

# INTRODUCCIÓN HISTÓRICA A LA GEODESIA

*Miguel J. Sevilla de Lerma*

*Catedrático de Universidad*

*Instituto de Astronomía y Geodesia. Facultad de Ciencias Matemáticas.*

*Universidad Complutense de Madrid*

1. LA GEODESIA, SU OBJETO	1
2. DIVISIONES DE LA GEODESIA	4
3. MÉTODOS GEODÉSICOS	6
4. NOTICIA HISTÓRICA	10
4.1. Grecia	11
4.2. Edad media	14
4.3. Siglos XV y XVI	15
4.4. Siglo XVII	18
4.5. Siglo XVIII	19
4.6. Siglo XIX	23
4.7. Siglo XX	28
5. BIBLIOGRAFÍA	35
COMPLEMENTOS	39

## 1. LA GEODESIA, SU OBJETO

La Geodesia es una de las Ciencias más antiguas cultivada por el hombre. El objeto de la Geodesia es el estudio y determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, de su campo de gravedad, y sus variaciones temporales; constituye un apartado especialmente importante la determinación de posiciones de puntos de su superficie. Esta definición incluye la orientación de la Tierra en el espacio.

Etimológicamente la palabra Geodesia, del griego  $\gamma\eta\delta\alpha\iota\omega$  (divido la tierra), significa la medida de las dimensiones de la Tierra, en su acepción moderna también engloba el estudio del campo de gravedad.

La Geodesia es una ciencia básica, con unos fundamentos fisicomatemáticos y con unas aplicaciones prácticas en amplias ramas del saber, como en topografía, cartografía, fotogrametría, navegación e ingenierías de todo tipo sin olvidar su interés para fines militares. Está íntimamente relacionada con la astronomía y la geofísica, apoyándose alternativamente unas Ciencias en otras en su desarrollo, en sus métodos y en la consecución de sus fines.

Todo el proceso de **determinación de posiciones** geodésicas está intrínsecamente ligado con la forma y dimensiones de la Tierra, por lo tanto el problema de la determinación de la figura de la Tierra no es puramente teórico

sino que tiene una proyección práctica en lo referente al cálculo de coordenadas de puntos y a la resolución de problemas geométricos sobre su superficie.

La parte teórica del problema general de la **figura de la Tierra** consiste en el estudio de las superficies de equilibrio de una hipotética masa fluida, sometida a las acciones gravitatorias y a un movimiento de rotación (Fig. 1). Por una parte habrá que efectuar numéricamente una comprobación de que las formas teóricas que se establezcan sean compatibles con la realidad, y por otra, a partir de la observación, habrá que calcular los parámetros que definan su forma y sus dimensiones. Aquí los conceptos físicos y geométricos están interrelacionados; la teoría del potencial y las ecuaciones integrodiferenciales juegan un papel principal.

En Geodesia la superficie matemática de la Tierra es el **geoide**, superficie equipotencial en el campo de la gravedad terrestre que se toma como cota cero en la determinación de altitudes ortométricas. La materialización aproximada del geoide sería una superficie que envolviera la Tierra y que resultase de la prolongación de la superficie media de los mares a través de los continentes, siendo normal a todas las líneas de fuerza del campo gravífico terrestre. La determinación del geoide se convierte así en uno de los objetivos fundamentales de la Geodesia.



*Fig.1. Imagen de la Tierra desde el espacio*

El estudio de las **mareas terrestres** o variaciones periódicas de la vertical también es objeto de la Geodesia, cuyas conclusiones al respecto son de sumo interés para la astronomía y la geofísica. Se estudian fundamentalmente las acciones atractivas del Sol y la Luna sobre la Tierra, la teoría del movimiento de estos astros es bien conocida. La observación del fenómeno consiste en la

medida de las desviaciones provocadas en la vertical física, en sus componentes vertical y horizontales.

Este es el objeto de la Geodesia en su forma general, sin embargo no debemos olvidar otros fines prácticos de lo que podríamos llamar Geodesia regional o utilitaria. Nos referimos a su aplicación a la formación de cartas o **mapas** en su más amplio sentido, incluyendo desde la carta topográfica fundamental de un país a las cartas o mapas especiales para fines concretos. En estos menesteres la Geodesia debe proporcionar la infraestructura geométrica necesaria y efectuar mediciones precisas de distancias, ángulos, altitudes, orientaciones observaciones a satélites, etc. La formulación matemática se trata en la teoría de **Redes Geodésicas**. Como ejemplos, las cartas hidrográficas para la navegación o las cartas planimétricas de empleo en agrimensura o catastro implican, cada una de ellas, una Geodesia particular con métodos apropiados. Tanto la medida geométrica de emplazamiento de radiofaros, torres de control, antenas, como los apoyos de base para construcción de túneles, acueductos o autopistas incumbe en parte a la Geodesia. También debemos incluir los estudios del medio ambiente, búsqueda de recursos mineros y energéticos, sobre todo para fijar áreas de explotación y zonas de prospección para concesiones. Estas y otras necesidades civiles hacen que se desarrollen métodos precisos y se utilicen tanto las técnicas clásicas como los modernos satélites artificiales.

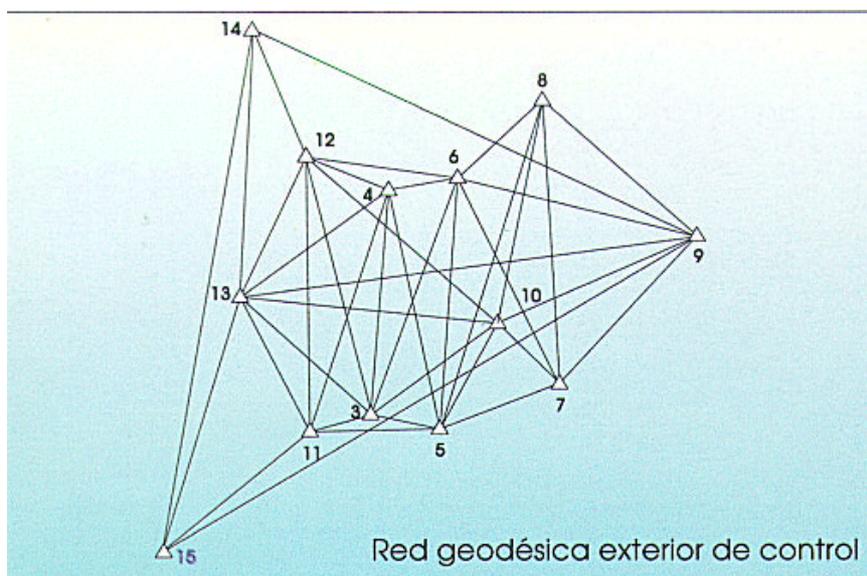


Fig. 2. Red de control de la presa El Atazar

Mención aparte debemos hacer al estudio de **deformaciones de la corteza**. La precisión alcanzada por los instrumentos de medida geodésicos es tan alta que pueden detectarse movimientos de la corteza del orden del milímetro. Esto abre un nuevo campo de actuación en el que entran de lleno los estudios de control de zonas activas de la corteza, los parámetros determinados pueden utilizarse como precursores de desastres naturales como en el caso de terremotos o erupciones volcánicas y su conexión con la geodinámica del planeta.

Citemos por último las grandes aplicaciones de la **microtriangulación** o fijación de posiciones relativas de puntos con precisiones del orden de la décima de milímetro. Esta precisión es necesaria en el control de ciertas instalaciones tales como fábricas de funcionamiento automático, centrales nucleares, instalación de radiotelescopios y en el estudio de deformación de presas (Fig. 2) y de grandes estructuras, etc.

## 2. DIVISIONES DE LA GEODESIA

Los objetivos de la Geodesia pueden alcanzarse siguiendo diversos métodos de trabajo a partir de distintos tipos de datos obtenidos directa o indirectamente, siendo así que atendiendo a ellos podemos distinguir tres grandes ramas.

**Astronomía Geodésica.**- Es aquella parte de la Geodesia que con métodos y observaciones astronómicas trata fundamentalmente de obtener la dirección de la vertical; determina, pues, coordenadas astronómicas, latitud  $F$ , longitud  $L$  (o el tiempo  $t$ ) y acimutes astronómicos  $a$ . Con los datos obtenidos trata de determinar el geoide como figura de la Tierra por el método de nivelación astrogeodésica, y efectuar la reorientación de redes geodésicas en la compensación con puntos Laplace. Las determinaciones astronómicas, tanto su teoría como sus métodos son a veces incluidas dentro de la astronomía de posición. Los métodos de pasos meridianos y de alturas iguales son los más comúnmente empleados.

**Geodesia Geométrica.**- Es aquella rama de la Geodesia en la que los datos de observación están constituidos por las medidas de ángulos y distancias en la superficie terrestre. Estos datos son referidos a un elipsoide de referencia para construir las triangulaciones en el caso de la Geodesia clásica bidimensional o bien estudiados en coordenadas cartesianas en el caso de la Geodesia tridimensional. También son necesarias las determinaciones de altitudes de puntos sobre una superficie de cota cero. El conocimiento de la geometría del elipsoide de revolución es fundamental.

**Geodesia Dinámica.**- Es aquella rama de la Geodesia que basada en la teoría del potencial, trata de las medidas de la gravedad, del estudio del campo exterior y de la obtención de la forma de la Tierra; sus datos fundamentales son las medidas de la gravedad efectuadas generalmente en superficie, y las perturbaciones observadas en el movimiento de un satélite artificial. Está relacionada con la Geodesia geométrica, con la geofísica, con la astronomía y con la mecánica celeste. Suele subdividirse en gravimetría, teoría del campo y consecuencias.

No obstante esta división, hoy día los métodos globales de la Geodesia actúan en conjunto con datos geométricos y dinámicos a fin de alcanzar sus objetivos de forma conjunta en la llamada **geodesia integrada**.

Desde el punto de vista temático, la Geodesia puede dividirse en diversas secciones o capítulos que, aunque relacionados unos con otros, algunos de ellos han adquirido entidad propia. Así, entre otros, tenemos.

**Teoría de la figura de la Tierra.**- Constituida por los principios de la teoría del potencial y teoría de figuras de equilibrio aplicados al campo de gravedad terrestre.

**Teoría de redes geodésicas.**- Incluye el estudio de las triangulaciones y trilateraciones, el cálculo y compensación de redes geodésicas y el cálculo de coordenadas, con el análisis estadístico de los resultados.

**Nivelación.**- Trata de todo lo referente a la medida de altitudes y establecimiento de redes altimétricas.

**Teoría de la rotación de la Tierra.**- Estudia el movimiento de rotación de la Tierra, en un sistema de referencia fijo en el espacio (precesión y nutación) y en un sistema de referencia fijo al cuerpo (velocidad de rotación y movimiento del polo) y está íntimamente ligada a la astronomía en lo referente a los sistemas de tiempo y nutación y a la geofísica con los modelos del interior de la Tierra. Sus principales datos son las determinaciones astronómicas clásicas, los resultados de la Geodesia Doppler, GPS, laser y VLBI.

**Gravimetría.**- Trata de las determinaciones de la gravedad, sus reducciones, cálculo de anomalías y establecimiento de redes gravimétricas; sirve de base para aplicaciones geodésicas y geofísicas.

**Geodesia Física.**- Está constituida por aquellas teorías y métodos encaminados a la determinación del geoide, con datos dinámicos o gravimétricos, mediante un análisis del problema de contorno de la teoría del potencial. Describe los modelos terrestres de comparación para el establecimiento de la figura de la Tierra, calcula y utiliza fundamentalmente las anomalías gravimétricas. También estudia el campo exterior de la gravedad.

**Mareas terrestres.**- Estudia las desviaciones periódicas de la vertical debidas a las acciones gravitatorias del Sol y la Luna y sus efectos sobre el geoide y

deformaciones de la Tierra, tanto desde un punto de vista teórico como numérico y experimental.

**Geodesia tridimensional.**- Trata el problema de la forma y dimensiones de la Tierra en un sistema de referencia tridimensional, aquí el elipsoide sólo será una superficie auxiliar de la que puede prescindirse. Su evolución actual se dirige al estudio de cuestiones de holonomía con sistemas de referencia móviles.

**Geodesia espacial.**- Esta nueva rama de la Geodesia trata principalmente con satélites artificiales cuya observación resulta más cómoda y precisa que la tradicional. Aplica técnicas tridimensionales y resuelve todos los problemas de la Geodesia tanto geométricos como dinámicos. En los cálculos emplea frecuentemente técnicas de colocación por mínimos cuadrados. Incluiremos también en la Geodesia espacial los métodos propios de la VLBI.

Ya con entidad independiente, tenemos:

**Cartografía.**- Trata del establecimiento de cartas de todo tipo y engloba todas las fases de trabajo, desde los primeros levantamientos hasta la impresión final de los mapas. Se incluyen los Sistemas de Información Geográfica.

**Topografía.**- Trata del estudio y aplicación de los métodos necesarios para llegar a representar el terreno con todos sus detalles, naturales o no, en él existentes, así como de los instrumentos utilizados.

**Fotogrametría.**- Técnica que trata de estudiar y definir con precisión las formas, dimensiones y posiciones en el espacio, de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente una o varias fotografías del mismo, en nuestro caso del terreno.

### 3. MÉTODOS GEODÉSICOS

Los métodos geodésicos no son otra cosa que la aplicación al estudio de la Tierra de la metodología científica de "Observación, Cálculo y Comprobación". Se observa un fenómeno, con teorías físicas y el uso de la matemática se establece un modelo que lo represente y después se comprueba lo cercano que este modelo y sus consecuencias están de la realidad observada.

Como ya se ha dicho, la Geodesia pretende conocer la forma y dimensiones de la Tierra y la representación de puntos de su superficie, interesa, pues, conocer para cada punto de la superficie terrestre unas coordenadas que lo determinen que generalmente serán bien cartesianas  $(x,y,z)$  o bien geográficas  $(\varphi,\lambda,h)$  en un cierto sistema de referencia bien definido.

Para la **determinación de las coordenadas geográficas** puede pensarse en principio en la observación astronómica, esto puede ser válido para obtener

las coordenadas de puntos individuales en número reducido, pero es evidente que pretender, por este procedimiento, asignar coordenadas a todos los puntos de la superficie terrestre es prácticamente imposible. Para subsanar este problema, la Geodesia clásica adopta una superficie matemática como figura de la Tierra y recubre dicha superficie con una red de triángulos de forma que conociendo las coordenadas de un vértice puedan calcularse las de los demás utilizando para ello simples medidas de ángulos o de distancias, o de ambas cosas.

Efectivamente, si suponemos por un momento la Tierra esférica, sea  $A$  un punto de coordenadas  $(j, l)$  conocidas (por ejemplo por observación astronómica); para calcular las coordenadas de otro punto  $B$  de la misma superficie consideremos el triángulo de posición  $PAB$  que los puntos  $A$  y  $B$  forman con el polo  $P$  de la esfera; si medimos la distancia  $AB$  entre ambos puntos y el acimut en  $A$  de la dirección  $AB$ , respecto del polo  $P$ , en el triángulo anterior conoceremos tres elementos: los lados  $AB$ , medido, y  $PA = 90 - j$ , dato, y el ángulo en  $A$  medido (Fig. 3).

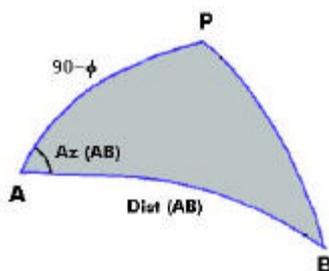


Fig. 3. Cálculo de coordenadas

Resolviendo entonces este triángulo con las fórmulas clásicas de la trigonometría esférica, podremos conocer el lado  $PB$  que dará la latitud de  $B$  y el ángulo en  $P$  que siendo la diferencia de longitudes nos dará la longitud de  $B$ .

Con este sencillo procedimiento podrían determinarse las coordenadas de más de un punto y tendríamos la base para efectuar una representación cartográfica. Después de haber resuelto una red de grandes triángulos o red de primer orden, se plantearía otra red de triángulos más pequeños, denominada de segundo orden, apoyada en la anterior y así sucesivamente con un tercer y un cuarto orden hasta llegar a los trabajos de relleno propios de la Topografía. Esta es la teoría de redes geodésicas con infinitud de aplicaciones.

