

W A P I N G

Revista Internacional de Ciencias de la Tierra

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

MEDIO AMBIENTE

TELEDETECCIÓN

CARTOGRAFÍA

CATASTRO

TURISMO



Cartografía Digital



MINISTERIO
DE FOMENTO

DIRECCIÓN GENERAL
DEL INSTITUTO
GEOGRÁFICO NACIONAL



CENTRO NACIONAL
DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA

BASE CARTOGRÁFICA NUMÉRICA (BCN1000, 500, 200, 25),
MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (MTN50, 25),
MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT1000, 200, 25),
LÍNEAS LÍMITE, BASE DE DATOS DE POBLACIÓN, MAPA DE USOS DEL SUELO,
FOTROGRAFÍA AÉREA, MAPA POLÍTICO DE EUROPA,
MAPA POLÍTICO DEL MUNDO, CALLEJEROS Y OTROS PRODUCTOS.

Oficina central y comercialización:
General Ibáñez de Ibero, 3 • 28003 MADRID
Teléfono: +34 91 597 94 53 • Fax: +34 91 553 29 13
e-mail: consulta@cnig.es • <http://www.cnig.es>

SOKKIA

DITAC



GSR2700 ISX

TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE LA INGENIERÍA



ESTACIÓN TOTAL ROBOTIZADA
SERIE SRX

CONFIANZA, INNOVACIÓN, SATISFACCIÓN... SENSACIONES QUE

ENCONTRARÁ EN EL NUEVO PROYECTO DE

SOKKIA ESPAÑA

DITAC SOLUCIONES
C/Albasanz, 14 Bis. 1ºE
28037 Madrid
Tel.: +34 91 440 13 20
Fax: +34 91 375 95 62

info@sokkiaditac.es
www.sokkiaditac.es

M A P P I N G

COMITE CIENTIFICO

PRESIDENTE DE HONOR:

D. Rodolfo Nuñez de la Cuevas

EDITOR JEFE:

D. José Ignacio Nadal Cabrero

EDITOR:

D. Andres Seco Meneses

Universidad Pública de Navarra, España

MIEMBROS:

D. Javier González Matesanz

Instituto Geográfico Nacional, España

D. Benjamín Piña Paton

Universidad de Cantabria, España

D. Andrés Díez Galilea

Universidad Politécnica de Madrid, España

D. Stéphane Durand

École Supérieure de Géomètres

Et Topographes, Le Mans, Francia

Dña. Emma Flores

Instituto Geográfico, El Salvador

Dña. Tatiana Delgado Fernández

Grupo Empresarial Geocuba, Cuba

D. Luis Rafael Díaz Cisneros

Cesigma, Cuba

Dña. Sayuri Mendes

Instituto de Geografía Tropical, Cuba

Dña. Rocío Rueda Hurtado

Universidad de Morelos, México

Dña. María Iniesto Alba

Universidad de Santiago, España

Dña. Cleópatra Magalhaes Pereira

Universidad de Oporto, Portugal

D. Javier García García

Instituto Geográfico Nacional, España

D. Jorge Delgado García

Universidad de Jaén

SUMARIO

6 DIELMOOPENLIDAR: CONTROL DE CALIDAD DE DATOS LIDAR Y GENERACIÓN DE PRODUCTOS FINALES

12 CAUCES MEANDRIFORMES Y RIESGOS NATURALES EN LA CARTOGRAFÍA HISTÓRICA DEL MEDITERRÁNEO ESPAÑOL

18 INTERFEROMETRÍA RADAR APLICADA A TERREMOTOS DE MAGNITUD MODERADA EN LAS CORDILLERAS BÉTICAS, SO ESPAÑA

24 PRESENTACIÓN DE UN METODO PARALELO A LA NORMA ISO 17123-5 PARA ESTACIONES TOTALES

28 FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS GEOESPACIALES A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED GEODÉSICA CANTONAL ENLAZADA A SIRGAS EN CUENCA-ECUADOR

38 MODELO DIGITAL DEL TERRENO Y CARTOGRAFÍA DEL VOLCÁN DE COLIMA (MÉXICO) UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT Y UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

44 EVALUACIÓN DE UN ÍNDICE DE ALISTAMIENTO EN INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES EN IBEROAMÉRICA Y EL CARIBE

47 EL ÉXITO DE LA GEODESIA ESPACIAL

52 LA IMAGEN CARTOGRAFICA DEL TERRITORIO Y SU CONSOLIDACIÓN EN EL SIGLO XIX

81 INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES DE LA REPÚBLICA DE CUBA (IDERC) EN SU ETAPA DE INSTITUCIONALIZACIÓN

84 USO DE INFORMACIÓN BASADA EN LA UBICACIÓN PARA ADMINISTRACIÓN MEJOR LOS CAMPAMENTOS DE REFUGIADOS EN TODO EL MUNDO - EL CASO DEL ACNUR

86 RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA Y MATERIALIZACIÓN DE UNA ESCULTURA

94 INCIDENCIA DE LA GEOMORFOLOGIA EN LOS IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS EN LA CARRETERA DE BELTRAN, GUANTANAMO, CUBA

Foto Portada: ESPAÑA 1584. Carpetania [ca.1:250.000]; Guipúzcoa [ca.1:300.000] Cádiz [ca.1:100.000] Otelio (Publicada en el libro "La Imagen del Mundo 500 Años de Cartografía") **Edita:** Revista Mapping, S.L. **Redacción, Administración y Publicación:** C/Hileras, 4 Madrid 28013 - Tel. 91 547 11 16 - 91 547 74 69 www.mappinginteractivo.com. E-mail: mapping@revistamapping.com **Diseño Portada:** R & A MARKETING **Fotomecánica:** P.C. **Impresión:** COMGRAFIC **ISSN:** 1.131-9.100 **Dep. Legal:** B-4.987-92.

Los trabajos publicados expresan sólo la opinión de los autores y la Revista no se hace responsable de su contenido.

Venta y Alquiler de Instrumentos Topográficos

Servicio Técnico · HDS Laser Scan Levantamientos en 3D
GRP System FX Medición y control de vías férreas · Servicios de Topografía



GRUPO ACRE

grupoacre.com referenciasgps.es

Leica
Geosystems

902 490 839 · grupoacre@grupoacre.com
Autovia A42 Salida 35 Pol. Ind. "Los Pradillos"

Survey To Our Planet

DielmoOpenLiDAR: control de calidad de datos LiDAR y generación de productos finales.



J.C. García. Director Gerente de DIELMO 3D S.L. - Valencia

1. Resumen

Desde hace más de 5 años DIELMO 3D S.L. ha estado trabajando en el desarrollo de software para el procesado de datos LiDAR, usándolo internamente para la producción de Modelos Digitales del Terreno (MDT) en numerosos proyectos. Finalmente, con la ayuda de la CIT hemos decidido tomar la iniciativa de crear un nuevo software libre basado en gvSIG para el manejo de datos LiDAR.

En primer lugar haremos una introducción a la tecnología LiDAR, comentando los fundamentos básicos, los datos originales que se obtienen después de un vuelo y las aplicaciones o productos finales que se pueden generar a partir de la tecnología LiDAR.

Una vez familiarizados con este tipo de datos, mostraremos el uso del driver desarrollado por DIELMO para el acceso, visualización y análisis de datos LiDAR originales en formato LAS y BIN para grandes volúmenes de datos. Por último comentaremos las herramientas que se están desarrollando para realizar controles de calidad a los datos originales y generar diferentes productos finales a partir de los datos originales: Modelo Digital del Terreno (MDT), Modelo Digital de Superficie (MDS) e imagen de intensidades.

Palabras clave: LiDAR, DielmoOpenLiDAR, MDT, software libre.

2. Fundamentos de la tecnología LiDAR

El LiDAR aerotransportado (Light Detection And Ranging) es un sistema activo basado en un sensor láser que se puede instalar en aviones o helicópteros. Esta tecnología está sustituyendo cada vez más a los métodos basados en fotogrametría para obtener MDT de alta precisión, porque consigue disminuir los costes y plazos de entrega a la vez que se obtienen precisiones mejores de 15cm en altura y una mayor densidad de medidas.

El funcionamiento del LiDAR consiste en un sensor de barrido que realiza la emisión de pulsos láser y mide el tiempo que tardan dichos pulsos en llegar a la superficie terrestre y volver hasta el sensor. Actualmente hay instrumentos LiDAR que miden hasta con una frecuencia de 150 Khz, lo que quiere decir que emiten y reciben 150.000 pulsos láser por segundo.

En principio todos los rayos láser salen en una única dirección apuntando hacia abajo, pero hay un espejo rotatorio que los desvía a ambos lados del avión con un ángulo de apertura configurable, de forma que se realiza un barrido de una determinada franja del terreno (la anchura dependerá de la altura del vuelo) conforme avanza el avión. Por otro lado, en el avión hay instalado un GPS que permite posicionar en tiempo real al instrumento, para saber en cada momento donde se encuentra. Para aumentar la precisión en el posicionamiento del instrumento, se utiliza un GPS diferencial en tierra (también se pueden utilizar estaciones de referencia como la red de estaciones permanentes GPS del IGN está conformada actualmente por 17 estaciones a lo largo de todo el territorio Español). Después de

realizar el vuelo se combinan los datos GPS del avión con los del GPS diferencial en tierra, para obtener precisiones de 5 cm en la posición del instrumento.

Por último, se dispone del sistema de navegación inercial del avión (IRS) que mide con una precisión de 0.001 grados las variaciones en la orientación del avión debidas a turbulencias, pequeños giros, inclinaciones, etc., de forma que se pueden compensar dichos movimientos.

Combinando toda esta información (distancia medida con el láser, ángulo del espejo que realiza el barrido, posición exacta del instrumento con GPS y sistema de navegación inercial), podemos obtener la medición de la altura del terreno con una precisión mejor que 15 cm en Z.

Cuando el rayo láser llega al terreno se comporta de forma diferente dependiendo de las características de los objetos que se encuentre. En la figura 2 vemos tres casos posibles.

1. En una **superficie sólida** (edificios, suelo, etc.), el rayo se refleja sin ningún problema y vuelve al avión.
2. En el **agua** el rayo láser sufre una reflexión especular y no vuelve al avión, por lo que no se obtiene ninguna información, apareciendo un hueco sin datos que habrá que interpolar a partir de las alturas de alrededor o de otros datos batimétricos de los que se pueda disponer.
3. En el caso de la **vegetación**, el rayo choca en primer lugar con la copa del árbol. En este momento parte del rayo se refleja y vuelve al avión, pero al tratarse de una superficie no sólida, hay otra parte del rayo que atraviesa la vegetación hasta llegar al suelo y vuelve al avión. El sistema guarda las coordenadas y alturas del primer y último pulso.

Una de las ventajas de la tecnología LiDAR consiste en la posibilidad de medir para cada pulso el primer y el último de los rebotes que vuelven al avión. Esto permite (con la configuración de vuelo adecuada) medir la altura del terreno en zonas completamente cubiertas por la vegetación, lo cual no es posible con técnicas de medición clásicas como la fotogrametría.

Un proyecto LiDAR se puede dividir en dos bloques claramente diferenciados: la adquisición de los datos y el procesado de los mismos. Hasta el momento hemos hecho referencia a la parte de adquisición de los datos, pero sin duda la parte más importante está en el procesado de los datos para obtener los diferentes productos finales. Los productos estándar obtenidos después del procesado de los datos LiDAR se muestran en la figura 3.

- **Nube de puntos irregular** correspondiente a los puntos LiDAR originales.
- **MDS** (Modelo Digital de Superficie) se obtiene interpolando los puntos del primer pulso. Aquí podemos

distinguir las alturas de los edificios, vegetación, puentes, coches, farolas, etc., como vemos en la parte izquierda de la figura 3.

- **MDT (Modelo Digital del Terreno)** se obtiene interpolando los puntos del último pulso, eliminando los puntos que no pertenecen al terreno. Lo vemos en la parte derecha de la figura 3, donde se aprecia que hemos simulado la misma zona pero eliminando edificios, vegetación y demás objetos no pertenecientes al terreno.
- **Clasificaciones** de los puntos pertenecientes a suelo, vegetación, edificios, puentes, líneas eléctricas, etc.
- **Imagen de intensidades.** A partir de la amplitud de la señal que vuelve al avión después de rebotar en la superficie terrestre obtenemos una imagen de intensidades que permite realizar distinciones entre superficies, identificando carreteras, etc. Una muestra de una imagen de intensidades la vemos en la figura 4.

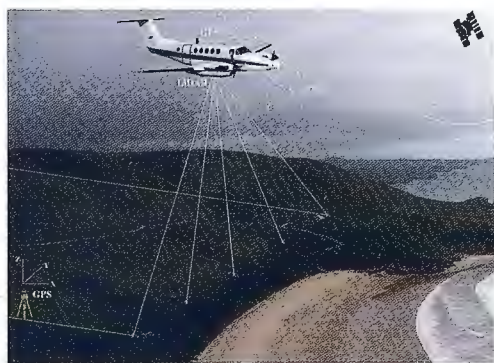


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la tecnología LiDAR

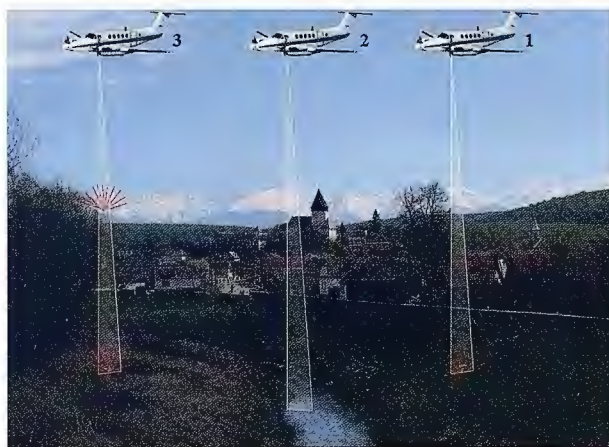


Figura 2. Funcionamiento del LiDAR ante diferentes superficies.

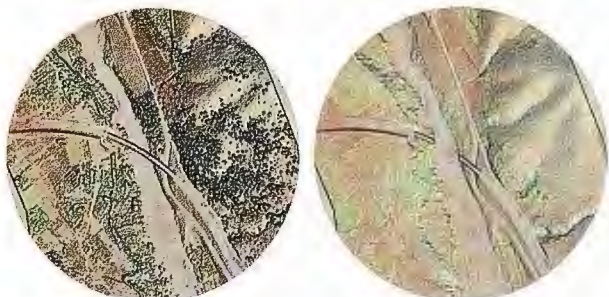


Figura 3. Productos estándar obtenidos después del procesado de datos LIDAR.

A partir de estos productos estándar, se pueden obtener otros productos derivados que se pueden aplicar a numerosas aplicaciones. A continuación vemos algunas de las

aplicaciones para las que se puede utilizar la tecnología LiDAR.

4. Aplicaciones de la tecnología LiDAR

Las principales aplicaciones para las que se suele utilizar la tecnología LiDAR son:

- **Cartografía para estudios de inundaciones:** una de las principales aplicaciones para lo que se está usando esta tecnología en España es para la realización de estudios de hidráulicos y de inundabilidad. Para este tipo de trabajos se necesitan nuevas mediciones precisas de las alturas del terreno. Habitualmente todos estos trabajos se realizaban con fotogrametría (se genera cartografía de detalle a partir de imágenes aéreas y con esa cartografía luego se produce el MDT), lo que conlleva un elevado coste y largos plazos de entrega. Con la tecnología LIDAR se pueden medir grandes extensiones con un menor coste, menor plazo de entrega, se dispone de una medición de alturas para cada metro cuadrado del terreno (mientras que en zonas planas, las curvas de nivel pueden estar muy separadas y al interpolar el MDT no es tan realista), permite medir las alturas del terreno debajo de la vegetación, menor dependencia con las condiciones climáticas, se pueden volar muchos más días al año, al ser un sensor activo no necesita la luz del sol y se puede volar de día o de noche o con nubes altas.



Figura 4. Imagen de intensidades obtenida a partir de la amplitud de los pulsos que vuelven al avión

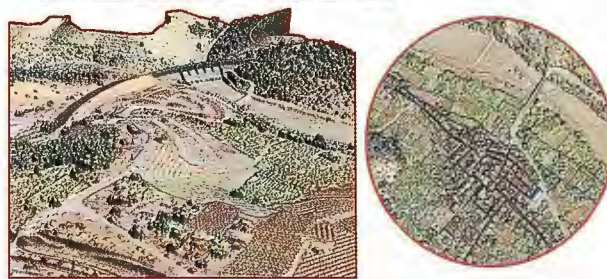


Figura 5. Cauce del río Palancia: presa del Algar.

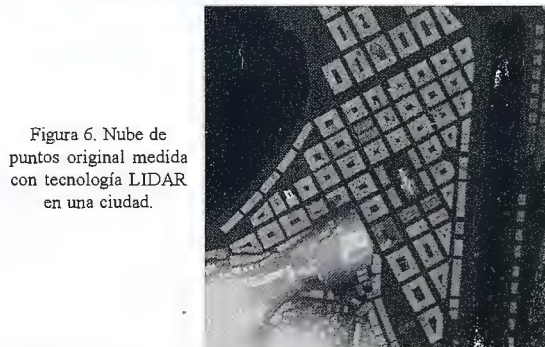


Figura 6. Nube de puntos original medida con tecnología LIDAR en una ciudad.

Desde hace varios años y cada vez más, los organismos públicos encargados de realizar estudios hidráulicos exigen la utilización de tecnología LiDAR para la generación de MDT de alta precisión.

-Aplicaciones en zonas urbanas: Otra de las principales aplicaciones de la tecnología LIDAR es para la medición de zonas urbanas para la planificación de redes de telecomunicaciones, detección de construcciones ilegales, planes de emergencia, aplicaciones de ingeniería y otras aplicaciones SIG

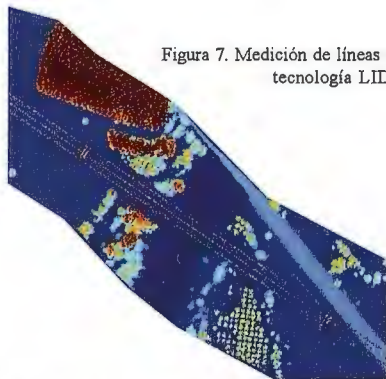


Figura 7. Medición de líneas de alta tensión con tecnología LIDAR

En la figura 6 vemos un ejemplo de la nube de puntos LiDAR original para una zona urbana. Como podemos ver se aprecian las alturas de todo lo que está en la superficie: edificios, vegetación, puentes, coches, farolas, personas, etc. Con las clasificaciones pertinentes, se pueden obtener modelos con la altura de los edificios, altura de la vegetación, etc.

-Aplicaciones en el mantenimiento de líneas eléctricas: Si instalamos el instrumento LIDAR en un helicóptero, de forma que se pueda volar más bajo y despacio, podemos medir con gran precisión las líneas de alta tensión.

En este caso el primero de los rebotes corresponde con la altura de los cables y el último con la altura del suelo. De esta forma se puede localizar los árboles que se acercan peligrosamente a los cables y que por lo tanto deben de ser talados, así como construcciones ilegales que estén a una distancia inferior a lo permitido. También se pueden localizar las torres y sacar modelos de catenarias.

Aunque no obtengamos tanto detalle, desde avión con menos puntos por metro cuadrado algunos puntos si caerán sobre los cables y también podemos hacer un inventario de los objetos que se acercan a los cables.

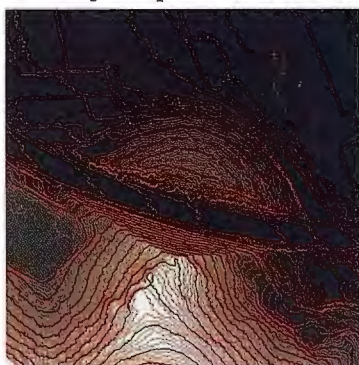


Figura 8. Extracción automática de curvas de nivel cada 1m a partir de un MDT LiDAR.

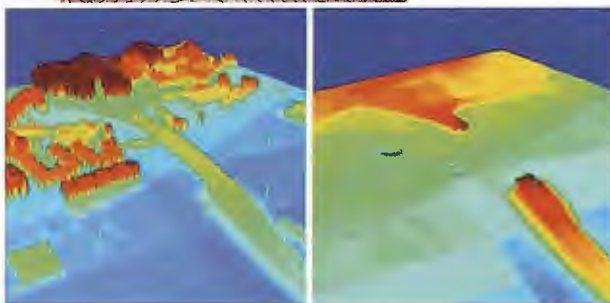


Figura 9. Uso del LiDAR para aplicaciones de ingeniería.

- Actualización de cartografía: También se pueden utilizar los datos LiDAR para la actualización de cartografía digital, mediante la extracción de curvas de nivel del MDT, extracción de las alturas de los edificios, etc.

- Para proyectos de ingeniería: Cartografía para proyectos de ingeniería civil: carreteras, líneas de ferrocarril, etc. Para mapas de ruido, inventario, estimación precisa de movimientos de tierras, visualización 3D y otras aplicaciones SIG

- Telecomunicaciones: Cartografía para proyectos de telecomunicaciones donde se necesitan MDT precisos, actualizados y con la altura de los edificios. A parte del MDT con la altura de los edificios, con la tecnología LiDAR también se puede extraer una clasificación de los edificios, para usarla como una capa clutter y otra capa solamente con la altura de los edificios.

- Gestión de la línea de costa: Con series temporales de vuelos LiDAR se puede evaluar la evolución de la línea de costa, las dunas, etc.

- Aplicaciones en el campo forestal: Dentro del campo forestal la tecnología LiDAR tiene una gran aceptación, gracias a la ventaja de poder medir tanto la altura de la parte alta de la vegetación como la altura del terreno, lo que permite obtener directamente la altura de la vegetación incluso en zonas de vegetación densa donde con el uso de sensores ópticos no es posible tener una visión directa del terreno.



Figura 10. A la izquierda MDS y a la derecha MDT+altura de edificios a partir del LiDAR.



Figura 11. Uso del LiDAR para el seguimiento de la línea de costa. Imagen de DIELMO 3D.

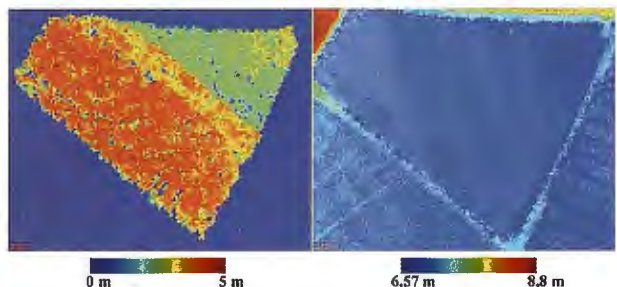


Figura 12. Medición de la altura de la vegetación con LIDAR. Imagen de DIELMO 3D.

Con el LiDAR se puede calcular de forma precisa la altura de cada árbol individual, localizar la posición del tronco de cada árbol individual, realizar cálculos de volúmenes, obtener la altura media del rodal, estudiar la calidad de la madera, realizar cálculos del índice de área foliar (LAI), etc. Todos estos parámetros son de especial importancia a la hora de realizar un inventario forestal y actualmente se obtienen mediante estimaciones realizadas con trabajo de campo.

En la figura 12 vemos a la izquierda una imagen con las alturas de los árboles (vemos que en este caso varían desde 0 hasta 5m) y en la derecha el Modelo Digital del Terreno (MDT). Para obtener las alturas de la vegetación se le resta al MDS el MDT y luego se hace una clasificación de los puntos que pertenecen a la vegetación o a otros objetos como edificios, etc.

- **Generación de ortofotos:** La principal ventaja que aporta la tecnología LiDAR está en la rapidez de las medidas y el procesado previo de los datos. Posteriormente tardaremos más en realizar las clasificaciones y el Modelo Digital del Terreno (MDT), pero una primera versión con un control de calidad de los errores más gruesos suficiente para hacer ortofotos se puede obtener de forma más rápida y precisa que en el caso de hacer un MDT por correlación automática. Esto es determinante a la hora de elegir esta tecnología cuando se necesita reducir al máximo los plazos de entrega.

Está demostrado que la tecnología LiDAR ofrece ventajas para las aplicaciones que hemos descrito en este documento y a muchas más. Por ejemplo, actualmente en el caso de España para la mayoría de los estudios de inundabilidad la administración exige que la adquisición de los datos se realice con tecnología LiDAR. Sin embargo, para otras muchas aplicaciones no se hace un uso extensivo del LiDAR porque no se pueden pagar los elevados costes de adquisición.



Figura 13. MDT PNOA 2006 (izquierda), MDS LiDAR 2004 (centro), MDT LiDAR 2004 (derecha). Imágenes de DIELMO 3D.

Hace unos años había muy pocos datos LiDAR disponibles, limitándose a pequeños proyectos para zonas inundables, etc., pero la tendencia es que en pocos años se disponga de grandes extensiones de terreno (Comunidades Autónomas y países) voladas con tecnología LiDAR. Por ejemplo, en el año 2005 se realizó la adquisición de los datos LiDAR de toda Gipuzkoa y el barrido global del territorio se actualizará cada dos años. Este fue el primer proyecto en España que realizaba la adquisición de todo un territorio con tecnología LiDAR, pero por ejemplo en 2008 se realizó la adquisición del resto del País Vasco, se está volando toda Cataluña y recientemente el Instituto Geográfico Nacional acaba de aprobar que el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) se vuele también con tecnología LiDAR, con lo que habrá disponibles datos LiDAR gratuitos de toda España actualizados cada 4 años.

Como vemos, se tiende a que cada vez haya más datos LiDAR disponibles que cubran grandes extensiones del territorio y toda esta información será libre para que cualquiera pueda acceder a ella. Esto hace que aumente considerablemente el número de usuarios potenciales de este tipo de datos, pero sin embargo, observamos que no hay herramientas accesibles para tratarlos y debido al elevado coste de las licencias de software comerciales que permiten el tratamiento de este tipo de datos, el número de usuarios con capacidad de explotar los datos LiDAR se reduce solamente a los proveedores de datos LiDAR. Esto hace que los usuarios finales no puedan manejar los datos LiDAR originales, sin la capacidad de realizar un control de calidad adecuado de los trabajos que contratan, ni corregir los errores observados en dichos productos, ni aprovechar los datos gratuitos para la elaboración de otros productos finales.

Por lo tanto, se hace necesaria la aparición de un software libre sencillo, flexible y potente, que sea un punto de encuentro para productores, usuarios y desarrolladores relacionados con la tecnología LiDAR, permitiendo la visualización, producción y control de calidad sobre los productos finales, mejorar los productos finales ya existentes y desarrollar nuevos productos finales de valor añadido integrándolos de forma sencilla dentro de un sistema de información geográfica libre como gvSIG.

Para ello DIELMO 3D S.L. aporta su experiencia investigadora en el ámbito de la teledetección, el desarrollo de software para la generación y tratamiento de modelos digitales del terreno y para el procesado de datos LiDAR, además del conocimiento del mercado al ser uno de los principales proveedores de datos LiDAR en España y haber trabajado en numerosos proyectos de adquisición y procesado de datos LiDAR para diferentes aplicaciones.

5. Control de calidad de datos LiDAR

En 2008 DIELMO comenzó el desarrollo del software libre DielmoOpenLiDAR, que es un software libre con licencia GNU GPL basado en gvSIG para el manejo de datos LiDAR. La fase inicial (ya publicada) consiste en un driver para el acceso a datos LiDAR en gvSIG. Este driver es la base para el manejo de los datos en diferentes formatos estándar, de forma que se ha dotado a gvSIG con las herramientas básicas que permiten a los desarrolladores el trabajar con datos LiDAR de la forma más transparente y sencilla posible. Por otro lado, también se permite abrir datos LiDAR originales (LAS y BIN), visualizarlos superpuestos a cualquier otra información geográfica, consultar los valores originales de cada uno de los puntos y editarlos, realizar un análisis visual de los datos y un control de calidad de los mismos.

En primer lugar, los botones de leyendas automáticas se pueden usar como una herramienta de análisis visual de los datos. Estas leyendas automáticas dibujan los puntos LiDAR en un color por aleatorio por defecto, o en función de la altura, intensidad y clasificación.

El botón que corresponde a la leyenda por defecto dibuja cada capa con un color aleatorio. Esta leyenda es la que se aplica por primera vez al cargar una capa y es muy útil cuando hay varias capas en la vista donde se puede apreciar por el color qué puntos pertenecen a una capa u a otra.



Figura 14. Ejemplo de leyendas por defecto.

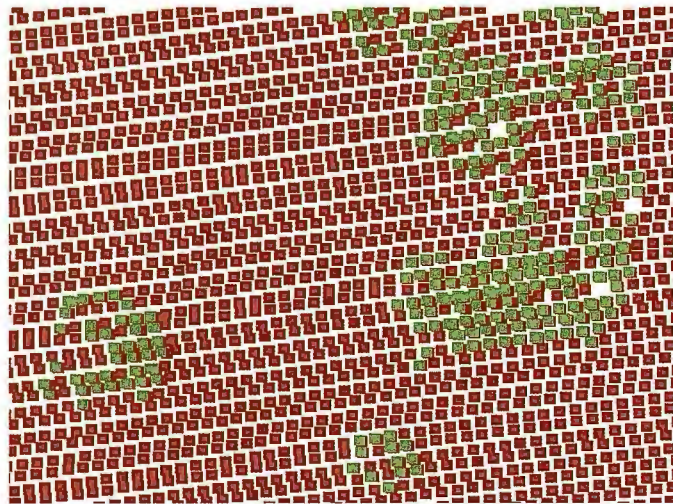


Figura 15. Ejemplo de una leyenda en función de la clasificación.



Figura 16. Ejemplos de leyendas en función de la intensidad y altura.

El primer control de calidad que podemos hacer es abrir en una misma vista de gvSIG todas las capas LiDAR de la zona de estudio junto con el polígono de la zona de interés, comprobando si se ha volado toda la zona.

En el caso de que se disponga de un fichero de puntos LiDAR ya clasificados, podemos utilizar el botón que aplica la leyenda en

función de la clasificación superponiendo a la vez una ortofoto para comprobar si las clasificaciones son correctas.

Por último tenemos los botones que aplican la leyenda en función de la altura o la intensidad, ambas se calculan de la misma forma en función de los valores de la tabla asociada, calculando una estadística a partir de los puntos visibles en la vista. Esto permite ajustar el histograma de forma automática para una mejor visualización de los datos.

La velocidad con la que se puede pasar de un tipo de simbología a otra a pesar del gran volumen de datos que somos capaces de manejar, hace de DielmoOpenLiDAR una herramienta ideal para un análisis visual de los datos.

Además, al poder superponer dentro de una misma vista datos LiDAR con cualquier otra fuente de datos GIS, nos permite comprobar la precisión de los datos LiDAR tanto en planimetría como en altimetría. Por un lado, para comprobar la planimetría podemos usar como referencia ortofotos o cartografía vectorial disponible de la zona. Por otro lado, para comprobar la altimetría podemos realizar un levantamiento topográfico en campo en una zona plana, por ejemplo se suele hacer en un campo de fútbol que caiga dentro de la zona de estudio, y superponer los puntos XYZ medidos con el GPS diferencial junto con los datos LiDAR.

En la figura siguiente vemos unos datos LiDAR pintados en función de la altura, superpuestos a una serie de puntos XYZ medidos en campo con alta precisión mediante un GPS diferencial. Simplemente consultando la información asociada a los puntos LiDAR más cercanos a los puntos medidos con GPS podemos comprobar las diferencias en altura y obtener el error medio y la desviación estándar correspondiente.

6. Generación de productos finales

Una vez establecidas en la fase anterior las bases para los desarrollos relacionados con datos LiDAR en gvSIG, la segunda fase consistirá en desarrollar todas las herramientas necesarias para poder realizar un procesado de datos LiDAR completo con gvSIG. Por un lado habrá que dotar a gvSIG de algoritmos de cálculo automáticos y por otro lado habrá que implementar herramientas de edición manual que permitan realizar una edición manual de los resultados para corregir posibles errores.

Las herramientas automáticas permitirán:

- Exportar entre los diferentes formatos de datos LiDAR, con funciones de filtrado, operaciones matemáticas, unión de diferentes ficheros en uno solo, división de ficheros grandes en bloques más pequeños por una región geográfica o según el tamaño del fichero, etc.
- Crear informes basados en el análisis de los datos. Por ejemplo medir la densidad de puntos por metro cuadrado, la distancia entre puntos en las direcciones X, Y, medir la precisión de los datos comparándolos con medidas de campo, comprobar los errores residuales en el ajuste entre pasadas, etc.

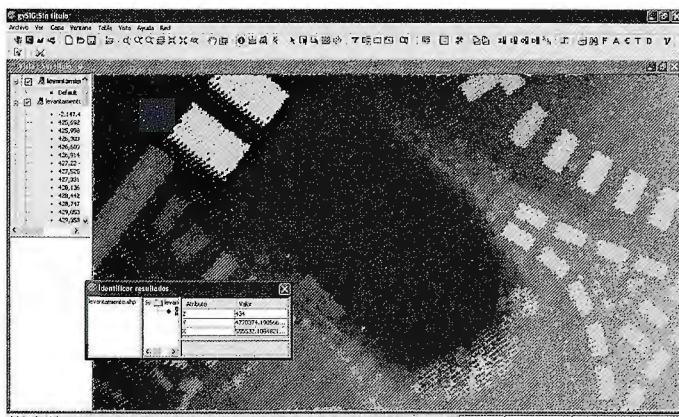


Figura 17. Datos LiDAR superpuestos a un levantamiento topográfico para comprobar la precisión en altura.

- Dividir todos los datos de un proyecto en bloques más pequeños (de forma manual o automática) que permitan el manejo de toda la información y rasterizar los datos LiDAR originales.
- Realizar clasificaciones automáticas para determinar qué puntos pertenecen al suelo, edificios, vegetación, para crear productos finales estándar como Modelos Digitales del Terreno (MDT), Modelos Digitales de Superficies (MDS), imágenes de intensidades, clasificaciones de edificios, clasificaciones de vegetación, clasificaciones de puentes y productos derivados: altura de los edificios, altura de la vegetación, MDT + edificios, MDT - puentes, MDT + edificios - puentes, etc.
- Realizar el mosaico de bloques y exportar los productos finales a los formatos adecuados.

La intención es que DielmoOpenLiDAR se convierta en un referente para la comunidad científica especializada en el procesado de datos LiDAR gracias a su potencia y facilidad a la hora de implementar nuevos algoritmos. Por este motivo, la idea es permitir a los usuarios añadir nuevos algoritmos que complementen los ya existentes o añadan nuevas aplicaciones, integrándolas de forma más sencilla y transparente, sin necesidad de que tengan que preocuparse de la parte gráfica, sino que solamente implementen su algoritmo.

Considerar que el uso de SEXTANTE es adecuado para esto y hará crecer el proyecto con las aportaciones de diferentes grupos de investigación interesados en desarrollar este tipo de herramientas.

También está previsto el permitir la creación de flujos de trabajo de forma gráfica a partir de las funciones existentes, de forma que se puedan automatizar los procesos siguiendo el orden y algoritmos definidos por el usuario y ejecutarlos por lotes.

Por muy sofisticados que sean los métodos de clasificación automática, es imposible el tener un 100% de aciertos, por lo que para que este software sea útil no solamente para investigación sino también para producción, se hace necesaria la implementación de

herramientas que permitan realizar un adecuado control de calidad de los productos finales descritos en los puntos anteriores con herramientas de edición manual inteligente (semiautomática) para realizar las correcciones necesarias de la forma más rápida y precisa posible.

A partir de los productos básicos que hemos conseguido producir en la segunda fase del proyecto, la tercera fase consiste en desarrollar herramientas inteligentes para la creación de nuevos productos finales de valor añadido como:

- Vectorización de edificios y estructuras.
- Vectorización de líneas eléctricas y localización de objetos (como árboles o construcciones ilegales) que se acercan a la línea eléctrica para su mantenimiento.
- Estimación de parámetros forestales (contar árboles, estimar la altura de los árboles, medir la altura media de un rodal, obtener parámetros de calidad de la madera...).
- Extracción de curvas de nivel para la actualización de cartografía digital.
- Detección de cambios para localizar construcciones ilegales, evolución de la línea de costa, etc.
- Mejora de los MDT para su utilización en estudios hidráulicos.

DIRECCIONES DE INTERÉS

ApliCAD
Aplicaciones de CAD, CAM y GIS

www.aplicad.com
gis@aplicad.com

Valencia: Ronda Narciso Monturiol, 6 - Parque Tecnológico - Tel. 963134035
Castellón: C/ M^a Teresa González 26 Entlo. Tel. 964724870

Autodesk
Authorized System Center

- Distribución, formación, soporte técnico y programación a medida sobre Autodesk Map y Autodesk MapGuide
- Aplicaciones Catastrales
- Dirección de Proyectos GIS

EXPOGEOGRAFICA MALAGA 2009
SALONES DE EXPOSICIÓN
DIPUTACIÓN DE MALAGA
20,21 Y 22 DE MAYO DE 2009

Para más información:
Tel. 915471116/915477469

CAUCES MEANDRIFORMES Y RIESGOS NATURALES EN LA CARTOGRAFÍA HISTÓRICA DEL MEDITERRÁNEO ESPAÑOL



Giménez-Font, Pablo - Universidad de Alicante.

Resumen.

El presente artículo pretende reflexionar sobre la validez de la cartografía histórica, relativa a ríos de la España mediterránea, en el estudio de las relaciones entre las sociedades ribereñas y la morfogénesis fluvial. Para ello se han seleccionado mapas del s. XVIII y de la primera mitad del XIX que representan trenes de meandros libres, debido a sus características dinámicas de tipo plurisecular. Su análisis permite obtener conclusiones desde dos perspectivas: la geomorfológica y la técnica, relacionada con los ambiciosos proyectos dirigidos a contrarrestar los efectos derivados de la sinuosidad de los meandros.

Palabras clave: Cartografía histórica, geomorfología fluvial, riesgos naturales, España mediterránea.

Abstract

This article aims to reflect upon the validity of the historical cartography of the rivers of Mediterranean Spain in the study of the relationships between riparian societies and fluvial morphogenesis. Maps were selected from the eighteenth century and the first half of the nineteenth century showing free meander trains due to their centuries-long dynamic nature. Analysis of these documents leads to conclusions from geomorphologic and technical perspectives, with regard to the ambitious projects designed to counteract the effects of the sinuosity of meanders.

Key words: Historical cartography, river geomorphology, natural risks, Mediterranean Spain.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución holocena de gran parte de los sistemas fluviales mediterráneos ha estado profundamente ligada a la actividad humana, hasta el punto que, para muchos casos, hay que hablar de una coevolución entre el medio natural de comportamiento complejo y las diferentes culturas instaladas en los distintos tramos de la cuenca. Los ríos han sido proveedores de agua, de suelos fértiles y de valiosas vías de comunicación, condiciones que han repercutido en elevadas densidades de población. La condición de centralidad de muchos ríos, otorgada desde antiguo, los ha convertido también en focos de una intensa actividad cartográfica por parte de agrimensores, ingenieros militares, arquitectos o hidrómetras (Faus, 1995). De esta forma, la rica cartografía española contiene un número importantísimo de planos y mapas que ofrecen, con una calidad creciente desde el s. XVI y, especialmente durante los ss. XVIII y XIX, representaciones con datos muy valiosos respaldados, en muchas ocasiones, por la documentación escrita.

Esta virtualidad ofrece una serie de oportunidades para la investigación transdisciplinar, al ofrecer nuevas lecturas de distinto signo que multiplican las posibilidades de muchos mapas antiguos. En el plano científico-técnico, exis-

ten interpretaciones muy valiosas sobre la capacidad erosiva y cambiante de los cauces, que derivan de una antigua preocupación por parte de las sociedades ribereñas (Capel, 1985), pero también se ofrecen soluciones técnicas encaminadas a reducir su vulnerabilidad ante la presencia de riesgos naturales. Por otro lado, desde un punto de vista ambiental la representación estática de un sistema natural se convierte en un elemento de referencia dentro de un análisis de morfogénesis fluvial, donde la perspectiva histórica y la actuación antropogénica cobra una importancia capital (Giménez & Marco, 2006). En este sentido, la representación de cauces con meandros libres es, por su carácter altamente dinámico y por su desarrollo en llanuras de inundación generalmente muy pobladas, el ejemplo que reúne de forma más clarificadora las ideas expuestas hasta aquí.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

La comprensión del dinamismo de los ambientes fluviales, perceptible a escala histórica, requiere de la utilización de metodologías transversales y técnicas diferentes, entre las que se encuentran el análisis de la cartografía histórica (Knighton, 1998). La diversidad es aplicable igualmente a las escalas espaciales y temporales, que pueden facilitar la valoración del peso relativo de la acción secular del hombre sobre los ecosistemas fluviales.

En el presente artículo, se pretenden realizar nuevas aportaciones a la estimación de la cartografía histórica como fuente de conocimiento para el estudio de la geomorfología de cauces meandrizantes y las actuaciones ingenieriles que se plantearon –de forma práctica o teórica– para reducir los riesgos producidos por la propia dinámica de los ríos sobre sus llanos de inundación.

La cartografía histórica ha sido un instrumento esencial en los estudios de geomorfología fluvial, especialmente para el análisis y reconstrucción de dinámicas de tipo secular, como la sinuosidad de los cauces o los procesos de ajustes del perfil de equilibrio de los ríos a escala histórica. Sin embargo, a excepción del estudio editado por Petts et al. (1989) o los apuntes ofrecidos por trabajos como el de Tropeano & Turconi (2004), las reflexiones metodológicas sobre su uso han sido más bien escasas. De forma complementaria, son incontables los estudios que han utilizado fuentes cartográficas antiguas –especialmente de los siglos XVIII y XIX– para elaborar mapas retrospectivos de la evolución de un tren de meandros, lo cual permite extraer conclusiones y aplicaciones metodológicas válidas para este estudio (Hooke & Redmon, 1989; Mateu, 1991; Alline & Bruneton, 2006).

Para la elaboración del presente artículo, junto a la bibliografía, se ha procedido a un vaciado de mapas procedentes de los siguientes archivos españoles: Archivo Histórico Nacional, Archivo del Reino de Valencia, Archivo de la Corona de Aragón y Biblioteca Nacional (en adelante AHN., ARV., ACA. y BN., respectivamente). Otra fuente de consulta básica ha sido una recopilación de cartografía histórica española relativa a obras hidráulicas, realizada por el antiguo Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU, 1985), así como la edición facsimilar de la obra del ilustrado A.J. Cavanilles (1795-1797) dedicada al antiguo Reino de Valencia.

3. DINÁMICA NATURAL Y ACTUACIONES ANTROPOGÉNICAS

Los cauces meandriiformes, especialmente los situados en llanuras de inundación, se componen de concavidades y convexidades dispuestas en la trayectoria del flujo de un río. Al tratarse de una forma de disipación de energía (Conesa, 1999: 34), pueden presentar una movilidad de carácter secular, en ocasiones incluso con cambios repentinos y violentos que, no obstante, van precedidos de una preparación previa más o menos perceptible. Su dinamismo, derivado de lo ha convertido en una de las principales temáticas de estudio de geomorfología fluvial mediante el análisis de la geometría de meandros, variaciones de longitud y cambio de ambientes sedimentarios. La cartografía y la fotografía histórica, junto a la fotointerpretación de antiguos cauces fosilizados en el parcelario, han sido las principales fuentes de información, en muchas ocasiones como paso previo o en conjunción con análisis sedimentológicos (Uribelarrea et al. 2003; Ollero et al. 2006; Ruíz, 2001).

El comportamiento dinámico de los meandros libres responde a un proceso que podría sintetizarse en la acción erosiva y sedimentaria de las aguas. La figura 1 nos muestra dos márgenes diferenciadas en un hipotético perfil transversal de un meandro. La margen interna es un espacio de deposición de sedimentos mediante *points bars* que reducen la profundidad; mientras que, por el contrario, la acción erosiva producida por una mayor velocidad y turbulencia de las aguas produce socavamientos, erosión lateral y zonas de derrame en la margen externa. Esta fluctuación dinámica, determinada por procesos de reajuste energético dentro del cauce, marca el avance del tren de meandros. En la cartografía histórica quedan bien representados los bancos de arenas y gravas —*points bars*— como espacios sin cultivar, descritos como «porción de tierra que queda entre los dos cauces» y «arenales o tierra debastada». Por el contrario, la migración lateral del cauce repercute en la desaparición de campos de cultivo, caminos, carreteras y casas en la parte cóncava del meandro. Si se trata de concavidades pronunciadas, la margen externa del meandro se convierte en un espacio crítico para los episodios de inundación, y por tanto en uno de los sectores donde ha actuado un mayor proyectismo desde tiempos históricos (figura 1). El ejemplo más interesante lo encontramos en la construcción de motas o la artificialización de cauces mediante la construcción de muros, especialmente en ámbitos

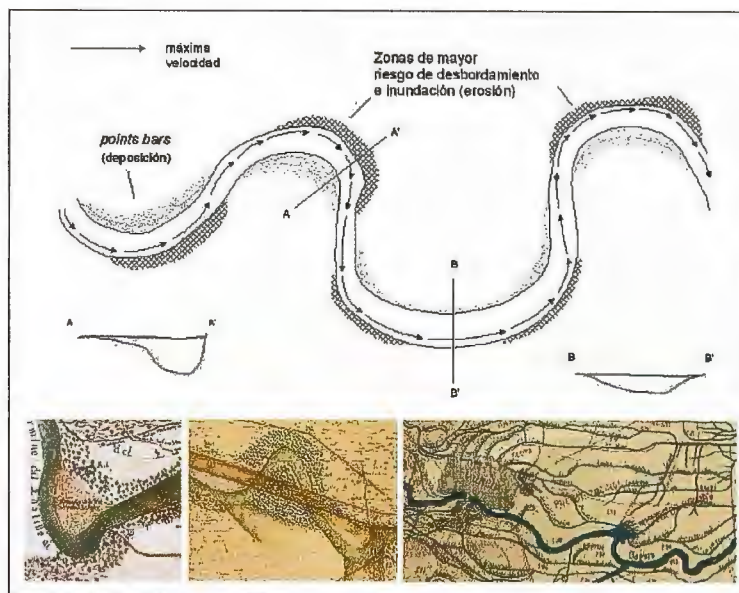


Figura 1. Esquema de un cauce meandrizante y algunos ejemplos del comportamiento de ambas márgenes del meandro en la cartografía histórica. Los dos primeros casos representan meandros del río Ter a la altura de Verges en 1750 (ACA, MP-550) y en 1790 (MOPU, 1985, plano nº 444). En el tercer ejemplo, un plano del río Segura en 1879 (BN, R.1569)

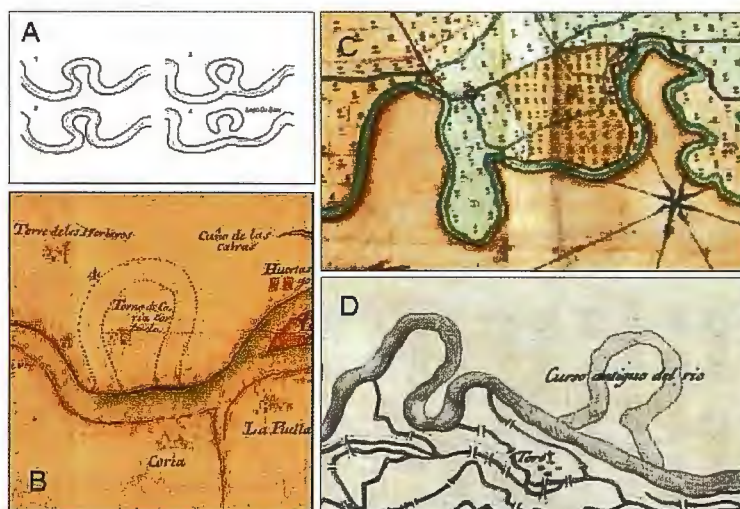


Figura 2. Esquema del estrangulamiento de un meandro (A) y ejemplos históricos. B: El Torno de Coria (1795), estrangulado de forma artificial (MOPU, 1985, plano nº 5). C: Meandro de Toro (1773) dibujado por León (AHN. Consejos M y P nº 74). D: éste último meandro, ya



Figura 3. Detalle de un plano del Canal Imperial de Aragón junto al río Ebro (1746), entre Sobradriel y Zaragoza (MOPU, 1985, nº 21). Se combinan meandros con cortas de canal de crecida (*chutte cut-off*) y de cuello (*neck cut-off*), brazos y depósitos de sedimentos asociados al cauce. Todavía se puede observar el meandro de Juslibol, actualmente convertido en un galacho.

urbanos como Valencia o Murcia, de los que existe una cartografía muy valiosa (Cisneros, 2004; Calvo, 2005).

La sinuosidad de un cauce meandrizante puede desembocar también en el estrangulamiento natural o el corte por desborde de un meandro, con cortas de canal de crecida (chutte cut-off) y de cuello (neck cut-off) (figura 3). Con sus diversas tipologías conforma, junto a las avulsiones, el modo de migración lateral no continua de un río, es decir, el abandono súbito de una parte o la totalidad del cauce (Ramonell & Amsler, 2005). Estos procesos derivan de reajustes naturales de un cauce que ha superado un umbral determinado en la curvatura de un meandro, y se deben a cambios locales relacionados con episodios climáticos y sedimentológicos y a la acción indirecta del hombre (Ruiz, 2001: 115). La corta natural de un meandro puede suponer la progresiva desaparición del mismo mediante la formación de un lago oxbow en la zona más profunda del mismo, coincidente con su parte exterior. La colmatación de dicho lago, que recibe multitud de denominaciones en España, se produce de forma natural o se acelera por parte del hombre, generalmente con fines agrícolas. Junto a la fotografía aérea, la cartografía histórica presenta abundantes referencias de antiguos meandros (Ebro, Pisuerga, Júcar, Llobregat o Ter) que, en ocasiones, permiten datar procesos de antiguos estrangulamientos reflejados e incluso inexistentes en el parcelario (figuras 2 y 3).

La valoración de la cartografía histórica referida a cauces meandriiformes va más allá de la propia observación y percepción de fenómenos naturales. Existen mapas de temática variada (infraestructuras hidráulicas, militares, generalistas, amojonamientos, etc.) que reflejan, de forma indirecta, la forma de un cauce determinado. El mayor o menor detalle y calidad de dicha representación permitirá su comparación con cartografía posterior y con el trazado actual. Pero, de la misma forma, aunque en menor número, existen otros mapas donde la temática principal reside precisamente en los problemas ocasionados por la dinámica natural de los meandros y, en muchas ocasiones, las soluciones técnicas proyectadas para su minimización. Este hecho permite valorar la percepción histórica de algunos riesgos naturales con un gran impacto económico actual, como son las inundaciones, y las respuestas ofrecidas por parte de ingenieros y arquitectos que fueron plasmadas en mapas y croquis cartográficos. El carácter excepcional y repentino del desenlace de alguno de los procesos morfogenéticos referidos suponía, junto a las vidas humanas, daños económicos muy importantes, comenzando por la propia reorganización de los límites entre propietarios y entre municipios, como de-



Figura 4. La variación del álveo del río La Noguera Pallaresa (1817), supuso un litigio que enfrentó a las poblaciones de Tremp y Talam por los cambios producidos en los lindes municipales (ACA, MP-188).



Figura 5. Meandro del camino de Beniel (1760) en el río Segura, y su situación actual tras las obras de encauzamiento realizadas en la década de 1990. (ARV. M y P nº 89 y ortofoto del SIG Oleícola)

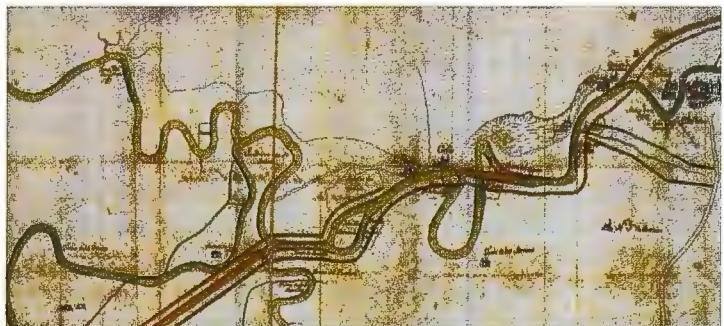


Figura 6. Detalle del plano del tramo final río Guadalquivir (1720) donde se representa un proyecto de encauzamiento y corta de los meandros de Coria y Merlina (cortesía de Francisco Barragán).

muestra el caso del río La Noguera Pallaresa (figura 4). El proyecto hidráulico fue, por consiguiente, bastante elevado y las representaciones cartográficas aumentaron en número y calidad a finales de la Edad Moderna (s. XVIII) y s. XIX. La solución técnica más generalizada fue imitar el proceso natural de estrangulamiento mediante operaciones de cirugía fluvial, consistentes en la construcción de un nuevo cauce que cortara el meandro por su cuello. A pesar de la existencia de antecedentes destacables en la cartografía de los ss. XVI-XVII, como demuestran los mapas publicados por Ojeda (2006) para el río Segura a su paso por Orihuela, la segunda mitad del siglo XVIII es un período muy productivo con planes ambiciosos y posibilidades técnicas crecientes. El principal escollo para la ejecución de dichos proyectos fue, principalmente, económico, pero también existieron problemas relacionados con una percepción y cálculos de base erróneos de algunos procesos hidrogeomorfológicos.

Este tipo de encauzamientos, que modificaban el trazado sinuoso de los ríos en su llanura de inundación, presentan distintas escalas. Existen proyectos relativos a la corta de un solo meandro problemático, como es el caso del meandro del camino de Beniel (río Segura, 1760), y los problemas de inundaciones que éste ocasionaba (figura 4). Otro ejemplo remarcable se encuentra relacionado con la navegabilidad, en este caso del río Guadalquivir, donde la amplitud de onda de los meandros de Coria y Merlina obligaba a circular unos 10 km sobre un cauce problemático (bancos de arena, marea subiente y propensión a los desbordamientos), para avanzar, en distancia real, no más de 500 m. A lo largo del siglo XVIII se sucedieron distintos proyectos para su eliminación, que no se culminaron hasta 1795 (Menanteau & Vanney, 1985). El ejemplo del denominado Torno de Coria, resulta interesante porque se han reconocido varios proyectos de corta a lo largo de toda esa centuria, que incluyen desde los centrados exclusivamente en el meandro, hasta los que pretendían canalizar el tramo final del Guadalquivir (figura 6). Ésta última clase de proyectos, que acometían la completa rectificación de un cauce erradicando varios meandros, son más numerosos y complejos, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de campos de cultivo y poblaciones, como demuestra el caso de Cardedeu y la Riera de Cànoves (figura 7). Junto al temprano plan de acondicionamiento hidráulico del Baix Llobregat (1736) en las cercanías de Hospitalet de Llobregat y Sant Boi, otras joyas cartográficas nos muestran excelentes proyectos de canalización que abarcaban varios kilómetros, realizando un análisis muy valioso del comportamiento de los meandros. El caso más representativo lo encontramos en el tramo bajo del río Ter, que presentaba graves problemas de inundaciones en ciertos sectores de los meandros por la margen derecha. En 1750 encontramos un proyecto de canalización que fue sustancialmente mejorado en 1790 por el ingeniero militar Juan Escofet, incluyendo una ambiciosa actuación sobre la desembocadura del río (figura 8).



Figura 7. La Riera de Cànoves a su paso por Cardedeu y las inundaciones provocadas sobre el casco urbano 1776 y 1777. El plano representa un proyecto de encauzamiento (ACA. MP136).



Figura 8. Detalle del proyecto de encauzamiento del río Ter en su tramo final, elaborado por Escofet en 1790. La copia del mapa es de 1821 (MOPU, 1985, nº 444)

El caso más representativo lo encontramos en el tramo bajo del río Ter, que presentaba graves problemas de inundaciones en ciertos sectores de los meandros por la margen derecha. En 1750 encontramos un proyecto de canalización que fue sustancialmente mejorado en 1790 por el ingeniero militar Juan Escofet, incluyendo una ambiciosa actuación sobre la desembocadura del río (figura 8).

El actualismo de muchos de estos planes, que se demuestra al comparar la corta de un meandro del río Segura con las obras de encauzamiento derivadas del R.D.-Ley 4/1989 (figura 5), ejemplifica la convivencia de dos tipos de proyectismo en la España de la Edad Moderna. Por un lado, existía un poderoso grupo de profesionales de formación no reglada, de tipo paragramial, que realizaron un número importante de obras públicas y mapas como maestros de obra, frailes-arquitectos o agrimensores. El avance de las reformas promovidas por la monarquía, sin embargo, dotó a la formación académica reglada de una entidad suficiente como para formar, mediante las academias de ingenieros militares y las reales academias de Bellas Artes, un cuerpo de técnicos que progresivamente adquirió un protagonismo en la elaboración de proyectos y cartografías de calidad como las presentadas aquí. No obstante, todavía a finales del siglo XVIII y principios del XIX existieron planes de carácter arbitrista, provenientes incluso del mundo académico, que no tenían en cuenta las condiciones del medio en que pensaban aplicarse. Es el caso de los proyectos de navegabilidad de ciertos ríos, conexiones intercuenca físicamente imposibles o trasvases técnicamente muy complejos (Gil Olcina, 2004).

4. CONCLUSIONES

El análisis de los ejemplos presentados en este estudio, seleccionados entre otros tantos, permiten ofrecer dos conjuntos generales de ideas relativas a la representación cartográfica de los ríos y su validez desde dos perspectivas: la geomorfológica y la relacionada con la historia de la técnica.

Para ello, en la cartografía española —obviando el ingente legado proveniente de América— se pueden encontrar mapas que, de forma indirecta, representan cauces meandriformes y mapas temáticos, relativos a las soluciones ingenieriles proyectadas para erradicar una serie de riesgos intrínsecos a la dinámica de los meandros libres. Tanto en uno como en otro caso, tienen un reconocido valor en el estudio de la historia hidrogeomorfológica de una cuenca fluvial, al representarse alguno de los tramos más dinámicos —y, por tanto, más problemáticos desde el punto de vista humano— de las llanuras aluviales. Desde un punto de vista cuantitativo la fiabilidad de la cartografía histórica, incluso de aquellas representaciones con una calidad aceptable, es fundamentalmente escasa. Sin embargo, su uso adecuado permite la reconstrucción de dinámicas de tipo secular mediante enfoques diacrónicos que pueden ayudar a establecer tendencias y aproximaciones a la evolución del sistema desde distintas escalas. A escalas temporales más recientes, en las que se insertaría la cartografía analizada, la acción antropogénica adquiere un protagonismo principal, por encima de factores naturales como las fluctuaciones climáticas.

Por otro lado, la cartografía de temática directa analizada (s. XVIII y primera mitad del s. XIX) incide en la proyección de soluciones técnicas para aminorar o acelerar procesos relacionados con la morfogénesis fluvial, convertida en un creciente riesgo natural para las sociedades establecidas en las riberas de un río. Este proyectismo, derivado de un conocimiento avanzado de los comportamientos de la dinámica natural, posee una gran actualidad dentro del campo de la ingeniería y permite plantear nuevas lectu-

ras en torno al papel de las obras públicas y los riesgos naturales, tanto en el plano teórico como en el perceptivo.

