

FOTOGRAMETRÍA AÉREA APLICADA A LA SITUACIÓN DE CAVIDADES

Juan Sebastián Galaz Villasante

G.E. Edelweiss

G.E. Rivas-Vaciamadrid

La búsqueda de un procedimiento fotogramétrico para situar entradas de cavidades ha conducido al desarrollo del Anaglifo Topográfico, representación estereoscópica del terreno que permite la medida de coordenadas (X,Y,Z).

ANTECEDENTES

Las técnicas de la topografía clásica, basadas en triangulaciones hacia o desde puntos de coordenadas conocidas, hacen posible situar las bocas exteriores de las cavidades; pero el grado de exactitud, que depende del método e instrumental utilizados, puede ser muy dispar.

Una rigurosa planificación en la elección de los vértices y puntos de apoyo principales, junto al empleo de teodolitos y concurso de personal cualificado, dan lugar a errores decimétricos, mucho menores que los requeridos en la mayoría de casos. Un ejemplo excelente lo constituye la triangulación exterior del complejo de Ojo Guareña [1].

A otro nivel, alejado del anterior, se encontrarían las triangula-

ciones llevadas a cabo mediante brújula y clinómetro, con ayuda de mapas topográficos convencionales. La baja resolución angular de estos instrumentos y la escasez de puntos de referencia con coordenadas conocidas pueden originar errores de varias decenas de metros, razonables en una fase preliminar de exploración, pero demasiado grandes para servir de base a trabajos posteriores.

La necesidad de situar y relacionar las bocas de entrada del sistema Peña del Trillo - La Trasmuera con errores por debajo de 10 metros, en una época en que el sistema GPS no era fiable, planteó la posibilidad de realizar medidas sobre fotografías aéreas, ya que en ellas eran perfectamente visibles casi todas las simas de la zona. Este empeño ha llevado a resolver los problemas básicos de la fotogrametría empleando herramientas informáticas de uso general, con unos resultados mejores a los esperados.

FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA

La medición del terreno a

partir de fotografías aéreas o terrestres constituye la principal aplicación de la fotogrametría. Esta técnica está basada en el mismo principio de triangulación a partir de medidas angulares empleado por la topografía clásica, ya que medir distancias sobre una fotografía es equivalente a medir ángulos desde el mismo lugar donde la fotografía fue tomada.

Cualquier punto del terreno Q, cuya imagen aparezca en dos fotografías consecutivas (q_1 y q_2), puede ser posicionado sobre un sistema de referencia topográfico (X,Y,Z) siempre que se conozcan las coordenadas de los puntos de vista (V_1 y V_2) de cada una de las fotografías sobre ese mismo sistema de referencia (*figura 1*).

El punto de vista V_i de una fotografía define completamente su posición y orientación en el espacio, y está compuesto por las coordenadas X_i , Y_i , Z_i del centro óptico de la cámara fotográfica y por los ángulos a_i , b_i , g_i de orientación de su eje óptico respecto a cada uno de los

ejes del sistema XYZ de referencia.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

Hasta fechas recientes, la elaboración de mapas a partir de fotos aéreas se realizaba con restituidores analógicos, instrumentos de altísima precisión basados en métodos optomecánicos de orientación y trazado. El desarrollo de ordenadores personales con gran capacidad de cálculo, y la disponibilidad de periféricos de digitalización e impresión, ha originado la paulatina desaparición de las técnicas analógicas. Por otra parte, el considerable abaratamiento de todos estos dispositivos ha puesto la realización de actividades fotogramétricas al alcance de cualquier usuario.

El procedimiento fotogramétrico desarrollado en esta ocasión se divide en varias etapas. Las operaciones realizadas en cada una, así como las aplicaciones empleadas, se resumen en la *tabla 1*.

1.- Digitalización

La consecución de un sistema de medida de distancias sobre las fotos aéreas se logra tras su digitalización con un escáner de sobremesa. Este instrumento se emplea en entornos domésticos y tiene una gran resolución óptica, pero su exactitud geométrica es bastante baja, por lo que las imágenes digitales obtenidas tienen deformaciones importantes, a priori inadmisibles si se pretende una mínima exactitud en las medidas. Afortunadamente estas deformaciones son repetitivas, y es posible corregirlas tras un proceso de calibración.

