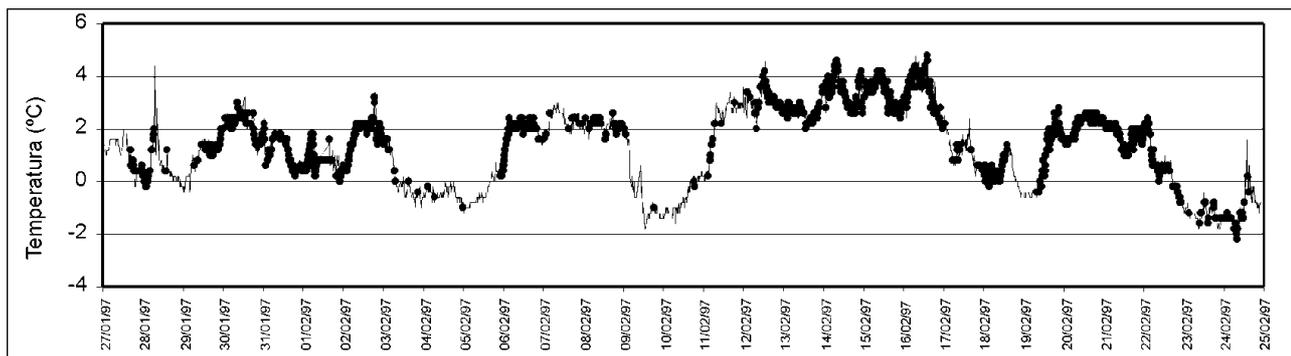
La temperatura

Se ha utilizado una serie temporal de temperaturas (Fig. 5a) registradas en una estación meteorológica automática (estación Dorotea) situada sobre el glaciar Johnsons, cercano a la Base Antártica Española, a 330m de altitud. Dado que nuestro interés es ver el efecto de la temperatura ambiental sobre el comportamiento del glaciar, se han preferido estos registros a los de la estación meteorológica, instalada sobre roca, de la Base Antártica. Los registros de temperatura fueron tomados cada 10 minutos, con una precisión de 0,2°C.

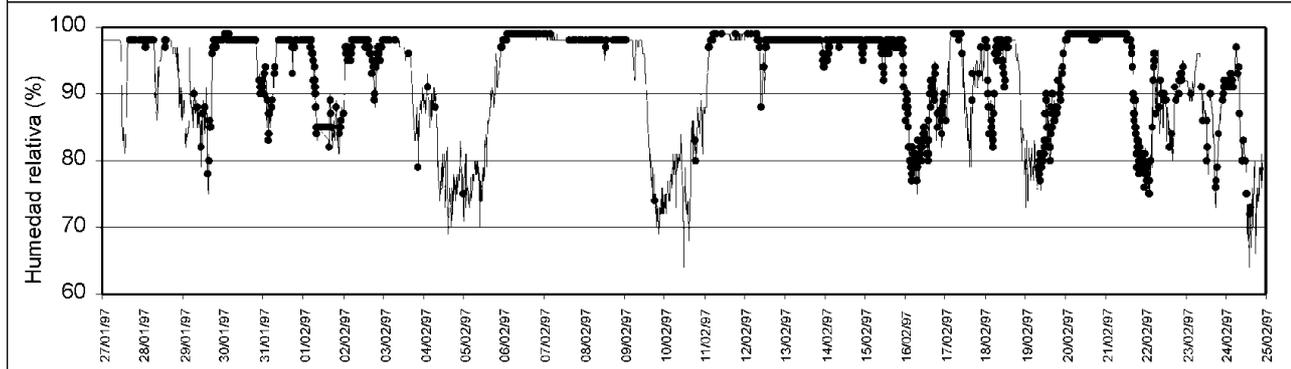
El análisis de las temperaturas muestra que:

- La temperatura máxima registrada es de 5,8°C y la mínima de -2,2°C. El recorrido diario de la temperatura (amplitud térmica diaria) varía, normalmente, entre 1°C y 3,8°C, excepto un día en que es de 6,2°C.
- Durante el periodo estudiado, el recorrido de la temperatura media diaria es de 4,6°C, siendo la máxima media diaria de 3,4°C y la mínima de -1,2°C.
- A lo largo del periodo estudiado la media de temperaturas es de 1,24°C manteniéndose estable (se detecta una levísima tendencia a decrecer, inferior a 0,1°C para el periodo de observación).

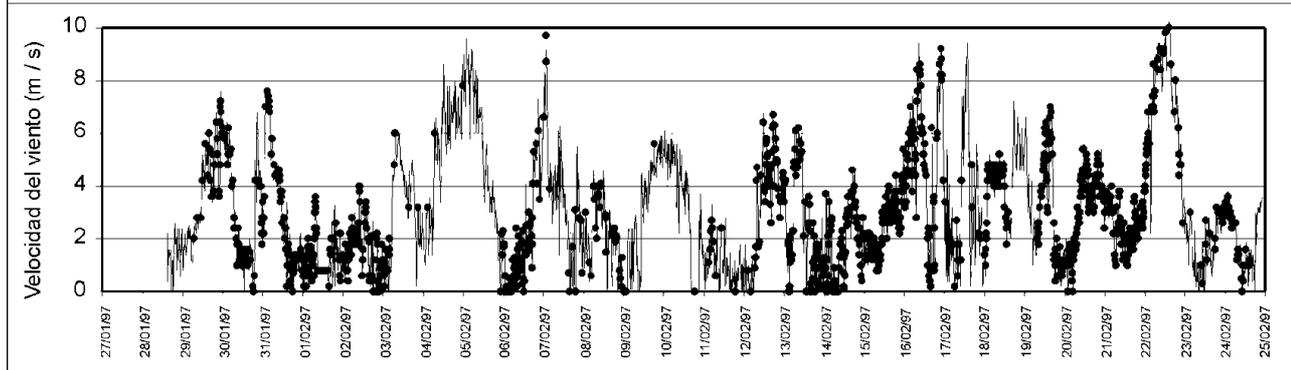
En resumen, las amplitudes térmicas diarias son pequeñas y menores que la oscilación de las medias diarias. Las temperaturas se mantienen con valores aproximadamente constantes durante algunos días, mostrando sólo suaves variaciones diurnas, y descienden o aumen-