5. REFERENCIAS

- wwwAlline, C. & Bruneton, H. (2006) “Variabilité spatiale et gestion des inondations dans la basse vallée du Rhône. L'exemple des plaines d'Arles (Département des Bouches-du Rhône)” en Chastagnaret, G. & Gil Olcina, A.: *Riesgos de inundaciones en el Mediterráneo occidental*. Casa de Velázquez-Universidad de Alicante, Madrid pp. 65-89.
- Calvo, F. (2005) “La construcción de los paisajes del miedo: un proyecto de protección contra inundaciones de la ciudad de Murcia en el siglo XVIII”. Nimbus, —, pp. 25-42.
- Capel, H. (1985) *La física sagrada. Creencias religiosas y teorías científicas en los orígenes de la geomorfología española*. Ed. del Serbal. Barcelona, 224 pp.
- Cisneros, P. (2004): “El Guadalquivir y la configuración de Valencia: su interpretación a partir de las vistas urbanas modernas”. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 37, pp.
- Conesa, C. (1999): “Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces”. Papeles de Geografía, 30, pp. 31-46.
- Faus, A. (1995) *Mapistes. Cartografia i agrimensura a la València del segle XVIII*. Alfons el Magnànim. València, 370 pp.
- Gil Olcina, A. (2004): “Albores de la planificación hidráulica en España” en *Historia, clima y paisaje. Estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez*. Universidades de Alicante, Valencia y Autónoma de Madrid. Valencia, pp. 111-124.
- Giménez-Font, P. & Marco, J.A. (2006): “Dinámicas ambientales – dinámicas antropogénicas. Reflexiones sobre los cambios antrópicos en humedales del SE de la Península Ibérica”. Comunicación inédita al *VII Congreso Ibérico del Agua*. Faro (Portugal).
- Hooke, J.M. & Redmond, C.E. (1989) “Use cartographic sources for analysis river channel change with examples from Britain” en Petts, G.E., et al. (eds.): *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*. Wiley. Chichester, pp. 95-113.
- Knighton, D. (1998) *Fluvial Forms & Processes. A new perspective*. Arnold. London, 383 pp.
- Marco, J.A. (2004) “Percepción y representación del espacio geográfico en Torrevieja a través de la cartografía general y particular”, en *El espacio geográfico de Torrevieja a través del tiempo: colección cartográfica (siglos XVI-XXI)*. Instituto Municipal de Cultura Joaquín Chapaprieta, Alicante, pp. 13-43.
- Mateu, J. F. (1991) “Cambios seculares de la agradación aluvial y de la meandrización en la Ribera Alta del Xúquer”. Cuadernos de Geografía, 50, pp. 147-169.
- Menanteau L. & Vanney, J.R. (1985) “El cauce del Bajo Guadalquivir, morfología, hidrología y evolución histórica” en Carrasco, D. (coord.) *El Río. El Bajo Guadalquivir*. Ayuntamiento de Sevilla. Sevilla, pp. 116-127.
- M.O.P.U. (1985) *Planos históricos de obras hidráulicas*. MOPU. Madrid, 398 pp.
- Ollero, A.; Ballarín, D.; Mora, D. (2006) “Cambios en el cauce y el llano de inundación del río Ebro (Aragón) en los últimos 80 años”. *Geographicalia*, 50, pp. 87-109.
- Ojeda, J. (2006) “Encauzamientos y mudamientos del río Segura en Orihuela durante los siglos XVI y XVII”. Cuadernos de Geografía, 79, pp. 1-18.
- Petts, G.E. (1989) “Historical analysis of fluvial hydrosystems”, en Petts, G.E. et al. (eds.): *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*. Wiley. Chichester, pp. 1-18.
- Ramonell, C.G. & Amsler, M.L. (2005) “Avulsión y rectificación de meandros en planicies de bajo gradiente: consideraciones para su predicción”. *Ingeniería del agua*, 12(3), pp. 231-248.
- Ruiz, J.M. (2001) *Hidrogeomorfología del llano de inundación del Júcar*. Tesis doctoral inédita. Universitat de València, 200 p.
- Uribebarrea, D.; Pérez-González, A. & Benito, G. (2003) “Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (cen. Spain) over the past 500 years”. *Quaternary Science Reviews*, 22, pp. 2209-2221.

Interferometría radar aplicada a terremotos de magnitud moderada en las Cordilleras Béticas, SO España.

González, Pablo J.; Fernández, José - Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM) - Facultad Ciencias Matemáticas - Madrid.
Luzón, Francisco - Dpto. de Física Aplicada - Universidad de Almería - Almería

Resumen

Desde 1992 se han producido en la Península Ibérica varias series sísmicas. En este trabajo, hemos estudiado la deformación debida a tres terremotos de magnitudes moderadas ($M_w \leq 5.3$) en las Cordilleras Béticas usando interferometría radar por satélite: Pedro Muñoz (Ciudad Real, Agosto 2007), Mula (Murcia, Febrero 1999) y Adra (Almería, Diciembre 1993). Para cada evento, calculamos todos los interferogramas diferenciales co-sísmicos utilizando las imágenes radar de apertura sintética (SAR) y eliminando posibles errores orbitales. Los interferogramas fueron combinados de forma apropiada para aumentar la relación señal ruido usando una técnica de "stacking". Con este método se refuerzan las componentes de fase comunes y reducen las debidas a efectos aleatorios. En el caso del terremoto de Adra los interferogramas se corrigieron por fenómenos de estratificación atmosférica. Los interferogramas diferenciales corregidos muestran una señal no correlacionada con la topografía en la cuenca de Bejar.

Palabras claves: Interferometría Radar, Cordilleras Béticas, Sismotectónica, Deformación co-sísmica.

Abstract

Since 1992 several seismic series has been shocked the Iberian Peninsula. In this work, we study the deformation due to three moderate magnitude earthquakes ($M_w \leq 5.3$) located in the Betic cordillera, using satellite radar interferometry: Pedro Muñoz (Ciudad Real, August 2007), Mula (Murcia, February 1999) and Adra (Almería, December 1993). For each event, we have calculated all possible co-seismic differential interferograms using archived synthetic aperture radar (SAR) images and removing residual orbital errors. In order to increase the signal-to-noise ratio we have appropriately combined the resulting interferograms using a stacking method (enhancing common phase components and reducing random components). Interferograms of Adra earthquake seems to be dominated by atmospheric stratification signals; we proposed a method to reduce these effects. Corrected displacement maps show significant subsidence in the Bejar basin. **Keywords:** Radar interferometry, Betic Cordillera, Sismotectonics, Co-seismic deformation

1. Introducción

Los terremotos liberan de forma instantánea los esfuerzos acumulados durante la denominada fase inter-sísmica. Estos esfuerzos provienen de los movimiento relativo entre grandes bloques a diferentes escalas (grandes terremotos son producidos por grandes fallas que separan grandes bloques y viceversa). Así, un terremoto se produce cuando estos esfuerzos superan la resistencia al corte de una zona de falla, produciéndose el deslizamiento relativo entre los bloques que separa la falla y liberando energía en forma de ondas sísmicas, calor (por fricción) y deformación de las rocas circundantes. La deformación de las rocas produce desplazamientos estáticos, comúnmente denominados deformación co-sísmica. Si la magnitud del terremoto es suficientemente grande o su hipocentro es su-

ficientemente superficial esta deformación produce desplazamientos que pueden ser medidos en superficie. Por tanto, la deformación estática de terreno es una fuente de datos muy importante a la hora de establecer la mecánica de ruptura de una falla (Wright, 2002). Una de las técnicas más populares en los últimos años para medir deformaciones de la superficie terrestre es la interferometría SAR diferencial (InSAR) (Massonnet y Feigl, 1998). En este trabajo, aplicaremos la InSAR terremotos de magnitudes moderadas producidos en las cordilleras béticas utilizando imágenes SAR de los satélites ERS-1/2 y Envisat de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Las Cordilleras Béticas en el sur de España, y el Rif en el norte de Marruecos, constituyen el borde occidental del orógeno alpino en el Mediterráneo. Esta zona está caracterizada por una sismicidad difusa y moderada (Figura 1). Esta sismicidad está principalmente controlada por la deformación de una extensa banda de terreno de unos 300 Km que acomoda el movimiento lento relativo de convergencia entre las placas Euroasiática y de Nubia (África occidental). Pese a las grandes incertidumbres que pesan sobre la cinemática del sistema orogénico Béticas-Alborán-Rif y como se distribuye la deformación entre las distintas fallas existentes, podemos afirmar que una estimación conservadora de la tasa global de convergencia es aproximadamente de 4-9 mm/año con una dirección predominante NO-SE (Nocquet y Calais, 2003; Fadil et al., 2006).

2. Interferometría diferencial SAR

La interferometría diferencial radar de apertura sintética (InSAR) ha sido desde principios de los años 90, del siglo XX, una técnica con un popularidad creciente para medir la topografía (Farr et al., 2007) y detectar desplazamientos del terreno (Fernández et al., 2003). El InSAR ha sido aplicado con éxito a diferentes problemas en las ciencias de la Tierra, como son la vigilancia y estudio de deformaciones en volcanes (Borgia et al., 2005), hundimientos del terreno en áreas urbanas (Tomás et al., 2005) o en regiones mineras (Herrera et al., 2007), deformaciones tectónicas y sísmicas (Lundgren y Stramondo, 2002; Wright, 2002), así como para capturar la distribución espacial de vapor de agua en la atmósfera (Hanssen, 2001).

La interferometría diferencial se basa en el cálculo de la diferencia de fase entre dos imágenes SAR sobre un mismo área, lo que se denomina fase interferométrica (interferograma). La fase del interferograma se relaciona con la diferencia de distancias entre un elemento sobre el terreno y el sensor SAR (normalmente embarcado en un satélite) existente entre las imágenes SAR. Así, cuando dos imágenes SAR se toman desde puntos de vista ligeramente diferen-

tes el patrón de interferencia está dominado por las diferencias en distancia debidas a la topografía. De forma análoga, cuando dos imágenes SAR son obtenidas desde un mismo punto de vista no existen diferencias en distancia debidas a la topografía, en su lugar todo el patrón de interferencia será debido a los posibles desplazamientos del terreno o a diferencias en el contenido en vapor de agua entre las imágenes SAR. Esta última característica del InSAR es la que explotaremos para obtener medidas geodésicas de alta precisión.

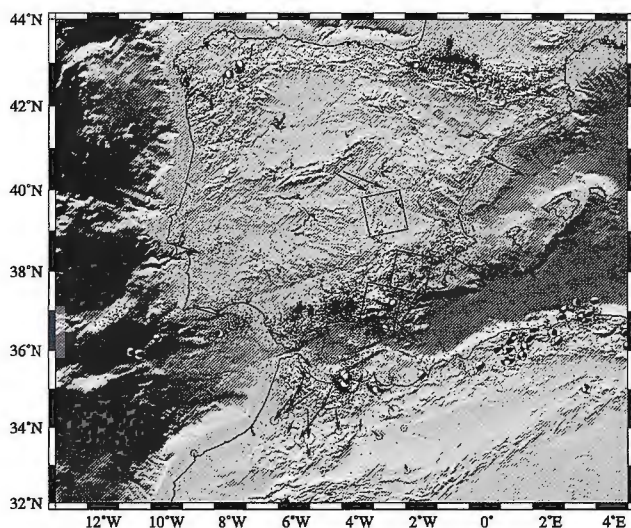


FIGURA 1. Modelo digital del terreno sombreado (GEBCO03, 2008) que muestra el área de estudio. Los vectores muestran estimaciones de las velocidades de movimiento relativo entre Eurasia y Nubia, fijando Nubia, obtenidas a partir de medidas GPS con magnitudes de ~ 5 mm/año (Fadil et al., 2006). La sismicidad se representa usando puntos rojos (USGS, 2008). Mecanismos focales según el Harvard-Centroid Moment Tensor (Dziewonski et al., 1981).

Aunque existen diferentes métodos para construir un interferograma diferencial (Hansen, 2001), es el método de los dos pasos el más utilizado (Massonnet y Feigl, 1998) y el que usaremos a lo largo de este trabajo. El método de los 2 pasos para construir un interferograma diferencial se basa en la simulación y posterior substracción de la fase interferométrica debida a la topografía del terreno del interferograma. Esta fase topográfica se puede modelar conociendo la topografía local y la posición espacial relativa (separación) entre los dos puntos de vista (pasos orbitales). El patrón de interferencia resultante de la substracción será proporcional a cualquier cambio en las distancia antena-terreno-antena debidas a los cambios topográficos dentro del interferograma (deformación) o contenidos diferenciales en vapor de agua en la atmósfera. Para una discusión más extensa sobre la generación de interferogramas, remitimos al lector a la extensa literatura especializada (por ejemplo, Massonnet y Feigl, 1998; Hanssen, 2001 y referencias en ellos).

3. Análisis de datos

En este trabajo hemos calculado interferogramas diferenciales para estudiar las posibles deformaciones co-sísmicas producidas por tres terremotos de magnitud moderada. Para ello se generaron todos los interferogramas diferenciales posibles que minimizasen la pérdida de coherencia (índice que expresa la correlación compleja entre dos imágenes SAR) debida a las diferencias de distancia espacial entre los puntos de adquisición de las imágenes SAR. Así, se generaron tres interferogramas diferenciales co-sísmicos

para el terremoto de Pedro Muñoz, once para el terremoto de Mula y siete para el terremoto de Adra, usando el paquete informático DORIS (Kampes et al., 2003) que tiene implementado el método interferométrico diferencial de los dos pasos (Massonnet y Feigl, 1998). Para el modelado del efecto topográfico de los interferogramas se utilizó la versión 2 del Modelo Digital de Elevaciones SRTM, un MDE global con una resolución espacial de 3 segundos de arco (Farr et al., 2007), y los vectores orbitales precisos calculados por la TU Delft, Holanda (Scharroo y Visser, 1998).

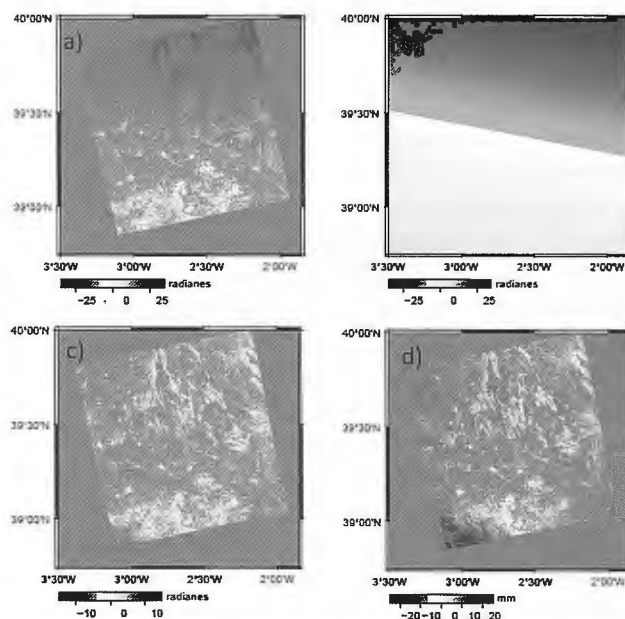


FIGURA 2. Corrección por imprecisiones orbitales: a) Interferograma diferencial desenrollado (en radianes), b) Rampa orbital simulada por ajuste mínimos cuadrados, c) Residual (en radianes) y d) Interferograma diferencial corregido por errores orbitales (en milímetros).

Finalmente, una vez obtenido el interferograma diferencial resolvemos la ambigüedad bidimensional de fase (desenrollado de fase) haciendo uso del paquete informático SNAPHU (Chen, 2001). Puesto que la información sobre las efemérides precisas de los satélites ERS y Envisat es imprecisa, los efectos derivados de la variación de la separación orbital no son eliminados totalmente. Esto se traduce en frecuentes rampas orbitales a lo largo del área cubierta por los interferogramas (Figura 2a). Para minimizar este efecto hemos estimado el mejor plano bilineal a lo largo de cada interferograma (Figura 2b) y lo hemos abstraído (Figura 2c). Finalmente, los valores en radianes se transformaron a valores de desplazamiento utilizando la longitud de onda del sensor SAR (Figura 2d).

4. Resultados

4.1. Pedro Muñoz (Ciudad Real, Agosto 2007)

El 12 de agosto de 2007 se produjo un terremoto con magnitud 5,1, el de mayor magnitud registrada fuera de las Béticas en los últimos 10 años (desde la serie sísmica de Lugo en 1997). Este terremoto se localizó entre las localidades de Arenales de San Gregorio y Pedro Muñoz en la provincia de Ciudad Real, un área considerada de riesgo sísmico bajo (Figura 3a). La profundidad del hipocentro, fue estimada aproximadamente en unos 5-10 km y su moderada magnitud podría haber provocado desplazamientos en superficie detectables con la interferometría diferencial.

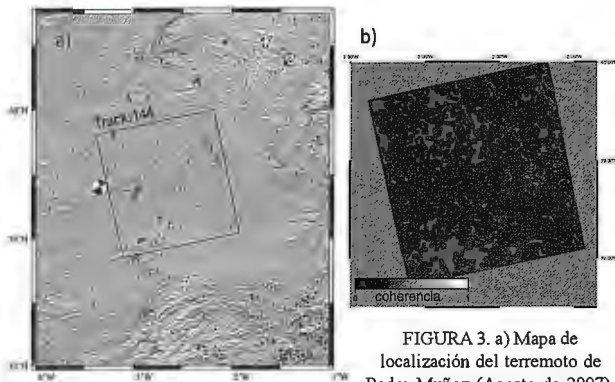


FIGURA 3. a) Mapa de localización del terremoto de Pedro Muñoz (Agosto de 2007).

El recuadro con borde negro fino limita el área cubierta por las imágenes SAR (Track ascendente 144). Epicentros del periodo 1973-2008 se representan con puntos negros (USGS, 2008), la serie sísmica con puntos rojos y mecanismo focal (IGN, 2008). b) Mapa de coherencia promedio de 5 interferogramas diferenciales utilizados en este estudio (ver texto para más detalles).

Para un análisis preliminar se obtuvieron cuatro imágenes SAR en paso ascendente sobre la región epicentral calculándose cinco interferogramas diferenciales (dos pre-sísmicos y tres co-sísmicos). La figura 3b muestra la coherencia promedio de los cinco interferogramas del área epicentral. Esta medida nos da un índice de calidad para interpretar la fase interferométrica diferencial.

Los tres interferogramas co-sísmicos individuales no muestran un patrón claro de deformación y parecen dominados por señales troposféricas. Puesto que la señal troposférica suelen estar no correlacionada con el tiempo, cada interferograma posee un patrón de distribución del vapor de agua, en teoría "independiente" (Hanssen, 2001). Si cada interferograma es llevado a un mismo sistema de "referencia de fases" (recordar que es una medida relativa) común a todos interferogramas sus medidas se pueden combinadas para reducir esta componente aleatoria y así aumentar una señal potencialmente común (deformación co-sísmica). En la figura 4a se muestra el promedio de los interferogramas co-sísmicos. Esta combinación parece estar dominada por la fase atmosférica proveniente de la imagen SAR esclava puesto que es común a todos los interferogramas. En la Figura 4b y 4c se pueden apreciar que los perfiles B-B' y C-C' no muestran ninguna señal común.

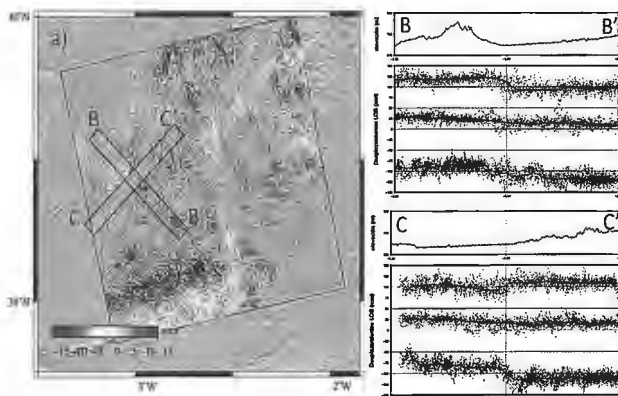


FIGURA 4. a) Patrón de deformación en LOS obtenido promediando 3 interferogramas co-sísmicos. b) Perfiles a lo largo de la dirección B-B' y C-C', respectivamente, parte superior topografía local (gris), parte inferior deformación en cada interferograma (20060216-20070830 rojo; 20061228-20070830 anaranjado; y 20070517-20070830 azul).

4.2. Mula (Murcia, Febrero 1999)

La región de Murcia ha sido la zona con mayor sismicidad en la Península ibérica en la última década. Una serie sísmica difusa en el tiempo ha generado terremotos de

magnitud moderada ($M_w \leq 5,1$ como Mula, 1999; Bullas, 2002 y Bullas, 2005) (Santoyo y Luzón, 2008). Concretamente el terremoto de Mula en 1999 ha sido estudiado previamente con interferometría radar (Martínez-Díaz et al., 2002). En este trabajo hemos calculado y combinado 11 interferogramas diferenciales co-sísmicos sobre la región epicentral para maximizar la detección de desplazamientos y reducir efectos atmosféricos (Figura 6a). Nuestros resultados poseen una dispersión en los datos muy reducida (Figura 6b), aun así el patrón de deformación resultante, no muestra señales claras. Este resultado está en consonancia con los resultados previos para este terremoto (Martínez-Díaz et al., 2002).

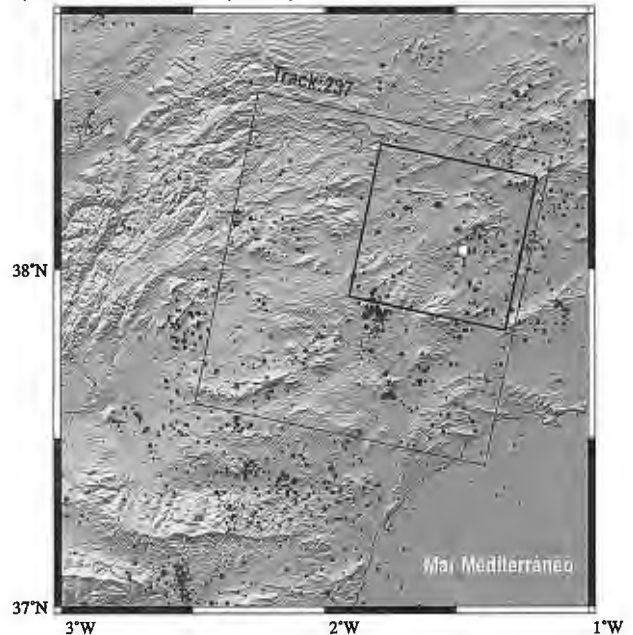


FIGURA 5. Mapa de localización del terremoto de Mula (Febrero de 1999). El recuadro con borde negro fino limita el área cubierta por las imágenes SAR (Track descendente 237). El recuadro con borde negro grueso limita el área representada en la Figura 6a. El cuadrado blanco representa el epicentro del terremoto.

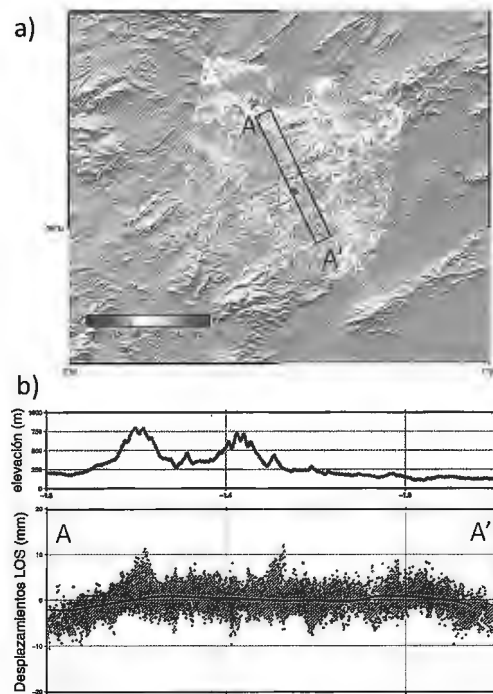


FIGURA 6. a) Patrón de deformación en LOS obtenido promediando 11 interferogramas co-sísmicos. b) Perfiles a lo largo de la dirección A-A', topografía local en la parte superior, y de deformación parte inferior (filtro de mediana, línea formada por puntos en gris oscuro).

4.3. Adra (Almería, Diciembre 1993)

Entre diciembre de 1993 y enero de 1994 se produjo la serie sísmica de Adra con dos terremotos principales de magnitudes Mw 5,3 y 4,8, respectivamente. El primer terremoto (23/12/1993) se produjo en tierra, mientras que el segundo (18/01/1994) ocurrió en una falla bajo el fondo del mar (Figura 7). Este terremoto ha sido el de mayor magnitud producida en España desde que están adquiriendo datos los satélites SAR de la ESA. Por ello, Romero et al., (2001) y Fernández et al., (2002) aplicaron la InSAR llegando a las mismas conclusiones: 1) Existía una señal consistente con el mecanismo focal del terremoto, 2) la señal se localiza relativamente lejos del epicentro de terremoto y 3) la señal reproduce la topografía local.

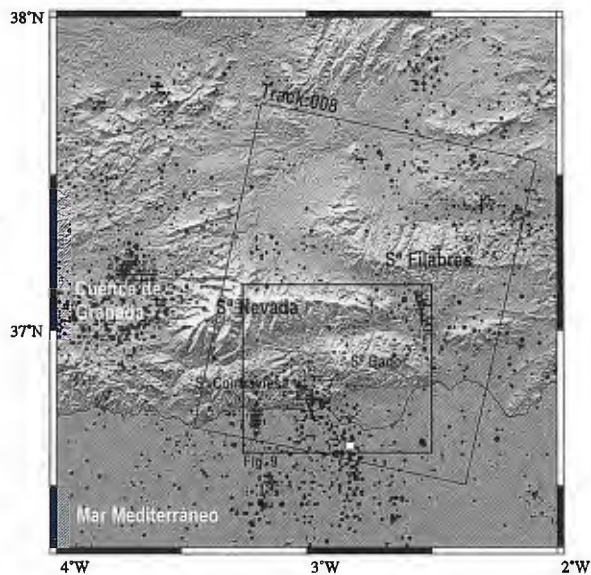


FIGURA 7. Mapa de localización de la serie sísmica de Adra (1993-1994). El recuadro con borde negro fino limita el área cubierta por las imágenes SAR (Track descendente 008). El recuadro con borde negro grueso limita el área representada en la Figura 9a. El círculo rojo representa el epicentro del terremoto del 23/12/1993 y el cuadrado blanco el epicentro del terremoto del 18/01/1994.

Dentro del proyecto GEOMOD se han revisado esos datos junto con la posibilidad de adquirir nuevos. Así, se han calculado 7 interferogramas co-sísmicos con separaciones espaciales (línea de base espacial) pequeñas, es decir por debajo de 200 metros. Las líneas de base cortas minimizan errores derivados del MDE utilizado.

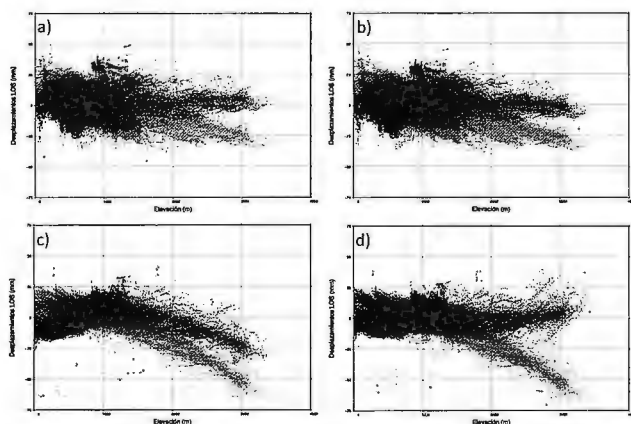


FIGURA 8. Resultados del método de corrección de la dependencia topográfica en la medida de deformación. Medidas de deformación en LOS sin corrección representados con puntos grises, medidas de deformación en LOS corregidos representados con puntos negros. a) Corrección lineal del interferograma 19920606-19971007. b) Corrección cuadrática del interferograma 19920606-19971007. c) Corrección lineal del interferograma 19931218-19951003. d) Corrección cuadrática del interferograma 19931218-19951003.

Otra de las posibles señales que complican la interpretación de los interferogramas diferenciales son los retardos troposféricos debidos a diferentes condiciones de estratificación atmosférica en el área de estudio. Este fenómeno es común en zonas con grandes gradientes topográficos traduciéndose en fases diferenciales que reproducen la topografía local. Esta señal es directamente proporcional a la elevación de los puntos del interferograma. En esta región de las cordilleras béticas este efecto parece dominar los interferogramas diferenciales (Figura 8). Así, para cada interferograma se buscó el mejor modelo lineal que redujera esta tendencia (Figura 8a). Tras el análisis de los residuos parece evidente que en algunos casos la estratificación (derivada del contenido en vapor de agua de la troposfera baja) no es lineal con la altitud, sino cuadrática (Figura 8c). Por ello, desarrollamos un método basado en un análisis estadístico de reducción de la varianza (test F). Así, que se introduzca una corrección por tendencia cuadrática cuando la comparación de los residuales lineales y cuadráticos muestren una reducción significativa de su varianza (Figura 8b y 8d).

Combinando los interferogramas corregidos por el efecto de estratificación atmosférica se obtuvo un mapa de desplazamientos que muestra una zona con aumento de la distancia satélite-terreno, probablemente por hundimiento (Figura 9), en la cuenca de Bejar.

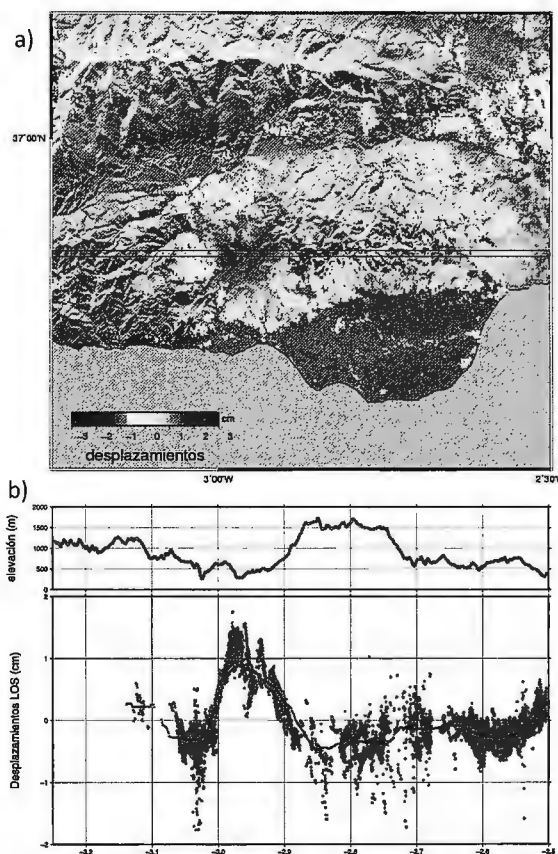


FIGURA 9. a) Patrón de deformación en LOS obtenido promediando 7 interferogramas co-sísmicos corregidos por dependencia con la elevación. Línea marca la traza del perfil mostrado en la Figura 9b. El círculo rojo representa el epicentro del terremoto. b) Perfiles topográfico local en la parte superior, y de deformación parte inferior (filtro de mediana, puntos gris oscuro). Valores positivos indican alejamiento del satélite (hundimiento).

5. Discusión y Conclusiones

En este trabajo se ha aplicado la interferometría diferencial para detectar desplazamientos producidos por 3 terremotos de magnitud moderada. No se ha detectado deforma-

ciones significativas en las áreas epicentrales del terremoto de Pedro Muñoz (2007) ni en el de Mula (1999). Sin embargo aplicando una corrección atmosférica, se ha detectado deformación indicativa de un hundimiento de aproximadamente 1,5 cm en la cuenca de Bejar cercana al epicentro del terremoto de Adra (23 de diciembre de 1993). Aunque la deformación es significativa, la causalidad directa debida al terremoto debe de ser tomada con precaución, puesto que la distancia con la localización del epicentro parece ser demasiado grande para representar deformación co-sísmica. Tras el terremoto también se observaron descensos en el nivel freático del acuífero de la cuenca de Bejar (Martínez-Díaz, comunicación personal). Una posible explicación para este hundimiento podría ser la consolidación del relleno sedimentario de esta cuenca: a) por una disminución significativa de la presión de poro en la zona saturada debida al terremoto o, b) por una sobreexplotación del acuífero en el intervalo de tiempo estudiado. Estos resultados muestran el claro interés de la realización de investigaciones utilizando la InSAR en terremotos de magnitudes moderadas, así como potenciales procesos hidrológicos desencadenados por estos.

6. Agradecimientos

Los datos de esta investigación han sido obtenidos a través del proyecto de la Agencia espacial Europea (ESA) CAT-1:4466 ("Geodynamical Studies in the Betic-Rif Ranges by means of Radar Interferometry"). Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto GEOMOD (CGL2005-05500-C02, del Ministerio de Ciencia e Innovación de España) y la UE mediante fondos estructurales FEDER. La investigación realizada por Pablo J. González ha sido también financiada por la Universidad Complutense de Madrid dentro de su programa de formación de personal investigador. La mayoría de las figuras han sido realizadas con el software libre GMT-tools (Wessel and Smith, 1998).

7. Referencias

Borgia, A., Tizzani P., Solaro G., Manzo M., Casu F., Luongo G., Pepe A., Bernardino P., Fornaro G., Sansosti E., Ricciardi G.P., Fusi N., Di Donna G., Lanari R. (2005) Volcanic spreading of Vesuvius, a new paradigm for interpreting its volcanic activity. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03303, doi:10.1029/2004GL022155.

Chen, C.W. (2001). Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry. Tesis doctoral, Stanford University.

Dziewonski, A.M., Chou, T.-A., y Woodhouse, J.H. (1981) Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852.

Fadil, A., Vemant, P., McClusky, S., Reilinger, R., Gomez, F., Sari, D. B., Mourabit, T., Feigl, K., Barazangi, M. (2006) Active tectonics of the western Mediterranean: Geodetic evidence for roll back of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rif Mountains, Morocco. *Geology*, 34(7), 529-532.

Farr, T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Piller M., Rodríguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi: 10.1029/2005RG000183.

Fernández, J., Romero R., Carrasco D., Luzón F., Araña V. (2002) InSAR volcano and seismic monitoring in Spain. Results for the period 1992-2000 and possible interpretations. *Optics and Lasers*

in Engineering, 37, 285-297.

Fernández, J., Yu T.T., Rodríguez-Velasco G., González-Matesanz J., Romero R., Rodríguez G., Quirós R., Dalda A., Aparicio A., Blanco M.J. (2003). New geodetic monitoring system in the volcanic island of Tenerife, Canaries, Spain. Combination of InSAR and GPS techniques, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 124(3-4), 241-253.

GEBCO (2008) General Bathymetric Chart of the Oceans. <http://www.gebco.net/>

Hanssen R.F. (2001) Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, 2001.

Herrera, G., Tomás R., López-Sánchez J.M., Delgado J., Mallorquí J.J., Duque S., Mulas J. (2007) Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology*, 90 (3-4), 148-159.

IGN (2008) <http://www.ign.es/ign/es/IGN/SisIndice.jsp>

Kampes B., Hanssen R.F., Perski Z. (2003) Radar interferometry with public domain tools. En: Proc. of FRINGE 2003, Dec. 1-5, Frascati, Italy.

Lundgren, P., Stramondo S. (2002), Slip distribution of the 1997 Umbria-Marche earthquake sequence: Joint inversion of GPS and synthetic aperture radar interferometry data, *J. Geophys. Res.*, 107 (B11), 2316, doi:10.1029/2000JB000103.

Martínez-Díaz, J.J., Rigo A., Louis I., Capote R., Hernández-Enrile J.L., Carreño E., Tsige M. (2002) Caracterización geológica y sismotectónica del terremoto de Mula (febrero de 1999, mb: 4,8) mediante la utilización de datos geológicos, sismológicos y de interferometría de RADAR (INSAR). *Boletín Geológico y Minero* 113 (1), 23-33.

Massonnet D., Feigl K. (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36(4), 8755-1209/98/97RG-03139 441-500.

Nocquet, J.M., Calais, E., (2003). Crustal velocity field of Western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001. *Geophys. J. Int.*, 154, 72-88.

Romero, R., Luzón, F., Fernández, J., Carrasco, D. (2001) Detection of surface displacement produced by the 1993 Adra earthquake (Mb = 5.0), South of Spain, using radar interferometry. In: Workshop on the Geodynamics of the Western part of Eurasia-Africa plate boundary (Azores-Tunisia). *Boletín ROA. No. 3/2001*.

Santoyo M.A., Luzón F. (2008) Stress relations in three recent seismic series in the Murcia region, southeastern Spain, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.019. en prensa

Santoyo M.A., González P.J., Fernández J., Luzón F. (2008) Stress relations and deformation in the 1993-1994 Adra series, Southern Spain. en preparación.

Scharro, R., Visser, P. (1998). Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 103(C4):8113-8127.

Tomás R., Márquez Y., López-Sánchez J.M., Delgado J., Blanco P., Mallorquí J.J., Martínez M., Herrera G., Mulas J., (2005) Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 269-283.

USGS (2008) National Earthquake Information Center <http://neic.usgs.gov/>

Wessel, P., Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

Wright, T.J. (2002). Remote monitoring of the earthquake cycle using radar interferometry. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 360:2873-2888.



PARQUES Y JARDINES

SICAT - GESTION

CATASTRAL

SIGURB - GESTION

PATRIMONIO

SISTEMAS

GESTION DE PORTALES WEB

ENCUESTA DE

URBANISTICA

E-LEARNING

MANEJO URBANO

GESTION DE REDES

GESTION TERRITORIAL

INFRAESTRUCTURAS

CORPORATIVA

la solución más sencilla



Sadim

grupohunosa

Sadim Sociedad Asturiana de Diversificación Minera S.A.

C/ Jaime Alberti, 2 · 33900 Ciaño Langreo. Asturias (España)

Tlfo.: (+34) 985 678 350 · Fax: (+34) 985 682 664



comercial@sadim.es www.sadim.es

PRESENTACION DE UN METODO PARALELO A LA NORMA ISO 17123-5 PARA ESTACIONES TOTALES

De la Cruz González, José Luis - Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén.

Ruiz Lendínez, Juan José - Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén.

Resumen

La norma ISO 17123-5 expone el método de trabajo que permite calcular la precisión para Taquímetros electrónicos (Estaciones Totales) en su empleo en Obra civil. Desde su salida al mercado, y hasta la aparición de la Norma, se han venido empleando métodos paralelos a esta que servían para calcular la desviación estándar de este tipo de instrumentos. En este trabajo presentamos uno de estos métodos alternativos y se comparan sus resultados, con los obtenidos a partir de la aplicación de la Norma ISO 17123-5, comprobando que se pueden usar los dos indistintamente para cualquier tipo de instrumentación topográfica

Palabras Claves: Norma ISO 17123, Errores instrumentales. Métodos paralelos

Abstract

ISO 17123-5:2005 specifies field procedures to be adopted when determining and evaluating the precision (repeatability) of electronic tacheometers (total stations) when used in building and surveying measurements. However, until these field procedures have been developed, another tests and methods have been used to evaluate the uncertainty of measurements of this kind of instruments. In this paper, we present an alternative method to evaluate this uncertainty, and we compare the results obtained with the above standard.

Key words: Norma ISO 17123, instrumental Errors. Parallel methods

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES.

Todo el material topográfico que habitualmente es empleado en obra, y de manera específica las Estaciones Totales, debe cumplir un conjunto de requisitos mínimos que aseguren su adecuación al uso. La comprobación de dichos requisitos se lleva a cabo a través de los diversos procesos de verificación, consistentes en el desarrollo de un conjunto de operaciones encaminadas a comprobar que el instrumento continúa midiendo conforme a las especificaciones recogidas en el certificado de calibración del mismo (Ruiz, 2005). En este sentido, y en la actualidad, tanto la calibración como la verificación de la instrumentación topográfica se realizan según lo expuesto en las correspondientes Normas ISO. Lógicamente, las Estaciones Totales no constituyen una excepción a esta regla.

En la instrumentación topográfica clásica, por ejemplo taquímetros, el error total cometido era obtenido mediante el cálculo de los correspondientes errores accidentales. De este modo, era necesario calcular el error de puntería, el error de lectura en el limbo, el error de verticalidad del instrumento (error que en la actualidad es prácticamente despreciable gracias a la existencia de los compensadores de dos ejes) y, finalmente, el error de dirección. Este último, estaba a su vez provocado por: (1) No ubicar con la exactitud necesaria tanto el instrumento sobre el punto de estación, como la señal sobre el punto visado, y (2) Por el error de falta de verticalidad del jalón (Dominguez, 1998).

Con la aparición, a principio de los años 90, primero de los Teodolitos electrónicos, y poco más tarde de las Estaciones Totales, el cálculo de los errores accidentales anteriormente citados fue perdiendo vigencia. De este modo, y hasta que no fueron desarrolladas, primero las normas DIN (Instituto Alemán de Normalización), y posteriormente las normas ISO 12858 (ISO, 1997) que aludían a los parámetros de calidad de la instrumentación topográfica, se produjo un importante vacío procedimental para el cálculo de los errores accidentales, y por lo tanto para la comprobación del correcto funcionamiento de la correspondiente instrumentación. Dicha ausencia se vio agravada con la aparición de instrumentos tales como las Estaciones totales con sistema de monitoreo. Con todo ello, surgió la necesidad de calcular los errores, y realizar el "chequeo" de los instrumentos de alguna forma ya que por ejemplo, y entre otras cuestiones, el enfoque automático no producía los mismos errores que el enfoque manual.

Ante esta situación, se desarrollaron diversos métodos, como el que se expone en el presente trabajo, que con el tiempo no han perdido vigencia, sino que pueden ser empleados de forma paralela y/o complementaria a la utilización de la Norma ISO 17123-5 (ISO, 2005), e incluso pueden ser utilizados para realizar el cálculo de los correspondientes errores en los trabajos de replanteo con un equipo topográfico (instrumento, jalón, niveles, etc.), para un momento y a una distancia concreta.

2. DESARROLLO DE LA NORMA ISO 17123-5.

Como ya ha sido tratado en diversa bibliografía, la Norma ISO 17123-5 (ISO, 2005) desarrolla una metodología de trabajo para el cálculo de la desviación estándar en Estaciones Totales, con el objeto de llevar a cabo diversos procesos de verificación, describiendo el método de observación y cálculo que ha de seguirse (Ruiz, 2006). Una parte importante de toda Norma son los diversos procedimientos que la integran. Para el caso de la verificación y calibración de instrumentación topográfica, los procedimientos suelen estar clasificados en simplificados (actuación rápida) y completos (procedimiento detallado), necesitando estos últimos de una serie de requerimientos y comprobaciones. A continuación, se van a detallar tanto los requerimientos como las operaciones correspondientes al procedimiento completo para el caso que nos ocupa.

2.1 Requerimientos iniciales de la Norma ISO 17123-5.

Para la aplicación del procedimiento completo (que se desarrolla en el siguiente apartado) se requiere preparar una zona de pruebas convenientemente dotada (asegurando que exista buena visibilidad, y que el terreno sea llano y

estable). Se deberán materializar tres puntos sobre el terreno, separados entre ellos una distancia comprendida entre los 100 y los 200 metros aproximadamente, de manera que formen (aproximadamente) un triángulo equilátero. Para la realización de la prueba completa (procedimiento completo) se hace necesaria, además, la medida de los valores atmosféricos correspondientes tanto a la presión como a la temperatura, por tanto deberá disponerse del equipo adecuado para ello.

2.2 Descripción del Procedimiento Completo para coordenadas tridimensionales.

Se realizarán un total de tres series distintas de observaciones, una serie sobre cada uno de los puntos que anteriormente se han definido. Estos puntos serán denominados en adelante como puntos 1, 2 y 3 respectivamente.

Para la obtención de las coordenadas planimétricas (X, Y), deberá actuarse de la siguiente manera:

-Para cada una de las series, se estacionará el instrumento en cada uno de los tres puntos definidos (comenzando por el punto número 1, punto que en cada caso será considerado como origen del sistema, y por tanto de coordenadas 0,0). Se observará a los otros dos puntos aplicando la regla Bessel (círculo directo y círculo inverso) realizando la medida de las coordenadas obtenidas.

-En cada caso, e independientemente del punto de estación, las coordenadas medidas deberán ser referidas al punto número 1 (al que por tanto, siempre le será asignado el valor 0,0 en coordenadas). Con ellas serán calculados los valores de los acimutes correspondientes, que igualmente deberán ser referidos al punto 1 (esto es, θ_1^2 y θ_1^3 respectivamente), a partir de la comparación de sus valores medios para cada una de las tres observaciones realizadas en cada serie. Del mismo modo, y con las coordenadas medidas y referidas al punto 1, se calcularán las distancias entre puntos.

-Con los acimutes y las distancias, obtenidas según el apartado anterior, se recalculan las coordenadas para los puntos 2 y 3 respectivamente.

-Con todos los valores (9 pares en total) de coordenadas planimétricas de los puntos 2 y 3 obtenidos para cada una de las tres observaciones realizadas en cada una de las tres series, se obtienen unos valores medios de coordenadas y se calculan los correspondientes residuos (r_x y r_y), que serán los que deban ser sometidos a las correspondientes pruebas estadísticas.

Para la coordenada "Z", deberá actuarse de la siguiente manera:

-En cuanto a lo que se refiere a la observación de desniveles, la norma indica únicamente la observación del incremento de "Z" de una estación a otra.

-El cálculo de la coordenada Z de los puntos dos y tres, se realizará mediante todas las combinaciones posibles entre los anillos observados, y un valor de un plano medio de desniveles, que nos servirá para calcular los residuos.

-Con estos valores de Z y el plano medio, calculamos los residuos de las observaciones y su desviación estándar. Finalmente, y tras completar el proceso, se van a obtener las desviaciones estándar para las coordenadas tridimensionales X, Y, Z.

3. METODOLOGIA PROPUESTA Y RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1 Instrumentación propuesta.

La instrumentación escogida para el desarrollo del presente trabajo ha sido la siguiente: Estaciones totales TC-805 y TCR-805, ambas de la casa comercial Leica Geosystems. Para dicha instrumentación, el fabricante proporciona una información respecto a las características técnicas que se recoge en la tabla 1.

MODELO	A	Medida angular		Sens / Comp			Medida distancia
		σ_{ISO-HZ}	σ_{ISO-V}	S	$\sigma_{comp-HZ}$	σ_{comp-V}	σ_{EDM}
TC-805	30	10 ^{cc}	10 ^{cc}	-	6	6	2 mm + 2ppm
TCR-805	30	15 ^{cc}	15 ^{cc}	-	5	5	Prisma: 2 mm+2ppm Sólido: 3mm+2ppm

Tabla 1. Características técnicas de la instrumentación empleada.

Además la instrumentación descrita, para la ejecución del conjunto de observaciones necesarias, se ha empleado un pequeño trípode provisto de una pinza en su parte superior, lo que ha permitido sujetar el jalón y el prisma, de forma que el error debido a la inclinación que estos pudieran sufrir, se pueda considerar nulo.

3.2 Observación de la Norma ISO 17123-5 con la instrumentación propuesta.

La primera fase del trabajo consistió en la observación de la Norma ISO 17123-5 con las dos Estaciones Totales propuestas (descritas en el apartado anterior). Los valores obtenidos son los que se muestran en la tabla 2. Puesto que la observación de la norma indica que el método ha de desarrollarse en círculo directo y círculo inverso, haciendo el promedio entre ellos, el error resultante vendrá dividido entre $\sqrt{2}$ si lo comparamos con la observación en un solo círculo. Como vamos a comparar los resultados de la Norma ISO con un procedimiento observado en un solo círculo, para poder compararlos, multiplicamos por $\sqrt{2}$ los resultados de la norma.

Instrumento	S_{ISO} (cc)	σ_{X-Y} (mm)	σ_Z (mm)
TC805	10	2.3	2.9
TCR805	15	3.2	5.9

Tabla 2. Desviaciones estándar observadas según la norma 17123-5.

Una vez observada la Norma ISO y obtenidos los resultados para la misma (tabla 1), se procedió a realizar la observación a partir del método que se propone en el presente trabajo.

3.2 Observación de la metodología propuesta.

En este caso, el campo de trabajo o zona de pruebas debe presentar unas características similares a las del caso anterior en cuanto a visibilidad y estabilidad se refiere.

En primer paso será dibujar, en un sistema CAD, un círculo cuyo radio sea similar a la mitad de la distancia media que separaba a los puntos 1, 2 y 3 del caso anterior, de este modo, las distancias observadas van a ser similares en ambos casos. Con objeto de que la observación, en este segundo caso, tuviera los mismos grados de libertad que para el caso de observación de la Norma ISO, se eligieron un total de 26 puntos pertenecientes al círculo homogéneamente distribuidos en él (figura 1) de modo que al llevar a cabo la observación se empleara todo el limbo hori-

zontal del instrumento, obteniendo sus coordenadas planimétricas X e Y.

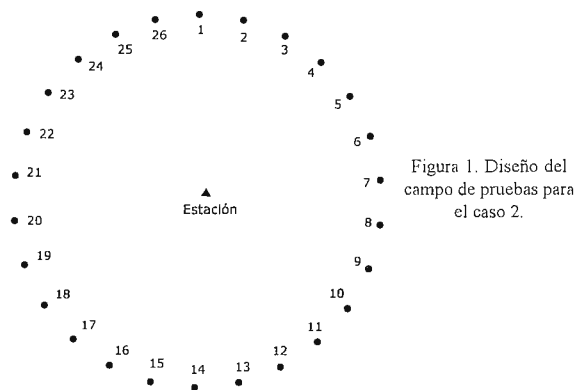


Figura 1. Diseño del campo de pruebas para el caso 2.

Todo lo anterior permite obtener unas coordenadas calculadas, referidas a un sistema arbitrario, de todos los puntos mencionados. (Centro del círculo, y puntos exteriores pertenecientes al mismo). Tras ello, se procedió a realizar el replanteo en campo de dichos puntos, ayudados, como ya se ha indicado, por el trípode ya mencionado. Dicha tarea de replanteo debe llevarse a cabo tanto para la TC805 como para la TCR805.

En una primera fase del replanteo, se emplearon estacas de madera para materializar la ubicación de cada uno de los puntos, para posteriormente en una segunda fase, replantear con precisión (ayudados por el trípode telescópico) sobre la estaca de madera el punto exacto del círculo de coordenadas conocidas. Este punto quedó materializado sobre la estaca mediante la inserción de un pequeño clavo sin cabeza. Para la obtención de la coordenada "Z", se observó, dando cota a la cabeza de la estaca del punto de estacionamiento, y dotando mediante nivelación trigonométrica, de una coordenada arbitraria Z a cada punto del círculo.

Según el procedimiento anterior, y una vez que fueron replanteados los 26 puntos pertenecientes al círculo, se levantó el instrumento, estacionándolo de nuevo. Con el instrumento nuevamente estacionado, pasamos ahora a observar los puntos que previamente habían sido replanteados, calculando las coordenadas X, Y, y Z. Con estas coordenadas (obtenidas directamente con el instrumento), se procedió a calcular los acimutes correspondientes a los puntos replanteados, y se calculó la diferencia entre los acimutes observados y los acimutes replanteados, obteniendo una diferencia media, con la que fueron corregidos todos los acimutes observados.

Ya con estos nuevos acimutes corregidos se pasó a calcular las coordenadas X e Y definitivas, calculando los residuos como la diferencia entre las coordenadas calculadas y las coordenadas observadas. A partir de los residuos se calculó la desviación estándar para las coordenadas planimétricas, actuando de manera análoga con la coordenada "Z". Los valores obtenidos son los mostrados en la tabla 3.

Como puede deducirse de la comparación entre las tablas 1 y 2, existen diferencias de observación entre un método y otro. Para poder establecer si las diferencias que surgen son apreciables o estadísticamente iguales para las coordenadas X e Y, se procedió a aplicar el test de Fisher al 97,5% con 24 grados de libertad (Expresión 1).

Instrumento	$\sigma_{x,y}$ (mm)	σ_z (mm)
TC805	3.07	1.30
TCR805	4.70	1.47

Tabla 3. Desviaciones estándar para las coordenadas X, Y, Z según instrumento.

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}(v_{xy},v_{xy})}} \leq \frac{S_1^2}{S_2^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}(v_{xy},v_{xy})} \quad (1)$$

Donde:

F: Valor de Fisher.

S₁: Desviación estándar de la observación ISO.

S₂: Desviación estándar de la observación del círculo.

Sustituyendo por los valores correspondientes, obtenemos que se cumplen las siguientes condiciones para cada instrumento:

$$\text{TC805: } 0.4405 \leq 0.56 \leq 2.27$$

$$\text{TCR805: } 0.4405 \leq 0.463 \leq 2.27$$

Puede deducirse, por lo tanto, que ambos casos son estadísticamente iguales.

En cuanto a lo que se refiere a la coordenada "Z", se puede actuar de la misma manera, eliminando alguna observación del círculo, ya que, en este caso, la Norma ISO posee únicamente 15 grados de libertad. Sin embargo, con una simple inspección visual de los resultados puede apreciarse como para el caso del "círculo" los valores obtenidos son más pequeños que en el caso de la aplicación de la Norma ISO, por lo que puede intuirse que también cumpliría el test de Fisher. La explicación de obtener un valor de "Z" más pequeño es que se realizaron menos estacionamientos, además de que la señal no varió su altura durante la observación, acumulando así menor cantidad de errores.

4. CONCLUSIONES

La conclusión que debe extraerse del trabajo es clara. Los dos métodos que aquí se han presentado, por una parte la aplicación de la Norma ISO 17123-5 y, por otra, el empleo de los puntos replanteados de un círculo, son igualmente válidos para poder llevar cabo la calibración del correspondiente instrumental topográfico (en este caso Estaciones Totales), puesto que los valores obtenidos cumplen con el test de Fisher para los grados de libertad de la observación y al 97,5%.

En cualquier caso, deben establecerse matices que nos ayuden a decantarnos por la aplicación de uno u otro método en función de la casuística que se presente. Así, mientras que el replanteo del círculo nos puede proporcionar información añadida acerca del error que se comete en el replanteo bajo una forma de trabajo concreta, la aplicación de la Norma ISO 17123-5 tiene el valor extra de ofrecernos información acerca de la desviación estándar para cualquier tipo de observación (itinerario, radiación, etc.) en sus coordenadas tridimensionales.

Referencias

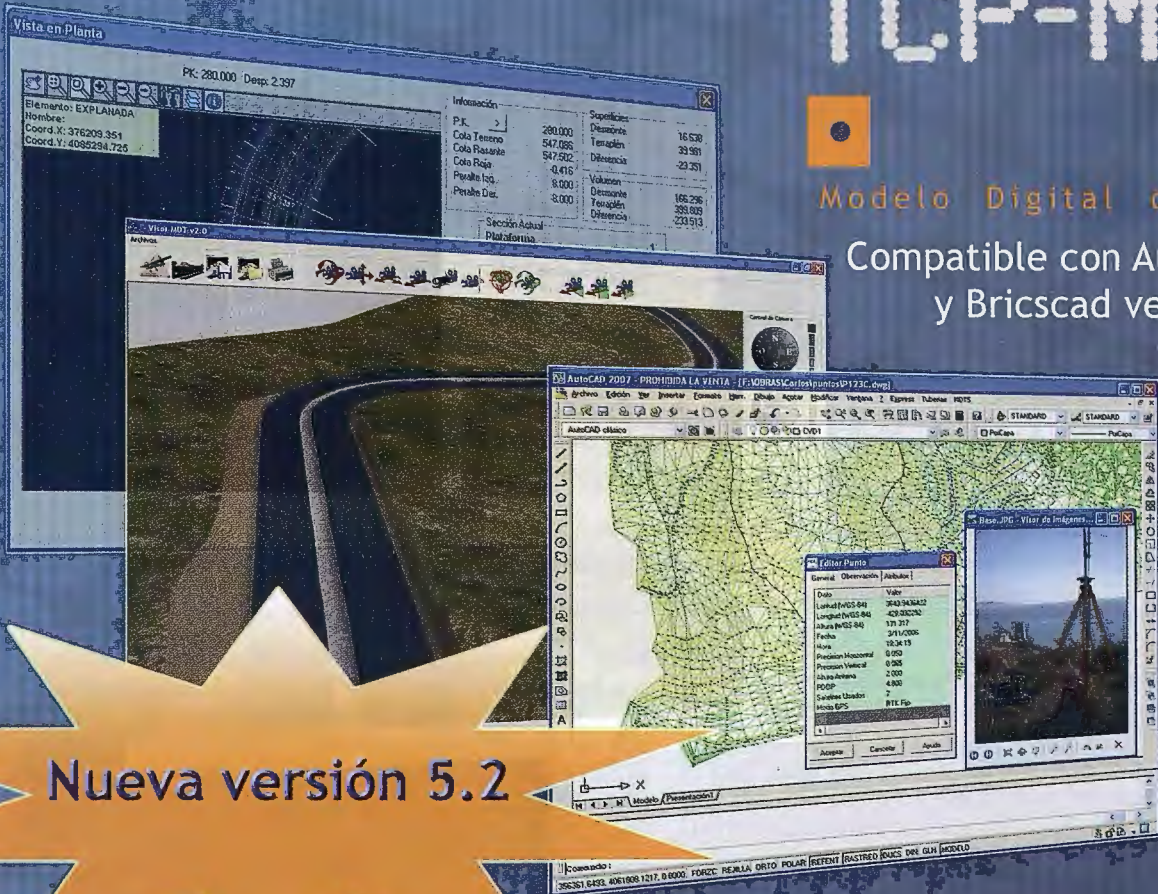
- ISO 12858 (1997) International Organization for standardization CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
- ISO 17123 (2005) International Organization for standardization CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
- Dominguez, F., 1998. Topografía general y aplicada. Ed. Mundi-Prensa. 13ª ed. pp. 811.
- Ruiz, J., De la Cruz, J., 2005. Desarrollo de un plan de calidad. Mapping. Revista Internacional de ciencias de la Tierra. Nº 104, pp. 72-86.
- Ruiz, J., De la Cruz, J., Blázquez, E., 2006. Sistema de calidad para la ejecución y control de obra lineal. Procedimientos específicos para instrumentación topográfica. Actas XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Barcelona. España. Ed. Digital.

TCP-MDT



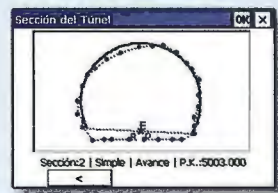
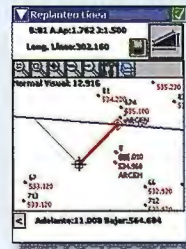
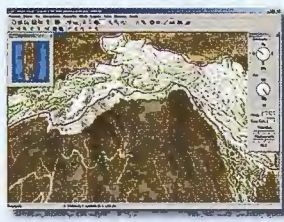
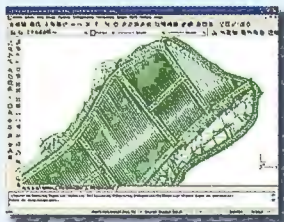
Modelo Digital del Terreno

Compatible con Autocad 2009
y Bricscad versión 8



Nueva versión 5.2

levantamientos proyectos replanteos carreteras urbanizaciones
canteras topografía construcción urbanismo ingeniería



INTELLI-MDT

Modelo digital del terreno
con CAD incluido

ORTO-3D

Visualización 3D a
partir de ortofotos
y MDT's

TCP-GPS

Replanteo y toma
de datos con GPS

TCP-ET

Replanteo y toma
de datos con
estación total

TCP-TUNEL

Replanteo y toma
de datos de túnel



Una solución para cada necesidad
www.aplitop.com

C/Sumatra nº9, 29190 - Málaga Tlf: 952 43 97 71 - Fax: 952 43 13 71

www.aplitop.com

aplitop@aplitop.com

FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS GEOESPACIALES A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED GEODÉSICA CANTONAL ENLAZADA A SIRGAS EN CUENCA-ECUADOR

José Miguel Gaspar Soriano¹. - Voluntario Unites bajo Naciones Unidas en la Municipalidad de Cuenca, Ecuador.