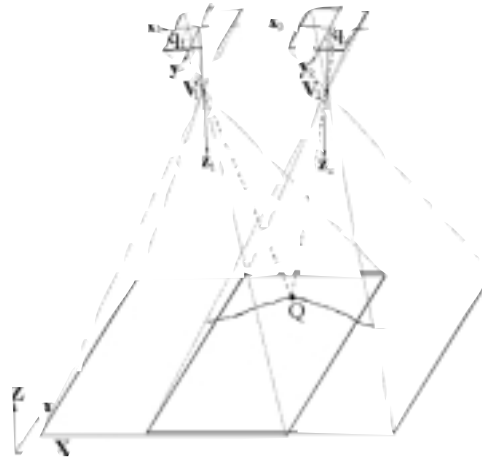


Figura 1. Proyección de un punto sobre dos fotografías consecutivas.

2.- Orientación interior

El origen de coordenadas xy está situado en el centro de cada fotografía, exactamente por donde pasa el eje óptico de la cámara, y coincide con el punto medio entre cada pareja de marcas fiduciales opuestas que se encuentran en las esquinas de casi todas las fotos aéreas (*figura 2a*). Eventualmente pueden emplearse otras marcas que suelen encontrarse en el centro de los laterales (*figura 2b*) y que

muchas veces también son fiduciales (*figura 2c*).

3.- Formación de pares estereoscópicos

La agrupación de las fotos aéreas en parejas, que posibiliten la visión estereoscópica de su zona de cobertura común, facilita la identificación de detalles y da mayor precisión a las medidas. La forma más cómoda de visualización estereoscópica en la pantalla de un ordenador es el anaglifo,

ETAPA	APLICACIÓN
Establecimiento de un sistema óptico para poder realizar medidas suficientemente exactas (digitalización).	TWAIN_32 (PHOTOSHOP)
Asignación de un origen y ejes cartesianos de coordenadas planas sobre cada fotografía (orientación interior).	VBA AUTOCAD
Agrupación de las fotografías en pares estereoscópicos.	VBA AUTOCAD MATLAB
Cálculo de las coordenadas exteriores (XYZabg) de los puntos de vista de todas las fotografías que componen la zona de interés (aerotriangulación).	VBA AUTOCAD MATHEMATICA
Medida de coordenadas XYZ con una marca flotante (cursor estereoscópico).	VBA AUTOCAD

TABLA 1. Etapas en el proceso fotogramétrico.

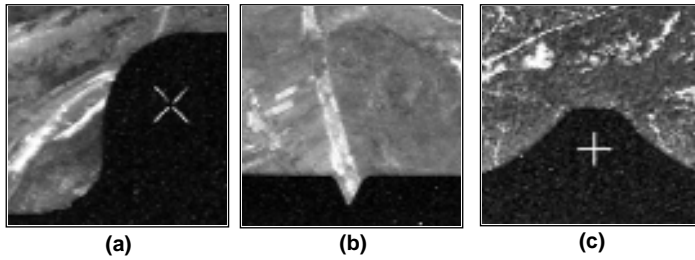


Figura 2. Marcas utilizadas en la orientación interior

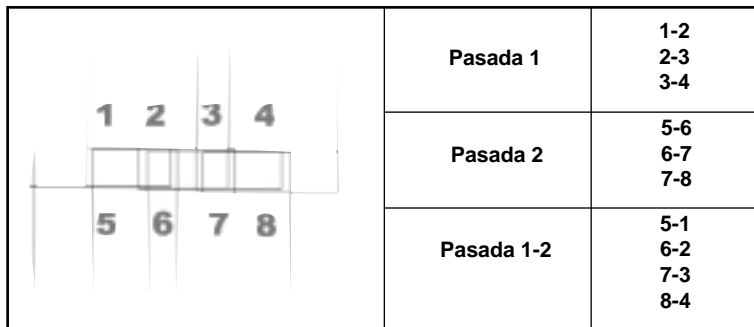


Figura 3. Ejemplo de formación de pares.

consistente en utilizar colores complementarios (rojo-verde o rojo-azul) para cada una de las imágenes que componen el par. Mediante unas gafas con sendos filtros de los mismos colores se consigue que a cada ojo le llegue la imagen derecha o izquierda correspondiente.

Se deben formar pares con todas las fotos contiguas, pertenecientes a la misma pasada y a pasadas adyacentes (figura 3). Las imágenes correspondientes a los pares formados sobre pasadas

adyacentes deben girarse 90°. Con objeto de obtener una visión estereoscópica confortable de cada par, hay que ajustar el desplazamiento horizontal entre las dos imágenes que lo forman, y minimizar los posibles desplazamientos verticales, para lo que suele ser necesario realizar operaciones de traslación, giro y cambio de escala en al menos una de ellas. Los valores numéricos de estas operaciones han de registrarse y ser tenidos en cuenta a la hora de medir las coordenadas interiores de parejas de puntos homólogos.