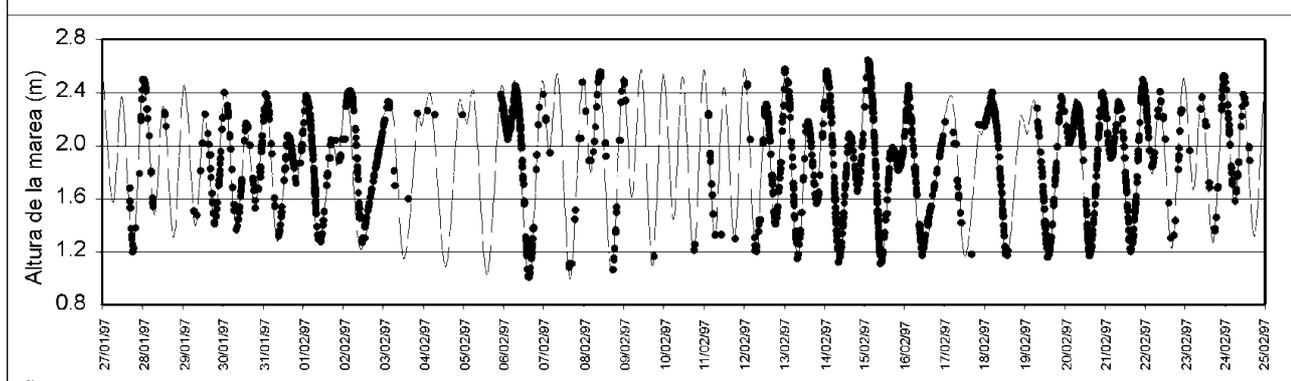
a) — Temperatura • Caída de bloques



b) — Humedad relativa • Caída de bloques



c) — Velocidad del viento • Caída de bloques



d) — Marea • Caída de bloques

tan bruscamente para iniciar un nuevo periodo de estabilidad. Estas variaciones bruscas son debidas a cambios del tiempo meteorológico, debidos a advecciones de masas de aire.

Relaciones entre la caídas de bloques y la temperatura

Las temperaturas se mantienen iguales o inferiores a 0°C durante un 25,44% del periodo de tiempo considerado, mientras que las caídas de bloques de hielo a estas temperaturas solo representan el 7% del total de caídas registradas. Hay, pues, una clara influencia de las temperaturas negativas que inhiben la caída de bloques.

Calculando para cada temperatura el número de caídas por hora (caídas/hora) se observa que éstas aumentan significativamente con la temperatura. Esta relación es mayor si en lugar de la temperatura correspondiente al momento de la caída se tiene en cuenta la temperatura media de la hora anterior a la caída (Fig. 6a).

La humedad relativa

Se ha utilizado la serie temporal de medidas obtenidas en la misma estación que los datos de temperatura (Fig. 5b).

Del análisis de la evolución de la humedad relativa se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Durante el 51,57% del periodo estudiado, la humedad es igual o superior al 97%.
- La humedad máxima registrada es de 99% y la mínima de 64%.

- La oscilación diaria de la humedad puede llegar hasta el 29%, pero normalmente se mantiene en valores mucho menores. La oscilación de la humedad media diaria es del 19,7%, siendo la máxima media diaria de 98,9% y la mínima de 79,2%.

Al igual que se observa en las temperaturas, la humedad se mantiene durante algunos días con fluctuaciones no muy acusadas y desciende o aumenta bruscamente para iniciar un nuevo periodo de cierta estabilidad. Estas variaciones bruscas son debidas a las ya citadas advecciones de masas de aire.

Durante el periodo estudiado las oscilaciones más importantes de humedad están bastante de acuerdo con las de temperatura y se pone de manifiesto una cierta relación directa entre temperatura y humedad, tal como se observa comparando las gráficas correspondientes de la Fig. 5. Tan solo en algunos cortos periodos, de algunas horas, se invierte claramente esta tónica. Durante el día 16 de febrero y la noche del 21 al 22 de febrero con temperaturas relativamente altas, 3,8°C y 1,8°C respectivamente, la humedad relativa baja a valores de 82,7% y 80,7% respectivamente.