Raúl Mejía Pesántez, MSc².- Coordinador del Proyecto Cuenca Digital, SEGELAN, Municipalidad de Cuenca, Ecuador.

RESUMEN:

Este artículo describe las tareas realizadas en el proceso de materialización, observación y cálculo de una Red Geodésica Tridimensional de 2º Orden realizada por G.P.S., y las repercusiones que tendrá el desarrollo del territorio cuencano. Para la realización de una Red con las características descritas más adelante, cobra vital importancia la planificación o trabajo a priori. La planificación se realiza antes de salir a campo puesto que las observaciones GPS tienen que ser simultáneas, y por lo tanto se tendrá que hacer un cronograma de los diferentes equipos y tiempos de observación. Uno de los factores que más influye en la metodología de observación es la distancia entre los puntos a observar (longitud de los vectores), instrumental utilizado, precisión requerida, entre otros. En este documento se presenta los cálculos, resultados estadísticos del ajuste, y compensación.

En cuanto a las repercusiones que tiene la implementación y puesta en disponibilidad de una red geodésica para Cuenca son numerosas en el mediano y largo plazo aunque existe una incidencia inmediata en el ámbito catastral. La implementación de la red geodésica nació de las entidades municipales directamente ligadas con la gestión territorial, las cuales al no disponer de una cartografía precisa, debían lidiar con problemas de precisión en planificación y uso de suelo, riesgos, despliegue de infraestructura de servicios, etc. Así también la ausencia de un marco geodésico provocaba retrasos en la adquisición de nueva información territorial principalmente en las áreas de expansión y rurales del cantón, afectando las finanzas municipales relacionadas con el cobro equitativo de impuestos prediales.

Finalmente en este documento se describe la introducción del Datum SIRGAS'95 el cual reemplaza al largamente utilizado Datum PSAD 56 (sistema que se va quedando en desuso), actividad que solventará los problemas de transformación de Datum, agilizando el intercambio de información entre entidades provinciales, nacionales e internacionales.

ABSTRACT:

This article contains a description of the planning, observation and data processing of a 2nd Order - Three Dimensional Geodetical Network using GPS, and also it is presented a description of the impact in development for the third city in importance within Equator also a World Heritage City by UNESCO: Cuenca. When a network of these characteristics is implemented, one of the most important tasks to be done is the planning, well in advance to the field work, mainly because the GPS observations must be done simultaneously. The schedule for the teams involved and the timeline for observations depends directly on the planning. The methodology for observations

depends on the distance between observed points (vectors length), number of available satellites, precision required, and so on. Once the planning is described, it is presented the computing of vectors and the statistics obtained with the compensation. The impacts of the implementation of a geodetical network using GPS are diverse but stronger in the cadastral field. The implementation of this GPS Network comes from the imperative need of the municipality, such as land registration and land planning cause they do not have a basic cartography in good condition and precise, and it produces various problems when making land planning studies, poorly land uses, risk maps that do not conform to reality and a cadastral mapping defective and poorly updated are examples which has a direct impact on the municipal economic resulting in a shortfall in the collection of land taxes, especially in the rural areas, affecting citizens. Another cause remarkable is the inability to verify the goodness of the results obtained by professionals in the topographic area, they do not have the necessary infrastructure to be able to determine coordinates with a degree of absolute reliability because there are not points materialized on the ground that permitting to a reference from. Lastly, a SIRGAS'95 Datum is introduced for replaces the Datum PSAD 56 (which is falling into disuse), it solve problems of transforming Datum, and streamlines information exchange with provincial and national entities.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto, considerado estratégico, fue el otorgar al Cantón Cuenca de un marco geodésico a través de la implementación de una Red Geodésica GPS en toda la provincia, solventando así ciertos problemas técnicos topo-cartográficos. Cuenca está situada en la región centro-sur del Ecuador (*Figura 1*). La ausencia de un marco geodésico y la inadecuada precisión y poca actualidad de la cartografía en Cuenca (del año 1995) afectó fuertemente a las instituciones locales, tanto públicas como privadas, así como también a la ciudadanía. La implementación de la red tendrá también implicaciones en el mediano y largo plazo dentro de la institucionalidad cuencana relacionada con la gestión del territorio. Esta situación no es ajena a lo que sucede en muchas ciudades de Latinoamérica. La expansión urbanística de Cuenca, una ciudad de tamaño medio (400 mil habitantes) hace imperativa la utilización de técnicas cartográficas actuales.

Ante la falta de precisión en la cartografía base se ha debi-

do trabajar a una escala más pequeña que aquella que correspondería, realizándose levantamiento topográficos a una escala inadecuada, a más de que los levantamientos se han ido apoyando unos en otros, de tal forma que cada uno de ellos ha servido de referencia para el próximo, con la consiguiente acumulación de errores dando como resultado una cartografía en mal estado porque en ningún momento se partió de un origen fiable. Todo ello hace evidente la necesidad de una buena adquisición de datos de campo para lo cual se requieren puntos de referencia que sirvan de origen a los profesionales cuando deben realizar mediciones en campo. Por este motivo la Municipalidad de Cuenca decidió implementar una Red Geodésica Tridimensional de 2º Orden, que a su vez ha sido densificada en todos las parroquias del cantón¹.

¹Unidad territorial en que se subdivide un país.

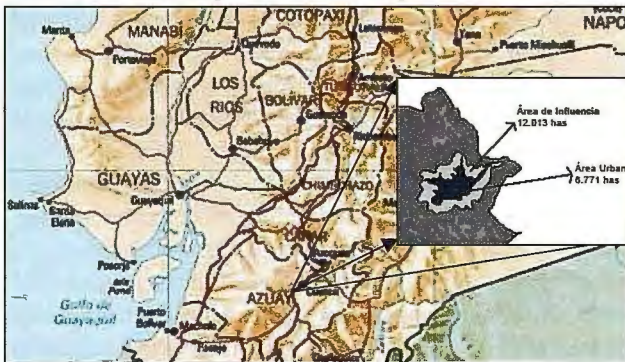


Figura 1. Cantón de Cuenca, donde se ha implementado la Red.

El estudio esta promovido por la Municipalidad de Cuenca (Ecuador) que mediante la CCC (Corporation Comercial Candiense) ejecutó los trabajos a través de la empresa quebequense BLL Inc. La Municipalidad de Cuenca realizó el trabajo de seguimiento y evaluación a través de un técnico geodesta perteneciente al Programa Unites de Naciones Unidas, buena parte de las actividades de seguimiento están resumidas en este documento.

2. SITUACIÓN CARTOGRÁFICA INICIAL Y SUS REPERCUSIONES

La necesidad de materializar esta Red está íntimamente relacionada con las repercusiones que benefician a las entidades municipales de planificación, catastro y ETA-PA²; *para poder hacer una óptima planificación del territorio es necesario conocerlo adecuadamente*. Las consecuencias de no disponer de datos de partida fiables, cartografía precisa, puntos de referencia, dan como consecuencia la imposibilidad de adquirir datos de campo con precisión, situación que afecta la gestión del territorio por parte de las diferentes entidades locales y/o nacionales: periciales topográficas, delimitación de parcelas, hitos y mojonamientos, cobro de impuestos urbanos y rurales, alcantarillado, planeamiento de carreteras son solo algunas de las actividades que se ven afectadas. En algunos casos es suficiente si se realiza mediciones relativas para solventar el problema temporalmente, en el cálculo de áreas, deslindes o ciertas obras lineales, pero el problema se agrava cuando se intenta concatenar dicho trabajo con otros, y es cuando se evidencian las deficiencias cartográficas que hacen imposible su fusión en un plano final (cartográficamente bien elaborado), razón por la cual los funcionarios municipales recurren a una suerte de "pseudoajuste" a la cartografía hasta que encajen unos levanta-

mientos con otros. Por otro lado cabe mencionar la imposibilidad de utilizar correctamente GPS topo-geodésicos para realizar levantamientos topográficos, ya sean en tiempo real o post proceso, porque no se dispone de ningún punto de origen, debiendo trabajarse en relativo pero nunca en absoluto. Este problema trasladado a planificación del territorio hace que no se realicen levantamientos en coordenadas absolutas, y finalmente cuando se intenta superponer esta nueva planificación con la cartografía existente se obtiene un resultado pobre que degenera en acumulación de errores que con el tiempo se vuelven inadmisibles y producen desplazamientos en los levantamientos de varios metros. Esta problemática ofrece una ligera idea de las dificultades que es posible encontrar si no se tiene un Sistema de Referencia Espacial preciso y materializado en el lugar de actuación.

²Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca.



Figura 2. Mapa donde se aprecia la distribución de los puntos que forma la Red Geodésica del Cantón Cuenca, y los puntos pertenecientes a la Red GPS Nacional.

3. INSTRUMENTAL UTILIZADO

Los puntos de referencia utilizados para la implementación de la red cantonal pertenecen a la Red GPS Nacional del IGM (Red de primer orden creada por el Instituto Geográfico Militar, y que a su vez está enlazada con SIRGAS³). La longitud máxima de estos puntos de referencia de la red cantonal a implantar no supera los 70 kilómetros; es importante destacar que los puntos de la red nacional del IGM estaban fuera del límite provincial⁴. El factor de longitud junto con la precisión que se quiere alcanzar son los condicionantes básicos que determinan la utilización del instrumental y la metodología a emplear.

Instrumental utilizado:

- Walktalkies, se consigue estar en todo momento en continua comunicación con los diferentes operarios, y supervisar todas las observaciones en tiempo real.



- 4 Receptores GPS 5700 Trimble, necesarios para realizar 4 observaciones simultáneamente obteniendo de esta forma 6 vectores en cada sesión, ganando tiempo y redundancia.

- Placas de zamak (aleación de zinc con aluminio, magnesio y cobre) con un imán incorporado, martillo, cemento, etc., para la materialización de los hitos.

- Trimble Total Control, para el cálculo y ajuste de la Red Geodésica.
- Diversos programas computacionales específicos de la topografía.

³Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

⁴Subdivisión gubernamental usualmente en el nivel inferior a estado.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1. Consideraciones previas

Para la correcta observación en campo, se tuvo que establecer contacto con el IGM para obtener información de los puntos de la *Red GPS Nacional* que sirven de origen para enlazar esta nueva *Red Cantonal* bajo el mismo *Sistema de Referencia Espacial* del país, que a su vez está enlazado a *SIRGAS*. Tras la obtención de la información correspondiente se procedió a estudiar la zona de actuación y a comprobar si los puntos que se requerían existían físicamente en campo. Así también, previo al proceso de observación se analizó cuidadosamente la planificación, recorrido y tiempo de observación. Los puntos de referencia utilizados en este proyecto están situados en las partes más altas de la zona, situándose con frecuencia en la cima de las montañas (puntos visibles entre sí, ventajoso si se utilizan métodos clásicos aunque actualmente con las técnicas GPS esta condición es prescindible).

La búsqueda de los puntos en el terreno fue en algunos casos muy costosa debido principalmente a la dificultad orográfica que presenta el trayecto, durante el ascenso,



Figura 3. A la izquierda se observan los caminos de herradura que se debía recorrer para llegar a los puntos de referencia. La imagen de la derecha se corresponde con la zona denominada Narihuiña, una zona muy montañosa, situada a una altitud de más de 3200 metros.

hasta situarse en el punto de referencia en cuestión (algunos ubicados a más de 3.500 metros de altura), y también por las condiciones meteorológicas que provocan fuertes lluvias en la mayor parte de la zona de estudio. Todos estos factores hicieron aumentar la dificultad de localizar los puntos, y transportar los equipos por las zonas montañosas, por lo que en más de una ocasión se recurrió a la ayuda de varias personas para transportarlos en los trayectos de muy larga duración por las montañas.

4.2. Materialización de los puntos pertenecientes a la Red

Una vez se tuvo claro los puntos a utilizar, y su ubicación exacta en el lugar, se procedió a la planificación, y materialización de todos aquellos puntos pertenecientes a la *Red Geodésica para el Cantón de Cuenca (Red de 2° Orden, denominada Red CAN-S, Red Geodésica Cantonal de Orden Superior)*, mediante hitos geodésicos en aquellos puntos donde se intuyó una mejor conservación y durabilidad (zonas de *ETAPA, Empresa Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado*). Se debió cumplir con algunas normas técnicas del IGM utilizadas en la materialización de la Red GPS Nacional, las cuales indican las dimensiones de las estructuras de materialización de los puntos: base en el suelo de *30x30cm, 25x25cm* en la base superior, altura sobresaliente del terreno de *20cm*, y profundidad de *60cm* para evitar el desplazamiento del punto (*Figura 4.B*). Se estableció una clasificación para los puntos primarios de la *Red Geodésica Cantonal (2° Orden, Red Geodésica Cantonal de Orden Superior; Red CAN-S)* y otra para los



Figura 4. A) En la imagen de la izquierda se aprecia la materialización de un punto de 3° Orden (Molleturo) situado en la acera. B) En la imagen de la derecha se observa un punto de 2° Orden (Yanuncay) materializado según las directrices del IGM. Cada uno de ellos lleva una serie de inscripciones grabadas que definen el tipo de punto y su clasificación.

puntos densificados a partir de esta Red y materializados en cada una de las parroquias⁵ del Cantón Cuenca (3° Orden, densificación de la de 2° Orden, y denominada *Red Geodésica Cantonal de Orden Inferior, Red CAN-I*) materializados mediante clavos. Se establecieron un par de puntos en cada zona de interés, visibles entre sí, y de fácil estacionamiento con los aparatos topográficos que se requiriera en el momento por parte de los profesionales, para que se pueda obtener un acimut de salida (si se utilizan métodos clásicos) junto con un origen. La mayoría de los puntos de tercer orden se establecieron en zonas asfaltadas (*Figura 4.A*) siempre que fuera posible, o cercanas a la acera, donde se prevé que ya no existan intervenciones urbanísticas. Los clavos con los que se han materializado los puntos son de zamak, con un imán incorporado, con el objeto de que en el futuro puedan encontrarse fácilmente incluso si están cubiertos por tierra o escombros.

4.3. Observación en campo

Se materializaron los puntos o vértices que definen la *Red GPS* en la provincia con la siguiente clasificación: para puntos de 2° Orden se denominó *Red Geodésica Cantonal de Orden Superior (Red Can-S)* y para los puntos de 3° Orden, *Red Geodésica Cantonal de Orden Inferior (Red Can-I)*. De esta forma la Red Can-S se repartió por el Cantón de Cuenca, y es la que va a servir como referencia para cualquier trabajo de densificación posterior que se realice en el territorio del Cantón. La Red de Orden Inferior está particularizada para todas las parroquias del Cantón Cuenca y materializada mediante pares de puntos visibles entre sí (parques, iglesias, instalaciones deportivas,...), para que se pueda realizar levantamientos tanto por topografía clásica como por GPS, enlazados siempre a un sistema de referencia espacial preciso y global.

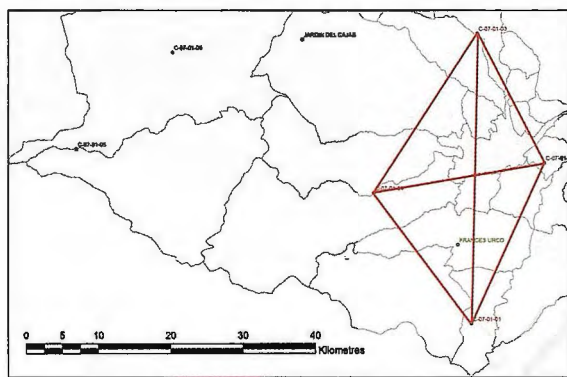


Figura 5. Se observa la distribución de los puntos de 2° Orden Cantonal. La primera sesión de observación está representada en rojo, y engloba 4 puntos pertenecientes a la nueva Red implantada, se realiza una segunda sesión con el resto de los puntos que forman la Red, de manera que está observada internamente mediante observaciones relativas entre sí. Posteriormente la Red se enlaza a los puntos de referencia pertenecientes a la Red Nacional del IGM (color verde).

4.3.1) Observación Interna de la Red Geodésica Cantonal (Red Can-S)

Las observaciones de la Red CAN-S estuvieron compuestas por 2 sesiones, en cada una de ellas intervinieron siempre 4 puntos medidos simultáneamente (obteniéndose 6 vectores), con el consiguiente ahorro de tiempo y mayor redundancia en las observaciones. Primeramente se observan todos los puntos a calcular de la Red de 2° Orden (*Figura 5*). Posteriormente se enlazó dicha Red a los puntos de referencia proporcionados por el I.G.M.

⁵Un municipio se divide en parroquias urbanas y rurales.

El equipo de trabajo en campo estuvo constituido por 5 grupos, 4 grupos se corresponden con los grupos de observadores que se colocaron en cada uno de los puntos a calcular (para obtener observaciones simultáneas), y otro grupo de control que fue supervisando, en todo momento, que el trabajo de campo saliera de acuerdo a lo planificado.

Número del punto	Nombre
C-07-01-01: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 01 =Punto 1	CUMBE
C-07-01-02: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 02 =Punto 2	PACCHA
C-07-01-03: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 03 =Punto 3	TUÑI
C-07-01-04: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 04 =Punto 4	YANUNCAY
C-07-01-05: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 05 =Punto 5	IBERIA
C-07-01-06: C=Cuenca, 07 = año 2007, 01= Red de Primer orden, 06 =Punto 6	MOLLETURO

Tabla1. Correspondencia entre el punto numerado de la Red y su toponimia.

En un principio se planificó que la duración de cada una de las sesiones debía de ser de 6 horas de observación, pero debido a la poca longitud de los vectores se justificó que con observaciones solapadas de 4 ó 5 horas era suficiente. En teoría, cuando se tienen muchos satélites, como es este caso en particular, y existe un buen PDOD (parámetro que indica la geometría de los satélites, y que influye de forma significativa en la determinación del punto de forma que cuánto mas regular sea la geometría de los satélites que intervienen en la intersección del punto mejor es el resultado), es posible obtener resultados satisfactorios en menos tiempo de observación. La correspondencia entre



Figura 6. La imagen de la izquierda se corresponde con el punto FRANCES URCO. A la derecha se aprecia el punto que esta situado en esta misma cima de la montaña y que utilizó la misión geodésica francesa para determinar el arco de meridiano y comprobar así la forma de la tierra. A los científicos franceses Bouguer, Godín y La Condamine se unieron los españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa, insignes marinos; ya en tierras ecuatorianas se unió por sus conocimientos de geografía y geodesia el científico ecuatoriano, Pedro Vicente Maldonado (los estudios duraron 9 años, posteriormente le siguió otra misión en suelo quiteño). Los sabios franceses dieron origen al sistema métrico universal.

el número de punto como está materializado en la red y su toponimia se aprecia a continuación (Tabla 1):

Generalmente las salidas a campo se producían a horas muy tempranas, para que estén todos los aparatos estacionados y listos a la hora predeterminada; en la mayoría de ocasiones se realizaron observaciones nocturnas, idóneas para obtener mejores resultados debido a que se reduce el error ionosférico.

6h00	11h00	ZHUD	F. URCO	C-07-01-02	C-07-01-03
13h00	18h00	ZHUD	F. URCO	C-07-01-02	C-07-01-03
6H00	11H00	J. DEL CAJAS	F. URCO	C-07-01-06	C-07-01-05
13h00	18h00	J. DEL CAJAS	F. URCO	C-07-01-06	C-07-01-05
6H00	11H00	J. DEL CAJAS	F. URCO	C-07-01-06	C-07-01-04
13h00	18h00	J. DEL CAJAS	F. URCO	C-07-01-06	C-07-01-04

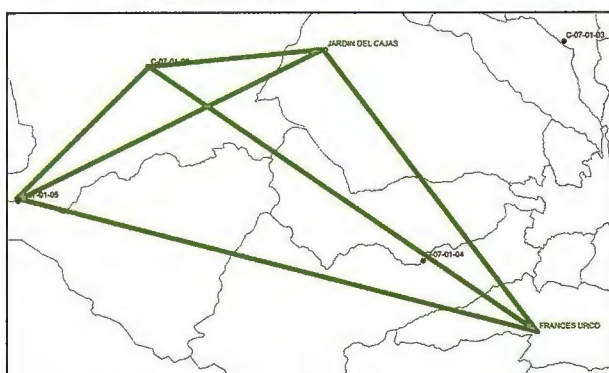


Figura 7.A) A la izquierda se aprecia los horarios y puntos observados en cada una de las sesiones realizadas. B) En la imagen de la derecha se observa como se liga la Red CAN-S a la Red GPS Nacional dos a dos. Los puntos C-07-01-05 y C-07-01-06 se corresponden con La Iberia y Molleturo que pertenecen a la Red CAN-S (puntos en rojo), y los puntos Franco Urco y Jardín del Cajas pertenecen a la Red GPS Nacional del IGM (puntos en verde).

4.3.2) Enlace de la Red Geodésica Cantonal al Sistema de Referencia SIRGAS

Una vez realizada la observación interna de la Red CAN-S se procedió a ligarla a la Red GPS Nacional (enlazada a SIRGAS) mediante los puntos de referencia del IGM, empleándose la misma metodología pero esta vez con distintos tiempos de observación. Los puntos mínimos necesarios para resolver el Ajuste de la Red Ligada son tres (Figura 6).

La observación se realiza dos a dos, tomando como referencia 2 puntos de coordenadas conocidas (puntos de referencia del I.G.M.) y otros dos puntos de la Red a calcular (Red CAN-S). Las observaciones están desglosadas en 6 sesiones repartidas en 2 días, realizadas a distintas horas, y con una duración aproximada de 5 a 6 horas cada una (Figura 7.A). Es importante resaltar que en cada sesión distinta se realizaba un cambio de aparato y operador (cada punto se observó con dos sesiones diferentes), evitándose que se repitiera las mismas condiciones, para la adquisición de los datos, en el punto (se compensa de esta manera los errores de instrumental y humanos). A la vez que se intercambiaban los puntos de referencia.

Fue de vital importancia la realización de una planificación exhaustiva, ya que todo el proceso de cálculo y resultados esperados dependen de los tiempos de observación simultánea e instrumental. Por este motivo, se debía tener en cuenta según el caso, la accesibilidad, tiempo de recorrido y demás inconvenientes debidos a factores orográficos,

como por ejemplo el recorrido para llegar al punto del Jardín del Cajas. Este recorrido implicó ir desplazándose por un viejo sendero que bordeaba las grandes montañas situadas a más de 4200 metros de altitud, y en donde se tuvieron que utilizar animales de carga y personal para trasladar los equipos. Este factor junto con el condicionante de que las observaciones se realizaron por la noche supuso el hecho de planificar toda una sesión de campo atendiendo a este punto, por la distancia a la que se encuentra de los otros, y su dificultad para estacionar en él (Fig. 8).



Figura 8A. A la izquierda, panorámica del punto origen (IGM) en el Parque Nacional Cajas. A la derecha, un operador perteneciente a UNITEs bajo Naciones Unidas que cooperó en este proyecto observando por técnicas GPS el punto, a más de 4250 metros de altitud durante todo un día y una noche.

4.3.3) Líneas bases y Ajuste Libre de la Red Geodésica Cantonal (Red Can-S). Criterios

Los resultados de un ajuste dependen del criterio a priori que se realice sobre el cálculo de las líneas bases y método de procesamiento, todo ello está relacionado con el tipo de precisión que se requiera, longitud entre puntos de observación, etc. Hay que tener en cuenta factores como el modelo troposférico, modelo ionosférica, y las efemérides precisas que influye sustancialmente sobre el resultado final si los vectores son de larga longitud. El hecho de utilizar un aparato bifrecuencia permite corregir el error que se producen en la onda a su paso por la atmósfera, que junto con la posición de los satélites (efemérides) son dos de los factores que más influyen en el resultado.

Parámetros utilizados en el cálculo de las líneas bases y Ajuste

Modelo Ionosférico; obtenido por medio de la Universidad de Benn para los días de observación en campo.

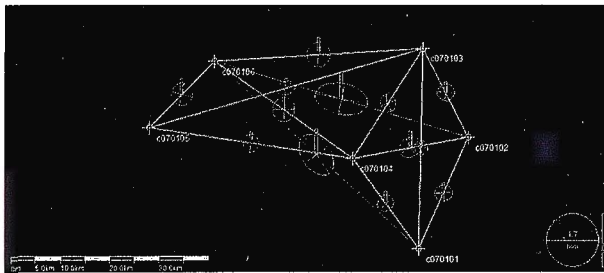


Figura 8. Se observa las líneas bases calculadas a partir de las observaciones relativas de la Red. El error relativo máximo calculado para cada uno de los vectores independientes entre sí ha sido de 1,7mm en planimetría y 7,7 mm en altimetría, lo cual refleja en una primera aproximación que los vectores están dentro de la tolerancia permitida.

Modelo Troposférico; el classical Hopfield (aunque no difiere significativamente en el resultado final la utilización de uno u otro debido a la poca dimensión de la Red).

Modelo Meteorológico; uno estándar definido por el MISS. **Efemérides precisas:** son determinaciones orbitales de alta precisión realizadas por diferentes instituciones. Para ello, emplean los datos de pseudodistancias y fase registrados por estaciones permanentes diseminadas por todo el mundo. Los ficheros con las efemérides son puestos a disposición pública a través de Internet (International GPS Service for Geodynamics (IGS)). Contienen, en intervalos de 15 minutos, la situación y el error del oscilador de cada uno de los satélites. La situación viene dada en forma de coordenadas cartesianas geocéntricas respecto al correspondiente ITRF. De esta forma se puede determinar con mayor exactitud la posición de los satélites en el momento de la observación. Se consigue obtener un mejor cálculo de los puntos en la superficie terrestre ya que la triangulación sobre el punto se realiza más exacta al estar la geometría de los satélites mejor establecida.

Se procede al cálculo de las líneas bases, a partir de las observaciones se calculan unos vectores entre puntos (Figura 8), estos vectores son conocidos como *Baselines* (líneas bases, que consiste en un par de estaciones sobre las cuales se han registrado datos GPS de forma simultánea y que se expresa como un vector de incrementos de coordenadas entre dos estaciones). En este tipo de líneas es de esperar una solución fija libre de retardo ionosférico. El ratio, que se define como el cociente de la varianza de la segunda mejor solución y la varianza de la mejor se cifra entre 1.6 a 11.6, y en este caso estamos dentro de los rangos permitidos. Cuando los valores son próximos a uno indica que apenas hay diferencia entre las varianzas de las dos mejores soluciones y por consiguiente la certeza de haber escogido estadísticamente las mejores soluciones es muy baja. A continuación se muestra un gráfico de los resultados que se han obtenido en el procesamiento de las líneas bases:



Figura 9. Gráfico del Ajuste Libre de la Red. Se observa las elipses de error en cada uno de los puntos.

El tipo de solución, el ratio y el estimador del observable de peso unidad son los parámetros básicos para analizar la calidad de la observación. En caso de existir algún problema también es conveniente analizar otros indicativos como la desviación típica de cada una de las componentes del vector resultante del cálculo, el error medio cuadrático que se determina a partir de los residuos obtenidos en cada una de las soluciones a lo largo del proceso de cálculo y la variación geométrica de la solución a lo largo del proceso. Posteriormente se realiza un *Ajuste Libre* en donde se analizan si las observaciones realizadas en campo han sido válidas o no, y si tienen las precisiones requeridas (Figura 9). Mediante la interpretación de los resultados estadísticos del *Ajuste* es posible definir la bondad del trabajo realizado en campo, es decir si la red en relativo ha sido observada correctamente. El ajuste se realiza en 3D y se seleccionan a priori unos valores que sirven como criterio para el procesamiento:

Number of GPS Baselines	60
Number of Total Station Measurements	0
Number of Control Points in National System	3
Number of Adjusted Points	9
Confidence level	1 σ
Significance Level for Tau Test	1.00 %
Standard Error of Unit Weight	1.555
Number of Iterations	2
Refraction Coefficient	0.140

Figura 10. Parámetros estadísticos obtenidos tras el Ajuste Fijo

Los resultados obtenidos tras el *Ajuste Libre* han sido totalmente satisfactorios. El máximo valor en el semieje mayor de la elipse de incertidumbre o de error no supera los 3,2 mm en planimetría, y 7,3 mm en H con un nivel de confianza del 95%. Las precisiones obtenidas oscilan de 1,6 a 1,9 mm en planimetría y de 7,9 a 17,3 mm en altimetría. El estimador de la varianza de peso unidad a posteriori con un valor de 1,578 indica que los supuestos establecidos inicialmente se asemejan a los a posteriori tras el ajuste. Se concluye que la Red ha sido observada correctamente.

4.3.4 Ajuste Fijo e Interpretación de resultados

Una vez se ha comprobado que las observaciones se han realizado correctamente se procede al cálculo del *Ajuste Fijo (Red Ligada)* con 3 puntos fijos (Frances Urco, Zhud y el Parque del Cajas). El marco de referencia utilizado en el ajuste es el ITRF, ya que los puntos fijos están enlazados a SIRGAS'95 (ITRF94), y al utilizar la efemérides precisas se obtienen unos resultados aproximados mucho más precisos ya que se dispone de unos vectores mejor orientados, por lo tanto la salida de los datos que se observan a continuación están calculados bajo SIRGAS'95 utilizando el elipsoide GRS80 (aunque en la práctica WGS84 y GRS80 se pueden considerar iguales).

El resultado de este *Ajuste Fijo* serán unas coordenadas ajustadas con unas precisiones asociadas a cada uno de los puntos y unos parámetros estadísticos (Figura 10) que nos determinan la calidad del trabajo realizado y en cierto modo nos permite analizar también la calidad de la red sobre la que se apoya.

El Error estándar de peso unidad a posteriori ha sido de 1,563 (admisible ya que se asemeja al valor 1), que indica el grado de aproximación de la precisión supuesta inicial, traduciéndose todo ello en que la precisión establecida a priori es menor de la que en realidad es. El número de

iteraciones ha sido dos, con lo que el sistema ha convergido en una solución rápidamente. Se obtienen grandes precisiones en las coordenadas tanto en planimetría como en altimetría (Figura 11 y 12). Al realizar el ajuste se introdujo el modelo Geoidal EGM96, ya que para el Ecuador no existe en la actualidad ningún modelo de Geoide, con lo que las alturas Ortométricas están referidas a este modelo geoidal.

La *desviación estándar* puede ser interpretada como una medida de incertidumbre, que al medirse de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas, es un promedio o variación esperada respecto de la media aritmética. De tal forma que *la precisión no tiene nada que ver con la calidad de la información, sino que es una medida de la exactitud con la que se realizan las mediciones*. Se observan unas precisiones en planimetría que oscilan entre 2,2 y 3,4 milímetros, y de 10,9 a 19,7 mm en altimetría, lo cual indica una gran precisión en las mediciones realizadas. Tras haber obligado a la *Red Cantonal* a ajustarse a la geometría establecida por la *Red Nacional*, mediante los puntos de referencia utilizados, es normal que aumenten los errores (Figura 13) ya que se le está obligando a encajar a una geometría preestablecida que ya de por sí arrastra unos errores.

Cada coordenada tiene asociada una elipse de error, que indica la incertidumbre en la posición del punto *tridimensionalmente*.

Sus parámetros representan aspectos de la precisión en la ubicación de un punto sobre la superficie de referencia después de realizar el ajuste mínimo cuadrático. Su semieje mayor (en módulo y orientación) es el error estándar máximo. Su semieje menor es el mínimo. Su superficie representa un determinado porcentaje de probabilidad de ubicación del punto (cercano al 37%). Si se multiplican los semiejes por el factor 2.5 la superficie de la

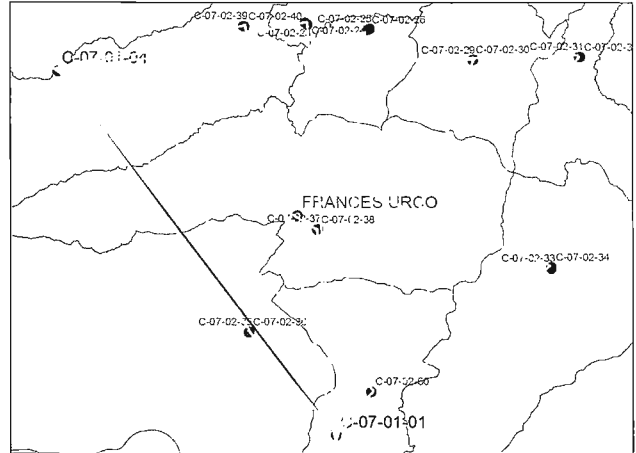


Figura 14. Observaciones de la Red efectuadas dos a dos (dos estaciones colocados en los puntos de la Red CAN-S y otros dos en la Red CAN-I) con observaciones de 45 minutos, tiempo de observación menor debido a que las distancias para enlazar estos puntos con los de la Red CAN-S son de menor longitud, y debido a la gran redundancia en las observaciones internas de la Red CAN-I.

Point	Latitude	σ	Longitude	σ	Height	Elevation	σ
FrancesUrco	S 3° 00' 27.94154"	0.0mm	W 79° 02' 35.01290"	0.0mm	2873.7760m	2851.6998m	0.0mm
Zhud	S 2° 27' 40.64953"	0.0mm	W 79° 00' 21.22869"	0.0mm	2865.7730m	2842.5346m	0.0mm
c070101	S 3° 06' 20.68522"	3.4mm	W 79° 01' 34.28814"	3.4mm	3105.9407m	3084.3800m	18.3mm
c070102	S 2° 54' 20.75733"	2.7mm	W 78° 56' 10.34294"	2.8mm	2643.1480m	2620.2867m	14.6mm
c070103	S 2° 44' 43.83237"	2.2mm	W 79° 01' 08.74245"	2.3mm	3423.0792m	3400.0886m	10.9mm
c070104	S 2° 56' 38.25969"	2.3mm	W 79° 08' 47.72812"	2.2mm	2941.3022m	2919.5458m	12.0mm
c070105	S 2° 53' 22.90921"	3.0mm	W 79° 31' 03.55741"	3.2mm	681.1858m	664.1955m	13.2mm
c070106	S 2° 46' 10.27130"	3.1mm	W 79° 23' 55.15539"	3.1mm	2571.4711m	2552.6445m	19.7mm
cajas	S 2° 45' 11.12823"	0.0mm	W 79° 14' 13.20636"	0.0mm	4232.5680m	4211.5732m	0.0mm

Figura 11. Resultado de las coordenadas geográficas obtenidas tras la compensación con sus respectivas precisiones.

Point	Northing	σ	Easting	σ	Height	Elevation	σ
FrancesUrco	9667353.9560m	0.0mm	717502.8930m	0.0mm	2873.7760m	2851.6998m	0.0mm
Zhud	9727785.8970m	0.0mm	721735.3210m	0.0mm	2865.7730m	2842.5346m	0.0mm
c070101	9656513.6180m	3.4mm	719358.4982m	3.4mm	3105.9407m	3084.3800m	18.3mm
c070102	9678613.2816m	2.7mm	729404.9538m	2.8mm	2643.1480m	2620.2867m	14.6mm
c070103	9696354.0315m	2.2mm	720217.7602m	2.3mm	3423.0792m	3400.0886m	10.9mm
c070104	9674429.8083m	2.3mm	706003.6182m	2.2mm	2941.3022m	2919.5458m	12.0mm
c070105	9680491.4752m	3.0mm	664757.9744m	3.2mm	681.1858m	664.1955m	13.2mm
c070106	9693762.2383m	3.1mm	678006.1718m	3.1mm	2571.4711m	2552.6445m	19.7mm
cajas	9695553.4930m	0.0mm	695983.6410m	0.0mm	4232.5680m	4211.5732m	0.0mm

Figura 12. Coordenadas en la proyección UTM y su desviación estándar (precisión) asociada a cada coordenada obtenida tras la compensación.

Point	Semimajor Axis	Semiminor Axis	Angle	95% confidence radius
FrancesUrco	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm
Zhud	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm
c070101	3.4mm	3.3mm	64.8°	8.3mm
c070102	2.9mm	2.6mm	67.0°	6.7mm
c070103	2.3mm	2.1mm	54.7°	5.5mm
c070104	2.3mm	2.1mm	40.3°	5.5mm
c070105	3.3mm	2.9mm	63.8°	7.6mm
c070106	3.3mm	2.9mm	43.0°	7.6mm
cajas	0.0mm	0.0mm	90.0°	0.0mm

Figura 13. Elipses de Error o Incertidumbre Absolutas. Se aprecia los semiejes mayor y menor de las elipses tridimensionales, y sus orientaciones.

elipse resultante abarca el 95% de probabilidad, y pasa a llamarse *elipse del 95% de confiabilidad*, e indica donde puede estar situado el punto con una probabilidad de acierto del 95 %. Esta zona de incertidumbre indica el posible radio de posicionamiento de cada uno de los puntos, y según los resultados obtenidos tras el ajuste puede oscilar de 5,5 mm a 8,3 mm.

Las elipses de error o incertidumbre absolutas facilitan una descripción de conjunto y detalle de la figura de errores de la red con suficiente exactitud, sin embargo, debido a la gran dependencia que tienen del *Datum* puede llegar en ocasiones a obtenerse una conclusión errónea ya que los puntos de apoyo no deben considerarse exentos de error, como se ha citado anteriormente la Red sobre la que se apoya parte de unos errores, y es matemáticamente inexacto, y si la precisión solicitada a la red es muy elevada puede resultar arriesgado no tenerlo en consideración, por lo tanto cuando la precisión de la red lo requiera se deberá de considerar que se tienen errores de partida.

La metodología que se ha seguido en todo el proceso de cálculo y ajuste se resume de la siguiente forma; primeramente se realiza un ajuste libre con los vectores procesados utilizando las efemérides radiotransmitidas para depurar observables, y se constriñe a SIRGAS con datum WGS84. Posteriormente se contrasta los resultados con los obtenidos mediante el datum ITRF (GRS80, elipsoide del ITRS), prácticamente no se observan diferencias de ningún tipo al utilizar un elipsoide u otro en redes de pequeña magnitud como es este caso. Por último se procede a realizar el ajuste con los vectores obtenidos con efemérides precisas constreñidos a SIRGAS (datum ITRF, elipsoide GRS80). La conclusión es que no se aprecian diferencias significativas en los resultados finales ni en los residuos.

Todos los resultados obtenidos junto con los parámetros estadísticos antes comentados indican que las observaciones que se han realizado en campo son correctas, y la Red ha sido ajustada y compensada satisfactoriamente en SIRGAS'95.

Tras haber implementado la Red CAN-S (Red Geodésica Cantonal de Orden Superior de Cuenca) se dispuso a densificar la Red con un total de 72 puntos añadidos, denominándose Red CAN-I (Red Geodésica Cantonal de Orden Inferior) en todas las parroquias del Cantón (Figura 14), orientado a que los profesionales en campo pudieran disponer de un Origen Cartográfico, y solucionar de esta forma el problema origen de la cartografía. Se materializaron dos puntos en aquellas zonas más céntricas de todas las zonas parroquiales pertenecientes al Cantón (parques, escuelas, instalaciones deportivas, etc.). Se siguió el mismo procedimiento de trabajo de campo antes comentado, mismo esquema de trabajo e instrumental, pero con observaciones de menos duración (45 minutos) ya que las longitudes entre los puntos a calcular eran muy cortas.

Tras realizar esta densificación con un total de 72 puntos pertenecientes a la Red CAN-I (Red Geodésica Cantonal de Orden Inferior) se dispusieron de unas normas técnicas y capacitaciones sobre como trabajar en este nuevo Sistema de Referencia Espacial (SIRGAS'95), y posteriormente paso a formar parte del Sistema de Referencia Oficial para todo el Cantón de Cuenca.

6. CONCLUSIONES.

La implantación de esta Red Geodésica Cantonal tiene mucha trascendencia en todas las competencias municipales porque permite una correcta planificación y gestión de los datos mediante la adecuada adquisición de los datos geoespaciales. El nuevo escenario es favorable no solo para las instituciones públicas sino para cualquier profesional técnico que trabaje con cartografía ya que ahora podrá comprobar el resultado de sus trabajos y dispondrá de mayor fiabilidad en sus coordenadas. Si bien el problema no se soluciona totalmente con respecto a la situación anterior, el disponer de una herramienta pública y fiable permitirá elaborar cartografía de calidad que acompañada de su buen uso dará como resultado la sinergia necesaria para que en un futuro próximo se solucionen todos los problemas cartográficos existentes.

La Red implementada está enlazada a su vez al Sistema de Referencia SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas del Sur) en el marco de referencia ITRF'94 y esto a su vez materializa el ITRS (Sistema Terrestre Internacional de la Tierra). Se accede a este sistema de referencia a través de las coordenadas del marco de referencia SIRGAS'95 (densificación del marco ITRF94 en América del Sur [SIRGAS Project Committee, 1997]). Las coordenadas se encuentran referidas a la época 1995.4.

Otra ventaja a destacar de trabajar en este sistema es que se prescinde de las Transformaciones de Datum, con los Datum Geodésicos Clásicos PSAD56, debido a que las mediciones directas de campo mediante topografía clásica y técnicas GPS se realizan en WGS84 que prácticamente es igual al GRS80 a nivel de usuario.

Los beneficios a mediano plazo son múltiples, desde ya se ha presentado la Red Geodésica Cantonal en reuniones y talleres con los diferentes actores que intervienen en el territorio cuencano e incluso la provincia. Esta primera actividad realizada en el Cantón Cuenca con el apoyo internacional, tendiente a tecnificar las actividades de adquisición de datos, ha puesto en evidencia muchas falencias en los profesionales cuencanos e incluso en sus instituciones y sin duda es el comienzo de nuevos proyectos que permitan mejorar la capacidad operativa de la localidad y el país en cuanto a describir de mejor manera el territorio. La implementación de la red geodésica en Cuenca coincide con la definición de políticas⁶ en Ecuador que buscan el fortalecimiento del ordenamiento territorial en todos los niveles, el trabajo realizado es sin duda un aporte que desde lo local tendrá incidencia a nivel nacional.

⁶ Hasta la fecha de elaboración de este documento en el Ecuador se plantea ya la institucionalización del Ordenamiento Territorial en la nueva constitución ecuatoriana, así como también se hace referencia a la necesidad de disponer de cartografía con criterios geodésicos bien establecidos (Ecuador-Asamblea Constituyente, Mesa 4 de Ordenamiento Territorial).

Referencias Bibliográficas

- Chueca, Herraes, Berné. 1997. *Tratado de Topografía III. Redes Topográficas y Locales. Microgeodesia*. Paraninfo
- Municipalidad de Cuenca, 2004. "Plan Estratégico de Cuenca 2010". Edición Municipal.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2005. "División Política Administrativa del Ecuador". Edición Municipal
- Brunet-Lebel-Leger Inc, 2007. "Estudio de Factibilidad para la Implementación del Sistema Integrado de Catastro para el Área Urbana de Cuenca". Edición Municipal.
- ETAPA, 2007. "Plan Operativo de ETAPA". Edición Municipal.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2008. "Documento Borrador del Plan de Ordenamiento Territorial- POT". Edición Municipal.

MODELO DIGITAL DEL TERRENO Y CARTOGRAFÍA DEL VOLCÁN DE COLIMA (MÉXICO) UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT Y UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

José Miguel Gaspar Soriano¹ e Ignacio Galindo Estrada²

¹ETSI Geodésica, Cartográfica y Topográfica, Universidad Politécnica de Valencia, España. ²Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente (CUICA), Universidad de Colima, México.

ABSTRACT

This paper shows the importance and repercussion that it has the joint use of satellite techniques together with Geographic Information Systems (GIS) in the study of environmental problems: An analysis is presented using a multispectral Landsat 7 image with 8 channels centered at the Colima Volcano, the main features are identified, classified and processed after its treatment and improvement obtaining a classification of the zone of study. Subsequently, using a Geographic Information System (GIS) a regional cartography is developed as well as a Digital Elevation Model (DEM). These products are remarkably improved by integrating the DEM in the Landsat image.

KEY WORDS: Colima Volcano, Cartography [Geographic Information Systems (GIS)], Landsat Image, Digital Elevation Model.

RESUMEN

Este artículo trata sobre la importancia y la repercusión que tiene el uso conjunto de las técnicas satelitales y las herramientas provistas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el estudio de problemas del medio ambiente. Se presenta un análisis utilizando una imagen Landsat multiespectral de ocho canales centrada en el Volcán de Colima, se identifican los principales rasgos, clasifican y procesan después de su tratamiento, obteniéndose una clasificación de la zona de estudio. Subsecuentemente, utilizando un Sistema de Información Geográfica, se desarrolla una cartografía y un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Estos productos se mejoran notablemente al integrar el MDE en la imagen Landsat.

PALABRAS CLAVE: Volcán de Colima, Cartografía [Sistemas de Información Geográfica (SIG)], Imagen Landsat, Modelo Digital de Elevación.

1. INTRODUCCIÓN

En cualquier zona del planeta con un alto riesgo volcánico, como ocurre en este caso en Colima (México), se justifican estudios en diversos ámbitos tendientes a conocer y mitigar el riesgo. En el presente trabajo, se han utilizado diversas técnicas de teledetección espacial, y herramientas de Sistemas de Información Geográfica conocidas como herramientas SIG (Longley et al., 2002). Es principalmente en este tipo de técnicas en las que se centra este artículo. Este tipo de estudio no aporta una información cuantitativa pero si ofrece un gran resultado visual, y con ello una

fácil interpretación del medio donde está ubicado el volcán, sirviendo así de esta manera a un apoyo en diferentes áreas de estudios, dentro del tema de Volcanología.

La recepción en el CUICA (Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente) en tiempo real de imágenes satelitales NOAA desde 1994 nos ha permitido confirmar que el Volcán de Fuego de Colima es el volcán más activo dentro de los 14 volcanes actualmente activos de México (Galindo y Domínguez, 2002, 2003). En esta región, la población está continuamente alertada por las actividades de este volcán y la gran sismicidad de la región, y con el valor añadido de la proximidad existente entre este y pueblos colindantes, donde ya en más de una ocasión han sido advertidos por el riesgo que corren, como por ejemplo la gran erupción producida en 1913 (Saucedo Girón, 1997), o el intenso temblor producido en el centro de la ciudad de Colima en Enero de 2002. De ahí la justificación de dicho estudio, ya sea con unas herramientas u otras.

Se utilizaron técnicas SIG junto con los datos proporcionados mediante Medición de Distancia con Láser, conocido con las siglas LIDAR (Light Detection and Ranging), que actualmente son una novedad para adquirir estos datos digitales de elevación, y que sirven para aplicaciones de mapas a gran escala y la creación de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), que posteriormente es posible incorporar en las imágenes satélites, para obtener así un resultado visual excelente, dando una visión lo más cierta de la superficie del terreno.

El hecho de hacer este tipo de Representaciones Tridimensionales hace posible un estudio topográfico de la zona, y consiguiente estudio del riesgo, así como una fácil interpretación en cuanto a la orientación de las pendientes, vaguadas, y posibles surcos por donde fluyen los restos volcánicos.

Los fundamentos de este trabajo son de proveer a las Autoridades de Protección Civil, representaciones digitales en gráficas tridimensionales del terreno, con las cuales se pueden tomar decisiones de protección a la población más fidedignas de la realidad.

Por todo lo anteriormente comentado, y debido al gran crecimiento de esta ciudad de Colima, tanto industrialmente como residencialmente, se hace imprescindible una mejora en los estudios del Medio Ambiente, con la aportación de Modelos Digitales Tridimensionales dotados de una gran viabilidad en el estudio de los riesgos volcánicos, debido al carácter gráfico que presentan.

Por otro lado, se utilizan también técnicas satelitales, para mejorar su interpretación visual, y proceder a realizar una clasificación de los materiales del terreno que junto con la utilización de herramientas SIG, herramienta muy potente que permite hacer estudios teniendo en cuenta multitud de variables del medio, se procede al cartografiado de los diferentes materiales que hay en el medio de una manera fácil, y con resultados gráficos muy óptimos.

En este caso, son los SIG, también conocido con las siglas GIS, y técnicas de teledetección espacial, las que aportan una ayuda al estudio del medio en el que se vive.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

Diseñar y preparar un Modelo Digital del Elevaciones en el área del Volcán de Colima.

3. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE HERRAMIENTAS SIG Y TELEDETECCIÓN ESPACIAL EN ESTE TIPO DE ESTUDIOS

Tal y como se ha comentado, el Estado de Colima está experimentando un gran desarrollo, tanto a nivel residencial, como industrial. Todos estos factores junto con la proximidad del volcán más activo del país, ha hecho que nazca una clara necesidad de un estudio del medio ambiente, siempre necesario, pero más aún cuando se presentan situaciones como esta, con algunas alertas considerables vividas en anteriores ocasiones.

Ya se sabe la importancia que tiene hacer un buen análisis previo de la zona, a la hora de definir o aproximarnos a una correcta delimitación de los riesgos naturales, para hacer un estudio detallado, ya que si no es así, las consecuencias que puede desatar la ubicación errónea de estos riesgos ambientales pueden ser irreparables. La no utilización de estas técnicas o el mal manejo de las mismas puede influir en decisiones a nivel social frente a estos riesgos naturales, acarreando consecuencias irreversibles, tanto económicas como socialmente.

Se requiere la realización de una gran cantidad de operaciones de análisis, para obtener una correcta clasificación, y conocer la fiabilidad del trabajo realizado, de esta manera, se decidió efectuar el estudio detallado de la zona colindante al Volcán de Colima con la utilización de un SIG, en el cual la imagen utilizada para dicho estudio tuvo que estar georeferenciada previamente, para poder posteriormente introducirle el MDE, y también poder hacer una clasificación correcta en la proyección adecuada.

Por otro lado, según la actual legislación sobre la construcción, es necesario hacer un estudio de impacto medioambiental para cualquier zona que se quiera urbanizar, la repercusión que dicho estudio realizado tiene en este tema, es que en parte sirve como un estudio a priori para dicha evalua-

ción de Impacto Medioambiental, y conocer de alguna forma la naturaleza del medio, aunque de forma poco rigurosa. Como nueva aplicación a partir de este ejemplo, se puede citar el estudio de nuevas ubicaciones del uso del suelo, sirviendo a su vez como apoyo en el estudio de planificación del Territorio.

4. ANÁLISIS DE LA IMAGEN SATÉLITE, CLASIFICACIÓN, Y CARTOGRAFÍA

En este punto es de vital importancia tener presente ciertos criterios geográficos, cartográficos y técnicos sobre la realización de dicha clasificación de la zona, en este caso se han tenido en cuenta la diferente respuesta espectral de cada uno de los diferentes materiales de la zona.

Los programas que se han empleado en este trabajo han sido:

ArcGis v8.3, se procede a cartografiar la cobertura referente a las clasificaciones, realización del TIN (modelo vectorial), y su integración en la imagen satelital.

Envi 3.5, con él se realiza el análisis de las regiones de interés, y su posterior clasificación. Y la mejora visual mediante técnicas de corrección y realce en la imagen.

Surfer 8.0, para la realización de modelos tridimensionales de elevaciones de la zona del Volcán de Colima, y obtención de una imagen (modelo raster) de la zona de estudio.

Cartografía de partida

La información de partida proporcionada es una imagen perteneciente al LANDSAT 7 (Fig. 1), formada por 8 bandas espectrales, donde la mayor novedad se encuentra en esta última banda perteneciente al pancromático, con una resolución de 15 mts, 30 mts en las bandas 1, 4, 5, y en las bandas 6.1, 6.2 y 7 una resolución de 60 mts, con lo que se muestra una gran ventaja en relación costo-beneficio frente a su antecesor LANDSAT 5. Se parte de una imagen que contiene información multispectral, que va desde el visible, infrarrojo medio y cercano hasta el infrarrojo térmico.

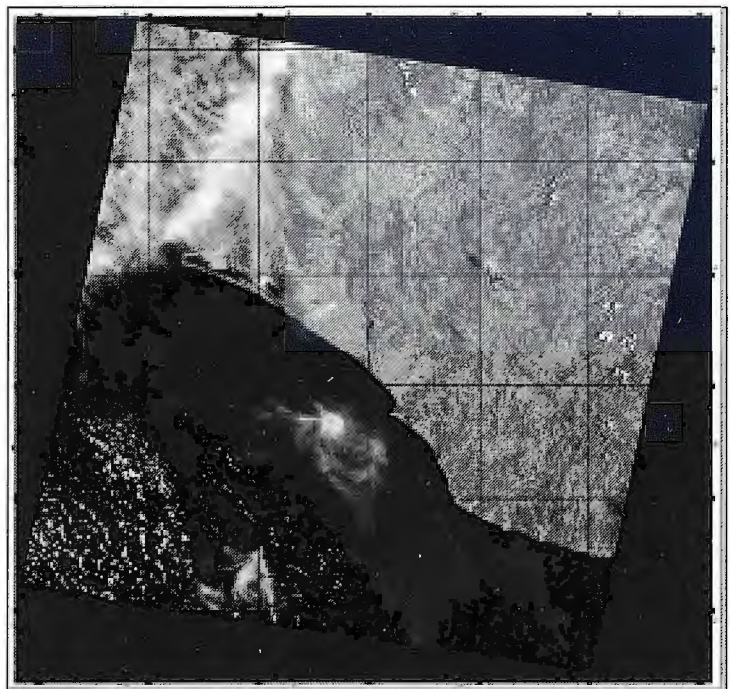


Figura 1. Imagen de la zona de estudio, obtenida por LANDSAT 7. Combinación de bandas 7, 4, 1.

Análisis efectuado

Se procede a la preparación y a una serie de correcciones a la imagen. El estudio se realiza observando si hay pérdidas de píxeles o errores de bandeado, que en ningún momento se detectaron. Posteriormente, se le aplica una corrección producida por la transmisividad atmosférica. Para ello primeramente se escoge una zona (Fig. 2) donde se sabe su respuesta espectral teórica, y se compara con la respuesta espectral obtenida por el sensor.

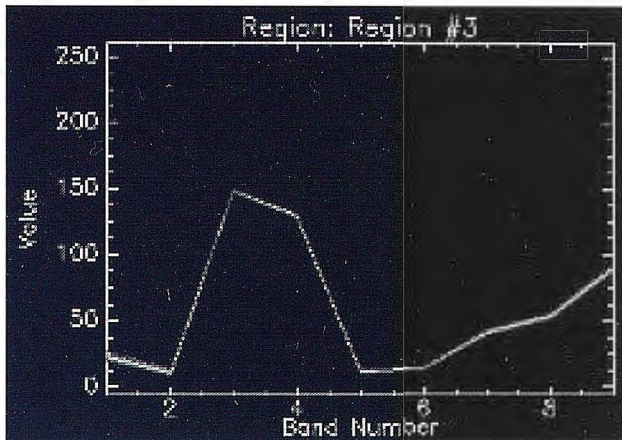


Figura 2. Gráfico de la respuesta espectral de aguas profundas en cada una de las bandas.

La diferencia entre el valor teórico y el valor obtenido es el error cometido por la dispersión atmosférica, con lo que se procede a dicha corrección. Al aplicar esta corrección, el valor obtenido en cada una de las bandas en esa superficie tiene que ser 0 (Figura 3), ya que en este caso la superficie escogida son las aguas profundas, debido a que se conoce su respuesta espectral y el valor teórico es 0.

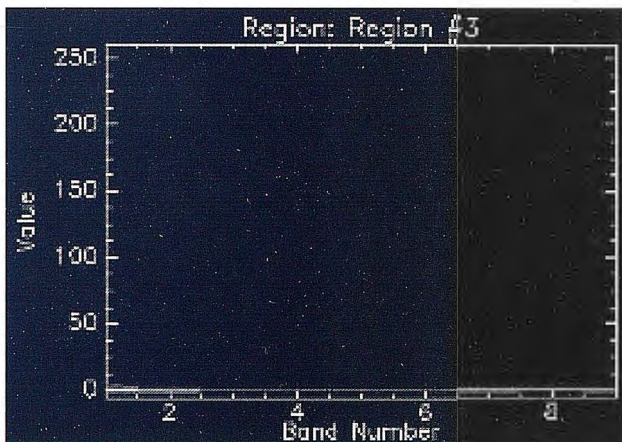


Figura 3. Gráfico donde se muestra la respuesta espectral de cada una de las bandas en zonas de aguas profundas tras haber aplicado la corrección.

Se supone que el error producido por la dispersión atmosférica afecta por igual a todas las regiones de interés, o zonas de estudio. En realidad no es así, sino que esta dispersión atmosférica afecta de forma distinta a cada una de las respuestas espectrales de las regiones de interés. Este tipo de corrección requiere de un análisis y estudio de la zona exhaustivo, y para ello es necesario saber exactamente cual es la respuesta espectral de cada una de la regiones en campo, con ayuda de radiómetros, que en este caso no se disponía de él, por este motivo, se da por válida la corrección realizada, al suponer un error constante en cada una de las zonas de estudio.

Posteriormente, se someten una serie de técnicas de realce a la imagen, para conseguir una mayor interpretación, me-

dante la aplicación de filtros (Fig. 4), estudiando así cual es el que mejor resultados ofrece para la imagen en cuestión, que en este caso es el filtro de media.

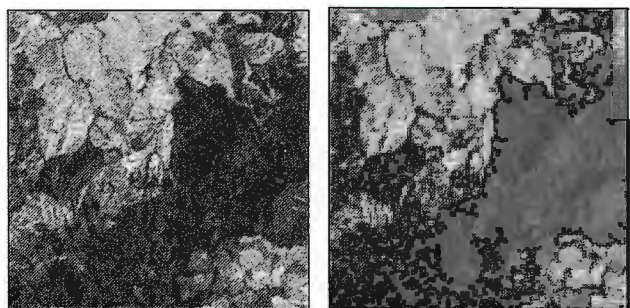


Figura 4. Imagen original e Imagen tras haber aplicado un filtro de media 3x3.

Regiones de interés y estudio estadístico

Se realiza una clasificación a grosso modo, pues las malas condiciones ambientales, que existían en el momento de la captación de la imagen por el satélite, no permitían realizarlo de otra forma, pero si al menos diferenciar, en líneas generales, los materiales más predominantes de la zona (Fig. 5). Las muestras escogidas son:

- | |
|------------------------------|
| 1. Zonas de cultivo |
| 2. Hidrografía |
| 3. Zonas de Montaña. |
| 4. Núcleo urbano. |
| 5. Zonas con gran nubosidad. |

Figura 5. Muestra de las regiones de interés escogidas para la clasificación.

Se procede a definir en la imagen una serie de regiones de interés, y mediante su respuesta espectral, se obtiene una ligera clasificación. Para ello, previamente se realizan una serie de estudios estadísticos, cuyos resultados nos establecen que regiones de interés están bien definidas y cuales no, así como el poder de discriminación entre unas y otras, pudiendo así determinar la bondad del trabajo realizado.

Para comprobar la fiabilidad de esta clasificación se procede a realizar un estudio estadístico (Fig.6), cuyos resultados son los siguientes:

	Pair Separation
Monte_Cultivo	1.52736286
Núcleo urbano_Cultivos	1.72578184
Núcleo urbano_Monte	1.86216115
Nubes_Monte	1.99945749
Hidrografía_Nubes	1.99995362
Nubes_cultivo	1.99998573
Hidrografía_Monte	1.99998617
Hidrografía_Cultivos	1.99999962
Nubes_Núcleo urbano	2.00000000
Hidrografía_Núcleo urbano	2.00000000

Figura 6. Tabla que expresa el grado que es posible discernir entre unos elementos y otros, mediante la distancia a cada una de las bandas dos a dos, de forma que cuanto mayor separación entre las bandas, mejor discriminación y con ello una mejor clasificación.