4.- Aerotriangulación

En principio, el cálculo del punto de vista (Xs, Ys, Zs, a, b, g) de una fotografía aislada puede realizarse a partir de las coordenadas interiores (x, y) y exteriores (X, Y, Z) de un mínimo de tres puntos cuyas imágenes aparezcan en la fotografía (puntos de apoyo) [3]. Sin embargo es muy difícil en la práctica que tres puntos de estas características sean visibles en la

misma fotografía, incluso hay ocasiones en que no aparece ninguno, por lo que este método no es viable.

La solución a la escasez de puntos de apoyo viene dada por la zona de solape entre fotografías y pasadas contiguas, coincidente con la zona de cobertura común que permite la formación de pares estereoscópicos. A través de las coordenadas interiores de unos puntos “de enlace” comunes a dos o más fotografías se consigue la orientación relativa entre todas ellas, manteniéndose para todo el conjunto la necesidad de un mínimo de tres puntos de apoyo.

Una vez medidos y anotados los puntos de apoyo y de enlace pertinentes se procede a calcular los puntos de vista del conjunto de fotografías, mediante la resolución por mínimos cuadrados [4] del sistema formado por las ecuaciones de proyección de todos los puntos involucrados. Además de los puntos de vista, en este sistema son también incógnitas las coordenadas exteriores (XYZ) de los puntos de enlace anotados. La altura Z de muchos de estos puntos de enlace puede ser conocida a priori, de forma muy fiable, con la ayuda de un mapa topográfico, sobre todo si tales puntos están situados en zonas sensiblemente llanas. Es muy conveniente aprovechar esta circunstancia, y ello da lugar a un tipo especial de puntos de enlace “de altura conocida” por medio de los cuales se mejora la exactitud en altura de las zonas alejadas de los siempre escasos puntos de apoyo. Además, la presencia de al menos un par de estos puntos reduce a dos el mínimo necesario de puntos de apoyo (figura 4).

5.- Medida de coordenadas XYZ

Tras obtener los puntos de vista (Xs, Ys, Zs, a, b, g) de cada

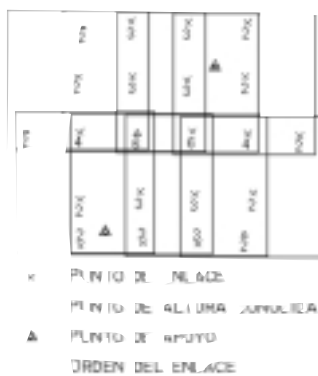


Figura 4. Ejemplo de distribución de puntos de apoyo y de enlace.

una de las fotografías ya es posible medir coordenadas (XYZ) sobre los mismos pares (anaglifos) utilizados en la aerotriangulación. El procedimiento consiste en dibujar dinámicamente sobre el par de interés una pareja de marcas que correspondan a sendas proyecciones, sobre cada una de las dos imágenes que forman el par, de un punto virtual de coordenadas (XYZ) controlables a voluntad. Cada marca debe dibujarse con el color correspondiente a la imagen donde haya de ser visible, gracias a lo cual se percibe estereoscópicamente una marca que “flota” sobre el terreno (marca flotante), y que puede situarse sobre cualquier detalle en la superficie del terreno variando las coordenadas (XYZ) en la dirección deseada.

Varios factores pueden contribuir al error en esta medida de coordenadas, pero entre todos ellos sobresale, haciendo insignificantes a los demás, la imprecisión en el proceso de calibración del escáner. La mencionada imprecisión se ha cuantificado en un error absoluto máximo de aproximadamente 0.15 mm, en cualquier zona de las imágenes digitalizadas. Este error en la medida (xy) sobre las fotos aéreas se transforma en un error (XY) sobre el terreno, que depende de la escala del vuelo. Para los vuelos disponibles más comunes, a escalas entre 1/20000 y 1/40000, el error absoluto máximo estaría comprendido entre 3 y 6 metros. En cuanto al error en altura (Z), puede estimarse en el doble del error (XY) para la mayoría de los casos.

ANAGLIFOS IMPRESOS DE PARES INDEPENDIENTES.

Una gran ventaja de los anaglifos observables sobre la pantalla del ordenador, durante dis-

tintas fases de medida, es la facilidad de imprimirlos, tal como pone de manifiesto la *figura 5*. En ella se muestra el tercio inferior del par formado por las fotografías números 56038 (izquierda) y 56037 (derecha) pertenecientes al vuelo a escala 1/33000 de 1957, y que representa una zona de aproximadamente 4 Km² centrada en la cima del Castro Valnera. Merece la pena detenerse en la contemplación de este monte, particularmente famoso entre la comunidad espeleológica debido a la gran cantidad de simas que alberga, muchas de cuyas bocas son visibles en la imagen.

