

**FOTOGRAMETRÍA DIGITAL  
AUTOMÁTICA APLICADA AL  
ESTUDIO DE ESTRUCTURAS  
GEOMORFOLÓGICAS  
DINÁMICAS. APLICACIÓN SOBRE  
EL GLACIAR ROCOSO DE LAS  
ARGUALAS (PIRINEOS  
CENTRALES-ESPAÑA)**

José Juan de Sanjosé-Blasco \*, José Moreno-del  
Pozo y Ángel Bejarano-Borrega \*\*

\*: Departamento de Expresión Gráfica (área de  
Geodesia, Cartografía y Fotogrametría)

\*\* : Departamento de Informática

[jjblasco@unex.es](mailto:jjblasco@unex.es)

*Universidad de Extremadura  
Escuela Politécnica  
10071 Cáceres*

**Resumen**

Este artículo propone una técnica automática para el análisis del comportamiento de estructuras naturales en situación de movimiento (dunas, deslizamiento de laderas, glaciares,...) o de estructuras artificiales (desplome de edificios, muros de contención,...). Para ello, se propone el empleo de sistemas predictivos y técnicas fotogramétricas digitales. El proceso de automatización está enfocado hacia dos objetivos:

1. Correlación entre las condiciones climáticas (precipitaciones, temperaturas, dirección e intensidad del viento,...) y la dinámica de la estructura. Esta correspondencia es ejecutada a través de procesos matemáticos (series temporales, sistemas dinámicos). En esta fase puede predecirse:
  - El comportamiento futuro de la estructura.
  - Predicción del “apoyo de campo” para la fase fotogramétrica.
2. Correlación automática entre las imágenes fotogramétricas de objeto cercano (convergentes e inclinadas) con la aplicación de un programa informático denominado “Foto-Cartógrafo”.

En concreto, esta propuesta está basada en la investigación que se ha realizado sobre el glaciar rocoso activo de las Argualas (Pirineos centrales-España) durante el periodo 1991-2000. El interés de estudiar una estructura glaciar es su gran sensibilidad a los cambios ambientales (cambio climático terrestre) y su apreciable dinámica (40

cm/año).

**Abstract**

In this article an automatic technique is proposed in order to analyze the behavior of any moving natural structure (dunes, slipping slopes, glaciers...) or artificial structure (building collapse, containment walls...). To achieve it, it is necessary to use predictings systems and photogrammetric techniques.

This automation process is approached to two aims:

1. Correlation between climatic conditions (precipitations, temperaturas, wind direction and intensity...) and the dynamic of the structure. This matching is carried out through mathematic processes (temporal series, dynamic systems). In this phase we can predict:
  - The future behavior of the structure.
  - Prediction of the “supporting field” for the photogrammetrical phase.
2. Automatic correlation between photogrammetrical images of a close-range (convergent and sloping ones) using a computer program called “Foto-Cartógrafo”.

Specifically, this research has been carried out into activ rock glacier of the Argualas (Central Pyrenees-Spain) during the period 1991-2000. The purpose of studying a glacier structure is due to its great sensibility to environmental changes (Earth climatic change) and its great dynamic (40 cm/year).

**Palabras clave:** climatología, geodesia, sistemas predictivos (sistemas dinámicos y series temporales), fotogrametría (aérea, terrestre, de objeto cercano), correlación de imágenes.

**INTRODUCCIÓN**

En la actualidad los glaciares del mundo están en un periodo de retroceso, y ello quizás sea debido al cambio climático terrestre. España cuenta con los glaciares (blancos y rocosos) del continente europeo más cercanos al ecuador.

Tradicionalmente, las mediciones de la dinámica de los glaciares han requerido de técnicas como: geodesia y fotogrametría aérea (Kaufmann y Ploesch 2000). En nuestro estudio, ambas técnicas presentaban los siguientes inconvenientes:

- Geodesia: Determinación espacial (X, Y, Z) de muy pocos puntos.
- Fotogrametría aérea tradicional: Es muy costosa económicamente.

Para paliar estas desventajas se han realizado tomas fotogramétricas con un helicóptero,

de manera que las fotografías muestran gran cantidad de información y además, este tipo de vuelo presenta las facilidades de ser más económico y la precisión es mayor (pequeña distancia al objeto).

