

# Fotogrametría terrestre en el Glaciar Johnsons, Isla Livingston, Antártida

## Terrestrial photogrammetry at Johnsons Glacier, Livingston Island, Antarctica

V. PALÀ<sup>(1)</sup>, J. CALVET<sup>(2)</sup>, D. GARCÍA SELLES<sup>(2)</sup> y L. XIMENIS<sup>(2)</sup>

*(1) Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona. vicenep@icc.es*

*(2) Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. Zona Universitària de Pedralbes. 08028 Barcelona*

### RESUMEN

Para la realización de cartografías de detalle de zonas en las que no se dispone de fotografías aéreas o en las que las medidas topográficas clásicas, con teodolito o estación total, no son posibles o dificultosas, se propone la utilización de las técnicas de fotogrametría aplicadas a fotografías terrestres. Este artículo presenta los principios básicos de la fotogrametría, la metodología de trabajo a seguir y un ejemplo de su aplicación. Los resultados del ejemplo se comparan con medidas topográficas clásicas.

*Palabras Clave:* Fotogrametría terrestre. Isla Livingston. Antártida.

### ABSTRACT

In order to apply precise cartography over areas where aerial photography is not available and classical topography is difficult or impossible, we propose photogrammetric techniques applied to terrestrial photography. In this paper we review the basic foundations of photogrammetry and the steps in the working methodology. We present application as example practical and compare the results to classical topographic measurements.

*Keywords:* Terrestrial photogrammetry. Livingston Island. Antarctica.

---

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Johnsons Glacier is a little basin belonging to the glacier cap in Livingston Island (Fig. 1). Since 1994-95, some studies in glaciology have been carried out there, providing yearly displacement measurements and ice accumulation and ablation rates.

The ash layers in this glacier come from a volcano eruption in Deception Island. These layers, which are isochronal lines inside the ice, provide highly valuable information about glacier system dynamics and, when level age data are available, ice accumulation rate can be established.

The Johnsons Glacier ash layers are observed both in the glacier front when the ice reaches the sea and in the glacier surface. Meteorological difficulties encountered when working in the field and glacier front inaccessibility make terrestrial photogrammetry an effective technique for ash layer cartography.

The technique requires the use of photogrammetric cameras, that is, stable calibrated laboratory photographic cameras. Photographs have to be taken from at least two different positions to provide stereoscopic capability. Photogrammetry allows stereoscopic computation even when the pictures we take do not provide an acceptable stereoscopic view because of physical terrain constraints.

The cartographic results obtained from the study of one ash layer are presented. The measurements were made using both a total station and a photogrammetric camera.

### **Theoretical and methodological aspects in Photo grammetry**

A photogrammetric block is a set of photographs to be “processed” simultaneously, together with the field information. The block parameters or unknowns are the elements we want to determine by means of a priori measurements. Two different types of measurements are possible, direct or indirect ones.

In a direct measurement we measure directly a parameter, for instance, a tri-dimensional point parameter being measured using a GPS. On the other hand, the measured values in an indirect measurement are explained or estimated as a set of functions of some parameters. These functions are called observation models (models).

The equations describing error in the measurements are called observation equations. The error is the difference between the a priori measured value and the estimated one, that is, the value calculated by the model. On the assumption that there is redundancy in the photogrammetric block (that is more equations than parameters exist), the measurements are mutually independent of each other, and the observations contain only random errors following a normal distribution, we find the optimal solution for the parameters to be the one that minimizes the sum of the squares of the errors. This is called the least squares solution [1,2]. A photogrammetric adjustment is an algorithm or program providing the least squares solution for all the parameters in the photogrammetric block.

The parameters or unknowns to be solved in a least-square adjustment are the following:

- Tridimensional position of a point (P3D) in the ground coordinate system. The point will be any one observed in a given photograph ( $X, Y, Z$  in Fig. 2), or a point used to take a photograph ( $X_C, Y_C, Z_C$  in Fig. 2).
- Camera attitude for each photograph (ACT). The camera orientation in space is defined by 3 rotations to be applied to the 3 axes of a coordinate system local to the camera ( $x, y, z$  in Fig. 2) describing the orientation of this system in relation to the ground coordinates system ( $X, Y, Z$  in Fig. 2).

The *a priori* measurements are:

- a) The image position of a point projected to the photograph ( $x, y$ ).
- b) The ground position of a point, either a point that is visible in a photograph or a point from which a photograph is taken.
- c) Observation of a distance between two points.

A very simple observation equation is established for any direct measurement: the difference between the parameter and its measured value. Moreover, a function (model) will estimate the value for any indirect measurement. The required models for our case study are based on collinearity and coplanarity equations [1], on one hand, and on the point distance on the other hand.

### 1) Collinearity equations

These two equations describe the fundamental assumption that the exposure centre, the ground point and its corresponding image point all lie on a straight line, that is, they describe the image acquisition geometry. Two observation equations are established for each observed point in a photograph. Those points that were not measured in the field are identified (have their position measured) in at least two photographs. Therefore three positioning unknowns ( $X, Y, Z$ ) for a point can be solved from four equations.

### 2) Coplanarity equation

The major advantage of this equation, in comparison to the collinearity equations, lies in its final simplification, since the first one does not involve the ground point position and save its corresponding parameter in the block. This equation makes the relative orientation of two photographs possible, providing a good approximation approach to the parameters for the final adjustment which, by means of the collinearity equations, will involve the field information in order to get the *absolute orientation* of the photographs.

For each tie point, that is, a ground point observed in two photographs, a unique observation equation is formed. This equation states the error as the lack of coplanarity for two vectors. These vectors are connecting the tie point and the projection centre of each photograph.

### 3) Distance equation

This is the error equation for Euclidean distance measurement. The distance can be measured either in the field or by means of existing maps.

## CARTOGRAPHY OF THE ASH LAYERS IN JOHNSONS GLACIER

The ash layers are easy to recognize, since they are one to two centimetres thick and their dark colour makes them stand out clearly from the ice, both in the field and in the photographs. However, when the angle between the stratum plane and the topographic surface is too small, the layer may appear badly drawn, causing positioning errors of about one meter.

Both in topographic and photogrammetric surveys, there is a need for a set of points called *coordinate vertices*, having known, relative or absolute, coordinates (Fig. 3). These vertices have been placed on rocky placements providing, as far as possible, good views of the landscape. They have also been used as photograph capture points and, at the same time, as Ground Control Point (GCP) measurement stations. In order to reference the vertex and control points to a 3D system defined using the UTM planimetry subsystem, two points with well-known UTM coordinates have been used.

### 1.- Cartography using the total station

The radiation method was applied. The total station was installed in one of the vertices and oriented using another vertex as a reference point. Later, placing a reflector on each target point (26 points in total, see Fig. 3), the azimuth and zenith angles together with the distance to the point were recorded.

Following the technical specifications manual, the angular precision for the GEODOLITE 506 total station is 6" and the precision distance is  $\pm 5\text{mm} + 5\text{ppm}$ . In our case study the distance range is 1035-2235 m. Table 2 summarise the possible errors.

## 2.- Cartography using a photo grammetric camera

### a) Photograph acquisition and camera positioning

In our case study, the pictures were taken from two vertices, placed at the top of a hill, providing spectacular (depending as usual on meteorological conditions) panoramic views of the glacier surface (Fig. 3). Two photographs were taken from the Johnsons vertex, presenting lateral overlapping, and two more were taken from Johnsons-B with the same overlapping conditions. Both sets have enough overlapping to provide stereoscopic vision (Fig. 4). The pictures were taken on 19 February 1999, using a Hasselblad MK-70 camera with a 100 mm focal length and a 6x6 film format. The film was AGFAPAN APX 25.

### b) Field information acquisition

The position for a set of GCP, usually selected on rocky placements from the glacier flanks, was measured from Johnsons vertex using the total station (Fig. 3). The use of points lying on the glacier is not recommended since the ice displacement makes them useless for future photographs.

### c) Photographs scanning

The scanning density is 1693,333 ppi (15  $\mu\text{m}$  per pixel).

### c) Photogrammetric adjustment

Two different types of points have been identified: a) tie points, that is, unknown-position points on the ground; b) GCP with ground position coordinates that are well known (Figs. 3 and 5).

During the system adjustment, the camera positions are considered to be perfectly known (without error) and their related parameters fixed to constant values. The adjustment process computes the attitude angles and distributes the error between the ground position estimation, for the GCP, and the image position (row, column) estimation, for all the points (GCP and tie points) that have been identified in the photographs. The final errors are displayed in Table 3.

### e) Measurement

After the adjustment, a set of points (184 points in Figs. 3 and 6) along the layer trace on the surface are identified and their position computed by photogrammetry.

