

LA ESTEREORTOFOTOGRAFIA EN LA ELABORACION DE MAPAS

Por ALVARO GONZALEZ FLETCHER**

INTRODUCCION

Las ideas que aquí se expresan tienen por objeto mostrar el empleo de una técnica útil y expedita que agiliza la elaboración de planos y mapas, especialmente sobre las áreas rurales y áreas urbanas en donde las construcciones sean de escasa altura.

A las técnicas cartográficas propiamente dichas, aquí descritas, se adicionan las facilidades que hoy en día ofrecen la sistematización y digitalización de la información reunida en una imagen del terreno. Todo ello presenta al cartógrafo unas nuevas y mejores posibilidades para que dentro del ámbito de un mundo moderno y dinámico, se dote a los usuarios de un sistema que —sin sacrificar las precisiones debidas— dé prontitud a las soluciones de sus problemas y suministre la base necesaria para la toma de decisiones.

El proceso señalado en este escrito se aparta de los sistemas fotogramétricos hasta ahora considerados convencionales, para buscar soluciones más económicas y pragmáticas con las cuales se dé respuesta rápida a las necesidades de cartografía en regiones carentes de ella o en donde ésta está desactualizada o requiere otras especificaciones.

Lo que aquí se establece no es nuevo en su concepción pero sí en su aplicación, en particular, en nuestro medio. Se trata del uso de la estereortofotografía en la elaboración de planos y cartas o mapas topográficos o temáticos con énfasis en su aplicación en el catastro físico.

Las ortofotografías contienen prácticamente toda la información que puede incluirse en un modelo estereoscópico del terreno que luego puede ser reconstruido por métodos convencionales para producir los respectivos planos o mapas. Desafortunadamente en las técnicas convencionales de la orto-

fotografía, la información contenida en ella está restringida únicamente a la planimétrica. Por otra parte la facilidad de interpretación en una ortofotografía convencional comparada con la del modelo tridimensional del terreno, está de lado de éste último.

Por tanto, lo ideal sería combinar en un sistema técnico la objetividad y precisión del modelo estereoscópico convencional con la expedición de la ortofotografía. Esta técnica es la de la estereortofotografía, cuya simple descripción aquí ofrecemos, junto con sus aspectos teóricos, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en nuestro medio.

ORTOFOTOGRAFIA CONVENCIONAL

En la opinión de muchos expertos las técnicas de ortofotografía son la respuesta al problema de un sistema económico y rápido para la elaboración de mapas.

En el campo de la ortofotografía existen diversas técnicas y se utilizan distintos equipos.

Los principios básicos pueden entenderse por medio de una simple explicación, utilizando un instrumento convencional de proyección directa anaglifa. Asumamos que tenemos un instrumento del tipo Kelsh o Balplex con visión anaglifa.

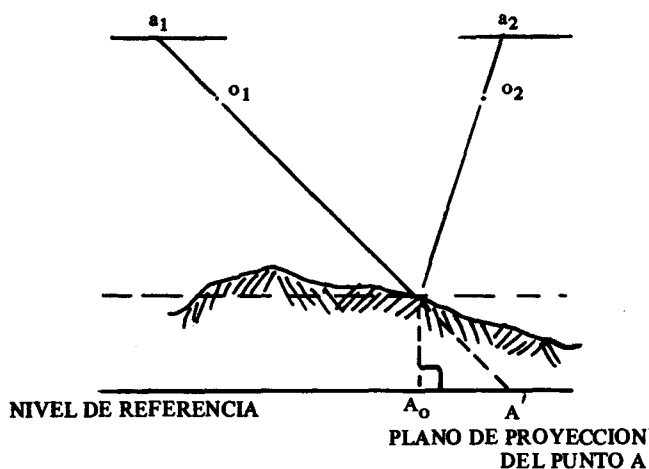
Se orienta un modelo fotográfico en los proyectores del instrumento y se debe disponer de una mesilla movable en la dirección ZZ que se desplaza también en dirección XX y YY. Sobre esa mesilla se coloca una película fotográfica sensible únicamente al color azul, de la imagen proyectada por el proyector izquierdo del aparato. La película se cubre con una lámina opaca en la cual existe una pequeña abertura (digamos de 1 mm. de ancho por 5 mm. de largo), la que se puede mover a lo largo de uno de los ejes. Esta abertura, una vez termine su recorrido en la dirección del eje, se puede des-

* Disertación leída el 20 de marzo de 1985 durante su posesión como Académico Correspondiente.

** Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.

plazar en una longitud igual a la de su ancho en dirección perpendicular a la del movimiento inicial, para continuar con este último movimiento a lo largo del eje primario, produciendo, al hacerse repetitivamente, un barrido total del área del modelo. El observador puede ver una pequeña parte del modelo estereoscópico a través de la abertura mediante el uso de lentes de colores azul y rojo, correspondientes a los colores proyectados. El operador ajusta la altura de la mesa a la de los detalles del modelo. La película fotográfica colocada en la mesa bajo la abertura, como se dijo antes es sólo sensible al color azul, y en la medida en que la abertura se mueve a lo largo de la película colocada en la mesa desplazable, se va registrando en la emulsión fotográfica la imagen proyectada, formando una faja continua longitudinal. La imagen total (ortofoto) es el resultado de la unión fotográfica automática de estas fajas longitudinales.

Lo anterior se realiza por el movimiento longitudinal de la abertura y el desplazamiento en ZZ de la mesa. Puesto que cada elemento de la superficie del terreno, correspondiente a la abertura, es proyectado en el plano XY al nivel adecuado de Z (en el modelo), se elimina el desplazamiento geométrico de la imagen, típico de los procesos de rectificación.



A₀ posición correcta en el proceso de ortofotografía o rectificación diferencial.
A' posición desplazada en el proceso de rectificación convencional.

Suponiendo que los elementos de la superficie del terreno tratados por el sistema antes descrito son infinitesimales, la rectificación diferencial equivale a transformar el sistema de proyección central propio de la fotografía aérea en un sistema de proyección ortogonal con su centro de proyección en el infinito.

Es evidente que la orientación de un modelo estereoscópico del terreno es el pre-requisito del método de rectificación diferencial.

No importa si la información se obtiene de un modelo reconstruido físicamente, solución análoga, o de un modelo matemático abstracto, solución analítica.

El tamaño de la abertura debe establecerse de acuerdo con la topografía del terreno. Esto implica aspectos de precisión y rendimiento. Aberturas pequeñas deben corresponder a terrenos quebrados, mientras que aberturas de gran tamaño lo serán a terrenos planos. Aberturas pequeñas reducen la velocidad de barrido del modelo y por tanto el rendimiento en la elaboración de la ortofoto.

La imagen fotográfica obtenida por el procedimiento aquí descrito es en apariencia igual a una ampliación fotográfica del negativo original, pero en realidad es una imagen equivalente geométricamente a un plano en el cual no hay signos convencionales, ni nomenclatura geográfica.

El sistema de formación de la ortofoto se lleva a cabo por un método de barrido de la imagen del modelo —el cual se hace en dirección XX— y la construcción del perfil de ese barrido longitudinal en la dirección ZZ. Ello hace que este sistema sea muy apropiado para la digitalización automática del modelo.

Por otra parte es lógico pensar que si se hacen perfiles verticales del terreno (dirección ZZ) la determinación de curvas de nivel es también una operación factible y relativamente sencilla. Por tanto, la ortofoto puede ser complementada con la presentación de curvas de nivel o con puntos de elevación conocida y con todos los datos digitalizados de los aspectos planimétricos representados en ella.

AUTOMATIZACION DE LA TECNICA DE LA ORTOFOTOGRAFIA

Una de las posibilidades fundamentales que deben considerarse en la técnica de producción de ortofotografías es la amplia oportunidad de automatizar total o parcialmente el proceso, con la salvedad de que los correladores ópticos usados en los instrumentos hoy diseñados no distinguen entre la superficie del terreno desnudo y la cobertura natural o artificial, por lo cual el uso de este sistema automático no debe utilizarse en zonas con edificios altos o con cobertura vegetal muy elevada. En estos casos se utilizarán ortofotos a escala pequeña en donde el efecto de este cubrimiento produce un error tolerable. Un efecto parecido se produce en zonas demasiado rugosas, si el tamaño de la abertura usada en la rectificación diferencial no es reducido proporcionalmente.

Por otra parte la pequeña zona de rectificación puede no ser la de una abertura rectangular sino de cualquier otra figura regular, tal como un cuadrado u otra figura geométrica cuyo tamaño debe reducirse de acuerdo con lo abrupto de la topografía. A mayor relieve, menor tamaño de la figura o abertura.