Mención aparte debemos hacer de la **altitud**  $h$ , tanto en su definición como en su determinación. Desde un punto de vista geométrico nos dará idea de la

distancia de dicho punto a una cierta superficie de referencia. La elección de dicha superficie y de la línea sobre la que se toma dicha distancia son otros tantos problemas que la Geodesia debe resolver, debiendo dar, además, la definición precisa de altitud, concepto que vendrá a relacionar los aspectos geométricos y dinámicos de la Geodesia. Generalmente todo esto se conoce con el nombre de **nivelación**.

Evidentemente, las técnicas de cálculo no son tan sencillas como la expuesta anteriormente para el modelo esférico, pero hoy día esto no es problema: la matemática nos proporciona los métodos de cálculo (por ejemplo sobre un elipsoide) y las computadoras lo ejecutan.

Al suponer los vértices de una red geodésica fijos, podemos obtener, en la fase de observación, más datos de los estrictamente necesarios para su cálculo, esta superabundancia de datos unido al hecho de que las observaciones en esencia son magnitudes aleatorias, nos permitirá aplicar técnicas estadísticas para obtener como resultado un conjunto único y geométrico de valores de las coordenadas de los puntos y una estimación de la precisión alcanzada. Esta fase se conoce con el nombre de **compensación** de la red.

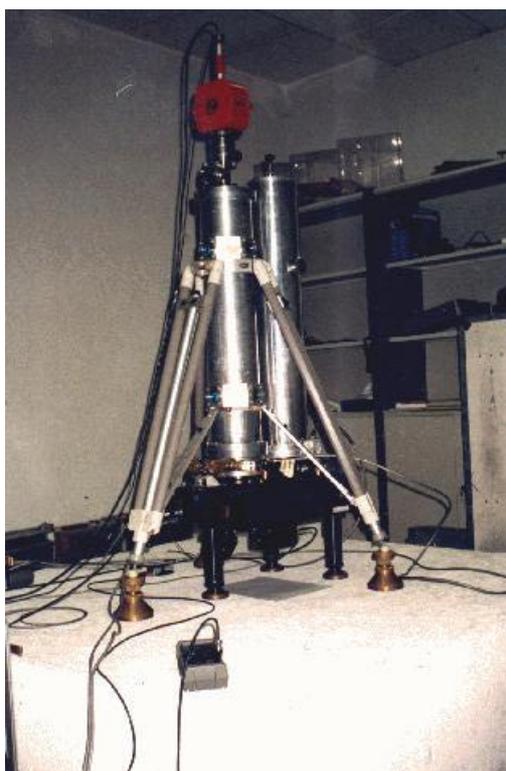
La Geodesia clásica trata de resolver el problema de la figura de la Tierra siguiendo el proceso siguiente: a) Determinación de un elipsoide de revolución como figura aproximada de la Tierra, b) Determinación del geoide sobre este elipsoide dando sus ondulaciones o cotas del geoide sobre el elipsoide y c) Determinación de las posiciones de puntos de la superficie topográfica terrestre con relación a la superficie del geoide mediante nivelación. En la determinación de este elipsoide que será el que mejor se adapte a la forma de la Tierra, se utilizarán observaciones astronómicas y geodésicas principalmente datos gravimétricos y de satélites artificiales, siguiendo distintos métodos para la resolución del problema. Se denominará **elipsoide de referencia**.

En todos sus aspectos la Geodesia clásica presupone, o bien el conocimiento de la figura de la Tierra para la determinación de puntos de su superficie, o bien el conocimiento de dichos puntos para la determinación de la forma. En este sentido, se entiende por forma de la Tierra el **geoide**, que puede determinarse por diversos métodos y, si se elige convenientemente el elipsoide de referencia, la experiencia demuestra que las diferencias entre una y otra superficie son pequeñas alcanzando raramente el centenar de metros.

Para la determinación del geoide y del campo de gravedad de la Tierra se necesitan medidas de la gravedad, estas se obtienen con los instrumentos y métodos propios de la **gravimetría** (Fig. 4).

La metodología geodésica también incluye técnicas tridimensionales. El cálculo riguroso de una triangulación en el espacio fue emprendido por Bruns en 1856, pero es Martín Hotine quien en 1956 propone las bases en las que se asentará la Geodesia tridimensional, plenamente realizada mediante la Geode-

sia espacial con la utilización de satélites artificiales. Con los satélites se dispone en las cercanías de la Tierra de puntos de observación y medida que podrán ser situados en aquellos lugares que nos interese independientemente de la geografía de la zona.



*Fig. 4. Gravímetro*

La Geodesia **tridimensional** persigue el estudio de la figura de la Tierra y del potencial exterior sin hipótesis previas sobre su forma, es decir, evitando la engorrosa utilización del elipsoide como figura aproximada. La parte geométrica de esta rama de la Geodesia consiste en el establecimiento de un inmenso poliedro cuyos vértices estén dados por sus coordenadas cartesianas tridimensionales en un sistema de referencia cuyo origen sea el centro de gravedad de la Tierra y cuyo eje principal sea su eje de rotación convencionalmente establecido. La parte dinámica de la Geodesia espacial consiste en el análisis de las perturbaciones que en el movimiento de un satélite introduce la forma de la Tierra y conocidas aquellas determinar ésta.

La Geodesia clásica suponía en sus consideraciones teóricas que sus objetivos, forma de la Tierra, posiciones de puntos de su superficie y campo de

gravedad no variaban con el tiempo salvo por el efecto periódico de marea. Sin embargo, la Geodesia moderna ha llegado a un estado de desarrollo tal que la precisión alcanzada nos dice que, como indica la teoría, ya no pueden seguirse considerando invariables los objetos de estudio. Por consiguiente, se hace necesario investigar a fondo problemas **geodinámicos** y esto ya puede hacerse fundamentalmente por dos razones: porque se dispone de potentes ordenadores electrónicos que permiten tratar matemáticamente grandes series de datos y porque, además, pueden utilizarse los **satélites artificiales** para la obtención de un número prácticamente ilimitado de tales datos de observación.

En líneas generales habrá que establecer un sistema de referencia bien definido, una red geodésica de puntos de referencia cuyo movimiento pueda ser estudiado, conociendo para ello su posición en función del tiempo. En esta red podremos obtener un conjunto de observables básicos, tales como ángulos, distancias, diferencias de distancias, velocidades, aceleraciones, etc., con los cuales podremos emprender el estudio de una gran cantidad de problemas astronómicos, geodésicos y geofísicos, entre los que podemos destacar la rotación de la Tierra y el movimiento del polo junto con los mecanismos de excitación, la disipación de energía y los posibles orígenes geofísicos de las irregularidades observadas. También podremos estudiar los movimientos de la corteza terrestre, tanto debidos a mareas como a la tectónica de placas, incluyendo los movimientos sísmicos y sus efectos además de las posibles interacciones entre las masas continentales, atmosféricas y oceánicas.

#### **4. NOTICIA HISTÓRICA**

El estudio y evolución de la Geodesia ha planteado grandes problemas matemáticos en todas las épocas, y en la historia de esta ciencia aparecen los más eminentes científicos de la Humanidad, quienes han aportado sus conocimientos y contribuido a su desarrollo. Al mismo tiempo, o quizá por ello, la Geodesia ha sufrido los avatares y controversias del desarrollo cultural de los pueblos y en muchos casos la influencia de ciertas filosofías e incluso de la propia teología, sobre todo en la edad media, ha sido manifiestamente negativa.

**Época remotísima.**- No está admitida la existencia de civilizaciones superdesarrolladas en tiempos remotos en pueblos antiguos del Asia Central: chinos, sumerios, asirios, etc., que poseyeran una cultura más vasta que la actual y que por lo tanto tuvieran grandes conocimientos acerca de la figura de la Tierra así como del resto del Universo.

## 4.1. Grecia

Las primeras referencias griegas sobre la forma de la Tierra son más poéticas que científicas, no hay más que leer los poemas de **Homero (900 a.C.)**. En sus poemas heroicos resume todos los conocimientos cosmográficos y geográficos de la época y del pueblo heleno, en gran desarrollo, con una gran imaginación. Supone la Tierra plana y limitada en todos sus sentidos por las aguas del océano, coloca en medio a Grecia y en particular al monte Olimpo correspondiente a la Tessalia. En los confines del horizonte supone misteriosas columnas que sirven de sustentáculo a los cielos; bajo el suelo a gran profundidad sitúa a Tártaro morada de los enemigos de los dioses y fuera de los confines misteriosos de la Tierra el caos o la inmensidad. Esto no es ni más ni menos que la interpretación de la naturaleza por un espíritu de imaginación brillante.

**Tales de Mileto (639-546 a.C.)** decía que la Tierra era un barco redondo flotando en un océano sin límites. **Anaximandro de Mileto (610-547 a.C.)**, discípulo de Tales, dice que es un cilindro que ocupa el centro de todo lo creado, pero construye la primera carta geográfica conocida. Para su discípulo **Anaxímenes (550-480 a.C.)** y para **Anaxágoras de Clazomene (500-428)**, el Sol es un disco muy delgado y la Tierra es otro disco o trapecio suspendido en el aire. **Jenofantes de Colofón (540 a.C.)** suponía la Tierra plana e ilimitada.

Los filósofos griegos afirmaban que la Tierra era esférica 500 años a. C. y se apoyaban en que la forma geométrica más perfecta era la esfera. **Parménides (515-440 a.C.)** y **Empedocles (470 a.C.)** emitieron por primera vez la idea de la esfericidad de la Tierra y su aislamiento en el espacio. **Pitágoras de Samos (569-470 a. C.)** llegó a decir que la Tierra no podía tener otra forma y que además estaba aislada en el espacio e inmóvil. **Filolao (450 a.C.)**, de la escuela pitagórica, opina que la Tierra gira alrededor de sí misma produciendo los días y las noches y se desplaza, como el Sol, la Luna, los planetas y a mayor distancia el cielo con las estrellas fijas, alrededor del fuego central, alma del mundo; también se desplaza el Antichton (hemisferio opuesto). Sin embargo, **Leucipio (460-370 a.C.)** y **Demócrito de Abdera (460-370 a.C.)** suponían otra vez que era un disco plano sostenido por el aire. **Hicetas, Heráclides (388-315 a.C.)** y **Efanto** atribuían a la Tierra un movimiento de rotación y pensaban que por lo menos la Tierra, Mercurio y Venus se movían alrededor del Sol.

**Platón (429-338 a.C.)**, que admite que la Tierra es redonda, la supone aislada e inmóvil. **Eudoxio de Gnido (409-356 a.C.)**, discípulo de Platón, da la teoría de las esferas de cristal para explicar el movimiento de los planetas y estrellas (supone veintiséis) con ejes en distintas direcciones y movimientos diversos, **Calipo** llega a treinta y tres esferas y **Aristóteles (384-322 a.C.)**, a cincuenta y cinco. La teoría aristotélica sostiene: 1) La Tierra es esférica porque tal es la forma aparente de los demás astros, tal es también la forma que toma un cuerpo, como una gota de agua, sometido a la sola presencia de sus partes y tal es la forma que nos revela la sombra terrestre en los eclipses de Luna. 2) Las dimensiones de la Tierra no deben ser desmesuradas puesto que con el cambio de lugar varían el aspecto y número de las estrellas visibles. 3) La Tierra no debe moverse en el espacio, ya que su movilidad hipotética no se refleja en la posición constante de los demás astros, la altura de un astro variaba de igual forma a la misma hora en cualquier parte de la Tierra. Esta teoría tuvo una vigencia de siglos dado que era utilizada por la mayor parte de las religiones.

El geógrafo **Dicearco (350-285 a.C.)** supone la Tierra esférica y refiere sus medidas al meridiano y al paralelo de Rodas introduciendo así las coordenadas esféricas. El geómetra **Euclides** enuncia las leyes del movimiento diurno y hace observar que entre las Osas hay una estrella que no se mueve. **Arquímedes (287-212 a.C.)** da un gran impulso a las matemáticas y evalúa la circunferencia terrestre.

En contra de las teorías aristotélicas aparecen las revolucionarias de **Aristarco de Samos (310-230 a.C.)** que eliminó todas las esferas y estableció el sistema heliocéntrico; la oposición de **Aristóteles** y **Cleantes (331-232 a.C.)** silenciaron estas teorías hasta los tiempos de **Copérnico**.

Admitiendo la esfericidad de la Tierra, **Eratóstenes de Cyrene, (276-195 a.C.)**, bibliotecario de la Biblioteca de Alejandría fundada por el rey de Egipto Ptolomeo Soter, fue el primero en determinar 240 años a.C. el radio terrestre.

Midió la longitud del meridiano entre Siena (actual Asuan) y Alejandría, obteniendo un valor de unos 39000 Km. para la longitud de la circunferencia terrestre (unos 6207 Km. de radio). Eratóstenes se dio cuenta de que en el solsticio de verano, el Sol iluminaba en Siena los pozos hasta el fondo, por lo que en ese momento se encontraba en el cenit en su culminación. En ese mismo instante midió la altura del Sol en Alejandría, que suponía estaba en el mismo meridiano que Siena. La distancia cenital determinada no era otra cosa que el ángulo que en el centro de la Tierra esférica sustentaba el arco de meridiano Siena-Alejandría (Fig. 5).

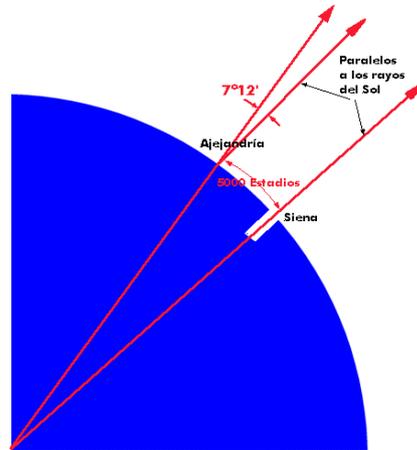


Fig. 5. Esquema del método de los arcos

También conocía Eratóstenes la distancia entre ambas ciudades, así tenía todos los datos para determinar el radio de la Tierra. Las hipótesis y medidas de Eratóstenes no eran exactas, por ejemplo entre Siena y Alejandría hay una diferencia de longitudes de cerca de  $3^\circ$ , pero sí su método, conocido como método de los arcos, que fue utilizado durante muchos siglos.

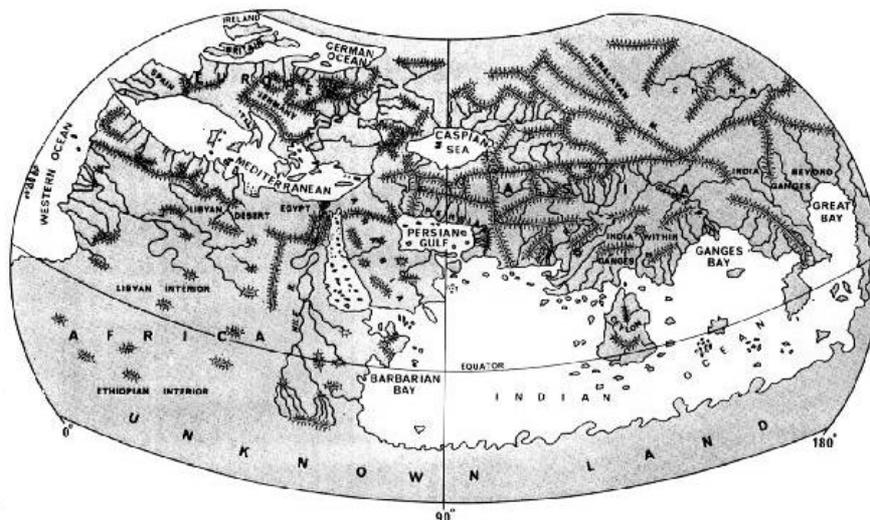
Este método de los arcos fue aplicado por **Posidonio, (135-51 a.C.)** que midió el arco entre Rodas y Alejandría, sustituyendo el Sol por la estrella Canopus, pero obtuvo un valor de unos 29000 Km. para la circunferencia (unos 4615 Km. de radio).