Por otro lado, existen datos estadísticos que permiten afinar más sobre los resultados obtenidos, permitiendo asegurar con que grado de aproximación se ha realizado la clasificación. Los siguientes parámetros estadísticos son: Fiabilidad global (Overall Accuracy): relación existente entre el total de píxeles de test clasificados correctamente y los píxeles totales del test.

Píxeles: 1211760 / 1258650

Porcentaje: 96.2746%

Coefficiente Kappa (Kappa Coefficient): expresa la reducción del error al aplicar la clasificación, respecto al error que se hubiera producido realizando una asignación aleatoria.

0.9372

Fiabilidad del productor (Prod. Acc.): relación existente entre los píxeles asignados a una clase y los totales realmente existentes de esa clase (probabilidad de que un píxel perteneciente a una clase dada sea clasificado correctamente).

Con estos datos que se muestran se concluye que las clases con una mayor fiabilidad en su clasificación son: hidrografía y núcleo urbano. La clase con menor fiabilidad son los cultivos.

Gracias al análisis realizado en la imagen satelital, es posible, mediante las regiones de interés estudiadas, realizar una clasificación, y con ello su representación cartográfica. Los resultados visuales a priori son:

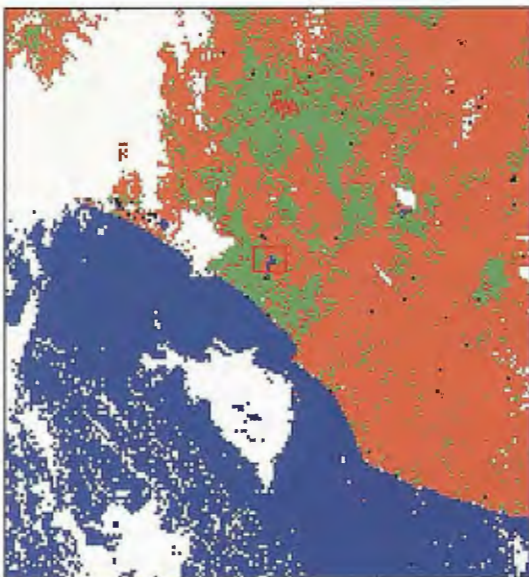


Figura 7. Imagen resultante de la clasificación supervisada.

El último paso, en este proceso de clasificación, es emplear un método llamado Class Dump (Figura 8), que permite unir todos los polígonos que tienen un mismo atributo.

Este proceso permite mejorar visualmente el aspecto de la imagen, para su posterior cartografiado.

Cartografiado

Finalmente mediante técnicas SIG se procede a cartografiar la imagen resultante después de todo el proceso de clasificación realizado. Previamente, la imagen tuvo que ser georeferenciada, con puntos de apoyo en el terreno, que posteriormente también servirá para incorporar el MDE en ella.

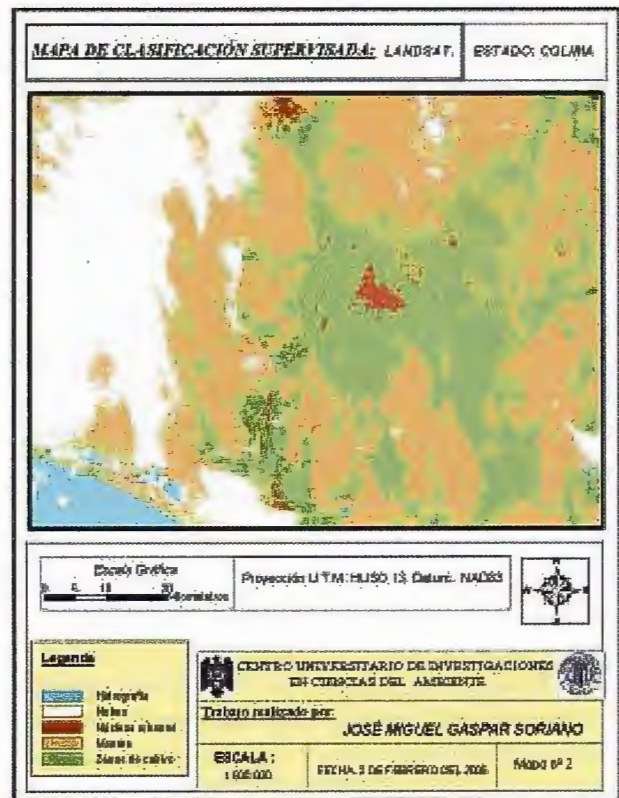
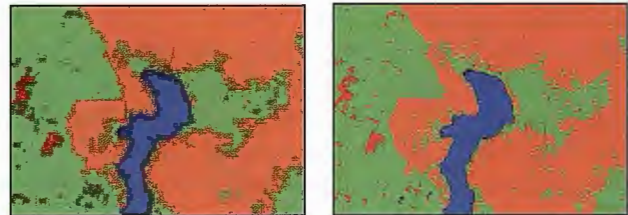


Figura 8. Diferencia entre la imagen con Clasificación Supervisada, antes y después del proceso Post Clasificación ClassDump.

Dada la cantidad de operaciones de análisis requeridas, así como de sus correcciones y técnicas para mejorar la interpretación de la imagen, y su posterior clasificación, se optó por utilizar el programa Envi 4.0, ofreciendo resultados muy satisfactorios. Para el cartografiado se utilizaron herramientas SIG con el software comercial ArcGIS de la casa ESRI. Estos programas fueron ideales, ya que son herramientas informáticas capaces de gestionar y analizar una gran cantidad de datos.

Queda demostrada la gran ventaja de este tipo de tecnología para estos estudios, así como una garantía en los resultados obtenidos, factor determinante para la realización de este trabajo.

5. CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.

Se realizaron diferentes Modelos Digitales de Elevaciones de la zona del Volcán de Colima. Para su construcción se utilizaron los datos capturados mediante LIDAR. Los sistemas LIDAR colectan datos de posición (x,y), y de elevación (z) en intervalos predefinidos. Los datos resultantes LIDAR son una red de puntos muy densa, en este caso, los datos estaban a intervalos de 5 metros.

Para modelizar la superficie es necesario acudir a métodos de interpolación, ya que no es posible medir todos los puntos de la superficie. Estos métodos de interpolación

espacial permiten calcular el valor altimétrico de toda la superficie conociendo el valor de esta variable en otras posiciones. Los interpoladores que se utilizan son locales, operan sólo dentro de una pequeña zona alrededor del punto a interpolar, de tal forma que un cambio en un dato muestral solo afecta a una pequeña zona (los valores altimétricos serán más parecidos cuanto más cerca se encuentren los elementos entre sí). Y también se les denomina exactos porque generan una superficie donde los datos muestrales coinciden con la altimetría.

Krigeado

Uno de los interpoladores utilizado es el Kriging (Longley, et al., 2002), es un método geoestadístico de interpolación, es exacto, y genera superficies suavizadas. Representar la tierra, con la variación espacial tan irregular que tiene, resulta muy difícil mediante una función matemática que genere una superficie suavizada, por este motivo crea una superficie estocástica, con valores probabilísticos.

Una de las ventajas a destacar es que genera un valor de error asociado a cada punto interpolado, y una estimación acerca de la varianza de la superficie, de modo que hay un rango de valores posibles para cada punto. El programa que se utilizó fue el Surfer 8, obteniendo una imagen raster (Fig. 10), que está formada por matrices, en las que celdillas de igual forma y tamaño representan una zona de la superficie terrestre, con valores numéricos (cotas equidistantes que se sitúan en los centros de celdillas). Desde el punto de vista de ponderación, se considera el mejor método.

Por el contrario, no permite el tratamiento de discontinuidades topográficas que supongan cambios bruscos, como rupturas de pendiente, ya que genera modelos muy suavizados.

TIN

Posteriormente, y para comprobar que modelo se ajusta más a la realidad, se procede a realizar otro Modelo Digital de Elevaciones, mediante herramientas SIG, empleando un modelo vectorial, en concreto un TIN (Triangulated Irregular Network). Esta red se define como un conjunto de triángulos irregulares adyacentes y no superpuestos.

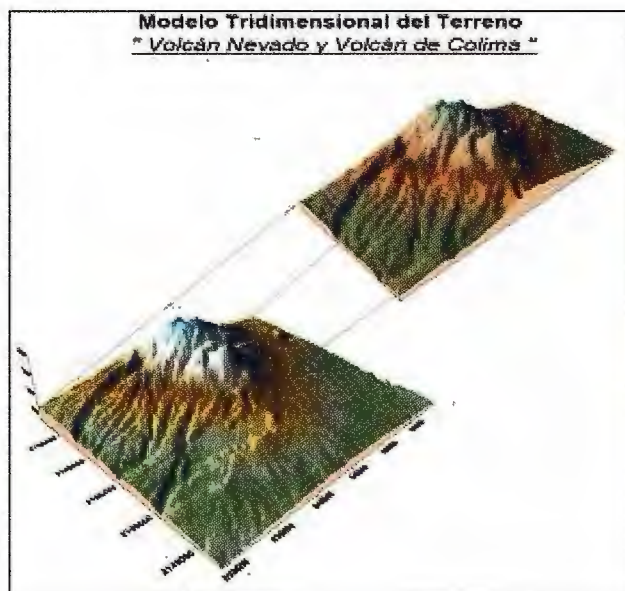


Figura 10. Modelo tridimensional del Volcán de Colima y el Volcán Nevado mediante datos LIDAR (raster).

Este plano se ajusta a tres puntos no colineales, que junto con otros planos forman un mosaico. La interpolación que se utiliza es también local, y exacta, asigna a cada punto a interpolar un valor que depende del que posean los tres puntos muestrales más cercanos. Estos puntos son los vértices del triángulo que lo contienen, respetando la altura de los puntos muestrales.



Figura 12. Imagen Grid generada a partir del TIN.

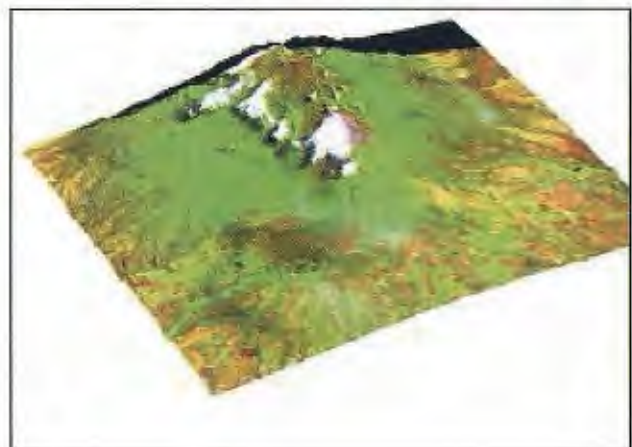


Figura 13. Integración del Modelo Digital de Elevación en la imagen LANDSAT.

Ya que son los vértices de los triángulos. Es el único que respeta la altimetría original, a diferencia del modelo raster.

Si los puntos definen bien el terreno, el TIN podrá representar de forma precisa una superficie con menos puntos que otros modelos. El software empleado ha sido el ArcGis 8.3, y el algoritmo utilizado es el de Delaunay, es el método más habitual de triangulación, debido a que sus triángulos intentan ser lo más equiláteros posibles. Son más rápido que un raster y ocupan más memoria, pero es lo más satisfactorio para superficies topográficas con fuertes discontinuidades, porque se adapta a la complejidad del terreno, conformando una red de triángulos más densa allí donde es mayor el número de puntos muestrales.

El mayor inconveniente es que no tienen en cuenta la altura de los puntos que son vértices de un mismo triángulo. Tiene en cuenta la distribución de los puntos pero no la forma de la superficie que va obteniéndose. En zonas donde los nodos tienen igual cota se crean triángulos (planos), que modifican la forma de la superficie. Una de las condiciones de este método es que se conserve la equiangularidad, al producirse este hecho, ya no se unen los triángulos planos con el resto, y se produce una falta de suavizado en estas zonas de la superficie.

Si la orografía del terreno es abrupta, como es este caso, y se disponen de puntos característicos del terreno, entonces es muy probable que este modelo sea el que más se ajuste a la realidad de la superficie sin perder precisión planimétrica en la interpolación y respetando la altimetría original.

Creación de un GRID

Se procede a transformar la imagen TIN (modelo vectorial) a un Grid (modelo raster). Se utiliza de nuevo el programa ArcGis 8.3, donde existe una opción lineal que mantiene la pendiente propia de cada uno de los triángulos. Al proceder a esta transformación se observan cambios bruscos en el paso de un triángulo a otro.

Es una forma de aprovechar las ventajas que por un lado tiene la triangulación, y por otro, la posibilidad de realizar un análisis de mallas regulares.

El problema es elegir el tamaño de celdilla de salida, problema complejo y que en general, se opta por elegir un tamaño muy pequeño de píxel. Se busca una resolución espacial que mantenga la bondad del TIN.

Destacar que no existe ningún método de interpolación mejor que otro, pues cada uno tiene un algoritmo diseñado para unas determinadas características. En función del tipo de datos de partida que se tenga, la superficie que se quiera modelizar, si es abrupta, o por el contrario suave, y la precisión requerida, se elegirá uno u otro método.

Fusión del TIN con la imagen satélite.

Por último, se fusiona el Modelo Digital de Elevación,

un TIN con la imagen LANDSAT (Figura 13) que previamente se había georeferenciado, obteniendo ahora si una visión más real del terreno que se corresponde con la zona de estudio del volcán de Colima. Se tiene la opción también de realizar un video tridimensional del vuelo sobre este modelo. El resultado obtenido ofrece un aspecto visual sorprendente, si se tiene un buen Modelo Digital de Elevaciones, y una imagen con una gran resolución tomada en condiciones atmosféricas óptimas.

6. CONCLUSIÓN.

La combinación de imágenes satélites LANDSAT, datos LIDAR de elevación del terreno, y la utilización de Sistemas de Información Geográfica permiten obtener Modelos Digitales de Elevaciones de gran precisión, y representar el terreno en 3D, junto con imágenes satélites de muy alta calidad, ofreciendo un gran potencial visual de la zona de estudio, aunque esta característica siempre dependerá de los datos de partida que se tengan. Con lo que se demuestra también la gran utilidad y validez de los datos obtenidos mediante LIDAR, cuyos datos son de gran precisión, y con un gran volumen de puntos de la zona de estudio, indispensable para crear Modelos Tridimensionales ajustados a la realidad del terreno.

La utilidad que prestan las imágenes satélites LANDSAT en cuanto a una clasificación temática del suelo, y cualquier otro tipo de estudios referentes a cultivos y materiales, teniendo siempre en cuenta el correspondiente tratamiento de la imagen, diferentes correcciones, técnicas de realce, etc.

La aplicación de los resultados obtenidos permiten una mejor interpretación gráfica de la orografía del terreno, útiles en la toma de decisiones por los cuerpos de Protección Civil para prevenir y mitigar daños a la población en casos de desastre .

Referencias.

Galindo, I., and T. Dominguez: Near real-time AVHRR surveillance of the 1997-2000 activity of Volcan de Colima (Mexico) and its relationship with seismic monitoring. *J. Volcanol. & Geothermal Res.*, 117, 91-104, 2002.

Galindo, I., and T. Dominguez: Real-time AVHRR Multispectral Thermal Monitoring and Ash Emission Detection into the Atmosphere: The Case of Colima Volcano (Mexico). In *Volcanism and the Earth's Atmosphere*, Geophys. Monograph Series, American Geophysical Union, Volume 139, 133-150, 2003.

Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D.J., and Rhind, D.W.: *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley, 454 pp., 2002.

Saucedo Girón, R.: *Reconstrucción de la Erupción de 1913 del Volcán de Colima*. Tesis doctoral, UNAM, 1997.

Márquez, J.: *Modelos digitales de elevaciones, métodos de interpolación y parámetros morfométricos del relieve*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Vol 1., 2004.

Evaluación de un Índice de Alistamiento en Infraestructuras de Datos Espaciales en Iberoamérica y el Caribe

Tatiana Delgado Fernández, Secretaría Ejecutiva de la CIDERC, GEOCUBA
 Rafael Espín Andrade, CETDIR, CUJAE
 XII Convención y Expo. Internacional

En el marco del Proyecto CYTED IDEDES “Evaluación y Potenciación de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs) para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe”, se ha desarrollado una evaluación de las condiciones que tienen 15 países representativos de la región (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Cuba, Ecuador, Guatemala, Jamaica, México, Panamá, Perú, Surinam y Uruguay) para enfrentar el desarrollo de las IDEs. Esta investigación forma parte de un estudio mayor que se viene desarrollando con apoyo del Proyecto de Holanda “Space for geoinformation” en relación a la Evaluación de IDEs a nivel mundial.

Revelar cuáles son las características y condiciones particulares de los países de Iberoamérica y el Caribe para desarrollar sus Infraestructuras de Datos Espaciales Nacionales, es el objetivo de este trabajo. Sin embargo, su alcance no es sólo diagnosticar, sino que esa evaluación comparativa será la base para proponer medidas regionales que permitan hacer avanzar aquellas iniciativas menos desarrolladas a partir de las propias potencialidades del área. Organizaciones de la región, como el Comité Permanente de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas, se han convertido en auspiciadores de este propósito por cuanto está en línea con sus propios objetivos; esto posibilita que la investigación conduzca a implementar medidas y acciones en el seno de esta organización para impulsar las iniciativas IDEs de los países de Latinoamérica y el Caribe.

Introducción

Uno de los objetivos del primer año del Proyecto CYTED 606PI0294 “Evaluación y potenciación de las Infraestructuras de Datos Espaciales para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe”, del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED, 2005), fue un diagnóstico sobre el estado actual de las IDEs en los países de la región. Uno de los estudios vinculados a esta evaluación fue en relación a la medición del Índice de Alistamiento en IDEs (Delgado, et al, 2005).

En este trabajo se aborda el método empleado para evaluar el índice de alistamiento en IDEs, basado en un modelo de lógica difusa-compensatoria. Así mismo, se exponen los resultados de esta evaluación para 15 países de la región.

Modelo de lógica difusa-compensatoria

La Lógica Difusa Compensatoria es un modelo lógico multivalente que renuncia a varios axiomas clásicos para lograr un sistema multivalente idempotente y ‘sensible’ que asimila virtudes de las escuelas descriptiva y normativa de la Toma de decisiones, pues permite la compensación de los atributos (en este caso predicados), pero si son violados ciertos umbrales hay un veto que impide la compensación. Al mismo tiempo, las propiedades que satisface hacen posible de manera natural el trabajo de traducción del lenguaje natural al de la Lógica, incluidos los

predicados extensos si éstos surgen del proceso de modelación. En esta propuesta, el operador conjunción (c) es la media geométrica, la negación, la clásica función $n(x)=1-x$ y la disyunción (d) el operador dual de la media geométrica, que garantiza el cumplimiento de las reglas de De Morgan [Espín, 2006]. La implicación con propiedades más deseables es la implicación de Zadeh generalizada ($i(x,y) = d(n(x), c(x, y))$) aunque ha sido estudiada también la implicación $i(x,y)=d(n(x),y)$.

La equivalencia es definida a partir del operador i como $e(x,y)=i(x,y)^i(y,x)$

Los cuantificadores universal y existencial son introducidos a través de las siguientes fórmulas:

$$\forall_{x \in X} p(x) = \bigwedge_{x \in X} p(x) = \sqrt[n]{\prod_{x \in X} p(x)} = \begin{cases} \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{x \in X} \ln(p(x))\right) & \text{si } x p(x) \neq 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

$$\exists_{x \in X} p(x) = \bigvee_{x \in X} p(x) = 1 - \sqrt[n]{\prod_{x \in X} (1 - p(x))} = \begin{cases} 1 - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{x \in X} \ln(1 - p(x))\right) & \text{si } x p(x) \neq 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

Para el caso de conjuntos acotados de R_n , los cuantificadores universal y existencial son definidos de manera natural desde los conceptos de conjunción y disyunción respectivamente, pasando al caso continuo a través del cálculo integral [Espín, 2006]:

$$\forall_x p(x) = \begin{cases} \frac{\int_x^1 \ln p(x) dx}{\int_x^1 \frac{1}{x} dx} & \text{si } p(x) > 0 \text{ para todo } x \in X \\ 0 & \text{En cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

$$\exists_x p(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\int_x^1 \ln(1-p(x)) dx}{\int_x^1 \frac{1}{x} dx} & \text{if } p(x) > 0 \text{ for all } x \in X \\ 1 & \text{En cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Considérese el predicado $C(j)=\forall i(I_i \rightarrow P_{ji})$ (6) donde I_i es la veracidad de que el atributo i es importante y P_{ji} expresa la veracidad de que los deseos correspondientes al atributo i son satisfechos por parte de la alternativa j . Nótese la analogía de la formulación con los planteamientos clásicos del Problema de Decisión Multicriterio; sin embargo, la forma de obtener los pesos relativos de cada atributo son aquí sustituidos por valores de verdad de afirmaciones sobre la importancia de los diferentes atributos.

Se garantiza con este modelo de decisión, la combinación efectiva de elementos intangibles valorados a través de expertos considerando escalas categoriales de veracidad; con información cuantitativa, que aporta valores de verdad a través de predicados definidos convenientemente a partir de tal información. La importancia de los predicados o atributos puede ser obtenida a su vez a través de predicados de diverso tipo, tal y como es el caso de los diversos modelos de Administración Lógica desarrollados. [Espin, 2004].

En resumen, este modelo permite tener en cuenta la importancia relativa de los atributos a través de la conjunción de expresiones condicionales (formula 6), nótese además que cada expresión condicional alcanza el valor cero solo en el caso en que la importancia relativa I_i sea 1, y el predicado del atributo correspondiente (P_{ji}) tome valor cero; o sea cuando $I_i=1$ y $P_{ji}=0$ la conjunción de la fórmula (6) alcanza el valor cero independientemente del comportamiento de los demás atributos. Esto significa que es posible el veto, y que este se produce solo si hay certeza total de que el atributo es importante y este tiene desempeños inaceptables.

Índice de Alistamiento de las IDEs

Se identificaron los factores y criterios desagregados a continuación:

- Organizativos (visión-compromiso-motivación, liderazgo institucional, acuerdos que facilitan un marco legal (paraguas));
- Información (cartografía digital disponible, conocimiento de los estándares);
- Redes de acceso y software (conectividad Web; infraestructura tecnológica, disponibilidad de software geoespacial/ desarrollo propio);
- Recursos humanos (nivel educacional, cultura de IDE, liderazgo individual);
- Recursos financieros (Fuentes gubernamentales, privadas, o iniciativas geoespaciales nacionales).

Se desarrollaron un grupo de proposiciones en lenguaje natural que modelan las condiciones de alistamiento en una IDE:

- Un país está listo para enfrentar una IDE si y sólo si tiene un nivel apropiado de organización, información, perso-

nas y recursos financieros, y algún nivel (se está modificando "atenuando" el peso de la tecnología respecto al resto del os factores) de tecnología/redes de acceso.

- Un país tiene un apropiado nivel de organización para una IDE si y sólo si tiene un apropiado nivel de visión, liderazgo institucional y marco legal.

- Un país tiene un apropiado nivel de información para una IDE si y sólo si tiene una apropiada disponibilidad de cartografía digital y en caso de que no la tuviera entonces tuviera un nivel importante de metadatos.

- Un país tiene un apropiado nivel de recursos humanos para una IDE si y sólo si tiene un apropiado nivel de capital humano medido globalmente en toda la sociedad, tiene cultura de IDE y liderazgo individual.

- Un país tiene un apropiado nivel de recursos financieros para una IDE si y sólo si tiene un apropiado nivel de financiamiento central del gobierno o del sector privado o de la recuperación de la inversión de la industria geoespacial.

- Un país tiene un apropiado nivel de red de acceso o tecnología para una IDE si y sólo si tiene un nivel apropiado de infraestructura tecnológica, de conectividad Web, y una apropiada disponibilidad de software geoespacial o desarrollo geoinformático propio o cultura de software libre.

Se aplicó una encuesta para obtener los datos primarios de los criterios de decisión a partir de una escala de 7 valores desde muy altos hasta valores muy bajos del criterio, que se codifican entre 0 y 1. La encuesta se circuló por el Comité Permanente de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas (CP IDEA) y en algunos casos se obtuvo directamente por la gestión del proyecto CYTED IDEDES. En todos los casos, respondieron las autoridades de las iniciativas de IDEs en los países estudiados o aquellas que representan a los actores que deben jugar ese rol. Se obtuvieron respuestas de 15 países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Ecuador, España, Guatemala, Jamaica, México, Panamá, Perú, Surinam y Uruguay.

La tabla 1 refleja las respuestas dadas por estos países para cada criterio de decisión y a continuación se muestra la tabla 2 que es el resultado de la aplicación del modelo de lógica compensatoria por criterios y para el Índice de Alistamiento en IDEs.

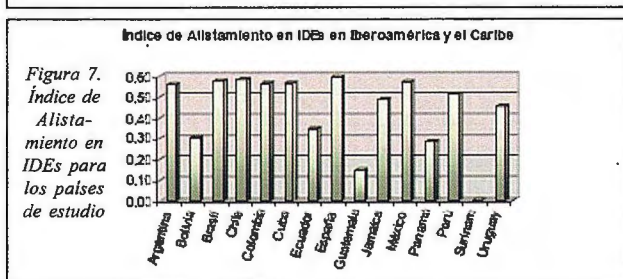
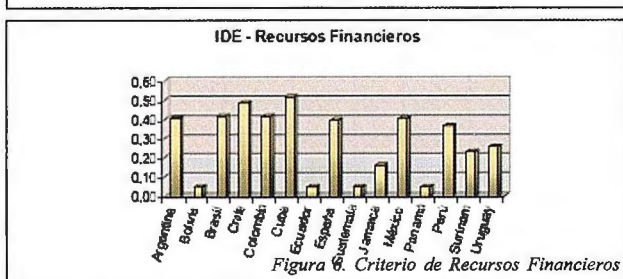
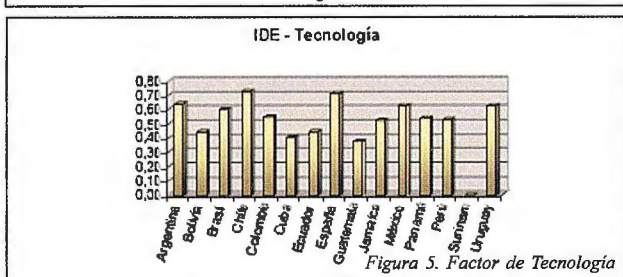
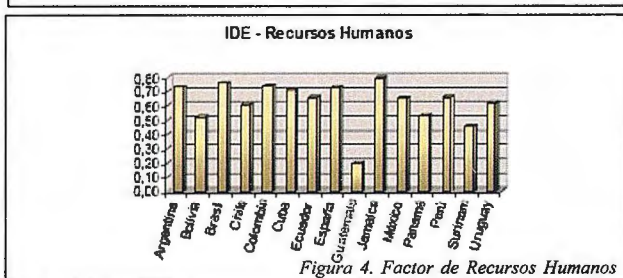
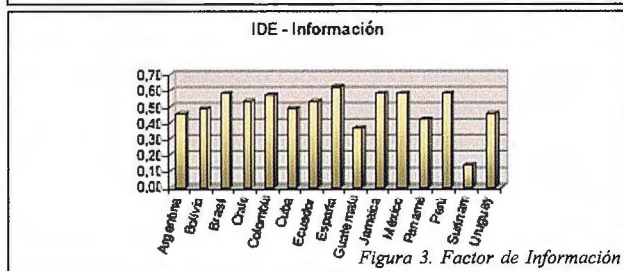
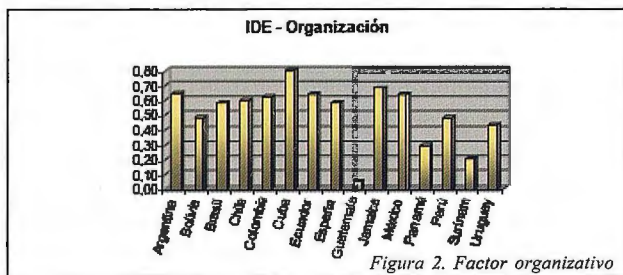
Criterio de Decisión	País	Argentina	Bolivia	Brasil	Chile	Colombia	Cuba	Ecuador	España	Guatemala	Jamaica	México	Panamá	Perú	Surinam	Uruguay
Visión de los políticos		0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,05	0,50	0,50	0,35	0,65	0,50	0,35
Liderazgo institucional		0,65	0,65	0,80	0,55	0,95	0,50	0,65	0,80	0,05	0,50	0,65	0,35	0,50	0,35	0,65
Acuerdos legales paraguas		0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,05	0,50	0,50	0,20	0,35	0,05	0,35
Disponibilidad de cartografía digital		0,50	0,65	0,80	0,65	0,65	0,65	0,65	0,80	0,35	0,50	0,50	0,50	0,50	0,20	0,50
Disponibilidad de metadatos		0,50	0,35	0,50	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,50	0,50	0,35	0,50	0,05	0,50
Capital Humano		0,92	0,80	0,83	0,90	0,85	0,90	0,87	0,97	0,52	0,79	0,54	0,66	0,67	0,90	0,92
Cultura-educación en IDEs		0,65	0,35	0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,35	0,50	0,50	0,35	0,50	0,20	0,50
Liderazgo institucional		0,65	0,50	0,80	0,50	0,95	0,50	0,65	0,80	0,25	0,50	0,65	0,50	0,65	0,50	0,50
Conectividad Web		0,62	0,36	0,58	0,84	0,36	0,17	0,18	0,43	0,32	0,38	0,81	0,34	0,41	0,00	0,36
Infraestructura de telecomunicaciones		0,19	0,06	0,17	0,28	0,12	0,05	0,09	0,41	0,04	0,13	0,13	0,10	0,11	0,12	0,24
Disponibilidad de software geoespacial		0,65	0,35	0,65	0,80	0,80	0,35	0,50	0,80	0,25	0,50	0,65	0,95	0,65	0,35	0,65
Desarrollo geoinformático propio		0,65	0,35	0,35	0,65	0,50	0,65	0,50	0,80	0,25	0,35	0,50	0,35	0,35	0,05	0,65
Cultura Opensource		0,35	0,35	0,35	0,35	0,50	0,50	0,50	0,50	0,35	0,35	0,50	0,35	0,35	0,05	0,65
Financiación central del Gobierno		0,35	0,05	0,50	0,50	0,50	0,65	0,35	0,65	0,05	0,35	0,65	0,05	0,35	0,50	0,35
Retorno de la inversión		0,50	0,05	0,50	0,65	0,50	0,65	0,65	0,20	0,05	0,05	0,35	0,05	0,50	0,05	0,20
Actividad Sector Privado		0,35	0,05	0,20	0,20	0,20	0,05	0,65	0,20	0,05	0,05	0,05	0,05	0,20	0,05	0,20

Tabla 1. Valores de los criterios en los países estudiados según resultado de encuesta.

Tabla 2. Factores e Índice de Alistamiento por países, calculados por modelo de lógica difusa-compensatoria

Factor	País	Argentina	Bolivia	Brasil	Chile	Colombia	Cuba	Ecuador	España	Guatemala	Jamaica	México	Panamá	Perú	Surinam	Uruguay
Organización		0,63	0,48	0,38	0,60	0,62	0,80	0,64	0,58	0,05	0,68	0,64	0,29	0,48	0,21	0,43
Información		0,46	0,49	0,38	0,53	0,57	0,49	0,53	0,62	0,36	0,38	0,38	0,42	0,58	0,14	0,46
Personas		0,73	0,52	0,76	0,61	0,74	0,71	0,66	0,73	0,20	0,30	0,65	0,33	0,66	0,45	0,61
Tecnologías		0,64	0,44	0,60	0,73	0,53	0,40	0,45	0,71	0,37	0,32	0,62	0,33	0,53	0,00	0,62
Recursos Financieros		0,40	0,05	0,42	0,48	0,42	0,51	0,05	0,38	0,03	0,16	0,40	0,05	0,36	0,23	0,25
Índice de Alistamiento		0,56	0,31	0,58	0,58	0,57	0,56	0,35	0,59	0,15	0,49	0,57	0,28	0,51	0,00	0,45

Las figuras 2, 3, 4, 5 y 6 muestran los valores de la tabla 2 respecto a los factores.



En la figura 7 que se muestra abajo, se puede apreciar finalmente el Índice (Compuesto) de Alistamiento en IDEs para los países de Iberoamérica y el Caribe estudiados.

Los valores obtenidos por factores que inciden en el índice de alistamiento en IDEs para cada país y su análisis regional permiten conocer las potencialidades y debilidades del área. Estas reflexiones constituyen una base para proyectar medidas y planes de acción que permitan beneficiar aquellas iniciativas menos desarrolladas, a la vez que se aprovechen las potencialidades intrínsecas de la región.

Conclusiones

Este trabajo forma parte del Proyecto CYTED IDEDES-606PI0294 "Evaluación y potenciación de las Infraestructuras de Datos Espaciales para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe" e impacta en uno de los objetivos iniciales del mismo al diagnosticar el estado de preparación de los países de la región para enfrentar IDEs Nacionales.

El modelo de Lógica Difusa Compensatoria, empleado para determinar los niveles de los factores y el propio Índice de Alistamiento, revela grandes potencialidades para evaluar y combinar factores más bien cualitativos, facilitando su expresión en lenguaje natural y su traducción al de la lógica, y permitiendo ponderar criterios.

La mayor significación del estudio llevado a cabo sobre las condiciones y niveles de preparación de los países de Iberoamérica y el Caribe para desarrollar Infraestructuras de Datos Espaciales, más allá del propio diagnóstico, radica en que puede ser usado como base para proponer medidas regionales que permitan hacer avanzar aquellas iniciativas menos desarrolladas a partir de las propias potencialidades del área.

Agradecimientos

Agradecimientos a las autoridades de IDEs en Iberoamérica y el Caribe por la información suministrada

Referencias

CYTED, 2005, Delgado, T., "Evaluación y potenciación de las IDEs para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe", Propuesta aprobada en la Convocatoria CYTED del 2005.

Crompoets, J. et al, 2004. Assessing the worldwide developments of national spatial data clearinghouses. Int. J. Geographical Information Science. Vol. 18, No. 7, October-November 2004, 665-689.

Delgado, T., 2004. Cuban Spatial Data Infrastructure (IDERC): Enterprise, Information, Computation and Engineering Perspectives. IV International Congress GEOMATICA 2004.

Delgado, T. 2005. Infraestructuras de Datos Espaciales en países de bajo desarrollo tecnológico. Implementación en Cuba. Tesis de doctorado, ITM, Comisión de Geodesia y Cartografía, 2005.

Espin, R., et al, 2004. Compensatory logic: A fuzzy approach to decision making. International Congress NAISO, Portugal, June 2004.

eTechnology Group@IMRB, 2003. E-Readiness Assessment of Central Ministries and Departments. Draft Report. India.

Giff, G & Coleman, D., 2002. Spatial Data Infrastructure Funding Models: A necessity for the success of SDI in Emerging Countries, FIG XXII International Congress, Washington D.C., USA, April 19-26, 2002.

Hyman, G, Perea, C., Rey, D., and K. Lance, 2003. Survey of the Development of National Spatial Data Infrastructures in Latin America and the Caribbean. In Proceedings of ESRI User's Conference, July 2003, San Diego, CA.

Kok, B. & van Loenen, B., 2004. How to assess the success of National Spatial Data? Infrastructures. Computers, Environment and Urban Systems. Elsevier Editor. Article in press.

UNDESA & CRG 2003. UN Global E-Government Survey 2003.

El éxito de la geodesia espacial

Gracias al Laboratorio del Nepal DMG y al GNSS, sabemos que la India converge hacia el Nepal a 35 mm/año.

Pascual Bolufer - IQS, Barcelona

RESUMEN

La red GNSS es lo mejor de que disponemos hoy día: unas 350 estaciones, de un consorcio mundial universitario, que permite una precisión milimétrica.

El servicio GNSS (Global Navigation Satellite System) se llamaba antes Internacional GPS Service. Es una Federación voluntaria de 350 agencias, que integran las señales GPS, COMPASS-China y GLONASS. Como además integrarán Galileo y otros sistemas de navegación, GNSS logra el mayor nivel de precisión.

Hay receptores GPS+GLONASS, que ofrecen la tecnología de posicionamiento por satélite G3. Es un sistema diseñado para rastrear todas las señales de posicionamiento disponibles, que define nuevas cotas de rendimiento y precisión.

China planea lanzar en 2009 tres satélites y siete más en 2010, dentro del sistema COMPASS/Beidou. En los años 2015-2020 China completará la constelación de 30-MEO y la de 5-GEO.

En cuanto a Glonass, en diciembre pasado constaba de 17 satélites. El sistema necesita 18 satélites para cubrir la Federación rusa, y 24 para lograr la cobertura mundial. Tiene proyecto de disponer de 30 satélites en 2011.

El sistema GNSS, porque integra los sistemas ya citados del GPS, Glonass, Compass y Galileo, ha creado en geodesia espacial una verdadera revolución para medir las deformaciones de la corteza terrestre con precisión milimétrica; pero además ofrece un sistema de referencia unificado a escala del planeta.

ABSTRACT

The GNSS network is the best we have today: some 350 stations, owned by a University association, that affords millimeter precision.

Former, International GPS Service, now we know as "Global Navigation Satellite System". This is a voluntary association with 350 agencies. Their work: the integration of GPS, Compass-China and Glonass observations. In the next future, the Galileo and other projected systems will increase the GNSS association, in order to get a higher precision.

The GPS+Glonass receivers offer the G3 satellite positioning. It is a system with a capacity to get the best figures of efficiency and precision.

The China program for 2009 announces 3 satellites to be launched, and 7 more in 2010, as an integration in the Compass/Beidou system. The constellation of 30-MEO and 5-GEO will be launched by China in the 2015-2020 period.

The Glonass constellation has 17 satellites (last december). The needs of the system are 18 satellites for the Russian Federation area, and 24 for the whole planet. China's purposes are 30 satellites in flight in 2011.

For spatial Geodesy is a good news the quoted systems: GPS, Glonass, Compass and Galileo. Is a giant jump that allows the measure of earth's crust deformities within the millimeter's precision.

In addition, GNSS builds a unified reference system for the whole planet.

El desarrollo de las técnicas de Geodesia Espacial es un gran éxito, a la hora de medir las deformaciones de la corteza terrestre, no solo por su precisión, sino también porque ofrece Sistemas de referencia unificados a escala planetaria, algo antes prácticamente imposible con la geodesia clásica.



Foto 1 El pico Langtang Lirung, de 7 227m, en Nepal, forma parte de la cordillera del Himalaya, zona de colisión de las placas india y euroasiática. Región muy estudiada para prevenir sismos.

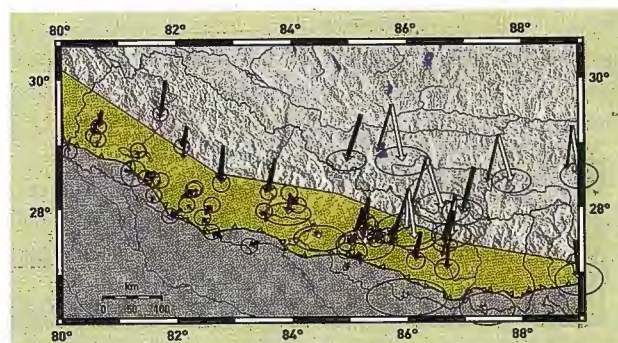
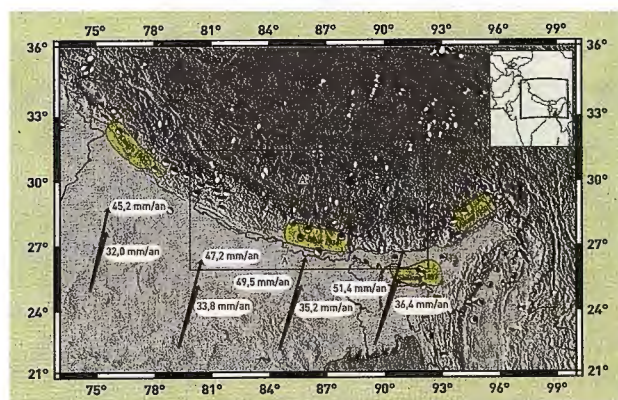


Foto 2 (Arriba) Mapa sismotectónico del Nepal, basado en dos estudios: Modelo Nuvel-1* (flechas negras), y el del DMG, del Nepal (flechas granate). En ambos trabajos la placa india se acerca a Nepal y Tibet, pero con menor velocidad según DMG (33-36 mm/año). Se acumula tensión, y la fecha del último gran sismo permite deducir aproximadamente, cuándo se producirá el próximo.

(Abajo) Ampliación del recuadro central del mapa superior. Los puntos rojos son las 3 estaciones GPS del DMG. La zona amarillo-verdosa es el MHT (Main Himalayan Thrust), la región frontera que limita la placa euroasiática.

Ambos mapas son de P. Bettinelli.

Por su relativa facilidad de uso y la disminución de costes, el sistema GPS, operativo desde 1995, es ampliamente utilizado por la comunidad científica, asociado a otras materias complementarias, como Sismología, Tectónica, Geología, Geodesia terrestre, radar interferométrico, VLBI y el sistema DORIS.

En solo 10 años, al conseguir precisiones milimétricas, el GPS se ha convertido en una herramienta indispensable,

para medir el movimiento de las placas tectónicas a gran escala, e incluso para detectar movimientos más débiles de deformación intraplaca.

Ya es posible medir la deformación de la corteza terrestre antes y después de un sismo. Por ej.: la falla de San Andrés, en California, ha sido una de las primeras en ser instrumentada. Los movimientos producidos por el sismo de Landers (1992, magnitud 7.4) han sido medidos directamente por la red de estaciones GNSS con precisión milimétrica.



Foto 3 Estación GPS permanente instalada en Nepal en 1997, a 2 150m de altitud. Foto DMG.

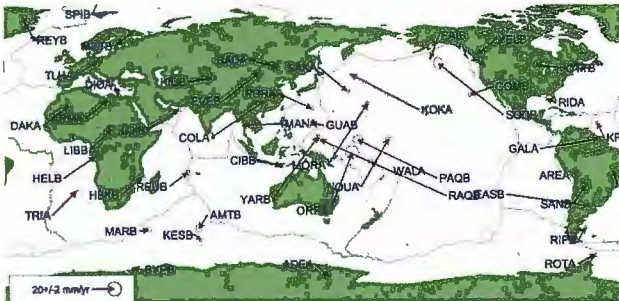


Foto 4 Mapamundi construido con DORIS. Las flechas indican la dirección del desplazamiento entre placas. El movimiento se expresa en mm/año. Placas pequeñas, como la placa ibérica no figuran. Foto Legos-CLS.

Está aumentando la densificación de estaciones permanentes en las zonas de deformación rápida, que existen generalmente en los bordes de las placas (California, Japón, Taiwán, Sumatra, Chile, México..).

Fenómenos que antes ocurrían desapercibidos, ahora son detectados. Son deformaciones transitorias, interpretadas como deslizamientos asísmicos (sismos lentos), por ej.: en Cascades, Canadá, y Guerrero, al sur de México.

Antes los desplazamientos horizontales de las placas tectónicas eran descritos por modelos establecidos únicamente a partir de observaciones geológicas y geofísicas en las fronteras de las placas. Un modelo cinemático de referencia es el NUVEL-1. Supone que las placas son rígidas y sus velocidades de desplazamiento son constantes a lo largo de 3-4 millones de años. Este modelo clásico ha permitido medir la velocidad de ensanchamiento del Atlántico: unos 2 cms/año.

Ahora disponemos de la geodesia espacial, la cual nos permite construir modelos geodésicos, que son independientes del modelo geológico.

La geodesia a gran escala se beneficia de los satélites geodésicos: la forma de la Tierra es consecuencia de su rotación, la cual causa el abultamiento ecuatorial. El geoide es la figura de la Tierra, deducida de sus accidentes topográficos, una superficie idealizada del mar, que continúa bajo las masas continentales, una esfera irregular.

El elipsoide de referencia tiene el mismo volumen que el geoide, con un radio ecuatorial mayor que el radio polar. La elipticidad física de la Tierra se puede deducir con gran precisión, al observar las perturbaciones de órbita de los satélites.

El sistema de referencia geodético de 1980 (GRS80) indica que su semi eje mayor mide 6,378,137m y el aplastamiento 1:298.257. Sirve de base al GPS para el posicionamiento geodésico.

Los receptores GPS han reemplazado casi completamente a los instrumentos terrestres, para la geodesia a gran escala.

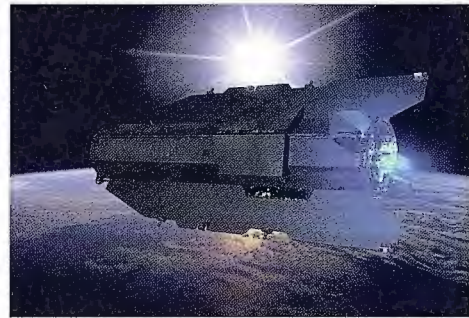


Foto 5 El satélite GOCE, lanzado el 16 de marzo pasado. Ver Mapping, septiembre 2008, pp.50-54.

Para lograr la sensibilidad de 1 mGal y determinar el geoide con una precisión de 1-2 cms., GOCE tiene una órbita casi circular, sincrónica solar, con un altitud de 250-240 kms. Se ha previsto el roce del satélite con la tenue atmósfera a tan baja altitud. Foto ESA.

Como excepción podemos mencionar todavía: Satellite Laser Ranging (SLR), Lunar Laser Ranging (LLR) e Interferometría de base muy ancha (VLBI), que todavía registran las irregularidades de la rotación terrestre y los movimientos tectónicos de placas.

El GPS geodésico

La constelación de 24 satélites GPS fue concebida por el Ejército americano, como sistema de radionavegación a escala mundial, y desde abril 1995 está disponible a la comunidad civil. Cualquiera puede conocer su posición, de día o de noche, en cualquier punto del globo e incluso desde el espacio.

Los satélites ocupan 6 planos orbitales, inclinados respecto del ecuador, a unos 20 200 kms de altitud. Su periodo de rotación terrestre es de 11h 58 min.

El sistema GPS consta de 3 segmentos: el espacial (los satélites), los receptores y el control. Este último consta de 5 estaciones de seguimiento en permanencia, las cuales transmiten sus informaciones a un centro Maestro, que recalcula las órbitas con precisión.

Cada satélite contiene relojes atómicos de rubidio o de cesio. El reloj atómico sirve para sincronizar a todos los satélites de la constelación. Los satélites emiten simultáneamente en la banda L dos frecuencias, con una longitud de onda de 19 y 24 cms, moduladas por dos códigos: el C/ A/Coarse Acquisition/ y el código P (Precise, unas 10 veces más exacto que el primer código).

El satélite emite señales de navegación referentes a elementos de órbita y parámetros del reloj.

El usuario terrestre debe colocar la antena GPS sobre un pilar anclado al suelo, perfectamente solidario de los movimientos de la corteza terrestre. El receptor ha de medir la fase de la señal y el tiempo de propagación de la señal electromagnética satélite-receptor, convertido en pseudo-

distancia. El receptor GPS para geodesia ha de contar el número de fracciones de ciclo, respecto de la señal sinusoidal (la portadora).

Hay que corregir las coordenadas iniciales, para eliminar o minimizar las desviaciones causadas por la ionosfera, troposfera, mareas terrestres y lunares, etc.

Además relacionar las coordenadas absolutas al sistema geodésico mundial. Para ello hay que integrar en el cálculo los datos de las estaciones GNSS, cuyo posicionamiento es conocido con gran exactitud.

El sistema Galileo, previsto para entrar en servicio en 2013, aportará datos mejorados. Entonces hará falta un receptor que procese los datos del Glonass, ruso, junto con los de Galileo.

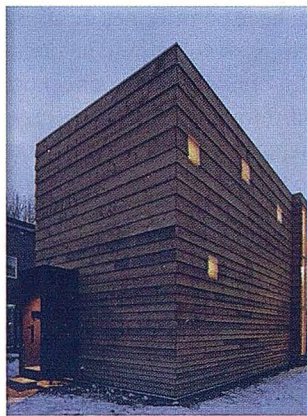


Foto 6 Casa en Sapporo ,Hokkaido ,Japón. Arquitecto Jun Igarashi. 100 m². La madera resiste bien los seísmos.

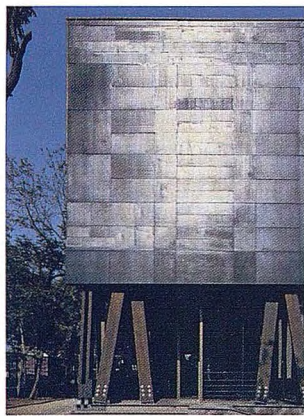


Foto7 Casa en Santiago de Chile. Arquitecto ,Alberto Mozó. Emplea madera laminada. Oficina para la Empresa de Informática Nicolás Moens de Hase.

Cada medición de distancia sitúa al receptor en una esfera, con centro en el satélite. Cuando medimos simultáneamente la distancia del receptor a 4 satélites GPS, creamos una configuración, que corresponde a un punto único en el espacio. El receptor puede en ese momento determinar su posición y además su altitud. La precisión en la medición del tiempo de propagación de la señal satélite-receptor es de 2 nseg.

El receptor de dos frecuencias GPS+Galileo será más beneficioso para el usuario que solamente un GPS con las 3 frecuencias.

La red GNSS

Es lo mejor de que disponemos hoy día: unas 350 estaciones, de un consorcio mundial universitario, que permite una precisión milimétrica.

El servicio GNSS (Global Navigation Satellite System) se llamaba antes Internacional GPS Service. Es una Federación voluntaria de 350 agencias, que integran las señales GPS, COMPASS-China y GLONASS. Como además integrarán Galileo y otros sistemas de navegación, GNSS logra el mayor nivel de precisión.

Hay receptores GPS+GLONASS, en constelación dual, que ofrecen la tecnología de posicionamiento por satélite G3. Es un sistema diseñado para rastrear todas las señales de posicionamiento disponibles, que define nuevas cotas de rendimiento y precisión.

China planea lanzar en 2009 tres satélites y siete más en 2010, dentro del sistema COMPASS/Beidou. En los años 2015-2020 China completará la constelación de 30-MEO y la de 5-GEO.

En cuanto a Glonass, en diciembre pasado constaba de 17 satélites. El sistema necesita 18 satélites para cubrir la Federación rusa, y 24 para lograr la cobertura mundial. Tiene proyecto de disponer de 30 satélites en 2011.

En EE.UU. hay propuestas para cancelar en 2010 el sistema de navegación LORAN.

Los días 18 y 19 de marzo pasado se ha celebrado Cergal 2009 en Oberpfaffenhofen, Alemania, un Simposio para simular y probar el complejo sistema GNSS.

El sistema GNSS, porque integra los sistemas ya citados del GPS, Glonass, Compass y Galileo, ha creado en geodesia espacial una verdadera revolución para medir las deformaciones de la corteza terrestre con precisión milimétrica; pero además ofrece un sistema de referencia unificado a escala del planeta.

GNSS edita "Incede GNSS", una revista con 6 ediciones al año, para ofrecer al lector sus valiosos servicios.

Incluso ha superado el amplio campo de la geodesia espacial, y permite la creación de pequeños satélites, que orbitan en formación, a una distancia controlada por el GNSS, de unos pocos metros. Por ej.:un satélite oculta al 2º satélite la fotosfera solar(provoca un eclipse), y éste último puede fotografiar la corona solar en condiciones excelentes.

Europa está desarrollando su propio GNSS, Galileo, que es una nueva constelación añadida al GPS, el cual a su vez se está modernizando. La unión de esas constelaciones producirá indudables beneficios a la precisión.

Lo último en precisión, usando una red GPS permanente de 9 estaciones,procede de un grupo de las Universidades, Purdue y Northwestern,EE.UU.Han medido el movimiento de la falla New Madrid,y han obtenido un movimiento de 0.2 mm/año.Ver: "Time-variable deformation in the New Madrid Seismic zone. Science, 2009 ,p.323(5920).

VLBI

Las medidas geodésicas VLBI (Very Long Base Interferometry) han permitido, por ej.:medir la velocidad de ensanchamiento del Atlántico, en 2 cms/año.

Recordemos que VLBI consiste en la observación de un objeto celeste, con un gran número de radiotelescopios, ubicados en distintas partes de la Tierra, trabajando como su fueran un único radiointerferómetro, gracias a un sistema de grabación que permite después procesar de forma conjunta los datos de todas las antenas participantes.

Un cuásar (Quasi Stellar radio source) fijo en la esfera celeste, de extraordinaria distancia y brillo, irradia ondas captadas por los radiotelescopios en intervalos de tiempo del orden de nanosegundos. Por un formalismo basado en la transformada de Fourier, es posible obtener imágenes de muy alta resolución del cuásar.

Desde 2007 hay consenso de que el cuásar es el núcleo activo de una galaxia joven, compacto, que presenta un alto corrimiento al rojo. El corrimiento más alto conocido de un cuásar es de 6.4 (Sloan Digital Sky Survey).

Los cuásares pueden fácilmente liberar energía a niveles iguales a la combinación de cientos de galaxias medianas. La VLBI es la base teórica en que se apoyan los ICRF (Internacional Celestial Reference Frame), para crear un marco de apoyo para las ITRF(Internacional Terrestrial Reference Frame), que a su vez crean las bases para la geodesia.

DORIS

Es un sistema francés, basado en el efecto Doppler, para determinar con precisión la posición de un satélite en su órbita, factor clave para funcionar como altímetro.

Al contrario que en el GPS, la antena Doris recibe las señales emitidas por los emisores terrestres de la red Doris. Cuando el emisor y el receptor cambian sus distancias, la onda recibida es diferente de la emitida: el efecto Doppler. Cuando el satélite se acerca al emisor terrestre, la frecuencia recibida en la antena Doris es más elevada, que la emitida, y al contrario, cuando se aleja. Si las frecuencias emitida y recibida son iguales, el emisor terrestre se halla perpendicular a la trayectoria del satélite.

La frecuencia recibida por el satélite es función del tiempo. La pendiente de la curva en el punto de máximo acercamiento (TCA: Time of Closest Approach) permite calcular la distancia entre el emisor terrestre y el satélite. La determinación exacta de la posición en la órbita no es instantánea.

Cada vez que el satélite pasa por encima del emisor, se toma la distancia. La acumulación de pasos sobre el emisor aumenta la precisión de la distancia. La precisión es de 10 cms en órbita radial para datos de hasta 3 horas, 4 cms para datos de hasta 3 días, y 2.5 cms para datos de hasta 30 días. La precisión máxima es cercana al centímetro.

El emisor terrestre se coloca sobre el punto que requiere vigilancia, por ej.: volcanes, falla geológica activa, glaciares, etc. El sistema Doris es apto para objetos fijos, o de movimiento lento. Muy útil en Geodesia.

Fue creado como altímetro, para medir la altura de la superficie marina respecto del elipsoide de referencia. Esa superficie incluye el geoide, es decir, la forma de la superficie marina, sin tener en cuenta las fuerzas perturbadoras, como mareas, vientos y corrientes.

Así se obtiene el Sistema Internacional de Referencia, las anomalías de gravedad y el Centro de gravedad de la Tierra.

Doris ha registrado el movimiento del eje polar entre 1993 y 2001, con un desplazamiento de hasta 10 m, respecto de la posición teórica. La Tierra gira de modo irregular debido a desplazamientos de masa y variaciones en su velocidad de giro.

Hace menos de un siglo Alfred Wegener propuso la teoría del desplazamiento continental. Hoy tenemos instrumentos, como Doris, que ven el movimiento de placas en la superficie terrestre, porque hay emisores Doris en los bordes de las placas. El desplazamiento oscila entre unos pocos milímetros y 15 cms por año.

Los datos Doris se procesan junto a otros datos, como los de la constelación GPS, y VLBI, creados para medir el movimiento tectónico.

La placa Ibérica y Euroasiática

Hay convergencia en los Pirineos, fruto de la colisión de las placas Ibérica y Euroasiática. Donde antes había mar, los estratos se levantaron hasta 3 000m de elevación en la cordillera pirenaica. Fue el proceso de convergencia con Europa.

El CNES francés y CEA, en la zona de los Alpes, han medido la velocidad con la red GPS, llamada RENAG (Réseau National GPS permanent), desde el año 2 000: unos 5 mm/año.

El movimiento relativo de las placas Ibérica y Africana respecto de la placa Euroasiática en el Mediterráneo occidental es 40-50% más débil que las predicciones basadas en los modelos geológicos.

La deformación del Himalaya en Nepal

El Departamento de Minas y Geología de Nepal, DMG, ha construido una red de 3 estaciones GPS, instaladas en 1997, que continúan operativas, para completar la red sísmica existente. La red ha sido completada con campañas puntuales, para lograr una mayor densidad espacial.

Gracias al DMG conocemos ahora la convergencia, cómo la India empuja hacia el Norte, con una velocidad que presenta variaciones estacionales. En el Himalaya se observan fósiles marinos, testigos del Mar de Thetis.

La India, antes cercana a África, hace 55 millones de años, se fue desplazando hacia el norte, y en su empuje ha creado la cordillera del Himalaya. La convergencia concentra energía elástica, que es liberada durante el seísmo, y crea un elevado riesgo sísmico en Nepal y al oeste, Cachemira. El Tibet (China) al norte de Nepal, se halla fuera de la convergencia.

Desde fines del siglo XIX el Nepal se ha visto sacudido por los seísmos, el de 1934 alcanzó la magnitud 8.4. Para prevenirlos Nepal estudia sismotectónica: analizar los movimientos verticales, con una estación Doris en el monte Everest, y con GPS desde 1995. El DMG ha creado recientemente una red de 20 estaciones GPS cerca de Katmandú. El DMG ha publicado las observaciones: La India se desplaza hacia el Norte 35 mm/año.

Es una convergencia menos rápida que la procedente de los modelos de tectónica de placas, que registraban una velocidad de 48 mm/año.

La deformación interna de la India es mucho menor: 1.8 mm/año.

La energía elástica, que la India concentra con la compresión, es liberada violentamente en los seísmos de gran magnitud.

El acortamiento de la zona centro-oriental de Nepal es de 19-21 mm/año. Las series de GPS muestran cambios estacionales de acortamiento. La causa probable será las variaciones de agua de la región.

La evaluación de riesgo sísmico requiere la observación de las fallas activas, en donde se acumula energía elástica. Las mediciones con GPS directas son indispensables para estudiar las deformaciones de la corteza terrestre, con el fin de evaluar el riesgo sísmico.

Nepal continúa sus observaciones, ayudado por Caltech University, americana.

Referencias

- Bendick, R. Geodetic observations of the 8 October 2005 Kashmir Earthquake. *Geology*, 35:267-270. 2006.
- Bettinelli, P. et al. Plate motion of India and interseismic strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS measurements. *Journal of Geodesy*, 80, p.567-589, 2006.
- Chalmers, M. Every second counts. *New Scientist* 7 febr. 2009.
- Flouzat, M. Mesures de déformation par GPS. *Les Mouvements tectoniques à grand échele*. Clefs CEA Hiver 2009.
- Joosting, J.-P. GPS developments. *Microwave Engineering Europe*. May 2008.
- Maarten, Sch. Engineering solutions from the Global Navigation Satellite System. *Inside GNSS*, december 2008.
- Mark, L. Laser technology helps track changes in mount St. Helens. *Science daily* 2004-1026121.
- Penel, H.-P. Quand les satellites aident le positionnement global. *Sciences et Avenir*, mai 2005.
- Snyder et al. Studying stream morphology with airborne laser elevation data. *Eos*. 2009.90.