En resumen puede decirse que a pesar de las limitaciones inherentes al sistema de correlación de imágenes a lo largo de líneas de perfil (barrido automático) se debe pensar que el proceso de ortofotografías es significativamente más automatizado que

el sistema de restitución automática. Adicionalmente el sistema de elaboración de perfiles automáticos provee simultáneamente la facilidad para digitalizar la topografía y para la elaboración de curvas de nivel y de modelos digitales del terreno, los cuales pueden ser presentados en forma gráfica o numérica.

LIMITACIONES DE LA ORTOFOTOGRAFIA CONVENCIONAL

A pesar de las ventajas antes explicadas, de uniformidad de escala y de representación planimétrica completa del terreno correspondiente al modelo o modelos fotográficos, la ortofotografía presenta las siguientes limitaciones:

- a) Dificultad en lo que se ha llamado lectura cartográfica o lectura de mapas;
- b) Incapacidad para suministrar información sobre características verticales del terreno y de los detalles naturales o artificiales localizados sobre él.

La primera de estas limitaciones se debe a dos hechos: la representación bidimensional de objetos tridimensionales dificulta su foto-identificación y los detalles del terreno pueden aparecer en tonos muy oscuros o grises, sin contraste en una fotografía, pero no así en la otra fotografía de par estereoscópico. Esto último facilita la interpretación y foto-identificación de objetos del terreno en el sistema convencional. La ortofotografía simple no ofrece esta ventaja.

La ortofotografía simple no contiene información sobre cotas o alturas del terreno. Aún si ésta es complementada con las curvas de nivel, el resultado no es satisfactorio en el campo vertical.

Con el fin de superar estas limitaciones y dificultades se ha encontrado la estereortofotografía como solución.

OBSERVACION ESTEREOSCOPICA DE LAS ORTOFOTOGRAFIAS

Las ortofotografías convencionales pueden observarse estereoscópicamente con el empleo de la otra fotografía que forma el par estereoscópico correspondiente. Pueden entonces presentarse dos casos: las imágenes (ortofoto y fotografía convencional) se encuentran a una escala diferente, o se ha ampliado la fotografía que forma el estereo-par para facilitar la visión estereoscópica.

En uno u otro caso el proceso es dispendioso y los resultados no son prácticos, especialmente para la restitución de líneas continuas, por los desplazamientos en Y que hay que llevar a cabo para conservar la visión tridimensional del terreno. Por otro lado no hay una definición clara de la dimensión en Z y los paralajes en X son afectados por la inclinación de la fotografía que forma el par con la ortofoto.

Otra posibilidad para mejorar la interpretación de ortofotografías sería la de elaborar pares de ortofotos de las dos fotografías del estereo-par.

La observación de pares de ortofotos es sencilla si se tiene en cuenta que no hay paralaje horizontal, pero como resultado de ello el terreno aparece plano a pesar de no serlo. Sólo los detalles verticales, tales como árboles o edificios, pueden observarse tridimensionalmente por no estar en el plano de rectificación diferencial ya que ésta se aplica al terreno. Por tanto, este método no es aplicable para obtener información vertical del terreno.

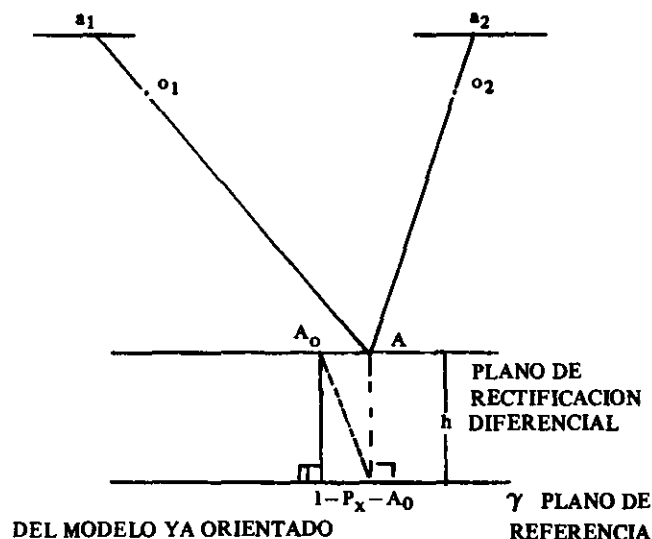
TEORIA DE LA ESTEREORTOFOTOGRAFIA

La solución que ofrece resultados ampliamente satisfactorios para lograr la uniformidad de escala y la facilidad de interpretación e identificación de los detalles del terreno y la información vertical adecuada, es la denominada estereortofotografía.