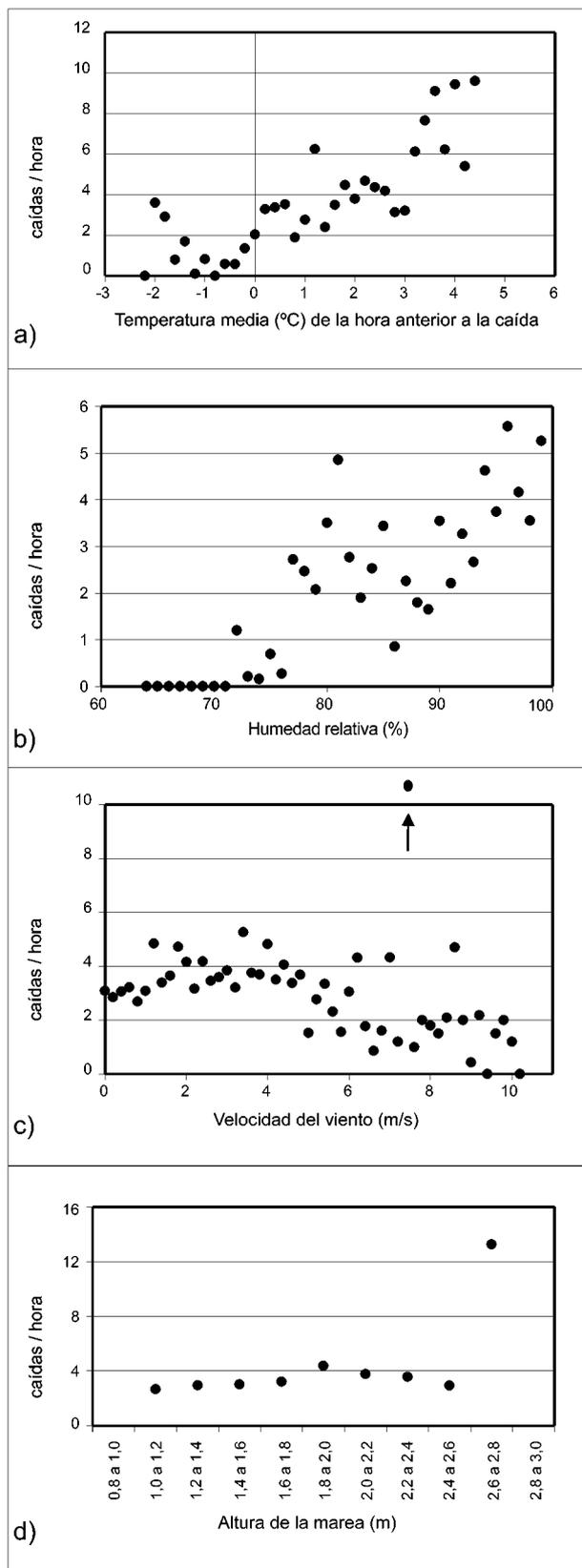
Exceptuando los dos cortos periodos citados, podemos admitir, en una primera aproximación, que alternan advecciones de aire relativamente cálido y húmedo con advecciones de aire más frío y menos húmedo.

Relaciones entre las caídas de bloques y la humedad relativa

Calculando para cada valor de humedad relativa el número de caídas por hora se observa (Fig. 6b) que éstas au-

Figura 5. (a) Serie temporal de temperaturas, registrada en el glaciar Johnsons. Los registros son cada 10 minutos, con una precisión de 0,2°C. Los puntos indican la temperatura en el momento de registrar cada una de las caídas. (b) Serie temporal de medidas de humedad relativa, registrada en el glaciar Johnsons. Los registros son cada 10 minutos, con una precisión del 1%. Los puntos indican la humedad relativa en el momento de registrar cada una de las caídas. (c) Serie temporal de medidas de velocidad del viento. La serie está confeccionada con datos de las estaciones meteorológicas del glaciar Johnsons y de la Base Antártica Española, dando prioridad a los datos del glaciar. Los registros son cada 10 minutos, con una precisión de 0,1 m/s. Los puntos indican la velocidad del viento en el momento de registrar cada una de las caídas. (d) Serie temporal de altura de la marea. La serie está confeccionada por interpolación por el método de kriging, a partir de los valores y hora de las pleamares y bajamares. Los puntos indican la altura de la marea en el momento de registrar cada una de las caídas.

Figure 5. (a) Air temperature temporal series recorded on Johnsons Glacier, registered every 10 min, with an accuracy of 0.2°C. Points indicate calving events. (b) Relative humidity temporal series recorded on Johnson Glacier, registered every 10 min, with an accuracy of 1%. Points indicate calving events. (c) Wind velocity temporal series compiled from data recorded every 10 min with an accuracy of 0.1m/s at the Spanish Station and Johnson Glacier. Points indicate calving events. (d) Tidal oscillation temporal series. Points indicate calving events.



mentan significativamente a medida que aumenta la humedad.

Dado que la temperatura y la humedad relativa presentan una cierta relación directa y que las caídas están también relacionadas directamente con ambos parámetros, se plantea la posibilidad de que la relación entre caídas y humedad relativa sea un reflejo de la relación entre caídas y temperatura.

En la gráfica b de la figura 5 se observa que para valores de humedad relativa comprendidos entre el 76% y el 86% el número de caídas por hora es alto. El número de caídas registradas que se dan en este intervalo de valores de humedad relativa es de 334, de las cuales 125 corresponden a los días en que la relación entre valores de temperatura y valores de humedad relativa es inversa (83 corresponden al día 16 de febrero y 42 a la noche del 21 al 22 de febrero). Parece, pues, que la relación directa entre caídas y humedad relativa es un reflejo de la que hay entre caída y temperatura, ya que se rompe cuando la relación entre temperatura y humedad es inversa.

El viento

La serie temporal de registros de velocidad del viento de la estación meteorológica situada en el glaciar y la serie de la estación situada en la Base son incompletas. Con ambas se ha confeccionado una serie, casi completa, dando prioridad a los valores registrados en el glaciar (Fig. 5c). En los tramos en que ambas series se solapan parece claro que las tendencias son las mismas, aunque los valores de velocidad del viento difieren ligeramente. Los registros de dirección del viento son mucho más incompletos y no se ha podido construir una serie utilizable.