En la actualidad el desarrollo del proyecto realizado sobre el glaciar rocoso de las Argualas ha seguido el proceso (Esquema 1):

1. Datos geodésicos (6 campañas de campo) y datos climáticos obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.), entre los años 1991-2000.
2. Con la correlación entre ambas informaciones puede predecirse con técnicas matemáticas (sistemas dinámicos) la posición de las dianas geodésicas o “puntos de apoyo” fotogramétricos.
3. Ejecución del proceso fotogramétrico mediante la recogida de información con fotografías analógicas (cámara semimétrica) y el posterior escaneado fotogramétrico.
4. Desarrollo del programa “Foto-Cartógrafo” con el cual, se mejora la calidad de la imagen (filtrados), y se detectan las marcas preseñalizadas del apoyo fotogramétrico (orientación absoluta).

El programa “Foto-Cartógrafo” en la actualidad no realiza la orientación interna y relativa, y por lo tanto, se ha utilizado el programa fotogramétrico de objetos cercanos “C.D.W.”. Con este programa puede determinarse los parámetros externos ( $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \chi$ ) de la cámara.

Posteriormente, con los valores externos de las posiciones de las cámaras y mediante el desarrollo de un algoritmo de correspondencia se realiza la orientación absoluta sobre determinados puntos preseñalizados en el glaciar. De esta manera, puede calcularse automáticamente las coordenadas en tres dimensiones ( $X, Y, Z$ ) de dichos puntos.

#### **CARACTERÍSTICAS DE UN GLACIAR ROCOSO ACTIVO PIRENAICO**

Puede definirse un glaciar rocoso como: *“masa de derrubios deslizantes sobre una ladera o fondo de valle en la que se reconocen surcos, arcos, cordones y lóbulos, así como un frente abrupto en el que afloran los finos derivados del flujo glaciar”* (Serrano et alii. 1995).

Para que un glaciar se forme es necesario que la nieve caída sea mayor que la nieve fundida, esto ocurre cuando hay grandes nevadas y las

temperaturas son tan bajas que permiten conservarla. Si además, existen derrubios (piedras) de los paredones del glaciar y llegan a colmar el hielo permanente o “permafrost” se genera un glaciar rocoso (Figura 1).

Los glaciares rocosos activos se desplazan muy lentamente debido a causas como: espesor de los clastos, pendiente, temperaturas, etc. La dinámica del mismo, no es igual en toda su superficie (la zona frontal-central tiene la mayor dinámica glaciar), ni en la estación del año (en verano existe mayor dinámica que en invierno).

#### **EL CLIMA EN EL PIRINEO CENTRAL**

Los glaciares rocosos avanzan y retroceden como respuesta a los cambios climáticos, esto es, si aumentan las temperaturas también aumenta su dinámica. Dichos movimientos son inapreciables a simple vista, pero no es así si se controlan con métodos geodésicos o fotogramétricos.

Existen cuatro etapas térmicas anuales sobre los glaciares pirenaicos (Gómez et alii. 1998):

- Enfriamiento (otoño): Enfriamiento rápido del suelo.
- Capa de nieve (invierno): Efecto aislante de la capa nival, con espesores superiores a 5 m.
- Penetración de hielo (comienzo de la primavera): Incorporación del hielo al “permafrost” existente.
- Descongelación (abril-octubre): Desaparece la nieve y las temperaturas medias diarias son superiores a 0 °C.

La temperatura media anual pirenaica de 0 °C está situada a una altitud de 2726 m. El glaciar rocoso de las Argualas se encuentra entre 2590 m (frente) y 2730 m (cola), por lo tanto está enclavado dentro del límite de “permafrost”.

Los valores climáticos más influyentes en la dinámica glaciar son las precipitaciones y las temperaturas. Estos valores se han calculado para el glaciar de las Argualas a partir de los datos de las estaciones cercanas del I.N.M.:

- Precipitaciones: La estación más cercana (a 5 km) al glaciar es Sallent de Gállego, de la cual existe la serie completa de precipitaciones desde 1990.
- Temperaturas: Se ha considerado para esta zona que el gradiente térmico para los meses de agosto y septiembre es de -0,61 °C/100 m.

#### **ANÁLISIS GEODÉSICO DE LA DINÁMICA**

## DEL GLACIAR DE LAS "ARGUALAS"

Para calcular la dinámica del glaciar rocoso de las Argualas se realiza desde 1991 un estudio geodésico que pretende localizar con gran precisión determinados elementos (varillas) y comparar sus posiciones  $(X, Y, Z)$  espaciadas en el tiempo.

Además de la observación del año 1991, se han realizado las campañas 1993, 1994, 1995, 1998 y 2000. La observación en periodos anuales hubiera sido la situación idónea para el desarrollo predictivo, pero ha sido imposible por motivos económicos (falta de financiación) y climáticos (mal tiempo atmosférico).

La técnica geodésica empleada ha sido la intersección directa (angular y distancias), pero además en el año 2000 se empleó el sistema de posicionamiento global (G.P.S.) y la fotogrametría de objeto cercano. El sistema G.P.S. no ha dado buen resultado, debido al efecto multicamino de las señales de los satélites sobre los paredones del glaciar.