BLOM
IMAGING THE WORLD



BLOM SERVICIOS DE GEOINGENIERIA

Medio Ambiente y Forestal
Gestión Urbana y Rural
Infraestructuras
Carreteras y Redes eléctricas
Fondos de ayuda al desarrollo
Defensa
Catastro
Telecomunicaciones



BLOM SERVICIOS DE INFORMACION

Navegación Real y LBS
Geo Búsqueda
Servicios de Emergencia
Servicios Inmobiliarios
Gobierno Local y Regional

LA IMAGEN CARTOGRAFICA DEL TERRITORIO Y SU CONSOLIDACIÓN EN EL SIGLO XIX.

HISTORICO

Mario Ruiz Morales - Universidad de Granada.

Introducción.

La Cartografía se puede definir como la rama de las Ciencias de La Tierra centrada en los estudios y operaciones de campo, artísticas y técnicas que intervienen, a partir de los resultados obtenidos por aquellos y por las medidas directas, o análisis de diversas documentaciones, en la elaboración del mapas, planos u otros medios de expresión, así como en su explotación posterior. Se trata por tanto de una ciencia multidisciplinar que afecta a un colectivo tan amplio como heterogéneo, pero con el interés común de contar con una representación adecuada de la información geográfica del territorio, sea analógica o digital. Aunque parezca obvio, conviene tener muy presente que para ello es imprescindible el conocimiento previo de la forma y dimensiones del objeto que ha de ser representado, la Tierra en general y una parte de ella en particular. Ese es precisamente uno de los principales objetivos de la Geodesia, que se convierte así en el soporte en que deberá apoyarse inequívocamente cualquier imagen territorial con una cierta fiabilidad geométrica. La materialización de tales objetivos se consigue a través del posicionamiento espacial de una serie de puntos de control repartidos por el territorio que se pretende representar, es decir con la determinación de las tres coordenadas siguientes: latitud, longitud y altitud.

Hay dos vías fundamentales para su determinación, una directa en la que intervienen las observaciones astronómicas, para las dos primeras, y físicas, para la última. El otro procedimiento es indirecto y se basa en la aplicación de las propiedades geométricas del modelo matemático terrestre más común, esto es del elipsoide de revolución con aplastamiento polar, midiendo para ello ángulos y distancias. Las dificultades inherentes al método directo, sobre todo para la longitud y la altitud, explican que hayan sido dos magnitudes muy difíciles de evaluar hasta bien entrado el siglo XIX; la longitud está indefectiblemente unida a la medida del tiempo y la altitud a la intensidad del campo gravitatorio engendrado por la Tierra.

A partir de la época en que empieza a ser incuestionable el modelo elipsoidal de la Tierra, tras el éxito de las expediciones científicas al virreinato del Perú y a Laponia, surge de manera natural el estudio de la cartografía matemática propiamente dicha, para poder contar con una imagen plana del mismo con fiabilidad suficiente, el mapa en definitiva. Se estableció para ello una correspondencia biunívoca entre las dos superficies, mediante un par de funciones de dos variables que ligaba el par curvilíneo (latitud y longitud del elipsoide) con el par cartesiano (abscisa y ordenada del plano del mapa). Otra circunstancia evidente en la

que se debe de insistir es en el hecho de que al tratarse el elipsoide terrestre de una superficie que no es desarrollable, su representación plana, esto es la imagen cartográfica del territorio, contará inevitablemente con una serie de errores que habrá que evaluar y en su caso acotar. Ello se consigue mediante el estudio comparativo de los elementos diferenciales del elipsoide y del mapa, figuras que en el primer caso están limitadas por arcos de meridiano y de paralelo, y en el segundo por las imágenes de ambos en el mapa.

Las funciones que se acaban de citar no son más que la expresión analítica de los múltiples sistemas cartográficos que logran la transformación entre las dos superficies, unos sistemas que aún conservan, generalmente, la antigua denominación de proyecciones, recordando el tiempo en predominaban en su ejecución los planteamientos geométricos sobre los analíticos. En la llamada cartografía topográfica o geodésica, la de mayor utilidad en los proyectos de ingeniería civil o militar, solo se emplean los sistemas llamados conformes, aquellos que conservan durante la transformación las formas de las figuras diferenciales en el elipsoide y en el mapa; en un lenguaje matemático más estricto serían los definidos por unas funciones de variable compleja que cumplen las ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, de Cauchy Riemann. El sistema UTM (Universal Transverse Mercator) es el de mayor difusión y empleo.

Evidentemente, la altitud queda al margen de ese proceso cartográfico, de modo que a la imagen, en el mapa, de los puntos de control, ya comentados, se le debería añadir justamente el valor que la cuantifica. Obsérvese que, todavía, el proceso de formación del mapa que se acaba de esbozar es incompleto, pues en él solo estarían representados esos últimos puntos. Habríamos conseguido un mapa en el que faltaría la práctica totalidad de la información geográfica que caracteriza a la zona a representar. En el proceso de captación de esa información, constituida por la planimetría, la altimetría y la toponimia, es en donde intervenían de manera exclusiva las técnicas topográficas, hasta que en el pasado siglo fueron paulatinamente sustituidas por las fotogramétricas y las de teledetección, sustentadas por las que son propias de la geodesia espacial, siendo la del posicionamiento global (las del GPS por ejemplo) su principal exponente.

El proceso de la formación del mapa culminaría con su dibujo, el cual solo es posible si se cuenta con una determinada simbología, una especie de lenguaje cartográfico con sus correspondientes signos convencionales. Gracias a ellos se pueden identificar con facilidad los detalles

topográficos del terreno: puntuales, lineales y superficiales. Su forma, tamaño y colorido dependerá de la naturaleza del propio detalle, de manera que los relacionados con la geografía humana, como vías de comunicación y enclaves urbanos, serán radicalmente distintos de los de tipo orográfico o hidrográfico, por citar solo dos ejemplos ciertamente significativos. La denominación de todos ellos, la toponimia, también está sujeta a una cierta clasificación, que afecta al tamaño, al tipo y hasta al color de la letra empleada. Esos signos convencionales se refieren asimismo a detalles administrativos como límites de términos municipales, provincias, comunidades autónomas, etc., o a otros como líneas eléctricas y vías pecuarias.

Aunque estas imágenes cartográficas, con soporte geodésico, tengan su origen en las directrices marcadas en la Francia del siglo XVII, no fue hasta el XIX cuando se implantan definitivamente, merced al imparable desarrollo de las redes geodésicas europeas y a la sucesiva aparición de los Organismos cartográficos de carácter estatal, con la misión fundamental de obtener de manera, más o menos inmediata, el Mapa Topográfico de sus países respectivos. El protagonismo de España en este campo fue del todo relevante, baste decir que a la medición de la base central de su red geodésica, envió la Academia de Ciencias francesa un comisionado, en vista de las expectativas que se habían despertado, ya que se iba a utilizar un instrumento que se suponía el mejor de todos los que se habían empleado hasta entonces. Pocos años después se creó el Instituto Geográfico, un acontecimiento científico de primer orden, cuyo primer Director, y fundador, Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, fue luego Presidente (casi perpetuo) de la Asociación Geodésica Internacional y principal impulsor del Sistema Métrico Decimal en el mundo. El proyecto más emblemático de dicho Centro fue el Mapa Topográfico Nacional de España, cuyas líneas maestras causaron una muy grata impresión en la comunidad científica de la época. Entonces se institucionalizó en España el empleo sistemático de las curvas de nivel, el levantamiento topográfico de todos sus núcleos de población, el deslinde jurisdiccional de todos y cada unos de los términos municipales, por citar tan solo algunos de los cometidos cartográficos fundamentales del referido Instituto.

El Legado de la Ilustración.

La extraordinaria modificación del horizonte geográfico que se produjo en el Renacimiento, y que tanto se amplió en los siglos siguientes, tuvo un reflejo inmediato en la permanente actualización de las imágenes cartográficas, las cuales daban cuenta de todos los descubrimientos que se iban realizando. Aunque la importancia de tales mapas fuera tan manifiesta, ha de subrayarse su falta de rigor científico; varias son las razones que sustentan una afirmación así de rotunda. En primer lugar la constatación de que no se acotaban los errores inherentes al hecho de que la superficie terrestre no es desarrollable, un ejemplo significativo es el de la conocida proyección cilíndrica y directa de Mercator, que revolucionó la navegación al transformar en rectas las líneas loxodrómicas o de igual acimut. En ella las deformaciones lineales son inversas al coseno de la latitud, es decir en el ecuador se conservarían las distancias al ser esta igual a cero, en cambio a una latitud de 60°

se duplicarían al pasar de la esfera al mapa; la consecuencia es inmediata, una circunferencia que tuviera en la primera un kilómetro de radio se transformaría en el segundo en otra con doble perímetro que la anterior y con una superficie cuatro veces mayor; las deformaciones en las regiones polares llegarían a ser inconmensurables, pues en el límite el coseno de la latitud se anularía y su inverso tendería a infinito. Otros dos defectos considerables de aquellos mapas eran la inadecuada evaluación de las longitudes geográficas y de las altitudes, representándose estas últimas mediante el procedimiento ancestral de los perfiles abatidos, un método tan intuitivo como inexacto. Sin embargo hay otro aspecto cualitativo de igual o mayor relevancia que los anteriores, mal se puede obtener una representación fiable de la Tierra sin saber a ciencia cierta su figura y tamaño, dos cuestiones geodésicas fundamentales que no se resolvieron adecuadamente hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XVIII.

En efecto, fue entonces cuando quedó definitivamente superada la virulenta controversia científica entre los partidarios de los dos modelos matemáticos de la Tierra, los newtonianos del elipsoide oblató y los cartesianos del elipsoide prolato, una vez concluidas las expediciones al virreinato del Perú y a Laponia, que habían sido propuestas, respectivamente, por L. Godin y P. Maupertuis a la Academia de Ciencias de París. Su consecuencia inmediata fue el final de la era esférica y el comienzo de la del elipsoide de revolución con aplastamiento positivo¹; una figura geométrica que sería a la postre el modelo a representar en el plano del mapa. El éxito de aquellas dos expediciones desencadenó otra serie de operaciones geodésicas centradas, principalmente, en las medidas de arcos de meridiano, tendentes todas a encontrar la verdadera magnitud de los parámetros elipsoidales. Podría decirse que aquellas grandes aventuras científicas terminaron con la que protagonizó el astrónomo La Caille en el Cabo de Buena Esperanza, a pesar de que su cometido principal fuera la realización de una amplia campaña de observaciones astronómicas, que le permitieron confeccionar un catálogo con más de dos mil estrellas visibles en el hemisferio Sur. El abad francés ya gozaba de un merecido prestigio cartográfico, pues había ideado un original método con el que poder hallar la longitud geográfica: en las dos estaciones cuya diferencia de longitud se pretendía determinar, se anotaba la hora marcada por el reloj cuando aparecía el resplandor producido por la deflagración de una pequeña cantidad de pólvora. Sin embargo su singular aportación al campo de la geodesia fue la comprobación de que el modelo elipsoidal de la Tierra presentaba también simetría meridional. Durante su estancia en aquellas latitudes realizó, además de la necesaria triangulación geodésica, otra medición que marcó un hito en la historia de la geodesia planetaria, pues fue entonces cuando se calculó por primera vez la distancia de la Tierra a la Luna, con una incertidumbre aceptable²; contando para ello con la imprescindible colaboración de su compatriota Lalande, desplazado a Berlín a tal efecto. Al final de sus días, La Caille, perfeccionó ese valor, teniendo en cuenta el carácter elipsoidal del planeta.

¹ El elipsoide de revolución es la figura geométrica engendrada por una elipse que gira en torno a uno de sus ejes. Si a es el semieje mayor y b el menor, se define el aplastamiento como el cociente $(a-b)/a$. Otras de las relaciones conocidas son las

llamadas excentricidades: e la primera y e' la segunda, dadas por $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$ y $(e')^2 = (a^2 - b^2)/b^2$.

2 Esa figura de la Tierra se suele definir por medio de dos parámetros: generalmente sus dos semiejes, aunque también se pueden elegir uno de ellos y una relación entre ambos, el más común es el aplastamiento. Sus dimensiones se fueron perfeccionando con el tiempo, aunque tardara más el ajuste de su achatamiento: $\alpha = (a - b) / a$.

3 La distancia entre el planeta y su satélite se calculó haciendo intervenir el concepto de paralaje diurna y resolviendo el cuadrilátero formado por el centro de la Tierra, la Luna y los dos observatorios situados en Berlín y la ciudad del Cabo, supuestas ambas capitales en el mismo meridiano.

En esa misma época se sentaron las bases de la cartografía matemática, como disciplina científica que trata del estudio y representación plana del elipsoide terrestre. El responsable fue Lambert, el cual plasmó sus investigaciones en su clásica obra "*Anmerkungen und Zusätze zur Entwerfung der Land und Himmels charten*", aparecida en el año 1772. Ciertamente, en ella se resumen los principios esenciales que deben presidir cualquier representación cartográfica rigurosa, es decir con fiabilidad geométrica debidamente contrastada: a) no deformar el territorio, respetando las dimensiones relativas, b) conservar la escala de distancias y las alineaciones y c) permitir el cálculo de coordenadas. El matemático alsaciano comentaba en su publicación, que tales exigencias no podían resultar compatibles; iniciando, por otro lado, el estudio de un método general de representación de la superficie esférica capaz de conservar los ángulos. Enunció, en resumen, el principio básico de la conformidad, al proponer que la única hipótesis de igualdad entre las relaciones de los elementos diferenciales de las figuras esféricas y las planas correspondientes es suficiente para asegurar la conservación de los ángulos en la representación plana. Tal principio lo aplicó después a la proyección cónica con meridianos rectilíneos obteniendo las expresiones analíticas y clásicas de la todavía cotidiana proyección cónica y conforme de Lambert. La metodología la generalizó a las proyecciones de meridianos circulares, la proyección de Lagrange entre ellas, y en colaboración con ese mismo matemático dedujo la expresión general de las representaciones conformes de la esfera sobre el plano, haciendo uso de la variable de Mercator⁴. En su ingente tarea cartográfica también obtuvo Lambert las expresiones que definen el desarrollo cilíndrico transverso de Mercator referido a la esfera, siendo él el primero en recomendarlo para representar territorios cuya dimensión predominante fuese latitudinal. Mención especial merecen sus tablas para obtener el desarrollo cónico de un elipsoide con un aplastamiento de 1/230.

4 La llamada variable de Mercator es una función de la latitud que simplifica notablemente las expresiones matemáticas empleadas en cartografía. Su denominación proviene de su empleo en la proyección cilíndrica y directa de Mercator. En el caso esférico es igual al logaritmo neperiano de la tangente del ángulo que se obtiene al sumarle 45° a la mitad de la latitud.

Mientras tanto continuaban practicándose las mediciones de arcos de meridiano, por entender que todavía podían contribuir al conocimiento cabal de la Tierra, incluyendo los elementos fundamentales de su campo gravitatorio, aunque no se hubiera resuelto aún el difícil problema de encontrar una medida única, de carácter universal, con la que cuantificar, precisamente, los desarrollos de los arcos medidos. Las discusiones sobre la conveniencia de encontrar ese patrón invariable desembocaron en la proposición, hecha en 1790, por la Asamblea Constituyente francesa y en la consiguiente creación de la Comi-

sión, la cual adoptó como unidad de las medidas lineales la diezmillonésima parte del cuarto de meridiano. La propuesta de la Comisión, presidida por Laplace, incluyó la inmediata medida de un arco de meridiano comprendido entre Dunkerque y Barcelona, a ambos lados del paralelo de 45° de latitud y con un desarrollo superior a los 1000 km. Quedaba pendiente la cuestión, nada baladí, del aplastamiento del elipsoide, imprescindible para saber el desarrollo del cuarto del meridiano y poder definir el metro como su diezmillonésima parte. Se compararon, para ello, los desarrollos parciales de grados obtenidos, entre esas dos ciudades, con otros previamente conocidos. La Comisión eligió, en función de sus cálculos, el valor 1/334 y, en el año 1799, definió el metro como 443.296 líneas. De acuerdo con su dictamen resultaron diez millones de metros para el cuarto del meridiano, unos dos kilómetros menos de lo que se estima en nuestros días, elemento geográfico que resultaría fundamental para la definición de la unidad más característica del Sistema Métrico Decimal.

5 El desarrollo del meridiano se halla mediante una integral definida, del grupo de las elípticas, en la que el integrando es el producto del radio de curvatura del meridiano y del diferencial de la latitud. El radio de curvatura responde a la siguiente expresión $\rho = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{-3/2}$, a es el semieje mayor del elipsoide, e es su primera excentricidad y ϕ la latitud.

6 La determinación del aplastamiento elipsoidal es teóricamente sencilla ya que el arco de meridiano es función del radio de curvatura y de la diferencia de latitudes entre sus extremos. Como quiera que el radio de curvatura depende a su vez del aplastamiento y del semieje mayor (los dos parámetros que definen el elipsoide) es obvio que ambos valores pueden obtenerse a partir de las ecuaciones planteadas con dos medidas de arco, efectuadas preferentemente en regiones alejadas. Si los arcos medidos fuesen más de dos, la solución la proporcionaría el método de los mínimos cuadrados. Igualmente se podría proceder con los arcos de paralelo aunque las dificultades prácticas de las operaciones geodésicas hicieron que fuese poco frecuente la medida de los mismos.

7 Delambre, que fue uno de los operadores responsables de la medición (junto a Méchain), lo definió en cambio como $m = 443.9271 - 27.70019\alpha + 378.6942\alpha^2$, expresado en líneas, siendo α el aplastamiento del elipsoide.

8 La línea era una medida de las denominadas anatómicas, igual a la doceava parte de la pulgada, que a su vez era la doceava parte del pie. Su equivalencia métrica no es evidente: el pie de París era de 0.3248m, en cambio el de Burgos era de 0.2786m.

Fue también en este siglo de las luces cuando la escuela cartográfica francesa alcanzó su máximo esplendor, desbancando definitivamente a la holandesa, que permanecía anclada a criterios más comerciales que científicos. La mayor fiabilidad de sus representaciones cartográficas se debió indudablemente a la proliferación de lugares identificados mediante el correspondiente par de coordenadas geográficas. Buena prueba de su desarrollo fue la imagen del relieve incluida en el mapa batimétrico del Canal de la Mancha, en el que P. Buache⁹ había dibujado los veriles con una equidistancia de diez brazas (alrededor de 16.7 metros) y que fue incluido por la Academia de Ciencias en sus memorias del año 1753. Otro plano con curvas batimétricas singular fue el de la rada de Cherbourg (1789), debido a Meusnier y a La Bretonnière. Meusnier, matemático y general de Napoleón, ya había propuesto antes (1777) en una de sus publicaciones "expresar la figura del terreno uniendo todos los puntos de igual cota con una curva". Asimismo debe destacarse el mapa de Dupain-Triel en el que aparece la totalidad de Francia con curvas de nivel y una equidistancia de diez toesas (poco más de 19 metros), siendo este uno de los primeros mapas en que se emplearon con carácter global, no obstante su trazado era todavía poco fiable habida cuenta de la gran incertidumbre con que se determinaban las altitudes. El propio autor reconocía, indirectamente, esa circunstancia al perfeccionar su método para hallar desniveles y abogar por su enseñanza

en la obra "Nuevos métodos de nivelación", publicada en 1802.

9 El título del mapa fue *Carte physique ou géographie naturelle de la France*, siendo presentado a la Academia en el año 1744. Su formato era de 39 x 50 cm y su escala de 1: 2800000. El original estaba coloreado a mano.



Batimetría del Canal de la Mancha en el mapa de Philippe Buache.

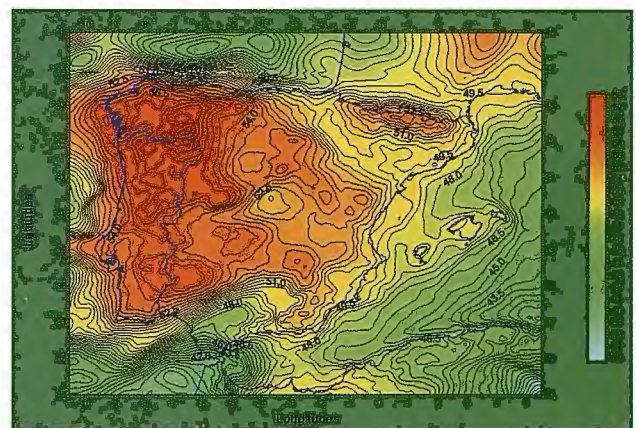
La producción cartográfica del resto de los países se vio influenciada por la francesa, así sucedió por ejemplo con los mapas ingleses, que en muchos casos eran copias más o menos evidentes de los que se habían hecho en el continente. La excepción a esa tónica la marcó A. Arrowsmith, el cual llegó a ser un experto en la teoría de las proyecciones cartográficas, aunque simultaneaba ese cometido con sus trabajos como agrimensor. Su obra más conocida fue un mapamundi, dibujado siguiendo el desarrollo cilíndrico de Mercator, en el que había incorporado las rectas "reguladas de acuerdo con las exactas observaciones astronómicas del capitán James Cook". Inglaterra fue el lugar en el que se creó el primer centro cartográfico estatal gracias a las propuestas del general W. Roy, que había participado muy activamente en el enlace astronómico y geodésico entre los Observatorios de Greenwich y París. Su informe *General Instructions for the Officers of Engineers employed in Surveying* dirigido al Duque de Richmond, en el que se resumían excelentemente las técnicas geodésico-topo-gráficas al uso, puede explicar la creación por éste, en el año 1791, del *Ordnance Survey*, con sede en la Torre de Londres, el centro contribuyó definitivamente a mejorar la reputación de los mapas ingleses. En Rusia también se dejó sentir la influencia de Francia, al emprender una importante tarea geodésica y cartográfica bajo los auspicios de la Academia de San Petersburgo, fundada en 1725 (a ella perteneció el geógrafo francés d'Anville). Aunque se concedió una especial importancia a la enseñanza de la Geodesia, tampoco se descuidó la formación de mapas. En el año 1745 se publicó el primer atlas del país bajo la dirección de L. Euler. Tanto en Alemania como en los Países Bajos se realizaron también mapas apoyados en triangulaciones locales, siguiendo las directrices que había dado en el siglo anterior el abad francés J. Picard, miembro fundador de la Academia de Ciencias.

Jorge Juan, sobre todo, y Antonio de Ulloa fueron los dos marinos que protagonizaron las ciencias geográficas de España en esta interesante época, gracias a su decisiva participación en la expedición americana que validó las tesis newtonianas. Tras su regreso a la metrópoli continuaron colaborando entre sí, no solo en la redacción de

las obras con las que dieron cuenta de sus resultados, sino también en observaciones astronómicas. Prueba de ello es el estudio de los eclipses de Luna y de Sol que realizaron desde el domicilio de Ulloa en Madrid, durante el año 1748, aunque el trabajo no tuviera el rigor de los que había efectuado este, durante su estancia en América. Su importancia histórica es incuestionable, en tanto que se llegó a incluir en una comunicación¹⁰ a la "Royal Society" de Londres, la cual iba iluminada con un dibujo de las manchas solares vislumbradas a todo lo largo de la observación, un ejemplo sobresaliente de cartografía astronómica muy poco conocido. En todo caso, lo más destacable en el presente contexto es su probable colaboración en la redacción de un documento cartográfico de excepcional valor, del que se conserva una copia en la Real Academia de la Historia, por tratarse del primer intento para lograr una representación cartográfica de España con utilidad topográfica¹¹.



Alegoría de la geografía matemática, incluida por Jorge Juan y Antonio de Ulloa en su obra *Observaciones astronómicas y físicas, hechas por orden de S.M. en los reinos del Perú* (1773).



Geoides gravimétricos de la Península Ibérica obtenidos en el año 2006, a partir del banco de datos del Instituto Geográfico Nacional, por el profesor M. J. Sevilla de Lerma (Universidad Complutense de Madrid y por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas). La equidistancia de sus curvas es centimétrica.

10 Antonio Ulloa presentó su análisis en las "Philosophical Transactions" de la Real Sociedad de Londres, con el título siguiente: « Observatio Eclipsis Solares Julii 28, 1748. Madrita Habita a Domino Antonio de Ulloa S. S: R.». El documento se tradujo al español y se publicó en la revista *Astronomía* (Vol. Julio-Agosto. 2005. pp. 83-87) bajo el epígrafe *Dos eclipses observados por Antonio de Ulloa en el año 1748*.

11 Tanto ese documento, como el proyecto presentado al marqués de la Ensenada aparecen reproducidos y comentados en "Jorge Juan y sus proyectos para un mapa de España" (Universidad de Granada & Fundación Jorge Juan. 2005)

El manuscrito consta de sesenta y siete páginas, y está claramente estructurado en tres grandes apartados: Geografía, Hidrografía y Astronomía; aunque deba de entenderse la Geografía en su sentido más genuino, es decir con un evidente contenido matemático referido a la medida y a la representación de la Tierra. En el documento se aborda, con todo lujo de detalles, un proyecto cartográfico de primer orden, pues su pretensión no es otra que la obtención de un Mapa de España verdaderamente fiable, y apoyado por tanto en una triangulación geodésica centrada en su correspondiente base. El desarrollo del proyecto detalla toda la casuística de la observación, recogiendo el tipo de información geográfica que debería ser captada. El proyecto se complementa con otros que son propios de los levantamientos hidrográficos del litoral sustentados, como los anteriores, en las necesarias observaciones astronómicas que pretendían determinar la latitud, la longitud y el acimut de ciertas direcciones, para poder así atenuar los inevitables errores inherentes a tan gran proyecto. Todo indica que Jorge Juan se debió apoyar en este manuscrito para redactar el otro proyecto que presentó al marqués de la Ensenada y que es más conocido por haber sido ya publicado en las Memorias del Depósito Hidrográfico, concretamente en la del año 1809, aunque fuese presentado al ministro en el año 1751. Tampoco es aventurado suponer que el citado manuscrito pudiera haber servido a Tofiño, gran admirador de la obra de Jorge Juan, cuando proyectase sus conocidos "Derroteros de las costas de España..."; fijando de esa forma la superficie de su territorio peninsular.

A todo lo largo del texto, de la Real Academia, se utiliza frecuentemente el vocablo Geógrafos para referirse a los miembros de las Compañías, encargados de los levantamientos geodésicos y topográficos. La elección de Jorge Juan, y probablemente de Ulloa, tiene su trascendencia, ya que además de recoger el primer sentido etimológico del término, se hace eco del pensamiento francés al respecto. No en vano se había organizado en Francia, durante el año 1726 el Cuerpo de Ingenieros Geógrafos, aunque su primer reglamento no apareciese hasta 1769, fecha próxima a la redacción definitiva de este proyecto cartográfico. Por otro lado, a él, y a Ulloa, se debió la propuesta efectuada a Ensenada para que Tomás López se trasladase a París, asegurando este último que fue allí para aprender a levantar un Mapa de España. El cartógrafo madrileño intervendría, decisivamente¹², años después, para que su buen amigo Godoy crease finalmente el efímero Cuerpo de Ingenieros Cosmógrafos, en el año 1796. Las ordenanzas correspondientes fueron firmadas por el rey Carlos IV en San Ildefonso el 19 de agosto de ese mismo año, señalándose en su introducción los principales cometidos de los nuevos ingenieros.

¹² La influencia de López sobre Godoy parece ser más que probable, a la vista de la creación por este del Gabinete Cartográfico en el año 1795, atendiendo así la

propuesta que le había formulado López con el fin de disponer de un Centro semejante al que ya existía en París y Londres.

Las misiones cartográficas solamente aparecieron reflejadas con toda nitidez en los puntos séptimo y octavo de la introducción, cuando manifestaba el rey lo siguiente:

Para que además de la ocupación del cultivo de la Astronomía tenga este Cuerpo una en que constantemente pueda emplear sus individuos con utilidad del público, es mi Real ánimo que á su cargo quede la formación de la Carta geométrica del Reyno, y de qualquiera otras particulares ó generales que destos mis dominios se hayan de formar. Lo mismo se entenderá respecto á las Cartas de mis dominios ultramarinos; por manera que al cargo de dicho Cuerpo estará el levantar y formar las Cartas geográficas, ya sea dentro del continente, ya sea fuera de él en mis dominios de América.

Paradójicamente sería el cometido cartográfico el que finalmente resultaría potenciado al reducirse sustancialmente las misiones tan ambiciosas que se les habían encomendado, una tarea que compartiría protagonismo con la exclusivamente astronómica que se desarrollaba en el Observatorio del buen Retiro y que se había integrado en la Escuela correspondiente. De hecho el primer trabajo que emprendió el nuevo Cuerpo de Ingenieros fue el levantamiento de la carta geográfica de España, un cometido al que estaba especialmente obligado por sus ordenanzas, tal como se acaba de comentar. En el año 1800 presentó Coronado, el primer director del nuevo centro, su proyecto que rápidamente pasó a su fase de ejecución, de hecho se mandaron operadores a Cataluña y a Galicia, pero desgraciadamente no se conserva documentación relativa a tales levantamientos.

La supresión de este Cuerpo de Ingenieros, claro antecedente de los actuales Ingenieros Geógrafos, se realizó a propuesta del abate Coronado, el cual la presentó a Pedro Cevallos, Ministro de Estado. Su patético escrito, ampliamente recogido por J. Tinoco en sus Apuntes para la Historia del Observatorio de Madrid, comienza glosando la importancia de los primeros resultados de la Escuela para añadir a continuación "...Pero vino la envidia, la codicia y el orgullo a plantar en medio del más bello jardín la pestifera discordia, la ciega desconfianza, y todo quedó yerto y desmayado...". Tras múltiples y pretendidas justificaciones finaliza su escrito pidiendo que se suprima el Cuerpo y se *secularice*, proponiendo por otra parte, en relación con el mapa de España, la creación en cada Intendencia de una comisión permanente, cuyos trabajos servirían para completar los que se realizasen desde otra central ubicada en el Observatorio. El caso es que el Gobierno aceptó sus proposiciones, quedando suprimido el Cuerpo por la Real Orden del 31 de agosto de 1804.

El desafío geodésico y cartográfico.

Durante el siglo XIX permanecen, en sus líneas fundamentales, los métodos del periodo anterior: triangulaciones, determinaciones astronómicas y gravimétricas, así como los asociados a la medida del tiempo; si bien se emplearon instrumentos más fiables, realizando tanto las observaciones como los cálculos consecuentes con un rigor extremo. Por otra parte, el establecimiento en Francia del

Cartografía de Calidad

Empresa certificada a la
calidad NOR ISO 9002



Avda. Hytasa, 38, Edificio Toledo, 1-4º
41006 SEVILLA
Tels.: 95 465 57 76 - 95 465 51 27 - Fax: 95 465 57 76
E-mail: invar@invarsl.com
www.invarsl.com

Sistema Métrico Decimal propició, en aquel país, una cierta complacencia al pensar que tras haber medido su meridiano central ya estaba todo suficientemente aclarado, máxime cuando hasta se había prolongado más allá de Barcelona. El desplazamiento del protagonismo francés, a favor del alemán, en estos ámbitos geodésicos y carto-ráficos fue debido, en gran parte, al matemático Bessel. Su libro *Gradmessung in Ostpreussen und ihre Verbindung*, publicado en el año 1838, marcó el inicio de una nueva época para la geodesia, por la perfección con la que se abordaban cada uno de los temas. A él se debió la definición de un nuevo elipsoide, en 1841, que llevó su nombre y tuvo una gran aceptación y uso en numerosas representaciones cartográficas; sus parámetros fueron: semieje mayor igual a 6377.397155 km y aplastamiento de 1/299.1528.

La otra figura de la geodesia alemana fue el genial C. F. Gauss, uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos y digno compañero de Arquímedes y Newton. Gauss empezó a interesarse por la teoría de las superficies cuando estaba enfrascado en sus trabajos de triangulación en el antiguo reino de Hannover, reflejo de su pensamiento fue la obra *"Disquisiciones circa generales superficies curvas"* (1827). En ella introdujo las coordenadas geodésicas sobre una superficie (u, v) en claro paralelismo con las geográficas (φ , λ), pudiendo expresar un elemento diferencial de línea por medio de su primera forma fundamental, en la que sus coeficientes eran las llamadas constantes de Gauss, E, F y G_{13} . Su método renovó el estudio geométrico de las superficies y muy particularmente el de las líneas geodésicas, además de la resolución de los triángulos sobre el elipsoide de revolución. Esta aplicación geodésica la publicó Gauss en sucesivas etapas (1843, 1847) con el título *"Untersuchungen über Gegenstände der höheren Geodäsie"* (Investigaciones sobre Temas de la Geodesia Superior), un verdadero compendio del saber geodésico de la época, en el que fue incluyendo la mayoría de sus singulares aportaciones¹⁴.

13 En el supuesto de que la superficie imagen del elipsoide de revolución, que modeliza la Tierra, fuese el plano del mapa, la relación entre las coordenadas esféricas (φ , λ) y planas (x, y), sería precisamente la expresión analítica del sistema cartográfico que lograba la transformación. En ese supuesto, si $x = f(\varphi, \lambda)$ e $y = g(\varphi, \lambda)$, la primera forma fundamental vendría dada por $(ds')^2 = E d\varphi^2 + 2F d\varphi d\lambda + G d\lambda^2$; siendo ds' la imagen del elemento de línea, ds , en el elipsoide. Las constantes E, F y G dependen de las derivadas parciales de las funciones f y g con relación a las dos coordenadas geográficas.

14 En él se indica, por ejemplo, en las triangulaciones de primer orden los triángulos sobre el elipsoide se pueden calcular como esféricos, supuestos situados sobre una esfera de radio igual a la media geométrica de los radios de curvatura principales, y correspondientes a la latitud media del triángulo en cuestión.

La aplicación de esas constantes de Gauss simplifica notablemente todo el desarrollo matemático propio de la cartografía geodésica. De forma que las características del sistema cartográfico como escala local¹⁵, convergencia de la cuadrícula¹⁶ y otras, pueden expresarse en función de tales constantes. Así por ejemplo, las condiciones de conformidad pueden formularse como $E/\rho^2 = G/N^2 \cos^2 \varphi$ y $F = 0$, dos ecuaciones en derivadas parciales, también conocidas como ecuaciones de Cauchy-Riemann, las cuales no solo son fundamentales en la Cartografía Matemática sino también en la Teoría de la variable compleja¹⁷. Este problema de la representación plana del elipsoide lo generalizó Gauss inmediatamente a dos superficies cualesquiera. Para ello introdujo la teoría de la representación conforme en una memoria que, aparecida en el año 1822, tituló *"Repre-*

sentación de una superficie dada sobre otra, de forma que resulte semejante en sus porciones más pequeñas". Paralelamente desarrolló durante esta etapa de geodesta fecundo los fundamentos del desarrollo cilíndrico transverso, considerando un cilindro elíptico, en lugar de circular, tangente a un cierto meridiano elíptico. Aplicándolo en sus trabajos, calculó las coordenadas cartesianas de los vértices que formaban sus redes de triángulos. Lamentablemente no se conserva la deducción de las fórmulas empleadas aunque sí la expresión de las mismas en sus lecciones de Geodesia Superior. Esa es la circunstancia que explica el hecho de que la proyección UTM sea también referida en ocasiones como proyección de Gauss.

15 Se llama escala local la relación entre dos elementos diferenciales lineales del mapa y del elipsoide.

16 La convergencia de la cuadrícula en un punto es el ángulo formado por la imagen, en el mapa, del meridiano y una paralela al eje de ordenadas trazada por dicho punto.

17 La interpretación geométrica de tales ecuaciones es doble: la escala local sobre el meridiano ha de ser igual que sobre el paralelo y las imágenes de ambas líneas tienen que ser perpendiculares. N, p y φ son respectivamente, el radio de curvatura del primer vertical, el radio de curvatura del meridiano y la latitud geodésica. Sus valores dependen del elipsoide elegido (a, e^2), N vale concretamente a $(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2}$.

Al igual que Newton rompió con el modelo esférico, Gauss hizo lo propio con el elipsoidal, aunque en menor medida que aquel. Efectivamente, en el año 1828, como antes había hecho Laplace (1802) y después haría Bessel (1837), cuestionó el modelo del elipsoide terrestre al no suponerlo válido cuando se pretendía lograr una gran exactitud. Es decir postuló la conveniencia de considerar otra superficie que se ajustase mejor a la forma real de la Tierra, ya que en el supuesto de no considerar las desviaciones de la vertical¹⁸ pueden surgir incertidumbres en los cálculos de los parámetros elipsoidales muy superiores a la precisión de las observaciones. A esa nueva superficie se refería Gauss cuando en su publicación "Determinación de la diferencia de latitud entre los Observatorios de Göttingen y Altona (1828)" afirmaba, *lo que llamamos la superficie de la Tierra en el sentido geométrico no es más que esa superficie que corta en todos lados la dirección de la gravedad en ángulos rectos, y parte de la cual coincide con la superficie de los océanos*. La primera y quizás más clara y sucinta definición del geoide, una palabra que como es sabido acuñaría años después (1873) J. B. Listing, uno de sus alumnos; el cual, junto a Fischer y Bruns, inició las teorías sobre la ondulación del geoide¹⁹, fijando entre 800 m y 1 km la separación máxima entre él y el elipsoide.

18 La desviación de la vertical es el ángulo que formaría en un punto dado la normal al elipsoide con la línea de la plomada, o vertical física; su máximo valor se estima en unos treinta segundos sexagesimales.

19 Se le llama ondulación del geoide a la separación existente entre él y un cierto elipsoide, puede ser positiva y negativa, actualmente se admite que su amplitud máxima es del orden de los 100 metros. Las denominadas cartas del geoide lo representan precisamente superpuesto sobre una imagen cartográfica del elipsoide elegido como referencia, uniendo mediante curvas de nivel todos los puntos en los que coincide la ondulación (siendo opcional el empleo de tintas hipsométricas).

La superficie así definida, equipotencial en nuestro campo gravitatorio, deberá coincidir pues con la superficie de los océanos, una vez eliminada la influencia de las mareas, de los vientos y corrientes marítimas, y supuesta uniforme la densidad de sus aguas. Si bien en los mares coincide sensiblemente con su superficie, en las zonas continentales adopta formas con inflexiones muy variables, de manera que su expresión matemática es sumamente complicada aunque teóricamente pueda obtenerse por su condición

de superficie equipotencial. Eso hizo que se prescindiera en un principio del geoide como superficie de referencia, tomando otra más asequible al cálculo aunque en ese supuesto hubiera que contar con las desviaciones de la vertical. Aunque el problema no se solucionaría hasta el siglo siguiente, gracias los trabajos de Helmert y Hayford, se entró a partir de entonces sino en la era del geoide, si en la nueva era del geoide-elipsoide, en tanto que es sobre esa última superficie matemática sobre la que se representará el geoide como la superficie física que es.

Una vez conocidas las peculiaridades geométricas y físicas de los dos modelos de la Tierra: elipsoide de revolución y geoide, ya se podía proceder a la representación cartográfica y rigurosa de una parte de la misma, con las suficientes garantías²⁰. En el proceso de la formación del mapa hay dos etapas bien diferenciadas y complementarias, en primer lugar se transforma el elipsoide de revolución en una superficie plana haciendo uso de un determinado sistema cartográfico, conforme si se pretende que tenga aplicabilidad geodésica, y se evalúan los errores asociados al proceso para acotarlos; lo que se traduce en una cierta limitación del campo de la representación, dicho de otro modo, un mapamundi no es una imagen cartográfica con utilidad geodésica o topográfica. Se llegaría así a la imagen planimétrica del terreno, pudiéndose localizar sus puntos indistintamente, por el par de coordenadas cartesianas o por sus homólogas geográficas. Evidentemente se lograría el posicionamiento completo, planimetría y altimetría, añadiendo al punto que figura en el mapa, la altitud real que sitúa a su homólogo con relación al geoide; es decir el modelo físico de la Tierra no está involucrado en el proceso de transformación cartográfica y la altitud se conserva sin alteración alguna. Para todo ello se contaba con la experiencia previa de los Ingenieros Geógrafos franceses que se habían encargado de hacer el Mapa de Francia, apoyándose en una red geodésica diseñada de acuerdo con las pautas impuestas por Picard, a saber: proyectando cadenas de triángulos a lo largo de los meridianos y de los paralelos. Las enseñanzas de Bessel y de Gauss también fueron determinantes a la hora de adquirir el compromiso cartográfico necesario para obtener las imágenes cartográficas del territorio. No obstante, quedaban sin resolver satisfactoriamente dos cuestiones de gran relevancia, relacionadas con la longitud y con la latitud, y que incidían directamente sobre la calidad final del mapa; a ellas nos referiremos a continuación.

²⁰ No obstante, conviene hacer algunas matizaciones. Todos los viajes del siglo anterior hicieron posible que hacia el año 1800 fuesen fiables, en términos globales, las representaciones cartográficas de la Tierra, con la salvedad de las regiones polares. De forma tal que pudieron finalmente solventarse las equivocaciones que sistemáticamente venían figurando en los mapas. Entre ellas caben destacarse dos ejemplos importantes, por un lado California, representada durante tanto tiempo como isla aunque los padres Salvatierra (1697) y Kino (1700) habían confirmado su peninsularidad, Delisle ya la representaba como una península a comienzos de siglo (siguiendo ejemplos anteriores) aunque en otros mapas posteriores aún figurase como isla. Otro error considerable que quedó sin sentido fue la existencia del mítico estrecho de Anian representado en numerosos mapas sin tener una información real del mismo, lo sorprendente del caso es que su imaginario emplazamiento vino a coincidir con el que cruzó el danés V. J. Bering en el año 1728, ochenta años después de que lo hiciese al parecer el ruso S. Dezhnev.

Aproximación histórica al problema de la longitud.

La longitud, al contrario que la latitud, ha sido a lo largo del tiempo la coordenada geográfica cuyo cálculo resultaba más complicado, hasta el punto de que solo se pudo conocer con la exactitud debida en la segunda mitad del

siglo XIX. El problema de su determinación, o el problema de "echar el punto" como se decía siglos atrás, al hacerlo en el mar, mediatizó toda la producción cartográfica y la propia historia, pues no debe de olvidarse que esa circunstancia propició el descubrimiento del nuevo mundo. Para entender mejor las dificultades, ha de recordarse necesariamente su definición y su estrecha relación con los elementos geométricos de la esfera celeste. La diferencia de longitudes geográficas entre dos puntos dados es la medida del diedro formado por los meridianos de ambos, siendo el meridiano de cada punto el plano formado por el eje del mundo y el propio punto. Esos planos, que cortan al elipsoide de revolución, según las elipses meridianas, coinciden con otros de la esfera celeste, esto es la esfera hipotética sobre la que se proyectan todas las estrellas, justamente con los círculos horarios de las mismas ó planos formados por el citado eje y una estrella dada.

El nombre de círculo horario se corresponde con el del ángulo horario de la estrella, medida del diedro formado por el meridiano del lugar y el citado círculo de una cierta estrella. El apelativo horario hace especial mención al tiempo astronómico, concretamente podría definirse la hora como el ángulo horario ó en función del mismo, de manera que el tiempo tiene carácter local²¹. Se entiende por tanto que la diferencia de longitudes entre dos puntos coincidía con la diferencia que existe entre los ángulos horarios ó entre las horas locales en tales puntos. Ahí radica precisamente el principal inconveniente para su correcta evaluación. Determinar la hora local del observador, que identifica un instante determinado²², no es nada trivial, pues se trata de hallar el valor del ángulo horario, de una estrella dada, a partir del triángulo astronómico cuyos vértices son: la proyección de la estrella sobre la esfera celeste, el Polo²³ y el Cenit²⁴; aunque se pueda simplificar sobremedida si el instante elegido para la observación es el del paso de la estrella por el meridiano del lugar, ya que en ese supuesto el triángulo esférico se reduciría a un arco y el ángulo horario valdría 0^h o 12^h . Sin embargo, la verdadera dificultad se planteaba en realidad cuando se pretendía saber la hora local del meridiano elegido como origen de las longitudes, ante la imposibilidad de transmitirla exactamente al observador situado sobre el punto incógnita²⁵; evidentemente la hora se refería al mismo instante anterior. Se entiende así que las numerosas fórmulas magistrales, surgidas al amparo de otras tantas convocatorias de concursos, fuesen meras aproximaciones a la solución definitiva que proporcionó el imparable desarrollo de las telecomunicaciones. El problema de la longitud ha estado siempre tan presente en la historia de la cartografía, que al llegar al siglo en el que prácticamente se resolvió, parece obligado hacer un esfuerzo de síntesis y resumir algunos de los intentos más señalados para lograrlo.

²¹ La hora solar se puede determinar sumándole doce horas al ángulo horario del Sol. La hora sidérea sería la suma del ángulo horario de la estrella y de su ascensión recta.

²² Los instantes de la observación estaban asociados al comienzo de ciertos fenómenos, generalmente, astronómicos. Los eclipses fueron de los más usados en la antigüedad, aunque posteriormente se fueron eligiendo otros más fáciles de concretar, como el paso de las estrellas por el meridiano del lugar.

²³ Los polos celestes, Norte y Sur, son la intersección del eje de rotación de la Tierra (el eje del mundo) con la esfera celeste.

²⁴ El Cenit y el Nadir son la intersección de la esfera celeste con la vertical física, es decir la línea de la plomada. El primer punto está sobre la cabeza del observador.

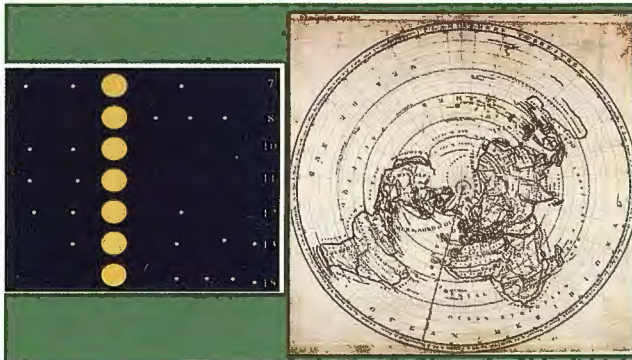
²⁵ El transporte de relojes que marcaran la hora del meridiano origen no resultaba



El último globo terráqueo del viejo mundo (Martín Behaim). En el dibujo se le ha superpuesto el nuevo continente, para entender mejor el error colombino.

operativo, ya que durante el trayecto se desajustaban los péndulos, teniendo en cuenta que los medios de amortiguación dejaban mucho que desear.

Hiparco de Nicea, el más grande astrónomo de la antigüedad, determinó al parecer la diferencia de longitudes entre Rodas y Alejandría, apoyándose en la observación simultánea de eclipses lunares. Cerca de trescientos años después, el insigne Tolomeo anunció la posibilidad de calcular la longitud mediante la resolución de un triángulo esférico, del que se conocía la latitud de un vértice, así como el acimut y desarrollo del segmento máximo que partía de él.



Recreación de las primeras observaciones de los satélites de Júpiter, efectuadas por Galileo Galilei en el mes de enero del año 1610, y el Planisferio de Cassini que adornó el Observatorio de París. Las longitudes geográficas que refleja son más exactas que las anteriores, al haber sido determinadas mediante observaciones simultáneas de los eclipses de los citados satélites.

Tolomeo fue de los primeros en referirse a las longitudes en términos parecidos a los actuales, su imagen del mundo habitado se extendía desde el meridiano de Canarias, tomado como origen, al situado a 180° al Este de las mismas. El legó a la posteridad el exagerado ensanchamiento del ecumene, con tan conocidas consecuencias en la era de los descubrimientos, al corroborar, en cierto modo, los datos erróneos de Aristóteles. Ejemplo de ello es la diferencia de longitudes entre Tánger y Alejandría, que creía de 54° , cuando el valor actual es de $35^\circ 39'$.

El tratado de al Biruni, *Kitab tahdid nihayat al-amakin litashih masafat al-masakin*²⁶, es una obra geodésica de obligada referencia en la que citaba sus trabajos para obtener la longitud de Ghazna, cuyo meridiano tomaría como referencia para fijar las longitudes contenidas en las tablas de al-Qanun. Naturalmente tuvo que calcular la diferencia de longitudes entre dicha ciudad y otras como Bagdad o Alejandría, cuyos meridianos ya habían servido de origen para otras tablas. Para ello realizó una serie de itinerarios entre Ghazna y Bagdad, cuyos desarrollos sobre el círculo máximo correspondiente obtuvo tras corregir los datos proporcionados por los relatos de los viajeros; en otro trabajo

obtuvo la diferencia de longitudes entre Bagdad y Alejandría. En cada uno de los itinerarios citaba las latitudes de las ciudades extremas que determinó con exactitud mediante observaciones astronómicas. Una vez transformadas las distancias en arcos ($1^\circ \approx 56 \frac{2}{3}$ millas) y conocidas las latitudes de las ciudades respectivas evaluó la diferencia de longitudes obteniendo la cuerda sobre un cierto paralelo y extrapolando su valor al ecuador terrestre. De ese modo mejoró sustancialmente las coordenadas geográficas de Tolomeo, en torno a un grado, a pesar de que las longitudes continuasen siendo defectuosas. Generalmente se acepta que los cartógrafos árabes corrigieron la longitud del Mediterráneo, aumentada por aquel²⁷ en torno a los 20° . La longitud la redujo al Jwarizmi a $43^\circ 20'$, y al Battani a $35^\circ 30'$.

26 Una posible traducción sería: *Determinación de las coordenadas de posiciones para la corrección de distancias entre ciudades.*

27 La motivación del sabio alejandrino no está exenta de controversia, podría haber sido el procurar que el ecumene alcanzase la cifra redonda de los 180° , aunque también se sugiere que la equivocación se podría haber debido al observar el eclipse en el que supuestamente basó su determinación.

Eclipses de los satélites de Júpiter		
Observación	Fecha	$\Delta\lambda$
Inmersión del III satélite	19 septiembre	$1^h 57^m 50^s$
Inmersión del I satélite	19 septiembre	$1^h 56^m 0^s$
Inmersión del I satélite	21 septiembre	$1^h 56^m 4^s$
Inmersión del I satélite	28 septiembre	$1^h 55^m 58^s$
Inmersión del II satélite	28 septiembre	$1^h 56^m 27^s$
Inmersión del II satélite	5 octubre	$1^h 56^m 4^s$
Inmersión del I satélite	7 octubre	$1^h 55^m 53^s$
Inmersión del I satélite	12 octubre	$1^h 55^m 40^s$
Inmersión del I satélite	21 octubre	$1^h 56^m 3^s$
Inmersión del II satélite	23 octubre	$1^h 56^m 50^s$
Inmersión del III satélite	25 octubre	$1^h 57^m 55^s$
Inmersión del I satélite	28 octubre	$1^h 55^m 44^s$
Inmersión del I satélite	30 octubre	$1^h 55^m 56^s$
Inmersión del II satélite	30 octubre	$1^h 56^m 39^s$
Emersión del I satélite	21 octubre	$1^h 55^m 50^s$
Inmersión del I satélite	12 enero 1799	$1^h 55^m 57^s$

Observaciones de Nouet en el Cairo, comenzadas en el año 1798. El promedio de los resultados obtenidos fue $1^h 55^m 54^s$ al Este de París. Fuente: Description de l'Égypte ou Recueil des observations et des recherches qui ont été faites en Égypte pendant l'expédition de l'armée française.

En el mundo occidental del medioevo debe subrayarse la obra *Dialogi cum Judeo*, por equipararse en ella tiempo astronómico y longitud. Su autor fue el aragonés Pedro Alfonso, también conocido como Moisés sefardí, el cual llegó a ser el médico de Enrique I de Inglaterra. Su discípulo, el monje Walcher, observó eclipses de Luna entre los años 1107 y 1112, defendiendo la posibilidad de que la longitud se podía hallar como la diferencia horaria entre los lugares de Italia e Inglaterra, desde los que se había dividido simultáneamente uno de ellos. En la segunda mitad de ese mismo siglo, Roger de Hereford señaló que el eclipse del 12 de septiembre de 1178, observado desde su ciudad, Marsella y Toledo, permitió calcular sus longitudes con relación al meridiano de Arín (India).

La observación simultánea de los eclipses lunares²⁸ fue también el procedimiento elegido, en los Libros del Saber de Astronomía, para determinar la longitud geográfica. La cuestión es tratada concretamente en el capítulo LXIX (Libro segundo. *Libros del astrolabio redondo*) bajo el epígrafe "De saber las longuras de las ciudades". La transcripción completa del texto, realizada por Manuel Rico y Sinobas, es la siguiente:

28 Los eclipses lunares se observaban, a efectos de calcular la longitud, todavía en el siglo XVIII, según se desprende de los trabajos realizados por el alemán T. Mayer, para el taller cartográfico de J. B. Homann. Mayer llegó a optar al premio prometido por el Consejo de la Longitud de Inglaterra, recibiendo sus herederos un total de 3000 libras.

"Si esto quieres saber. a mester que rectificquen dos rectificadores el eclipsi lunar. et que sea ell un rectificador dellos en lugar que sea su longura sabuda. et ell otro en aquel lugar de que tú quieres saber su longura. et que rectificquen cada uno dellos en so lugar et començamiento dell eclipsi. et la fin de la tiniebla. si fuer ell elipsi complido. et el començamiento de la claridad. et so cumplimiento. Et sepa cada uno dellos en so lugar sobre cuántas oras comienza cada uno destes términos sobredichos. et fágalo saber all otro rectificador. et tomen la diferencia que es entre las oras en cada uno destes términos sobredichos. et a de seer esta diferencia una en todos los términos. Et multipliquen aquella diferencia en. XV. et lo que fuer póngale nombre la longura que es entre las dos ciudades. Et despues caten a la diferencia de las oras a qual cibdat es. et si fuera la cibdat de que fue sabuda la longura. sepan que la cibdat de que quieren saber la longura es oriental de la cibdat que es sabuda. et minguen la longura que es entre las dos ciudades. de la longura de la ciudad sabuda. et lo que fincar. esso será la longura de la cibdat que quieren saber. Et si fuer la diferencia de las oras a la cibdat non sabuda, sepan que aquella cibdat non sabuda es oriental de la sabuda. et añadan la longura de la cibdat sabuda. et lo que se ayuntar. Esso será la longura de la cibdat non sabuda. et si se avinieren las oras de los términos en uno en amas las ciudades. Sepan que de una longura son amas".

Ya se ha comentado la especial incidencia que tuvo el problema de la longitud en el descubrimiento de América²⁹, pues bien, fue durante el primer viaje, justamente en la noche del día 13 de septiembre de 1492, cuando Colón comprobó que la declinación magnética³⁰ variaba con esa coordenada geográfica. Aquella noche cruzaron, sin ser conscientes de ello, la llamada línea agónica, o de declinación nula; un hecho que conmocionó a toda la tripulación, acostumbrada hasta entonces a que la aguja imantada estuviese siempre del mismo lado de la meridiana³¹. El almirante llegó a pensar a raíz de entonces en la existencia de un meridiano singular con unas propiedades similares a las de la línea ecuatorial. Esa idea colombina³² influyó en la opinión de otros cosmógrafos ilustres, como Mercator³³ o Alonso de Santa Cruz, el cual trató de establecer un claro paralelismo entre los parámetros magnéticos: inclinación³⁴ y declinación, y las coordenadas geográficas: latitud y longitud. Durante todas las expediciones posteriores fueron permanentes, además de los trabajos magnéticos, las observaciones astronómicas, todavía imprescindibles para calcular la posición sobre el globo terráqueo de los diferentes lugares; empleando generalmente las alturas meridianas del Sol para la latitud y la observación simultánea de la ocultación de estrellas por la Luna para la longitud. Ese último procedimiento fue empleado, por ejemplo, para determinar la longitud de Río de Janeiro durante la travesía de Magallanes, aunque verdaderamente se apoyasen en la ocultación de Júpiter por la Luna; no obstante, el resultado no fue nada aproximado, pues fijaron su longitud en 17^h 15^m al Oeste de Sevilla, es decir que localizaron a la bahía brasileña cerca de China.

29 La mejor evidencia gráfica de ello es la superposición del nuevo continente

sobre el globo terráqueo de Martín Behaim, construido en Nuremberg en el año 1492 ó 1493; una obra clásica de la cartografía globular que podría haber sido concebida para dar mejor cobertura a las tesis de Colón, con el que había coincidido en Lisboa.

30 La declinación magnética es el ángulo que forma la componente horizontal del vector intensidad del campo con la meridiana geográfica, dicha componente también es conocida con el nombre de meridiana magnética. La declinación magnética es pues la diferencia entre rumbos y acimutes, o bien el acimut geográfico del meridiano magnético.

31 El jueves día 13 de Septiembre se recoge en el diario, de a bordo, lo siguiente "Aquel día con su noche, yendo a su vía, que era el Oeste, anduvieron XXXIII leguas, y contava tres o quatro menos. Las corrientes le eran contrarias. En ese día, al comienzo de la noche, las agujas noruesteavan y a la mañana nordesteavan algún tanto, de lo que conoció que la aguja no iba derecha a la estrella que llaman del Norte, o Polar, sino a otro punto fijo e invisible".

32 El propósito de relacionar las coordenadas geográficas con el magnetismo terrestre fue auspiciado por el propio rey Felipe II, el cual llegó a convocar un premio para el que descubriese la pretendida dependencia.

33 Mercator, especialmente interesado en el magnetismo y en la navegación, pretendió resolver mediante aquel el problema de las longitudes. En su declaración al emperador Carlos, de 1553, afirmaba "...hay mucho que decir sobre la utilización de la aguja imantada...es por lo que yo expongo ahora su uso en la investigación de las longitudes de los lugares, una cosa desconocida..."

34 La inclinación magnética es el ángulo que forma el vector intensidad de campo con el plano del horizonte.

Aunque Regiomontanus ya había sugerido en 1472 un nuevo procedimiento para calcular la longitud, el primero en hacerlo de un modo más convincente fue su compatriota, el astrónomo y cartógrafo Johannes Werner, más de cuarenta años después, en 1514. El método no era otro que el de las distancias lunares, basado en el desplazamiento horario de la Luna en ascensión recta, que llega a ser de más de dos segundos por minuto³⁵. La observación consistía en medir con instrumentos de la familia del sextante la distancia angular entre el borde de la Luna y diversas estrellas, tomando nota de las horas locales correspondientes; para compararlas, acto seguido, con las asociadas a las mismas distancias en el meridiano elegido como origen; se obtenían así una serie de diferencias, cuyo promedio proporcionaba el valor de la longitud. El método requería, evidentemente, el empleo de numerosas tablas lunares con sus efemérides, diseñadas a tal efecto, en las que se detallaran las posiciones relativas, incluidas distancias y horas, de la Luna con relación a las estrellas; unas tablas de las que se haría uso ininterrumpidamente hasta comienzos del siglo XIX. Una muy conocida fue la del marino José de Mendoza y Ríos (*Tablas para los usos de la navegación y astronomía náutica*), publicada por vez primera en 1800, que alcanzó su quinta edición, debidamente actualizada³⁶, en 1898. Al parecer fue otro español, el navegante Pedro Sarmiento de Gamboa³⁷, el primero en emplear este método de las distancias lunares en alta mar, cuando viajaba hacia el Estrecho de Magallanes. En realidad la distancia angular medida por Sarmiento fue la existente entre la Luna y el Sol, realizando la operación astronómica con una especie de ballesta que fabricó a tal fin...«y con este instrumento, con la ayuda de Dios, tomó los grados de longitud por la llena de la Luna y nacimiento del Sol...»³⁸. Otro ejemplo de su utilización fue la que tuvo lugar durante la expedición de A. Malaspina (1789-1794), contando con el auxilio de los cronómetros de Harrison para tomar la hora local, que tanto ayudó a la renovación de la cartografía náutica española.