El gran astrónomo de esta época fue **Hiparco de Nicea (190-120 a.C.)** que pensaba que la Tierra es esférica y que está inmóvil en el centro del mundo, inventa la trigonometría, descubre la precesión de los equinoccios, conoce el valor de la inclinación de la eclíptica y determina la duración del año trópico, entre otros trabajos astronómicos.

En tiempos de Julio Cesar (46 a.C.), que mandó hacer un levantamiento cartográfico del Imperio Romano, son de destacar los geógrafos **Estrabón (55 a.C. – 25 d.C.)** y **Plinio el Viejo (23-79 d.C.)** que observa las mareas en Cádiz y que murió observando la erupción del Vesubio en el año 79 d.C.

El mayor geógrafo y astrónomo de este tiempo fue **Claudio Tolomeo (100-170 d.C.)**, que admitió el valor del radio terrestre de Posidonio y además lo transmitió a su posteridad. Autor de los trece volúmenes del *Almagesto* de cuyo original no se dispone pero si se tienen las traducciones hechas al árabe por el sirio Hunaim Ibn Ishaq en el siglo IX y al latín por Gerardo de Cremona en el siglo XII en Toledo. Ideó el sistema planetario geocéntrico basado en sus observaciones desde el templo de Serapis. Construyó un mapa del mundo y las posiciones terrestres las representaba por la latitud y longitud, la autori-

dad de Tolomeo traspasó su época. En la Figura 6 puede verse el mapa del mundo atribuido a Tolomeo.



*Fig. 6. Mapa del mundo de Tolomeo*

## 4.2. Edad media

Las ideas aristotélicas impregnaron la Edad Media en Europa, se admitía la esfericidad de la Tierra, pero se explicaba muy mal. Se suponía la Tierra cubierta de agua excepto la parte habitada (ecumene), en las antípodas era imposible vivir “boca abajo”. La historia de esos siglos está moteada por los avances y descubrimientos de matemáticos y astrónomos que no dejan de considerar los problemas geodésicos en sus trabajos; un resumen de los conocimientos matemáticos es realizado por el geómetra **Papús** (400).

Es de destacar la medida del arco de meridiano realizada por el monje budista chino **I Hsing** en el año 727.

Las aportaciones árabes a la Geodesia son muy reducidas, aunque merecen destacarse las expediciones organizadas en las llanuras de Palmira y Zinjara, cerca de Bagdad y Al Raqqah por el califa **Al-Mamún (786-833)**, hijo del Haroun al-Raschid, (830) para determinar la longitud del grado, y los trabajos del matemático **Al-Khwarizmi** que publicó un mapa del mundo conocido y determinó el radio de la Tierra, además de introducir en las matemáticas los

numerales hindúes 1,2,... y de cuyo nombre se tomó la palabra algoritmo tantas veces usada después.

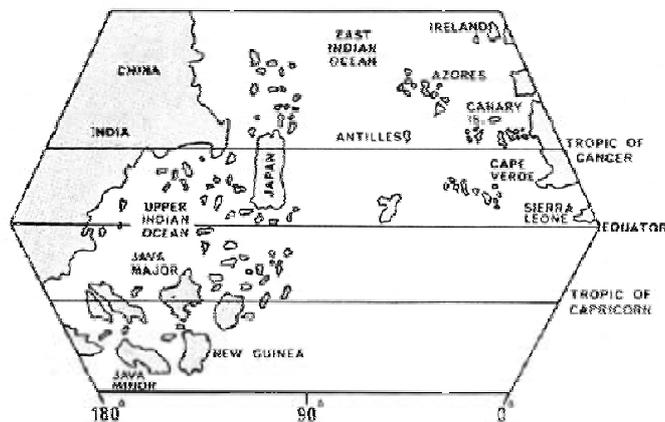
El astrónomo **Al-Battani (858-929)** hacia el año 900 publica un tratado de geografía dando las posiciones de las principales ciudades; sirviéndose de la trigonometría publica tablas astronómicas de uso común. Los astrónomos árabes **Aboul Wefa** y **Ben Younis** recalculan las constantes astronómicas y **Alhazen (966-1039)** escribe un tratado de óptica. En 1154, en Sicilia, aparece la gran compilación de *Geografía Universal* de **Idrisi (1098-1166)**.

Las primitivas enseñanzas griegas, de maestros de la categoría de Pitágoras, Eudoxio, Aristóteles, Eratóstenes, Hiparco y Tolomeo, entre otros, sobrevivieron gracias a la civilización árabe, y en el siglo XII, a través de España, llegaron a Europa en las traducciones al latín hechas en el reinado de Alfonso X de Castilla.

Un caso digno de mención es el de **Roger Bacon (1214-1294)**, creador de la óptica, estudia la refracción, gran problema de las observaciones, trata la astronomía y la geografía y considera las mareas terrestres como el resultado de la atracción lunar.

### 4.3. Siglos XV y XVI

Pasado este tiempo, surge la época de las grandes exploraciones. En primer lugar fue, posiblemente, el viaje de **Marco Polo (1254-1324)** de 1271 a 1295 el que sirvió a **Toscanelli (1397-1482)** para la confección de un mapa (Fig. 7) que quizá influyó en la decisión de **Cristóbal Colón (1492)** de cruzar el Atlántico navegando hacia el oeste

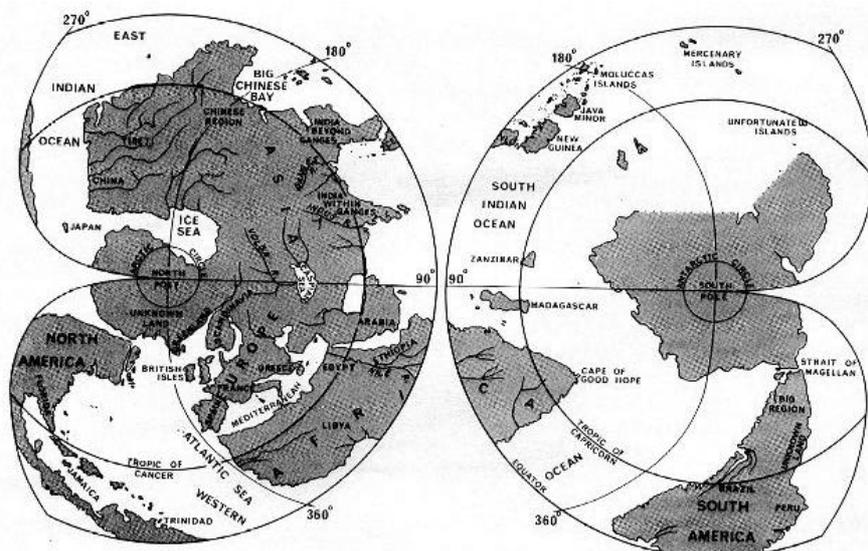


*Fig.7. Mapa de Toscanelli*

Pero Toscanelli, cometió un gran error pues tomaba como radio de la Tierra el determinado por Posidonio y transmitido por Ptolomeo y como en sus mapas se apoyó Colón no es de extrañar que éste creyera que el Cipango y el Catay estaban más cerca (1025 leguas) de lo que realmente resultó (3150). Según relata en su tercer viaje, Colón se percató de que la Tierra no era esférica, pero no supo explicarlo.

Después de Colón, **Vasco de Gama (1469-1524)** llega al sur de África y **Magallanes (1480-1521)** y **Elcano (1519-1522)** dan la vuelta al mundo.

Las necesidades de navegación, principalmente, hicieron que se organizaran verdaderas escuelas de cartógrafos, quienes con los conocimientos, muchas veces imprecisos, aportados por la Geodesia confeccionaron gran cantidad de mapas, algunos de los cuales adquieren gran renombre, como los del italiano **Américo Vespucio (1415-1512)** quien obtuvo los primeros mapas de la costa oeste de América del norte y dio nombre al continente. Sin embargo el cartógrafo por excelencia de esta época, cuyos mapas satisfacían las necesidades de la navegación, fue el flamenco **Gerhard Kaufmann (1512-1594)** más conocido por **Mercator**. En la Figura 8 puede verse el mapa del mundo de Mercator.

*Fig. 8. Mapa del mundo de Mercator*

Hasta finales del siglo XV no aparecen en Europa nuevas ideas en el terreno de la Geodesia o de la astronomía. Quizá deba recordarse al cardenal alemán **Nicolás de Cusa (1401-1464)** que se hizo famoso por su idea del Universo infinito y que estudió el movimiento diurno de la Tierra. Otros como **Peurbach (1423-1461)**, **Waltherus (1430-1504)** y **Regiomontano (1436-1476)** hicieron algunos intentos para evolucionar las ideas, y **Leonardo da Vinci (1452-1519)**, además de un artista confirmado, fue un buen científico, sugiriendo ya ideas sobre la isostasia y las mareas terrestres.

El gran astrónomo de esta época es **Nicolás Copérnico (1473-1543)** quien en su obra "*De Revolutionibus Orbium Coelestium*" de 1543 da la teoría heliocéntrica del sistema solar, que vino a revolucionar el pensamiento de la época anclado en las ideas aristotélicas; se entablaron duras polémicas y se logró indirectamente que la atención de los astrónomos y geodestas se dirigiese por este camino. Proliferaron las observaciones, se construyeron observatorios y en general la astronomía tuvo el apoyo de gobiernos y particulares que de otra manera difícilmente se hubiese logrado. Naturalmente, la Geodesia y la navegación se beneficiaron enormemente de los resultados que se estaban obteniendo, pues pronto dispusieron de un mejor conocimiento de las posiciones de los cuerpos celestes indispensables para sus fines de posicionamiento y orientación. La teoría heliocéntrica pronto fue admitida por el mundo científico; la razón se imponía a la teología, aunque no sin grandes sacrificios: el italiano **Giordano Bruno (1548-1600)** fue ejecutado por hereje al admitir las ideas copernicanas y **Galileo** fue obligado a retractarse de las mismas en uno de los procesos más famosos de la historia.

El gran observador de esta época es **Ticho Brahe (1546-1601)** cuyas observaciones del planeta Marte permitieron a **Kepler (1571-1630)** enunciar sus dos primeras leyes sobre el movimiento de los planetas. También Kepler propuso un método para determinar el radio terrestre, consistía en medir la distancia entre dos puntos alejados sobre la superficie de la Tierra y los ángulos formados por la recta que los une con las verticales en ambos extremos. En los países católicos la Inquisición incluye en el Index de libros proscritos las obras de Copérnico, Galileo y Kepler, entre otros, y esta situación se mantiene nada menos que hasta 1822 en que intenta producirse una reconciliación entre la razón y la fe. Pero hubo de esperarse hasta octubre de 1992 cuando el Papa polaco Juan Pablo II reconoció oficialmente que la Iglesia Católica dejaba de considerar hereje a Galileo.

Un invento matemático viene a ayudar de forma definitiva la realización de cálculos geodésicos y astronómicos. Se trata de los logaritmos inventados por **Neper (1550-1617)** en 1595, estos no eran ni decimales ni neperianos. Las tablas de logaritmos decimales fueron publicadas por **Briggs** en 1624 y los logaritmos neperianos fueron introducidos por **Euler** en 1748.

En cuanto a las medidas del arco cabe destacar que el médico francés **Fernel (1485-1558)** en 1525 midió la distancia entre París y Amiens con un cuadrante y contando las vueltas que daban las ruedas de su carruaje.

#### 4.4. Siglo XVII

Las investigaciones y los trabajos geodésicos continúan, pero con unas bases mucho más científicas que antes. **Stevin (1548-1620)** intuye la gravedad. **Galileo Galilei (1564-1642)** aplica el anteojo a las observaciones astronómicas y enuncia las primeras leyes de la mecánica con los importantes conceptos de velocidad y aceleración, también establece las leyes de la caída de los graves. La refracción es estudiada por los matemáticos **Fermat (1601-1665)** y **Descartes (1596-1650)** quien en 1637 publica las leyes por las que se rige. También Descartes presenta su teoría de los torbellinos para explicar el Universo.

Las medidas del arco continúan. En 1615 el holandés **Snellius (1580-1626)** realizó la primera triangulación precisa y estudió la refracción; midió un arco entre Bergen op Zoom y Alkmaar con una base cerca de Leyden. Este método, cuyos principios fueron dados por **Gemma Frisius** en 1533, perduró hasta el siglo XX con las mejoras aportadas por los instrumentos de observación y medios de cálculo. También se efectúan mediciones en Inglaterra por **Norwood (1590-1675)** que en 1633 mide el arco entre Londres y York y en Italia por los jesuitas **Riccioli (1598-1671)** y **Grimaldi** usando por primera vez ángulos cenitales recíprocos en 1645, aunque tuvieron problemas con la refracción atmosférica. En España aparece, en 1615, un mapa de Aragón realizado por **Juan Bautista de Labaña (1555-1625)** en el que se utilizan las triangulaciones para los levantamientos.

En 1670 en Francia, el abad **Picard (1620-1683)** mejora los procedimientos de observación al aplicar a los instrumentos goniométricos un anteojo provisto de retículo (Fig. 9) formado por dos hilos en cruz. Midiendo por triangulación el arco de París entre Malvoisine (al sur de París) y Sourdon (al sur de Amiens) determinó el radio terrestre y su resultado (6275 Km. de radio) fue de trascendental importancia pues sirvió a **Newton (1642-1727)** para calcular la distancia a la Luna, que venía dada en unidades del radio terrestre, y comprobar su ley de gravitación universal formulada en 1666 y publicada en 1687. Newton suponía que la fuerza de atracción que mantiene la Luna en su órbita alrededor de la Tierra es la misma que la fuerza que actúa sobre los cuerpos de la superficie terrestre, entonces sólo tenía que comparar la fuerza

de atracción con la gravedad obtenida por **Galileo**. Los precursores de la Ley de Newton parecen ser el italiano **Borelli (1608-1679)** y los ingleses **Horrox (1619-1641)** y **Robert Hooke (1635-1703)** que dedicó gran parte de su obra al estudio de la gravedad. También disponía Newton de la matemática necesaria, puesta a punto por él mismo, por **Descartes** y por **Leibnitz (1646-1716)** principalmente.

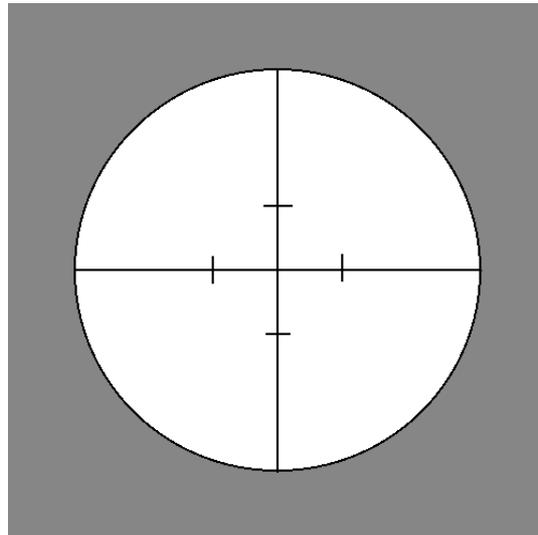


Fig. 9. Retículo de anteojo

La aplicación de la Ley de Newton a la teoría de figuras de equilibrio permitió concluir que la Tierra no era una esfera sino que debía ser un elipsoide de revolución achatado por los polos del eje de rotación. Fundamentalmente **Newton** trata el problema de la figura de la Tierra en las proposiciones XVIII, XIX y XX de su obra “*Philosophiae naturalis principia mathematica*”, también en esta obra da la primera explicación correcta del fenómeno de las mareas y efectuó cálculos precisos de las mismas. Ya en 1672 **Richer** había observado que el péndulo astronómico es más lento en Cayena que en París y **Huygens, (1629-1695)**, el gran experto en relojes, que utilizó el primer reloj de péndulo preciso, interpretó estas variaciones diciendo que la gravedad aumenta del ecuador a los polos porque la Tierra es aplanada. Esto se verifica para el elipsoide de Newton

#### 4.5. Siglo XVIII

El siglo XVIII está dedicado en primer lugar a la medida de la longitud del grado para determinar el aplanamiento de la Tierra y en segundo lugar al desarrollo teórico de la Geodesia Dinámica.