Las medidas geodésicas se han realizado por todo el glaciar para recoger todos los posibles movimientos del mismo, mientras que las señales artificiales o "puntos de apoyo" para aplicar la técnica fotogramétrica se han limitado a una pequeña zona del glaciar. Esta diferencia fue debida a que se hacía inviable hacer un análisis fotogramétrico de todo el glaciar (Sanjosé 2001).

Los métodos geodésicos, tanto angulares como distanciométricos si estuvieran exentos de errores mostrarían una coincidencia en su resultado. En ambos casos la diferencia del resultado está por debajo de la tolerancia "impuesta" de  $\pm 4$  cm.

El comportamiento dinámico de todas las varillas no es el mismo, lo cual es lógico puesto que depende de la posición espacial de las varillas en el glaciar (Figura 2). Este estudio geodésico de la dinámica glaciar quiere ejecutarse en el futuro mediante el desarrollo de la fotogrametría de objeto cercano y el programa "Foto-Cartógrafo".

## PREDICCIÓN DE LA DINÁMICA GLACIAR

Pasados unos años desde el inicio del estudio dinámico del glaciar rocoso de las Argualas se comprobó que había una correlación entre la variable climática y los desplazamientos que estaba sufriendo el glaciar. Por ejemplo, esta relación es más acusada en el año 1994 donde la media de las temperaturas en los Pirineos fue  $3^{\circ}\text{C}$  superior al

resto de años de la década de los 90 (anteriores y posteriores) y por lo tanto, esto produce una mayor dinámica glaciar.

Mediante el empleo de procesos predictivos puede estimarse el comportamiento futuro de algunos elementos (varillas geodésicas, puntos de apoyo).

El estudio predictivo puede encaminarse en la línea de las series temporales y de los sistemas dinámicos, en concreto se ha desarrollado el sistema dinámico debido a que se dispone de muy pocos datos para aplicar la técnica de las series temporales. Se ha empleado el programa matemático "Mathematica" para resolver el sistema de ecuaciones dinámico.

El sistema dinámico consiste en el cálculo de la posición futura de un elemento (varilla, punto de apoyo) que está bajo el efecto de una deformación.

$$x_n = F \cdot x_{n-1}$$
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} a & b & c \\ e & f & g \\ k & l & o \end{pmatrix}_{(p,i)} \begin{pmatrix} d(x) \\ h(y) \\ q(z) \end{pmatrix}_{n-1}$$

Una vez realizado el cálculo, las coordenadas de una cualquiera de las varillas obtenidas con el sistema dinámico son (Sanjosé 2003):

$$X:1216,713 \quad Y:1063,780 \quad Z:847,909$$

Las coordenadas de la misma varilla anterior obtenidas mediante la observación geodésica son:

$$X:1216,753 \quad Y:1063,818 \quad Z:847,938$$

Puede comprobarse que hay una diferencia de  $\pm 4$  cm entre las coordenadas del sistema de cálculo dinámico y las mediciones geodésicas, por lo tanto es un método aceptable para la determinación predictiva de los "puntos de apoyo" de la fase fotogramétrica.

## DESARROLLO FOTOGRAMÉTRICO DE LA DINÁMICA GLACIAR

Las fotografías son la base para la realización de la técnica fotogramétrica, la cual para el caso que nos ocupa tiene las siguientes ventajas con respecto a los métodos topográficos o geodésicos:

- Permite el estudio de estructuras inaccesibles: Existen rocas a las que no es posible acceder.
- Puede extraerse gran cantidad de información:

Cualquier elemento que aparece en el par estereoscópico es posible medirlo.

- Ahorro de tiempo: La toma fotográfica es muy rápida, no así la recogida de información geodésica debido a que deben buscarse las varillas de campañas anteriores.

En el caso de las Argualas, las fotografías se han tomado con una cámara semimétrica desde un helicóptero en estado de movimiento casi estático (Figura 3).

Los “puntos de apoyo” se han preseñalizado mediante cartones de color blanco y negro y a los cuales se les han dado coordenadas absolutas con procedimientos predictivos. Estas señales artificiales aparecen en todas las fotografías.

Para tratar la información digitalmente deben escanearse las fotografías en un escáner fotogramétrico. Las fotografías del glaciar rocoso están escaneadas a una resolución de 10  $\mu\text{m}$ . Para orientar espacialmente las fotografías se debe desarrollar el “proceso general de la fotogrametría”, esto es, orientaciones: interna, relativa y absoluta. Cualquier intento de orientación en restituidores comerciales convencionales ha sido infructuoso debido entre otras causas a las condiciones geométricas (convergentes e inclinadas) tan exageradas de las tomas fotográficas.