Figura 6. Numero de caídas por hora registradas para cada valor de temperatura (a), de humedad relativa (b), de velocidad del viento (c) y de altura de la marea (d). El número de caídas por hora para valores de marea entre 2,6 m y 2,8 m no es representativo, ya que solo se registró esta altura de la marea durante un episodio de 58 minutos, frente a 678,5 horas de duración del estudio.

Figure 6. Number of calving events per hour against (a) temperature, (b) relative humidity, (c) wind velocity, (d) tide level. Tides ranging 2.6 to 2.8 m are not relevant since they were registered only for a short period (58 min) with respect to the total duration of the study(678.5 h).

Relaciones entre las caídas de bloques y la velocidad del viento.

Calculando para cada velocidad del viento el número de caídas por hora se observa (Fig. 6c) que éstas disminuyen significativamente a medida que aumenta la velocidad del viento. Esta relación se comentará más adelante.

La marea

Los datos de la altura de la marea se han obtenido del Anuario de Mareas (Instituto Hidrográfico de la Marina Sección de Oceanografía, 1996) en el que se incluye la tabla de mareas (altura y hora de la pleamar y de la bajamar) para la caleta Johnsons (Johnsons Dock) de la isla Livingston. A partir de estos datos se han interpolado los valores intermedios por el método de kriging geoestadístico (Matheron, 1965, 1969, 1970, 1973) (Fig. 5d).

La amplitud máxima (valor máximo menos valor mínimo) de la marea en el periodo estudiado es de 1,6 m.

Relaciones entre las caídas de bloques y la altura de la marea

Calculando para cada altura de la marea el número de caídas por hora no se observa ninguna variación significativa (Fig. 6d).

Mientras que para las diferentes alturas de la marea el número de caídas por hora oscila entre 2,67 y 4,37, para alturas superiores a 2,6 m se dan 13,27 caídas /hora. Este valor no es representativo, ya que la marea solo ha superado esta altura durante un episodio de 58,5 minutos, frente a 678,5 horas de registro de datos.

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LA MAREA EN LA PROBABILIDAD DE LA CAÍDA DE BLOQUES. REGRESIÓN LOGÍSTICA.

Para estudiar la influencia de las diversas variables meteorológicas y de la marea en la probabilidad de la caída de bloques se utilizó una regresión logística. Este análisis relaciona la probabilidad de caída de bloques, estimada a partir de su presencia o no en intervalos de observación, con el resto de variables explicativas a través de un modelo *logit* (Kleinbaum, 1994). En nuestro caso la duración de los intervalos de observación se ha ajustado a una hora.

Para establecer cuales son las variables explicativas se efectuaron correlaciones cruzadas entre las caídas de bloques y los parámetros (variables medioambientales, marea, número de orden del día de observación y hora, del día, del intervalo en estudio) que se suponía podían tener influencia en las caídas.

Para las temperaturas se realizaron correlaciones entre las caídas y las temperaturas registradas en la hora de la caída, así como con las medias de temperaturas desde una hasta 24 horas antes de la caída. Se retuvo como las más relacionada con las caídas la media de 1 hora antes de cada intervalo de observación.

Igual se hizo con el nivel de marea correspondiente a la hora de observación y con los niveles medios desde 1 hora hasta 8 horas antes; lo mismo con la oscilación de la marea en las horas anteriores. Para la marea sólo se observó correlación al considerar la altura correspondiente a la hora de la caída.

No se obtuvieron resultados significativos al considerar la hora del día, por lo que se prescindió de esta variable.

Finalmente se han considerado como variables explicativas:

- La temperatura media horaria de la hora anterior al intervalo de observación de caída de bloques.
- El nivel de la marea en el momento que se inicia el intervalo de observación.
- La velocidad de viento en el momento en que se inicia el intervalo de observación.
- La humedad relativa en el momento en que se inicia el intervalo de observación.
- El número de orden del día en que se hace la observación dentro de la serie de 29 días que ha durado la recogida de datos. Esta variable parece importante por cuanto a medida que pasan los días el número de caídas aumenta; posiblemente se relaciona con el efecto acumulativo de la temperatura antes indicado.

Para reducir la dependencia entre las observaciones incluidas en los análisis se trataron sólo las obtenidas cada 5 horas, despreciando el resto.

En primer lugar se estimó el modelo completo a partir de los resultados obtenidos. El modelo completo in-

	Caídas registradas en el sector NNE (N=126)				Caídas registradas en el resto de los sectores (N=130)			
	ΔX^2	Δdf	P	Parámetros	ΔX^2	Δdf	P	Parámetros
Modelo completo	42,22	16	<0,001		40,17	16	<0,001	
Interacciones 2° nivel	7,36	10	N.S.		3,34	10	N.S.	
Temperatura media, -1 h	30,99	1	<0,001	0,76	27,45	1	<0,001	0,72
Marea	0,05	1	N.S.		0,10	1	N.S.	
Velocidad del viento	0,06	1	N.S.		7,87	1	<0,01	-0,025
N° del día	4,03	1	<0,05	0,05	1,39	1	N.S.	
Humedad	0,71	1	N.S.		0,02	1	N.S.	

Tabla 3. Resultados de los análisis logísticos.

Table 3. Results of the logistic analyses.

N: número de observaciones incluidas en el análisis, X^2 : deviancia, df : grados de libertad, P: expresa la probabilidad de error, N.S. indica que la variable no es significativa. Parámetros: parámetros de la regresión logística para las variables incluidas en el mínimo modelo adecuado final. Deviancia es la medida de la discrepancia, utilizada por el programa, para medir la adecuación de un modelo a los datos empíricos. La deviancia es el logaritmo de la razón entre dos verosimilitudes. Esta razón sigue una distribución Chi-cuadrado y por lo tanto se puede calibrar su significación estadística para evaluar con exactitud la adecuación del modelo en estudio. Se indican en negrita las variables que aparecen como más importantes.

cluye la influencia de todas las variables indicadas y la influencia de pares de variables que interactúan entre sí (interacciones de segundo nivel).

