

Estudio por teledetección de la dinámica del glaciar de Bahía Falsa Isla Livingston (Antártida)

J. Corbera¹, J. Calvet¹, V. Palá²

¹ *Departamento de Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología. Universidad de Barcelona. Barcelona-08071*

² *Instituto Cartográfico de Catalunya, Parque de Montjuïc. Barcelona-08038*

RESUMEN

El objetivo de este artículo es analizar las fluctuaciones del glaciar de Bahía Falsa, en la Isla Livingston (Antártida). Las fluctuaciones han sido evaluadas en los intervalos de tiempo comprendidos entre 1956-86 y 1986-91, utilizando las fotografías aéreas de la zona tomadas en 1956 y 1986, así como las imágenes tomadas por el satélite Landsat-MSS en 1986 y Spot en 1991. Con la finalidad de comprender el comportamiento en el tiempo de dicho sistema glaciar, hemos analizado utilizando técnicas de Fourier, las características del campo de grietas de la zona terminal en los años 1956 y 1986; también hemos calculado el adelgazamiento entre dichos años del glaciar utilizando métodos fotogramétricos, así como el ritmo de las fluctuaciones en los periodos 1956-86 y 1986-91. A partir de los datos proporcionados, podemos concluir que se ha observado un importante retroceso y adelgazamiento del glaciar a estudio, así como un cambio en la dinámica del flujo del hielo, tal y como se refleja en el cambio en posición de la morrena central y de orientación del campo de grietas.

PALABRAS CLAVE: Casquete glaciar, Teledetección, Antártida.

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the ice cap fluctuations in False Bay, Livingston Island (Antarctica). It has been evaluated in two time intervals, 1956-86 and 1986-91 by using aerial photographs taken in 1956 and 1986, and satellite images taken by Landsat-MSS in 1986 and Spot in 1991. In order to understand the behavior of the glacier system, we have analyzed the system of crevasses over the terminal zone of the glacier in 1956 and 1986 by using Fourier techniques, the thinning of the glacier using photogrammetric models, and also the rate of these fluctuations in the periods 1956-86 and 1986-91. Thanks to these methods we have observed a very important retreat and thinning of the glacier and also a change of ice flow as a change of position of the central moraine and orientation of the crevasses.

KEY WORDS: Ice cap, Remote Sensing, Antarctica

INTRODUCCIÓN

Las islas Livingston y Greenwich pertenecen al archipiélago de las Shetland del Sur, situado a unos 1000 km. del continente sudamericano. Este archipiélago está separado del continente sudamericano por el Paso de Drake, y por el Estrecho de Bransfield de la Península Antártica, de la que dista unos 100 km., Las Shetland del Sur se encuentran situadas entre los 61° y los 63° de latitud Sur, y los 54° y los 63° de longitud Oeste.

Las islas Shetland del Sur están constituidas por casquetes de hielo impuestos sobre la topografía, quedando en términos medios porcentajes no superiores al 10% de la extensión total de las islas descubiertas de hielo. En particular la isla Livingston, con una extensión total aproximada de 800 km², es la segunda en extensión del archipiélago después de la isla Rey Jorge, y aproximadamente sólo un 9% de la isla queda descubierta de hielo (Fig.1)

Una gran parte de los trabajos científicos españoles en la Antártida, se desarrollan en el contexto geográfico de la Isla Livingston, ya que en dicha isla se ubica la base antártica española Juan Carlos I. Desde la preparación de la primera campaña de campo en la isla Livingston en el año 1988-89, por parte del grupo de investigadores del Departamento de Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología de la Universidad de Barcelona, se constató la pobre diversidad de documentación cartográfica de la zona, llegando al extremo de que la cartografía más detallada de la isla Livingston en su totalidad, correspondía a las hojas W 62° 58' y W 62° 60' del British Directorate of Overseas Surveys, a escala 1:200.000 y elaboradas a partir de la fotorestitución de fotografías aéreas verticales tomadas entre 1956 y 1957. Con el objetivo de elaborar un documento cartográfico actualizado y de mayor detalle, nos proponemos realizar una cartografía a partir de imágenes de satélite a escala 1:100.000 de las islas Livingston y