35 Se puede admitir que la Luna recorre cada hora una distancia angular equivalente a su diámetro, por decirlo en términos coloquiales.

36 Una variación mejorada del método de las distancias lunares se centraba en la observación del paso del borde lunar por el meridiano del lugar. Antes y después se observaban además estrellas previamente seleccionadas, con declinaciones similares a las que tuviese la Luna.

37 Este marino, nacido en Alcalá de Henares, marchó pronto al nuevo mundo en busca de fortuna, simultaneando sus viajes con el aprendizaje de la astronomía. Su vida fue un tanto azarosa, llegando a tener problemas con la inquisición: fue encarcelado en Lima (1564) por orden de su arzobispo e inquisidor ordinario.

38 Pedro Sarmiento de Gamboa, el Navegante. Boletín de la Real Academia de la Historia. Tomo XXVIII. Abril. 1896.

La invención del telescopio, en la frontera de los siglos XVI y XVII, y su inmediata aplicación astronómica conmocionó al mundo ilustrado, llegando a revolucionar la historia del conocimiento. El protagonista excepcional fue Galileo, con sus pormenorizadas observaciones y el descubrimiento de los satélites de Jupiter, las estrellas mediceas. La primera constatación de su existencia tuvo lugar el 7 de enero de 1610, deduciendo rápidamente que giraban alrededor del planeta por variar su posición relativa en días sucesivos. Desde abril del año siguiente, ya distinguía Galileo unos de los otros, trató de hallar el periodo de cada uno de ellos, al tiempo que estudiaba el número de veces que eran ocultados por su planeta y confeccionaba unas tablas en las que se predecían sus apariciones y desapariciones. Y es que desde el primer momento intuyó la posibilidad de observar simultáneamente sus eclipses, desde lugares diferentes, para obtener la diferencia de longitudes entre ambos. La segunda contribución del sabio italiano al problema de la longitud fue su concienzudo estudio del péndulo, comprendiendo que su oscilación era un medio ideal para medir intervalos de tiempo y un posible mecanismo en que basar la construcción de un reloj exacto; así lo puso de relieve con un dibujo V. Viviani, uno de sus alumnos.

Más tarde, en el año 1616, solicitó³⁹ el premio que había ofrecido el rey Felipe III, en 1598, al "descubridor de la longitud", asegurándole una pensión indefinida de 8000 ducados, además de pequeños adelantos para aquellas ideas que pudiesen conducir al descubrimiento definitivo. Galileo le presentó también el "celatone", el instrumento astronómico que había fabricado con ese objeto, una especie de casco de bronce con un anteojo incorporado, a través del cual el observador podía ver los satélites con uno de sus ojos, mientras que con el otro contemplaba a simple vista la luz procedente de Jupiter. Sin embargo fue rechazada su oferta por considerarla poco operativa para la navegación, teniendo en cuenta que no se podrían observar los satélites con la frecuencia ni con la estabilidad necesarias para obtener unos resultados verdaderamente fiables. Todo lo contrario ocurrió en tierra firme, en donde la observación simultánea de los eclipses de tales satélites permitió comprobar de inmediato la falsedad de algunos mapas considerados hasta entonces como paradigmáticos. El impacto fue tan importante que, a partir del año 1650, el método recomendado por Galileo era reconocido universalmente como el que lograba mejores resultados en las aplicaciones cartográficas terrestres; a él se debe, en cierto modo, el empuje necesario para lograr su posterior desarrollo.

39 La participación en esa especie de concurso quedó perfectamente documentada por un despacho enviado al virrey de Nápoles, el 28 de enero de 1620, diciendo el rey lo siguiente: "que Galileo Galilei, matemático del gran Duque de Toscana y lector de la Universidad de Pisa, ofrecía dar el modo de poder graduar la longitud y facilitar y asegurar la navegación del Océano, y que ofrecía también otra invención para las galeras del Mediterráneo, con que se descubrirían los bajeles del enemigo diez veces más lejos que con la vista ordinaria"

Aunque quedase demostrada su utilidad cartográfica, era evidente que se podían mejorar las tablas con las efemé-

des de Jupiter y sus satélites. Uno de los primeros en hacerlo, en 1668, fue el astrónomo italiano G. D. Cassini⁴⁰, a la sazón profesor de la Universidad de Bolonia. Es probable que el prestigio que alcanzó por su publicación influyera sobre Picard, a la hora de proponerle al rey Luis XIV que lo nombrara Director del flamante Observatorio de París, creado, por decisión real de 1667, como anexo astronómico de la Academia de Ciencias, fundada en el año anterior. Mediante las observaciones de los eclipses de los satélites, realizadas desde París y Uraniburg⁴¹, se enlazaron astronómicamente ambas ciudades, gracias a los trabajos de Picard, llegando a que su diferencia de longitudes era de 42^m 10^s, un valor mucho más exacto que todos los que anteriormente habían sido fijados.

40 Cassini fue el fundador de una dinastía de astrónomos y geodestas, siempre ligados al Observatorio de París. Ciudadano francés, desde 1671, pasó a la posteridad por sus trabajos en el meridiano de Francia, que a la postre desencadenaron la encendida polémica sobre los dos modelos elipsoidales de la Tierra.

41 El celebrado observatorio, entonces en ruinas, fue dirigido por T. Brahe, profesor de Kepler; siendo allí donde este último recopiló la información astronómica necesaria para formular sus tres leyes. Puede que fuese en aquella isla en donde se empleó por primera vez la triangulación, como medio ideal para obtener el desarrollo de un arco de meridiano y calcular el radio de la Tierra. Blaeu debió tener constancia de ello durante su etapa de colaborador de Brahe, así se podría explicar mejor su deseo de que Snell hiciese algo parecido en Holanda.

Dicho método fue usado durante los años (1672-1674) y (1679-1681) para calcular la longitud geográfica de un gran número de ciudades que jalonaban el contorno de Francia. Al mismo tiempo coordinaba Cassini la formación de un mapamundi, teniendo en cuenta el novedoso procedimiento, que ya podía catalogarse de moderno, en cuanto que la posición relativa de los meridianos era más ajustada desde el punto de vista geométrico; otra de las novedades que aportaba era que, por fin, la imagen que ofrecía del Mediterráneo se parecía más a las representaciones actuales que a todas las que le habían precedido. El mapa, *Planisphère terrestre*, adornó el suelo de la torre occidental de París desde que se presentó en 1682, desgraciadamente el original se destruyó en un incendio, conservándose solo la copia realizada por su hijo en el año 1696. Tres años antes había aparecido la obra *Neptune françois*, considerado entonces como la primera obra de la Cartografía Náutica moderna, al haberse confeccionado sus mapas apoyándose en las nuevas coordenadas geográficas que se habían calculado. Este procedimiento de hallar las longitudes geográficas y sus diferencias continuó empleándose en el siglo siguiente.

Uno de los posibles ejemplos, fue su utilización por V. Tofiño, con ocasión de sus levantamientos hidrográficos del litoral peninsular, cuya expresión gráfica fue el Atlas Marítimo Español. También se emplearon los satélites de Jupiter frecuentemente durante la expedición científica francesa que acompañó al ejército de Napoleón cuando invadió Egipto; el responsable de las observaciones fue el astrónomo Nouet, miembro de la Comisión de Sabios y del Instituto del Cairo. En el cuadro anterior se da un ejemplo referido precisamente a esa capital⁴², una vez elegido el Observatorio de París como meridiano origen.

42 Verdaderamente la posición de la capital egipcia quedó fijada por los tres resultados siguientes: A través de los eclipses de los satélites de Júpiter 1^h 55^m 54^s.0. Por la ocultación de la estrella δ de Escorpio por la Luna 1^h 55^m 54^s.0. Por la ocultación de Venus por la Luna 1^h 55^m 53^s.5. Es decir que se llegó a un valor medio de 1^h 55^m 53^s.8.

Con independencia de las investigaciones pendulares de Galileo, C. Huygens, miembro fundador de la Academia de

ingesis

En distribución de material topográfico abarcamos desde venta y alquiler de equipos hasta un servicio postventa muy efectivo. El equipo técnico de INGESIS está formado por personal cualificado para atender cualquier consulta o duda que pueda surgirle al cliente.

Al ser usuarios de los productos ofertados estamos habituados a encontrarnos con todo tipo de situaciones, ofreciendo al cliente no solo una formación sino también nuestra experiencia.

DISTRIBUIDOR AUTORIZADO PARA ANDALUCÍA

Leica when it has to be **right**
Geosystems

Autodesk® diseña herramientas especializadas y las acerca a sus clientes a través de sus distribuidores autorizados para ofrecerles una atención personalizada.

INGESIS como distribuidor autorizado está cerca de sus clientes para atender sus necesidades y darle el soporte necesario en el momento adecuado.



GPS 1200

SMARTOVER

TOTALMENTE COMPATIBLE CON LA RED ANDALUZA DE POSICIONAMIENTO

GPS 900

CON PRECISIÓN CENTIMÉTRICA A UN PRECIO EXCEPCIONAL

CÓRDOBA

Periodista Antonio Rodríguez Mesa_L.10_14010

957 752 392



957 751 388



MÁLAGA

Iván Paulov, 8_bloque 1_oficina 1_29590

Parque Tecnológico de Andalucía

952 020 240



952 020 171



ingesis@ingesis.net



www.ingesis.net



GPS | ESTACIONES TOTALES | CONTROL DE MAQUINARIA | NIVELES Y ACCESORIOS | LASER



Ciencias de París, hizo las suyas para desarrollar la teoría matemática del péndulo y llegar al convencimiento de que podría regular el mecanismo de los relojes. El astrónomo holandés contribuyó así a la realización de medidas más exactas de los intervalos de tiempo y por tanto a la correcta determinación de la longitud. Durante su estancia en París, adonde fue llamado por Luis XIV, publicó una de sus obras más sobresalientes, *Horologium Oscillatorium* (1673), detallando los resultados de sus trabajos y asegurando que su reloj era el mejor instrumento para hallar la longitud de puntos localizados mar adentro. Algunos de los relojes construidos de acuerdo con sus directrices llegaron a probarse con resultado satisfactorio durante un viaje a Cabo Verde en 1664. En sus últimos prototipos sustituyó el sistema pendular, normalmente afectado por el balanceo del barco, por otro alternativo: el muelle espiral del volante del reloj.



Estatua de John Harrison, junto a varios detalles de su cronómetro H4.

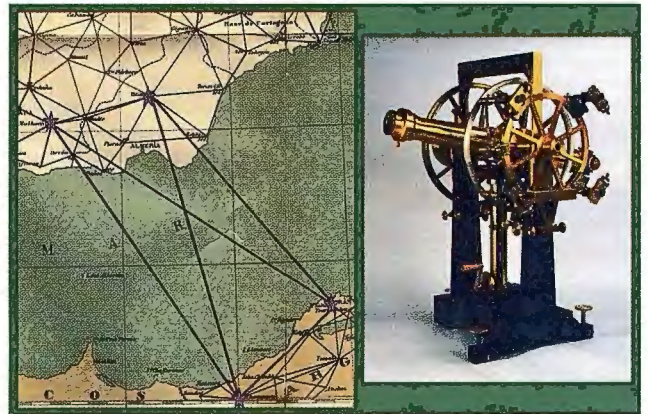
A pesar de los innegables avances que se habían producido, aún estaba lejos de resolverse satisfactoriamente el problema de las longitudes, sobre todo cuando se trataba de localizar un punto en alta mar, tal como ya quedó dicho. Esa fue la razón fundamental que informó la creación del Observatorio de Greenwich en el año 1675, por orden del rey Carlos II. Su director, el astrónomo J. Flamsteed, recibió el encargo de formar un catálogo estelar que mejorase el de T. Brahe, pero sobre todo unas tablas lunares específicas que permitieran a un observador naval conocer en todo momento su longitud como diferencia de horas (entre el punto y Londres) relativas a una cierta posición de la Luna; la apuesta por el método de las distancias lunares era por tanto más que evidente. Sin embargo, no se logró confeccionar el deseado almanaque náutico hasta 1763, año en que se publicó *The British Mariner's Guide*, resultado brillante de los trabajos astronómicos efectuados por N. Maskelyne, el cual había observado, dos años antes, en la Isla de Santa Elena un tránsito de Venus, determinando durante su viaje la longitud por medio del ya citado método de las distancias lunares; Maskelyne fue también director del Observatorio y el primero en medir el tiempo con indeterminaciones próximas a las décimas de segundo.

La creación del Observatorio despertó las consiguientes expectativas, máxime cuando seguían vigentes las soluciones peregrinas que tanto proliferaban en las postrimerías del siglo XVII, de modo que al no cumplirse se movilizaron los sectores más directamente afectados⁴³, hasta el punto de conseguir que se crease en el Comisión parlamentaria a tal efecto. La Comisión solicitó el oportuno in-

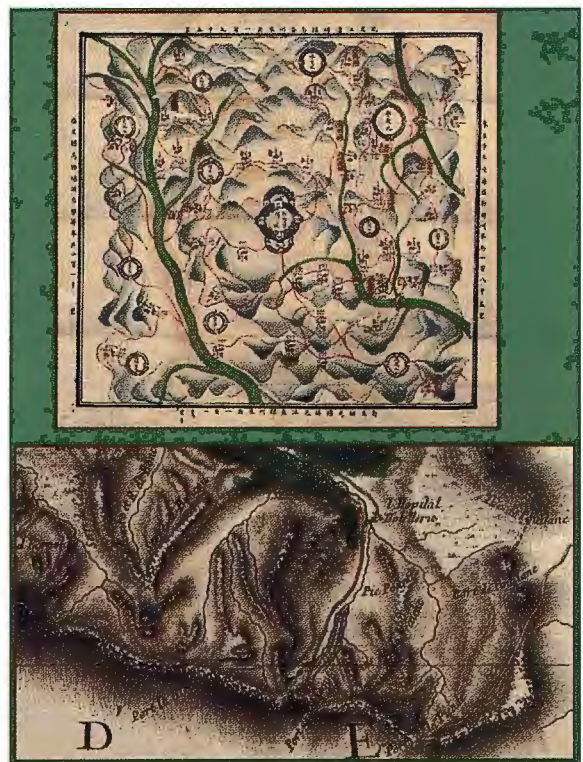
forme pericial a una figura tan respetada como Newton, el cual explicó el estado del conocimiento, comenzando por enumerar los procedimientos al uso para calcular la longitud, reconociendo la bondad de sus principios y la dificultad de llevarlos a la práctica⁴⁴. Antes de entrar de lleno en los pormenores de las soluciones astronómicas, mencionó la que supuestamente proporcionaría un reloj portátil en los siguientes términos: "One is by a match to keep time exactly. But, by reason of the motion of the ship, the variation of heat and cold, wet and dry, and the difference of gravity in different latitudes, such a watch hath not yet been made"; palabras que indirectamente apuntaban a la imposibilidad de hallar la solución por esa vía.

43 Se llegó a dirigir un escrito al gobierno, firmado por: Captain's of her Majesty's Ships, Merchants of London, and Commanders of Merchants-Men. (The illustrated Longitude)

44 Ya antes de hacer su dictamen había asegurado Newton: «That, for determining the Longitude at Sea, there have been several projects, true in theory, but difficult to execute»



El cuadrilátero del enlace hispano argelino de 1879 y el círculo meridiano portátil de Brunner, que se empleó en las observaciones astronómicas.



Dos representaciones del relieve: una mediante perfiles abatidos (mapa de la provincia de Yunnan) y otra con una especie de normales (Carta de Cassini). En la imagen francesa se aprecia el Puerto de Benasque.

La Comisión tomó buena nota del informe de Newton, sugiriendo al Parlamento que admitiese cualquier propuesta

y que, en su caso, recompensara al ganador. Acto seguido se publicó el llamado Decreto de la Longitud (*Longitude Act*) el día 8 de julio de 1714, el cual establecía tres tipos de premios: uno de 20000 libras para el que hallase la longitud con un error menor de 30', otro de 15000 libras si el error era inferior a 2/3 de grado y un tercero de 10000 libras si el error alcanzado era del orden de un grado⁴⁵. El Decreto contemplaba además la creación de un Consejo evaluador que no llegó a disolverse hasta el siglo siguiente, concretamente en el año 1828, tras haber desembolsado más de 100000 libras⁴⁶. Finalmente los mayores premios recayeron en J. Harrison, quien anunció su reloj H-4 en 1755, aunque no lo completase hasta el año 1759. El modelo ganador fue un reloj portátil de cerca de 13 cm de diámetro y apenas 1.4 kg. de peso. Aunque el autor estaba orgulloso de los tres modelos anteriores, era este su preferido a tenor de lo que escribió: *"I think I may make bold to say, that there is neither any other Mechanical or Mathematical thing in the World that is more beautiful or curious in texture than this my watch or Timekeeper for the Longitude...and I heartily thank Almighty God that I have lived so long, as in some measure to complete it"*. El reloj de Harrison fue probado con éxito en dos travesías: Jamaica (1761-1762) y Barbados (1764), comprobándose fehacientemente que los errores que presentaba eran despreciables en relación con las tolerancias fijadas en el Decreto. Sin embargo la cicatería del Consejo impidió que cobrase el primer premio, entregándole solo el importe del segundo. En cambio la Royal Society le concedió su medalla de oro y el Parlamento un total de 8750 libras, una recompensa que venía a reconocer su ingenio y virtuosismo instrumental, y su decisiva aportación para solucionar el problema de la longitud en alta mar.

⁴⁵ Las tolerancias fijadas por el Decreto eran tolerables para el mar pero inadecuadas para tierra adentro. Sus equivalencias lineales lo hacen más comprensible: el desarrollo de medio grado es del orden de 55.6 km., el de 2/3 de grado equivale a unos 74.12 km., finalmente el desarrollo del grado tiene aproximadamente 111.19 km. Se ha supuesto el modelo esférico de la Tierra, con un radio de 6371 km.

⁴⁶ Aunque sea difícil fijar su equivalencia con la moneda actual, puede estimarse que la cantidad entregada en los premios de longitud ascendería a una cantidad superior a los 40 millones de euros.

Las innovaciones introducidas por el relojero inglés causaron pronto sensación en los gobiernos europeos, cumpliéndose sobradamente las expectativas que él mismo había despertado al enviarles antes los libros que publicó sobre el particular. Una vez recibidos en España, su Ministro de Marina e Indias, Julián de Arriaga, solicitó un informe a Jorge Juan, entendiéndolo que él era la persona con mayores conocimientos al respecto. La respuesta⁴⁷ a la petición del sustituto de Ensenada la firmó Jorge Juan en Madrid el 12 de abril de 1765, probando que sí estaba al tanto del problema de la longitud. He aquí parte del mismo, concretamente la que se refiere a los experimentos realizados con el cuarto cronómetro, que había construido Harrison cuatro años antes, durante la travesía que se inició en Portsmouth, con destino a Jamaica, el 18 de noviembre de ese mismo año:

«El cronómetro se puso en una caja segura con cuatro llaves, una de ellas llevaba Harrison, otra el gobernador Lytelton, otra el capitán Digges y otra el primer teniente del navío, con orden expresa de que no se abriera sin concurrir los cuatro que debían dar certificación de haberse procedido con la legalidad

necesaria. Antes de salir de Portsmouth se tomaron las alturas correspondientes⁴⁸ del Sol para arreglar el cronómetro por M. Robertson, profesor de matemáticas, en presencia de Harrison, el gobernador Lytelton y del capitán, y teniente del navío con el Comisario del Puerto, Hughes, y el matemático Juan Robinson; se firmaron y sellaron dichas observaciones y se remitieron al Almirantazgo. El matemático Robinson se mandó embarcar en el propio navío para celar el todo, y que llegado a Jamaica pudiese tomar las alturas correspondientes del Sol, y observar la longitud de los satélites de Júpiter, a fin de comparar con la que diese el cronómetro; pues no era asunto de poderse fiar de la signada por las cartas, mayormente cuando Harrison pretendía aún mayor exactitud de cuanta hasta ahora se ha podido imaginar, siendo acreedor a los premios que se han ofrecido sobre el asunto...Puede ser que ahora en los principios no condesciendan los ingleses a participarnos el secreto, pero es seguro que después de las próximas experiencias no puedan evitarlo. Las medidas que será preciso tomar son de que se vayan a su tiempo dos o tres relojeros españoles de los que se conocen aplicados, a que aprendan con el mismo Harrison, procurando contentar a este; pues aunque llegue el caso de que nos vendan los cronómetros, no es esto suficiente; es preciso que haya después quien los tenga limpios y corrientes; porque en esto consiste el beneficio; y que si llegase el caso que se rompa una rueda, haya quien la sepa hacer de nuevo».

⁴⁷ El informe es un documento de incuestionable interés que fue reproducido por Fernández Dauro en 1879 (Volumen IV de sus Disquisiciones náuticas).

⁴⁸ El método astronómico de las alturas correspondientes trataba de hallar la hora del paso del Sol por el meridiano del lugar. La hora se obtenía como promedio de las que se iban obteniendo al observar el Sol en instantes en que tuviese la misma altura, antes y después de su culminación; instantes que se conocen con el nombre de posiciones correspondientes, en tanto que son simétricas con relación al citado meridiano.

A estas alturas del siglo XVIII la solución astronómica, por antonomasia, continuaba siendo el método de las distancias lunares, no solo por disponer de tablas con efemérides cada vez más rigurosas, sino también por contar con instrumentos que proporcionaban datos más fiables. De nuevo se pone de manifiesto que la mejor contribución de los ingleses a las Ciencias de la Ilustración fue la derivada de su reconocida faceta de constructores de instrumentos geodésicos⁴⁹ o de navegación. En el año 1731 ideó J. Hadley su octante⁵⁰, llamado así por disponer de un limbo con una amplitud de 45°, que disponía de un dispositivo óptico para medir las alturas de las estrellas sobre el plano del horizonte y la distancia angular que las separaba en la esfera celeste. Su evolución natural desembocó en el sextante, especialmente proyectado para la medida directa de las distancias lunares; uno de los que causó sensación fue el que construyó J. Ramsdem en 1772, ya que fue empleado con éxito durante la tercera travesía del capitán Cook, junto al cronómetro de Harrison.

⁴⁹ J. Ramsdem, uno de los mejores instrumentistas, ideó en 1763 una máquina de graduar con la que resolvió la cuestión de dividir un círculo de bronce. Poco después fabricó su gran teodolito, con un limbo de 91 cm de diámetro, que con ayuda de micrómetros permitía hacer lecturas de hasta un segundo de aproximación. La construcción del instrumento fue financiada por la *Royal Society*, haciendo posible la primera triangulación precisa de las Islas.

⁵⁰ Los más directos antecedentes de este instrumento fueron la vara de Jacob. O ballesta, debida a Levi ben Gerson (1330) y el sector cuadrangular ideado por J.

Davis en 1595, con el que se podía observar indirectamente el Sol. El astrónomo francés La Caille homenajeó a Hadley, dando el nombre de octante a una constelación del hemisferio Sur.

Mientras tanto proseguía la investigación sobre la diferencia de longitudes "terrestres". Fruto de ello fue el método de las señales de fuego ya comentado. Su autor, el astrónomo La Caille, lo llevó a la práctica en el transcurso de las operaciones geodésicas relacionadas con el paralelo de Brest, París y Estrasburgo; aunque las primeras experiencias las había realizado antes, en 1738, entre las montañas francesas de Sète (Hérault) y Saint-Victoire (Aix-en-Provence). Los resultados de las cuatro medidas efectuadas, $7^m 34^s$, $7^m 33^s.5$, $7^m 32^s.5$ y $7^m 33^s$, mostraron que la exactitud alcanzada superaba con creces a los que se podrían haber obtenido observando los eclipses de los satélites de Jupiter. Esta novedosa metodología se empleó, con ligeras modificaciones, en las operaciones más señaladas del siglo XIX, tal como se tendrá ocasión de comprobar poco más adelante.

Otra de las contribuciones más sobresalientes a la resolución del problema de la longitud fue el uso de las técnicas geodésicas, basadas en la geometría del elipsoide de revolución y en las ecuaciones diferenciales de sus líneas geodésicas. La cuestión entraña una cierta dificultad, al tratarse de una compleja generalización de las transformaciones simples que permiten pasar de las coordenadas polares, módulo y argumento, a las coordenadas cartesianas, abscisa y ordenada. El papel del módulo y del argumento lo jugarían la distancia, reducida al elipsoide, y el acimut, mientras que el de las cartesianas lo desempeñarían las coordenadas geográficas. En otras palabras, conocidas la latitud y longitud de un punto se pueden hallar las de otro, si se conocen los parámetros que definen el elipsoide, el desarrollo del arco geodésico que los une y el acimut de este último⁵¹. Basándose en esta última metodología se efectuaron los primeros enlaces astronómicos, de los tiempos modernos, entre puntos muy alejados sin intervisibilidad. El más sobresaliente fue el realizado entre los Observatorios de Greenwich y París, durante el año 1787, llevando a la práctica la propuesta que había realizado en su momento Cassini de Thury. Para ello se proyectó y observó una triangulación en forma de cadena y compuesta por veinte triángulos, los instrumentos usados fueron los teodolitos de Ramsden y los círculos repetidores de J. Borda.

⁵¹ En realidad, las coordenadas así obtenidas no coincidirían con las que se hubiesen determinado por vía exclusivamente astronómica (coordenadas astronómicas); sin embargo las diferencias entre ellas son insignificantes y relacionadas con la desviación de la vertical. De ahí que a las coordenadas curvilíneas que figuran en la iconografía cartográfica se les conozca con el nombre de coordenadas geográficas, refiriéndose indistintamente a las coordenadas astronómicas y a las geodésicas, aunque en rigor se trate de estas últimas.

Llegados al siglo XIX ha de reseñarse el marcado protagonismo que adquiere España en este campo de la geografía matemática, gracias a las aportaciones de sus geodestas y de sus astrónomos; sobresaliendo Carlos Ibáñez entre los primeros y Miguel Merino entre los segundos, ambos miembros de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Tan brillante trayectoria la había iniciado el valenciano J. Chaix, subdirector que fue de la Escuela de Ingenieros Cosmógrafos y estrecho colaborador de Coronado, quien en el año 1799 determinó la diferencia de longitudes entre Madrid y París, observando el paso de Mer-

curio por el Sol. El valor obtenido aseguraba que Madrid estaba $24^m 8^s$ al Oeste de la capital francesa, aunque se modificase después como fruto de las campañas emprendidas por los Observatorios astronómicos de ambas ciudades⁵², en las que participó muy activamente el ya citado Merino, el cual llegó a dirigir el Observatorio madrileño del Retiro. Chaix colaboró también en una operación de gran envergadura, el enlace geométrico⁵³ de las Islas Baleares con las costas levantinas, que nació al amparo de la prolongación del meridiano de Francia y de la definición del Sistema Métrico Decimal.

⁵² *El Real Observatorio Astronómico de Madrid (1785-1975)*, es una publicación rigurosa y amena que repasa la historia de tan señera institución, de la que su autor, Manuel López Arroyo, fue uno de sus últimos directores.

⁵³ Sin embargo el enlace no se pudo completar del todo hasta muchos años después, cuando lo hizo el equipo dirigido por Carlos Ibáñez, primero como Director del Distrito Geodésico y Catastral de Levante y luego como Director General del Instituto Geográfico y Estadístico. Las operaciones dieron comienzo en 1865 y finalizaron en 1885, tan considerable periodo de inactividad se debió al compromiso adquirido con el gobierno francés, con relación al enlace astronómico y geodésico entre España y Argelia. *Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico. Tomo VII. 1886*. La escala de la red geodésica, formada con esa ocasión, la proporcionó una regla que había diseñado el propio Director y que luego sería conocida con el nombre de aparato de Ibáñez.

Tanto él como J. Rodríguez⁵⁴, el sabio español en palabras de J. B. Delambre, intervinieron decisivamente junto a los franceses J. B. Biot y J. F. Arago, que habían sido nombrados directores del proyecto por P. S. Laplace. A las determinaciones previstas de latitud y gravedad, se añadieron las de la longitud geográfica y la del acimut de una referencia, para poder replantear la dirección de la meridiana. Esa última operación era imprescindible para poder hallar las horas de paso por el meridiano del lugar⁵⁵, de las diferentes estrellas que habían previsto, y por tanto la longitud del mismo, como diferencia entre esas horas locales y las que les servían de referencia. El propio Arago incluyó después en el segundo tomo de sus Memorias Científicas el valor obtenido, que localizaba la estación elegida, el vértice geodésico Mola en la Isla de Formentera, a $0^{\circ} 48' 11''$. 26 al Oeste de París.

⁵⁴ Los pormenores de esa interesante observación figuran, entre otras, en *Los trabajos geodésicos de José Rodríguez González*. Rodríguez fue un astrónomo muy valorado fuera de España.

⁵⁵ El cálculo de la longitud basada en ese fenómeno astronómico de la culminación pasó a ser uno de los más empleados en el futuro. Su fiabilidad estaba pues condicionada por la asociada a la determinación del acimut y de la latitud, también necesaria para el cálculo del anterior.

Antes de que comenzasen esos trabajos, Biot ya había expresado, en sus informes previos a las autoridades francesas, la conveniencia de prolongar el meridiano de París más allá del litoral valenciano, hasta lograr enlazar el continente europeo con el africano. Hubo que esperar al último tercio del siglo para que los gobiernos de España y Francia decidieran abordar el proyecto, nombrando como responsables a Carlos Ibáñez y a François Perrier. Tan ambiciosa operación discurrió con los sobresaltos propios de altitudes tan extremas, las dificultades inherentes a visuales excesivamente largas y al hecho, tan problemático y novedoso, de ser casi rasantes al Mediterráneo. El caso es que se logró un éxito irrepetible y de común acuerdo se realizó la publicación internacional que daba cuenta de las observaciones realizadas, de los cálculos efectuados y de los resultados obtenidos: *Enlace geodésico y astronómico de la (sic) Argelia con España, realizado en 1879, por Orden de los Gobiernos de España y de Francia, bajo la*

*dirección de los señores: General Ibáñez, por parte de España, y Coronel Perrier, por parte de Francia*⁵⁶.

56 Bajo sus nombres respectivos figuraba lo siguiente: Ibáñez (Individuo de la Academia de Ciencias de Madrid, Director General del Instituto Geográfico y Estadístico), Perrier (Individuo de la Academia de Ciencias del Instituto de Francia, Jefe del Servicio Geográfico del Ejército).

C. Ibáñez confió la dirección de las observaciones astronómicas a Miguel Merino y Melchor, contando con él desde el primer momento: ya que participó en todas las reuniones preparatorias que tuvieron lugar para discutir tanto las cuestiones científicas que se pensaban analizar, como los pormenores de la intendencia, nada despreciables por la localización tan peculiar de los dos vértices españoles. El mismo Perrier se responsabilizó de las observaciones astronómicas del lado francés, siendo esta la última campaña de campo en que participó. En realidad los instrumentos astronómicos solo se estacionaron en dos vértices del cuadrilátero: Tetica y M'Sabiha (cerca de Orán), habida cuenta de que el acceso a los mismos y sus previsibles condiciones atmosféricas los hacían preferibles a los otros dos: Mulhacén y Filhaoussen. Su cometido principal era calcular la diferencia de longitudes entre los dos vértices anteriores, sus latitudes y los acimutes astronómicos de dos direcciones cualesquiera que partieran de ellos. Las observaciones propiamente dichas dieron comienzo el diez de octubre de ese año 1879, una vez instalados en los correspondientes pilares, del nuevo campamento astronómico, todos los instrumentos necesarios⁵⁷.

57 Para hacerse una idea de la complejidad del proyecto se relaciona seguidamente el instrumental que hubo que transportar a la cumbre de la Tetica, curiosamente próximo al Observatorio hispano alemán de Calar Alto: un anteojo de pasos, convertible en círculo meridiano portátil, un teodolito Repsold, un péndulo sidéreo de Matthäus Hipp y un cronógrafo portátil, además de toda la maquinaria, requerida como auxilio imprescindible para el éxito de la operación, relacionada con la emisión y recepción de las señales luminosas.

La observación más compleja que se pretendía realizar culminaba con el cálculo de la diferencia de longitudes geográficas entre los vértices, debiendo determinar, en primer lugar, la hora local en cada uno de ellos. Inmediatamente después había que proceder a su comparación, apoyándose para ello en la emisión y recepción de señales luminosas, sucesivas y recíprocas, correspondientes a un mismo instante físico. La hora se obtuvo observando numerosas culminaciones de estrellas circumpolares. Todas las observaciones se registraron temporalmente por medio de los cronógrafos, con receptor Morse incorporado, contruidos en talleres franceses. La luz eléctrica que marcaba el instante preciso en que debería de fijarse la hora en cada vértice, para luego hallar su diferencia, se consiguió añadiendo al instrumento óptico original un anteojo, mediante el cual podía dirigirse la luz en la dirección deseada. Al final de la operación se habían visado alrededor de 190 estrellas, aunque el número de punterías realizadas fuese mucho mayor, ya que hubo algunas que se observaron veinticinco veces. Tras efectuar las oportunas correcciones, el valor adoptado finalmente para la diferencia de longitudes geográficas dado por Merino y Perrier fue $\Delta\lambda = 6^m 14.979 \pm 0.013$, debiendo entender que el vértice español se encuentra al Oeste del argelino⁵⁸.

58 Ese método para calcular la diferencia de longitudes era la variante moderna del método de las señales de fuego, ya referido en varias ocasiones.

59 Los detalles de esta gran aventura científica se pueden consultar en el artículo *El enlace astronómico entre Europa y África de 1879*.

Entre los estudiosos de la historia de la ciencia continua manteniéndose el respeto por todos aquellos que hicieron

posible la aventura científica del doble enlace. Unos de los últimos comentarios al respecto fue realizado por el prestigioso geodesta francés, Jean Jacques Levallois, Ingeniero Geógrafo y antiguo Secretario general de la Asociación Geodésica Internacional, el cual aseguraba en el año 1988 (*Mesurer la Terre, 300 ans de géodésie française. De la Toise du Châtelet au Satellite*) que con el enlace hispano argelino se habían cumplido los deseos de sus compatriotas Biot y Arago, añadiendo después "esta ambiciosa operación, perfectamente estudiada y proyectada, favorecida por la buena suerte y coronada por un rotundo éxito, proporcionó a sus responsables el reconocimiento científico universal, además de los honores académicos y recompensas oficiales".

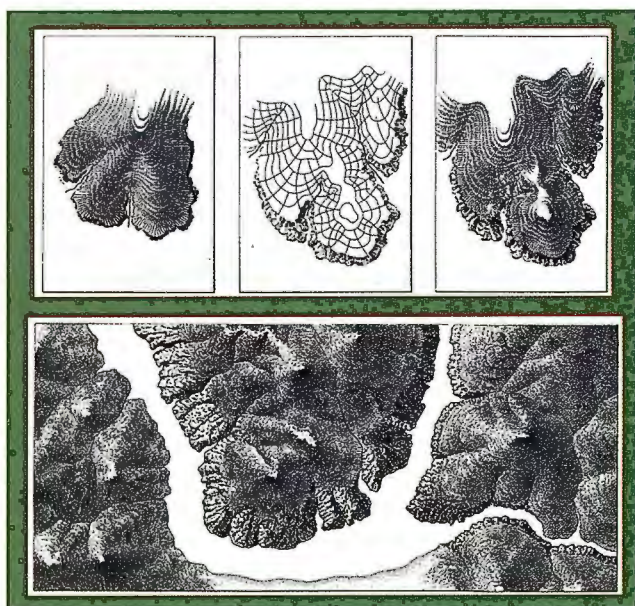
La reseña sobre la cuestión de la longitud se va a culminar con varios extractos de un discurso de Carlos Ibáñez ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales⁶⁰, dando la bienvenida a Joaquín Barraquer y Rovira, que había sido elegido miembro de esa institución en abril de 1878, aunque su recepción tuvo lugar el día 1 de mayo de 1881. Se daba la circunstancia de que Barraquer era el geodesta del Instituto Geográfico que había dirigido, desde el pico del Mulhacén, las observaciones geodésicas del enlace anterior. En esta ocasión, el discurso de bienvenida leído por Ibáñez fue marcadamente institucional, reflejándose tanto su posición al frente del Instituto Geográfico y Estadístico como su condición de presidente de la Asociación Geodésica Internacional. En su disertación, una brillante lección en la que se aborda la reciente historia de la geodesia, se aprecian tres bloques perfectamente diferenciados y referidos respectivamente a su vertiente geométrica, física y metrológica; aunque solo se refieran aquí los aspectos directamente relacionados con la longitud.

60 Tanto este discurso como el que pronunció al recibir al nuevo académico Pedro Alcántara de la Llave han sido recientemente comentados en el artículo *Los discursos de recepción del General Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero en representación de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

El discurso de Ibáñez cobra especial interés, en este contexto, cuando se encarga de relatar con evidente amenidad unos acontecimientos de capital importancia en el desarrollo de la localización geográfica del territorio, pues apoyándose en ellos pudo resolverse definitivamente el secular problema de la determinación de la longitud. Ni que decir tiene que el protagonista de excepción en los mismos no fue otro que Samuel Morse. Así se expresaba Ibáñez:

«Navegaba en 1832 a bordo del *Sully*, desde el Havre a Nueva-York, un renombrado pintor americano, que en los ocios de la travesía, departiendo con algunos pasajeros y meditando sobre los experimentos de Franklin, imaginaba los fundamentos del pequeño aparato que ha cambiado la faz del sistema de comunicaciones entre los habitantes de la Tierra. Samuel Morse, que no era otro el pintor, hubo de dejar por entonces sin realización práctica su peregrina idea, que vimos planteada doce años después, cuando se puso en comunicación electro-telegráfica a las ciudades de Washington y Baltimore. No se hizo esperar mucho tiempo la aplicación de tan prodigioso invento a la geodesia, puesto que el mismo año de 1844 tuvo el Capitán Carlos Wilkes la idea de medir la diferencia de longitudes geográficas entre las menciona-

das ciudades, valiéndose del telégrafo eléctrico; y dos años después la determinó Walter, por el indicado procedimiento, entre Washington y Filadelfia. Pero en las aplicaciones científicas era ante todo necesario determinar, con precisión, el tiempo invertido por la corriente eléctrica para recorrer la distancia que media entre los puntos unidos por un hilo telegráfico; experimento realizado con este objeto bajo la dirección del mismo Walter, en el intervalo de 1849 a 1851. El promedio de los resultados concordantes, entonces, obtenidos, entre diferentes líneas, es de 24.800 kilómetros por segundo. El Nuevo Mundo se hallaba en posesión de un procedimiento completo para determinar la diferencia de longitudes geográficas, el cual ha llevado, con toda justicia, el nombre de *método americano*».



Dos ejemplos de relieves simulados por el procedimiento de las normales. Fuente: *Láminas de dibujo topográfico y rotulación de planos* (Láminas V, Trazado de las normales y XV, Orografía). Antonio Revenga Carbonell y Ricardo Muñozerro (1954).

Como era previsible, las noticias de los experimentos americanos no tardaron en llegar a Europa, indicando Ibáñez que fue el astrónomo austriaco J. J. Litrow, Director del Observatorio de Viena, el primero en usar el nuevo procedimiento telegráfico para calcular la diferencia de longitudes entre Viena y Praga en el año 1851. La unión permanente entre los dos continentes no se consiguió hasta el año 1866, merced a los cables metálicos instalados en el fondo oceánico; fue entonces cuando, en palabras de Ibáñez, se "vio por primera vez tal maravilla: una diferencia de longitudes determinada a 4300 kilómetros de distancia por observaciones de las mismas estrellas". Seguidamente detalla los logros conseguidos:

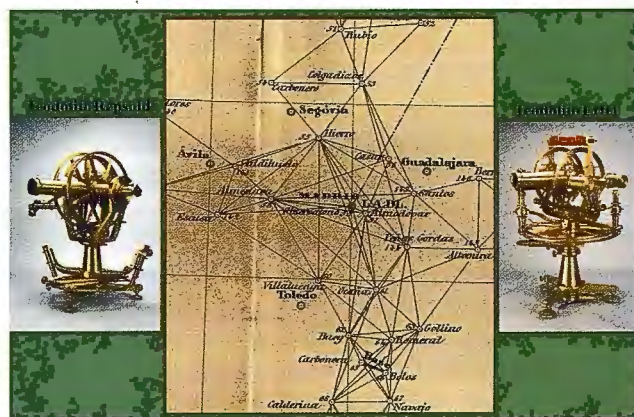
«El resultado alcanzado, en tan extraordinaria operación, fue que la diferencia de longitudes entre los observatorios de Cambridge, en los Estados-Unidos, y de Greenwich, en Inglaterra, es de 4h 44m 30s, 99, con un error probable de *una décima de segundo*. Repetida la operación por el cable francés de Duxbury, en 1870, no difirió del anterior resultado obtenido más que en una *centésima de segundo*, y el error probable de la determinación bajó a *seis centésimas de segun-*

do. Otra determinación se llevó todavía a cabo, en 1872, por el cable francés de Saint-Pierre; resultando la diferencia de longitudes exactamente igual a la anterior, hasta las centésimas de segundo inclusive, con un error probable de *cuatro centésimas de segundo* tan solo. Maravillosa concordancia, que ensalza el sistema americano, cuya precisión era ya entonces tan grande».



La Península Ibérica en el Mapa Físico de Europa de 1842. Su autor fue H. K. W. Berghaus, apoyándose en los trabajos de Bredsdorff y Olsen. La imagen del relieve se logra mediante el empleo de normales, curvas de nivel e hipsometría.

Después refiere Ibáñez otro invento del año 1848 con especial incidencia en las observaciones de la astronomía geodésica e igualmente asociado a la determinación fiable de la longitud geográfica; en esta ocasión el inventor fue también americano, el astrónomo W. C. Bond, el cual lo ideó en plena efervescencia de las medidas americanas al respecto. La utilidad de tan ingenioso instrumento la describe Ibáñez a la perfección



Triángulos geodésicos de primer orden en las cadenas de meridiano y de paralelo de Madrid.

«Desde la invención del cronógrafo, multitud de geodestas avezados a las observaciones terrestres, se han puesto, en cortísimo plazo, en disposición de observar los pasos de las estrellas y otros fenómenos análogos, con la misma precisión que el más hábil astrónomo de un observatorio, y con una superior a la del más diligente observador que operase sin tan ingenioso aparato; el cual proporciona, además, la inapreciable ventaja de conservar la impresión gráfica del tiempo y de la observación del fenómeno en las cintas de papel, circunstancia que permite comprobar y rectificar el resultado de la observación cuantas veces se considere conveniente».

Carlos Ibáñez no tardó en disponer que el método americano se emplease en el Instituto Geográfico y Estadístico, para calcular las diferencias de longitud, ya que entre los años 1882 y 1883 así lo hicieron Eugenio de Eugenio y Antonio Esteban en el triángulo Badajoz, Lérida y Madrid. Las estaciones elegidas⁶¹ se unieron telegráficamente mediante un hilo directo, "sin interposición de revelador alguno en ningún punto intermedio de la línea». En las memorias del referido Instituto (Tomo VI. Año 1886) se da cuenta de que la Dirección General de Correos y Telégrafos «puso a disposición de los observadores este hilo durante el tiempo necesario, así como las pilas, aparatos Morse y demás accesorios electro-telegráficos que, para facilitar y asegurar el buen éxito de la operación principal, eran indispensables". Los cronógrafos empleados fueron los de Fuees, con ligeras modificaciones. El informe sobre los trabajos, que ocupó un total de 350 páginas del citado tomo, proporcionó los siguientes resultados:

Lérida-Madrid..... (17_m 15s.423 ± 0s.011),
 Madrid-Badajoz..... (13_m 10s.459 ± 0s.014),
 Lérida-Badajoz..... (30_m 25s.844 ± 0s.009).

61 En Badajoz fue el vértice geodésico Reducto, llamado así por encontrarse en un enclave levantado por las tropas francesas durante el primer sitio a la ciudad. En Madrid fue el Observatorio del Retiro. El vértice denominado Lérida estaba situado al pie de la torre del castillo, junto a la puerta del cuartel de Claustros.

La medida y representación del relieve terrestre.

La altitud es la tercera coordenada que, junto a la longitud y a la latitud, permite la representación cartográfica de la superficie topográfica del terreno. La altitud es una magnitud más física que geométrica, intrínsecamente dependiente del campo gravitatorio engendrado por la Tierra. Así se desprende de la propia definición de energía potencial (W), pues dividiéndola por el producto de la masa y de la aceleración de la gravedad (g) se obtendría directamente la altitud (H), es decir: $H = W/g$, en el supuesto de considerar una masa unitaria. Se comprende pues que la altitud está asociada a una cierta superficie de referencia, u origen a partir de la que se mide. La superficie física origen de la altitud, en el sentido corriente del término, es una equipotencial del campo gravitatorio terrestre, concretamente el geoide, que como ya es sabido coincide sensiblemente con el nivel medio del mar en reposo; la latitud recibe en ese caso el nombre de ortométrica y su valor es el del segmento determinado por el punto del terreno y su proyección sobre el geoide, siguiendo la vertical física o línea de la plomada.

En los últimos años se ha introducido una nueva altitud referida al modelo matemático de la Tierra, esto es al elipsoide de revolución. Su valor es también el del segmento formado por el punto en cuestión y su proyección sobre esa superficie, siguiendo la normal a la misma. Igualmente, en este segundo caso se podría definir como el cociente entre la energía potencial, propia de un campo gravitatorio imaginario engendrado por esa Tierra elipsoidal, y el valor teórico de la gravedad asociada al mismo, la llamada gravedad normal. Esta última altitud, conocida con el nombre de elipsoídica o geométrica, no es igual por tanto a la que hemos denominado ortométrica; la diferencia entre ambas es del mismo orden que la ondulación del geoide, es decir está aproximadamente comprendida entre cero y cien metros. En cualquier caso es evidente que no se puede con-

cretar exactamente el valor de cualquiera de ellas sin que se haya obtenido el correspondiente a la gravedad. Esa es en definitiva la circunstancia que vino imposibilitando su correcta evaluación hasta el siglo XIX, en que aparecieron por fin los primeros gravímetros⁶², basados en el principio físico del péndulo simple. El que las altitudes anteriores, o absolutas, tardaran en saberse con gran exactitud, no significa que ocurriera lo propio con las relativas, o desniveles, ya que al hallar las diferencias se eliminaban la mayoría de los errores⁶³.

62 La primera determinación de la gravedad en España la realizó Gabriel Ciscar en Madrid, durante el año 1800, con un equipo de cuatro péndulos, según una nota redactada por él mismo en 1821; dando cuenta además de una memoria lamentablemente desaparecida. El valor encontrado por ese marino valenciano fue $g = 980.4486 \text{ cm. s}^{-2}$. Con independencia de esa medida, la gravimetría la inició en España el geodesta Joaquín Barraquer y Rovira, el cual hizo, en 1877, una determinación absoluta con un péndulo de inversión en el antiguo edificio del Instituto Geográfico (Calle Jorge Juan nº 8. Madrid), que serviría de base a las que efectuaría en el Observatorio Astronómico de Madrid, entre los años 1882 y 1883.

63 Los métodos topográficos y geodésicos que pretenden el cálculo de los desniveles reciben el nombre de nivelaciones. Las nivelaciones se suelen clasificar en geométricas, o directas, y en trigonométricas o indirectas; y también en simples y compuestas según que se determine el desnivel con una sola visual o con varias. En las nivelaciones geodésicas, exclusivamente geométricas, ha de tenerse presente la falta de paralelismo de las superficies equipotenciales: en todos los puntos de una de esas superficies se conserva constante el producto de la gravedad y de su distancia a otra superficie tomada como origen. Como la gravedad es función de la latitud, resultará que al variar la coordenada deberá de hacer lo propio la altitud, de ahí la falta de paralelismo. Existen además las nivelaciones barométricas, basadas en la variación de la altitud con la presión atmosférica, y las nivelaciones GPS, aunque los desniveles que proporcione sean, en un principio, elipsoidales.

Hasta bien entrado el siglo XIX no se pudieron cuantificar los desniveles a partir de las imágenes cartográficas del territorio, pues la representación del relieve se realizaba todavía por medio de los perfiles abatidos, un procedimiento tan remoto que se conservan ejemplos prehistóricos; al ya clásico de Çatal Hüyük, en Turquía, puede añadirse otro que ha sido estudiado más recientemente, en el año 2000. Se trata de una estela conservada en el Museo Arqueológico de Oviedo e interpretada en el artículo *Petroglifos cartográficos en la Estela de Carondio (Allande. Asturias), los primeros identificados en España*. La radical transformación de los horizontes geográficos producida en el Renacimiento y el posterior auge de los planos catastrales de los Países Bajos, que ya podían calificarse como modernos atendiendo a su exactitud, no estuvieron acompañados de un desarrollo parecido en la simbología del relieve. Son múltiples los ejemplos que avalan el juicio anterior, aunque el mapa de Palestina, que hizo Mercator cuando tenía tan solo 25 años, con sus perfiles abatidos y superpuestos, junto a un sombreado para realzar el relieve, y los que figuran en los atlas de Ortelius, Hondius, y los de Blaeu, sean suficientemente significativos.

Hasta entonces las alturas de montañas, e incluso de edificios, se calculaban indirectamente por procedimientos trigonométricos, empleando medidas de ángulos y distancias; sin embargo, la incertidumbre de las propias medidas y la temible influencia de la refracción atmosférica hacían que los resultados fuesen poco fiables. No obstante cambian pronto las expectativas, gracias a los experimentos barométricos de E. Torricelli, evidenciando la existencia de la presión atmosférica, y a los de B. Pascal, poniendo de manifiesto su variación con la altitud, cuyos valores absolutos estaban a punto de ser hallados por vez primera, con un cierta fiabilidad. A Pascal se le debe además la afirmación tan trascendente de que el mar está todo al mismo

nivel, es decir igualmente distante del centro de la Tierra en todos sus puntos. Ante el éxito de la nivelación barométrica efectuada por él, proliferaron en los años siguientes fórmulas que permitían obtener la altitud de un punto haciendo intervenir diversas constantes meteorológicas. La práctica de este tipo de nivelación se desarrolló sin interrupción a partir de entonces, contemplándose desde luego como el método ideal que iba a ser empleado en las múltiples exploraciones que se avecinaban. Quizás sea el gran geógrafo A. Humboldt, el representante más genuino a ese respecto, pues señaló mediante ese procedimiento la existencia de nuestra meseta peninsular, aparte de sus otras mediciones de altitud en el viejo y nuevo mundo. El descubrimiento lo realizó gracias a los perfiles efectuados en España durante el año 1799: uno de Valencia a Galicia y otro desde Granada a los Pirineos. La complejidad de las observaciones barométricas era manifiesta, en vista de las pocas altitudes absolutas que se conocían a comienzos del siglo XIX. El propio Humboldt refería en 1807 que solo habían sido medidas las alturas de sesenta y dos montañas, la mitad de las cuales las había obtenido el mismo. También fue pionero al representar el relieve en sus mapas mediante el sistema todavía novedoso de las normales, al que nos referiremos más adelante.

Con la creación de la Academia de Ciencias de París se establecieron las bases necesarias para la correcta evaluación de las altitudes. El abad Picard, que como ya es sabido fue uno de los miembros fundadores, introdujo el principio de la nivelación trigonométrica, al tener la idea de medir las distancias cenitales para calcular la diferencia de altitudes entre los extremos de un lado geodésico, calculando de esa forma el desnivel del río Sena entre Sèvres y Nôtre Dame. Picard y su discípulo la Hire indicaron, asimismo, la conveniencia de estacionar el nivel en el punto medio del segmento que se pretendía nivelar, siendo por tanto el verdadero iniciador de la nivelación geométrica, el método más exacto para obtener el desnivel entre dos puntos dados. Siguiendo a Pascal, afirmaba Picard que son puntos a nivel aquellos igualmente alejados del centro de la Tierra; su relación con la altimetría se acentuó al comprobar que el Director del Observatorio de París, que él había recomendado a Luis XIV, insistía en esa idea. En efecto, G. D. Cassini fue el que adoptó finalmente el nivel medio del mar como origen de altitudes, generalizando así la definición anterior. Desde entonces aparece el mar como una superficie tangible sobre la que se apoya el relieve terrestre y a la que hay que referir las medidas sobre él efectuadas.

Volviendo a la representación del relieve, conviene indicar que el mandato cartográfico de la Academia de Ciencias no se cumplió totalmente hasta que a Cassini de Thury se le encargó el Mapa General de Francia, con otros regionales a escala 1/86400; un mapa que se convertiría, a la larga, en una obra maestra precursora de los mapas topográficos contemporáneos. El mapa, conocido después como carta de Cassini, lo terminó en realidad su hijo Cassini IV, que lo presentó formalmente a la Academia en 1789. Sin embargo esa imagen de Francia se vería pronto superada tras ser analizada pormenorizadamente por una Comisión presidida por Laplace, la cual dictaminó en 1817 la necesidad de confeccionar el denominado Mapa de Estado Mayor, cu-

los levantamientos a escala 1:40000 (editados a 1:80000) se ultimarían entre los años 1818 y 1863. En la decisión de la Comisión influyó poderosamente la mala determinación de las coordenadas geográficas, amén de otros defectos entre los que se destacó la inadecuada simbología que había sido empleada con relación al relieve; pues Cassini había pretendido obtener una perspectiva caballera del territorio, siguiendo así la tradición impuesta por los militares desde el siglo XVI.

A medida que fue aumentando la exactitud de los mapas planimétricos se constató definitivamente la inconveniencia de los perfiles abatidos para representar el relieve. Uno de sus mayores inconvenientes, máximo si se sombreaban, era la ocultación de la información previamente plasmada en el mapa. Las dificultades que se les planteaban a los cartógrafos eran tales que algunos como G. Delisle, nombrado primer geógrafo real de Francia en 1718, llegaban a exasperarse, como prueba su afirmación de que para que un mapa pareciera agradable no debía incluir ninguna montaña. Cassini trató de solventar el problema añadiendo un sombreado difuminado según la geomorfología del terreno, que recuerda en cierto modo al método de las normales. En todo caso él era consciente de la insuficiencia de su método, pues respondía a las críticas afirmando que la causa principal era la falta de puntos con altitud conocida y fiable, así como lo larga, difícil y costosa que resultaba la representación del relieve. Sin embargo las críticas⁶⁴ no cejaron habida cuenta de que a esas alturas de siglo era más creciente el interés por los desniveles, plenamente justificado por otra parte, si se piensa en las continuas obras de Ingeniería, canales y ferrocarriles fundamentalmente, y en el hecho, quizás más determinante, de que las necesidades militares eran acuciantes para la adecuada realización de planos de fortificación, en que apoyar el mejor emplazamiento de las piezas de artillería y otras cuestiones logísticas, como la guarnición de la tropa.

64 F. Dainville sintetizó muy bien en 1970 la situación de entonces, al asegurar que a los mejores cartógrafos del final del siglo XVIII no les preocupaba demasiado la representación gráfica del relieve, al contrario que a sus sucesores de comienzos del XIX, profundamente preocupados por la misma.

Al final del siglo XVIII ya se habían introducido dos métodos que no solamente servían para representar gráficamente el relieve terrestre, sino que también permitían poder obtener las altitudes del cualquier punto a partir de la propia representación. Los dos métodos que acaban de citarse son el conocido con el nombre de normales y el actual de las curvas de nivel. El mayor sajón J. G. Lehmann fue el primero que, hacia 1799, dio a las normales (líneas o trazos de ancho variable) una aplicación diferente a la que había tenido hasta entonces, sugerir las laderas con mayores o menores ángulos de pendiente. Finalmente las concibió como proyección de una parte de la línea de máxima pendiente, de manera que su conjunto describiera verdaderamente el espacio topográfico. El relieve se representaba en ese caso mediante trazos dirigidos según la pendiente mayor, oscureciéndolos a medida que aumentaba la inclinación del terreno. La longitud de cada uno de los trazos se correspondía con un determinado desnivel, existiendo entre ellos una separación que, generalmente,⁶⁵ era el cuarto de dicha longitud. El método resultaba realmente eficaz desde el punto de vista plástico, siempre que se dispusiera de suficientes puntos de altitud conocida; de

ahí su rápida aceptación por los estamentos militares y la consiguiente inclusión en la cartografía producida por los mismos.

65 Lehmann reguló el grosor y la separación de cada una de las normales mediante una escala o diapasón de nueve grados, tratando de expresar así la intensidad variable de la reflexión de la luz al considerar una iluminación cenital del relieve. Naturalmente en las minutas originales había que dibujar previamente las curvas de igual altitud para que las normales fuesen perpendiculares a ellas por tratarse de líneas de máxima pendiente.



Dos fragmentos del Plano del Término Municipal de Zaragoza, levantado por el Topógrafo D. Dionisio Casañal y Zapatero a escala 1:5000.

De entre toda ella debe destacarse la formada por los Ingenieros Geógrafos militares de Napoleón y más concretamente la que acabaría denominándose *Carta del Emperador*, una obra cartográfica sobresaliente dibujada a escala 1:100000, compuesta por 420 hojas de 0.80 x 0.50 m. que cubrían Europa: del Rhin al Dvina y del Báltico al Tirol. Posteriormente surgieron variaciones del método suponiendo iluminaciones oblicuas (generalmente bajo un ángulo de 45° y viniendo del NW)⁶⁶; un excelente ejemplo con el relieve así representado es la serie de mapas realizada por el suizo H.G. Dufour. Más adelante se emplearon colores diferentes para las normales, claros si se trataba de zonas elevadas, oscuros para las regiones de menor altitud y otros aún más oscuros para las superficies situadas a la sombra. El balance final de la aplicación de este sistema de representar el relieve presenta dos inconvenientes graves: por una parte se recargaba considerablemente el dibujo, ocultando, como los perfiles abatidos, detalles planimétricos o incluso pudiendo confundirse con alguno

de ellos; por otro lado no permitían obtener la altitud de un punto por interpolación, una cualidad que como es evidente debe caracterizar a cualquier representación altimétrica rigurosa.⁶⁷

66 El hecho de que la luz provenga del N.W. no es posible por las posiciones que ocupa el Sol a lo largo del día y del año, sin embargo la plasticidad que se obtiene al examinar el mapa es grande, pues se ven las sombras arrojadas de izquierda a derecha y hacia el observador. El delineante dibujaba normalmente con la luz delante y a la izquierda.

67 Los procedimientos empleados para representar el relieve terrestre deben permitir hallar la altitud de cualquier punto del mapa, deben también reflejar bien las pendientes y traducir las formas del terreno de un modo tan expresivo como sea posible.