En segundo lugar, se utilizó un procedimiento de eliminación en pasos hacia atrás de las variables explicativas (*backward step-wise*), con el objetivo de seleccionar un modelo final que incluyera solamente las variables más significativas. Solamente las interacciones significativas fueron incluidas en el modelo final.

Finalmente, se examinaron las variables principales. Las que afectaban menos se excluyeron del modelo, empezando por la menos efectiva. El mínimo modelo adecuado seleccionado incluyó solamente las variables necesarias para explicar la probabilidad de caída de los bloques (Crawley, 1993; Kleinbaum, 1994).

Se realizaron dos análisis logísticos diferentes. Uno para todas las caídas registradas en el sector NNE que corresponde a un frente glaciar homogéneo y otro para el resto (RESTO en la Tabla 3) de las caídas, que agrupa caídas en frentes de características diversas y distancias variables a la red sísmica.

Los análisis se realizaron con el paquete estadístico STATISTICA (Statsoft, Ltd. 5.1, 1996).

Los resultados se presentan en la Tabla 3.

La Fig. 7a representa la probabilidad de caída de bloques, en el sector NNE, en función de la temperatura media, de la hora anterior, y del número de orden del día. La Fig. 7b representa la probabilidad de caída de bloques, en el resto de los sectores, en función de la temperatura media, de la hora anterior, y de la velocidad del viento.

La Fig. 8a representan las caídas de bloques registradas en el sector NNE y la probabilidad de caída de bloques calculada para cada hora en función de la temperatura media, de la hora anterior, y del número de orden del día.

La Fig. 8b representa las caídas de bloques registradas en el resto de los sectores (RESTO) y la probabilidad de caída de bloques calculada para cada hora en función de la temperatura media, de la hora anterior, y de la velocidad del viento.

La temperatura media una hora antes de la observación de la caída de bloques es claramente la variable más importante y explica, de manera directa, el 73% de la variabilidad en la probabilidad de caída de bloques en el sector NNE y el 68% en el resto (RESTO) de los sectores. Se hizo ya una consideración sobre el efecto inhibitorio de las temperaturas por debajo de 0°C. El porcentaje de variabilidad se calcula dividiendo el X^2 de la variable entre el X^2 total.

El número de orden del día tiene una cierta influencia en el sector NNE (9% de la variabilidad de la probabilidad de ca-

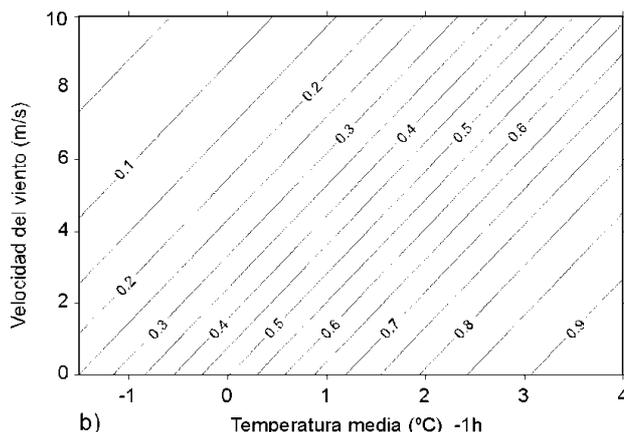
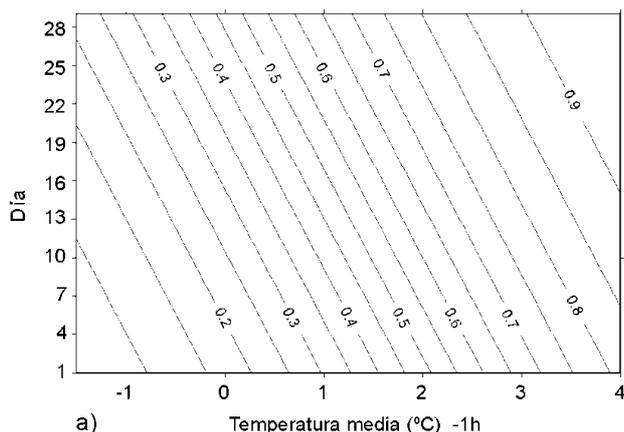


Figura 7. (a) Probabilidad de caída de bloques, en el sector NNE, en función de la temperatura media, de la hora anterior, y del número de orden del día. (b) Probabilidad de caída de bloques, en el resto de los sectores, en función de la temperatura media, de la hora anterior, y de la velocidad del viento.

Figure 7. Probability of calving events (a) in the NNE, as a function of the previous hour average temperature and the ordinal day number, (b) in the rest of areas, as a function of previous hour average temperature and wind velocity.

ída de bloques); cuanto más avanzado es el día de observación más probabilidad hay de que caigan bloques. Se hizo anteriormente una consideración sobre el efecto acumulativo de la temperatura sobre el glaciar. Seguramente el número de orden del día expresa indirectamente esta influencia en una serie térmica en la que la tendencia a lo largo del periodo estudiado es estable. Extrañamente, esta variable no es significativa en el resto de los sectores; no encontramos una explicación para este hecho si seguimos considerando que el aumento de caídas al avanzar en número de orden del día es un efecto térmico. Sin embargo, si consideramos que este aumento no está relacionado directamente con el efecto acumulativo de la temperatura, sino que es debido a incremento en la velocidad de los glaciares, cabría la posibilidad de pensar que hay frentes en los que el aumento de velocidad no se ha dado o es poco significativo.

