

BREVE HISTORIA DE LA GEODESIA

José Luis Almazán Gárate - Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos - Universidad Politécnica de Madrid
Amparo Verdú Vázquez - Ingeniera en Geodesia y Cartografía - Universidad Alfonso X el Sabio
M^a Carmen Palomino Monzón - Dra. en Ciencias Físicas - Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN:

La geodesia estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la Tierra. Desde un punto de vista práctico, una de las mayores utilidades de la geodesia es que mediante sus técnicas es posible representar cartográficamente territorios muy extensos. Esto se consigue mediante el establecimiento de una red de vértices geodésicos distribuidos por toda la superficie terrestre, de los cuales se determinarán sus coordenadas, así como su elevación sobre el nivel del mar con muy alta precisión.

Es importante hacer un recorrido por la historia de la geodesia para entender su evolución y poder conocerla en profundidad.

PALABRAS CLAVE: Geodesia, vértices geodésicos, topografía, cartografía

Introducción

El término geodesia proviene del griego (geo = tierra y desía = divisiones). Por tanto, etimológicamente significa las divisiones (geográficas) de la tierra o el acto de dividir la tierra.

También podemos definir de forma simple a la geodesia como la ciencia que se ocupa de darnos a conocer la forma y dimensiones de nuestro planeta. Por otro lado, suministra con sus resultados de mediciones y cálculos, la referencia geométrica para las demás ciencias que estudian la dinámica del planeta y los factores que influyen sobre él. Hay que tener en cuenta que no podemos hablar de Geodesia sin apoyarnos en algunas ciencias auxiliares, como son la Cartografía y la Fotogrametría.

La Geodesia Superior o Geodesia propiamente dicha, dividida entre la Geodesia Física y la Geodesia Matemática, trata de determinar y representar la figura de la Tierra en términos globales. La Geodesia Práctica o Topografía, levanta y representa partes menores de la Tierra donde la superficie puede ser considerada plana.

Es importante hacer un recorrido por la historia de la geodesia para entender su evolución y poder conocerla en profundidad.

Época Antigua

No pueden datarse las primeras operaciones geodésicas por estar ligadas al sentido de la orientación y a la necesidad de materializar las direcciones cardinales. A finales del neolítico los menhires¹ y las alineaciones de dólmenes² tenían en cuenta esa circunstancia, estimándose que las tres cuartas partes de dichas construcciones estaban dispuestas hacia el sol naciente.



Dolmen
Fuente: elestrecho.com



Menhir

Fuente: queenou.m6blog.m6.fr

1 Menhir: Gran piedra larga (monolito) colocada verticalmente en el suelo

2 Dólmen: Monumento construido con grandes bloques de piedra que forma una cámara de enterramiento que soporta una o varias piedras planas a modo de techo. Muchos estuvieron originalmente recubiertos con tierra, formando túmulos. En algunas construcciones la cámara está precedida por un pasillo, un corredor construido a base de ortostatos con cubierta adintelada.

Herodoto le atribuye a Egipto la invención de la geometría. Los egipcios poseían sólidos conocimientos geométricos a tenor de las pirámides con proporciones tan perfectas y alturas considerables.

Bajo el prisma geodésico es sorprendente la exactitud lograda al orientar sus grandes construcciones y en particular las pirámides, presentando en todos los casos una desviación menor de un grado en relación al Norte Geográfico (en la pirámide de Keops se observa una desviación de 2' 28"). De acuerdo con ello ha de suponerse que disponían de una metodología fiable y basada en observaciones astronómicas, al no conocer todavía la brújula. Todo hace pensar en la observación de la estrella polar de la época, o en la de cualquier otra en el momento de su culminación. Es muy probable que, al poder medir la longitud de la sombra de un gnomon³, comprobaran pronto que la más corta señalaba hacia el Norte.



Gnomon

Fuente: www.wsanford.com

Aunque hoy día se acepte que existen indicios para suponer que los constructores de la gran pirámide de Giza incorporaron información geodésica en sus dimensiones, se admite al mismo tiempo que fueron Pitágoras y otros sabios de su escuela los primeros en razonar que la Tierra debía ser esférica por serlo el Sol y la Luna.

Su quehacer geométrico quedó igualmente reflejado en su agrimensura, ciertamente desarrollada, hasta el punto de poder replantear los detalles topográficos desaparecidos en las periódicas inundaciones del Nilo.

3 En sus primeras observaciones el hombre notó que la sombra variaba de acuerdo con la posición del sol. Así nació el gnomon, que consistía en un bastón incrustado en el suelo perpendicularmente, y en tierra se señalaban surcos que indicaban los distintos momentos del día. La sombra del bastón era la que señalaba los diferentes horarios.

Generalmente se acepta que no existieron intercambios directos entre Egipto y Mesopotamia, pero puede afirmarse que para los babilonios del tercer y segundo milenio eran familiares conceptos básicos de la geodesia y de la cartografía matemática. Sin embargo sus concepciones cosmológicas eran aún rudimentarias, al considerar que la tierra era un disco plano que flotaba en un océano que la rodeaba y en cuyo centro se encontraba Babilonia. Tal concepción fue simbolizada en el conocido mapa de su mundo fechado en torno al año 600 a.C., conservado en el museo británico.