Nada novedoso puede decirse acerca de las curvas de nivel, el mejor método para representar el relieve terrestre, de ahí que solo se señale su principal inconveniente⁶⁸ para aquellos usuarios del mapa poco familiarizados con su lectura, se trata de que no se consigue con ellas un efecto plástico inmediato. Se ha debatido mucho acerca del origen y primera utilización de estas líneas en las representaciones cartográficas. Aunque muchos autores citen a E. Halley como el primero que empleó isolíneas, también otros aseguran que ya lo hicieron tanto Alonso de Santa Cruz en 1536, como el portugués L. Teixeira en el año 1585. Siguiendo la secuencia de aparición de mapas que incluirían líneas consideradas como lugar geométrico, y limitando estas a las relacionadas con el relieve marino o terrestre, deben citarse en primer lugar los manuscritos realizados por los topógrafos holandeses P. Bruinsz (1583) y P. Ancelin (1697). Ambos incluían veriles, en el primer caso referidos al río Sparne y en el segundo para representar los fondos de la desembocadura del Mosa, empleando una equidistancia de cinco pies. Aparentemente entre esos dos años no se emplearon las curvas de nivel para representar la batimetría. El ingeniero holandés N. S. Cruick, más conocido con el nombre latino de Cruquius, realizó otro mapa parecido entre 1728 y 1730, referido en esta ocasión al estuario del Merwede (afluente del Rhin) cuyo fondo acotó con suficientes puntos (al contrario de lo sucedido con sus tributarios).

68 Otro grave inconveniente, ya felizmente superado, es el que aparecía, en los levantamientos topográficos de grandes extensiones, ya que el operador no poseía siempre los necesarios conocimientos geomorfológicos y se limitaba a establecer una redícula en el terreno, determinando la altitud de los vértices de la misma, sin prestar la debida atención a las líneas de cambio de pendiente. El problema podía acentuarse si el relieve era accidentado, pues usualmente los itinerarios topográficos

DESARROLLO DE LOS ARCOS DE MERIDIANO DE 10' DE EXTENSION, Á DIFERENTES LATITUDES.						DESARROLLO DE LOS ARCOS DE PARALELO DE 20' DE EXTENSION, Á DIFERENTES LATITUDES.					
LATITUD DEL ORIGEN DEL ARCO.	X_1	DIFERENCIAS.	LATITUD DEL ORIGEN DEL ARCO.	X_2	DIFERENCIAS.	LATITUD.	X_1	DIFERENCIAS.	LATITUD.	X_2	DIFERENCIAS.
36 0	18485,174	528	40 0	18905,293	544	36 0	30055,739	63,366	40 0	32488,810	66,724
10	3,636	535	10	6,480	541	10	29399,573	65,620	10	325,450	66,285
20	4,319	534	20	7,264	542	20	925,755	63,874	20	336,921	66,807
30	4,743	535	30	7,985	543	30	884,879	64,127	30	357,114	66,887
40	5,268	536	40	8,405	543	40	800,752	64,380	40	370,267	66,925
50	5,784	536	50	8,848	544	50	736,372	64,633	50	397,067	66,930
0	6,320	538	0	9,318	544	0	671,739	64,885	0	416,789	66,925
10	6,848	538	10	9,790	544	10	608,854	65,138	10	468,789	66,930
20	7,377	539	20	10,266	544	20	541,718	65,387	20	504,430	66,930
30	7,907	539	30	10,744	544	30	476,331	65,638	30	533,359	66,930
40	8,437	539	40	11,224	545	40	410,695	65,888	40	561,771	66,930
50	8,967	539	50	11,704	545	50	344,809	66,138	50	590,069	66,930
0	9,489	534	0	12,180	545	0	278,675	66,385	0	618,415	66,930
10	10,003	534	10	12,660	547	10	212,928	66,634	10	645,923	66,930
20	10,567	534	20	13,140	547	20	145,656	66,880	20	475,516	66,930
30	11,101	535	30	13,620	547	30	89,776	67,127	30	400,869	66,930
40	11,626	535	40	14,100	548	40	011,619	67,373	40	327,891	66,930
50	12,171	535	50	14,580	548	50	2884,376	67,619	50	254,886	66,930
0	12,707	537	0	15,060	548	0	376,657	67,864	0	191,247	66,930
10	13,244	537	10	15,540	548	10	306,703	68,109	10	107,639	66,930
20	13,783	538	20	16,020	549	20	740,684	68,354	20	034,129	66,930
30	14,320	538	30	16,500	549	30	672,530	68,598	30	2690,087	66,930
40	14,869	539	40	16,980	549	40	605,732	68,840	40	685,916	66,930
50	15,398	541	50	17,460	549	50	534,892	69,083	50	811,247	66,930
40 0	18306,939		40 0	18819,484		40 0	28468,810	69,083	40 0	26736,961	

Tablas para calcular los desarrollos de los arcos de meridiano y de paralelo en el Mapa Topográfico Nacional. Memorias del Instituto Geográfico.

discurrían por líneas singulares del terreno (divisorias o vaguadas principalmente) y no se identificaban suficientes puntos en los espacios intermedios. Toda esa casuística desapareció paulatinamente a medida que la Fotogrametría se fue incorporando a las tareas cartográficas, puesto que así se eliminó en gran medida la, por otra parte normal, subjetividad del operador de turno.

En torno al año 1771 el ginebrino M. Carla-Bonifás sentó las bases teóricas de las curvas de nivel, llegando a representar con ese procedimiento una isla imaginaria. Once años después aparecería en París su obra "*Methodes nouvelle pour exprimer rigoureusement sur les cartes terrestres et marines les hauteurs et les configurations du terrain*", editada por el Ingeniero Geógrafo J. L. Dupain-Triel. Este ingeniero presentó a la Academia de París, en 1791, su mapa de Francia (ya citado) con curvas de nivel y equidistancia de diez toesas, como anexo de un trabajo teórico. Años después (1798- 1799) lo perfeccionó añadiéndole divisorias sinusoidales y cuatro tonos distintos entre las curvas, a pesar de ello la representación de Francia dejaba todavía mucho que desear. El gran geodesta francés L. Puissant (1769-1843) reconoce en su excelente tratado de Topografía (París. 1820) la aportación trascendental de Du Carla, por entender las curvas de nivel como intersecciones del terreno con una sucesión de planos horizontales equidistantes y proyectadas ortogonalmente sobre uno de ellos. Es muy probable que en la definitiva adopción de este método de las curvas de nivel influyera poderosamente la recomendación de P. S. Laplace, quien propuso decididamente su empleo para obtener la representación más fiable del relieve terrestre; el caso es que desde aquella época comenzaron a usarse sin interrupción en la mayoría de planos y mapas topográficos.⁶⁹

⁶⁹ En la práctica el curvado de los planos solo se introdujo primeramente para regiones poco extensas, puesto que así resultaba más fácil la captura de la información altimétrica

Creada la Sociedad Geográfica de París, en el año 1821, una de sus primeras actividades fue la doble convocatoria (1822, 1825) de un concurso para lograr un mapa de Europa con curvas de nivel y fomentar de esa manera su empleo generalizado. El anuncio rezaba así: "*Determiner la direction des chaines de montagnes de l'Europe, leurs ramifications et leurs élévations succesives dans toute leur étendue*". Aunque el primer premio se declarara desierto lo cierto es que la convocatoria sirvió para que surgiera el primer boceto altimétrico del continente. Ese fue el trabajo preparado por los daneses J. H. Bredsdorf y O. N. Olsen, que si bien representaron el relieve con normales, recibieron una recompensa de 600 francos de oro. El mapa fue mejorado después por Olsen, acompañándolo de una memoria en la que justificaba el empleo, en esta segunda versión, de las curvas de nivel dada la gran cantidad de altitudes (alrededor de 20000) que había logrado recopilar para la ocasión; añadiendo que no sabía de nadie que hubiese efectuado algo parecido hasta entonces, para una superficie tan considerable. También comentaba Olsen que las normales, si se dibujan correctamente, requerían el conocimiento previo de tantas altitudes como se necesitarían para el curvado, creyendo asimismo que las curvas de nivel con una equidistancia de 1000 pies proporcionaban un buen esquema orográfico del continente. Por otro lado aseguraba que lo ideal hubiera sido lograr dos representaciones complementarias: una mediante normales y otra con curvas de nivel, pero que entendía las dificultades derivadas de su elevado coste.

Su segundo mapa sirvió de base para los primeros atlas físicos de Europa, como el realizado por H. Berghaus en 1842 con el título *Phisikalischer Atlas* (1:6640000), cuya copia incluiría luego A. K. Johnston, en su atlas mundial del año 1848 (*The Physical Atlas*). La copia se titulaba *Los Sistemas Montañosos de Europa representados mediante curvas de nivel*, dibujándose con trazo grueso las correspondientes a altitudes de 1000 pies y con otro más fino, y discontinuo, las de 500 pies; en las zonas dudosas se volvían discontinuas las primeras, mientras que en las segundas se incluían puntos que separaban los trazos discontinuos⁷⁰. El autor reconocía la influencia ya citada al rotular en lugar destacado que el mapa se basaba principalmente en la orografía de Europa proporcionada por Bredsdorf & Olsen, con la excepción de las cadenas montañosas de Turquía, Grecia y Cerdeña que se incorporaron de acuerdo con las observaciones y mediciones de Boné, en los dos primeros casos, y de Marmara.

⁷⁰ Quizás sea este el segundo mapa de la península Ibérica con curvas de nivel, basándose en el que ya había formado Olsen, una imagen aceptable de la geomorfología peninsular que se reproduce junto a estas líneas por su innegable interés. Todas las bondades altimétricas del mapa de la península quedan un tanto eclipsadas por la inclusión de un mapa etnográfico de la misma, con el tópico de la Andalucía musulmana, que no deja de sorprender a esas alturas del siglo XIX.

Tales circunstancias y la aparición de atlas sucesivos, en los que el relieve ya era representado mediante curvas de nivel, contribuyeron indudablemente a popularizar su empleo como el mejor medio para mostrar altitudes absolutas y desniveles con un elevado grado de exactitud. De esa forma en los macizos montañosos comenzaron a sustituirse las normales por curvas de nivel densas, aunque esto se hiciera más por temor a recargar demasiado el mapa que por propio convencimiento. El dilema permaneció por tanto durante cerca de un siglo, sin que los cartógrafos supiesen conciliar las normales convencionales con las curvas de nivel, consideradas todavía como una verdadera novedad. En todo caso, la importancia de tales curvas, usadas aisladamente o en combinación con las normales, no dejaba de crecer; a pesar de ello, la solución a la coexistencia armoniosa de los dos métodos para representar el relieve no se iba a lograr hasta algunos años después, en que se optó finalmente por el método de las curvas de nivel para representar la altimetría de las series de Mapas Topográficos Nacionales que se iniciaron en la segunda mitad del siglo XIX, coincidiendo con la creación de Organismos Cartográficos especializados.

La perfección alcanzada por la litografía y la impresión en color, posibilitaron la coloración de los espacios entre curvas de nivel a partir de la década 1840- 1850. El principio en que se basó el empleo de las tintas hipsométricas, como nuevo método para representar el relieve terrestre y aumentar su plasticidad, fue simple: "más alto, más claro"⁷¹. Al parecer uno de los primeros en aplicarlo fue el F. Hauslab, aunque K. Koristka y A. Stieler fueran también pioneros en este campo. La magnífica colección de atlas escolares realizados para cada continente, por T. E. Sydow y los trabajos de K. Peucker y A. Hübl son también ejemplos dignos de mención entre todo el colectivo de cartógrafos que veían como solución la adaptación de la imagen coloreada del mapa a las capacidades fisiológicas del ojo humano. Sin embargo ninguna de esas tentativas más o menos teóricas encontró una aplicación realmente práctica y duradera.

71 Las tintas hipsométricas se usan, casi con exclusividad, en las escalas pequeñas (menores de 1:100000 generalmente). En lo que se refiere a la asociación color-altitud, no hay acuerdos universalmente aceptados. Sirvan de ejemplo los siguientes criterios adoptados en la publicación del Atlas de España. Al primer Atlas editado por el Instituto Geográfico y Catastral en 1965, contaba con un mapa del territorio a 1:500000, descompuesto en zonas comprendidas entre las altitudes: 0, 100, 200, 400, 600, 1000, 1400, 2000, 3000 y mayores. A ellas asignaba nueve tintas: verde claro para las dos primeras (más oscura para el intervalo de menor altitud), seis tonos de siena (aumentando la oscuridad con la altitud) para las siguientes zonas y el blanco para las zonas con altitud superior a los 3000 metros. En cambio el criterio adoptado para el Atlas Nacional de España, recientemente publicado por el, ahora denominado, Instituto Geográfico Nacional ha variado sustancialmente. Aunque se mantiene la escala 1:500000, se consideran las zonas comprendidas entre las altitudes: 0,75, 150, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 2100, 2700 y mayores. Los colores contemplados son: tres tintas verdes para las tres primeras zonas (más oscuro si la altitud es menor), dos amarillos (más oscuro si la altitud es mayor), seis sienas (con idéntico criterio que el amarillo) y un gris azulado para superficies con una altitud mayor de 2700 metros.

Todo lo contrario ocurriría en Suiza, en donde la investigación sobre nuevos métodos para representar el relieve produjo resultados verdaderamente sobresalientes. Los primeros surgieron, a partir del año 1870, por las investigaciones de R. Leuzinguer, X. Imfeld, F. Becker y H. Kümmerly entre otros. Todos ellos contribuyeron a la solución final del problema, asociando con una gran armonía y maestría las curvas de nivel, los escarpados (variaciones del método de las normales empleadas cuando la pendiente es generalmente mayor del 50%) y un lavado plástico muy elocuente obtenido por efecto de una iluminación oblicua, similar a la comentada con anterioridad. Ya en el siglo XX, el profesor de Zurich E. Imhof supo hallar la correlación más adecuada entre todos los elementos del relieve, simplificando, exagerando o atenuando las diferentes componentes que intervienen en su representación gráfica. Las principales aportaciones cartográficas del mismo están recogidas en sus numerosas publicaciones, debiendo destacar las varias ediciones de *Kartographische Geländedarstellung* y la más reciente (1982) versión inglesa *Cartographic relief presentation*. Es muy elocuente el comentario que hizo (1980) al respecto I. Kupck: "él (refiriéndose a Imhof) supo mostrar en definitiva que arte y ciencia encuentran así la mayor de sus aplicaciones sobre la imagen cartográfica".

Mientras tanto, la evaluación de los desniveles y de las altitudes no había dejado de progresar desde que apareció, en 1848, el tratado de nivelación debido a Bretón de Champ; un manual que recogía toda la casuística de la nivelación geométrica, el procedimiento ideal para determinar las altitudes. El fue el principal impulsor de una red de nivelación moderna, aunque su ejecución se encargará a P. A. Bourdalouë⁷². La precisión que se alcanzó fue determinante para hacer realidad los proyectos de ferrocarril que se desarrollan en la época, téngase en cuenta que las máquinas de vapor no podían superar pendientes mayores del dos o tres por ciento. El éxito de sus trabajos en el Canal de Suez aceleró la formación, en Francia, de la Red Nacional de Nivelación de Precisión, nombrándose a Bourdalouë responsable principal de todo el proyecto. Por una decisión ministerial del año 1860, se hizo coincidir el origen de las altitudes de la red con el nivel medio del Mediterráneo en la ciudad de Marsella.

⁷²La actividad de Bourdalouë se internacionalizó cuando efectuó su nivelación en el istmo de Suez, comprobando que el nivel medio del Mar Rojo está alrededor de 80 cms. por encima del nivel medio del Mediterráneo, rectificando así el valor de 8 ó 9 metros dado por los Ingenieros Geógrafos que acompañaron a Napoleón en su campaña de Egipto. Obviamente sus resultados fueron básicos para que se construyera el canal en 1869.

Creado ya el Instituto Geográfico y con tales antecedentes, era lógico que se iniciaran rápidamente los trabajos de nivelación de precisión en España. En Febrero de 1.871 se procedió a estudiar los dos niveles enviados desde Suiza por Kern de Arau, los cuales le habían sido encargados por Carlos Ibáñez. El 12 de Agosto del mismo año comenzó la nivelación de la línea Madrid-Alicante, nivelando en los dos sentidos el con el itinerario Madrid-Aranjuez. Seguidamente se continuó hasta llegar a Alcazar de San Juan, incluyendo la nivelación de la Base de Madridejos⁷³ finalizando los trabajos en Enero de 1.872. El día 11 de Febrero se empezó a nivelar partiendo de Alicante para concluir la totalidad de la línea el 13 de Septiembre, al llegar a Alcazar de San Juan. El extremo de la línea en Madrid fue la señal NP26 (655.361 m) colocada en el Observatorio del Retiro, aunque en "previsión de un movimiento" se situaron cuatro más en: La Puerta de Alcalá, Museo del Prado, Ayuntamiento y Palacio Real, formándose así el llamado Polígono de Madrid. La señal origen de la línea y de toda la Red Española de Nivelación fue ubicada en el Ayuntamiento de Alicante, NP1 (3.409 m), una vez enlazada con la regla situada en su puerto, gracias a la cual se determinó el nivel medio del mar⁷⁴, bajo la dirección del Ingeniero Jefe de Caminos, Canales y Puertos de aquella ciudad J. M. Jaúdenes durante los años 1870, 1871 y 1872.

⁷³El itinerario discurrió por la carretera general desde Madrid a Madridejos y desde allí hasta Quero, por un camino vecinal, siguiendo por la línea del ferrocarril hasta Alcazar de San Juan.

⁷⁴La instalación y determinación del nivel medio del Mediterráneo mediante registros mareográficos fue posterior. El mareógrafo construido en Londres por Adie se recibió en Madrid durante la primavera de 1.873. Decidida su ubicación en un muelle del puerto de Alicante, se construyó el edificio correspondiente y se destinó al mismo un Auxiliar de Geodesia con el encargo exclusivo de atender y mantener el mareógrafo, desde su puesta en funcionamiento el día 1 de Marzo de 1.874.

Es muy interesante la afirmación contenida a éste respecto en las memorias del Instituto Geográfico:

Aunque hasta ahora no se han hecho observaciones por medio de mareógrafo, es tan pequeño el que se pudiera llamar error medio de la determinación del nivel medio del mar en Alicante, que no hay inconveniente en combinar por el pronto el resultado de ésta con los obtenidos en la nivelación. Tratándose del nivel medio en el interior del puerto, no se puede considerar más que como un dato aproximado, que podrá sufrir alguna pequeña variación cuando se lleven a cabo las observaciones con un mareógrafo, convenientemente situado. No obstante, son tan reducidas en éste mar, así las variaciones que por las mareas experimenta el nivel medio, como el descenso gradual que se le supone en el Estrecho de Gibraltar a lo largo de la costa del Levante de España, que sólo para el estudio de éste descenso gradual y con el objeto de tener observaciones de la altura del agua exentas del error que proviene de operar dentro de un puerto, se considera necesaria la colocación de tres mareógrafos en ésta costa, bastando para los usos de las nivelaciones de precisión los resultados que se obtengan con estos aparatos y los que proporcionará la observación de una escala en los demás puertos".

La instalación del mareógrafo de Alicante en el año 1.874, sus registros y los de los colocados en Santander y Cádiz,

permitieron comparar los niveles medios del mar en dichos puntos, a través de las correspondientes líneas de nivelación, y constatar que la diferencia entre ellos alcanzaba magnitudes dignas de consideración. En efecto, los niveles medios de Santander y Cádiz estaban por encima del nivel calculado en Alicante, 0.6742 metros (observaciones durante los años 1876 al 1882) para el primer caso y 0.4148 metros (observaciones entre los años 1880 y 1882) para el segundo. Aunque los valores anteriores se obtuvieran sin tener en cuenta la falta de paralelismo de las superficies equipotenciales en la nivelación de las líneas que conectaban las tres ciudades, si pudo afirmarse que el nivel medio del Mediterráneo está bajo el del Atlántico y en mayor medida bajo el del Cantábrico. Debe de hacerse notar, a modo de conclusión, que una vez ultimadas las observaciones de la Red de Nivelación de Precisión a lo largo de las carreteras, que se habían elegido como límites de los anillos, hubo que modificar todo el proyecto para incluir la nivelación de las líneas de ferrocarril, ante la solicitud de varias compañías. Ello produjo una demora en los trabajos que se prolongó hasta el año 1925, fecha en que se publicó el primer catálogo nacional de altitudes.

El armazón geodésico del Mapa Topográfico Nacional de España.

La supresión de la escuela de Ingenieros Cosmógrafos supuso un serio contratiempo para la pretendida formación de la Carta geométrica del Reino. Ello no impidió que su demanda continuase estando presente, en las décadas venideras, al considerar que el mapa debería ser una de las actuaciones prioritarias del gobierno. La situación llegó a ser tan insostenible que la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales se pronunció taxativamente en el año 1852: *"no debe pasar más tiempo sin que la energía de una voluntad decidida, y con el noble empeño de vencer toda clase de obstáculos, por grandes que sean los sacrificios que esto lleve consigo, se emprenda obra tan necesaria como la de nuestro mapa topográfico"*. Ignorando si se produjo la clásica reacción causa-efecto, al año siguiente se creó la Dirección de la Carta Geográfica de España y, dentro de ella, una Comisión que resultó verdaderamente eficaz, pues de inmediato se inició la triangulación geodésica del territorio. Desde su constitución, fueron miembros destacados de la Comisión: Frutos Saavedra Meneses y Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, dos figuras clave de la geodesia española. A ellos se les encargó el proyecto de un instrumento que diera escala a la red y que estuviese a la misma altura, como mínimo, de sus homólogos europeos. La regla geodésica, luego llamada de la Comisión, superó todas las expectativas, no solo por las directrices fijadas en el proyecto sino también por haber sido construida en los talleres más prestigiosos de París, bajo la directa supervisión de los dos geodestas.

La filosofía de la red geodésica era idéntica a la de la francesa, que había ofrecido excelentes resultados, es decir se deberían configurar las cadenas de triángulos a lo largo de los meridianos y de los paralelos. Con ese criterio se constituyeron las cadenas triangulares de los meridianos de Salamanca, Madrid, Pamplona y Lérida, con un incremento longitudinal de dos grados aproximadamente, así como tres cadenas sobre los paralelos de Palencia, Madrid y Badajoz, separadas también alrededor de dos grados. Se

proyectaron, por otra parte, las llamadas cadenas de costa, las cuales se extendieron por el Norte, Este y Sur. La escala de la red la proporcionaron seis bases, que se deberían medir directamente, repartidas por toda la España peninsular, a saber: Madrideojos, Vich, Cartagena, Arcos de la Frontera, Lugo y Olite⁷⁵.

⁷⁵ Solamente se midió la base de Madrideojos con la regla de la Comisión, empleándose en las restantes otra que había diseñado Ibáñez, de ahí que se conociera después con el nombre de aparato de Ibáñez, con prestaciones análogas a las de la anterior pero con menores servidumbres en las observaciones.

La medida de la base de Madrideojos, formada por los vértices Bolos y Carbonera, despertó las expectativas de la comunidad geodésica internacional, sobre todo de la francesa que mandó como representante a un distinguido profesor de su afamada Escuela Politécnica: Aimé Laussedat⁷⁶. La base se materializó sobre el terreno en noviembre de 1857, comenzando la medición real el 22 de mayo de 1858, a partir de Carbonera; a Bolos llegaron el día 7 de septiembre, once días después se volvió a medir la base eligiendo como origen un punto intermedio de la misma, terminando la operación el 5 de octubre. El estudio geodésico correspondiente se publicó por primera vez en 1859: *Experiencias hechas con el aparato de medir bases perteneciente a la Comisión del Mapa de España*; siendo traducido al francés por Laussedat. La medida dirigida por Ibáñez y Saavedra arrojó los resultados siguientes: Longitud directa 14664m.5000 ± 0m.0041, Longitud reducida al nivel medio del mar en Alicante 14662m.8964 ± 0m.0041, Longitud calculada por la triangulación⁷⁷ 14662m.9014. Desnivel Bolos-Carbonera 2m.584 ± 0m.0064. Con la medida de la Base de Madrideojos se inicia verdaderamente la ejecución de la Red Geodésica Española, del rigor con que se hizo da fe el hecho de que una institución tan reconocida como la Academia de Ciencias de París la citara como paradigma.

⁷⁶ Además de profesor de geodesia en dicha Escuela, es reconocido universalmente como el fundador del Fotogrametría. Después de su estancia en Madrideojos, llegó a ser amigo personal de Carlos Ibáñez. Recientemente se ha publicado precisamente el libro *Cartas del General Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero al Coronel Aimé Laussedat*, que recoge parte de la correspondencia mantenida entre ellos.

⁷⁷ Además de la medida directa se hizo otra indirecta, por medio de una triangulación proyectada en torno a la base, siendo Bolos y Carbonera vértices de la misma; triangulación que permitió la determinación trigonométrica del segmento formado por ambos puntos.

Las cadenas de meridianos y paralelos formaron diecinueve cuadriláteros que se fueron denominando con el nombre de la población más importante de la zona, rellenándose sucesivamente de triángulos de primer orden. La observación de la red se ultimó en el año 1892 dentro del cuadrilátero de Cáceres. Posteriormente se densificaría con otra llamada de segundo orden (con lados comprendidos entre 10 a 20 km.) y esta a su vez con otros triángulos de tercer orden, con lados menores (entre 5 y 10 km.)⁷⁸. Las observaciones angulares se realizaron con los teodolitos más precisos de la época (entre 1" y 2" de apreciación) como los fabricados por Ertel, Pistol y Repsold, siguiendo diferentes métodos para obtener la lectura definitiva. Los acimutes de los lados se obtuvieron a partir del lado Observatorio-Hierro⁷⁹, cuyo acimut fue determinado con gran exactitud por astrónomos del Observatorio de Madrid.

⁷⁸ Al final resultarían un total de 573 vértices de primer orden (285 en las cadenas principales y 288 dentro de los cuadriláteros), 2000 de segundo orden y unos 10000 de tercero.

⁷⁹ El vértice Observatorio se refiere al del Retiro, Hierro es un vértice situado en la Sierra de Guadarrama.

Precisamente sus coordenadas astronómicas ($\varphi = 40^{\circ}24'29''.70\text{ N}, \lambda = 3^{\circ}41'16''\text{ WG}$) sirvieron para deducir las geográficas o geodésicas del resto de los vértices de la red, tomando como meridiano origen el que contiene al Observatorio; que pasó así a ser el Datum⁸⁰ de la red española. Sus astrónomos colaboraron muy activamente en las observaciones de las dos cadenas fundamentales: paralelo y meridiano de Madrid⁸¹, bajo la dirección de A. Aguilar. A lo largo de aquellas observaciones se hallaron las coordenadas astronómicas de diferentes vértices para poder controlar, en su momento, la marcha de la compensación, la orientación y la bondad de la red en definitiva. Los cálculos se realizaron sobre el elipsoide de Struve, resolviéndose el problema geodésico directo⁸² con las fórmulas de Puissant, truncando los desarrollos en serie para no considerar los términos de segundo orden⁸³. Las altitudes de vértices se obtuvieron tras enlazar con las señales de la Red de Nivelación de Precisión, empleando niveladas simples o recíprocas y en algunos casos simultáneas. En la medida de lo posible se procuraba siempre enlazar con un vértice geodésico de primer orden, usando la nivelación trigonométrica.

80 Finalizada la observación de la red y realizados los primeros cálculos se conocen todos los lados y ángulos de sus triángulos, pero no las coordenadas geográficas de sus vértices. Es decir que no se puede superponer esa malla triangular sobre el modelo matemático de la superficie terrestre. Esa dificultad se solventa calculando las coordenadas de cualquiera de sus vértices por procedimientos astronómicos; pues bien, a ese punto que hace las veces de origen se le llama Datum. Obsérvese que aunque ya se pueda hacer coincidir el vértice en cuestión con un punto dado del elipsoide, aún sería necesario girar la red para situarla con la orientación debida; esa última operación es el objeto del cálculo del acimut tronomico de uno de los lados de la red que parta del datum.

81 Así lo dispuso la R.O. 1.7.1857 indicando su objetivo "*para que las longitudes y latitudes determinadas con la mayor exactitud pudieran compararse con las deducidas de las triangulaciones geodésicas y señalar con firmeza las perturbaciones locales en esta parte de nuestro globo, comparando su figura con la del elipsoide de revolución*", evidenciándose así la que quizás pueda ser primera mención oficial de la desviación de la vertical y del geode en la geodesia española.

82 El problema geodésico directo es el que se plantea cuando se pretenden conocer las coordenadas geodésicas de un vértice dado en función de las de otro, de la distancia entre ambos y del acimut del lado que los une; es la generalización del paso de coordenadas polares a cartesianas que ya fue citado.

83 Sin embargo, la insuficiencia de los medios de cálculo junto al gran número de observaciones a tratar hicieron que la compensación se pospusiera hasta el año 1950 en que se hizo el ajuste global de la Red Europea, apoyándose en el elipsoide internacional de Hayford y eligiendo como Datum la torre de Helmert en Postdam.

El primer sistema cartográfico empleado en el Mapa Topográfico Nacional.

La creación del Instituto Geográfico en el año 1870 supuso el impulso estatal y definitivo que necesitaba para su culminación un proyecto tan ambicioso como la formación del Mapa Topográfico español. Tan solo unos días después de que se crease el Instituto Geográfico, el Regente del Reino, general F. Serrano, firmó el Decreto (30.9.1870) en el que se detallaban las principales características del Mapa. La primera se refería a la escala de la publicación, fijada en 1/50000. La segunda delimitaba el campo de sus hojas, al ordenar "que el mapa se divida en hojas de 20 minutos de base en sentido de los paralelos, por 10 minutos de altura en sentido de los meridianos". Finalmente, la tercera deja sin indicar el tipo de sistema cartográfico que debería elegirse para confeccionar el mapa: "que se considere como plana la parte de superficie terrestre representada en cada una de las hojas, sin sujetar el mapa a ningún sistema de proyección general".

El prestigio de que gozaba Ibáñez en la comunidad científica internacional incidió muy positivamente sobre la trayectoria del centro recién creado, sobre todo cuando dio a

conocer las líneas maestras de su principal proyecto. A. Hirsch, Secretario por aquel entonces de la Asociación Geodésica Internacional, consideraba a tan emblemático producto cartográfico "como uno de los ejemplos más perfectos de la cartografía moderna". Es incuestionable que el trabajo que inició el Instituto despertó la admiración y la expectación de los que estaban interesados en la medición y representación de la Tierra. Los protagonistas indiscutibles de tan interesante proyecto cartográfico, estaban llamados a ser los Topógrafos del Instituto Geográfico, a tenor de lo que afirmaba Ibáñez en el mes de marzo del año 1871 "dedicado este Cuerpo, compuesto de 300 individuos, a las operaciones topográficas que requiere la formación del mapa general del territorio; ha sido posible plantear las disposiciones preliminares para la publicación que todas las naciones de Europa, incluso Portugal, tiene hacia muchos años por lo menos comenzada"⁸⁴.

84 Estado de los trabajos del Instituto Geográfico en 31 de marzo de 1871. Apéndice nº 4 de la *Descripción Geodésica de las Islas Baleares*.

Las ambigüedades presentes en las dos últimas características del Mapa: modelo elipsoidal elegido y sistema cartográfico que lo transformase en el plano del mapa, fueron pronto resueltas. En primer lugar se decidió adoptar como modelo el elipsoide de revolución propuesto por W. Struve, cuyos parámetros característicos son los que se indican a continuación: semieje mayor de 6378.2983 km. y un aplastamiento polar dado por 1/294.73. En cuanto al modo de obtener el mapa, propiamente dicho, ha de consultarse el tomo primero de las Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico, brillantemente prologado por Carlos Ibáñez y publicado en el año 1875. En él se da cuenta de los trabajos cartográficos efectuados por los dos funcionarios del Instituto, e Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: M. Muruve y A. Bosch, los cuales concluyeron su trabajos⁸⁵ entre los años 1871 y 1875.

85 Los detalles del mismo aparecen resumidos entre las páginas 941 y 951 del referido volumen.

Al referirse al Mapa, dentro del prólogo, afirmaba Ibáñez lo siguiente:

"Se han dedicado, por lo tanto, algunas páginas a todas aquellas noticias que el lector ha menester para apreciar el conjunto de la grande obra nacional encomendada al INSTITUTO, y cerciorarse de que se desenvuelve armoniosamente desde los fundamentos primeros, hasta su último remate: el mapa topográfico de España. Regada nuestra patria en esta rica y utilísima parte de la geografía, puesto que todas las naciones de Europa se hallan ya en posesión de sus grandes mapas oficiales, acude, por fin, al palenque científico con los primeros frutos de su reciente laboriosidad. El Mapa, con cuya hoja de Madrid comienza la representación del territorio español en magnitud lineal cincuenta mil veces menor que la realidad, se traza, dibuja y reproduce como indica la última de las Memorias que se dan a luz".

La imagen plana de cada uno de los trapecios curvilíneos definidos sobre la superficie del elipsoide de Struve se dibujaron independientemente, procurando que el desarrollo de los meridianos y paralelos del mapa coincidieran, en la medida de lo posible, con el de sus homólogos



Triangulación urbana de Madrid. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.



elipsóidicos. Es como si se asimilara la región delimitada por los trapecios anteriores a otra plana de la misma forma sobre los planos tangentes trazados por los centros de los mismos; dicho de otra manera, la región del elipsoide se transformaría cartográficamente en otra constituida por la superficie poliédrica limitada por los planos tangentes ya citados. Esa semejanza es precisamente la que da nombre a este sistema cartográfico, también conocido como proyección poliédrica⁸⁶. El sistema no puede encuadrarse dentro de ninguna de las familias clásicas: equivalentes y conformes, aunque analizado a nivel local (en el campo de cada hoja) produce resultados muy satisfactorios por mi-



Plano de Zaragoza, levantado por el Topógrafo D. Dionisio Casañal y Zapatero entre 1878 y 1880.

nimizarse las anamorfosis de todo tipo. Por el contrario, su mayor inconveniente se presenta cuando el análisis se efectúa desde un punto de vista global (involucrando varias hojas) y se pretenden representar en un mismo plano

todas las hojas que representan a la región considerada. Efectivamente, el problema es en todo análogo al que se plantea cuando se desarrolla la superficie de un poliedro, de modo que han de aparecer discontinuidades, sin información geográfica, coincidentes con las desgarraduras existentes entre las distintas caras de la superficie poliédrica⁸⁷.

⁸⁶ El primer sistema cartográfico empleado en el Mapa Topográfico Nacional también era conocido como proyección natural, una denominación que pretendía reconocer el carácter local de la misma y el modo en que se dibujaba el mapa: procurando que los desarrollos de los meridianos y de los paralelos del elipsoide se conservasen en el plano. Otro de los nombres que la identificó, en su momento, fue el de proyección policéntrica, en atención a los múltiples centros de la proyección presentes en el mapa, uno para cada una de sus hojas. Digamos por último que es más clásico encuadrarla dentro del grupo de las llamadas trapezoidales o trapeziformes, un apelativo más acorde con su fundamento geométrico, en cuanto que las imágenes de los trapecios curvilíneos son a su vez trapecios planos.

⁸⁷ La justificación geométrica es clara, imposibilidad de que en un vértice común a cuatro hojas valga cuatro rectos la suma de los cuatro ángulos. Como ejemplo elocuente y muy singular, por la personalidad de su autor, se debe citar el dibujo de dos dodecaedros, posibles representaciones de una esfera, así como el desarrollo plano de uno de ellos. El dibujo fue realizado por A. Dürero, en el año 1538, para ilustrar su intención de proyectar el globo terrestre sobre un poliedro, entendiéndolo como un compromiso entre la superficie esférica y el plano; esa novedosa transformación, introducida por él, cobró otra vez actualidad a comienzos del siglo XIX gracias a los mapas de C.G. Reichard y J.W. Woolgar.

Volviendo al trabajo efectuado por los dos Ingenieros del Instituto Geográfico, hay que subrayar la importancia del mismo, una buena aplicación de la geodesia geométrica en la que hicieron uso de las propiedades de los dos radios de curvatura principales del elipsoide: el del primer vertical y el de la elipse meridiana. Basándose en ellos determinaron los desarrollos de los arcos de paralelo y de meridiano, en el primer caso el cálculo era obvio, pero el segundo no era tan evidente⁸⁸ al tratarse de un arco elíptico. Las dificultades que les surgieron, al contar con unos medios de cálculo tan rudimentarios, fueron de tal entidad que gran parte de su valiosa contribución cartográfica se centró en la búsqueda de fórmulas que hicieran más accesibles los cálculos.

⁸⁸ La operación no era nada trivial al tener que resolver una integral elíptica definida, que no es del grupo de las inmediatas.

Los resultados de sus laboriosos cálculos los reflejaron en las tablas adjuntas, detallándose allí los desarrollos de los arcos de meridiano y de paralelo para las latitudes y longitudes que delimitaban el territorio, que iba a ser representado en el mapa. El haber sido designado el desarrollo del meridiano con la letra Y no es casual, pues está directamente relacionado con la ordenada empleada en el dibujo, como pronto se verá. Análoga consideración se puede hacer con relación al empleo de la letra X, ya que se trata de una magnitud asociada a la abscisa que habrá de usarse en el mapa. Acto seguido explican el empleo de las dos tablas para obtener los lados de todos los trapecios curvilíneos del elipsoide, dando el ejemplo de los relativos a la hoja de Madrid, con una latitud inferior de $40^{\circ} 20'$. De ese modo resulta que los lados no paralelos del trapecio valdrían $18507_{m.021}$, en cuanto a las bases, de latitudes $40^{\circ} 20'$ y $40^{\circ} 30'$, vendrían dadas por $28326_{m.921}$ y $28257_{m.114}$. La diferencia entre ambas, poco más de 19 cm, era por tanto despreciable a la escala prevista; en cambio resultaría muy significativa si se hubieran elegido las bases superiores de los dos trapecios extremos, situadas a latitudes de 36° y de $43^{\circ} 40'$, pues entonces alcanzaría un valor mayor de 63 cm. Asimismo hacen ver que la discrepancia entre los lados meridionales, los no paralelos, es insignificante dentro de la España peninsular: inferior a las cinco décimas de milímetro.

En el punto octavo de su aportación a la Memoria del Instituto, habían reconocido la inadecuada representación cartográfica en que se estaban apoyando y que trataban de sustituir. Así debe entenderse, al menos, su afirmación "No es posible fijar de antemano el número exacto de hojas que han de componer todo el Mapa, pues para ello falta el conocimiento de las longitudes y latitudes de varios puntos del contorno de España, aún no determinada con precisión. Trazando las hojas en uno de los pequeños mapas publicados y previa consulta de algunas longitudes y latitudes bien conocidas, como las de *Peñas, Llatias, Conjureros, San Fernando, Mongó, ...*, resultan mil setenta y ochos⁸⁹ hojas". Antes ya habían especificado también que el origen de las longitudes iba a ser el meridiano de Madrid, realmente el que pasaba por el Observatorio Astronómico del Retiro.

⁸⁹ La publicación consta, verdaderamente, de 1.122 hojas numeradas, de Oeste a Este o de Norte a Sur, desde el 1 al 1.130. Este desfase se produjo porque el mapa empleado para tal fin, el de España realizado por Coello a 1:200.000, poseía defectos que hicieron posible la asignación de números a zonas inexistentes o que se dejaron sin numerar otras que lo requerían. Ese es el motivo de que a 13 números no le correspondan hojas y de que por el contrario existan 5 con numeración bis, editadas separadamente. Del conjunto total, 1.042 corresponden a la península, 1 a la Isla de Alborán, 32 a las Islas Baleares y 47 a las Canarias.

Aunque en el penúltimo párrafo de su artículo manifiesten "Terminado se encuentra el grabado en piedra y a cinco colores, de la hoja central, y vencidas quedan con su publicación todas las dificultades prácticas, relativas a la clara y exacta representación de cuantos detalles consiente la escala adoptada...", lo cierto es que no dan plena cuenta del modo en que se ha de dibujar el mapa. Dado que el trabajo apareció en el primer tomo de las Memorias del Instituto bajo el epígrafe PUBLICACION DEL MAPA DE ESPAÑA, PARTE PRIMERA y en los siguientes no figura su continuación, es razonable pensar que la segunda parte debe permanecer inédita, aunque se refiriese a una cuestión de tanto interés práctico. No obstante, los propios autores habían indicado indirectamente el procedimiento a seguir, toda vez que asociaron las letras Y y X a los desarrollos respectivos de los diez minutos de arco de meridiano y de los veinte minutos de arco de paralelo, como ya quedó dicho.

En el plano del mapa debían figurar representados los vértices geodésicos ubicados dentro del trapecio elipsoídico correspondiente, sea cual fuere el orden de la triangulación a la que pertenecieran. El cálculo de sus coordenadas geodésicas, latitud y longitud, se realizó empleando como Datum el primero establecido en España; es decir el vértice Madrid (Observatorio Astronómico del Retiro), cuyas coordenadas fueron $\lambda = 0^{\circ} 0' 0''$ y $\varphi = 40^{\circ} 24' 29'', 70$ N. La altitud de ese vértice de partida se fijó en $668_{m.31}$ sobre el nivel medio del mar en Alicante.

Naturalmente fue obligado establecer con carácter previo el necesario sistema cartesiano. Su origen coincidió con la imagen cartográfica del centro del trapecio curvilíneo del elipsoide, es decir con la imagen de la intersección del meridiano y paralelo central del mismo. Definido ese origen, o centro cartográfico, se trazaban los dos ejes coordenados mutuamente perpendiculares y se procedía después a localizar los puntos correspondientes a las cuatro esquinas del trapecio plano. Para ello se marcaba sobre el eje de las *ies*, a uno y otro lado del origen, un segmento idéntico a la mitad del desarrollo del arco de meridiano

comprendido entre los dos paralelos extremos, una magnitud que se podía hallar sin dificultad a partir de la tabla correspondiente.

Por los extremos del segmento anterior se dibujaban dos rectas paralelas al eje de abscisas, después se marcaban, a uno y otro lado del eje de las ordenadas, la mitad del desarrollo del arco de paralelo, deducido en función de la latitud superior o inferior del trapecio del elipsoide; esas dos magnitudes se obtenían también apoyándose en la tabla confeccionada al efecto. Los dos segmentos así obtenidos, perpendiculares al eje de las *ies*, eran precisamente las imágenes de los paralelos pertenecientes al trapecio considerado. Los lados no paralelos de ese trapecio plano, eran en una primera aproximación las imágenes de los meridianos extremos de su homólogo elipsoidal. El signo de ambas coordenadas cartesianas dependía de los que tuviesen la longitud, en el caso de las abscisas, la diferencia de latitudes, en el caso de las ordenadas. Es pues inmediato que las imágenes de los paralelos serían rectas, paralelas al eje de las abscisas. Por el contrario las imágenes de los meridianos, salvo la del central, son curvas trascendentes, aunque sus curvaturas sean lo suficientemente pequeñas como para considerarlas también rectilíneas; es decir el trapecio curvilíneo se transformaba en el trapecio recto del mapa. De ahí que el nombre más apropiado para este tipo de sistemas cartográficos sea el de trapezoidales⁹⁰ o trapeziformes. Tanto las imágenes de los meridianos como la de los paralelos se podrían dibujar sobre el mapa, una vez graduadas las bases (con los intervalos de longitud deseados) y los otros dos lados (con los correspondientes intervalos de latitud). En las antiguas ediciones del Mapa Topográfico Nacional, como en las actuales, se eligió como intervalo los diez segundos de arco, aunque solamente se rotularon los minutos.

⁹⁰ El origen de estas proyecciones es muy remoto, creyéndose que los cartógrafos de la antigüedad pretendieron simplificar así los desarrollos cilíndricos, de ahí que a veces se les llamase también pseudo cilíndricas. En los siglos XV y XVI se emplearon mucho estos sistemas cartográficos, incluso a efectos de navegación. Su objetivo principal no era otro que simplificar el dibujo, manteniendo en su verdadera magnitud los grados longitudinales, no solo sobre el paralelo medio, sino además sobre los paralelos extremos o sobre otros cualesquiera equidistantes de aquel; en cuanto a la latitud, se conservaba asimismo su valor real sobre el meridiano central. Resultaban así trapecios rectilíneos equidistantes, de manera que las imágenes de los meridianos convergían hacia los polos, mientras que los segmentos que representaban a los paralelos iban decreciendo con la latitud.

Aún a riesgo de equivocarme al no poderlo probar fehacientemente, me permito apuntar la posibilidad de que el modelo cartográfico español pudiera haber servido de patrón para la formación de diferentes series cartográficas europeas. El motivo no es otro que el prestigio científico de Carlos Ibáñez y la, más que probable, defensa que haría de su proyecto, por el que tanto había apostado, ante la comunidad geodésica internacional⁹¹. Mi sospecha parece más fundada, en cierta medida, cuando se examina la descripción de los sistemas trapezoidales empleados en diferentes países europeos, incluida España, realizada por el Ingeniero Geógrafo F. Reignier⁹².

⁹¹ Sus muchas inquietudes se verían prontamente compensadas con la edición de las primeras hojas del Mapa Topográfico Nacional, todas del entorno de Madrid: Colmenar Viejo, Getafe, Alcalá de Henares, Villaviciosa de Odón, etc.

⁹² El estudio es uno de los capítulos de su obra "Les Systèmes de Projection et leurs applications a la Geographie, a la Cartographie, a la Navigation, a la Topometrie, etc.", publicada en París (1957); un resumen del cual apareció también en otro libro de referencia obligada en la Cartografía Matemática "Flattening the Earth, Two Thousand Years of Map Projections", J.P. Snyder (1993).

Para completar el dibujo del mapa hay que añadirle el resto

de la información geográfica que caracteriza el territorio a representar, debidamente identificada por medio de los topónimos correspondientes. Los métodos clásicos para captar, sobre el terreno, dicha información, geográfica y toponímica, fueron los topográficos propios de aquel entonces, es decir: triangulaciones, nivelaciones, poligonales y relleno taquimétrico. La partición del territorio mediante los trapecios elipsoidales, luego transformados en las hojas del Mapa Topográfico, no significaba que la unidad de trabajo en los levantamientos de relleno fuese una hoja determinada. Aunque en realidad no estuviese contemplada como tal, si puede entenderse que ese papel se le asignaba al Término Municipal, pues con la ejecución del proyecto cartográfico de España se institucionalizó, en paralelo, la obtención de los planos de todos y cada uno de ellos. La escala empleada era la misma que la del mapa, es decir 1:25000, aunque a la hora de la edición se emplease la de 1:50000 para minimizar errores.

Con carácter previo a esos levantamientos se materializó sobre el terreno el límite jurisdiccional entre tales Términos, conformándose las actas de amojonamiento correspondientes. Asimismo, al efectuar los trabajos topográficos de cada Término Municipal, se prestaba especial atención a todos sus núcleos urbanos; con la particularidad de que, cuando la importancia de la población lo requería, se adoptaban para su dibujo escalas mayores (generalmente 1:2000 y 1:5000). El manual de instrucciones para esos trabajos de campo establecía la clasificación siguiente: a) capitales de provincia o poblaciones de gran extensión e importancia, b) poblaciones que sin tener esas características fuesen cabezas de Ayuntamiento, y c) el resto de los supuestos. La metodología propia de cada grupo presentaba naturalmente singularidades, que no impedían, en todo caso, la obtención de imágenes urbanas de contrastada fiabilidad geométrica. Con el proyecto del Mapa Topográfico Nacional de España se inventariaron, en definitiva, todos los cascos urbanos de su territorio, logrando al final del proceso la constitución de una fuente documental imprescindible para los que pretendan un conocimiento cabal del mismo.

El proceso cartográfico de la formación del mapa finaliza con el dibujo y rotulación de todos los detalles topográficos captados sobre el terreno y que conforman la información geográfica del mismo. Esta última tarea sería inabordable sin contar con la codificación correspondiente⁹³, una especie de lenguaje compuesto por signos convencionales. Aunque siempre se haya procurado que sean del todo evidentes, no hay lenguajes universalmente aceptados. No obstante, cuando la elección era la adecuada el lector del mapa podía percibir una organización real de cifras y símbolos. En cualquier caso su percepción estará muy influenciada por su experiencia al respecto, hasta el punto de que puede llegar a mediatizar el análisis de una determinada imagen territorial. La simbología afecta en mayor medida a la información planimétrica, pues en la altimetría se limitaba a dibujar la curva de nivel⁹⁴ que iba uniendo los puntos de igual altitud. La semiología cartográfica requeriría un tratamiento específico y más extenso de lo que permiten los límites de este capítulo, aunque, cuando menos, debe quedar constancia de que el mejor signo convencional es aquel que se comprende de

inmediato y sin necesidad de recurrir a explicación alguna.

93 Realmente la codificación ya se había tenido en cuenta durante los levantamientos de campo, al realizar la croquisación que los caracteriza.

94 El dibujo de las curvas de nivel, que ahora se realiza de manera automática, entrañaba ciertas dificultades que se solventaban con experiencia y conocimientos geomorfológicos. En primer lugar se procedía a la interpolación, que desembocaba en el curvado final del plano del mapa. Se comprende por tanto que el producto final adoleciera de los defectos geométricos asociados a la subjetividad del proceso.

Bibliografía general

Arteaga L., F. Nadal. *Las series del Mapa Topográfico de España a escala 1:50000. Instituto Geográfico Nacional.*

Bagrow L. *History of Cartography. Precedent Publishing.*

Broc N. *Les Montagnes au siècle des lumières. C.T.H.S.*

Calatrava J., M. Ruiz Morales. *Los planos de Granada 1500-1909. Diputación Provincial de Granada.*

Crone G. *Historia de los Mapas. Fondo de Cultura Económica.*

Fernández Dauro C. *Disquisiciones Náuticas V. IV. Instituto de Historia y Cultura Naval.*

Imhof E. *Cartographic relief presentation. W. de Gruyter.*

Lasalle T. *Cartographie, 4000 ans d'aventures et de passion. IGN-NATHAN.*

Levallois J. J. *Mesurer la Terre. 300 ans de géodésie française. De la toise du Châtelet au Satellite. Presses de l'École National de Ponts et Chaussées.*

Maling D.H. *Coordinate Systems and Map Projections. Pergamon Press.*

- Measurements from maps. Principles and methods of cartometry. Pergamon Press.

Muro J. I., Nadal F., L. Arteaga. *Geografía, estadística y catastro en España 1856-1870. Ediciones del Serbal.*

Paladini Cuadrado A. *Notas para la historia del Mapa Topográfico Nacional. Militar: Revista de Cultura Militar (nº*

3). Universidad Complutense.

Pelletier M. *La Carte de Cassini, l'extraordinaire aventure de la Carte de France. Presses de l'École National de Ponts et Chaussées. París.*

Reguera Rodríguez A. *Geografía de Estado. Los marcos institucionales de la ordenación del territorio en la España contemporánea 1800-1940. Universidad de León.*

Robinson A. *Early Thematic Mapping in the History of Cartography. The University of Chicago Press.*

Ruiz Morales M. *Los Ingenieros Geógrafos, origen y creación del Cuerpo. Centro Nacional de Información Geográfica.*

-Aportaciones del General Ibáñez e Ibáñez de Ibero a las Ciencias Geográficas. Revista Datum XXI, nº 5.

-El Primer Sistema Cartográfico del Mapa Topográfico Nacional de España. Revista Mapping, nº 109.

-Cartas de Ibáñez de Ibero al francés Aimé Laussedat. Revista Mapping, nº 103.

Ruiz Morales M., M. Ruiz Bustos. *Forma y Dimensiones de la Tierra, síntesis y evolución histórica. Ediciones del Serbal.*

Sobel D., W. J. H. Andrewes. *The illustrated longitude. The true history of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time. Fourth Estate.*

Torroja Menéndez J. Mª. *Los antecedentes del Mapa Topográfico Nacional y la Real Academia de Ciencias. Revista Mapping, mayo 1993.*

Thrower N. *Maps & Civilization, Cartography in Culture and Society. The University of Chicago Press.*

Williams J.E. D. *From Sails to Satellites. The Origin and development of Navigational Science. Oxford University Press.*

Yang Q., J. P. Snyder, W.R. Tobler. *Map Projection Transformation, Principles and Applications. Taylor & Francis.*

La Tienda Verde

LIBRERÍA ESPECIALIZADA

CARTOGRAFIA

LIBROS Y GUIAS DE MONTAÑA, NATURALEZA Y VIAJES

DISTRIBUIDORA DE CARTOGRAFIA Y LIBROS DE MONTAÑA

C/ Maudes, 23 (Viajes y Naturaleza)
Tel: 915 353 810 / 915 353 794 - Fax: 915 342 639
C/ Maudes, 38 (Mapas y Libros de Montaña)
Tel: 915 330 791 / 915 343 257 - Fax: 915 333 244

Distribución.
Tel: 915 337 351 - Fax: 915 333 244
Web: www.tiendaverde.org
e-mail: info@tiendaverde.es

Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (IDERC) en su etapa de institucionalización.

Dra. Tatiana Delgado Fernández

Secretaría Ejecutiva de la Comisión Nacional de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (CIDERC), GEOCUBA XII Convención y Expo. Internacional

Resumen

Después de un proceso de varios meses de conciliación con los Organismos de la Administración Central del Estado, se aprobó, en septiembre del 2005, el Acuerdo No. 5535 del Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros que establece la creación de la Comisión Nacional de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba. Este hecho marca pautas en el desarrollo de esta iniciativa nacional.

Este trabajo está encaminado a describir la nueva etapa de la IDE en Cuba en el marco de la CIDERC. Para ello, se utiliza una adaptación del enfoque "State of Play" de un estudio comisionado por EUROSTAT & DGENV en el marco de ISPIRE. En tal sentido, el reporte es organizado en los aspectos siguientes: creación de capacidades, marco legal, datos de referencia y datos temáticos fundamentales, metadatos, acceso y otros servicios, estándares, y uso y eficiencia de la IDE.

Por último, se describen los principales retos que enfrentará la IDERC en un próximo período.

Introducción

La Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (IDERC), habiendo sido en sus inicios (2001-2005) una iniciativa basada principalmente en el entusiasmo y el liderazgo individual de algunos actores, se ha transformado en un proceso institucional apoyado por representantes de los principales sectores del Gobierno, gracias al establecimiento de la Comisión Nacional de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (CIDERC). La CIDERC se crea en virtud de la aprobación del Acuerdo No. 5535 del Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros en Septiembre del 2005.

Este hecho marca un hito en la evolución de la IDE en Cuba, ya que permite el mancomunado esfuerzo de todos los actores en torno a compartir la información geográfica de la forma más eficiente posible y en función de maximizar los beneficios de la sociedad.

Este artículo describe el estado actual de la IDERC bajo su nuevo marco legal (CIDERC) haciendo énfasis en los aspectos proporcionado por el modelo "State of Play" de la iniciativa IDE europea INSPIRE, aunque no es estrictamente fiel al mismo¹.

Finalmente se describen los principales retos de la IDERC en los años próximos.

¹ Un estudio riguroso siguiendo el modelo "State of Play" para la IDERC está siendo enfrentado por la autora como parte de un libro denominado "IDEs en Iberoamérica y el Caribe" en el marco del Proyecto CYTED 606PI0294

Creación de Capacidades

La tabla siguiente muestra las principales actividades llevadas a cabo desde el año 2002 en función de la creación de capacidades a nivel nacional

La actividad de capacitación de Abril del 2006 marca una nueva etapa en este sentido, si se tiene en cuenta que es el primero desarrollado bajo la coordinación de la CIDERC. El mismo contó con la participación de 65 especialistas de los sectores de gobierno, empresariales y académicos, que debatieron las reales condiciones de sus entidades para desarrollar IDEs multisectoriales y multiniveles para toda la sociedad. Esta actividad contó con el auspicio del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, y fue impartido por profesores nacionales y por el Dr. Joep Crompvoets de la Universidad de Wageningen de Holanda. Está previsto un Programa de Fortalecimiento de Capacidades que abordará en un plazo de dos años los temas siguientes:

- Políticas de la IDERC
- IDEs en el medioambiente
- Normas de las IDEs
- Servicios de la IDERC en función de la sociedad

Marco Legal

La Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (IDERC) ha entrado en una etapa de institucionalización a partir de la aprobación del Acuerdo No. 5535 del Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros, en virtud del cual se crea una Comisión Nacional para establecer la IDERC (CIDERC). Con la presencia de personalidades de alto nivel de los principales ministerios e institutos, cuya actuación en la misma puede ser decisiva, la reunión de constitución se llevó a cabo el 7 de Noviembre de 2005.

La CIDERC está integrada por cerca de 40 miembros, representativos de los principales ministerios y la Asamblea Nacional del Poder Popular. La coordinación de la CIDERC está a cargo de la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia, que se apoya en una Secretaría Ejecutiva, basada en el Grupo Empresarial GEOCUBA (principal proveedor de datos espaciales fundamentales para la IDERC).

Hasta la fecha, esta Comisión aprobó las Estrategias de la IDERC 2005-2010; así como su Plan de Trabajo Anual. Durante el año 2006 deben comenzar a funcionar los nuevos grupos de trabajo definidos bajo este nuevo y definitivo marco legal. El año 2006 es decisivo no sólo en cuanto a la creación de capacidades, sino en el establecimiento de las primeras políticas sobre el uso, acceso, disseminación, copyright, precios, etc, de la información geográfica; así como también en el desarrollo de nuevos servicios públicos, sectoriales y de gobierno asociados a la IDERC.

Datos fundamentales

Las escalas y datos disponibles en la IDERC son las siguientes:

Taller-Curso-Seminario	Objetivo	Resultado
Febrero 2002 - Seminario de Infraestructura de Datos Espaciales a cargo de Dora Inés Rey, Colombia, Secretaria Ejecutiva del Comité Permanente de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas	Dar ideas introductorias sobre las IDEs y con ello comenzar la diseminación de la cultura sobre el tema entre los actores de la sociedad	- Cerca de 30 personas, en su mayoría del <i>nivel técnico</i> recibieron el conocimiento
Febrero 2003 - University of Wisconsin-Madison / GEOCUBA Workshop on Clearinghouse, Metadata, and Map Server Technologies to Support Spatial Data Infrastructure Development in Cuba	Familiarización con tecnologías y estándares asociados a las IDEs (Metadatos y Servidores de Mapas)	- Cerca de 40 personas, en su mayoría de <i>nivel técnico</i> , recibieron el conocimiento
Diciembre 2003 - Taller Nacional de la IDERC celebrado en la Universidad de Ciencias Informáticas	Profundización en los componentes de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Cuba (IDERC)	-Cerca de 40 personas de <i>nivel político y técnico</i> recibieron información y conocimientos sobre la IDERC
Noviembre 2004 - University Wisconsin-Madison "IDERC Workshop on Geospatial Metadata Documentation and Clearinghouse Tools to Support Environmental Applications in Cuba"	Conocer aplicaciones de IDEs en el contexto del medioambiente Discutir acerca de las políticas de uso, acceso, diseminación, etc de los datos espaciales en el marco de la IDERC	- Cerca de 40 personas del <i>nivel técnico</i> recibieron el conocimiento - Documento sobre bases para establecer las políticas de la IDERC
Abril 2006 - Generalidades de las IDEs. Implementación a nivel local y nacional Prof. Dr. Joep Crompvoets, Universidad de Wageningen, Holanda	Crear capacidades relacionadas con el uso y manejo de las Infraestructuras de Datos Espaciales entre los diferentes actores de la sociedad cubana	- Más de 60 personas de los <i>niveles político, académico y técnico</i> recibirán un taller y aportarán sus ideas sobre la <i>implementación</i> de la IDERC

- Mapa topográfico 1: 250 000 (cobertura nacional)
- Mapa topográfico 1:100 000 (cobertura nacional)
- Mapa topográfico 1: 25 000 (algunas provincias y ciudades principales)
- Mapa planimétrico 1: 5 000 (principales ciudades y asentamientos urbanos de toda la nación)
- Mapa planimétrico 1: 2 000 (La Habana)

La industria de cartografía está proyectada a la mejora del proceso tecnológico y productivo, con vistas a dar respuesta a la demanda de la IDERC en productos cartográficos y en la calidad, lo cual constituye uno de los principales problemas que enfrentan los proveedores de datos espaciales en la actualidad en Cuba.