**Dominico Cassini (1625-1712)**, director del observatorio de París, observa que el planeta Júpiter aparece aplanado y dice que la Tierra también debe serlo, pero no dice cómo. En 1693 se comienza la prolongación del arco de Picard por el norte hasta Dunkerque y por el sur hasta Colliure, los trabajos se interrumpieron y fueron continuados de 1700 a 1718 por su hijo **Jacques Cassini (1677-1756)**, **Filipo Maraldi (1665-1729)** y **La Hire (1640-1718)**. Con los resultados de las seis mediciones distintas realizadas a lo largo de 36 años se obtenía que la longitud de un arco de un grado disminuía desde el ecuador hacia el polo norte y se concluía, al contrario que los newtonianos, que el elipsoide terrestre debía ser alargado en el sentido del eje de rotación. Por aquel entonces **Bradley (1693-1762)** descubre la nutación.

La controversia fue zanjada en favor de las conclusiones newtonianas al comparar los resultados experimentales obtenidos por dos expediciones organizadas por la Academia de Ciencias de París, a propuesta del académico **d'Anville (1697-1782)**, con el fin de medir la longitud de un grado de meridiano en las proximidades del polo y otro en el ecuador. **Maupertuis (1698-1759)** y **Clairaut (1713-1765)** fueron a Laponia (1736-37) a 76° de latitud norte y **Godin (1704-1760)**, **La Condamine (1701-1774)** y **Bouguer (1698-1758)**, con la colaboración de los españoles **Jorge Juan (1713-1773)** y **Antonio de Ulloa (1716-1795)**, fueron a Perú (1735-44). Esta es una de las primeras misiones geodésicas en las que participaron grupos internacionales, pues para su desarrollo fueron necesarios acuerdos entre los Reyes Luis XIV de Francia y Felipe V de España por un lado y entre Suecia y Rusia por otro.

**Bouguer** aprovecha la ocasión para medir la desviación de la vertical producida por el Chimborazo no explicándose los resultados obtenidos a no ser que la montaña tuviera “grandes huecos en su interior”.

Los resultados de las mediciones confirmaron las conclusiones newtonianas. Desde entonces la Tierra se considera, en segunda aproximación, como un elipsoide de dos ejes achatado por los polos del eje de rotación (Fig. 10). Al respecto dijo **Voltaire** sobre **Maupertuis** “*Il avait aplati la Terre et les Cassini*”, pues fueron tres generaciones de Cassinis las que estuvieron involucradas. El problema desde entonces es determinar las dimensiones de la Tierra obteniendo valores numéricos del semieje y del aplanamiento del elipsoide terrestre.

En 1740 **Daniel Bernoulli (1700-1782)** escribió un trabajo sobre las mareas basado en la ley de Newton y usando observaciones mejoró los valores dados por Newton.

En 1742 **Maclaurin (1698-1746)**, que había leído una tesis a los 17 años sobre “*El poder de la gravedad*”, estudiando las mareas, demuestra que el elipsoide de revolución aplanado puede ser una figura de equilibrio de una masa fluida y homogénea sometida a su propia gravitación y dotada de un movimiento de rotación, también obtiene la correspondiente ley de gravedad. En 1743 **Clairaut**, que a los 18 años fue aceptado como miembro de la Academia Francesa, publica su “*Théorie de la figure de la Terre*” que puede considerarse como el origen de la Geodesia Dinámica.

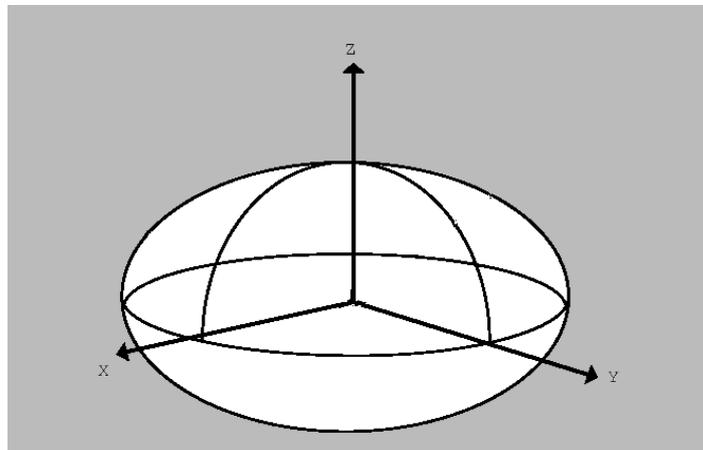


Fig. 10. Elipsoide terrestre

Para determinar el semieje y el aplanamiento de la Tierra otras muchas medidas de la longitud del grado fueron realizadas desde entonces: En 1751 los Jesuitas **Maire** y **Boscovich (1711-1787)** miden un arco en Rusia y **Rimini** otro en los Estados Pontificios bajo los auspicios del Papa Benedicto XIV. **La Caille (1713-1762)** y **Maclear** miden en 1752 un gran arco en África del Sur. En 1768 **Mason** y **Dixon** miden el arco en los Estados Unidos empleando un método de proyecciones ciertamente ingenioso. En 1769 **Maskeline (1732-1811)** mide el arco de Escocia y estudia la desviación de la vertical. En todos los casos había controversias en los resultados debido a la no existencia de una unidad de medida universalmente admitida.

La Asamblea Constituyente de Francia crea por Decreto de 26 de marzo de 1791 la “*Commission Général des Poids et Mesures*” que decidió la adopción del sistema métrico decimal. El metro quedó definido en función de la longitud del meridiano terrestre. Para dar la longitud del metro **Delambre (1749-1822)** y **Pedro Andrés Mechain (1744-1804)** miden el meridiano de Francia entre Dunkerque y Perpignan. Los españoles **Gabriel Ciscar (1760-**

**1829**) y **Agustín de Pedrayes (1744-1815)** intervinieron en las discusiones previas a la preparación de este sistema métrico, celebradas en París entre 1793 y 1800. El resultado de esta operación fue publicado por **Delambre** en una obra titulada “*Les bases du système métrique décimal*”. En 1895 la Comisión se transforma en “*Convention International du Metre*”.

El desarrollo de la matemática complementa perfectamente el desarrollo geodésico. **Euler (1707-1783)**, a quien se deben las primeras teorías sobre el movimiento de cuerpos rígidos en particular las ecuaciones de la rotación, junto con **Monge (1746-1816)** y **Meusnier (1754-1793)** definen los elementos fundamentales de las curvaturas de superficies y las propiedades de las líneas trazadas sobre ellas llegando a teoremas clásicos de la teoría de superficies de aplicación geodésica. **D’Alembert (1717-1783)** en 1749 estudia el equilibrio de una masa fluida en rotación y su alumno **Laplace (1749-1827)** publica en 1773 su primera memoria sobre mecánica celeste, en su segunda memoria de 1799 incluye la teoría matemática de las mareas dando el desarrollo que hoy día lleva su nombre, además, estableció las ecuaciones hidrodinámicas de propagación de las ondas de marea en los océanos, ecuaciones que no han podido ser integradas hasta el advenimiento de los ordenadores. En 1786 publicó su memoria sobre la figura de la Tierra.

Trabajos también importantes son los emprendidos por **Lagrange (1736-1813)** quien en 1788 publica la primera edición de su “*Méchanique Analytique*”, y obtiene las ecuaciones del movimiento del polo. En 1785 **Legendre (1752-1833)** introduce la noción de potencial y funda la teoría de funciones esféricas y en 1787 publica su memoria sobre observaciones trigonométricas donde aparece su famoso teorema de resolución plana de triángulos esféricos.

Desde el punto de vista práctico **Borda (1733-1799)** perfecciona los instrumentos geodésicos con la introducción del círculo repetidor y realiza la unión geodésica Greenwich-París.

Es a partir de esta época cuando la Geodesia clásica comienza a estructurarse. Se hace necesario establecer las definiciones precisas de aquellos conceptos continuamente manejados y de cuyo entendimiento y comprensión depende su desarrollo lógico y coherente. Algunos de estos conceptos presentan lo que podemos llamar definiciones puramente descriptivas que, sin ser precisas, sirven para localizar el concepto, o dicho de otro modo, para tener una idea de él; tales son la mayor parte de las definiciones que aparecen en tratados o cursos elementales; no obstante, la Geodesia como ciencia en sí, exige definiciones rigurosas.

Una cosa quedó clara después de los trabajos de **Snellius** y **Picard** y es que con medidas de ángulos y distancias podían obtenerse posiciones de puntos sobre la superficie de la Tierra. Pronto proliferaron, debido principalmente a necesidades cartográficas con fines militares, civiles y de navegación, las

invenciones de nuevos instrumentos de observación y se perfeccionaron los teodolitos para la medida de ángulos (Fig. 11).



Fig. 11. Teodolito reiterador

#### 4.6. Siglo XIX

La primera gran operación geodésica en el siglo XIX fue la prolongación hacia España del meridiano de Francia, preparada por **Mechain**, por encargo del “*Bureau des Longitudes*”, en la que intervinieron por parte de Francia **Domingo Francisco Arago (1786-1853)** y **Juan Bautista Biot (1774-1872)** y por parte de España **José Chaix** y **José Rodríguez y González**. **Arago** fue un eminente astrónomo, físico y geodesta; secretario del “*Bureau des Longitudes*” y director del observatorio de París; profesor de análisis y Geodesia en la escuela politécnica. En 1848 fue Ministro de Marina y de Guerra y abolió la esclavitud en las colonias francesas. Colaboró con **Biot** en la medida del índice de refracción del aire; en 1840 descubrió la cromosfera solar.

Las medidas de grandes arcos de meridiano y paralelo se sucedieron a lo largo de este siglo. Como hemos dicho, entre los años 1806 y 1808 **Biot** y **Arago** por parte francesa y **Chaix** y **Rodríguez** por parte española prolongaron el meridiano de Francia en España y enlazaron las islas de Ibiza y Formentera con el continente. En 1817 **Struve (1793-1864)** y **Tanner** comienzan la medida del arco del Danubio al Ártico que terminan en 1849. En 1819 aparece calculado el elipsoide de **Walbeck** en Rusia. En 1823 **Everest (1790-1866)** mide el arco de la India y en 1830 publica los datos de su elipsoide. Este mismo año **Airy** calcula su elipsoide con arcos de meridiano y paralelo

de Gran Bretaña. En 1866 el Coronel norteamericano **Clarke (1828-1914)** obtiene los elementos de su primer elipsoide que se utiliza en América del Norte y en 1880 publica el segundo. Un gran impulso instrumental es el dado por **Perrier (1833-1888)** en 1868 con los círculos acimutales para la observación de triangulaciones de primer orden, que son construidos por los hermanos **Brünner**. En 1885 **Jäderin** emplea los hilos en suspensión para la medida de bases geodésicas.

Es en el siglo XIX cuando la mayor parte de los científicos de elite establecen y desarrollan las bases de la Geodesia matemática y experimental. **Carlos Federico Gauss (1777-1855)**, astrónomo, geodesta y matemático, director del observatorio de Gottinga, inventó el heliógrafo y diseñó, calculó y compensó, utilizando por primera vez el método de mínimos cuadrados, la red geodésica del reino de Hannover en 1821 y dio las bases de la geometría diferencial de superficies de uso obligado en Geodesia geométrica y dinámica; también estableció el fundamento teórico de la Geodesia con la definición de la superficie matemática de la Tierra, superficie equipotencial que posteriormente, en 1872, **Listing** llamaría geoide. Los fundamentos del método de mínimos cuadrados habían sido establecidos por **Mayer** en 1748, **Laplace** en 1787 y **Legendre** en 1805.

**Gauss** inició en 1823 la medida de un arco de meridiano entre Altona y Gottinga y otro de paralelo en Hannover, estos trabajos geodésicos en Alemania fueron continuados por **Bessel** y **Baeyer (1794-1885)** que llegaron a cubrir todo el territorio alemán por una red geodésica que enlazaría con los trabajos efectuados en Francia, en los países bálticos y en los países de la Europa Central, haciendo posible el enlace con los trabajos geodésicos realizados en Rusia.

También se realizaron trabajos geodésicos en América, en Asia y en África en el siglo XIX. Los trabajos geodésicos en América del Norte condujeron a la medida de largos arcos de meridiano y a la obtención del elipsoide de **Hayford** que posteriormente fue adoptado por la UIGG como Elipsoide Internacional.

Con los trabajos realizados a lo largo del siglo se han determinado entre otros los siguientes elipsoides:

<b>Elipsoide</b>	<b>Semieje</b>	<b>Aplanamiento</b>
Everest (1830)	6.377.276	1/300.8
Airy (1830)	6.376.542	1/299.3
Bessel (1840)	6.377.397.	1/299.15
Clark (1888)	6.378.245.	1/293.5
Hayford (1909)	6.378.388.	1/297.0

También en el siglo XIX la teoría del potencial fue desarrollada con multitud de teoremas. **Jorge Gabriel Stokes (1819-1903)**, en 1849 publicó una memoria titulada “*On the variation of gravity at the surface of the Earth*” donde expone su método para la determinación del geoide a partir de anomalías de la gravedad. **Green (1793-1841)** da sus famosas identidades, **Poincaré (1854-1912)**, demostró que el aplanamiento terrestre tenía un límite, **Bruns (1848-1919)**, introductor de la Geodesia tridimensional, presentó su famosa relación entre el potencial perturbador y la ondulación del geoide.

Los estudios sobre mareas realizados por **Laplace** fueron continuados por Lord **Kelvin (1824-1907)** que desarrolló una teoría de mareas para una Tierra elástica e introduce el análisis armónico en este campo. **George Darwin (1845-1912)**, hijo de Charles Darwin, aplicó las teorías de Lord Kelvin que fue su maestro y se le considera el creador de la teoría de mareas terrestres para una Tierra fluida y viscosa, estudia la fricción en el interior de la Tierra y predice la existencia de mareas de carga sobre la corteza elástica. **Pratt (1774-1872)** en 1855 presenta su modelo isostático y **Airy** hace lo propio el mismo año.

Otro gran matemático, geodesta y astrónomo fue **Bessel (1784-1846)**, director del observatorio de Königsberg, que midió el arco prusiano en 1838, determinó el primer valor fiable del aplanamiento de la Tierra y cuyo elipsoide de 1840 ha formado parte de algunos datums europeos. **Fourier (1786-1830)** nos da sus métodos de análisis armónico y la famosa transformada de tantas aplicaciones posteriores a la Geodesia. **Legendre** trabaja en el mismo sentido.

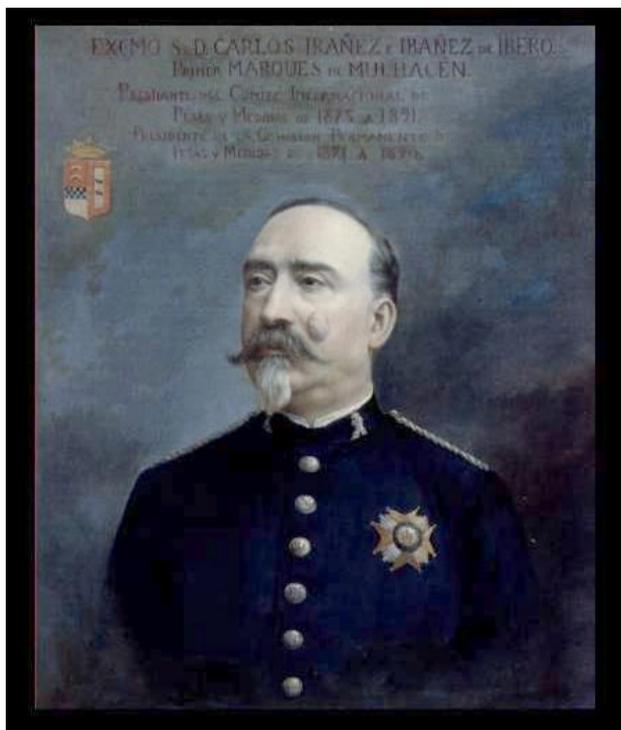
**Riemann (1826-1866)**, con sus teoremas sobre la transformación conforme, y **Cartán (1869-1951)** inician los fundamentos de la moderna geometría diferencial que continuada con los trabajos de **Marussi** está teniendo amplia repercusión en Geodesia tridimensional diferencial con el estudio de referencias móviles y coordenadas geodésicas holónomas de uso obligado en gradiometría.