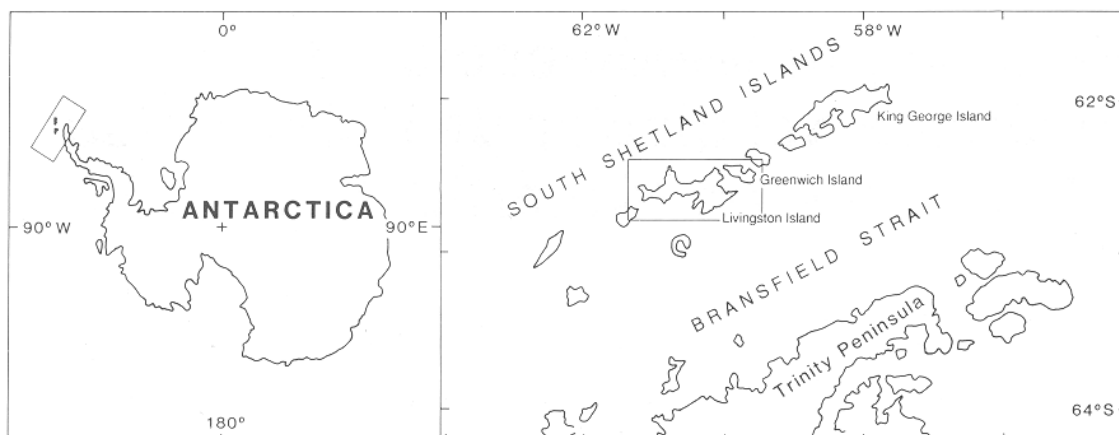


Fig. 1. Mapa de situación de la zona de estudio

Greenwich. Paralelamente, y dentro del marco de las campañas de campo realizadas durante los veranos australes de 1989/90 y 1990/91 se constató, comparando las observaciones de campo con las fotografías aéreas de 1956/57, una importante situación de retroceso del frente del casquete glaciar de la isla Livingston.

El motivo de este artículo es explicar como se han utilizado los documentos disponibles sobre la situación en el tiempo del glaciar en la zona de Bahía Falsa, para primeramente cartografiar las fluctuaciones y posteriormente analizar y entender los cambios en la situación dinámica del sistema glaciar en Bahía Falsa.

Diversos factores hacen el sistema glaciar de Bahía Falsa, especialmente atractivo para su estudio. Por una parte su proximidad a la Base Antártica Juan

Carlos I hace que la documentación disponible en forma de fotografías, diapositivas y cartografía de campo sea especialmente abundante. Las dimensiones de la zona terminal de Bahía Falsa, se recogen por completo a la escala 1:27.000 y 1:30.000 de las fotografías aéreas de 1956 y 1986 respectivamente, lo que hace su estudio mucho más cómodo. Tal y como puede observarse en la figura 2, el frente glaciar de Bahía Falsa presenta dos tipos de alimentación claramente diferenciada: por una parte, la zona alimentada por montaña con una área de acumulación cercana y fuerte pendiente y, por otra parte, la zona alimentada por el casquete glaciar, con una zona de alimentación más alejada y pendiente más suave. El análisis en el tiempo del comportamiento de cada una de las zonas aportará una valiosa información sobre la relación existente entre la dinámica glaciar y la topografía. Finalmente en la zona Sur-Este, se puede apreciar con claridad la existencia de una morrena central (Fig-2), depósito que marcará la divisoria de equilibrio entre los dos flujos de hielo y que por tanto su comportamiento en el tiempo nos ofrecerá valiosa información sobre la situación dinámica del sistema.

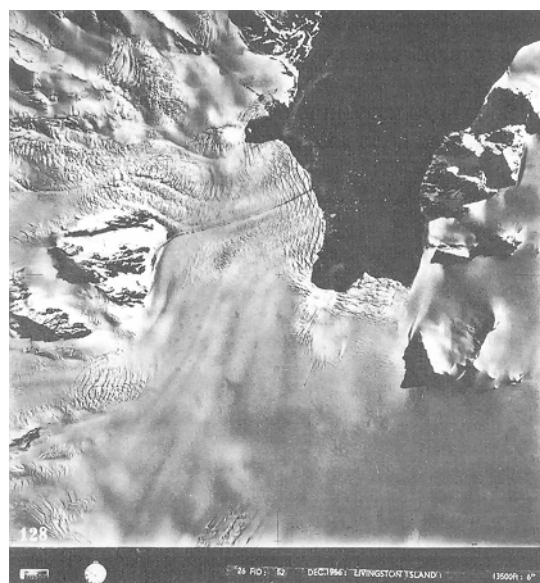


Fig. 2. Fotografía aérea de 1956 sobre el glaciar de Bahía Falsa.