La retícula dibujada sobre el anaglifo, que corresponde a la cuadrícula UTM (XY) con un intervalo de 200 metros, es un ejemplo gráfico de la distorsión introducida por el relieve, debido a la perspectiva cónica característica de las fotografías. Tal distorsión dificulta la medida de coordenadas (XY), en el caso de utilizar este tipo de anaglifo impreso para situar cavidades o cualquier otro accidente del terreno. Además, la medida de alturas no es posible, a no ser que se dibujen también sobre él curvas de nivel (trayectorias a Z constante), tarea factible pero que perjudica sensiblemente la visibilidad de los detalles del terreno.

Las limitaciones de este anaglifo han servido de estímulo para desarrollar otra forma de proyección que facilite la medida de coordenadas. Ello ha conducido de forma natural a otro tipo de anaglifo con el que, además del objetivo propuesto, se consigue la representación de zonas tan extensas como se desee, a cualquier escala y sin que se aprecien discontinuidades, lo que da lugar a imágenes

del terreno de gran impacto y belleza.

DESARROLLO DEL ANAGLIFO TOPOGRÁFICO.

Como se puede comprobar en la *figura 5*, la fotografía aérea de un terreno accidentado sobre cuya superficie se hubiera dibujado la cuadrícula UTM presenta esta cuadrícula como si estuviera arrugada, lo que es un gran inconveniente en la medida de coordenadas (XY). Existen dos alternativas para que la cuadrícula se vea absolutamente homogénea y ortogonal:

1. Volver a hacer una foto rigurosamente vertical desde mucho más lejos, idealmente desde el infinito.
2. Arrugar la foto original para que reproduzca exactamente el relieve del terreno, y obtener una imagen de esa foto arrugada por proyección ortogonal.

De las dos alternativas, la segunda es asequible, pues básicamente lo único que hace falta es conocer el relieve del terreno representado en la foto, es decir, la altura Z de cada punto XY, y para ello ya se dispone de un procedimiento de medida de coordenadas. Por otro lado, el “arrugado” de la foto original se realiza muy eficazmente con su imagen digital dentro del ordenador, y su proyección ortogonal es una operación trivial.

La *figura 6* es un pequeño anaglifo para ilustrar el proceso de ortogonalización que se acaba de describir. Las dos imágenes que lo componen, que cubren exactamente el mismo rectángulo de terreno, proceden del par mostrado en la *figura 5*. Aunque las dos fotografías originales fueron tomadas desde puntos de vista distintos, las correspondientes imágenes ortogonalizadas deberían ser exactamente iguales,

por lo que en su percepción estereoscópica debería estar ausente cualquier forma de relieve. Como puede observarse esto no ocurre, y a pesar de la planitud general del relieve percibido es notoria cierta rugosidad. Si la altura Z de cada posición XY (píxel) de las dos imágenes ortogonales hubiera sido determinada de forma exacta, no habría lugar a ninguna rugosidad. Obviamente éste no ha sido el caso, pues la medida manual de la altura de todos los píxeles de una imagen sería una labor muy penosa. Lo que se ha determinado es la altura de un conjunto de puntos muchísimo menor, aunque distribuidos uniformemente sobre el plano XY. La altura del resto de los píxeles se calcula por interpolación, y es la diferencia entre la altura interpolada y la altura real quien da lugar a la rugosidad observada, que en cualquier caso afecta muy poco a la medida XY.

No obstante, el relieve original desaparece a consecuencia de la ortogonalización, y eso supone una grave limitación, pues aunque ahora se podrían medir con una regla las coordenadas XY, sobre cualquiera de las imágenes por separado o sobre el anaglifo ortogonal, es muy difícil identificar los accidentes y detalles del terreno que se apreciaban perfectamente en el anaglifo sin transformar (*figura 5*).