La velocidad del viento no es significativa en el sector NNE y en cambio tiene un papel bastante importante en el resto de los sectores (19% de la variabilidad de la probabilidad de caída de bloques) actuando inversamente, es decir, al aumentar la velocidad del viento hay una tendencia a disminuir las caídas de bloques. La relación entre el aumento de la velocidad del viento y la disminución del *calving* puede ser establecida por efecto del intercambio turbulento de calor sensible entre el glaciar y el aire. Warren et al. (1995) indican que el viento puede tener una influencia indirecta al controlar el flujo turbulento de calor al glaciar, afectando así la tasa de ablación superficial y por tanto la descarga de aguas de fusión.

El nivel de marea, a pesar de lo esperado, por lo menos para el sector NNE, donde la base del frente del glaciar debe estar algunos metros por debajo del agua, no aparece como influyente. Podría ser debido a que la masa de hielo por debajo del nivel del mar no es suficiente para experimentar un empuje de flotación importante. Brown et al. (1982) y Qamar (1988) encontraron que no hay relación entre marea y *calving*. Warren et al. (1995) indican que, en el glaciar San Rafael, no hay correlación estadística significativa entre el nivel de marea y el *calving*; sin embargo, sugieren que la amplitud de la marea, entre 1 y 2 metros, quizá no es suficiente. En nuestro caso la amplitud máxima de la marea es de este mismo orden (1,6 m).

DISCUSIÓN

Warren et al. (1995) indican que la variabilidad del *calving* puede ser debida a cambios en la temperatura, precipitaciones, nivel de la marea, viento o acción de las olas pero no encuentran correlaciones estadísticas significativas ni comparando datos sincrónicos ni dejando un lapso de tiempo entre las diversas observaciones y el *calving*. De todos modos consideran que las variables meteorológicas pueden actuar como detonantes cuando la situación es crítica. En su caso, en el glaciar San Rafael, durante los 11 días para los que disponen de datos de temperatura, la temperatura media se mantiene superior a 7°C, con solo un par de días a temperaturas entre 3°C y

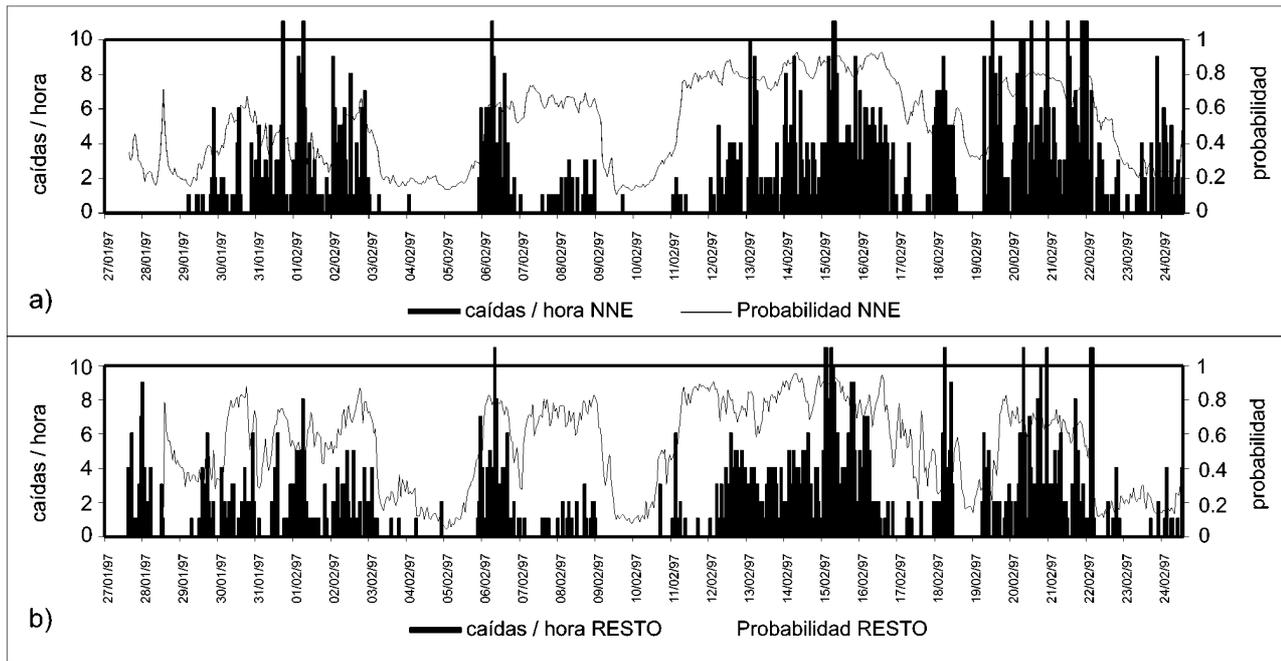


Figura 8. (a) Para el sector NNE, caídas de bloques por hora, registradas sísmicamente, y probabilidad de caída de los bloques según la temperatura media, de la hora anterior, y el número de orden del día. (b) Para el resto de los sectores, caídas de bloques por hora, registradas sísmicamente, y probabilidad de caída de los bloques según la temperatura media, de la hora anterior, y el número de orden del día.

Figure 8. (a) Calving event per hour registered by the seismic array and probability of calving according to the previous hour average temperature and the ordinal day number in the NNE. (b) Calving event per hour registered by the seismic array and probability of calving according to the previous hour average temperature.