METODOLOGÍA

Este, se puede apreciar con claridad la existencia de una morrena central (Fig.-2), depósito que marcará la divisoria de equilibrio entre los dos flujos de hielo y que por tanto su comportamiento en el tiempo nos ofrecerá valiosa información sobre la situación dinámica del sistema.

i) Tratamiento de la dinámica de las grietas y de la morrena central: El objeto del estudio es determinar las variaciones en el tiempo de la morrena central, así como de la geometría del campo de grietas en la zona terminal. Dichos parámetros son reflejo de la dinámica del hielo y han sido estudiados a partir del tratamiento en el dominio de Fourier, tomando como documentos de trabajo las fotografías aéreas de 1956 y 1986 sobre la zona.

ii) Fluctuaciones del frente glaciar de Bahía Falsa: A partir de la corrección orbital de las imágenes proporcionadas en modo pancromático (resolución espacial de 10 metros) por el sistema

SPOT, y la georreferenciación a dicho documento de la cartografía elaborada a partir de las fotografías aéreas de 1956, así como las imágenes de satélite Landsat-MSS de 1986, hemos reconstruido la posición del frente glaciar en los periodos 1956-86 y 1986-91.

iii) Estudio de los cambios en el espesor del glaciar: Bajo la elaboración de un modelo fotogramétrico han sido tratadas las fotografías aéreas de 1956 y 1986 sobre el perfil de la morrena central. Gracias al modelo fotogramétrico, hemos podido determinar las coordenadas (x,y,z) de la morrena central en el año 1956 y en el año 1986.

Dicho resultado nos proporcionará valiosa información sobre los cambios en posición y espesor del glaciar en el perfil de la divisoria de flujos.

RESULTADOS

i) Tratamiento de la dinámica de las grietas y de la morrena central:

Para el análisis de las grietas en la zona terminal de Bahía Falsa, primeramente se realizó una escanización a 400 D.P.I. (píxeles por pulgada) de la fotografía aérea vertical tomada en Diciembre de 1956 sobre Bahía Falsa y de una fotografía aérea vertical tomada en Diciembre de 1986 de la misma zona. Posteriormente se construyeron dos subimágenes de 512x512 píxeles (los algoritmos de transformada, de Fourier trabajan con dimensiones potencias de dos para optimizar su funcionamiento), correspondientes al sistema de grietas que se presentan justo en la zona terminal de la morrena central (Fig. 3).

Nuestro objetivo es determinar la periodicidad y orientación de las grietas como parámetro periódico

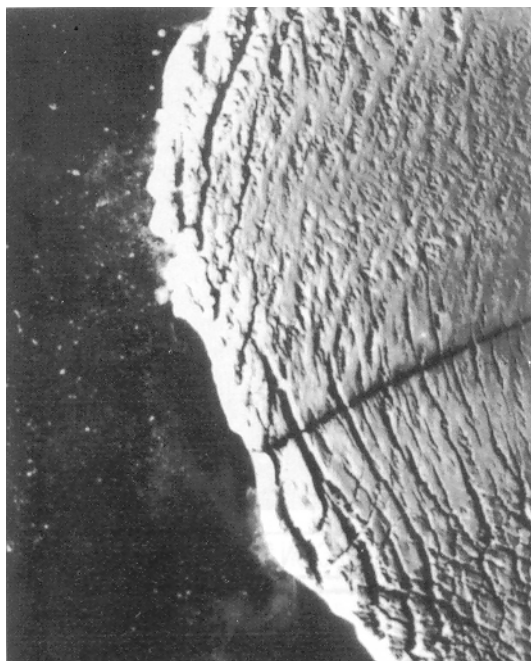
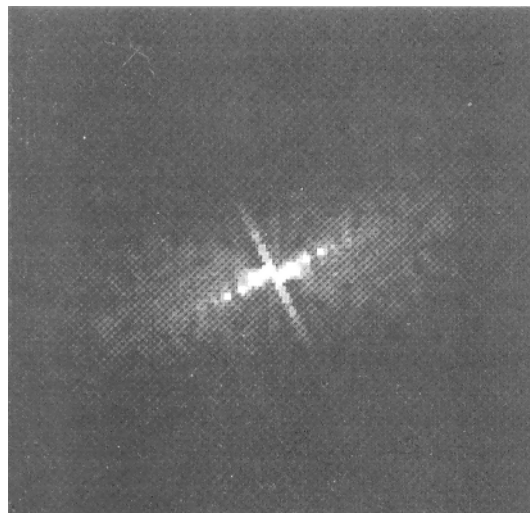
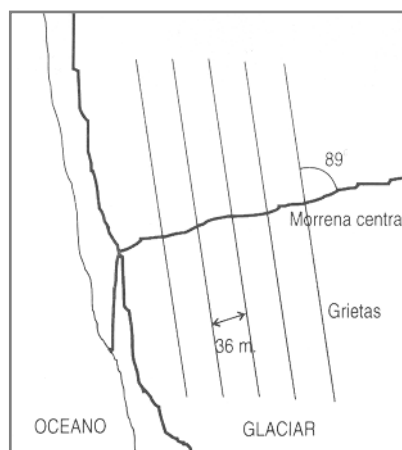