Es preciso entonces reponer el relieve original sobre el anaglifo transformado, lo que se puede lograr añadiendo algún tipo de perspectiva a las imágenes ortogonales que lo forman. Para ello basta con desplazar sobre el eje X cada uno de los píxeles de una de las imágenes (en este caso va a ser la izquierda) una distancia proporcional a su altura Z. El eje X (UTM) ele-

gido para tal desplazamiento no es arbitrario, pues equivale al eje Este-Oeste sobre el que se desarrollan las pasadas de los vuelos. Además, la relación entre las alturas y los desplazamientos de los píxeles (relación altura/paralaje) es una constante cuyo valor debe estar próximo a la relación entre la altura media del avión y la distancia media entre dos puntos de vista consecutivos. Teniendo en cuenta estas observaciones se consigue que la rugosidad del relieve (*figura 6*), que la interpolación de alturas no es capaz de discernir, se superponga de forma natural al relieve general o interpolado (*figura 7*), dando lugar a un relieve total (*figura 8*) que se percibe estereoscópicamente con la misma amplitud y textura que en el par original. Adviértase la diferencia entre los anaglifos de las *figuras 7 y 8*; el primero está formado a partir de una sola fotografía (56037), mientras que el segundo contiene ambas.

El anaglifo así transformado es igual al primitivo en cuanto a la visión del relieve e identificación de detalles, pero está dotado de tres notables propiedades:

1. La imagen derecha es una proyección ortogonal del terreno, lo que posibilita la medida directa de coordenadas XY.
2. La separación entre puntos homólogos de las imágenes izquierda y derecha es una función lineal de su altura, por lo tanto es también inmediata la medida de la coordenada Z.
3. Se pueden unir tantos pares contiguos como sea necesario, de la misma pasada o de pasadas adyacentes, siendo prácticamente inapreciables los empalmes.

El adjetivo que se ha asignado a este anaglifo es consecuencia de su estrecha relación con el

mapa topográfico, en cuanto a la proyección y escala horizontales, aunque la información que contiene es exclusivamente fotográfica. Cabe destacar que, en su forma impresa, combina casi todas las ventajas de mapas topográficos y fotos aéreas (*tabla 2*).

En cuanto a la exactitud de las medidas XYZ, al error primitivo procedente de la digitalización hay que añadir el error debido a las diferencias entre las alturas reales y las interpoladas, error que depende del tipo de terreno y de la exactitud y densidad de las alturas medidas. Se ha estimado un valor cuadrático medio del error global XYZ entre 3 y 6 metros, para anaglifos formados con fotografías de vuelos a escalas entre 1/20000 y 1/40000.

En la *figura 9* se muestra un anaglifo topográfico formado a partir de 5 fotos (4 pares) del mencionado vuelo de 1957, y que corresponde básicamente a la mitad superior de la partida BU-XII.A4 del Catastro Espeleológico de Burgos, situada en el extremo norte de la provincia.

Por último, el anaglifo de la *figura 10* está formado por 4 fotos (3 pares) del vuelo 1/30000 de 1985, y representa la porción del Valle de Sotoscueva donde se desarrolla el Complejo de Ojo Guareña. Destacan el valle ciego del río Guareña (Circo de San Bernabé) al NO y el cañón del río Trema unos 3 Km hacia el Este. A pesar de su pequeña escala horizontal (1:25000) son perfectamente visibles varias entradas al sistema.

REFERENCIAS

- [1] RIOSERAS GÓMEZ, Miguel Ángel; PLANA PAN-YART, Pedro (1986): Descripción del método topográfico