En 1888 **Küstner** observa variaciones periódicas de la latitud de un observatorio determinada por el método de **Talcott** y el experimento Berlín-Waikiki de 1891-92 demuestra que el eje de rotación de la Tierra no está fijo en la corteza. Para el estudio de este interesante fenómeno se crea en 1899 el *Servicio Internacional de Latitudes*.

Las ondas electromagnéticas fueron estudiadas por **Maxwell (1831-1879)** y el francés **Fizeau (1818-1896)** fue el primero en medir la velocidad de la luz en 1849. La aplicación de las ondas electromagnéticas a la medida de distancias en Geodesia fue iniciada por **Michelson (1852-1931)**, después en 1948 el

sueco **Bergstrand** inventó el geodímetro y **Wadley** en 1956 el telurómetro. Ahora estos instrumentos están muy perfeccionados con el concurso de la tecnología láser y la informática.

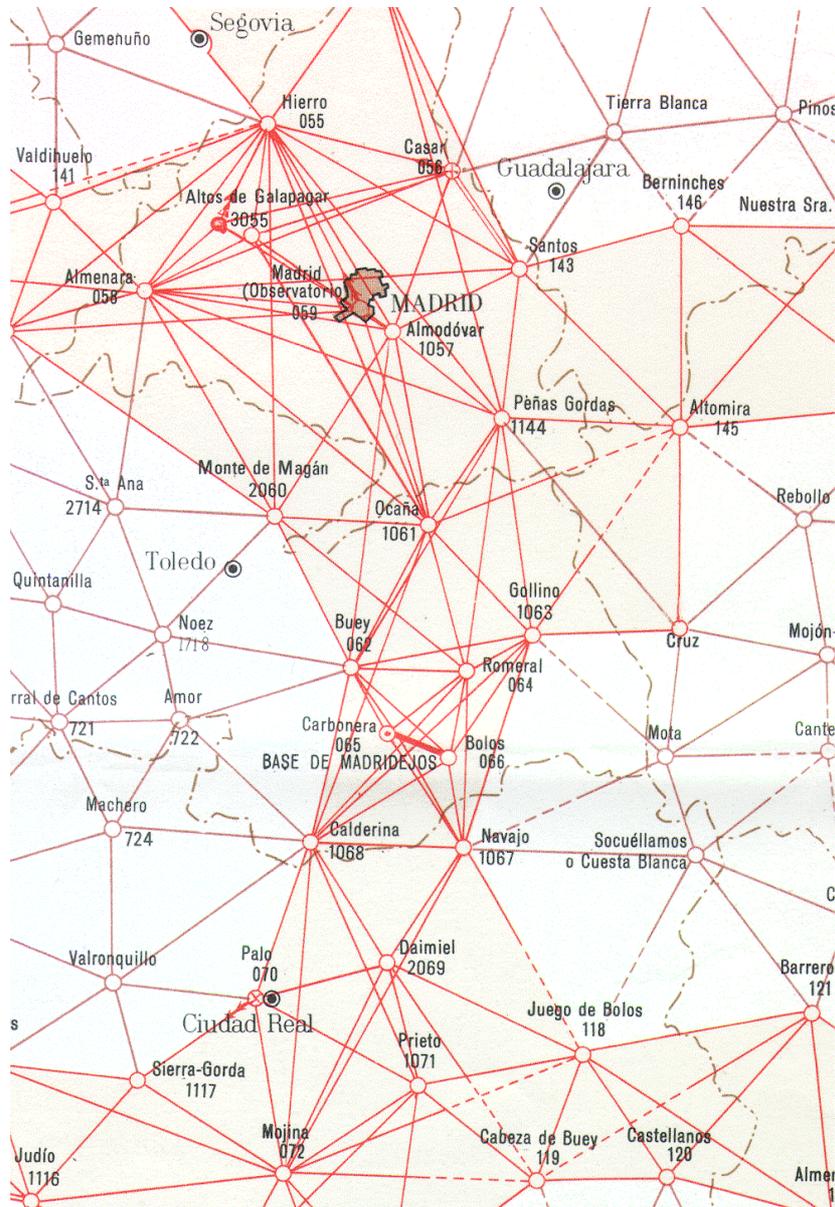
Mención aparte merecen los trabajos geodésicos realizados en España en el siglo XIX, especialmente dirigidos a la formación del Mapa Nacional. La importancia y necesidad para España de este Mapa fue advertida en diversas ocasiones por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Esta es la época en la que sobresale un insigne geodesta, Don Carlos Ibañez e Ibañez de Ibero (1825-1891) (Fig. 12) que, además de la invención de su famosa regla, de una forma u otra sintetiza los avances geodésicos españoles en este siglo.



*Fig. 12. Retrato de D. Carlos Ibañez*

Por un Decreto de 3 de noviembre de 1856, firmado por Narvaez, se crea la Comisión Nacional de Estadística, en cuyo reglamento se dice “Corresponde a la primera sección: La carta geográfica de España. Los planos topográficos para su aplicación catastral. La carta forestal y geológica...”

Es de destacar que en ciertas ocasiones las previsiones iban por delante de los hechos, pues en 1862 ya se dispone por el Ministerio de Estado el enlace de las redes de Portugal y Francia con la de España. También es digno de mencionar que por Decreto de 18 de mayo de este mismo año se crea el negociado de cálculos en la Junta General de Estadística dotándosele de personal y medios propios y preconizando en uso del método de mínimos cuadrados.



*Fig. 13. Red Geodésica Española*

Para la realización del Mapa de España (Fig. 13) como misión fundamental, por Decreto de 12 de septiembre de 1870 firmado por el Ministro de Fomento D. José Echegaray, entonces Académico y más tarde Presidente de la Real Academia de Ciencias, se creó el Instituto Geográfico. Por otro Decreto de 19 de junio del mismo año se crea la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico nombrándose con la misma fecha Director General al coronel de Ingenieros, D. Carlos **Ibañez** e Ibañez de Ibero.

También en el siglo XIX se realizan los trabajos geodésicos de enlace de Europa con África, una de las operaciones geodésicas de más envergadura del siglo no sólo en España sino en toda Europa, y en la que también participó D. Carlos **Ibañez**. Los trabajos de observación comenzaron el día 9 de septiembre de 1879 y se dieron por terminados el día 4 de octubre del mismo año. La labor del General Ibañez en la dirección de estos trabajos fue reconocida por el Gobierno con la concesión del título de Marqués de Mulhacén en 1889.

#### 4.7. Siglo XX

Sólo reseñaremos los hechos más sobresalientes.

Comienza el siglo con la aparición de la obra de **Helmert (1843-1917)** “Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie”, que viene a sintetizar los trabajos geodésicos hasta entonces y que ha servido y sirve como libro de referencia inexcusable. **Helmert** es el introductor del método de nivelación astrogeodésica para la determinación del geoide a partir de desviaciones de la vertical. En 1900 crea el Sistema Gravimétrico de Viena y en 1901 da su fórmula de la gravedad normal.

En 1900 comienzan las medidas de mareas terrestres con péndulos horizontales.

En 1903 se realizan las primeras observaciones gravimétricas en el mar con barómetros por **Hecker**.

En 1904 **Kühnen** y **Furtwänder** miden la gravedad absoluta en Potsdam y su valor es aceptado como origen del sistema mundial, aunque en 1950 se demostró que su valor era 14 miligales mayor del real. En 1906 aparece la balanza de torsión de **Eötvös** y las investigaciones isostáticas de **Hayford** y **Helmert**.

En 1909 el geodesta norteamericano **Hayford** con datos de la red geodésica de los Estados Unidos y aplicando el método de las áreas con la hipótesis

isostática de Pratt, publica los resultados de su elipsoide que posteriormente es adoptado como elipsoide de referencia Internacional en Madrid en 1924. Se establece el sistema de gravedad de Potsdam.

En 1910 **Poincaré** resuelve el problema del movimiento del polo para una Tierra con núcleo líquido.

En 1911 aparecen los trabajos de **Love (1863-1940)** que describen la marea de una Tierra elástica por medio de los llamados números de Love que sirven para caracterizar las deformaciones producidas por el potencial de marea.

En 1914 **Schweydar (1877-1959)** realiza la primera observación de mareas terrestres con un gravímetro y en 1921 aparece el famoso desarrollo armónico de **Doodson (1890-1968)** del potencial de marea.

En 1923 se desarrollan las medidas de gravedad con péndulos submarinos por el geodesta holandés **Vening-Meinesz (1887-1966)**.

En 1924 se utilizan los hilos invar para la medida de bases. Se adopta el elipsoide Internacional de **Hayford**.

En 1928 **Vening-Meinesz** publica un libro con las fórmulas que llevan su nombre y que determinan las componentes de la desviación de la vertical a partir de medidas gravimétricas. En 1929 presenta un aparato tripendular para la medida de la gravedad en el mar. También aparecen los primeros gravímetros de muelle de **Ising y Lejay**.

En 1930 el geodesta italiano **Giovani Cassinis** calcula la fórmula de la gravedad normal que es adoptada como fórmula internacional. Se perfeccionan los péndulos horizontales. Se realizan experiencias con gravímetros marinos y se utiliza el péndulo reversible para medidas absolutas en Washington y Teddington por **Clark, Heyl y Cook**.

En 1935 **Nicolás Stoyko** descubre las variaciones estacionales de la velocidad de rotación de la Tierra.

En 1936 aparecen los cálculos de un geoide gravimétrico de **Jeffreys e Hirvonen**. Se desarrolla la teoría de errores en nivelación por **Vignal**. Se presentan correcciones a las observaciones de gravedad en plataformas móviles por **Browie**. Se estudia el problema de contorno de la geodesia Física por **Molodensky, Krassowsky y Michailov**.

En 1937 **Kukkamäki** estudia la refracción y la nivelación con importantes resultados.

Las observaciones de eclipses de Sol y de ocultaciones de estrellas por la Luna proporcionan datos suficientes para la determinación de los parámetros del elipsoide terrestre y para la unión en un mismo sistema de referencia de puntos de la superficie terrestre alejados. Las observaciones de estos fenómenos proliferan en la primera mitad del siglo XX. Son de destacar los métodos empleados por **John O'Keefe** del U.S Army Map Service para la observación

de ocultaciones y los métodos para la observación de eclipses de **Atkinson**, **Kukkamäki**, **Linblad**, **Banachiewicz**, **Platzeck**, **Mairzegui**, **Gaviota**, **Markowitz** y nuestros más cercanos **Torroja (1919-1994)** y **Bonjera**.

La primera campaña de observación de un eclipse de Sol con fines geodésicos fue organizada por **Banachiewicz** en el eclipse del 19 de junio de 1936 observando desde Japón, Siberia y Grecia. Siguió el eclipse del 9 de julio de 1945 observado por expediciones finlandesa y sueca. El eclipse del 20 de mayo de 1947 fue observado también por astrónomos escandinavos desde Brasil y Costa de Oro. El eclipse del 4 de mayo de 1948 fue observado por astrónomos norteamericanos desde diferentes lugares. La Universidad Complutense de Madrid comenzó su participación en la observación de eclipses con fines geodésicos en el eclipse del 25 de febrero de 1952 desplazando una expedición a Cogo (Guinea Ecuatorial) en el que se ensayó por primera vez el método fotométrico afocal de **Torroja-Bonjera** con registro cinematográfico. Posteriormente se volvió a participar en el eclipse de 30 de junio de 1954 en Suecia en el que llegaron a montarse 36 expediciones de diversos países. Los resultados españoles, obtenidos con un método perfeccionado del anterior llamado focal o parcial, fueron de primera calidad.

En 1940 aparecen los trabajos del geodesta finlandés **Weiko A. Heiskanen** sobre aplanamiento de elipsoides de dos y tres ejes, sobre cartas de anomalías de la gravedad y sobre correcciones isostáticas siguiendo la hipótesis de Airy.

En 1943 el sueco **Bergstrand** inventa el geodímetro, primer distanciómetro con ondas de luz, que empieza a utilizarse en 1950.

En 1945 aparecen publicados los trabajos de **Molodensky**. Se efectúan triangulaciones Shoran.

En 1946 se realizan las primeras medidas con gravímetros absolutos de caída libre en Sevres por **Volet**. El geodesta finlandés **Väisälä** publica el método de triangulación estelar.

En 1947 se realiza la medida óptico interferométrica de bases de calibración con el aparato de **Väisälä**.

En 1948 el también geodesta finlandés **Tanni** publica el primer mapa del geoide mundial obtenido por aplicación de la fórmula de Stokes. Por su parte **Bomford** y de **Graaff-Hunter** calculan un geoide a partir de desviaciones de la vertical.

En 1950 el japonés **Takeuchi** resuelve por primera vez numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna las deformaciones elásticas de una Tierra no homogénea.

En 1950 se aplica la triangulación Hiran con precisión de 5 metros. Aparecen los niveles automáticos, los gravímetros de muelle de alta precisión y los gravímetros marinos Graf y LaCoste.

En 1954 el sudafricano **Wadley** inventa el telurómetro, primer distanciómetro con microondas, que empieza a utilizarse en 1957.

En 1957 se utiliza la cámara lunar de **Markowitz**.

En 1957, el 4 de octubre se lanza el primer satélite artificial de la Tierra por los rusos, el Sputnik 1, el Sputnik 2 fue lanzado un mes después y en febrero de 1958 se lanza el primer satélite norteamericano Vanguard I.

En 1958 comienza la geodesia por satélites con las cámaras Baker-Nunn y fotografía con fondo de estrellas.

En los años cincuenta se extiende el uso de la estadística en la compensación de redes con los trabajos de **Triensta**, **Bjerhammar**, **Wolf**, etc., y se establece el Datum Europeo ED50. Aparece el geoide astrogeodésico de **Bomford**, el geoide gravimétrico de **Heiskanen** y la red gravimétrica mundial de **Woolard** y **Morelli**. Se determinan los primeros armónicos del geopotencial por **O'Keefe**. Se finaliza la medida del arco desde Ciudad del Cabo a El Cairo.

En 1963 se crea el International Polar Motion Service, con sede en Mizusawa. Aparecen los gravímetros absolutos de **Sakuma** y **Faller**. Aparece el primer modelo Mekometer.

En 1964 se lanzan los primeros satélites Doppler Transit por los EEUU que quedan operativos para uso civil en 1967.

En 1968 aparece el gravímetro superconductor de Goodkind y se lanzan los satélites Echo I y II, ANNA 1B, Geos1 y 2, Pageos, Diademe1-2, Oscar 14 y Timation.

De 1966 a 1976 se realiza la primera gran operación europea de Geodesia por Satélites denominada WEST (Western European Satellite Triangulation). Participan 17 países europeos con un total de 40 estaciones, entre ellos España a través de la Cátedra de Astronomía y Geodesia de la Facultad de Ciencias de la UCM con dos cámaras balísticas. Se utilizaron los satélites pasivos ECHO I, ECHO II y Pageos. Como resultado de esta operación España quedó geodésicamente unida a Europa con dos vértices situados en la terraza de la Facultad de Ciencias. Estos vértices, verdaderos símbolos del avance científico de la época, fueron destruidos cuando la Facultad de Matemáticas pasó al nuevo edificio en la Ciudad Universitaria.

En 1967 se establece el sistema de referencia geodésico 1967 con nueva fórmula para la gravedad normal. Se presenta el gravímetro absoluto de lanzamiento vertical de **Cook**, y los primeros gravímetros absolutos portátiles de **Faller** con precisiones de 5 centésimas de miligal.

En 1969 el Apollo 11 deposita en la Luna los reflectores laser y se miden distancias desde los observatorios de Lick y McDonald. También en 1969 se mide la primera gran base por VLBI entre Haystack y Greenbank.