4°C. En Livingston las temperaturas medias diarias oscilan entre -1,25°C y 3,4°C. Así pues, los intervalos de temperatura no son coincidentes. Por otro lado, en nuestro caso, estamos a 62°40'S con un régimen de oscilación térmica diaria muy pequeño, mientras que en el glaciar San Rafael, a 46°41'S, debe haber una oscilación térmica ambiental diaria bastante más acusada. Las condiciones de temperatura no son muy similares entre ambos glaciares, lo cual podría justificar las diferencias entre los resultados de ambos estudios.

Según cita Van der Veen (1996), Sikonia y Post (1980) indican que hay una correlación entre la tasa de *calving* y la descarga de las aguas subglaciales. En realidad, debido a la dificultad de medir la descarga subglacial, establecieron esta correlación con la descarga de un río próximo. Admitiendo que este río tiene un régimen similar al de las aguas subglaciales, queda implícita la relación con la temperatura, ya que las aguas subglaciales tienen una estrecha relación con la temperatura.

Por lo que respecta a la lluvia, ya hemos indicado que Warren et al. (1995) encuentran tan solo una leve relación entre ésta y el *calving*. Sikonia y Post (1980) y Theakstone y Knudsen (1986) (según cita de Warren et al., 1995) han indicado una relación entre lluvias importantes y aceleración del *calving*. Qamar (1988) y también, según cita Van der Veen (1996), Krimmel y Vaughn (1987), Walters y Dunlap (1987) y Meier et al. (1994) encuentran correlación entre precipitaciones y aumento de la velocidad del glaciar pero no explicitan si influye directamente en el *calving*. En nuestro trabajo no hemos dispuesto de datos de precipitaciones.

No hemos encontrado trabajos que relacionen humedad ambiental y *calving*, por lo cual no podemos contrastar nuestra deducción de que la humedad no es un factor importante.

Por lo que respecta al viento ya se ha indicado que Warren et al. (1995) no encuentran correlación entre éste y el *calving*, sin embargo indican que puede tener una in-

fluencia indirecta al controlar el intercambio turbulento de calor sensible entre el glaciar y el aire, tal como indicamos en nuestro trabajo.

Brown et al. (1982) son taxativos e indican que no hay correlación estadística entre el nivel de la marea y el *calving* en el Columbia Glacier, Alaska, donde la oscilación de la marea llega hasta 5 metros. Qamar (1988), para el mismo glaciar, indica que podría ser que haya influencia de la marea, pero que no ha llegado a detectarla. Warren et al. (1995) tampoco encuentran relación, en el glaciar San Rafael, entre la marea y el *calving*, pero indican que en situaciones críticas puede tener alguna influencia. Todas estas conclusiones concuerdan con las halladas por nosotros. Destaca en Warren et al., en Qamar y también en nuestro caso, la resistencia a admitir que la marea no juegue ningún papel con relación al *calving*.

Entre los factores que no hemos estudiado cabe destacar el posible efecto del oleaje. Según Warren et al. (1995) tanto en el glaciar San Rafael, como en el Columbia, e incluso en Jakobshavns Ibrae, en el oeste de Groenlandia, que es uno de los más activos del mundo desde el punto de vista del *calving*, el oleaje no es un factor importante debido a la abundancia de icebergs y *brash*. Diversos autores se refieren también a la profundidad del agua en la zona de *calving*, al espesor del glaciar, al nivel del agua en el frente, a la situación de los desagües subglaciales, a la fracturación del glaciar (grietas), a los mecanismos de fractura en el momento de la caída, etc., factores todos ellos que no han sido estudiados por nosotros.

La relación entre la velocidad del glaciar y el *calving* han sido estudiadas por diversos autores. Brown et al. (1982) observan que en el glaciar Columbia, desde 1976 hasta 1992, hay correlación lineal entre el *calving* y la velocidad del glaciar; Van der Veen (1996) propone dos escenarios diferentes para explicar esta correlación, sin que en ningún caso haya dependencia directa entre *calving* y velocidad o viceversa. Qamar (1988) en su estudio detallado del mismo glaciar, durante agosto de 1984, observa que en un par de episodios, hay un aumento de velocidad 2 o 3 días después de un incremento del *calving*, pero considera que este aumento de velocidad está más claramente asociado a un incremento en las precipitaciones que a un incremento en el *calving*. En nuestro caso hacemos una breve referencia al efecto de la velocidad del glaciar, pero nuestros datos no son comparables con los citados.

Por último hay que indicar que puede darse *calving* submarino en algunos de los frentes estudiados, pero no es posible identificarlo en los registros sísmicos.

CONCLUSIONES

La detección sísmica ha demostrado ser una técnica muy eficaz para el registro de caídas de bloques en los frentes glaciales que llegan al mar. Este tipo de fenómeno es prácticamente imposible de registrar de manera sistemática por cualquier otra técnica.

El análisis del registro de caídas, a lo largo de 29 días, ha puesto de manifiesto que, dejando de lado el efecto determinante del flujo glacial, hay una clara y directa influencia de la temperatura medioambiental en el número de caídas de bloques.

En uno de los sectores observados, también se ha puesto de manifiesto un aumento del número de caídas, dentro del periodo de observación, a medida que avanzamos en el tiempo. Hemos relacionado este aumento con un efecto de acumulación térmica que se registra en el glaciar, ya sea favoreciendo la capacidad de fragmentación del frente, ya sea aumentando la velocidad, por lo menos en la parte distal, del glaciar.

Se ha detectado, en algún caso, un efecto inverso de la velocidad del viento debido, posiblemente, al intercambio turbulento de calor sensible entre el glaciar y el aire.