La idea general para dar esta solución, se inicia con el concepto de pares de ortofotografías pero con una diferencia fundamental en una de ellas que consiste en introducir en la imagen compañera de la ortofoto básica, un paralaje artificial en dirección XX, proporcional a las diferencias de alturas del terreno.

Para dar una simple explicación al principio enunciado, volvamos a nuestro ejemplo del modelo formado en un instrumento de proyección tipo Kelsh o Balplex.

CONSIDEREMOS UN PUNTO A



El punto A corresponde en el plano de referencia a A' según la proyección ortogonal.

Suponiendo que para los puntos de una de las dos fotografías, la derecha por ejemplo, el plano de proyección que contiene la película en donde se formará la ortofoto es desplazado en un paralaje horizontal P_x proporcional a la diferencia de elevación entre el punto A y el plano de referencia de las alturas, se creará en la película una imagen continua que se ha denominado estereo-pareja, en la

cual todos los puntos tendrán las coordenadas Y iguales a los de la ortofoto producida a partir de la fotografía izquierda y las coordenadas X serán modificadas por paralajes proporcionales a sus diferencias de elevación. Puesto que el paralaje en dirección Y ha sido eliminado en todos los puntos, la observación tridimensional de estas imágenes, la ortofoto y su estereo-par, es muy sencilla.

No es necesario un instrumento con óptica compleja o un instrumento anaglifo. En un sencillo estereoscopio pueden ser observadas estas imágenes.

La importancia de este logro es la de que la estereortofotografía ofrece una completa, sencilla y práctica solución a muchos problemas de cartografía y fotointerpretación.

La ortofotografía es una proyección paralela y ortogonal del terreno y la estereo-pareja es una proyección oblicua paralela del terreno.

PRINCIPIOS GEOMETRICOS BASICOS

Un par de estereortofotografías está constituido por dos imágenes rectificadas diferencialmente. Una de las ortofotografías del par ha sido modificada por el paralaje horizontal P_x el cual se ha hecho proporcional a las diferencias de elevación h del terreno sobre un plano de referencia.

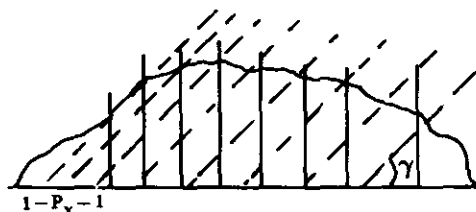
Por tanto:

$$P_x = c.h \quad (1)$$

en donde C es una constante arbitraria, la cual puede hacerse igual a:

$$\frac{1}{\tan \delta}$$

En esta solución la ortofoto es una proyección ortogonal del modelo del terreno sobre el plano de referencia con el centro de proyección en el infinito y la ortofoto compañera o la que forma el par es una proyección paralela oblicua, con el centro de proyección también en el infinito. El plano de referencia de las dos ortofotos es el mismo.



La fórmula $P_x = c.h$ contiene el concepto fundamental de la estereortofotografía.

La ortofoto compañera o estereo-par es idéntica a la otra, exceptuando que se le ha introducido a cada punto un paralaje artificial P_x , proporcional a su elevación sobre el plano de referencia.

Al seleccionar el valor de C se pueden considerar diversos factores. Si se usa un valor muy grande, la observación del modelo se puede exagerar en su aspecto vertical y distorsionar la apariencia del estereo-par. El otro factor a considerar es el de la presentación uniforme de los objetos naturales o artificiales tales como árboles, construcciones, etc.

El paralaje de estos detalles en las estereortofotografías es aproximadamente igual a:

$$P_x = \frac{B}{H-h} \quad \Delta P_x \cong \frac{B}{H-h} \Delta h \quad (2)$$

en donde B es la base en el aire, H es la distancia de proyección promedio, h la altura sobre el plano de referencia del terreno, y Δh la altura del objeto.