Fig. 3. Subimagen de trabajo del campo de grietas, correspondiente a 1956.

co y lineal a analizar en el tratamiento de Fourier. En el esquema de la figura.4 puede observarse la imagen en el dominio de frecuencias de la figura 3. El rasgo lineal de color blanco que aparece en la imagen en orientación norte-sur, corresponde a la morrena central.



SITUACIÓN EN 1956



SITUACIÓN EN 1986

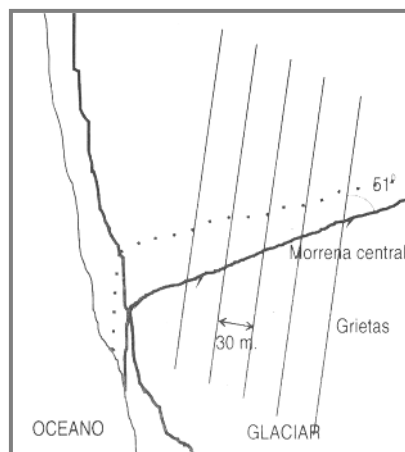


Fig. 4. Dominio de Fourier del campo de grietas de 1956 y esquemas de la geometría de las grietas y la morrena central en 1956 y 1986

En orientación este-oeste aparece una nube de puntos, apreciándose unos puntos de mayor intensidad que corresponden a los picos de frecuencia de la distribución espacial de las grietas en la imagen. Calculando la longitud de onda asociada al máximo frecuencias, previa corrección de las dimensiones de la imagen, resolución y escala de la imagen de trabajo, podemos encontrar cuál es la separación y orientación principal respecto a la morrena central, del sistema de grietas. En la figura 4, se ha representado también el resultado del análisis para la situación de la zona terminal de Bahía Falsa en 1956 y en 1986. Se aprecia con toda claridad como mientras la separación típica en el sistema de grietas, prácticamente no ha variado en el tiempo, su orientación respecto a una morrena central que ha derivado hacia la zona del frente alimentada por montaña, si lo ha hecho, pasando de ser un campo de grietas prácticamente perpendicular a la divisoria de flujo, a tener una orientación de 51°.

ii) Fluctuaciones del frente glaciar de Bahía Falsa:

Atendiendo a nuestro propósito de actualizar la cartografía sobre la isla Livingston y ofrecer así mismo un documento que tanto por calidad visual como por escala pudiese constituir un soporte de trabajo para el colectivo científico que trabaja en este entorno geográfico, nos inclinamos por elaborar una cartografía digital a partir de imágenes de satélite.

La vista estereoscópica de imágenes del satélite SPOT, su excelente resolución espacial de 10 metros en su modo pancromático, así como la órbita helio sincrónica de la plataforma (el terreno en cada órbita es vista en las mismas condiciones de iluminación solar), hizo obvia la elección de este tipo de imágenes para la elaboración del documento cartográfico, que a partir de ahora denominaremos Ortoimagen.

El sistema de proyección del documento *Ortoimagen de la isla Livingston*, es Lambert Cónica Ortomórfica, siguiendo las recomendaciones del SCAR, para el rango de latitudes en el que trabajamos, las características principales de la *Ortoimagen de la Isla Livingston* quedan resumidas en la tabla 1. La importancia de este documento reside en el hecho de que representa nuestra base cartográfica de referencia sobre la que estudiar en el tiempo el comportamiento del casquete glaciar, en particular en la zona de Bahía Falsa.