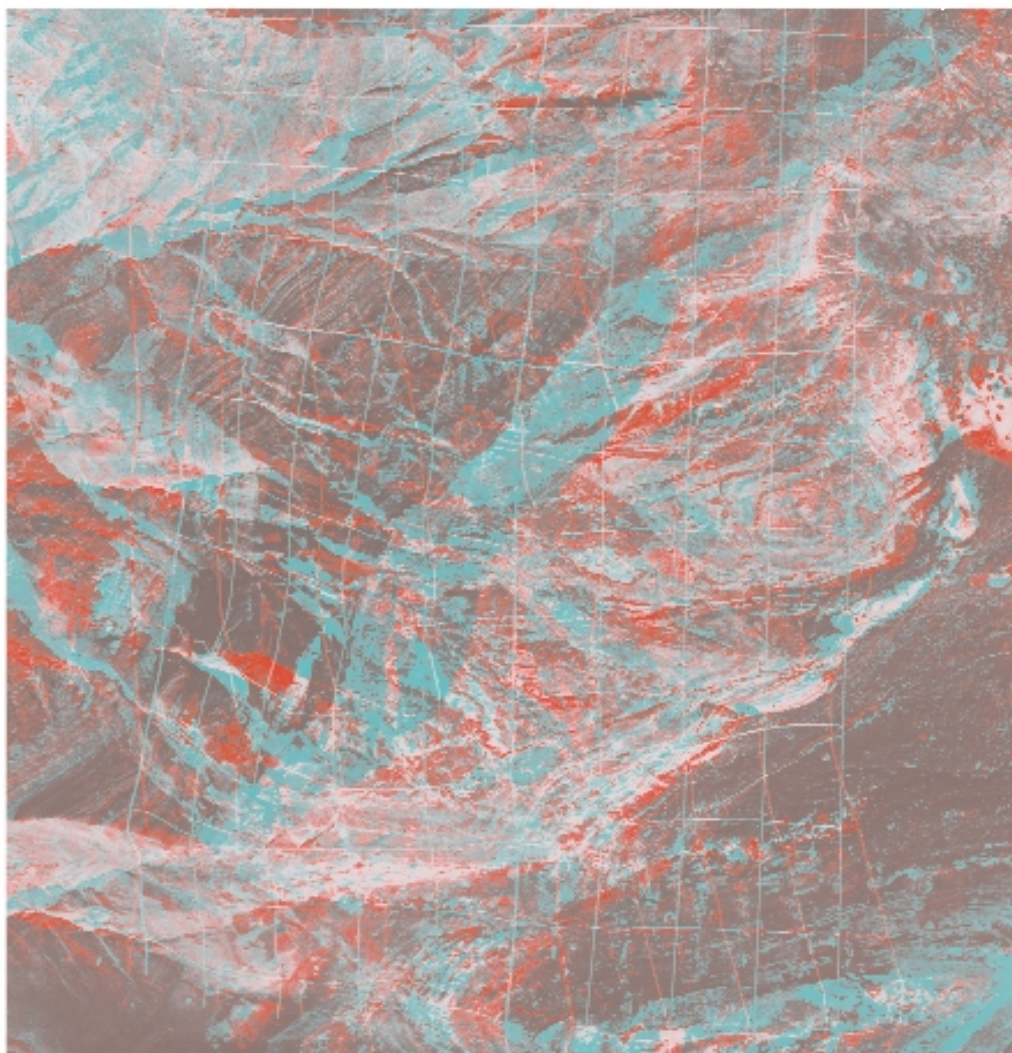


Figura 5. Relieve de un fragmento del par 56038-56037 (Castro Valnera en 1957).

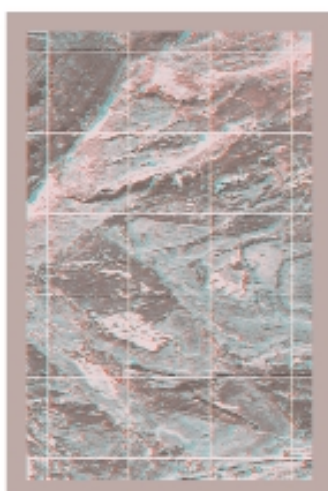


Figura 6.
Rugosidad del relieve.