ΔP_x es el paralaje diferencial de objetos elevados, localizados sobre el terreno.

Las estereortofotografías producidas por la fórmula básica (1) definen la superficie del terreno, pero para objetos elevados localizados sobre él se hace necesario utilizar otra escala.

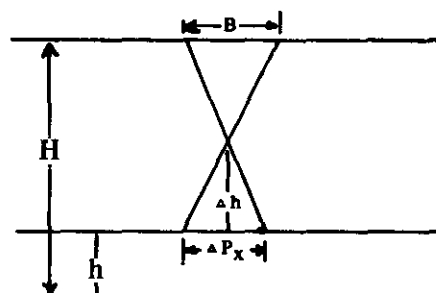
Puesto que el paralaje fotográfico de estos objetos elevados no puede cambiarse y el paralaje artificial introducido a la ortofotografía tiene un valor arbitrario parece que es conveniente usar la siguiente aproximación para C :

$$C \cong \frac{B}{H-h} = \frac{B}{H}$$

la conocida relación base, altura.

El valor exacto del paralaje ΔP_x en el plano correspondiente a una altura h sobre el plano de referencia es:

$$\Delta P_x = \frac{\Delta h}{H-h-\Delta h}$$



PARALAJE DIFERENCIAL DE UN OBJETO ELEVADO SOBRE EL TERRENO

$$\Delta P_x = \frac{\Delta h}{H-h-\Delta h}$$

$$\Delta P_x = \frac{B \Delta h}{H-h-\Delta h} \quad (4)$$

Esta fórmula da el paralaje de los objetos elevados sobre el nivel del terreno. Durante la producción del estereopar se lleva a cabo un desplazamiento en dirección XX de la película para los puntos del terreno. Si a este desplazamiento (4) le agregamos

la fórmula inicial $P_x = \frac{B}{H} h$ tendremos el paralaje total.

$$\frac{B}{H} h + \frac{B \Delta h}{H-h-\Delta h}$$

Esta expresión fue probada por el Consejo Nacional de Investigaciones del Canadá, encontrándose que es más adecuada la fórmula propuesta por S.H. Collins, a saber:

$$P_x = B \ln \left(\frac{H}{H-h} \right)$$

para generar el paralaje artificial. Con el fin de tener en cuenta tanto paralajes de los objetos naturales como de los artificiales y de que la fórmula de paralaje sea aplicable a unos y otros y al terreno, podemos decir que para considerar cambios infinitesimales de altura dh a una altura dada h podemos sustituir en la ecuación (2) Δh por dh y tener una integral

$$P_x = \int \frac{h B}{H-h} dh = B \ln \left(\frac{H}{H-h} \right) \quad (5)$$

si el paralaje artificial se introduce según la fórmula (5) las elevaciones del terreno y las de los objetivos elevados localizados sobre él estarán a la misma escala, evitando la ambigüedad antes indicada. Esto también es aplicable cuando la abertura del instrumento en el cual se producen las ortofotos es de un tamaño muy grande y por tanto puede aparecer el terreno con alturas diferentes, cuyo efecto es el mismo del producido por objetos elevados sobre el nivel del terreno.

El error en la medición de paralaje en la ortofoto producido en la elaboración de perfiles, se expresa por la fórmula

$$\Delta P_x = \left(\frac{X}{H-h} \right) (\Delta Z_2 - \Delta Z_1)$$

en donde X es la distancia del punto al nadir, ΔZ_1 y ΔZ_2 los errores en la medición de cotas. Si ΔZ_1 y ΔZ_2 son pequeños por un cuidadoso trabajo en la elaboración de perfiles, la expresión anterior es válida. Los errores en cotas están por debajo del límite del 1%. El máximo error planimétrico en las ortofotos se expresa por:

$$\Delta X' = \Delta Y' \frac{0.2881 \tan B}{1 + 1.155 \tan B}$$

siendo la longitud de la abertura YB y el ángulo dependiente del terreno en dirección Y .

INSTRUMENTOS USADOS EN LA PRODUCCION DE ORTOFOTOS

Existen hoy en día diversas clases de equipos que pueden ser utilizados en la producción de ortofotos. Los más destacados son los fabricados por las casas Wild de Suiza, Zeiss de Alemania y Nothway Gestalt Corporation del Canadá, pero la elaboración de estereortofotografías es en principio llevada a cabo por el instrumento de la casa Gestalt.