## RESULTS

Since the points that were measured using the total station and that ones measured with a photogrammetric camera are not the same (Fig. 6), the distance from those points (measured by the topographic station) to the trace (defined by the camera measured points) is computed. Table 4 provides, for each point, the geometric distance  $D_g$  (in XYZ space system), the planimetric or reduced distance  $D_r$  (in XY space subsystem) and the height difference.

Although the error in planimetry (0.95 m.) is similar to the altimetric error (1.02 m.), a systematic shift that places the trace one meter over the total station measurements is observed for the altitudes. This fact may be caused by an ill-conditioned adjustment due to a non-homogeneous point distribution, since the points are basically on one side of the photographed landscape (see Figs. 3 and 4).

The glacier surface has several structures (different tonality traces corresponding to specific ice layers, ash layer traces and fractures) that may be recognized in the photographs. Its cartography using a total station is almost impossible due to time constraints in the field campaigns and adverse meteorological conditions (fog and strong wind). Photogrammetric errors are a minor problem compared to those of impracticability.

Glacier dynamics studies need the acquisition of temporal data and the generation of their corresponding cartography. In the 'mapped' sector of the glacier, the horizontal component of the ice movement is about 20 meters per year, so the photogrammetric errors are perfectly acceptable for measuring that movement on a yearly basis. The vertical component should be measured again after longer periods of time since the glacier may move vertically, although less than one meter per year.

The position of the ash trace on the surface changes as a function of several concurrent factors: ice flow, ice ablation and layer orientation. Their combined action makes the trace just slightly shifted, despite the significant speed of the ice. Comparing the trace position in summer 94-95 to the position in summer 98-99, fully acceptable results are obtained by using photogrammetric tools, since displacements are big enough when compared to the errors caused by the measurements.

## CONCLUSIONS

Terrestrial photogrammetry surveys, as an alternative technique to topographic surveys, permit:

- cartography of remote areas,
- moving most of the work from outdoors (the field) to indoors (an office). This is a point to be considered since field limitations may be really restrictive, especially when weather conditions reduce the effective time in the field.
- to have images as useful and realistic graphical documentation,
- periodic comparison of the photographs.

Terrestrial photogrammetry requires:

- a photogrammetric camera, that is, a precise enough one,
- an appropriate photogrammetric software,
- some basic knowledge of photogrammetry.

To attain an acceptable precision the cartographer needs:

- appropriate positions to take the photographs from,
- to measure, in the field, some well distributed ground control points (GCP's),
- the GCPs to be clearly and precisely identifiable in the photographs.

Despite the evidence that the photogrammetric results are not as precise as those given by the total station, they are accurate enough for the displacements to be measured and provide, in addition, practical advantages. Sometimes photogrammetry make the measurements just possible under specific constraints or limitations.

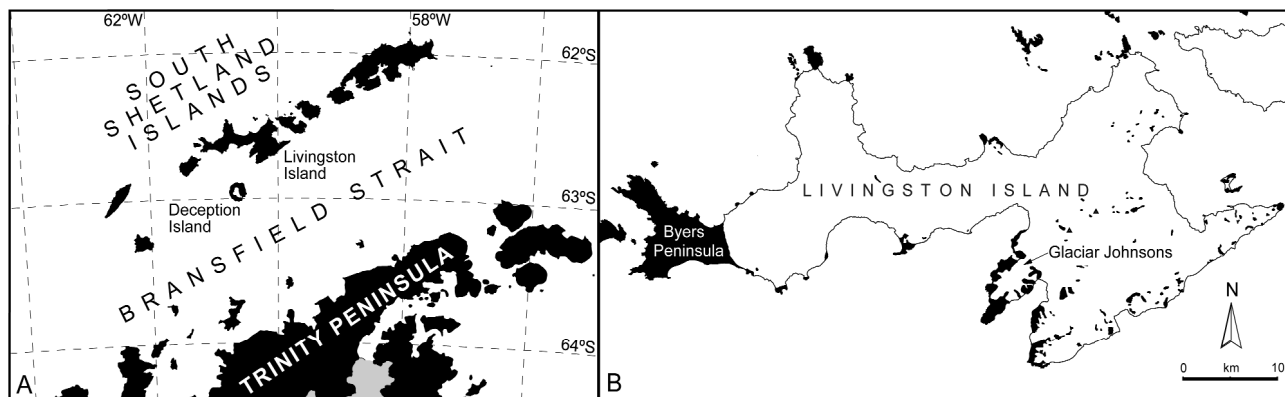


Figura 1. A) Situación de la Isla Livingston. B) Situación del Glaciar Johnsons en la Isla Livingston. En blanco se representa el casquete glaciar y en negro las áreas descubiertas.

Figure 1. A) Livingston Island situation. B) Johnsons Glacier situation.. White for the glacier cup and black for the uncovered areas.

## INTRODUCCIÓN

El Glaciar Johnsons es una pequeña cuenca que forma parte del casquete glaciar que cubre la Isla Livingston (Fig. 1). En dicho glaciar se están llevando a cabo estudios glaciológicos, con medidas anuales de desplazamiento del hielo y tasas de acumulación y ablación desde 1994-95 hasta la actualidad.

Intercalados en el hielo del glaciar hay una serie de niveles de cenizas, provenientes de las erupciones del volcán de la Isla Decepción. El estudio de la disposición actual de estos niveles, que son líneas isócronas dentro del hielo, proporciona información sobre la dinámica del sistema glaciar y, cuando se dispone de datos sobre su edad, permite establecer las tasas de acumulación de hielo.

En el Glaciar Johnsons, al igual que en la casi totalidad de la isla, el hielo llega al mar formando acantilados que superan los 30 metros de altura. En estos acantilados aparecen los niveles de cenizas (Calvet et al., 1993). Por su situación y por las continuas caídas de bloques que en ellos se producen, estos acantilados son inaccesibles y no es posible tomar medidas *in situ* de la posición de las capas de cenizas. Sin embargo, sí se pueden tomar medidas en la pared del acantilado utilizando un teodolito y operando por intersección, es decir tomando medidas desde dos puntos diferentes, sin necesidad de acceder al punto que se desea medir.

Los niveles de cenizas también afloran en la superficie del glaciar, siendo en este caso su acceso relativamen-

te fácil, por lo que se puede realizar su cartografía utilizando un teodolito con distanciómetro incorporado, es decir una estación total. Sin embargo las condiciones meteorológicas adversas (niebla, viento, etc.) frecuentemente dificultan o impiden este tipo de trabajos.

Estas dificultades meteorológicas junto con la imposibilidad de acceder a los frentes glaciares, hacen que la fotogrametría terrestre se haya considerado una técnica eficaz para la cartografía de los niveles de cenizas.

Esta técnica se fundamenta en el uso de cámaras fotogramétricas, es decir, cámaras fotográficas estables y calibradas en el laboratorio. Cada espacio de estudio debe ser fotografiado, como mínimo, desde dos posiciones distintas, de manera que proporcionen un recubrimiento estereoscópico. La base (B en la Fig. 2), o distancia entre las posiciones de toma de las fotografías, ha de ser la adecuada para alcanzar la precisión deseada. Incluso cuando por las características del terreno es imposible obtener fotografías aptas para una correcta visión estereoscópica, esta técnica permite realizar cálculos estereoscópicos y, por lo tanto, extraer resultados a pesar de una cierta pérdida de precisión en los mismos.

La fotogrametría terrestre amplía las posibilidades de la estación total. De hecho, para cada punto identificado en un par estereoscópico, se realizan cálculos trigonométricos similares a los que se realizan en topografía para obtener su posición en un espacio tridimensional. La fotogrametría presenta la ventaja de recoger una información gráfica con contenido métrico,