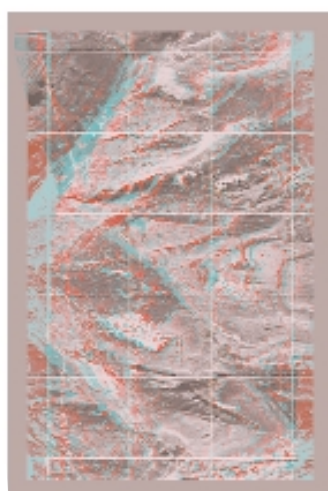


Figura 7
Relieve interpolado

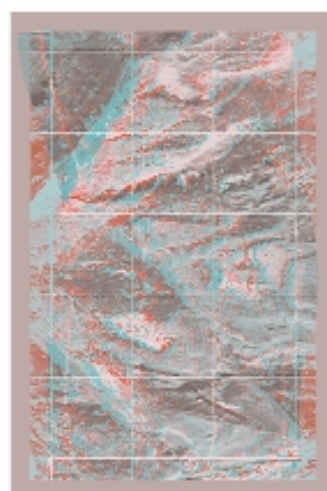


Figura 8
Relieve total



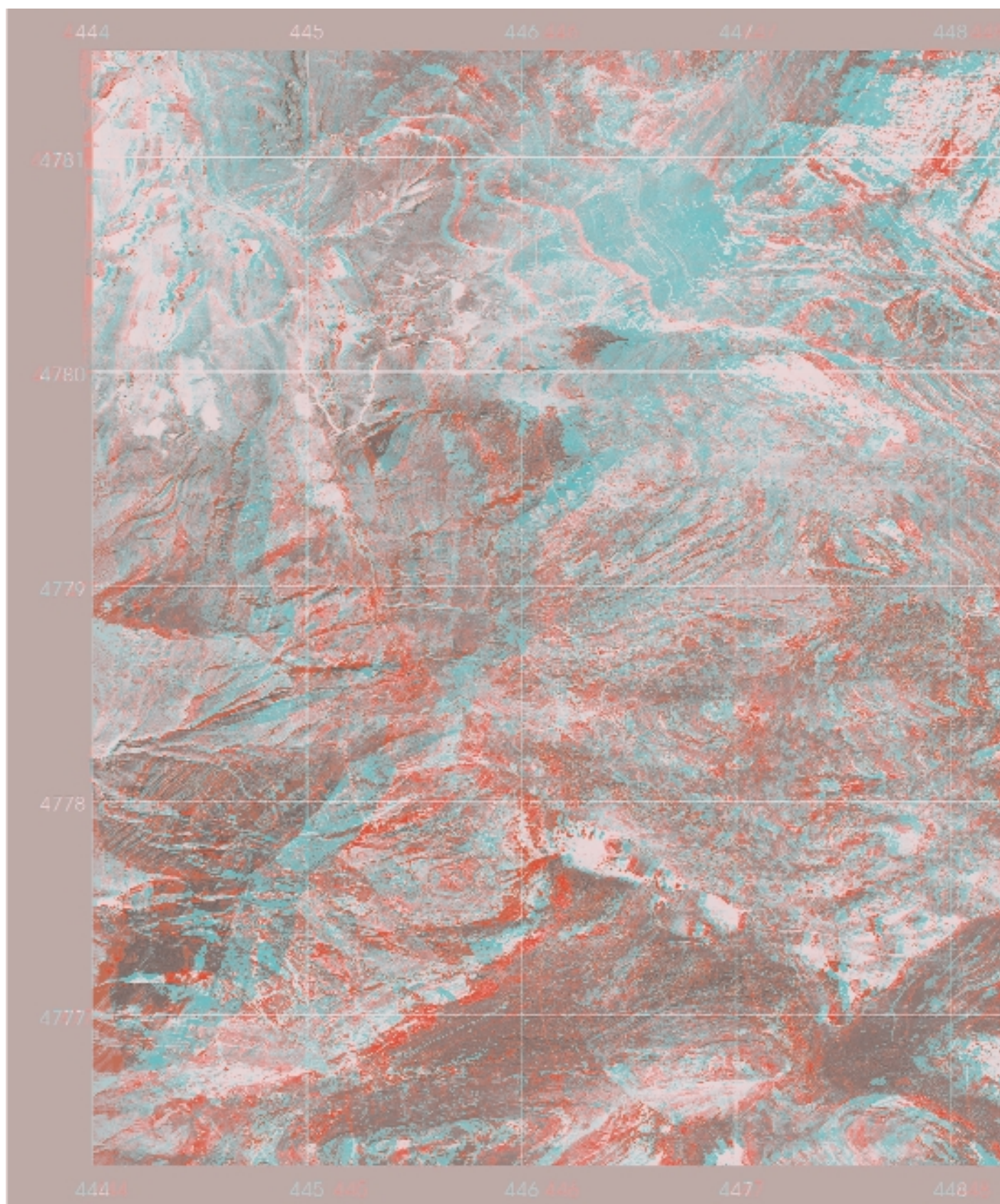


Figura 9. Anaglifo topográfico a escala 1:250.000. Relación altura/paralaje = 2,5. Altura de cruce $H_c = 1.000$ m. Montes de Valnera, puerto y valle de Lunada, Picón del Fraile, Peña Lusa, Tramasquera e Imunía en Julio de 1957.