En los años sesenta se utilizan las cámaras balísticas en geodesia por satélites. Se perfeccionan los equipos Doppler, se continúan lanzando satélites geodésicos y se desarrolla el receptor Mark I para VLBI. Aparecen las investigaciones de **Kaula** sobre teoría de satélites geodésicos, de **Bjerhammar** e **Hirvonen** sobre la geodesia sin hipótesis, de **Kaula, Bjerhammar** y **Moritz** sobre investigaciones estadísticas del campo de gravedad y los de **Baarda** y **Bjerhammar** sobre fiabilidad de redes geodésicas. También se estudia la refracción geodésica por **Tengstrom**, la colocación mínimo cuadrática por **Krarup** y **Moritz** y la determinación de movimientos recientes de la corteza por **Boulanger**. Los modelos de geopotencial llegan al orden y grado 16 como el SE II. Se perfecciona el seguimiento Doppler de satélites. El movimiento del polo se determina con observaciones Doppler.

En los años setenta el avance de la Geodesia es espectacular. Se termina y adopta la IGSN71, Red Gravimétrica Internacional estandarizada. Aparecen los sistemas de levantamiento inercial. Los gravímetros absolutos portátiles con precisión de 1 centésima de miligal. La gravimetría a bordo de helicópteros. También aparece el Terrameter, distanciómetro experimental de laser bicolor. Se despliega el sistema Doppler Tranet-2 y se perfeccionan los receptores Doppler como los JMR y los Magnavox. En cuanto a la VLBI se desarrollan los equipos Mark II y III y el primer sistema móvil.

También en estos años setenta se perfecciona el seguimiento laser a la Luna con nuevos reflectores depositados allí por los satélites Apollo14 y 15 y el Lunakhod II. El lanzamiento de satélites continúa con el DIAL, el Oscar 19, el PEOLE, los satélites laser STARLETTE y LAGEOS, el primer satélite altimétrico Geos-3 y el también altimétrico Seasat-1. El primer satélite GPS del Bloque I, el PRN4 fue lanzado el 22 de febrero de 1978.

Otros importantes avances en esta década los constituyen las investigaciones sobre movimientos recientes de la corteza con resultados experimentales en el este de Europa. Se obtienen perfiles de marea gravimétrica. Aparecen modelos de marea oceánica. Modelos de funciones covarianza del campo de gravedad. Se investiga la solución de grandes sistemas de ecuaciones (**Meissl**) y la Geodesia 4-dimensional (**Mather**). Se determina el WGS72 como sistema Geodésico Mundial y se termina la fase II de la retriangulación europea RETRIG con el sistema ED-79 (**Kobold**).

Los modelos de geopotencial llegan al grado y orden 36 con los GRIM-2 y GEM-10B. Los sistemas de posicionamiento por satélites Doppler y laser llegan a precisiones relativas de 2 decímetros. Estas precisiones también son alcanzadas con medidas VLBI intercontinentales. Los parámetros de rotación de la Tierra quedan determinados con precisiones de 2 centésimas de segundo de arco.

En la década de los ochenta se desarrolla la gravimetría marina y aerotransportada con precisiones de 1 miligal. Se contrastan los primeros gradiómetros. Se trabaja con seguimiento satélite a satélite. Se continúa y perfecciona el seguimiento laser de satélites y de la Luna. Se establecen las primeras redes geodésicas mundiales con VLBI para la definición del sistema de orden cero. Se siguen lanzando satélites geodésicos como los Navstar 6 a 13 de GPS, los Nova 1 a 3, el Oscar 30, el Bulgaria 1300, Meteor-3, Ajisai, Geo-IK y los ETALON 1 y 2. El primer satélite GPS del Bloque II fue lanzado en febrero de 1989. Por su parte se desarrollan y comercializan receptores portátiles GPS de 10 fabricantes.

En esta década las investigaciones se dirigen fundamentalmente a la Geodesia integrada, Geodesia operativa, optimización de redes, rotación de la Tierra y determinación del geoid. Se realizan campañas de comparación de gravímetros absolutos en Sevres. Se establecen los Datums Norteamericanos NADS-83 y NAVD-87. Se determina y comienza a usarse el Sistema Geodésico Mundial WGS-84. También se establece el Sistema Europeo ED-87 y la Red Europea Unificada de Nivelación UELN-73.

En gravimetría se comienza la Red internacional de Bases de gravimetría absoluta IAGBN. Se obtienen los primeros resultados de la topografía marina a partir de altimetría de satélites. En el GPS también se logran levantamientos estáticos y cinemáticos con precisiones centimétricas relativas. En cuanto a modelos de geopotencial, se obtienen desarrollos hasta orden y grado 360 como el OSU86F.

Un objetivo de los trabajos de esta década de los ochenta es aumentar la precisión de las determinaciones geodésicas, cualquiera que sea la técnica utilizada. La determinación de geoides regionales comienza a lograrse con precisiones internas de 20 centímetros, las técnicas espaciales de posicionamiento alcanzan precisiones relativas de 1 centímetro y los parámetros de rotación de la Tierra se determinan con precisiones de la milésima de segundo de arco.

Es también en la década de los ochenta cuando prácticamente todas las operaciones geodésicas de relieve tienen carácter internacional. Así surgen proyectos de diversa índole que se desarrollan en conjunto, entre ellos podemos citar: MERIT-COTES, WEDOC, WEGENER-MEDLAS, ADOS, Crustal Dynamics, etc.

En los años noventa continúan los desarrollos iniciados en la década anterior, presentándose ya resultados tangibles de gran precisión. Se establecen las redes continentales por técnicas GPS y las redes nacionales de orden cero. Un buen ejemplo es la red IBERIA 95 establecida por los Institutos Geográficos de España y Portugal (Fig. 14).

La investigación se dirige al control de calidad de las redes GPS con el estudio de la propagación de errores de todo tipo. También se investiga el modelado de fuerzas no gravitacionales y los métodos gradiométricos.

En la geodesia espacial continúan los avances en VLBI, GPS y los modernos sistemas DORIS, PRARE y DGPS para aumentar la precisión y facilidad de seguimiento de satélites y posicionamiento de estaciones. Se lanzan nuevos satélites GPS del bloque II y se prepara el bloque III, también se lanzan satélites Laser como el LAGEOS-2, el ESTELLA y en GFZ-1.

Pero la novedad de los años noventa es el uso de satélites medioambientales de amplio espectro, en 1991 se lanza en ERS-1 de la Agencia Europea del espacio, en 1992 el TOPEX/Poseidon, misión conjunta de EE.UU. y Francia y en 1995 el ERS-2 de la ESA. Estos satélites, además de servir como satélites de recursos y oceanográficos, proporcionan a la Geodesia medidas altimétricas con las que se perfeccionan los modelos de geopotencial, los geoides marinos y la determinación precisa de la SST, superficie topográfica del mar.



*Fig. 14. Red GPS IBERIA95*

Aparecen en estos años los modernos modelos de geopotencial como los estadounidenses OSU91A de 1992 y el EGM96 de 1996 entre otros. En paralelo aparecen los recientes trabajos sobre la determinación del geode en los países desarrollados. Entre ellos destacaremos el Geode Europeo determinado por el grupo del Prof. W. Torge y el Geode Ibérico IBERGEO95 (Fig. 15) que es el primer geode gravimétrico de la península Ibérica y su entorno,



**CSTG.-** Proyectos GPS para Geodesia y Geodinámica. *Boletín de la CSTG* N° 10. 264 pp., (Sevilla, M. J. Tr. Ed.) Comisión VIII de la Asociación Internacional de Geodesia. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Munich.(RFA). 1989.

**CSTG.-** Nuevas Misiones por Satélites para Estudios de la Tierra Sólida *Boletín de la CSTG* N° 11. 263 pp., (Sevilla, M. J. Tr. Ed.) Comisión VIII de la Asociación Internacional de Geodesia. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Munich. (RFA). 1989.

**EHRNSPERGER, W.-** Final Report on the Western European Satellite Triangulation WEST. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung. Helt Nr. 37. Munich, 1978.

**EKMAN, M.-** A concise history of the theories of tides, precession nutation and polar motion (from antiquity to 1950). *Bul. Int. Mareé*, 109, pp 7795-7848. 1991.

**FISCHER, I.-** The figure of the Earth – changes in concepts. *Geophys. Surveys* 2, 3-54. 1975.

**HAASBROEK, N. D.-** Gemma Frisius, Tycho Brahe and Snellius and their triangulations. *Publ Netherl Geodetic Comm*, Delt. 1968.

**KING-HELE, D.-** The shape of the Earth. *Scientific American*, vol. 217 N° 4, pp. 67-76. 1967.

**La forma de la Tierra.** Medición del Meridiano 1736-1744. Museo Naval. Madrid 1986.

**LEVALLOIS, J. J.-** Géodésie Générale. Eyrolles. Paris. Tomo I. 1970.

**MARTÍNEZ UTESA, Mª CARMEN.-** Ciencia y Milicia en el siglo XIX en España: El General Ibáñez e Ibáñez de Ibero. Monografía N° 9. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 1995.

**MERINO, MIGUEL.-** Figura de la Tierra. Anuario del Observatorio de Madrid. 1863.

**NUÑEZ DE LAS CUEVAS, R.-** Cartografía española del siglo XIX. En “Historia de la cartografía española”. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid. 1982.

**PERRIER, G.-** Petit Histoire de la Géodésie. Alcan, París.

**SEVILLA, M. J. y A.NUÑEZ.-** Determinación del elipsoide terrestre por el método de las áreas. *Técnica Topográfica*. Vol. IV, N° 13, pp. 4-13. Madrid. 1976.

**SEVILLA, M. J.-** Geodesia por Satélites y Navegación. *Técnica Topográfica*. Vol. XII, N° 54, pp. 7-16. (IAG N° 129). Madrid. 1983.

**SEVILLA, M. J.-** Astronomía Geodésica. *Topografía y Cartografía*. Vol. I. N° 6, pp. 30-39. (IAG N° 139). Madrid. 1984.

**SEVILLA, M. J.-** Cartografía Matemática. *Topografía y Cartografía*. Vol. II .N° 6, pp. 11-22. (IAG N° 151). Madrid. 1986.

**SEVILLA, M. J.-** Mecánica Celeste Clásica. CSIC-UCM. Instituto de Astronomía y Geodesia (UCM-CSIG), ISBN 84-87488-00-5. 289 páginas.. Madrid. 1989.

**SEVILLA, M. J.-** El GPS y las Misiones al Planeta Tierra. *Topografía y Cartografía*. Vol. VII. N° 39, pp. 9-19. Madrid. 1990.

**SEVILLA, M. J.-** El impacto de los desarrollos tecnológicos en la formación físico-matemática del Topógrafo. *Topografía y Cartografía*. Vol. IX, N° 52, pp. 23-32. Madrid. 1992.

- SEVILLA, M. J.-** A New gravimetric geoid in the Iberian Peninsula. *Bureau Gravimétrique International, BGI Bulletin D'information N° 77 and International Geoid Service, IGeS Bulletin N° 4* (IAG special issue "New Geoids in the World"), pp.163-180. Toulouse (Francia). 1995.
- SMITH, J. R.-** Introduction to geodesy : the history and concepts of modern geodesy. New York : Wiley, 1997.
- SOLER, T.-** A profile of General Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero: first president of the International Geodetic Association. *Journal of Geodesy*, Vol. 71 pp. 176-188. 1997.
- TODHUNTER.-** A history of the mathematical theories of attraction and of the figure of the earth. Dover Pub. Inc. New York 1962.
- TORGE, W.-**The International Association of Geodesy (IAG) - More than 139 years of International Cooperation. *Chronique I.U.G.I. N° 225*, p4-12. 1995.
- TORROJA, J. M.-** La Astronomía en el problema de la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra. Madrid 1959.
- TORROJA, J. M.-** La obra científica de Jorge Juan. *Revista Matemática Hispano Americana*, N° Extra dedicado a Jorge Juan. Madrid. 1973
- TORROJA, J. M.-** Jorge Juan y los antecedentes de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. *Revista de la Real Academia de Ciencias exactas, Físicas y Naturales, de Madrid*, Tomo LXVII, cuaderno 1º. Madrid. 1973.
- TORROJA, J. M.-** Una discusión sobre la figura de la Tierra. En "CCL Aniversario de la medición del arco de meridiano", pp. 11-18. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 1988.
- TORROJA, J. M.-** La gravitación universal y sus consecuencias. En "Historia de la Matemática en los siglos XVII y XVIII", pp. 75-112. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 1988.
- TORROJA, J. M.-** La Geodesia en el siglo XIX. En "Historia de la Matemática en el siglo XIX", pp. 275-300. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 1994.
- VANICEK, P. and E. J. KRAKIWSKY.-** Geodesy: The concepts. North Holland P.C. Amsterdam. 1986.



## COMPLEMENTOS

### Prolongación hacia España del meridiano de Francia (J. M. Torroja)

Las gestiones oficiales para esta operación se inician por parte del Ministro francés de Asuntos Exteriores **Talleyrand** con participación de los respectivos embajadores en París y Madrid y en las que intervino por parte española **José Chaix**, entonces subdirector del Observatorio Astronómico de Madrid.

Enviado por el “Bureau des Longitudes”, llegó **Mechain** a Barcelona el 5 de mayo de 1803 iniciando inmediatamente los reconocimientos para comprobar la posibilidad de las visuales y fijar el emplazamiento de los vértices desde los que deberían efectuarse las observaciones. En estos trabajos contó con la eficaz colaboración de **Fausto Vallés**, Barón de la Puebla. Recorrieron la costa valenciana y visitaron las islas. En la sierra del Espadán, el 12 de septiembre de 1804 enfermó **Mechain**, falleciendo el 20 del mismo mes en la casa del Barón de la Puebla, en Castellón, en cuyo cementerio descansan sus restos. A propuesta de **Laplace** el Bureau acuerda que la operación sea realizada por **Biot** y **Arago**.

Las operaciones geodésicas en Francia se completaron con la medida de un arco de 12°13' del paralelo de París efectuada entre 1818 y 1823, con una nueva red que habría de servir de base para la nueva “Carta de Francia” que debía reemplazar a la de Cassini, que se completó en 1865 con el enlace de Francia con Inglaterra, bajo la dirección de **Legendre** entre 1845 y 1870 y una nueva medida de la meridiana de Francia entre 1870 y 1892.

### Trabajos geodésicos realizados en Rusia (J. M. Torroja)

Los trabajos geodésicos en Rusia comenzaron por iniciativa del Zar Alejandro I quien invitó a dirigirlos a **José Rodríguez y González**, conocido por su participación en el enlace de las islas Baleares con la triangulación de la península en colaboración con **Biot** y **Arago**. En el libro de actas de la Universidad de Santiago, de la que **Rodríguez** era catedrático, se lee:..

“Tuvo este Claustro la mayor satisfacción al ver con cuantas instancias fue V. convidado p<sup>a</sup> que tomase a su cargo el importante destino de la dirección del depósito geográfico del vasto Imperio de todas las Rusias, que S.M.I. sabe grangearse la estimación de los sabios atrayendo a sus dominios los de todas las naciones. Pero si bien este Cuerpo se honra en que un catedrático suyo hubiese merecido tantas distinciones, no puede menos que confesar cuanto se complace al ver que con firme y

heroica resolución supo V. preferir a estas ventajas el destino de Profesor de Astronomía en el Rl. Museo de Ciencias Naturales y el encargo de la organización del Observatorio de Madrid con que S.M. acaba de agraciarme”. (Ramón María Aller: D. José Rodríguez González (O matemático de Bermeo) Archivos de Seminario de Estudios Galegos (1929))

Tras la renuncia de **José Rodríguez González**, los trabajos geodésicos en Rusia fueron efectivamente iniciados bajo la dirección de **Federico Guillermo Struve** astrónomo alemán al servicio del Zar y el general **Tenner**, que observaron una cadena de 258 triángulos que cubrían un arco de meridiano de 25°20' desde el Danubio hasta el norte, enlazada posteriormente con las redes europeas.

La Asociación Internacional de Geodesia en su reunión celebrada en Stuttgart en 1898 acordó se repitieran las medidas del arco efectuadas en el siglo XVIII en Laponia y Perú. Las nuevas medidas se hicieron en el norte de Suecia y Rusia entre 1899 y 1902 y en Perú entre 1899 y 1906 por la Sección de Geodesia del Servicio Geográfico Francés.