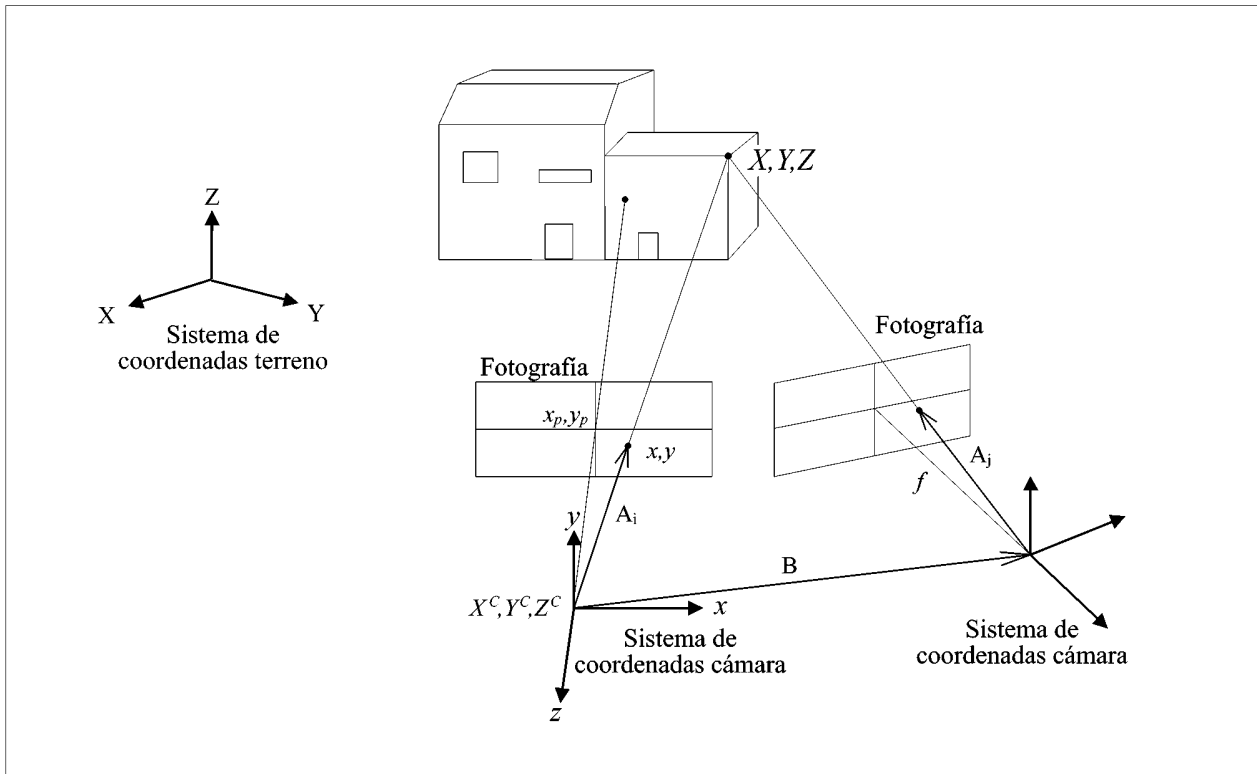


Figura 2. Geometría y sistemas de coordenadas en un bloque fotogramétrico.

Figure 2. Geometry and coordinate systems in a photogrammetric block.

cuya extracción se realiza en el gabinete, ampliando así el tiempo hábil de tratamiento de la información de campo. Permite también su comparación con documentos fotográficos del pasado y del futuro y de este modo completar series temporales.

El trabajo fotogramétrico realizado ha consistido fundamentalmente en establecer la metodología de trabajo básica para poder hacer mediciones, las cuales se obtienen como resultado del ajuste fotogramétrico. En el futuro es posible extender las prestaciones de esta metodología utilizando estaciones fotogramétricas digitales con visión 3D. Los algoritmos para la consecución del trabajo han sido desarrollados en el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), incluyendo las ecuaciones de observación necesarias para las condiciones restrictivas de captura de datos en la zona.

En el presente trabajo presentamos los resultados de la cartografía de una capa de cenizas que aflora a la superficie del Glaciar Johnsons, realizada utilizando tanto la estación total como la cámara fotogramétrica, lo

cual nos permite contrastar los resultados de las dos técnicas.

## ASPECTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS DE LA FOTOGAMETRÍA

### Principios básicos de la Fotogrametría

En este apartado introducimos los fundamentos y conceptos básicos de la fotogrametría (Wong, 1980), que derivan del análisis y estudio de fotografías obtenidas a partir de cámaras métricas. Las fotografías son visiones de un espacio tridimensional en el que deseamos medir. Para realizar mediciones de precisión en este espacio es necesario conocer perfectamente la orientación externa (posición y actitud) de la cámara en el momento de captar cada fotografía. El error en la medición de la posición de un punto será función de:

- la precisión con la que establezcamos la orientación externa (posición y actitud),

	<b>Colinealidad</b>	<b>Coplanaridad</b>	<b>Distancia</b>
<b>Parámetros (incógnitas)</b>	Posición punto (P3D)	Posición cámara foto 1 (P3D)	Posición punto 1 (P3D)
	Posición cámara (P3D)	Posición cámara foto 2 (P3D)	Posición punto 2 (P3D)
	Actitud cámara (ACT)	Actitud cámara foto 1 (ACT) Actitud cámara foto 2 (ACT)	
<b>mediciones</b>	Posición punto en foto	Posición punto en foto 1 Posición punto en foto 2	Distancia entre puntos
<b>Datos auxiliares</b>	Distancia focal	Distancia focal	
	Punto principal	Punto principal	
	Orientación interna	Orientación interna	

Tabla 1. Características de los modelos que aplicamos a las mediciones indirectas.

Table 1. Indirect model features.

- la capacidad de reconocimiento o identificación del punto en las fotografías, y
- el ángulo que forman los vectores que van de los centros de proyección de las fotografías (dos como mínimo) hasta el punto.

Denominamos *bloque fotogramétrico* al conjunto de fotografías que vamos a “tratar” simultáneamente (más adelante comentaremos en qué consiste este tratamiento), junto con la información de campo relativa al espacio visto en dichas imágenes. Los *parámetros o incógnitas* de un bloque son todos aquellos elementos (posición de los puntos desde los que se han tomado las fotografías, actitud de la cámara y posición de los puntos del terreno) que queremos determinar en base a unas *mediciones* realizadas a priori, cuantas más mejor, y que pueden ser de dos tipos: directas o indirectas.

En una medición directa obtenemos directamente el parámetro que hemos de ser capaces de determinar, por ejemplo, medimos directamente un parámetro de tipo “punto tridimensional” con un GPS, es decir, la posición de un punto del territorio en un espacio determinado. En cambio, en una medición indirecta, los valores medidos están relacionados con los parámetros mediante una función o expresión matemática, que llamaremos *modelo de observación* (modelo, a partir de ahora), el cual explica o estima dichos valores a partir de los parámetros. En concreto, las ecuaciones de colinealidad (que veremos más adelante) establecen un modelo que explica las mediciones realizables a partir de las fotografías. En estas mediciones observamos, sobre el plano de la película, la posición de un punto del territorio (punto tridimensional) que fue proyectado hacia la misma.

En general, se presenta la necesidad de determinar parámetros para los que no disponemos de medidas previas (medidas directas). Éste es el caso, normalmente, para la actitud de las cámaras y para todos los puntos visibles en las fotografías de los cuales no conocemos su posición en el terreno y, en algunos casos, para la propia situación de las cámaras.

Llamamos *ecuaciones de observación* a las ecuaciones que describen el error en las mediciones. Este error se establece como la diferencia entre el valor medido a priori y el valor explicado, esto es, el calculado por el modelo. Asumiendo que en un bloque fotogramétrico tenemos redundancia, es decir más ecuaciones que parámetros, que las mediciones son independientes y que el error es aleatorio y sigue una distribución normal, tenemos que la solución óptima para los parámetros es la que minimiza el sumatorio del cuadrado de los errores, conocida como solución mínimo cuadrática (Wong, 1980; Elassal, 1983).

Un *ajuste fotogramétrico* es un algoritmo o programa que proporciona la solución mínimo cuadrática para todas los parámetros de un sistema de ecuaciones de observación. Estas ecuaciones son, como hemos dicho, función de unos parámetros que queremos resolver o *incógnitas*. En concreto se determinan: los parámetros o incógnitas de orientación exterior (posición y actitud de la cámara) de las fotografías y las posiciones terreno de todos los puntos observados en alguna imagen.

A menudo, los modelos y por extensión las ecuaciones de observación, no son lineales y deben ser linealizados antes de implementarlos en el ajuste por mínimos cuadrados (*Least Squares Adjustment*). Una forma común de linealizar es mediante la aproximación de Newton de primer orden, que a partir de unas aproximacio-



nes para todos los parámetros, y asumiendo que la función es continua y es lineal en ese entorno, desarrolla la ecuación a partir de las derivadas parciales de la misma respecto de todos los parámetros. La solución mínimo cuadrática a este conjunto de ecuaciones lineales no proporciona los valores de los parámetros desconocidos, sino que proporciona las correcciones más probables a las aproximaciones de dichos parámetros. Estas correcciones se aplicarán antes de empezar una nueva iteración, esta vez con unos valores para los parámetros más próximos a la solución final. De este modo, el ajuste fotogramétrico (ajuste por mínimos cuadrados) requiere, para empezar, de una inicialización o aproximación inicial para todos los parámetros, seguido de varias iteraciones para eliminar progresivamente el error introducido por la linealización. El algoritmo finaliza, deja de iterar, cuando las correcciones a los parámetros son negligibles.

Puesto que se asume que las mediciones realizadas presentan un error inherente a la propia medición (que depende de la precisión del método y del propio instrumento, de la experiencia del operador, etc.), en el ajuste fotogramétrico se admite un cierto grado de libertad que expresan las desviaciones tipo a priori asociadas a cada medición. Estas desviaciones tipo indican en qué medida cada modelo debe aproximar la medición.