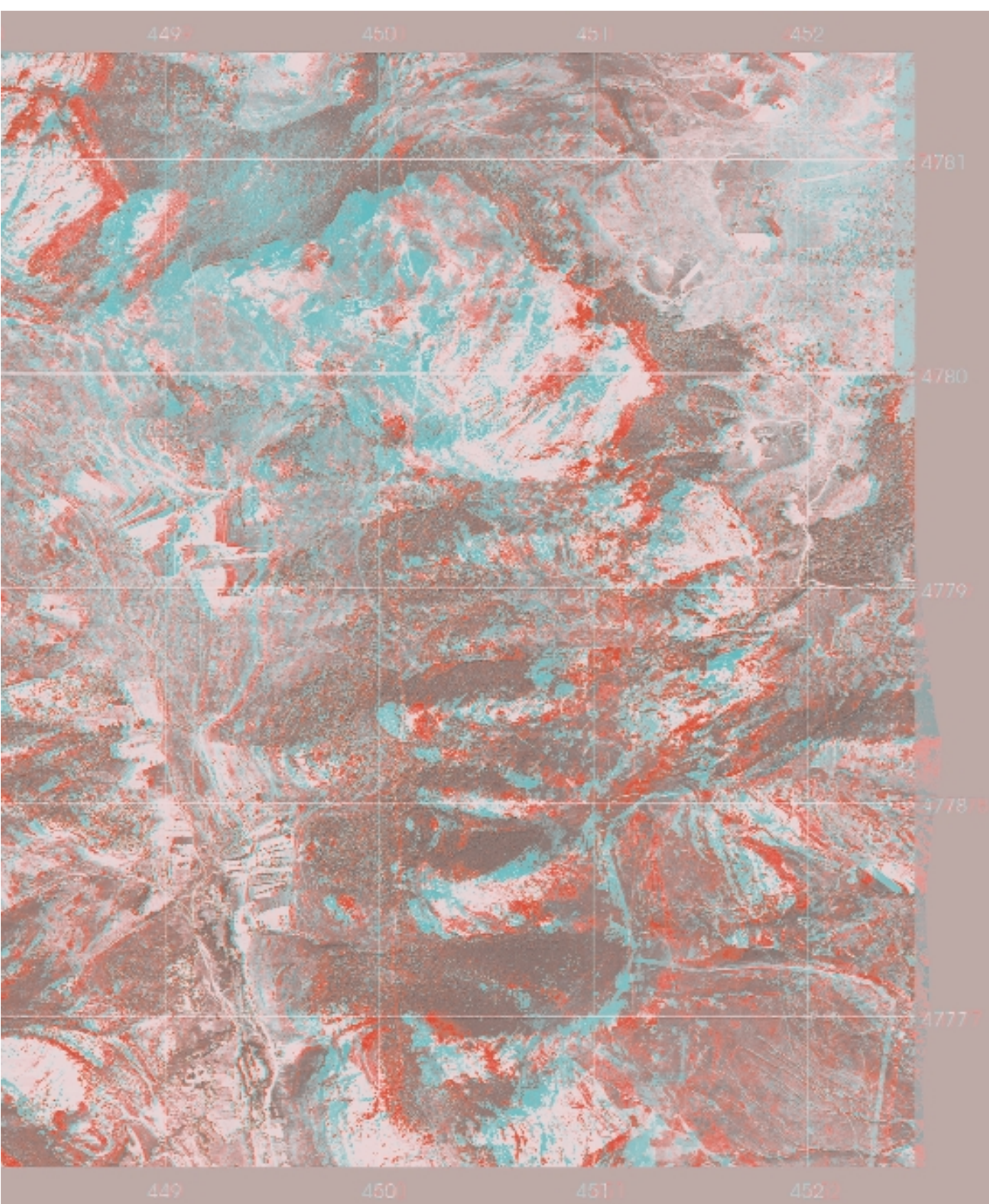




Figura 10. Anaglifo topográfico a escala 1:25000. $A/P = 2.5$ $H_c = 1000$ m.
Exteriores de Ojo Guareña en abril de 1985

empleado en el Complejo de Ojo Guareña, *KAITE, Estudios de Espeleología Burgalesa*, 4-5, pp. 309-330.

[2] GALAZ, Antonio F. (1994): *Localización de un punto por triangulación y mínimos cuadrados*, Inédito.

[3] CHUECA PAZOS, M. (1982): *Topografía (tomo II)*.

Fotogrametría terrestre y aérea. Editorial Dossat S.A.

[4] GALAZ, Antonio F. (2000): *Deducción del punto de vista de fotografías aéreas por mínimos cuadrados*. Inédito.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar un agradecimiento especial a mi primo

Antonio Fernández Galaz, quien me animó a emprender este proyecto y me ayudó a resolver varias dificultades, entre las que sobresale el arduo problema de la aerotriangulación.

CARACTERÍSTICAS	MAPA TOPOGRÁFICO	FOTOGRAFÍA AÉREA	ANAGLIFO TOPOGRÁFICO
Portabilidad	SI	Limitada	SI
Percepción del relieve	Limitada	SI	SI
Identificación de detalles del terreno	NO	SI	SI
Visible sin necesidad de ningún instrumento óptico	SI	NO (estereoscopio)	NO (gafas rojo-cian)
Posibilidad de unir trozos contiguos	SI	NO	SI
Disponibilidad de distintas escalas	SI	Limitada	SI
Medida de coordenadas XY	SI (regla)	NO	SI (regla)
Medida de alturas Z	SI (curvas de nivel)	NO	SI (regla)
Toponimia	SI	NO	NO

TABLA 2. Resumen de características de mapas, fotografías aéreas y anaglifos topográficos.