### **Trabajos geodésicos en América, en Asia y en África** (J. M. Torroja)

Los trabajos geodésicos en América del Norte han presentado especiales dificultades a causa de la enorme extensión del territorio a cubrir. Para ello se ha medido un arco del paralelo de 39° de latitud norte de más de cuatro kilómetros de longitud, con una diferencia de longitudes entre sus extremos de 48°46', así como un arco de 164 km. del meridiano de 98° W. En estos trabajos se llegaron a efectuar observaciones hasta distancias de 294 km. Esta amplia red de triángulos está dotada de numerosas observaciones astronómicas que dan mayor solidez al sistema, y han permitido efectuar un cálculo de conjunto de las redes de todo el continente desde el Canadá hasta Méjico a partir de un punto astronómico fundamental único. El elipsoide obtenido por **Hayford** en 1909 a partir de estas redes americanas fue adoptado por la UIGG como Elipsoide Internacional.

No han sido menores las dificultades en la India por su gran extensión. A partir de 1823 se iniciaron los trabajos geodésicos dirigidos sucesivamente por **Lambton, Everest, Wagh y Walker**, llegando a cubrir el territorio por una red homogénea de cerca de 25.000 km.

Respecto a las observaciones en África fueron iniciadas por **Lacaille** en 1750 con la medida de un arco de un grado en el Cabo de Buena Esperanza. En el norte de este continente, en Argelia, comenzaron los trabajos en 1854 que terminarán en 1869 bajo la dirección del capitán **Perrier**, observándose

una red de triángulos que más tarde se unirá, en memorable operación, a la que más adelante nos referiremos, con la triangulación española.

### **Trabajos geodésicos realizados en España en el siglo XIX** (J. M. Torroja)

Dejando aparte la época gloriosa de la cartografía mallorquina representada especialmente por el magnífico “Atlas” de **Cresques Abraham**, la necesidad de disponer de un mapa general de España fue ya apreciada por Felipe II, quien encargó a su cosmógrafo **Pedro de Esquivel**, catedrático de Matemáticas de Alcalá que “recorriese y marcase por vista de ojos todos los lugares, ríos arroyos y montañas por pequeñas que fuesen, en su actual situación”. Inicia los trabajos en 1566 pero muere Esquivel sin terminar el trabajo y encomendó el Rey su continuación sucesivamente a **Diego de Guevara** que también falleció poco después, y a su secretario **Alonso de Herrera**. Tanto los instrumentos utilizados como la mayor parte del trabajo se perdieron en el incendio del Escorial de 1671. El “Atlas del Escorial”, de veinte hojas, puede corresponder a este trabajo de **Esquivel**.

En 1743 los jesuitas **Martínez** y **de la Vega** prepararon un mapa de España, cuyo original se conserva en la Real Sociedad Geográfica. Dibujado a escala 1:400.000 representa el territorio de la península excepto la parte noroeste.

Pocos años más tarde, en 1751, el ilustre marino **Jorge Juan y de Santacilia**, que había participado en la medida de un arco de meridiano en el Perú, presentó un “Método de levantar y dirigir el mapa o plano general de España, con reflexiones a las dificultades de pueden ofrecerse, por Don Jorge Juan, Capitán de Navío de la Real Armada”. Da instrucciones detalladas sobre los métodos e instrumentos que utilizar “que podrían construirse en Londres o en París” y el personal necesario según sea la duración que quiera darse a la realización del proyecto. Agrupa el personal en compañías formadas por un Director particular, “quatro hombres inteligentes”, dos subalternos “no tan inteligentes” y un “delineador”. Existirá además un “Director General, que habrá de residir en la corte, al que se dotará del material necesario a fin de que averigüe la latitud y longitud de la corte” y “como los instrumentos concedidos al Colegio Imperial son muy propios para estas observaciones del Director General, se podrá valer de ellos”. Pero este proyecto de Jorge Juan no se llevó a la práctica por el cese de su mentor el Marques de la Ensenada.

A fines del siglo XVIII el rey Carlos IV, firma en San Ildefonso, con fecha 19 de agosto de 1796, unas “Ordenanzas del Cuerpo de Ingenieros Cosmógrafos del Estado y del Real Observatorio”, en el artículo 7 adjudica al nuevo Cuerpo “la formación de la Carta geométrica del Reyno”. Tampoco esta disposición llegó a tener efectividad.

No podemos dejar de citar la meritoria labor cartográfica de **Tomás López**, **Vicente Tofino**, de la Real Academia de la Historia, **Dionisio Alcalá Galiano**, **Felipe Bouzá**, **Domingo Fontán** y **Francisco Coello de Portugal**.

**Tomás López (1730-1802)** había sido enviado a París donde trabajó con los cartógrafos **Lacaille** y **D'Anville**. Formó numerosos mapas sin apoyo geodésico lo que dio lugar a defectos no despreciables. Su obra fue recogida por sus hijos, también cartógrafos, en un "Atlas geográfico de España" publicado en 1804. Por el contrario, **Vicente Tofino (1732-1795)** observó una triangulación a lo largo de toda la costa como preparación de su "Atlas marítimo de España" (1789). Publicó además un "Derrotero de las costas de España en el Mediterráneo y en sus correspondientes de Africa para inteligencia y uso de las cartas esféricas". **Dionisio Alcalá Galiano (1762-1805)** preparó un nuevo proyecto para la formación de un mapa de España que no tuvo mayor éxito. Ni lo tuvo el plan propuesto por **Felipe Bouzá (1759-1833)** a la Real Academia de la Historia.

**Domingo Fontán (1788-1866)** Catedrático de la Universidad Compostelana observó una red geodésica con una base en Lugo y dos mil vértices que habría de servirle de apoyo para la formación de la "Carta geométrica de Galicia" a escala 1:100.000 publicada en 12 hojas. En 1834 recibió el encargo de preparar una "Carta general del Reino", El año siguiente se trasladó a Madrid como Catedrático de Astronomía y Director del Observatorio Astronómico. Pero lamentablemente la situación en que había quedado el Observatorio tras su ocupación por las tropas de Napoleón le impidió dar sus clases.

Más importante es la obra cartográfica de **Francisco Coello de Portugal (1822-1898)**. Ingeniero Militar, nacido en Jaén, cuya afición a la cartografía le llevó a dejar el Ejército para dedicarse de lleno a la formación de sus mapas que debían servir de complementos al "Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones", publicado en 1845 por **Pascual Madoz**, nacido en Pamplona en 1806 y que llegó a ser Ministro de Hacienda. Para ello, además de recoger la información que pudo lograr en España en diversos centros, algunos de ellos militares, en los que hubo de vencer numerosas dificultades por parte de los correspondientes organismos directivos, se trasladó a París donde consultó la existente en el Depósito de la Guerra de Francia y en la Sociedad Geográfica de aquella capital.

Con esta información publicó un "Atlas de España y sus posesiones de Ultramar por D. Francisco Coello, Teniente Coronel, Capitán de Ingenieros". Presentó su Atlas en varias formas. En una de ellas cada mapa va dentro de una carpeta de cartón en cuyo reverso se lee: "Condiciones de la suscripción. El Atlas general de España y sus posesiones de Ultramar constará de 65 hojas que se repartirán en el orden siguiente". Incluye a continuación una relación

que empieza por Madrid (provincia), la cuarta es un plano de Madrid, dos de Canarias, una de las islas Baleares, dos de la isla de Cuba, otras se refieren a las posesiones de Africa, Islas Marianas, Puerto Rico, tres de las Filipinas, un mapa general histórico y una “carta general de reunión”. Indica a continuación “En cada hoja, además del mapa de la provincia, figuran los planos particulares de sus principales poblaciones, y extensas noticias estadísticas e históricas, escritas por D. Pascual Madoz”, y sigue “Los precios por suscripción iguales en Madrid y en las provincias, son los que expresa la tarifa siguiente: Precio de cada mapa sin doblar en papel grueso 20rs. Id. doblado en papel más delgado, y con carpeta, 20rs. ...”

Es inconcebible que este Atlas fuera obra de un solo hombre y editada, prácticamente, a sus expensas, por lo que no es de extrañar que su publicación se suspendiera en 1875. De las 65 hojas previstas sólo se publicaron 32, correspondientes a distintas provincias, varios generales de la península y las de las posesiones de África, Puerto Rico, Cuba e Islas Marianas.

La labor de **Coello** fue calurosamente elogiada en el extranjero, especialmente en Francia, por geógrafos de la categoría de **Prudent** y **Marcel**, y por el alemán **Reichthofen** que dijo que los mapas de Coello “deben reputarse como los mejores que existen de esta clase, y merecen especial mención los relativos al grupo complementario de las islas Filipinas, acerca de los cuales nada se ha hecho después que los supere”.

D. Francisco **Coello** de Portugal fue miembro de la Real Academia de la Historia y Presidente de la Real sociedad Geográfica, entre cuyos fundadores figuró.

Es evidente el interés de la labor de estos cartógrafos en especial la de **Coello**, pero la realidad es que la formación de un Mapa Nacional” debía ser una “empresa nacional” que había de ser emprendida por algún organismo nacional con esa misión y con los medios económicos necesarios.

#### **Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid.** (J. M. Torroja)

La Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales comprendió esta necesidad y en su libro de actas y en la correspondiente a la Sesión Ordinaria del día 31 de mayo de 1852 se lee:

“La misma sección de Ciencias Exactas con fecha 30 de Mayo presenta el informe pedido por la Academia acerca de los apuntes que sobre el levantamiento trigonométrico de la carta general de España había remitido el gobierno; cuyo tenor es el siguiente:

“Ningún asunto de mayor interés ni de más reconocida utilidad puede ocupar a esta Corporación. La España se ha quedado atrasada respecto a todas las demás Naciones de Europa en el conocimiento exacto y circunstanciado de su suelo, a pesar de que él es la base material, por decirlo así, sobre la que deben descansar y apoyarse las mejoras y las perfecciones de infinitos ramos de la administración pública, y los progresos seguros y bien entendidos de su industria y de su bienestar. El honor mismo del país reclamaría..., que no se deje pasar más tiempo sin que con la energía de una voluntad decidida y con el noble empeño de vencer todo género de obstáculos cualquiera que sean los sacrificios que lleven consigo, se emprenda una obra tan necesaria y se adopten al plantearla todas las precauciones capaces de asegurar su éxito...”

“Bajo dos aspectos distintos puede considerarse el asunto sobre el que versa este informe. El modo de formar una carta geográfica envuelve en sí cosas que son puramente científicas o facultativas y otras que se refieren al sistema de ejecutar los trabajos, a la manera de plantearlos, y al orden según el cual debe procederse a fin de que no se malgasten el tiempo ni los recursos que en ellos hayan de emplearse...”

“De esta reflexión se desprende la importancia de que la formación de la carta geográfica sea un asunto a que el Gobierno de S.M. afecte determinadas personas y recursos proporcionados bajo la condición de presentar cada año el resultado de lo que se hubiere adelantado en el precedente y el programa de lo que se hubiera de hacer en el venidero”.

“La Academia no mira como de su incumbencia descender a la organización de este personal, ni al cálculo de estos recursos; pero sin embargo no puede menos que hacer presente a V.E. que si se ha de realizar el pensamiento de la carta geográfica es preciso que desde luego se ocupen en llevarle a cabo varias comisiones que trabajando a la vez en diferentes parajes del Reino se encaminen a unir unas a otras sus operaciones y que tengan en la capital un centro de dirección destinado además a recoger los datos que ellas suministren y a ejecutar los cálculos que deben ser su resultado... cuanto mayor sea la actividad con que se ejecuten los trabajos y menor el tiempo que se tarde en concluirlos, tanto más grande será el ahorro de gastos y la economía de esfuerzos para llegar a obtener un resultado final satisfactorio”.

“Todo aconseja, pues, a juicio de la Academia que la formación de la carta geográfica de España se emprenda con ánimo resuelto de llevarla a cabo en el más corto plazo posible, así para lograr la seguridad de obtenerla como para hacer menos costosa su adquisición siendo, en el sentir de esta Corporación, hasta peligroso adoptar rumbos en semejante materia que lleven en su lentitud el sello de su ineficacia...”

“La historia de las tentativas hechas, hasta ahora en España para levantar la carta geográfica debe servir ya de lección y de enseñanza para resolver con acierto este difícil problema. En ella se ven varios pasos dados en diferentes épocas hacia tan importante fin sin ningún éxito y con pérdida de sacrificios cuantiosos...”

En la “Gaceta de Madrid de 16 de enero de 1853 aparece un Real Decreto de fecha 11 del mismo mes, en cuya “Exposición a S.M”. se lee “La formación de la carta geográfica de España es una empresa científica de las más

importantes, por no decir la primera de su género, y a la que conviene á V.M. consagrar activa atención, suficientes recursos y un decidido empeño”.

Y entre las disposiciones del Real Decreto, figuran las siguientes:

“Artículo 1º. Bajo la inmediata dependencia del Ministro de Fomento se establecerá la Dirección de la Carta geográfica de España, compuesta de una Junta permanente y los subalternos y auxiliares necesarios”.

“Artículo 3º. El Presidente de la Junta será como tal director general de todas las operaciones y comisiones relativas a la carta geográfica de España”.

En otro Real Decreto de la misma fecha “Atendiendo a los méritos y circunstancias que concurren en el Mariscal de campo D. **Manuel de Monte-verde**, Director que ha sido de la escuela del cuerpo de estado mayor del ejército. He venido en nombrarle Director de la Carta geográfica de España, con el carácter, consideración y atribuciones señaladas para dicho cargo en Mi Real Decreto de fecha de ayer”.

Don **Manuel Monteverde y Bethencourt** era miembro de esta Real Academia de Ciencias desde 1851. De esta Comisión formaron parte también los Académicos Sres. **García San Pedro** como Vicepresidente, **Terrero, Luxán, Fernández de los Senderos, Subercase** y **Aguilar**. A ella se agregó el también Académico D. **Carlos Ibañez**, por nombramiento del mes de noviembre de 1853.

Por otro Real Decreto de 14 de octubre del mismo año, 1853, publicado en la Gaceta del día 16 se disponía que “La dirección del mapa de España a cargo de la Junta creada por Mi Real decreto de 14 de enero de este año, estará en lo sucesivo bajo la inmediata dependencia del Ministerio de la Guerra.

#### **Carlos Ibañez e Ibañez de Ibero.** (J. M. Torroja y M. J. Sevilla)

El mapa de España que por aquel entonces se proyectaba había de apoyarse en una red geodésica y ésta a su vez en una base que habría de medirse con la máxima precisión posible. Para estudiar las soluciones dadas a este problema en 1854 fueron comisionados al extranjero D. **Carlos Ibañez** y D. **Frutos Saavedra**. Resultado de este viaje fue el proyecto de un “Aparato para medir bases geodésicas” que fue posteriormente construido bajo la dirección de Ibañez en París por **J. Brunner**. Después de otros viajes a París y Bruselas, Ibañez vuelve a España el 18 de Febrero de 1857.

Con este aparato, llamado “Regla de Estadística” o “regla de platino”, se midió una base en Madridejos (Toledo) durante los meses de mayo a octubre de 1858 por Ibañez y Saavedra con la colaboración de los capitanes de Estado Mayor D. **Fernando Monet** y D. **Cesáreo Quiroga**. En 1859 se publicó un extenso tratado con el título “Experiencias hechas con el aparato de medir

bases perteneciente a la comisión del Mapa de España”. Empieza con una “Advertencia preliminar” firmada por “Carlos Ibañez Coronel grad. Com. de Ingenieros y Frutos Saavedra, Coronel grad. Cap. de Artillería”. La obra consta de once capítulos seguidos de seis apéndices. El aparato se compone de una regla de platino que forma termómetro metálico con otra de latón, descansando ambas en un banco de hierro”. Después de una descripción minuciosa y de sus correcciones estudia con todo detalle su utilización en el campo.

Los resultados de esta memorable operación fueron expuestos con todo detalle en un nuevo volumen titulado “Base central de la triangulación geodésica de España” publicado en 1865, y el mismo año apareció una traducción al francés por el coronel A. **Laussedat**, profesor de la Escuela Politécnica de París, quien enviado por el gobierno francés, había asistido como observador a la medida de la base. Fue también traducida al alemán. En esta operación se logró una extraordinaria precisión, con un error probable del orden de 1:5.800.000 de la longitud obtenida que era de 14.662.885 metros, mientras que el error logrado en aquella época en el extranjero era de 1:1.200.000.