### Ecuaciones de observación y parámetros

Como hemos dicho anteriormente, las ecuaciones de observación describen el error cometido al querer explicar unos datos medidos u observados como el valor calculado por unos modelos que son funciones de los parámetros o incógnitas. Su expresión genérica es como sigue:

$$e = m - \hat{m}(P)$$

donde  $m$  es la medida realizada,  $\hat{m}$  es la estimación que podemos establecer con el modelo, y  $P$  son los parámetros.

Los parámetros, o incógnitas a resolver a partir de un ajuste por mínimos cuadrados, son los siguientes:

- Posición tridimensional de un punto (P3D), en el sistema de coordenadas terreno. El punto será un cualquiera observado en alguna fotografía ( $X, Y, Z$  en la Fig. 2) o punto desde el cual se haya tomado cualquier fotografía ( $X^C, Y^C, Z^C$  en la Fig. 2).
- Actitud de la cámara para una fotografía (ACT). Dicha orientación se define, en el espacio, a partir de 3 rotaciones que se aplican a los 3 ejes de un sistema de coordenadas local a la cámara ( $x, y, z$  en la Fig. 2, donde el plano de la película determina el plano  $xy$ , y el eje óptico coincide con el eje  $z$ ) y define la rotación de dicho sistema respecto del sistema de coordenadas terreno (Fig. 2).

Las mediciones *a priori* que podemos realizar son:

- a) La posición imagen de un punto proyectado en una fotografía ( $x, y$ ). En caso de que los datos observables sean la posición dentro de una imagen digital (fila, columna), será necesario establecer una orientación interna que convierta, previamente al ajuste, dichos valores en coordenadas sobre el plano de la película.
- b) La posición de un punto en el territorio, ya sea un punto observable en alguna de las fotografías o un punto desde el que se han tomado las mismas.
- c) Observaciones de distancia entre dos puntos.

Para cualquier medición directa de un parámetro se establece una ecuación de observación tan sencilla como la diferencia entre el parámetro y el valor observado para el mismo. Así, por ejemplo, una medición GPS introduce 3 ecuaciones de observación:

$$\begin{aligned} e_X &= X_{GPS} - X \\ e_Y &= Y_{GPS} - Y \\ e_Z &= Z_{GPS} - Z \end{aligned}$$

Para una medición indirecta, el valor estimado será función de los parámetros. A continuación resumimos los modelos requeridos para nuestro estudio: los dos basados

Precisión del GEODOLITE 506		
Angular	Distancia	
6"	±5mm+5ppm	
Error máximo en UTM para el conjunto de puntos medido		
X	Y	Z
±0,059 m	±0,067 m	±0,071 m

Tabla 2. Errores máximos en la posición de los puntos, debidos a la precisión de la estación total GEODOLITE 506.

Table 2. Errors in the point measurements due to the GEODOLITE 506 total station precision.

Punto	Coord. estación total – coord. Fotogrametría (metros)				Coordenadas imagen identificadas – coordenadas imagen ajustadas (píxeles)					
	Δ X	Δ Y	Δ Z	Δ XYZ	Fotos desde vértice Johnsons			Fotos desde vértice Johnsons-B		
					Δ columnas	Δ filas	Δ total	Δ columnas	Δ filas	Δ total
1	-1,05	-0,28	-0,21	1,107	0,007	0,354	0,35	0,004	-0,360	0,36
2	-0,78	-1,32	-0,11	1,537	0,002	0,115	0,11	0,001	-0,116	0,12
3	0,70	-0,77	-0,34	1,095	-0,003	-0,128	0,13	-0,002	0,129	0,13
5	-0,99	-0,98	0,11	1,397	0,001	0,029	0,03	0,000	-0,029	0,03
6	0,40	-0,38	0,01	0,552	-0,004	-0,197	0,20	-0,002	0,198	0,20
7	-0,44	-0,32	0,16	0,567	-0,003	-0,154	0,15	-0,002	0,154	0,15
15	-0,97	-0,48	-0,34	1,134	0,053	1,381	1,38	0,018	-1,354	1,35
16	1,11	0,34	0,22	1,182	-0,027	-0,549	0,55	-0,007	0,536	0,54
17	0,56	0,77	0,27	0,990	0,051	0,973	0,97	0,013	-0,947	0,95
18	0,29	0,09	0,15	0,339	-0,026	-0,524	0,52	-0,007	0,516	0,52

Tabla 3. Diferencia entre la posición de los GCP medida con la estación total y la posición calculada por fotogrametría, después del ajuste.

Table 3. Position differences for the GCP's, between the the total station measurements and the positons calculated by the photogrametric ajustement.

en las ecuaciones de colinealidad y coplanaridad, más el de distancia entre puntos.

### Modelos de observación

#### Ecuaciones de colinealidad

Describen la relación existente entre un punto del terreno y su posición o proyección en la fotografía. En concreto expresan la condición de que, para cada punto del territorio, el vector que une ese punto con el centro de proyección de la cámara, debidamente rotado para obtener sus coordenadas en el sistema local de la imagen, sea colineal con el vector que une la imagen del punto sobre la película y el centro de proyección. En resumen, estas ecuaciones describen la geometría de formación de la imagen:

$$\hat{x} = x_p - f \frac{m_{11}(X-X^c) + m_{12}(Y-Y^c) + m_{13}(Z-Z^c)}{m_{31}(X-X^c) + m_{32}(Y-Y^c) + m_{33}(Z-Z^c)}$$

$$\hat{y} = y_p - f \frac{m_{21}(X-X^c) + m_{22}(Y-Y^c) + m_{23}(Z-Z^c)}{m_{31}(X-X^c) + m_{32}(Y-Y^c) + m_{33}(Z-Z^c)}$$

donde  $\hat{x}, \hat{y}$ , son las coordenadas imagen estimadas por el modelo;

$x_p, y_p$  es el punto principal (intersección del eje óptico con el plano de la película);

$m_{ij}$  son los coeficientes de la matriz de rotación;

$X, Y, Z$  es la posición terreno del punto;

$X^c, Y^c, Z^c$  es la posición de la cual se toma la foto, en coordenadas terreno;

$f$  es la distancia focal de la cámara.

Para cada punto observado en una fotografía podemos formar dos ecuaciones de observación:

$$e_x = x - \hat{x}$$

$$e_y = y - \hat{y}$$

Todos aquellos puntos no medidos en el campo deberán ser identificados (medida su posición imagen) en un mínimo de dos fotografías. De este modo es posible calcular las 3 incógnitas de posición ( $X, Y, Z$ ) a partir de las 4 ecuaciones que podemos formar. Fijémonos que, para calcular la posición de un punto en un espacio 3D, necesitamos capacidad de cálculo estereoscópico, esto es, la posibilidad de determinar un punto a partir de la intersección de dos rectas en el espacio.

#### Ecuaciones de coplanaridad

Del mismo modo que las anteriores estas ecuaciones expresan, aunque de forma distinta, la condición necesaria para que dos fotografías permitan el cálculo estereoscópico (y su caso particular de visión estereoscópica) esto es, que para cada punto de territorio los dos vectores que definen la proyección de dicho punto en las dos fotografías sean coplanarios con el vector que uno los centros de proyección de las dos fotografías.

La mayor ventaja de estas ecuaciones frente a las de colinealidad reside en que en su desarrollo final no in-

volucran la posición del punto del terreno, con lo que ahorramos plantear un parámetro incógnita de este tipo. Estas ecuaciones permiten resolver la denominada *orientación relativa* entre fotografías. Los puntos que podamos determinar a partir de una orientación relativa quedarán aún pendientes de una posterior traslación, rotación y escalado que lleve sus coordenadas al sistema de referencia en el que se han medido los puntos de control de campo.

Punto medido con la estación total	Distancia de la traza fotogramétrica al punto medido con la estación total (m)		
	Distancia reducida	Desnivel (fotog.- est.)	Distancia geométrica
002.b.89	0,961	-0,175	0,977
003.b.89	0,441	0,301	0,534
004.b.89	0,890	0,891	1,259
005.b.89	1,098	0,071	1,100
006.b.89	3,405	1,489	3,716
007.b.89	1,683	1,178	2,054
008.b.89	0,764	0,677	1,020
009.ab.89	0,137	1,214	1,222
010.b.89	0,428	1,231	1,303
011.b.89	1,979	1,864	2,719
012.ab.89	0,102	-0,419	0,431
013.b.89	0,807	0,443	0,921
014.b.89	0,314	1,329	1,365
015.b.89	2,251	1,123	2,516
016.ab.89	0,078	1,267	1,269
017.b.89	0,255	1,391	1,415
018.b.89	0,624	0,831	1,039
101.b.89	1,428	0,826	1,650
102.b.89	2,084	1,304	2,458
200.b.89	1,045	0,964	1,422
204.b.89	0,216	1,620	1,634
205.b.89	1,438	1,052	1,782
206.b.89	0,061	1,492	1,493
207.b.89	1,138	1,522	1,900
207'.b.89	0,550	1,446	1,547
207".b.89	0,585	1,715	1,812
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,952</b>	<b>1,025</b>	<b>1,560</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>0,812</b>	<b>0,579</b>	<b>0,707</b>

Tabla 4. Distancia de la traza de la capa de cenizas, obtenida por fotogrametría, al punto de la traza, medido con la estación total, más próximo.