Proyección	Lambert Cónica Ortomórfica
Latitud origen	70° S
Latitud origen	60° W
Factor de escala en el origen	0,9931
Elipsoide de referencia	Internacional

Tabla 1

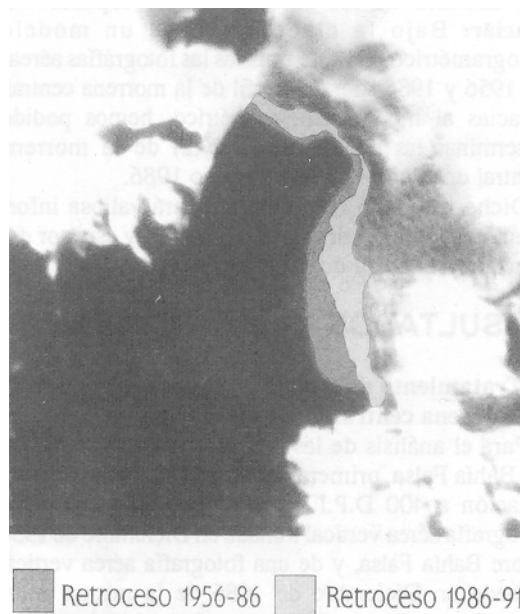


Fig. 5: Imagen de las fluctuaciones de la zona terminal del glaciar de Bahía Falsa, en los periodos 1956-86 y 1986-91

Para el estudio del comportamiento temporal de las fluctuaciones del casquete glaciar de las islas Livingston y Greenwich contamos, además de las ya citadas imágenes SPOT de 1991 y la cartografía británica elaborada a partir de las fotografías aéreas tomadas en 1956, con imágenes de satélite LANSAT-MSS de 1986 y LANDSAT-TM de 1988 y 1989.

Cabe destacar que de toda la información temporal disponible, tan solo en tres documentos podemos delimitar la geometría del casquete, glaciar en su totalidad. En la imagen de 1986, existen zonas de la isla Livingston donde la cobertura de nubes no permite delimitar el frente glaciar, y en la imagen de 1989, debido a los parámetros orbitales en la toma de las imágenes una parte de la Isla no queda cubierta. Por tanto nos encontramos con información completa en los años 1956, 1988 y 1991. Afortunadamente, en la zona de Bahía Falsa si contamos con información de 1986 para determinar la posición del frente. En la figura 5, aparece una subimagen de dicha cartografía temática en la zona de Bahía Falsa, donde quedan representadas las fluctuaciones del frente (retroceso) en los periodos 1956-86 y 1986-91.

Con el objetivo de estimar el ritmo de dichas fluctuaciones, definimos el llamado parámetro de fluctuación (Pt), como el cociente entre la superficie neta que ha fluctuado en un cierto periodo y el producto entre el número de años de dicho periodo (7) y la longitud del frente glaciar (L) al inicio de cada periodo (Eq.1)

$$P_f = \frac{S}{T \cdot L} \tag{1}$$

Los valores obtenidos para el parámetro de fluctuación (el parámetro tiene unidades de m/año) para la zona de Bahía Falsa quedan expresados en la tabla 2.

	1956-86	1986-91
Parámetro de fluctuación	2.39	22.55

Tabla 2

iii) Estudio de los cambios en el espesor de hielo:

Con el objetivo de analizar los cambios en la topografía superficial del glaciar, se ha elaborado un modelo fotogramétrico que, a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas de 1956 y 1986, permite reconstruir la posición (x,y,z) de una colección de puntos reconocibles en los dos pares.

En nuestra zona de estudio, dichos puntos fueron tomados sobre la morrena central que separa los dos flujos glaciares, tanto en los pares correspondientes a las fotografías aéreas de 1956, como en las de 1986. En la figura 6, se pueden observar en planta y perfil los resultados de dicho análisis, donde queda de manifiesto una disminución del grosor de hielo en la zona de la morrena central de Bahía Falsa (Fig 6b), así como un desplazamiento en el tiempo de la posición de dicha morrena (Fig 6a)

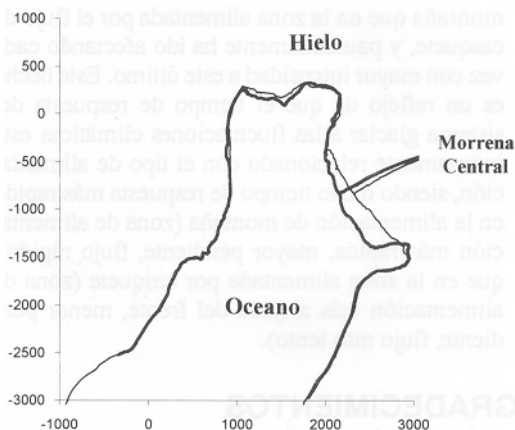
En la figura 6a se aprecia así mismo el retroceso del frente que había sido cartografiado en el apartado ii), en el periodo 1986-91.