El único programa comercial que ha resuelto el problema ha sido “C.D.W.”, pero el uso del mismo tiene dos inconvenientes:

1. Necesita al menos de tres fotografías (sin visión estereoscópica) para realizar la orientación.
2. No realiza la correspondencia automática.

Con el programa “C.D.W.” se han calculado los parámetros externos ( $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \chi$ ) de la posición de la cámara en el momento de hacer las fotografías. Estos valores son los datos iniciales para el desarrollo del programa “Foto-Cartógrafo”.

#### **AUTOMATIZACIÓN DE LA TÉCNICA FOTOGAMÉTRICA. PROGRAMA “FOTO-CARTÓGRAFO”**

En la actualidad, un proceso fundamental de la fotogrametría consiste en identificar y medir los puntos homólogos entre dos o más imágenes con recubrimiento. La correlación de imágenes es un campo que está todavía por investigar, aunque existen algoritmos que ya se están aplicando (Sonka et alii. 1998).

Cualquier algoritmo de correspondencia debe desarrollar las siguientes fases:

1. Corrección de las distorsiones de las fotografías, para ello se dispone de los datos de calibración de la cámara.
2. Detección y extracción de puntos, esquinas, líneas,... en cada imagen.
3. Determinación de la correspondencia entre las imágenes.
4. Obtención de coordenadas tridimensionales.

Para aplicar la correspondencia de imágenes deben compararse imágenes que están en dos dimensiones (fotografías) sobre objetos en tres dimensiones (realidad). El paso de la realidad a la fotografía impone una pérdida de información, debido a oclusiones, texturas pobres, ruido en las imágenes,... Para aplicar cualquier algoritmo de correspondencia es necesario suministrar valores iniciales como: posición espacial de las cámaras (orientación externa), escala de las fotografías, etc.

El programa propio “Foto-Cartógrafo” es capaz de medir de forma automática el movimiento tridimensional superficial del glaciar rocoso a través de fotografías convergentes e inclinadas. En consecuencia, se pretende implementar el algoritmo de correspondencia que mejor resuelva la formación del modelo tridimensional en el caso del glaciar rocoso de las Argualas.

Las fases del programa “Foto-Cartógrafo” son:

- Preprocesamiento de cada imagen digital, con el cual se resaltan los detalles de interés o se eliminan ruidos (marcas reseau) (Figura 4).
- Búsqueda de detalles, como son los “puntos de apoyo” señalizados. Esta fase es posible mediante la técnica de umbralización y el desarrollo de la transformada de Hough (Figura 5).
- Aplicación de un algoritmo de correspondencia sobre las señales artificiales calculadas anteriormente. En el programa “Foto-Cartógrafo” se ha implementado el algoritmo del coeficiente de correlación cruzada y se han impuesto las restricciones de orden y geometría epipolar (Figura 6).

#### **CONCLUSIONES**

La metodología mostrada en este artículo garantiza la recogida automática mediante técnicas predictivas y fotogramétricas de la dinámica de cualquier estructura geomorfológica (glaciares,

dunas, laderas deslizantes,...) que se encuentre afectada por efectos ambientales (precipitaciones, temperaturas, viento,...).

Adicionalmente esta metodología es aplicable con pequeñas variaciones a otras situaciones bastante alejadas de la original, como por ejemplo el estudio de la dinámica de otras estructuras no geomorfológicas: movimiento de edificios, presas, taludes, etc.

Hasta ahora esta técnica mostrada solo recoge la información de determinados puntos singulares (señales de los "puntos de apoyo"). En el futuro podría calcularse la dinámica de cualquier elemento superficial del glaciar, de manera que puede obtenerse información tridimensional de infinidad de puntos (Kaufmann y Ploesch 2000).

## **BIBLIOGRAFÍA**

Gómez, A., Salvador, F., Schulte, C. 1998. Evolución térmica de la capa activa... *Universidad de Barcelona*

Kaufmann, V. y Ploesch, R. 2000. Mapping and visualization of the retreat of two cirque glaciers in the Austrian Hohe Tauern National Park. *ISPRS*

Sanjosé, J.J. 2001. Métodos , técnicas e implemento de la correlación ... *Trabajo de investigación*

Sanjosé, J.J. 2003. Estimación de la dinámica d los glaciares rocosos mediante... *Tesis doctoral*.

Serrano, E., Sanjosé, J.J., Silió, F. 1995. Movimiento superficial del glaciar de las Argualas. *Pirineos*

Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R 1998. Image processing, analisis and machine. *PWS Publishing*