Table 4. Distance, from the ash layer trace measured by photogrammetry.

En general utilizamos estas ecuaciones para calcular buenas aproximaciones para los parámetros de orientación externa, aproximaciones que servirán de inicialización para la resolución definitiva del bloque fotogramétrico a partir de las ecuaciones de colinealidad.

La condición de coplanaridad, de que los vectores  $A_i$ ,  $A_j$  y  $B$  sean coplanarios, se puede expresar del siguiente modo:

$$(A_i \times A_j) \cdot B = 0$$

donde  $A_i$  y  $A_j$  son los dos vectores que definen la proyección del punto en las fotografías y  $B$  es la base o vector que une los centros de proyección de las mismas.

Denominamos puntos de atadura (*tie points*) a aquellos puntos 3D observados en dos fotografías. Para cada uno de ellos el error en la ecuación de observación expresa la falta de coplanaridad entre los vectores que apuntan a dicho punto desde las dos fotografías:

$$e_{copl} = (A_i \times A_j) \cdot B$$

#### Ecuaciones de distancia entre puntos

Estas ecuaciones expresan el error en la medición de la distancia euclídea entre dos puntos del espacio fotografiado. Estas distancias pueden haber sido calculadas sobre el terreno, o bien a partir de la cartografía existente. La ecuación de observación es la siguiente:

$$e_d = d - \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$$

donde  $d$  es la distancia observada y  $(X_i, Y_i, Z_i)$  y  $(X_j, Y_j, Z_j)$  son los dos puntos involucrados.

La Tabla 1 resume las características principales de los modelos que aplicamos a las mediciones indirectas.

#### Metodología de trabajo

Las tareas básicas a resolver para poder llegar a la obtención de un conjunto de medidas específico mediante el uso de la fotogrametría terrestre son:

a) Toma de las fotografías: Hasta el momento las fotografías han sido capturadas por cámaras analógicas, es decir, que utilizan película.

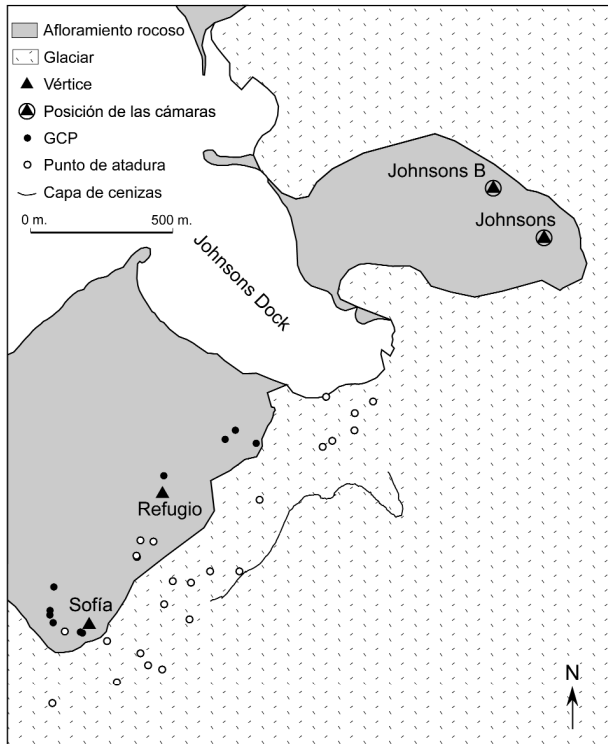


Figura 3. Mapa de la zona de trabajo. Desde los vértices Johnsons y Johnsons-B se han tomado las fotografías. Desde los vértices Johnsons, Sofia y Refugio se ha medido la posición de los puntos de control (GCP). Se indica la posición en el campo de los puntos de atadura (tie points) calculada por fotogrametría. La traza de la capa de cenizas es la obtenida por fotogrametría. Sistema de coordenadas UTM.

Figure 3. Working area map. The photographs were taken from two vertices: Johnsons and Johnsons B. Ground Control Points (GCP) were measured from Johnsons, Sofia and Refugio. Ground position relative to the tie points, computed by photogrammetric techniques, is indicated. The ash layer trace was obtained by photogrammetry. UTM coordinate system.

b) Toma de la información de campo necesaria: Sobre el terreno se identifican una serie de puntos (*ground control points*, GCP) y se calculan sus posiciones con una estación total. También se mide la distancia entre las posiciones donde se emplaza la cámara para obtener recubrimiento estereoscópico.

c) Digitalización: Las fotografías son digitalizadas en el ICC a través de un escáner fotogramétrico que no introduce deformaciones adicionales. El tamaño de píxel escaneado es de 15  $\mu\text{m}$ , que equivale a una densidad de escaneo de 1.693,333 ppi (puntos por pulgada).

#### d) Ajuste fotogramétrico

1) Para cada fotografía se mide la posición de la pequeña cruz que determina la posición del centro de coordenadas del sistema local de la imagen.

2) En caso de disponer de un certificado de calibración, se establece la orientación interna en base a la identificación de las marcas fiduciales en la imagen digital. Entre las coordenadas imagen y las coordenadas película se establece una transformación afin.

3) Orientación relativa: para cada grupo de fotografías se procede a un ajuste para calcular la orientación relativa de todas ellas respecto a una que consideramos imagen de referencia. Para ello son suficientes las ecuaciones de coplanaridad. Para la determinación de las orientaciones relativas no es necesaria la utilización de información de campo, aunque para ello haya que fijar ciertos parámetros que determinen un sistema de coordenadas local y resuelvan algunas ambigüedades. Para la orientación relativa es suficiente identificar la posición imagen, sobre dos fotografías como mínimo, de los puntos de atadura (*tie points*).

4) Una vez resuelta la orientación relativa se dispone de unas buenas aproximaciones iniciales para los parámetros de posición y orientación de todas las fotografías. Este es el momento para introducir la información de campo y proceder a un nuevo ajuste, el cual va a garantizar un posicionamiento, orientación y escalado correcto del modelo tridimensional. En esta etapa se introducen los puntos de control y/o las distancias entre los mismos. Se identifica la posición imagen de los puntos de control en todas las fotografías donde sean visibles. Se utilizan las ecuaciones de colinealidad.

e) Medición: Identificaremos, en un mínimo de dos fotografías, la posición imagen de cada punto del que se desee determinar su posición en el espacio. Con esta información podemos calcular la posición terreno del punto a partir de las ecuaciones de colinealidad, las cuales han quedado perfectamente determinadas al haber resuelto sus parámetros en la fase previa de ajuste.

f) Cambio de sistema de coordenadas terreno: En caso de querer establecer comparaciones con grupos de fo-

tografías anteriores, o compatibilizar los resultados con la cartografía existente, se debe determinar una transformación entre sistemas de coordenadas. Esta transformación puede obviarse si, en la etapa de ajuste fotogramétrico (d), se han introducido los puntos de control o las posiciones de la cámara en el sistema de coordenadas deseado.

## CARTOGRAFÍA DE LAS CAPAS DE CENIZAS DEL GLACIAR JOHNSONS

Las capas de cenizas tienen un espesor de uno a dos centímetros. Por su color muy oscuro destacan nítidamente respecto al hielo, lo que las hace fácilmente reconocibles en el campo e incluso en las fotografías gracias al contraste de color, pero sobretodo gracias a su continuidad lateral. Sin embargo, cuando la capa de cenizas forma un ángulo pequeño con la superficie topográfica, cualquier pequeña irregularidad topográfica hace que la traza se convierta en una línea sinuosa y además, al fundir el hielo, las cenizas quedan esparcidas sobre la superficie del glaciar. Por todo ello es difícil precisar en las fotografías donde se encuentra el afloramiento de cenizas, es decir, la traza cartográfica de las mismas sobre la superficie topográfica. Todo esto se traduce en imprecisiones en el momento de optar por la posición exacta de la traza, que pueden llegar a ser del orden de un metro tanto en la fotografía como en el campo.