No se detecta ninguna influencia debida a la marea.

Sería muy interesante poder extender este estudio a un periodo más dilatado de tiempo. Un periodo de un año nos permitiría observar la variación estacional de las caídas de bloques. Varios años de observación podrían permitirnos relacionar el *calving* con la reducción de extensión del casquete glacial y con su adelgazamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos ANT96-0734 y ANT95-0994-C03-02 del Programa Nacional de Investigación en la Antártida (CICYT). Jaume Calvet y Joan Manuel Vilaplana forman parte del Grup de Processos Geodinàmics Superficials de la Universitat de Barcelona (3130-UB-06) financiado con la ayuda 1999 SGR-00065.

BIBLIOGRAFÍA

Brown, C.S., Meier, M.F., Post, A., 1982. Calving speed of Alaska tidewater glaciers, with application to Columbia Glacier. U.S. Geological Survey Professional Paper 1258-C, 13 pp.

- Calvet, J., Casas, J.M., Corbera, J., Enrique, J., Fernández de Gamboa, C., Furdada, G., Palà, V., Pallàs, R., Vilaplana, J.M., Ximenis, L., (1998). Disminución de espesor del casquete glaciar de la isla Livingston. *Geogaceta*, 24, 63-65.
- Calvet, J., García Sellés, D., Corbera, J., (en este volumen). Fluctuaciones de la extensión del casquete glaciar de la Isla Livingston (Shetland del Sur) desde 1956 hasta 1996. *Acta Geológica Hispánica*.
- Corbera, J., 1996. Estudi per teledetecció de les fluctuacions del casquet glaciar de l'illa Livingston, Shetland del Sur (Antàrtida). (Tesis doctorals microfitxades; 2669) Universitat de Barcelona. ISBN: 84-475-1137-5.
- Crawley, M.J., 1993. *GLIM for ecologists*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 379 pp.
- Hughes, T., 1989. Calving ice walls. *Annals of Glaciology*, 12, 74-80.
- Hughes, T., 1992. Theoretical calving rates from glaciers along ice walls grounded in water of variable depths. *Journal of Glaciology*, 38(129), 282-294.
- Hughes, T., Nakagawa, M., 1989. Bending shear: The rate-controlling mechanism for calving ice walls. *Journal of Glaciology*, 35(120), 260-266.
- Instituto Hidrográfico de la Marina Sección de Oceanografía, 1996. *Anuario de Mareas 1997*. Servicio de publicaciones de la armada. Cadiz, 215 pp.
- Kleinbaum, D.G., 1994. *Logistic regression*. Berlin, Springer, 219 pp.
- Krimmel, R.M., Vaughn, B.H., 1987. Columbia Glacier, Alaska: changes in velocity 1977-1986. *Journal of Geophysical Research*, 92(B9), 8961-8968
- Martínez de Pisón, E., López-Martínez, J., Arche, A., 1992. Relieve, unidades y tipos de glaciares de la isla Livingston, Islas Shetland del Sur, In J. López Martínez (ed.) *Geología de la Antártida Occidental*, Simposios T3, III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Salamanca, Spain, 261-269.
- Matheron, G., 1965. Les variables regionalisées et leur estimation. Paris, ed. Masson et Cie., 212 pp.
- Matheron, G., 1969. Le krigeage universel. Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique, Ecole Nationales Supérieure de Mines de Paris., vol. 1, 82 pp.
- Matheron, G., 1970. La théorie des variables régionalisées et ses applications. Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique, Ecole Nationales Supérieure de Mines de Paris., vol. 5, 212 pp.
- Matheron, G., 1973. The intrinsic random functions and their applications. *Advances in applied probability*, 5, 439-468.
- Meier, M., Lundstrom, S., Stone, D., Kamb, B., Engelhardt, H., Humphrey, N., Dunlap, W.W., Fahnestock, M., Krimmel, R.M., Walters, R., 1994. Mechanical and hydrologic basis for the rapid motion of a large tidewater glacier, 1. Observations. *Journal of Geophysical Research*, 99(B8):15.219-15.229.
- Qamar, A., 1988. Calving icebergs: a source of low-frequency seismic signals from Columbia Glacier, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 93(B6), 6.615-6.623
- Sikonia, W.G., Post, A., 1980. Columbia Glacier, Alaska: recent ice loss and its relationship to seasonal terminal embayments, thinning and glacial flow. U.S. Geological Survey Hydrology Invest. Atlas HA-619. (3 sheets)
- Theakstone, W.H., Knudsen, N.T., 1986. Recent changes of a calving glacier, Austerdalsisen, Svartisen, Norway. *Geografiska Annaler*, 68A(4), 303-316.
- Van der Veen, C.J., 1996. Tidewater calving. *Journal of Glaciology*, 42(141), 375-385.
- Walters, R.A., Dunlap, W.W., 1987. Analysis of time series of glacier speed: Columbia Glacier, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 92(B9), 8969-8975.
- Warren, C.R., 1992. Iceberg calving and the glacioclimatic record. *Progress in Physical Geography*, 16(3), 253-282.
- Warren, C.H.R., Glasser, N.F., Harrison, S., Winchester, V., Kerr, A.R., Rivera, A., 1995. Characteristics of tide-water calving at Glaciar San Rafael, Chile. *Journal of Glaciology*, 41(138), 273-289.
- Ximenis, L., Calvet, J., Enrique, J., Corbera, J., Furdada, G., (en este volumen) The measurement of ice velocity, mass balance and thinning-rate on Johnsons Glacier, Livingston Island, South Shetland Islands. *Acta Geológica Hispánica*.