El análisis fotogramétrico de pares estereoscópicos de fotografías aéreas de 1956 y 1986, no tan sólo ha confirmado un importante retroceso del frente del casquete glaciar, sino también una disminución del espesor glaciar, parámetro fundamental en el momento de establecer la situación de balance de masas del sistema, que es, como hemos constatado, claramente negativo.

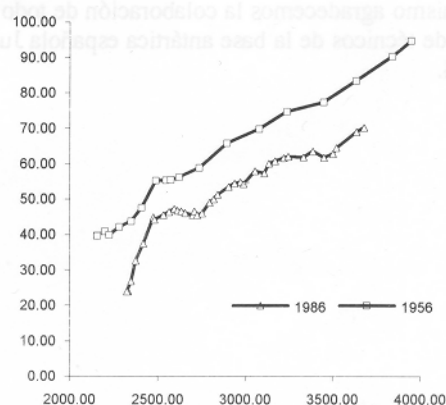
CONCLUSIONES

El estudio del sistema glaciar de Bahía Falsa, a partir de las herramientas que la teledetección nos ofrece, ha aportado las siguientes conclusiones.

- a) El glaciar se encuentra en una clara situación de balance negativo, tanto por el retroceso del frente del glaciar, como por la disminución del espesor del mismo, que puede estimarse entre los 15 y 20 metros.
- b) El ritmo de retroceso ha aumentado de forma notoria, pasando de 2.39 m/año en el periodo 1956-86, a 22.55 m/año en el periodo 1986-91.
- c) Se ha apreciado un cambio en la dinámica de los dos flujos de hielo que delimita la morrena central, tal y como queda demostrado tanto por la



(a)



(b)

Fig. 6. Resultados en planta y sección del análisis fotogramétrico de pares de fotografías aéreas sobre Bahía Falsa, tomadas en 1956 y 1986.

deriva en la posición de la morrena central hacia el flujo montañoso, como por el cambio de dirección del sistema principal de grietas de la zona terminal del glaciar.

- d) El retroceso del frente fue inicialmente más importante en la zona alimentada por el flujo de montaña que en la zona alimentada por el flujo de casquete, y paulatinamente ha ido afectando cada vez con mayor intensidad a este último. Este hecho es un reflejo de que el tiempo de respuesta del sistema glaciar a las fluctuaciones climáticas está íntimamente relacionado con el tipo de alimentación, siendo dicho tiempo de respuesta más rápido en la alimentación de montaña (zona de alimentación más rápida, mayor pendiente, flujo rápido), que en la zona alimentada por casquete (zona de alimentación más alejada del frente, menor pendiente, flujo más lento).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ANT93-0852.

Así mismo agradecemos la colaboración de todo el equipo de técnicos de la base antártico española Juan Carlos I.

BIBLIOGRAFÍA

- CALVET J. y CORBERA J. 1993. Fluctuations of the ice cap on Livingston Island-South Shetland, from 1956 to 1991, *SELPER*, Vol. 9 nº1-2. pp 31-35.
Departament de Geologia dinàmica, Geofísica i Paleontologia (Universitat de Barcelona), Institut Cartogràfic de Catalunya (1992). Ortoimagen de la Isla de Livingston, 1:100.000. D. Legal: B 29 039 - 92
- GORDON, J.E. and TIMMIS, R.J. 1992. Glacier fluctuations on South Georgia during the 1970s and early 1980s. *Antarctic Science*, 4(2), 215-226.
- GUGAN, D.J., 1987. Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery. *Photogrammetric Record*, 12(69):349-355.
- NOBLE, H.M. 1965. Glaciological observations at Admiralty Bay, King George Island, in 1957- 58, *British Antarctic Survey Bulletin*, 5, 1-11.
- PALA, V. and PONS, X. 1994. Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, (Forthcoming articles).
- SCHWITTER, M.P. and RAYMOND, C.F. 1993. Changes in the longitudinal profiles of glaciers during advance and retreat, *Journal of Glaciology*, 39(133), 582-590.
- SIEVERS, J and BENNETT, H. 1989. Reference systems of maps and geographic information system. *Antarctic Science*, 1(4), 351-362.
- THOMSON, J.W. and COOPER, A.P.R. 1993. The SCAR Antarctic digital topographic database. *Antarctic Science*, 5(3), 239-244.