### Red local de vértices de coordenadas conocidas

Tanto para los trabajos de topografía con una estación total, como para los de fotogrametría es necesario disponer de una serie de puntos, que llamaremos vértices, de coordenadas conocidas (relativas o absolutas), desde los que se efectuará el resto de observaciones de campo (Fig. 3). Estos vértices se han situado sobre afloramientos rocosos, con buena visibilidad sobre el paisaje. Los puntos han sido monumentados mediante la colocación en cada uno de ellos un pitón metálico en el suelo y se ha medido su posición con la estación total, constituyendo una red de vértices con un sistema local de referencia. Estos vértices se han utilizado como punto de toma de las fotografías y como estaciones de medida del conjunto de puntos de control (GCP). Para referir los vértices y puntos de control al sistema de coordenadas definido sobre la proyección UTM, se han utilizado dos vértices cuyas coordenadas UTM habían sido determinadas por el Servicio Geográfico del Ejército.

## Cartografía de las capas de cenizas de la superficie del Glaciar Johnsons

Aun cuando en nuestros levantamientos hemos cartografiado varias capas de cenizas, en el presente trabajo presentamos los resultados de una sola de ellas.

### Cartografía con la estación total

Se ha utilizado el método de radiación. La estación total se ha instalado en uno de los vértices y se ha orientado tomando como referencia otro de los vértices. A partir de aquí, colocando un reflector en cada uno de los puntos a medir, se han obtenido los ángulos horizontal y vertical, así como la distancia al punto. En caso de haber introducido en la estación total las coordenadas UTM del vértice y su altitud, obtendremos la posición del punto en ese mismo sistema de coordenadas.

Según las especificaciones técnicas, la precisión angular de la estación total GEODOLITE 506 es de 6" y la precisión en la distancia es de  $\pm 5\text{mm} + 5\text{ppm}$ . En la Tabla 2 se muestran los errores máximos calculados al obtener las coordenadas UTM del conjunto de puntos medido, debidos a la precisión de la estación total.

Cuando el afloramiento de la capa de cenizas es nítido, la precisión de la estación total es adecuada; pero cuando no lo es la precisión de la estación total supera ampliamente la precisión con que realmente se puede situar la traza en el campo.

La cartografía se efectuó midiendo la posición de 26 puntos (Fig. 6) sobre una longitud de traza de 1.106,9 m con un espaciado medio entre puntos de 38,17 m, obteniéndose una simplificación de la traza real.

Las mediciones con la estación total se realizaron, debido a las condiciones meteorológicas adversas, en varias sesiones, en concreto en los días 18, 22 y 23 de Febrero de 1999.

### Cartografía por fotogrametría

a) Toma de las fotografías y posición de las cámaras:

Tal como se observa en la Fig. 2, la posición de un punto en el terreno se obtiene por la intersección de dos visuales trazadas desde puntos de vista diferentes. Este procedimiento es básicamente el mismo que el

utilizado cuando se trabaja por intersección con un teodolito.

En principio, el error que se comete al calcular la posición de un punto por intersección, tanto en fotogrametría

como con el teodolito, depende, tal como se ha comentado en el apartado de principios básicos de fotogrametría, de:

- El error cometido al trazar cada una de las visuales. En fotogrametría el error en el trazado de cada vi-

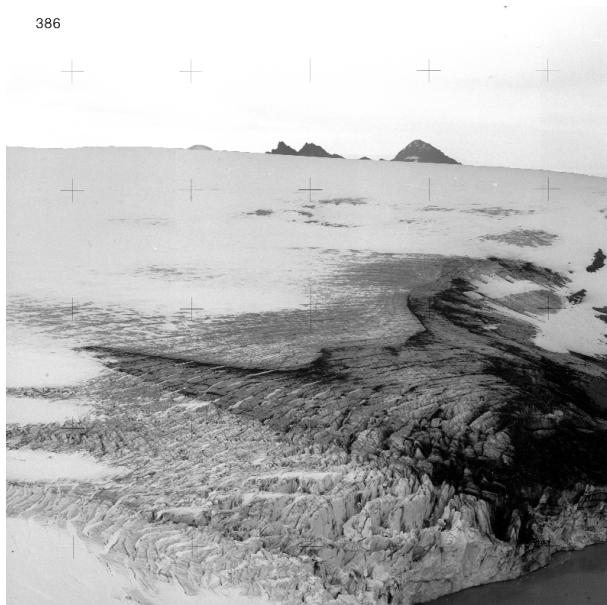
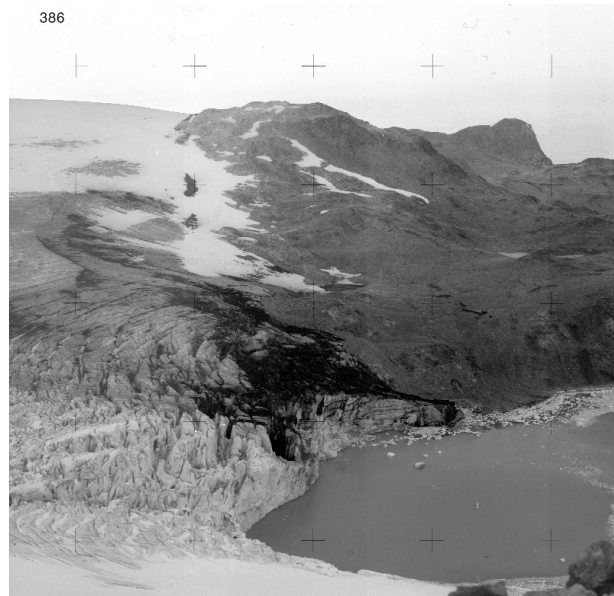
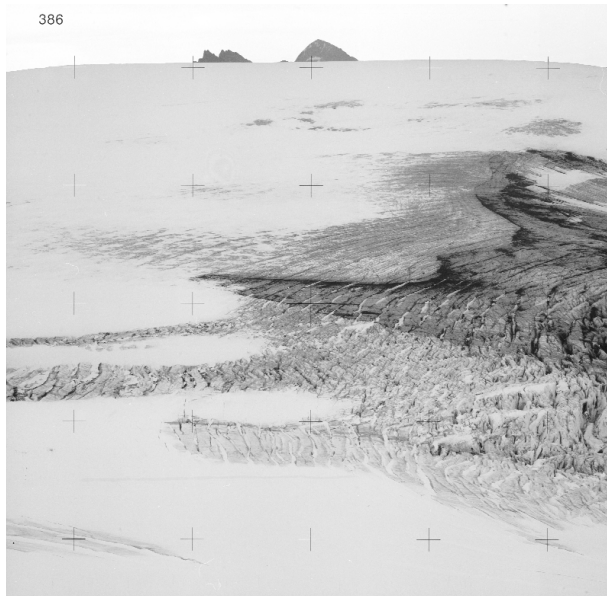


Figura 4. Fotografías. Las superiores tomadas desde el vértice Johnsons; las inferiores desde el vértice Johnsons-B. Las fotografías 102 y 118 forman par estereoscópico. La 101 y 117 forman par estereoscópico.

Figure 4. Top: photographs were taken from Johnsons vertex; bottom: from Johnsons-B vertex. Photographs 102 and 118 make a stereoscopic pair, and 101-117 make up a second pair.

sual, corresponde a la precisión con la que el operador ha seleccionado el punto en cada imagen.

- El ángulo que forman en el punto las visuales trazadas hasta él. Tanto en fotogrametría como con el teodolito este ángulo depende de la posición relativa entre los dos puntos desde los que se trazan las visuales (estaciones del teodolito o puntos de toma de las fotografías) y el punto visado. En el caso de intersección con teodolito, la posición óptima de las estaciones es aquella en la que se consigue que la intersección de las visuales sea lo más próxima posible a la ortogonal en cada uno de los puntos que se van a medir. En fotogrametría terrestre esta configuración geométrica se modifica trabajando, en general, con ángulos entre visuales mucho menores de 90°. Una configuración como la indicada para los trabajos con teodolito suministraría imágenes demasiado diferentes entre sí, lo que no permitiría la visión estereoscópica del paisaje.

Escoger la adecuada posición de las cámaras con relación a los puntos a medir es fundamental para obtener una buena precisión fotogramétrica. La situación ideal de toma de las fotografías de la superficie del glaciar sería desde avión o helicóptero, no disponiendo de estos medios se ha tenido que recurrir a fotografías tomadas desde tierra (fotografías oblicuas terrestres).

En nuestro caso, en el que se fotografía un glaciar en movimiento, existen una serie de limitaciones que dificultan poder operar siguiendo las consideraciones indicadas. La toma de fotografías debe hacerse:

- desde puntos fijos, de coordenadas conocidas, a fin de poder repetir las fotografías en otros momentos.
- desde puntos con una buena panorámica sobre el área de estudio.