La proyección cartográfica usada en estos mapas es la Proyección Cónica Conforme de Lambert (dos conos: Cuba Norte y Cuba Sur) y el datum es el Clarke 1866.

Metadatos

Existen metadatos de los datos disponibles en la IDERC (al nivel más general posible) conforme al núcleo del estándar ISO 19115.

Por otra parte, se han introducido cerca de un centenar de otros metadatos en algunas instituciones del país. El caso más representativo es la documentación mediante metadatos de todas las planchetas del Sistema de Información

Geológica de Cuba a escala 1: 100 000 del Instituto de Geología y Paleontología. En los próximos meses deben publicarse estos metadatos en el Portal Geoespacial Nacional junto a los generales.

El reto más importante de la CIDERC en este sentido es la institucionalización de los metadatos en las organizaciones proveedoras, para lo cual el Grupo de Trabajo de Metadatos está preparando los lineamientos para el desarrollo de dicho proceso de institucionalización.

El catálogo de metadatos de la IDERC tiene características peculiares, ya que se basa en un modelo stateless que renuncia al protocolo z3950 y, por ende, a los estándares que lo contemplan. En su lugar, el catálogo de metadatos de la IDERC se basa en una implementación de los estándares de Servidores de Mapas y Servidores de Objetos (WMS y WFS) considerando los metadatos como dato geoespacial, partiendo de asumir un Perfil de Metadatos para la IDERC donde la zona geográfica es un parámetro obligatorio (Delgado, 2005), por lo tanto, el metadato tiene una expresión espacial en la zona geográfica que inscribe al objeto que documenta, o sea, un rectángulo. Este modelo también facilita la visualización del catálogo como una capa más del Servidor de Mapas.

Acceso y otros servicios

El acceso a los datos de la IDERC está condicionado a las

políticas de acceso que estipule la joven CIDERC. En la actualidad se ofrece acceso público al mapa 1:250 000 desde el Portal Geoespacial Nacional (www.iderc.co.cu), y acceso restringido, desde otros servicios de valor añadido, al resto de los datos disponibles. Con la liberación de las Políticas generales de la IDERC en los próximos meses, otras nomenclaturas podrán ser accedidas públicamente desde el Portal Geoespacial Nacional.

Los servicios que están disponibles explícitamente en el Portal Geoespacial Nacional son:

- Visor genérico de Mapas (Permite visualizar todo lo que se sirve desde el Servidor de Mapas y navegar por sus informaciones)
- Nomenclator y Diccionario Geográfico
- Estadísticas del Mapa de Población según datos proveídos por la Oficina Nacional de Estadística

Implícitamente se puede acceder a los servicios tradicionales de una IDE (WMS, WCS, WFS) desde aplicaciones o servicios de valor añadido externos, siempre que los niveles de seguridad (autenticación) así lo permitan.

Estándares

En general, la IDERC está basada en estándares de la serie ISO 19100 y del Consorcio OGC, como se describe en otros acápite.

Uso y eficiencia de la IDE

La implementación de la IDERC está orientada a explotar el uso de la IDERC en escenarios públicos, de gobierno, sectoriales e institucionales. El producto insignia del escenario público es el Portal Geoespacial Nacional que brinda ya algunos servicios generales como el Nomenclator y Diccionario Geográfico y el Mapa de Población, además de un servicio de visualización de toda la información geográfica contenida en el Portal.

En el GeoPortal se emplean los principales estándares de la industria de la IG (OGC) como los servicios Web Map Server, Web Feature Service, GML, SDL, entre otros.

Además del Portal Geoespacial, existe una estrategia de implementación de la IDERC que abarca las IDEs municipales y provinciales, vinculadas al gobierno en línea; así como otras aplicaciones multisectoriales de apoyo a actividades priorizadas del país como el manejo de riesgos y desastres y el control de flota de vehículos, entre otras.

Trabajo futuro

El trabajo futuro de la CIDERC en función de potenciar la IDERC está condicionado por la Estrategia de la IDERC 2005-2010 y se orienta a implementar la misma en un esquema multisectorial y multinivel, con el objetivo de maximizar los beneficios del uso de la información geográfica compartida para toda la sociedad.

La institucionalización de la IDERC es otro reto del próximo período, mediante la legalización al más alto nivel posible de los roles de cada actor; así como, de las políticas definidas por la Comisión Nacional (CIDERC).

Las actividades de investigación y desarrollo de apoyo a la IDERC son también un desafío y están encaminadas a soportar la implementación de nuevos servicios; así como, apoyar las principales decisiones de la CIDERC. Los principales temas de investigación que están siendo desarrollados son los siguientes:

- Evaluación y medición de impacto de las IDEs
- Aspectos conceptuales de las IDEs
- Semántica Espacial
- Paralelismo (Grid)
- Datawarehouse y minería de datos

Se continuarán asimilando y desarrollando las nuevas especificaciones de OGC, a la vez que se construyan nuevos servicios de búsqueda, consulta y análisis para la IDERC. Una línea de desarrollo lo constituye el servicio Tocororo, que pretende ser un eslabón entre la IDERC y los potenciales usuarios, permitiendo el enlace entre los mapas servidos en la IDERC y los sistemas informativos de los usuarios, con funcionalidades de geo-buscador y geo-consultor.

Otro de los objetivos de la I+D para la IDERC es apoyar el proceso de formación académica en las universidades, para lo cual se están diseñando programas de postgrados y algunos temas de pregrado en Universidades de Informática con la especialización en Geoinformática e IDEs. Este es aún un proceso incipiente que deberá madurar en los próximos años con el apoyo de los miembros de la CIDERC representativos del sector académico.

La integración regional es, sin lugar a dudas, uno de los objetivos en los que se continuará trabajando en el futuro, principalmente como miembro del Comité Permanente para la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas, donde en la actualidad ocupa la vocalía por el Caribe.

Por otra parte, en los próximos tres años continuará en marcha, bajo la coordinación de Cuba, el Proyecto Regional "Evaluación y Potenciación de las IDEs para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe", el cual está conformado por 8 países (Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, México y Uruguay) y deberá realizar sus principales contribuciones en el desarrollo de servicios basados en ontologías que maximicen el uso de las IDEs en función del desarrollo sostenible en los países de América Latina y el Caribe. Este proyecto, financiado por el Programa de Ciencia y Técnica para el desarrollo (CYTED) para cuatro años, deberá revertir sus resultados en los países de la región a través de CP IDEA.

Conclusiones

La iniciativa cubana, tras cinco años de sus primeros pasos, está en un proceso de institucionalización apoyado en el marco legal que le ofrece la Comisión Nacional de la Infraestructura de Datos Espaciales, creada bajo un acuerdo de gobierno.

En la actualidad, la IDERC está enfocada, en el nivel nacional, al fortalecimiento institucional, la implementación de nuevos servicios multisectoriales y multiniveles, y la investigación y desarrollo que garantice la propia auto sostenibilidad de la misma.

En el contexto regional, la CIDERC se propone un papel más activo en el seno de CP IDEA que contribuya a la integración regional en torno al desarrollo de las IDEs en función del desarrollo de nuestros países.

Referencias

- Delgado, T., 2005. Infraestructuras de Datos Espaciales en países de bajo desarrollo tecnológico. Implementación en Cuba. Tesis de doctorado. ITM "José Martí". Marzo 2005.
- EC-INSPIRE: Spatial Data Infrastructures in Europe: State of Play Spring 2005. www.sadl.kuleuven.ac.be/

Uso de información basada en la ubicación para administrar mejor los campamentos de refugiados en todo el mundo - el caso del ACNUR.

Andrés Umaña Echevarría, Pitney Bowes Business Insight

RESUMEN

La Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) fue creada el 14 de diciembre de 1950 por la Asamblea General de las Naciones Unidas para dirigir y coordinar las medidas internacionales para la protección de refugiados y la resolución de problemas de refugiados a nivel mundial. Los grupos de refugiados que caen sobre la responsabilidad de la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) son complejos y diversos, y los desafíos de controlar tales poblaciones en condiciones muy marginales y con recursos limitados son enormes. En los últimos diez años, el ACNUR identificó la necesidad de una solución de información basada en la ubicación para desarrollar y aplicar herramientas para el análisis espacial con el objetivo de lograr la administración eficaz de los campamentos. Este artículo analiza tanto el tema general como los factores de influencia y las posibles soluciones que la ACNUR y sus proveedores de GIS han encontrado a lo largo de su trabajo.

PALABRAS CLAVE

GIS, soluciones geográficas, las Naciones Unidas, poblaciones de refugiados, la ubicación, la localización.

Los grupos de refugiados que caen sobre la responsabilidad de la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) son complejos y diversos. Fundamentalmente, los grupos de interés se dividen en siete categorías: refugiados, solicitantes de asilo, refugiados retornados, desplazados internos protegidos, desplazados internos protegidos retornados, personas apátridas y otros.

Las distintas poblaciones tienen diferentes necesidades y requieren distintas intervenciones del ACNUR y sus socios durante todo el ciclo de vida del tiempo que pasan lejos del hogar. Vivir en campamentos muchas veces es la única solución para las personas desplazadas y el ACNUR administra casi 300 campamentos exclusivos para refugiados (personas desplazadas que cruzaron una frontera internacional en busca de protección) en todo el mundo. Muchos campamentos tienen una población de hasta 25.000 habitantes y en algunos viven cerca de 100.000 personas.

Los desafíos de controlar tales poblaciones en condiciones muy marginales y con recursos limitados son enormes. Conocer más acerca de su distribución dentro de los campamentos y dónde y a quiénes se les deben prestar servicios específicos es un parámetro fundamental para

una acción eficaz por parte de los diversos organismos de ayuda humanitaria.

Muchas veces, los campamentos se crean en contextos de emergencia, se construyen en sólo unas pocas semanas y la planificación del suministro de servicios (agua, saneamiento, salud, educación, seguridad, protección, etc.) debe basarse en la ubicación de necesidades específicas para mantener un estado casi permanente.

Hasta fines de la década de 1990, la planificación geográfica se llevaba a cabo a mano, lo cual demostró ser cada vez más inadecuada a medida que el problema de los refugiados a nivel mundial crecía significativamente y la eficacia de los recursos en el terreno se volvía insostenible. El ACNUR identificó la necesidad de una solución de información basada en la ubicación para desarrollar y aplicar herramientas para el análisis espacial con el objetivo de lograr la administración eficaz de los campamentos. Dadas las limitaciones de los recursos centrales y locales y las diversidades institucionales y ambientales, una solución del Sistema de información geográfica (SIG) simple en función de modelos uniformes no podía brindar la solución en forma adecuada. Los factores operativos clave a considerar fueron:

- La falta de recursos humanos: dos personas del SIG en las oficinas centrales y seis técnicos del SIG (no permanentes) en el área, principalmente en África.
- La capacidad de asimilación del personal de campo (que no pertenece al SIG) se emplea al máximo; de este modo, el ingreso de nuevas herramientas y responsabilidades es sólo posible marginalmente.
- La existencia, disponibilidad, suficiencia, puntualidad y relevancia de los datos requeridos es mínima.
- Enviar a un especialista del SIG para que realice un ejercicio de elaboración de mapas del campamento es costoso y no siempre puede ser una prioridad para los administradores del campamento.
- El acceso a imágenes por satélite de alta resolución es costoso y la disponibilidad en regiones áridas o en bosques tropicales es escasa.
- La recepción del Sistema de posicionamiento global

(GPS) no está garantizada en esas regiones y condiciones.

- Los fondos para actualizar y sustentar el uso de información son escasos.
- La toma de decisiones basadas en el conocimiento todavía debe ser optimizada.
- Podría o no existir un sistema de direcciones o incluso ser parte de la base de datos del censo de la población a nivel del campamento y no todos los campamentos mantienen una base de datos digital de los registros de la población.

La solución

En 1998, el ACNUR empezó un programa exhaustivo de elaboración de mapas de los campamentos establecidos con el objetivo de crear una administración eficaz de las poblaciones, los recursos y las instalaciones.

Distintas asociaciones con organismos humanitarios le han permitido al ACNUR establecer un pequeño equipo del SIG. Sin embargo, por la naturaleza misma de la estructura asociativa, la rotación de personal es elevada. El uso de MapInfo Professional ha sido de ayuda en la transición entre los técnicos y la continuidad de la calidad de su producción. El costo relativamente bajo de adquisición de una configuración básica también es un factor importante ya que los socios, ya sea a nivel global o local, pueden considerar el desarrollo de sus capacidades de información basadas en la ubicación para trabajar en colaboración más estrecha con el ACNUR en el área. El software y el soporte de Pitney Bowes Business Insight (que incorpora a Pitney Bowes MapInfo) facilita los planes de descentralización de los servicios técnicos para acercar más las capacidades analíticas al punto de entrega (los campamentos); herramientas simples con eficiencia probada son fundamentales para un soporte continuo de calidad adecuada.

Por último, el ACNUR eligió a Pitney Bowes Business Insight como su socio de tecnología de localización debido a su flexibilidad y facilidad de uso para operaciones continuas, facilidad en la aplicación de plantillas hechas a medida, estándares y símbolos que se administran desde las oficinas centrales y se divulgan a los operadores de campo, capas básicas comunes (globales) que se administran centralmente, el hecho de evitar que los usuarios creen sus propias capas (sólo los espacios de trabajos locales forman capas básicas iguales) y el costo relativamente bajo de las licencias.

Los resultados

Dejando de lado las capacidades técnicas y las restricciones laborales asociadas con la elaboración de mapas de los campamentos, la cobertura de más de 300 campamentos de refugiados (¡y de más de 200 personas desplazadas internamente sólo en el norte de Uganda!) es un desafío de por sí para cualquier organización o empresa. El ACNUR ahora está comenzando a captar la participación de los socios en la aplicación de las pautas de elaboración de mapas para trazar mapas de más campamentos.

En 2007, los socios trazarán mapas de campamentos en Namibia, Tanzania y Uganda. El ACNUR espera ampliar esta cobertura a otros países con socios adicionales. La optimización de la información basada en la ubicación en la toma de decisiones a nivel local para la administración de los campamentos y para la planificación a largo plazo a nivel global debe hacerse realidad para el ACNUR, lo cual sólo puede alcanzarse mediante asociaciones sólidas.

"Las soluciones de GIS nos han equipado con una capacidad de información basada en la ubicación que está empezando a ayudarnos a descentralizar la elaboración de mapas de los campamentos hacia organismos humanitarios asociados en el área", afirmó Luc St-Pierre, Gerente Principal de Sistemas de Información Geográfica, ACNUR.

"La búsqueda de personal es nuestro desafío más grande y la capacidad de delegar la función crítica de elaboración de mapas de los campamentos a organismos nos brindará mucha más eficiencia para ubicar servicios e instalaciones, como el saneamiento.

Asimismo, la ubicación de servicios como los de educación, salud, seguridad y protección es fundamental para la administración de los campamentos que muchas veces son como pequeñas ciudades, ya que alojan hasta 100.000 personas".

Respaldando este objetivo, St-Pierre apunta a desarrollar un portal Web global para proporcionarles a los gobiernos y organismos una visualización compartida de los datos, acceso a la entrada de datos y la creación de valiosos informes.

Nota:

La Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) fue creada el 14 de diciembre de 1950 por la Asamblea General de las Naciones Unidas para dirigir y coordinar las medidas internacionales para la protección de refugiados y la resolución de problemas de refugiados a nivel mundial. El principal objetivo del ACNUR es proteger los derechos y el bienestar de los refugiados. ACNUR lucha por garantizar que todos puedan ejercer el derecho a solicitar asilo y encontrar un refugio seguro en otro estado, y que puedan volver a su hogar en forma voluntaria. Al ayudar a los refugiados a volver a su propio país o a establecerse en otro, el ACNUR también busca soluciones duraderas para esa difícil situación.

El Comité Ejecutivo del ACNUR y la Asamblea General de las Naciones Unidas también han autorizado la participación de la organización en otros grupos. Éstos incluyen personas que son apátridas o cuya nacionalidad está cuestionada y, en ciertos casos, personas internamente desplazadas.

En más de cinco décadas, el organismo ha ayudado a alrededor de 50 millones de personas a reanudar sus vidas. Desde enero de 2006, un personal de aproximadamente 6.689 personas en 116 países continúa ayudando a 21 millones de personas.

RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA Y MATERIALIZACIÓN DE UNA ESCULTURA

Javier A. Carelli y José E. Juliá. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Resumen

Entre las aplicaciones no topográficas de la Fotogrametría, una de las más difundidas es la restitución de objetos de valor artístico o histórico con el propósito de repararlos, o reconstruirlos, en caso de haber sufrido daños o destrucción. Este trabajo describe una metodología basada en procedimientos fotogramétricos digitales para la obtención de modelos tridimensionales a partir de fotografías tomadas con cámaras digitales de uso corriente. Se presenta, además, la réplica de una escultura del Dr. Juan B. Terán, fundador de la Universidad Nacional de Tucumán, materializada por un sistema de pantógrafo computarizado.

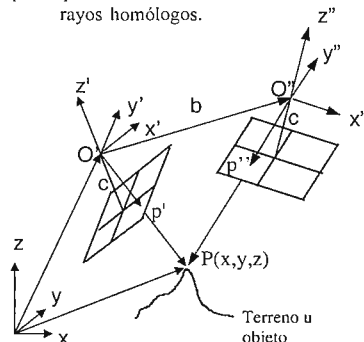
Abstract

Among non topographic application of Photogrammetry, one of the most widely known is the restitution of objects of artistic or historical value with the purpose of repairing or rebuilding them in case of damage or destruction. This paper describes a methodology based on digital photogrammetric procedures to obtain the digital model from a pair of photographs taken with digital cameras of current use. A replica, performed by a computer guided pantograph system, of a sculpture of Juan B. Terán, the founder of the Tucumán University, is also shown.

1. Introducción

En la Restitución Fotogramétrica, un punto en el espacio queda determinado por la intersección de dos rectas determinadas por los centros de perspectiva O' , O'' , y las imágenes homólogas p' , p'' de ese punto (Fig. 1). Si se conocen los parámetros de la orientación interior de la cámara (distancia principal "c" y posición del punto principal en el plano imagen), y si, además, se conocen las orientaciones exteriores de las dos cámaras con respecto a un sistema fijo, el x , y , z , la posición del punto "p" queda determinada.

Fig. 1: Determinación de un punto por intersección de dos rayos homólogos.



Dado que en este trabajo la escala puede ser arbitraria y no importa la posición del objeto con respecto a un sistema de coordenadas fijo, no es necesario conocer las orientaciones exteriores de ambas cámaras (equivalentes a las orientaciones relativa y absoluta). Basta, entonces, con conocer los cinco

parámetros de la orientación relativa, los cuales se consiguen aplicando la ecuación de coplanaridad de los vectores b , p' , p'' (Fig. 1) para al menos cinco puntos. La coplanaridad puede expresarse igualando a cero el producto mixto de esos vectores: $b \times p' \cdot p'' = 0$

Resuelta la orientación relativa o recíproca, como también se la conoce, entre dos haces de rayos, es posible formar un modelo semejante al objeto que permite la observación

y medición estereoscópica. En este modelo se introdujo, además, una escala aproximada con distancias conocidas en el objeto.

2. Restitución fotogramétrica

En el pasado, trabajando en los instrumentos analógicos, la posición de un punto en el espacio se determinaba pasando la marca flotante sobre ese punto en el modelo estereoscópico. El trazado continuo de una curva de nivel exigía que el operador moviera la marca flotante de manera que ella siempre "tocara" el objeto en el modelo estereoscópico.

En los procedimientos digitales actuales, por el contrario, se procede de una manera casi totalmente automática. Se define, por ejemplo, una ventana en el fotograma izquierdo y se busca el sector de imagen correspondiente en el fotograma derecho por medio de la comparación de niveles de gris o de color. Una vez obtenida la correspondencia se desplaza en una cantidad pequeña la ventana del fotograma izquierdo y se repite el procedimiento en forma de barrido hasta cubrir el área que interesa. La correspondencia de imágenes se lleva a cabo por medio de distintas técnicas como, por ejemplo, la correlación cruzada o mínimos cuadrados (Schenk, 1999), (Lerma García, 2002). De esta manera se obtiene rápidamente una gran cantidad de puntos espaciales que definen un modelo digital tridimensional del objeto.

Para el correcto funcionamiento de los procedimientos automáticos de búsqueda, las imágenes deben poseer una buena diferencia en tonos de gris, o en colores, entre puntos cercanos. Esta característica suele denominarse textura y admite una definición cuantitativa (Schenk, 1999), (Luccioni, 2006).

3. Procesamiento de los fotogramas del busto del Dr. Juan B. Terán

El preclaro fundador la Universidad Nacional de Tucumán ha recibido múltiples y merecidos homenajes. En todas las Facultades pueden encontrarse cuadros, bustos y esculturas en su memoria. Entre los bustos, los hay en espacios abiertos sujetos a las inclemencias del tiempo, y los hay en espacios interiores. El busto elegido para este trabajo es el que está en la sala del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (Fig. 2). Se trata de un busto en yeso de color blanco y con pocas impurezas. La textura de la imagen es, por consiguiente, muy pobre.

Para facilitar el funcionamiento de las técnicas de correspondencia automáticas se recurrió a un artificio propuesto, entre otros por Kraus (1996), que emplea la proyección de tramas sobre la superficie del objeto (Fig. 3). De esta manera, se genera una textura artificial. Kraus menciona varios procedimientos y, entre ellos, se eligió trabajar con el de proyección de tramas mediante un proyector no calibrado. Así, es posible emplear un proyector de diapositivas de uso corriente. Además, se optó por tramas irregulares

para evitar que se produzcan correspondencias falsas, aun en el caso de ventanas de búsqueda pequeñas. Experiencias realizadas en Tucumán con esta técnica y empleando varios tipos de trama se describen en un trabajo anterior (Juliá et al., 2005).

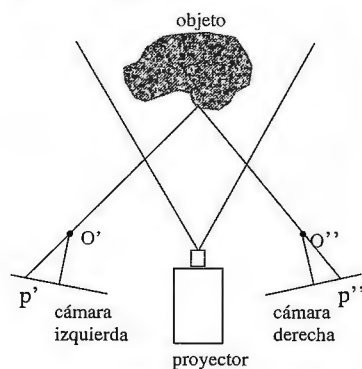


Fig. 3: Disposición de las cámaras y del proyector (preparada en base a Kraus, 1996).

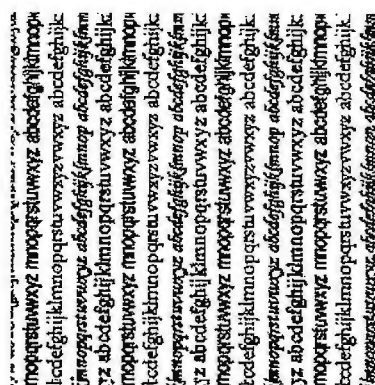


Fig 5: Detalle de la trama.

La Fig. 4 muestra el busto del Dr. Terán, sobre el cual se ha proyectado una trama consistente en renglones con letras minúsculas en blanco y negro, que es la que arrojó mejores resultados en las pruebas mencionadas.

Un detalle de la trama proyectada se aprecia en la Fig. 5. La cámara empleada es una Olympus C-60 de 6 megapixels y la restitución se realizó con el software Photomod de origen ruso. Por tratarse de una primera experiencia se trabajó con los parámetros de la orientación interior provistos por el fabricante, con la precaución de trabajar en las zonas centrales de ambos fotogramas para reducir los efectos de la distorsión. Debe mencionarse, sin embargo, que de cara a trabajos ulteriores, ya se han realizado varios ensayos de calibración de esta cámara, y de otras, siguiendo un procedimiento similar al recomendado por Chibunichev y López Cuervo (2005) en lo atinente a la corrección de las distorsiones radial y tangencial. Los resultados obtenidos, que se publicarán en un próximo trabajo, muestran residuales remanentes en el orden de 1 píxel.

La orientación relativa se realizó tratando de elegir puntos bien distribuidos sobre el objeto (unos 30 puntos). Los valores finales de las paralajes residuales (falta de intersección de rayos homólogos) no superaban el tercio del píxel.

Después de completar la orientación relativa, se generó de manera automática la red irregular de triángulos (TIN) empleando la proyección de la trama mencionada (Fig. 6).

A partir del modelo digital basado en el TIN pueden obtenerse varios productos y, entre ellos, las curvas de nivel que se muestran en las Figs. 7 y 8.

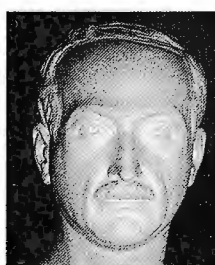


Fig. 2: Fotograma del busto del Dr. Juan B. Terán.



Fig. 4: Trama proyectada sobre el busto del Dr. Terán.



Fig. 6: Red irregular de triángulos (TIN).



Fig. 7: Curvas de nivel cada 2 mm, aprox.



Fig. 8: Curvas de nivel cada 1 mm, aprox.



Fig. 9: Ensayo preliminar de tallado del modelo digital.

4. Etapa de materialización

El modelo digital de elevaciones obtenido a partir del TIN y exportado en formato GRD fue enviado a la empresa del Ing. Marcelo Campi en la ciudad de Buenos Aires para su materialización por medio de un pantógrafo computarizado (router). La réplica (Fig. 9) se realizó en un material blando (telgopor de alta densidad) en dimensiones reducidas en un factor de 0,7 para que pudiera tallarse de manera completa, teniendo en cuenta el máximo rango de la coordenada "z" del pantógrafo.

La réplica mostrada en la Fig. 9 fue obtenida a partir de un solo par de fotografías tomadas de frente. Por este motivo la zona de las orejas no está bien reconstruida. Para restituir correctamente las orejas habría que tomar fotografías adicionales en otras posiciones, por ejemplo, tomas perpendiculares a las de frente.

5. Conclusiones

Las imágenes de las cámaras fotográficas digitales de uso corriente permiten la realización de trabajos fotogramétricos de manera rápida y económica. Además, la disponibilidad de aparatos computarizados de costo accesible hace posible el tallado de diversos materiales. En este trabajo, más que en la precisión, el énfasis estuvo puesto en la obtención de un procedimiento completo destinado a confeccionar la réplica de una escultura, incluida la materialización del modelo digital del objeto en un pantógrafo computarizado. En trabajos que actualmente están en desarrollo se han tenido en cuenta los parámetros de la orientación interna obtenidos mediante un proceso de calibración que incluye la corrección de las distorsiones radial y tangencial.

Agradecimiento

Al Ing. Marcelo Campi por su generosa colaboración en el tallado del busto de Juan B. Terán.

Referencias

Chibunichev A., López Cuervo S.: Fotogrametría No Cartográfica. Universidad Politécnica de Madrid, Marzo de 2005.
 Julia J. E., Carelli J. A.: Mejoramiento de la Textura de una Superficie por medio de la Proyección de Tramas sobre un Objeto a Restituir. Revista Mapping, N° 106. Madrid, Diciembre de 2005.
 Kraus Karl: Photogrammetrie, Band 2: Verfeinerten Methoden und Anwendungen. Dummler Verlag, Bonn, Alemania, 1996.
 Lerma García J. L.: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital. Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
 Schenk T.: Digital Photogrammetry, Volume I. TerraScience, Ohio, 1999.
 Luccioni Griselda M.: Imágenes Conjugadas en Fotogrametría Digital. Tesis de magister en Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán, Noviembre de 2006.

NORMAS PARA AUTORES

CONTENIDO

Mapping es una revista internacional en lengua española que publica artículos sobre Ciencias de la Tierra con un enfoque tanto investigativo como profesional. Mapping no es una revista especialista sino generalista donde se publican artículos de Topografía, Geodesia, SIG, Medio Ambiente, Teledetección, Cartografía, Catastro, Turismo y Ciencias de la Tierra en general. El amplio campo cubierto por esta publicación permite que en ella el lector, tanto científico como técnico, pueda encontrar los últimos trabajos publicados con las nuevas investigaciones y desarrollos en el campo de las Ciencias de la Tierra en la comunidad hispanohablante.

La revista Mapping invita a los autores de artículos en el campo de las Ciencias de la Tierra a la colaboración mediante el envío de manuscritos para su publicación, según las siguientes normas:

ESTILO

El artículo será enviado como documento de texto con las siguientes normas de estilo:

- La fuente será "Times New Roman" a tamaño 12.
- Interlineado a doble espacio.
- Sin espaciado adicional al final o al principio de los párrafos.
- Justificación en ambos laterales.
- Títulos de los diferentes apartados y subapartados del artículo ordenados de manera numérica, en mayúsculas y en negrita.
- Tamaño del papel DIN A4.
- Márgenes verticales y laterales de 2,5 cm.
- No se admiten encabezados ni pies de página.

LONGITUD

La longitud de los artículos no está establecida, recomendándose una extensión en torno a las 10 páginas para el texto con el estilo propuesto.

SISTEMAS DE UNIDADES

Salvo excepciones que serán evaluadas por el Comité Editorial el sistema de unidades será el Sistema Internacional.

FORMULAS MATEMÁTICAS

Las fórmulas matemáticas se incluirán en el cuerpo de texto en una línea aparte y con justificación centrada. Las fórmulas se numerarán correlativamente por su orden de aparición con su número entre paréntesis a la derecha.

TABLAS

Las tablas se incluirán en el artículo cada una de ellas en una hoja aparte a continuación del texto, numeradas en orden de aparición y con su leyenda. En el lugar del texto, en el cual deberán ser insertadas para la maquetación final se incluirá una línea con la palabra "tabla" y su número en, mayúsculas, con justificación centrada.

El diseño de las tablas será tal que permita su lectura con maquetación a una columna (8 cm de ancho) y excepcionalmente a 2 columnas (16 cm de ancho).

En ningún caso se admitirán tablas en formato apaisado.

FIGURAS

Las figuras se incluirán en el artículo cada una de ellas en una hoja aparte a continuación de las tablas, numeradas en orden de aparición y con su leyenda. En el lugar del texto, en el cual deberán ser insertadas para la maquetación final y se incluirá una línea con la palabra "figura" y su

número en mayúsculas, con justificación centrada. El diseño de las figuras será tal que permita su visibilidad con maquetación a una columna (8 cm de ancho) y excepcionalmente a 2 columnas (16 cm de ancho). Se admiten figuras en blanco y negro y color.

REFERENCIAS

En el cuerpo del texto del artículo las referencias se citarán por el apellido del autor y el año de publicación separados por una coma y entre paréntesis. Las referencias se incluirán al final del texto como un apartado más del mismo y se documentarán de acuerdo al estándar cuyo modelo se incluye a continuación:

LIBROS

Apellido 1, inicial del nombre 1., Apellido 2, inicial del nombre 2. (año) Título. Edición . Editorial, ciudad de publicación. Número de páginas pp.

REVISTAS

Apellido 1, inicial del nombre 1., Apellido 2, inicial del nombre 2. (año) Título del artículo. Revista, número (volumen), pp: pagina de inicio-pagina final.

DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS

Apellido 1, inicial del nombre 1., Apellido 2, inicial del nombre 2. (año) Título del documento. Enlace de Internet.

En todos los casos se incluirán tantos autores como figuren en las referencias.

No se admitirán artículos sin referencias.

FORMATO DEL MANUSCRITO

El documento que será enviado al comité editorial en el siguiente formato:

HOJA DE PORTADA

En la hoja de portada se incluirán los siguientes datos

TÍTULO

El título del artículo deberá tener menos de 15 palabras y estar escrito en español e inglés.

AUTORES Y FILIACIÓN

A continuación del título se incluirán los autores en el orden de aparición, sus datos de filiación y contactos en el siguiente formato:

Apellido, nombre.

Institución o empresa. Teléfono.

Correo electrónico. País

ARTÍCULO

El artículo estará formado por el cuerpo del texto, las tablas y figuras. **Irà precedido de su título en mayúsculas, un resumen de 100-200 palabras y palabras claves, todo ello en español e inglés.** El artículo comenzará en una hoja aparte y no contendrá ningún dato de los autores para la revisión anónima del mismo. La estructuración de los artículos es decisión de los autores pero se recomienda la estructura habitual en los artículos en publicaciones científicas.

ENVIO DE LOS MANUSCRITOS

Los manuscritos serán enviados en formato digital, preferentemente PDF o WORD a la dirección de correo electrónico manuscritos@mappinginteractivo.com

EXPO-GEOMÁTICA

MÁLAGA 2009

ALONOS DE EXPOSICIÓN DE LA DIPUTACIÓN DE MÁLAGA

Y PACÍFICO, 52-54 MÁLAGA

, 21 Y 22 DE MAYO

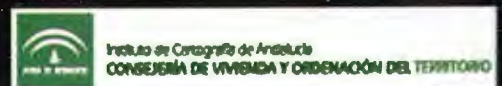


PATROCINADOR OFICIAL

M

málaga.es diputación

PATROCINADORES



INCIDENCIA DE LA GEOMORFOLOGIA EN LOS IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS EN LA CARRETERA DE BELTRAN, GUANTANAMO, CUBA.

MSc. Sandra Y. Rosabal Dominguez¹, Dr. José A. Zapata Balanque¹, Lic. Joel Gómez²

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) - Santiago de Cuba. Cuba.

²CITMA, Guantánamo

Resumen.

Se realizó el estudio de las condiciones geomorfológicas de los alrededores de la localidad de Beltrán, municipio Yateras, provincia Guantánamo, apoyados en herramientas de GIS, utilizando las variables disección vertical, máximas amplitudes y clasificación del relieve. Se contrastaron los resultados con los materiales obtenidos de los recorridos de campo realizados producto de deslizamientos ocurridos posterior a períodos de intensas lluvias en Yateras. Se presentan los principales impactos negativos causados por los deslizamientos en la carretera de Beltrán y se sugieren aquellas zonas que con similares parámetros podrían ser proclives al fenómeno.

Introducción.

En la construcción de las carreteras se presentan una serie de dificultades que a veces encarecen su construcción; el costo puede ser mayor si no se elige correctamente el trazado: en el entorno, la geomorfología, relieve, geología, tectónica y condiciones ingeniero-geológicas. La metodología presentada por Mora y Vahrson (1993) referenciada en el TC - 4 (ISSMGE, 1999), consideran importante la determinación de las condiciones geomorfológicas y determinan la susceptibilidad del relieve a partir del cálculo de la disección vertical.

El presente trabajo surge a partir de estudios preliminares, metodologías y propuestas de trabajos realizadas con anterioridad para el área de Beltrán, que sugieren realizar una caracterización de las variables geomorfológicas que influyen en los deslizamientos. Escobar (2007) plantea en su informe técnico criterios sobre la determinación de la susceptibilidad geomorfológica basada en el cálculo de la pendiente, la disección vertical y creación de un modelo digital del terreno.

Otros autores como Rodríguez (1991) plantea que la consideración geomorfológica más importante en el pronóstico de los deslizamientos es la historia de estos en un área determinada, así como otros factores importantes la pendiente de una ladera en relación a la fuerza de los materiales que la forman y el aspecto de la ladera o la dirección hacia donde enfrenta la ladera su curvatura.

En propuesta realizado por Zapata et al (2008) para caracterizar el sector de 20 km² entre las coordenadas: X: 681 000 a 686 000 y Y: 178 000 a 182 000, se proponían las siguientes actividades:

1. Conocer las causas que catalizan los deslizamientos en la zona de interés.
2. La modelación de las potenciales áreas de ocurrencia de futuros deslizamientos.

3. Tomar las medidas para la gestión y manejo del ordenamiento territorial ambiental y desarrollo de los ecosistemas existentes (asentamientos humanos y trazado definitivo de los viales).

4. Determinar las zonas y propuestas de procedimientos donde deben ejecutarse obras ingenieras de contención (Zoológico de Piedra).

Basados en estos criterios se exponen los pasos seguidos para determinar la caracterización geomorfológica del área y la aplicación del método presentado en el TC-4 (ISSMGE, 1999) denominado como zonación por criterios activos y pasivos para determinar la susceptibilidad del área de Beltrán a los deslizamientos. Considerando como agente catalizadores: un sismo de mediana a gran intensidad y las intensas lluvias frecuentes en la zona.

Ubicación Geográfica.

El área de Beltrán de aproximadamente 16 km², se encuentra ubicada al noreste de la ciudad de Guantánamo, en el municipio de Yateras (Figura 1.) en la provincia Guantánamo, con coordenadas planas Xi: 682. 000, X_r: 686.000 y Y_i: 179.000, Y_r: 183.000.

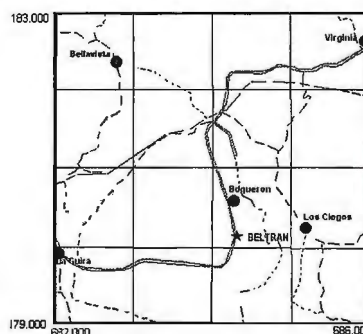


Figura 1. Ubicación geográfica de Beltrán (círculo) en el municipio de Yateras y vista mas detallada del área (estrella en azul), en la carretera entre La Güira y Boquerón, principal vía de comunicación y sus comunidades (círculos en rojo).

Sitios	X	Y
Zoológico de Piedra	684240	181100
Terreno Privado (Finca)	638890	181870
Carretera Beltrán (a)	684320	180150
Carretera Beltrán (b)	684190	179850

Tabla 1. Muestra de las coordenadas (planas) de los sitios donde están localizados los deslizamientos estudiados.

La Tabla 1 muestra las coordenadas de los sitios donde han ocurrido los principales deslizamientos del área de Beltrán, la vía era transitable hasta el momento de la ocurrencia de los deslizamientos, muchos ubicados en sectores muy cercanos al Zoológico de Piedra, un terreno privado (finca) y otros dos sitios en la carretera Beltrán que une a las comunidades la Güira y Boquerón (sectores (a) y (b)). Estos últimos deslizamientos fueron estudiados en el trabajo presentado por Escobar y otros (2006), se presentan las Fotos 1 a 4 de los deslizamientos.



Fotos 1. Deslizamiento del tramo de la carretera de la Güira a Boquerón.



Foto 2. Destrucción de la carretera de la Güira a Boquerón por un deslizamiento. (Sector b)

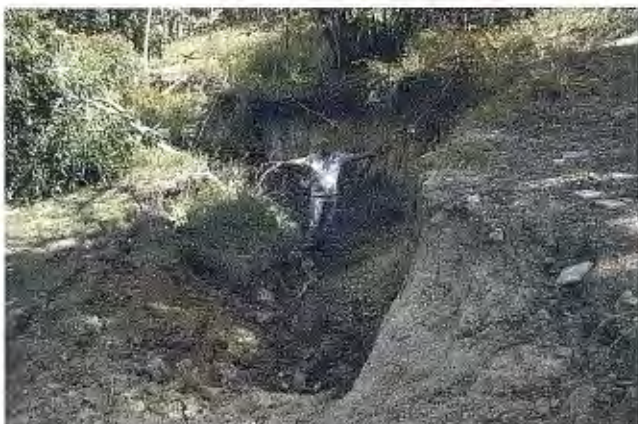


Foto 3. Escarpe principal del deslizamiento en la finca.



Foto 4. Escarpe principal del deslizamiento en el Zoológico de Piedra

Agentes catalizadores.

Los sismos y las intensas lluvias están considerados como agentes catalizadores de los deslizamientos, siendo las lluvias el más importante agente catalizador. El área puede ser afectada por terremotos de mediana a gran intensidad generados por una de las zonas sismogeneradoras más próximas al sitio tales como Oriente, Sabana o Purial.

Los primeros reportes de deslizamientos en el área datan desde el huracán Flora en 1963, luego en 1993 se reportaron deslizamientos de importancia en la zona del Zoológico de Piedra que se extendieron hasta Bellavista, (Escobar et, al, 2006), después de intensas lluvias producto de la interacción de un frente frío con una onda tropical casi estacionaria sobre el oriente del país, que provocó acumulados superiores a los 200 mm en varios puntos (periódico Granma del 25 de noviembre de 1993). Los últimos reportes datan del 2006 y 2008 asociados a intensas lluvias.

Para la zona de Boquerón las precipitaciones media anual es de 1 333.8 mm, pero 1 de cada 4 años acumula más de 1 600 mm y presenta en la serie de estudio un acumulado anual máximo de 1 744,9 mm (año 2006) y 1 729,5 mm en el 2005. (El acumulado histórico es de 1 881.1mm en 1963). (CITMA, GUANTANAMO, 2008).

Geomorfología.

Para la caracterización geomorfológica del área fue necesario determinar las máximas altitudes, realizar los mapas de disección vertical y red fluvial, calcular las pendientes y apoyada en un GIS, se obtuvo el modelo digital del terreno en 3D.

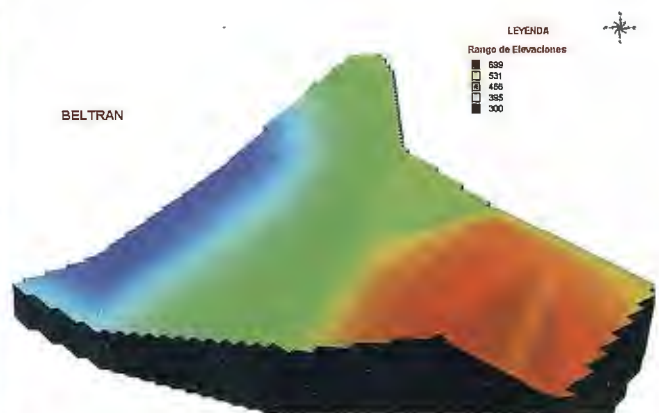


Figura 2. Modelo digital del terreno en 3D del área de Beltrán.

Altitudes.

Se determinaron las áreas donde predominan las máximas elevaciones (800 m), estando las máximas alturas hacia el este y sureste del área, donde se localizan las comunidades de Boquerón y Los Ciegos, las alturas mínimas (280 m) están ubicadas hacia el oeste donde se localiza la comunidad de La Güira. En la **Figura 2** se muestran las máximas elevaciones del área a través del modelo digital del terreno (MDT) en 3D que refleja las irregularidades del terreno de Beltrán. En base a los rangos de altitudes más utilizadas en Cuba, presentados en la **Tabla 2** (Díaz et. al., 1986), se realizó una clasificación altimétrica de la zona que permitió definirlo como relieve ondulado de montañas pequeñas ubicadas al sureste y de alturas grandes ubicadas al oeste.

CATEGORÍA DEL RELIEVE	PISO ALTITUDINAL	
Montañas	2 000 - 1 500	Montañas medias
	1 500 - 1 000	Montañas bajas
	1 000 - 500	Montañas pequeñas
	500 - 300	Submontañas
Alturas	300 - 200	Alturas grandes
	200 - 120	Alturas medias
	Menores de 120	Alturas pequeñas
Llanuras	120 - 80	Llanuras altas
	80 - 20	Llanuras medias
	Menores de 20	Llanuras bajas

Tabla 2. Resumen de la clasificación altimétrica del relieve, en pisos altitudinales y sus categorías, contenida en Díaz et al. (1986).

Diseción Vertical y Red Fluvial.

La diseción vertical se calculó con las diferencias de altura entre curvas de nivel dentro de una unidad de superficie (de 1 km²) a escala 1:50 000. Los máximos valores de diseción vertical se localizan hacia el sureste con valores mayores que 300 m/km². Los mínimos valores de diseción vertical se localizan hacia el oeste y norte del área con valores muy bajos en el rango de (50 - 150 m/km²).

En las zonas montañosas cuando ocurren las lluvias en las partes más altas, existe un fenómeno de escorrentía a través de la red fluvial hacia los lugares más bajos donde se acumulan las aguas en los valles de inundación. Los ríos que se encuentran dentro del área, Hondo que corre en dirección W y Yateras que corre en dirección E. La red del drenaje se clasifica como radial.

Zonación por criterios pasivos.

Después de haber realizado el análisis geomorfológico del área y la clasificación del relieve, se realizó una zonación de acuerdo a los criterios pasivos: donde intervienen el relieve y las características geológicas existentes en el área. El relieve como factor que influye en la ocurrencia de los deslizamientos y desprendimientos, tienen importancia significativa la forma que éste tenga y los valores de las pendientes. En el primer caso la forma del relieve determina la ocurrencia o no del fenómeno, esto es, en un relieve llano o suavemente ondulado no se producen, y aparecen con mayor frecuencia en relieves premontañosos y montañosos. En relación con las pendientes, las suaves (0 - 10 grados) no favorecen su ocurrencia, siendo más susceptibles a partir de los 10 grados y alcanzan su máximo valor de susceptibilidad a partir de los 30 grados.

En cuanto a la geología entre estos se consideran la litología, el grado de alteración o de intemperismo y el agrietamiento. La presencia de estratificación es un aspecto importante en la ocurrencia de los deslizamientos, ya

que constituyen discontinuidades en el macizo, que favorecen la ocurrencia de deslizamientos.

Para la Zonación utilizamos la clasificación siguiente Muy Favorable, Favorable, Poco Favorable.

BELTRAN: Favorable. Caracterizado por un relieve montañoso, de grandes elevaciones que varían entre los 280 y 800 metros sobre el nivel del mar, se calcularon las pendientes, los valores más bajos de pendiente se concentran hacia el W con valores que oscilan entre 6- 9° y hacia el E los valores de las pendientes oscilan entre los 10 - 30°, los máximos valores de disección vertical que se obtuvieron fueron de 300 m/km². La geología tiene condiciones favorables para que se produzcan los deslizamientos, existen intercalaciones de areniscas, arcillas y margas con intercalaciones de calizas biotriticas. Formación Maquey (P₃ — N₁) mq, (edad: Oligoceno- Mioceno Inferior). Zonación por criterios activos.

Para realizar la zonación por criterios activos utilizamos el método de "**Criterio magnitud - distancia recomendado**", propuesto por el TC-4 (ISSMGE, 1999) este método tiene en cuenta al sismo como agente catalizador de los deslizamientos y las precipitaciones, consideramos esta última el más importante agente catalizador de los deslizamientos en el área de estudio (**Figura 3**).

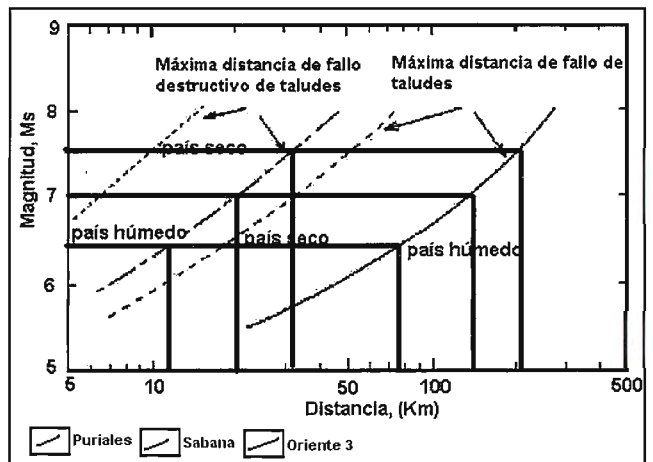


Figura 3: Curvas propuestas en el método criterio magnitud - distancia recomendado (tomado de TC - 4, 1999).

ZS	Mmáx	Clase 1	Clase 2
Sabana	7.0	18	120
Purial	6.5	11	78
Oriente 3	7.6	33	190

Tabla 3. Principales zonas sismogeneradoras y máximas distancias de fallo de taludes, las clases en Km., la Mmáx en magnitud Richter y ZS son las zonas sismogeneradoras.

El método empleado establece que la proporción del fallo de los taludes disminuye proporcionalmente con el aumento de la distancia de la fuente sísmica que se utiliza, contempla al sismo y a las lluvias como agentes disparadores de los deslizamientos.

Se obtiene como resultado dos zonas de fallo de los taludes para las principales zonas de origen de terremotos seleccionada que afectan al municipio de Yateras.

Clase 1: Máxima distancia epicentral de fallo destructivo de taludes.

Clase 2: Máxima distancia epicentral de fallo de taludes.

En la **Tabla 3** se presentan las principales Zonas Sismogeneradoras que afectan al municipio de Yateras y la máxima distancia de fallos de taludes según la magnitud máxima esperada (Richter). En el área existen otras zonas sismogeneradoras pero no se evalúan porque su magnitud no interfiere en los deslizamientos, los deslizamientos ocurren cuando la magnitud es mayor que 5.

Susceptibilidad del área a los deslizamientos.

Para la clasificación de la susceptibilidad empleamos cuatro criterios: el pasivo, activo, la memoria histórica y el obtenido en los recorridos de campos efectuados en noviembre (2006) y enero (2008). Este último nos permitió conocer el estado actual del área, las rocas, el agrietamiento, la erosión, entre otros factores. Se observaron grandes grietas transversales localizadas en la zona que ocupara el escarpe principal, grietas de cizallamiento, la superficie de rotura en el área de los deslizamientos, es un elemento fundamental que permite su clasificación, en este caso las superficies son curvas, cóncavas, se corresponde con un deslizamiento rotacional. Clasificación de la susceptibilidad a los Deslizamientos.

- **Susceptibilidad alta:** Favorable, Clase 1 y condiciones malas de estabilidad.
- **Susceptibilidad media:** Favorable, Clase 1 y condiciones buenas de estabilidad;
- **Susceptibilidad baja:** Favorable, Clase 1 y condiciones muy buenas de estabilidad;

Beltrán presenta alta susceptibilidad a los deslizamientos, por estar dentro de la categoría de Favorable por el criterio pasivo, malas condiciones de estabilidad por la geología existente y ubicada en la clase 1 por los criterios activos. Para la determinación del sector de mayor peligro geológico por deslizamientos, fue necesario realizar un análisis de todas las capas de información, auxiliándonos del GIS, (**Figura 4**).

Se propone (**Figura 5**) el sector de mayor peligro geológico por deslizamiento, donde se encuentran los máximos valores de pendiente, de disección vertical y de amplitudes. Pero además se mantienen las condiciones geológicas, la dirección de los escurrimientos indica que alcanzan su mayor velocidad de transporte y la existencia de elementos vulnerables.

Cuando se realizó el trazado de la carretera que une a las comunidades de La Güira con Boquerón no se tuvo en cuenta que el relieve predominante en este sector es montañoso. Se cortó la ladera, por consiguiente se rompieron las condiciones de equilibrio existente, las condiciones del drenaje natural, la pendiente natural formada por los procesos denudativos de erosión fundamentalmente producto de las altitudes del área.

Bajo estas condiciones puede ocurrir un incremento de los movimientos gravitacionales e incluso pueden reactivarse antiguos deslizamientos que habían alcanzado el estado de reposo.

La ocurrencia de estos deslizamientos en el área ha provocado impactos negativos.

- Deterioro paisajístico.
- Grave riesgos para la circulación del tránsito.
- Evacuación de pobladores hacia zonas más seguras.

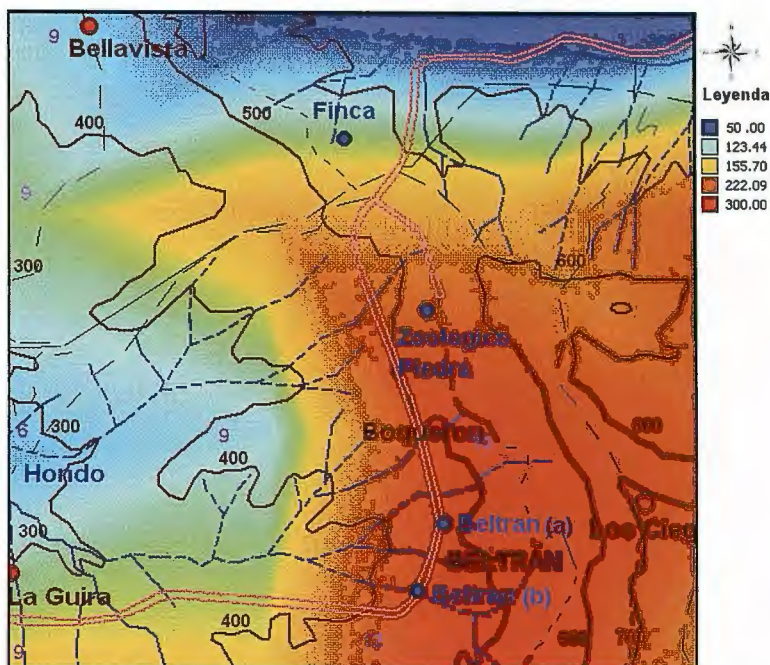


Figura 4. Múltiples capas de información sobre el área de Beltrán. Líneas en azul trazado de la red fluvial, líneas en marrón trazado de las curvas de nivel con sus valores, puntos azules sitios de deslizamientos, numeración en magenta las pendientes, mapa de disección vertical en el fondo, líneas negras caminos secundarios, línea doble trazado la carretera.

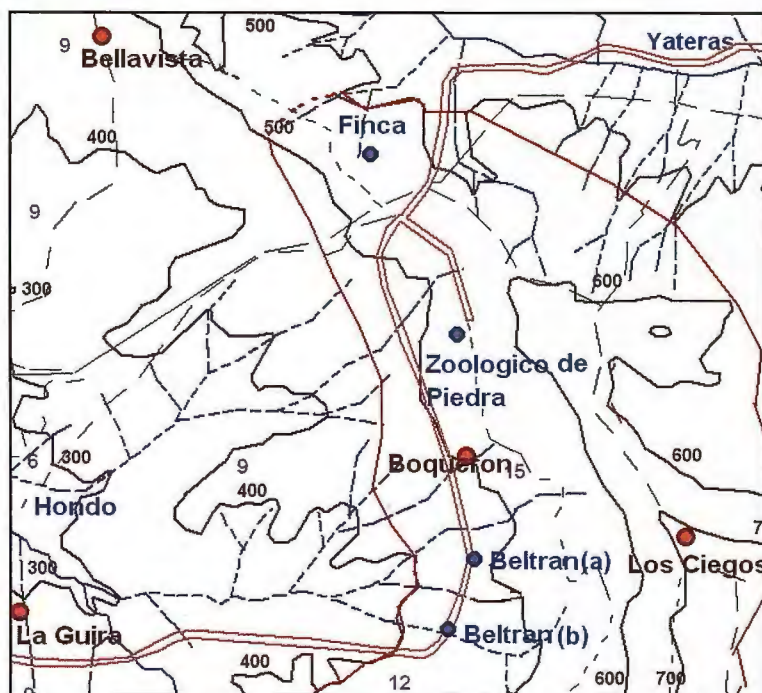


Figura 5. Sector (línea roja) propuesto como de mayor peligro geológico por deslizamiento. Líneas en azul trazado de la red fluvial, líneas en marrón trazado de las curvas de nivel con sus valores, puntos azules sitios de deslizamientos, numeración en magenta las pendientes, líneas negras caminos secundarios, línea doble trazado la carretera.

- Corta vida útil de la carretera, lo que obliga a construir otras vías de acceso, el camino utilizado está afectado por la erosión, existe presencia de grandes surcos.
- Continúa el peligro por deslizamiento de tierra en las pendientes pronunciadas con el consiguiente perjuicio para la infraestructura actual y la utilización de la tierra.

Conclusiones.

1. El relieve que caracteriza el área por la clasificación de las altitudes es un relieve montañoso que va desde la categoría de alturas grandes ubicadas al oeste hasta la categoría de montañas pequeñas ubicadas al sureste.
2. El área de Beltrán posee alta susceptibilidad a los deslizamientos.
3. La construcción de la carretera fue trazada sin tener en cuenta las características del relieve.
4. Se propone el sector de mayor peligro geológico por deslizamiento.
5. Los principales impactos detectados por la ocurrencia de los deslizamientos en el área están relacionados con el paisaje, grave riesgos para la circulación y evacuación de pobladores hacia zonas más seguras. Corta vida útil de la carretera.

Recomendaciones.

Que el nuevo trazado del tramo de la carretera afectada, se realice sobre un área de menor peligro geológico por deslizamiento.

BIBLIOGRAFIA.

Ayala C. (1992): Introducción a los riesgos geológicos. Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosa, 23. 28003 - Madrid.

Díaz J, L. et al. (1986): Los principios básicos de la clasificación morfoestructural del relieve cubano y su aplicación en la región centro oriental de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Geografía.

CMP Guantánamo (2008): Datos climáticos medios anuales de 3 sitios de la carretera Guantánamo - Yateras. Centro Meteorológico Provincial Guantánamo.

Escobar, E.; Guasch, F.; Villalón, M.; Bársana, A.; Rosabal, S.; Oliva, R.; Gómez, J.; Delgado, R.; Mesa, A. (2006): Informe Preliminar sobre el Deslizamiento de tierra ocurri-

do en la localidad de Beltrán, municipio Yateras, provincia Guantánamo en Noviembre del 2006. 6 pp. Reporte técnico en Fondos del CENAIIS y Delegación CITMA Guantánamo.

Escobar, E. (2007): Peligros por deslizamientos. II Convención Cubana de la Ciencias de la Tierra.

Keefer, D. K (1984): Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, v.95,p.406-421.

Mora, S. and Mora, R (1993): Landslide triggered by the Limón - Telire, Costa Rica earthquake and comparison with other events in Costa Rica, U. S. Geological Survey Professional Paper.

Mora, S. and Vahrson, W. (1993): Macrozonation methodology for landslide hazard determination, Bulletin International Association Engineering Geology.

Mora, S and Vahrson, W. (1993): Mapa de amenazas de deslizamiento en la región central de Costa Rica, Escala 1:200000, CEPREDENAC - Escuela Centroamericana de geología, Universidad de Costa Rica.

Pachauri, A.K and Pant, M. (1992): Landslide hazard mapping based on geological attributes. Engineering Geology, 32, p.81-100.

Periódico Granma (1993): Información de la Defensa Civil sobre intensas lluvias en la Zona Oriental del País. 25 de Noviembre de 1993.

Rodríguez, A. (1991): Manual de Geomorfología. Instituto Superior Minero Metalúrgico: 1987.

TC - 4 (1999): Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. The Japanese Geotechnical Society. ISSMGE. ISBN 4 - 88644 - 809 - 7. 219 pp.

Varnes, D.J (1978): Slope movement types and processes. En: R.L Schuster and R.J Krizek (editores), Landslides Analysis and Control Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 179. National Academy of Sciences, Washington

Zapata, J. A., Rosabal, S. Y., Escobar, E. y Gómez, J. F. (2008): Análisis de los principales factores naturales y antrópicos que catalizan e inciden en la ocurrencia de deslizamientos en la zona de Beltrán (municipio Yateras). Tarea técnica presentada por el CENAIIS a CITMA Guantánamo. Enero/2008. 3 pp.

BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN

MAPPING

Deseo suscribirme a la revista MAPPING por 12 números al precio de 11 números.

Precio para España: 60 euros. Precio para Europa: 90 euros

Forma de pago: Talón nominativo o transferencia a nombre de REVISTA MAPPING, S.L.

CAJA MADRID: Pº. de las Delicias, 82 - 28045 MADRID Nº 2038-1732-55-3001376203

Enviar a: REVISTA MAPPING, S.L. - C/Hileras, 4, 2º, Of. 2 - 28013 MADRID.

Nombre NIF ó CIF

Empresa Cargo

Dirección Teléfono

ELIJA LA HERRAMIENTA MÁS AVANZADA
Y SU TRABAJO SERÁ MÁS FÁCIL

Laser IMAGER 5006 de Z+F



- Intuitivo
- Sin cables
- Muy fácil de manejar
- En venta o alquiler



Avda Filipinas 46. Madrid 28003 Teléfono
915537207

grafinta@grafinta.com