El tiempo necesario para producir la ortofoto y estereo-par es considerablemente breve en el sistema automático de barrido del instrumento GPM de la Gestalt.

De este instrumento no solamente se obtienen la ortofoto y su estereo-par sino el llamado D.T.M.

o modelo digital del terreno para un total de 800.000 puntos por modelo, para los cuales se le han establecido sus coordenadas tanto planas como su altura sobre el nivel de referencia.

Al disponer de este material es fácil elaborar los mapas o planos convencionales, llamados mapas de línea, los ortofoto-mapas que ofrecen la imagen fotográfica del terreno junto con la información sobrepuesta en ellos como nomenclatura geográfica y curvas de nivel.

Los procedimientos para transformar las estereortofotografías en mapas convencionales (de línea) requieren la utilización de instrumentos muy sencillos denominados estereo-restituidores en los cuales se puede transformar el terreno representado en el modelo ampliado de la fotografía y fácilmente orientado, lo cual ofrece una gran facilidad por no requerir personal altamente entrenado y especializado y dar rendimiento altísimo en calidad y cantidad.

Además de estas ventajas el estereo-restituidor puede tener la capacidad para digitalizar más densamente los detalles de la superficie terrestre que deseen ser representados y codificados.

Por otra parte la información de las ortofotos puede ser digitalizada en una sencilla mesa de dibujo unida a un nuevo-procesador, la que se ha denominado la mesa digitalizadora, con la cual toda la información planimétrica del terreno puede ser codificada y almacenada, junta con toda la adicional sobre calidad de suelos, aguas y en general recursos naturales que se desee incluir, creando de esa forma un banco de datos de información geográfica, todos ellos ligados a los mapas y a las coordenadas propias de esos mapas.

MAPAS TEMATICOS

La estereortofotografía ofrece una amplia facilidad para la interpretación fotográfica de los diversos detalles del terreno. Ello agregado a las facilidades y ventajas que para la elaboración de la base cargográfica tiene el sistema, constituyen las bases para la elaboración de diversas clases de mapas, tanto topográficos como temáticos.

Especial énfasis podemos dar a los mapas o cartas catastrales. Históricamente el catastro ha sido concedido como el inventario de la propiedad inmueble. Sin embargo hoy en día se considera que las cartas catastrales pueden constituir la base para un sistema de cubrimiento cartográfico a escala mediana y grande de un país o región.

Además, a lo anterior se adiciona el hecho de que el inventario catastral trae consigo una enorme riqueza de información, no sólo por su variedad sino por la posible e intrínseca calidad lograda con el reconocimiento que es necesario hacer a cada predio.

Por tanto de todo esto se puede crear un banco de información sobre la tierra y sus recursos, y sobre su valor económico gracias a la capacidad que hoy existe para almacenar y manejar un enorme vo-

lumen de datos mediante la informática. Se dispone así de la herramienta básica para la planeación del desarrollo y la administración de los recursos.

CONCLUSIONES

El sistema esteortofotográfico presenta un concepto importante en varios aspectos:

- a) Una técnica completa en fotointerpretación y elaboración de mapas, cartas o planos.
- b) Una enorme facilidad y rapidez para los procesos antes señalados, permitiendo una descentralización del sistema de producción al tener un sitio la elaboración de las estereortofotos y otro los procesos de conversión de éstas en mapas o planos, con equipos simples y personal aún con poca experiencia en la operación de restituidores convencionales.

- c) La respuesta adecuada por su sencillez y efectividad en la actualización de cartas.
- d) Su extrema simplicidad y las otras características como la precisión del sistema, lo hacen muy apropiado para el establecimiento de un catastro moderno. Esto es de particular interés en los países en desarrollo.
- e) La posibilidad de cubrir con cargografía adecuada vastas regiones carentes de ella o en donde la calidad de los mapas no es suficiente.
- f) Es necesario entender que el sistema no ofrece las calidades que se requieren en zonas urbanas en donde el valor económico de la tierra y las condiciones de desarrollo exigen una altísima precisión altimétrica y planimétrica.
- g) El sistema ofrece amplias y nuevas posibilidades en la elaboración de planos y mapas. Se están adelantando investigaciones en esta técnica para hacerla más profunda y operativa.