En el presente caso se ha optado por tomar fotografías desde dos vértices situados en la cima de un monte desde el que se tiene una buena panorámica de la superficie del glaciar (Fig. 3). Desde el vértice Johnsons se han tomado 2 fotografías con solapamiento lateral y 2 fotografías desde el vértice Johnsons-B, también con solapamiento lateral. Ambos conjuntos se solapan entre sí para dar visión estereoscópica (Fig. 4). Las fotografías se realizaron el 18 de febrero de 1999.

Eventualmente, si las condiciones del terreno impiden tomar fotografías con estereoscopia visual, es posible tra-

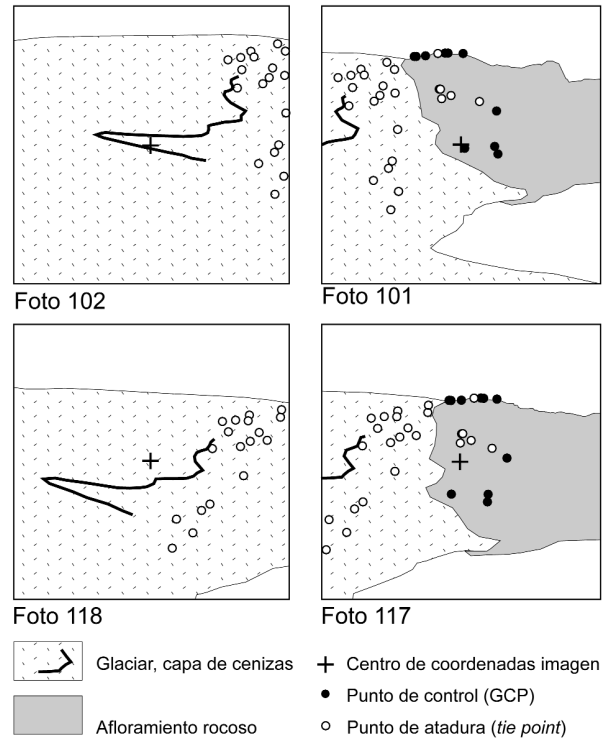


Figura 5. Posición en las fotografías del centro de coordenadas del sistema local de la imagen, de los puntos de posición medida en el terreno (GCP) y de los puntos de atadura (tie points). Se indica la traza de la capa de cenizas -línea gruesa- y los límites entre glaciar, substrato y mar (ver fotografías en la Fig. 4).

Figure 5. In the photographs: Center of the film coordinate system, Ground Control Points, Tie Points. The ash layer trace -thicker line- and the limits between glacier, bedrock and sea are indicated (see pictures in Fig. 4).

bajar con nuestro método, siempre que un mismo punto de campo sea reconocible en dos fotografías tomadas desde puntos distintos.

Las fotografías han sido tomadas con una cámara Hasselblad MK-70, que tiene una focal nominal de 100mm y un tamaño de negativo de 6cm x 6cm. La película utilizada ha sido AGFAPAN APX 25.

#### b) Adquisición de la información de campo necesaria:

La posición de los vértices desde los que se han realizado las fotografías es conocida. La base, es decir la distancia entre estos dos vértices es de 250,30 m. El área en la que se efectúan las medidas se sitúa, tal como ya se ha indicado, entre 1.035 y 2.235 m de distancia de los vértices.

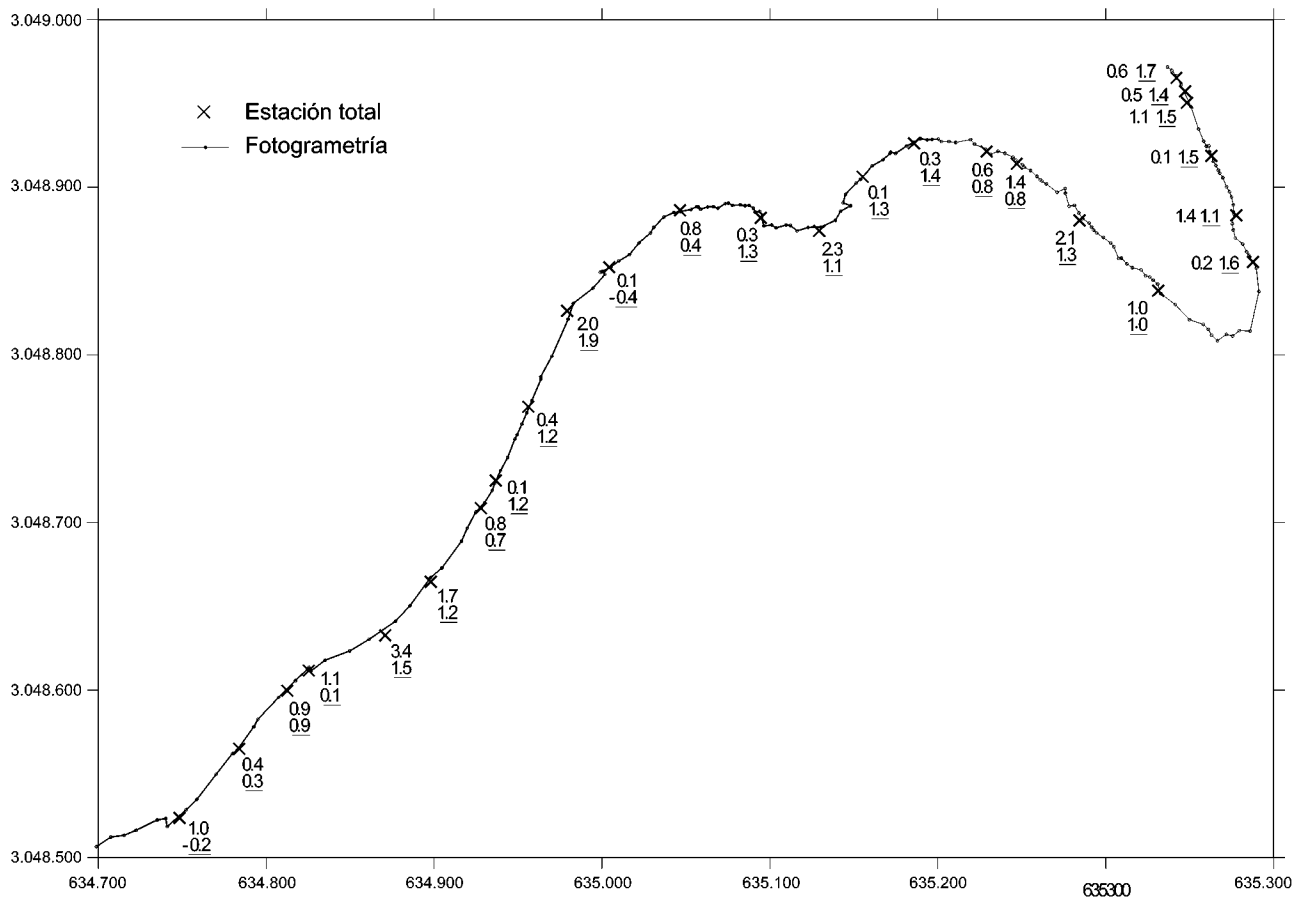


Figura 6. Cartografía de la capa de cenizas con la estación total (aspas) y por fotogrametría (los puntos indican las medidas realizadas). Número no subrayado: distancia reducida de la traza fotogramétrica al punto medido con la estación total. Número subrayado: desnivel entre la traza fotogramétrica y el punto medido con la estación total. Coordenadas UTM.

Figure 6. Ash layer cartography both using the total station (cross) and by photogrammetry (points). Unmarked number: reduced distance from the photogrammetric trace to the point measured by the total station. Underlined number: difference in height between the photogrammetric trace and the point measured by the total station. UTM coordinates.

Desde el vértice Johnsons se ha medido, con la estación total, la posición de una serie de puntos del terreno (GCP) (Fig. 3). Normalmente estos puntos se toman sobre afloramientos rocosos de los flancos del glaciar. No es aconsejable tomar puntos en el glaciar ya que el movimiento del hielo los hace inservibles para fotografías tomadas en otro momento.

#### c) Digitalización de las fotografías:

Las fotografías han sido digitalizadas con una densidad de escaneo de 1.693,333 ppi (15  $\mu$ m por píxel). La resolución de la película empleada admitiría una densidad de escaneo superior, pero se ha considerado que con 1.693 ppi (*points per inch*) establecíamos un buen equili-

brio entre la calidad de la imagen digital y el tamaño del fichero de imagen (14Mb).

#### d) Ajuste fotogramétrico:

En cada fotografía se ha identificado la posición (línea y columna) del centro de coordenadas del sistema local de la imagen.

En las fotografías se han identificado una serie de puntos que aparecen en pares estereoscópicos, estos puntos pueden ser de dos tipos: puntos cuya posición no se conoce en el terreno (puntos de atadura, tie points) y puntos cuya posición en el terreno es conocida (GCP) (Figs. 3 y 5).