El éxito de esta operación fue unánimemente reconocido en España y en el extranjero. En 1859 se le concede la cruz de Comendador de Carlos III, en 1860 la encomienda de Isabel la Católica y en 1961 la Cruz de la Orden de San Hermenegildo. Este mismo año, el 11 de mayo de 1961, ingresa D. **Carlos Ibañez** en la Real Academia de Ciencias, sección de Exactas a los 36 años de edad, leyó su discurso el 8 de marzo de 1963 que versó sobre “El origen y progresos de los instrumentos de Astronomía y Geodesia”, y ocupó el sillón nº 20. En una sesión celebrada por la Academia de Ciencias de París, de la que Ibañez era miembro correspondiente, el 2 de febrero de 1891, su Secretario, Mr. Bertrand comentó: “L’Espagne, en abordant la Géodésie scientifique, dépassait pour son coup d’essai la précision obtenue jusqu’elors par les plus habiles observateurs. Les noms d’Ibañez et de Saavedra étaient désormais inséparables dans l’histoire de la Science”.

No se conformó Ibañez con el éxito logrado con esta regla, sino que proyectó una nueva monometálica, de hierro, que, si bien no permitía lograr la precisión de la anterior, pues el error probable logrado era de 1:2.207.000 de la longitud medida “es más que suficiente, puesto que el error probable obtenido fuera de España, con los aparatos más perfectos en trabajos geodésicos de mayor importancia científica es doble del que se acaba de calcular”. Y en cambio tenía la ventaja de una mayor sencillez en su manejo y por tanto mayor rapidez en la medida. Sobre esta nueva regla publicó en 1869 una obra titulada “Nuevo aparato de medir bases geodésicas”. A esta regla se la conoce como “Aparato de Ibañez” según denominación del ministro de la Guerra.

Con esta nueva regla se midieron bajo su dirección tres bases en la red geodésica de las islas Baleares, descrita en una nueva obra que constituyó un voluminoso tratado titulado “Descripción geodésica de las Islas Baleares”, publicada en 1871. La red está constituida por 783 triángulos de los que 61 constituyen la red de primer orden, apoyada en tres bases medidas, una en Mallorca, de 2.100 metros de longitud, la segunda en Ibiza, de 1.664 metros y la tercera en Menorca, de 2.360 metros. El error probable de estas medidas fue del orden de 1:2.200.000 de la longitud medida, con lo que mejoraba los resultados logrados en aquella época en las bases medidas en distintos países de Europa... Además con las reglas europeas se venían midiendo unos 60 metros a la hora y con la segunda de Ibañez de 1868 se llegaban a medir hasta 200 metros a la hora. D. Carlos Ibañez recibió por estos hechos los mayores elogios de la época. En 1880 se mide con la regla de Ibañez la base geodésica de Aarberg en Suiza con una precisión de 1:3.000.000 de la longitud medida de 2.400 metros.

También Ibañez se preocupó por la nivelación y en 1864 publicó unos “Estudios sobre nivelación geodésica” en colaboración con D. **Joaquín Barraquer**, a quien en 1881 contestó Ibañez en su discurso de ingreso en esta Academia. En su dilatada vida de geodesta Ibañez de Ibero publicó más de 75 trabajos, memorias e informes, en los que refleja de forma pormenorizada todos los logros conseguidos.

### **Trabajos geodésicos de enlace de Europa con África.** (J. M. Torroja y M. J. Sevilla)

Del libro de Actas de la RACEFN se entresacan algunas frases de la sesión del día 17 de diciembre de 1879. Hay primero una “propuesta de los señores Aguilar, Saavedra y Merino de corresponsal extranjero a favor del comandante del Estado Mayor del Ejército francés Mr. Perrier, miembro del Bureau de Longitudes y Jefe de la Comisión encargada de prolongar los trabajos geodésicos de la Carta de Francia”.

El General Ibañez pidió la palabra y dijo: que la propuesta de Académico corresponsal, a favor de Mr. Perrier, “... le imponía el grato deber de dar noticia sucinta a la Academia de los trabajos geodésicos recientemente verificados por los franceses y españoles para enlazar las triangulaciones española y argelina y prolongar de este modo por encima del Mediterráneo la meridiana que desde las islas Shetland, a los 61° de latitud, desciende hasta nuestras Baleares, y parecía aquí detenida desde los tiempos de Arago y Biot por obstáculos infranqueables”.

“Por resultado de los trabajos llevados a cabo en años anteriores, tanto en las cumbres de nuestras elevadas cordilleras de la vertiente mediterránea, como en las mucho más deprimidas de la Argelia, habíase adquirido poco a poco la convicción

de que, a pesar de la gran distancia que medía entre las vertientes establecidas en una y otra, el mencionado enlace podía insertarse con posibilidades de buen éxito, lo cual motivo en el verano de 1978 en reconocimiento expreso de las localidades, que geodésicamente debían empalmarse, y un primer ensayo de triangulación por los procedimientos, o con medios de trabajo ordinarios”.

En representación de Francia Mr. Perrier, Comandante de la E. M. y Jefe de los trabajos geodésicos que se están verificando en Argelia, y de España, el Sr. Ibañez, como Director del Instituto Geográfico, pusieron en relación científica, sin pérdida de momento; celebraron largas discusiones, examinaron minuciosamente las dificultades del problema que se les había encomendado resolver y adoptaron entre otros algo menos importantes y como secundarios, los siguientes acuerdos previos”.

“1°. Emplear idénticos instrumentos para la mensuración en las estaciones Francesas y Españolas...”

“2°. Sin renunciar al uso de los heliotropos empleados en las triangulaciones ordinarias... durante el día, apelar al auxilio de la luz eléctrica producida por máquinas de Gramme, con motores de vapor para verse recíprocamente y poder trabajar de noche”.

“3°. Completar las operaciones propiamente geodésicas y estrictamente necesarias, con la determinación astronómica de la diferencia de longitudes entre dos vértices Español y Argelino, y determinación también de las latitudes geográficas de estos vértices y azimutes de dos direcciones cualesquiera...”

“En cumplimiento de lo así prevenido, el Sr. Ibañez, a quien sus múltiples ocupaciones y la necesidad de presidir en el extranjero otras conferencias internacionales de carácter también científico e indeclinables... designó para dirigirlos en su primera parte o en cuanto al dominio exclusivo de la Geodesia se refería al Sr. Coronel D. Joaquín Barraquer, nuestro compañero electo, individuo del Instituto Geográfico; y al Sr. Merino, astrónomo del Observatorio y del mismo Instituto para la dirección de los Astronómicos posteriores necesariamente a los geodésicos...”

“... el Sr. Ibañez manifestó: que los vértices que debían geodésicamente relacionarse eran los de Mulhacen y Tetica de Bacades, en España, con los de Sabiha y Filhausen en la Argelia distantes los dos primeros uno de otro cosa de 80 kilómetros y unos 250 o 270 de los africanos...”

“...en los primeros días de septiembre hallábanse organizadas las dos estaciones geodésicas de Mulhacen y Tetica y en sus puestos los observadores: D. Joaquín Barraquer, Jefe de la expedición, D. Juan Borrés, Capitán de Ingenieros y D. Priamo Cebrian, Teniente de Artillería en la primera, y D. Vicente López Puigcerver, Comandante de E.M. y D. Clodoaldo Peña, Teniente de Artillería en la segunda. Las observaciones comenzaron en seguida y a fin de mes podían ya darse como terminadas con éxito verdaderamente asombroso...”

“... el mismo Sr. Invitó al Sr. Merino para que enterase a la Academia de lo por él ejecutado...”

“El Sr. Merino comenzó por manifestar que sólo tomaba la palabra cediendo a las instancias del Sr. General Ibañez a quien exclusivamente a su entender y en la parte que a él se refería correspondía hablar en público de este asunto...”

“... habíale sido preciso instalar en el vértice denominado Tetica y en área reducidísima a 2000 metros de altitud, un círculo meridiano, construido con gran esmero por los hermanos Brunner de París, un péndulo astronómico, para la observación de pasos meridianos de estrellas del Sr. Hipps de Neuchatel, un cronógrafo relacionado eléctricamente con el péndulo...”

“La instalación de la estación astronómica completada con un excelente teodolito Repsold, confiado especialmente al Sr. Esteban y destinado a la determinación de la latitud del vértice y azimut de un lado de la triangulación española, comenzó en 4 de octubre...y pudo darse por terminada seis días después, pero cuando aún no estaba ultimada desatóse una furiosa borrasca que redujo a la inacción a los observadores y comprometió en términos alarmantes el éxito de la operación y la conservación de los preciosos y delicados instrumentos...”

“El 15 viendo que el temporal empeoraba en vez de abandonar, y considerando que seis noches de observación bastaban para dar por terminada la diferencia de longitudes entre Tetica y Sabiha, el Sr. Perrier dio la señal de despedida y concluyó la operación”.

“El Sr. Presidente después de manifestar a los Sres. Ibañez y Merino el agrado con que la Academia les había escuchado, les invitó a redactar una nota de los trabajos geodésicos y astronómicos realizados...que pudiera publicarse en la Revista...”

Y en efecto en la Revista de la Academia correspondiente al año 1880 (tomo 21 nº 3) se publicó un interesante trabajo con el título “Enlace geodésico y astronómico de Europa y Africa” dividido en dos partes: “Primera operación. Enlace geodésico” firmada por **Carlos Ibañez** y “Segunda operación. Enlace astronómico” por **Miguel Merino**.

En estos artículos amplían la información dada en la sesión antes citada con interesantes datos sobre el traslado de los instrumentos y su instalación en los vértices Mulhacén y Tetica y sobre el desarrollo e incidencias durante la observación. Reproduce en particular el texto del telegrama que el General Ibañez de Ibero recibió en París el día 20 de septiembre enviado el día antes por el Coronel **Barraquer**, que decía: “Ha caído hoy a las 11,30 de la mañana, un rayo en los aparatos eléctricos cuyos desperfectos ignoro todavía. Preparo la retirada...” Más, por fortuna y honra nuestra -sigue diciendo el artículo que comentamos- la retirada no se verificó, y allí permanecieron hasta los primeros días de octubre, cuantos tenían precisión de permanecer, no sólo para rematar el trabajo comenzado, sino para recoger el material de campaña, y volver a Madrid sin considerable deterioro”.

Las últimas observaciones se realizaron el día 29 de septiembre y la operación se dio por terminada el 3 de octubre de 1879. El error de cierre de los triángulos obtenido fue del orden de un segundo de arco y en la diferencia de longitudes del orden de la centésima. Termina así la operación geodésica más importante del siglo XIX.

### **UIGG (Unión Internacional de Geodesia y Geofísica)**

Es una organización internacional no gubernamental, una de las tres primeras Uniones creadas el 28 de julio de 1919 en Bruselas durante la Asamblea Constituyente del Consejo Internacional de Investigación (predecesor del Consejo Internacional de Uniones Científicas, ICSU, creado en 1931). Los países fundadores fueron nueve: Australia, Bélgica, Canadá, Estados Unidos de América, Francia, Italia, Japón, Portugal, Reino Unido e Irlanda. España se adhirió en 1922 y en 1925 contaba ya con 31 países miembros.

En la actualidad 75 países son miembros de la UIGG. 32 de Europa, 18 de Asia, 11 de África, 4 de América del Norte y Central, 6 de América del Sur y 4 de Oceanía.

En su estructura inicial la Unión comprendía seis secciones: Geodesia, Sismología, Meteorología, Magnetismo y Electricidad Terrestre, Oceanografía Física y Volcanología. Una séptima sección de Hidrología Científica fue creada en 1922. El término sección fue sustituido por el de Asociación en la quinta Asamblea General celebrada en Lisboa en 1933.

La UIGG es una de las 20 Uniones Científicas actualmente agrupadas en el seno del ICSU.

La UIGG se consagra al estudio científico de la Tierra y a sus aplicaciones a las necesidades de la sociedad, tales como los recursos minerales, la reducción de los efectos de los desastres naturales y a la protección del medio ambiente.

La UIGG es una organización de carácter puramente científico. Tiene como objetivos la promoción y la coordinación de los estudios físicos, químicos y matemáticos de la Tierra y de su entorno espacial. Estos estudios incluyen la forma de la Tierra, sus campos gravimétrico y magnético, la dinámica de la Tierra tomada como un todo y la dinámica de los medios que la componen, su estructura interna, su constitución y su tectónica, la generación de magmas, el volcanismo y la formación de rocas, el ciclo hidrológico que comprende las nubes, los hielos, los océanos, la atmósfera, la ionosfera, la magnetosfera bajo todos sus aspectos y las relaciones Tierra-Sol así como los problemas correspondientes para la Luna y los planetas. Las actividades de la UIGG engloban todos los estudios de la Tierra hechos con los satélites artificiales y las demás técnicas que implican el empleo de medidas a gran altitud.

La IUGG celebra Asambleas Científicas cada 4 años. La primera fue en Roma en 1922 y la última en Boulder en 1955. La Asamblea de 1924 se celebró en Madrid y la de este año 1999 se celebrará en Birmingham.

### **Asociación Internacional de Geodesia**

En abril de 1861 el General prusiano **Johann Jakob Baeyer (1794-1885)**, un colaborador de Bessel en la medida del arco prusiano del este (1831-1836), envió al ministro de la Guerra de Prusia un documento sobre "El tamaño y figura de la Tierra: un memorándum para la medición de un arco centro-europeo" que dedico a la memoria de Alexander von Humboldt. El objeto de esta propuesta era conectar los numerosos observatorios astronómicos de Europa Central por redes de triangulación para determinar desviaciones de la vertical y con ello la estructura relativa del geoide. Este proyecto científico implicó colaboración internacional para los levantamientos, recolección y evaluación de los datos así como para el análisis de los resultados. El Rey de Prusia ordenó que el plan de **Baeyer** se pusiera en marcha. En 1862 tuvo lugar la conferencia inaugural en Berlín y a finales de este año 15 Estados europeos firmaron su participación en esta organización. En 1864 se creó a propuesta de **Baeyer** la "Mitteleuropäische Gradmessung" con Alemania, Austria, Bélgica, Holanda, Dinamarca, Italia, Suecia, Suiza y Rusia. En 1867 se adhieren España y Portugal y la asociación cambia su nombre por el de "Europäische Gradmessung" a la que se sumó Francia en 1873. Así comienza la organización internacional del "Arco Europeo" que se reconoce como origen de la Asociación Internacional de Geodesia. El Bureau Central del "Arco Europeo" comenzó sus trabajos en 1866 con **Baeyer** como Presidente. En 1870 se estableció el Instituto Geodésico Prusiano que cobijó al Bureau Central. Después de la muerte de **Baeyer** en 1885 fue nombrado Director **Friedrich Robert Helmert** en 1886 quien añadió nuevos objetivos a la Organización.

El primer Presidente de la Asociación Internacional de Geodesia (después de **Baeyer**) fue el General D. **Carlos Ibañez e Ibañez de Ibero** cuyo prestigio hizo que fuera reelegido cada tres años desde 1874 hasta su muerte en 1891.

En 1884 se adopta el meridiano de Greenwich como origen de longitudes y en GMT.

En 1895 se unen a la AIG Estados Unidos y Japón.

En 1916 expiraron los acuerdos internacionales que no fueron renovados, con esto y con la muerte de **Helmert** en 1917 termina este primer periodo de colaboración internacional.

De 1917 a 1922 la AIG queda reducida a las naciones neutrales en la 1ª Gerra Mundial: Dinamarca, Holanda, Noruega, España, Suecia y Suiza.

En 1919 se organiza la ciencia internacional en muchas áreas de forma no gubernamental. Así nace el International Research Council (IRC) que en 1931 pasa al International Council of Scientific Unions (ICSU) donde entre otras se encuentra la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (UIGG) dentro de la cual existe una sección conocida desde 1932 como Asociación Internacional de Geodesia (IAG). Los objetivos y organización de la IAG están en “The Geodesist’s Handbook” que se publica cada 4 años.