Con las coordenadas imagen de los puntos se realiza la orientación relativa de las fotografías. Introduciendo la información de campo (coordenadas terreno de los GCP y posición de las cámaras) y utilizando las ecuaciones de colinealidad se resuelve el bloque fotogramétrico, que comprende fotografías y terreno.

Hay diversos métodos para conseguir el ajuste del conjunto de fotos. El utilizado ha consistido en resolver inicialmente el bloque fotogramétrico formado por un par estereoscópico (es decir dos fotos tomadas desde distinto punto que recubren el mismo espacio de terreno) y añadir el segundo par. Es fundamental que haya un importante solapamiento entre las fotos tomadas desde un mismo punto, para identificar puntos de atadura (*tie points*) que aparezcan en el primer par estereoscópico y también en el segundo.

Durante el ajuste del sistema se han considerado válidas (sin error) todas las posiciones de las cámaras, convirtiendo esos parámetros en valores o constantes fijadas. El proceso de ajuste ha consistido en buscar los ángulos de orientación de las cámaras que generan menos errores y repartir éstos entre el error de estimación de la posición en el campo de los GCP y el de estimación de la posición fila y columna de todos los puntos (GCP y puntos de atadura) identificados en las fotografías. Los errores finales se muestran en la Tabla 3.

#### e) Medición:

Una vez ajustado el sistema se han identificado en las fotografías una serie de puntos de una de las capas de cenizas y se ha calculado fotogramétricamente la posición de estos puntos. Se han identificado 184 puntos sobre una misma capa (Figs. 3 y 6). La distancia cartográfica media entre los puntos es de 6,38 m, con una longitud total de traza cartografiada de 1.168,2 metros.

### Comparación de resultados

Dado que los puntos medidos con la estación total y por fotogrametría no son los mismos, se ha establecido una traza de la capa de cenizas uniendo los puntos calculados por fotogrametría (Fig. 6), a partir de aquí se ha calculado la distancia de la traza (fotogramétrica) de la capa a cada punto medido con la estación. En la Tabla 4 se da, para cada uno de estos puntos, la distancia geométrica (en el espacio XYZ), la distancia reducida o planimétrica (en el espacio XY) y el desnivel. Podemos considerar que la

posición correcta es la medida con la estación total, así la tabla de distancias (Tabla 4) nos indica el error fotogramétrico relativo a los resultados topográficos.

El error medio en la posición planimétrica (XY) es de 0,95 metros con una dispersión de valores amplia alrededor del valor medio, lo cual indica que el error no es sistemático. En el cálculo de la distancia de la traza fotogramétrica a cada punto medido con estación total sólo se ha calculado el módulo, y no la dirección; esto último no tendría sentido dado el trazado sinuoso de la capa.

La media del error altimétrico es de 1,02 m, del mismo orden de magnitud que el planimétrico, pero en este caso la dispersión de valores es menor, lo cual indica que hay un error sistemático que nos sitúa el trazado fotogramétrico aproximadamente un metro por encima del medido con la estación total. Al calcular la diferencia de cota entre los valores fotogramétricos y los de la estación total se ha tenido en cuenta el signo.

### Origen de los errores

Los errores cometidos pueden ser debidos a un ajuste mal condicionado por la distribución no homogénea de los puntos de control, puesto que están todos situados a un lado del paisaje fotografiado (ver Figs. 3 y 4), con lo que al cartografiar la capa de cenizas se extrapola. Si dispusiéramos de puntos de control a ambos lados de la zona en la que se encuentra la capa, entonces estaríamos interpolando y los errores cometidos deberían ser menores.

### Posibilidades de utilización de la fotogrametría en el estudio del casquete glacial de la Isla Livingston

La superficie del glaciar presenta múltiples estructuras, capas de hielo, capas de cenizas, foliaciones y una densa red de grietas (Calvet y Santanach, 1992), todas ellas reconocibles en las fotografías. Su cartografía con estación total es imposible de efectuar dada la poca duración de las campañas de campo y a las dificultades debidas a las condiciones meteorológicas adversas, niebla y viento, que son muy frecuentes. Los errores fotogramétricos detectados en la cartografía se consideran un mal menor frente a la imposibilidad de realizar una cartografía de campo detallada.

Dado que el interés fundamental del estudio del glaciar reside en conocer su dinámica, es imprescindible la obtención de series temporales de datos o, mejor aún, de series cartográficas de la misma zona en distintas épocas.

En el sector del glaciar cartografiado, la componente horizontal del movimiento del hielo es del orden de unos 20 metros/año, con lo que los errores de fotogrametría son perfectamente aceptables y nos permiten medir el movimiento. Por el contrario, la componente vertical es del orden de metros, con lo que los datos fotogramétricos no son aceptables para lapsos de tiempo anuales, pero sí para periodos más prolongados.

Por lo que respecta a la traza en superficie de la capa de cenizas, hay que tener en cuenta que su posición varía en función de varios factores concurrentes: el flujo del hielo, la ablación del hielo y la disposición de la capa. El resultado final es que la posición de la traza, a pesar de la importante velocidad del hielo oscila solo algunos metros de año en año, manteniéndose desde el verano 94-95 aproximadamente en la misma zona. Comparando la posición anual de esta traza desde el citado verano hasta la actualidad (98-99), con medidas efectuadas con la estación total y con fotogrametría, se observa que los datos de fotogrametría son plenamente aceptables ya que los cambios de posición superan ampliamente el error que se efectúa en las mediciones fotogramétricas.

## CONCLUSIONES

La fotogrametría terrestre como alternativa a los levantamientos topográficos ofrece las siguientes ventajas:

- permite cartografiar zonas inaccesibles,
- el trabajo puede efectuarse en el gabinete, mientras que el trabajo de topografía clásica debe ser realizado en el campo; ésto es fundamental cuando hay limitaciones en el tiempo de trabajo de campo, ya sea por razones de planificación de la campaña o por limitaciones de tipo meteorológico,
- proporciona una documentación (fotografías) que es una reproducción fidedigna del terreno y, por lo tanto, permite extraer toda aquella información cartográfica que a lo largo del desarrollo y avance del trabajo se considere interesante, sin que sea necesario volver sobre el terreno,
- hace posible la comparación de fotografías del pasado o del futuro.

Hay unos requerimientos básicos para los trabajos de fotogrametría:

- es necesario disponer de una cámara fotográfica de tipo métrico o semimétrico para que los resultados tengan suficiente precisión,
- hay que disponer de un programa de tratamiento fotogramétrico adecuado,
- es preciso tener conocimientos básicos de fotogrametría para poder manejar adecuadamente el programa,

Para obtener una precisión aceptable en fotogrametría se necesita:

- que la toma de fotografías se haga desde puntos que permitan una configuración geométrica adecuada del bloque fotogramétrico,
- disponer de puntos de control (GPC) medidos con precisión en el campo, la distribución de estos puntos es fundamental para un buen ajuste del sistema,
- que los puntos a cartografiar sean reconocibles fácilmente y con precisión en las fotografías,

Tal como se ha mostrado en este trabajo, la precisión alcanzada en fotogrametría terrestre es menor que en los procedimientos clásicos de topografía, pero manteniéndose dentro de márgenes muy aceptables. En contrapartida ofrece notables ventajas de índole práctico en la realización del trabajo, siendo algunas de éstas fundamentales ya que permiten la realización de medidas (cartografía) que de otra manera serían prácticamente imposibles de realizar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto ANT96-0734 y de la acción especial ANT94E-1326 del Plan Nacional de Investigación en la Antártida. En su realización se ha contado con financiación proveniente de la ayuda 1999 SGR-00065 que recibe el Grup de Processos Geodinàmics Superficials de la Universitat de Barcelona (3130-UB-06).

## BIBLIOGRAFÍA

Calvet, J., Pallàs, R., Sàbat, F., Vilaplana, J.M., 1993. Los niveles de cenizas de los glaciares de Livingston: criterios para su datación. Vº Simposio de Estudios Antárticos. Barcelona, España, 1993. 195-208.

Calvet, J., Santanach, P., 1992. Grietas y pliegues en el glaciar de la ensenada Johnsons, borde del casquete glaciar de la isla Livingston, Islas Shetland del Sur. In J. López-Martínez (ed.) Geología de la Antártida Occidental. Simposios, III Congreso Geológico de España. Salamanca. T 3, 153-161.

Elassal, A.A., 1983. Generalized adjustment by least squares (GALS). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 201-206.

Wong, K.W., 1980. *Basic Mathematics of Photogrammetry. Manual of Photogrammetry*. Falls Church, Virginia. American Society of Photogrammetry. pp.37-102.