De su probada capacidad matemática es muestra su aplicación del teorema de Pitágoras unos mil años antes de que naciera el propio autor. Una de sus aportaciones más importantes fue la implantación del sistema sexagesimal en concordancia con los 360 días de los doce meses lunares⁴.

El mundo Greorromano

Coincidiendo con la decadencia de las civilizaciones orientales apareció en las islas del Egeo una nueva civilización que dio un impulso decisivo al progreso científico, sentando las bases para el posterior desarrollo de la geodesia. Pitágoras (580-500 a.C.) y Parménides (540-470 a.C.) fueron los principales defensores de la Tierra esférica. Aristóteles (384-322 a.C.) no fue ajeno a las enseñanzas de su profesor Platón (429-348 a.C.), también convencido de la esfericidad terrestre y del geocentrismo y que probó con observaciones que aún pueden repetirse: la sombra de la Tierra y la comprobación de que el Polo celeste alcanza mayor altura sobre el horizonte del lugar, a medida que se realizan desplazamientos hacia el Norte.

Contemporáneo de ellos fue el matemático Eudoxo (408-355 a.C.), cuya mayor aportación geodésica la realizó al fijar en 400.000 estadios⁵ la circunferencia máxima de la Tierra. Sobresale también Dicearco de Mesina (350-290 a.C.). En su obra descubre el ecúmene⁶ y lo dimensiona: 60.000 estadios de Este a Oeste y 40.000 estadios de Norte a Sur. A él se le atribuye la medida del arco de meridiano comprendido entre Siena y Lysimachia.

4 El día lo dividieron en 12 partes iguales, los beru. Cada beru (doble hora) fue subdividida en 60 dobles minutos y cada uno de éstos en 60 dobles segundos.

5 Al parecer el estadio tenía 125 pasos. El estadio griego equivalía aproximadamente a 185 metros mientras que el estadio egipcio era alrededor de 157,5 metros.

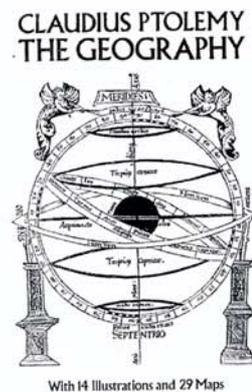
6 Porción de la Tierra permanentemente habitada, en contraposición a las áreas inhabitadas o temporalmente ocupadas.

Creada la Biblioteca de Alejandría y siendo ya la esfericidad de la Tierra un hecho incuestionable, surgió pronto como meta de sus filósofos el cálculo más riguroso de sus dimensiones. Un representante fue Eratóstenes de Cirene (275-195 a.C.) reconocido universalmente como fundador

de la Geodesia. Fue este filósofo el primero que hace la experiencia de medir la circunferencia de la Tierra. Lo realizó por el año 240 a.C., comparando la altura del Sol en un mismo día (el solsticio de verano) y en dos ciudades relativamente alejadas (Alejandría y Siena). Eratóstenes arriesga un resultado: 252.000 estadios egipcios o 40.000 kilómetros, hoy se sabe que tiene 39.690 de circunferencia. Los cálculos de Eratóstenes no fueron plenamente aceptados. Hubo muchas otras mediciones, la más importante y que tendría una especial incidencia en la historia de la humanidad, es la de Posidonio y Estrabón, que luego fue adoptada por Ptolomeo, que medía la circunferencia de la Tierra en 29.000 kilómetros, casi tres cuartas partes de la original. La historia quiso que Cristóbal Colón (1415-1506) utilizara esta medida en sus cálculos. Colón fue en dirección oeste porque pensó que Asia quedaba a solo 4.800 kilómetros, cuando en realidad tiene una distancia de 16.000 kilómetros, su suerte fue que hubiese un continente en medio.

Independientemente de la aproximación del resultado (que la tuvo) lo más sobresaliente de la medida fue el método empleado, que ha venido siendo aplicado de modo interrumpido hasta, prácticamente nuestros días.

Ptolomeo (90-168 d.C.) en el primer libro de su Geografía trató no solamente las generalidades correspondientes a las dimensiones de la Tierra, sino también la metodología cartográfica necesaria para su representación. Fue el primero en hablar de longitudes geográficas en términos semejantes a los actuales. La contribución de Claudio Ptolomeo es la última y más sobresaliente del mundo antiguo.



Tapa del libro de "Geographia" de Ptolomeo
Fuente: globalizacion.no.sapo.pt

Edad media

Después del gran sabio alejandrino, el progreso de las ciencias geográficas sufre un importante estancamiento pues los romanos no aportaron en ese campo nada sobresaliente. La situación se agravó con la destrucción de la Biblioteca de Alejandría y con la invasión de los bárbaros. Merece especial mención el imperio bizantino por el marcado carácter confesional que adquirió su estado, y por la consiguiente concepción errónea del mundo que adoptaron aquellos cristianos frente a la tradición griega.

La cuestión de esfericidad continuó debatiéndose muchos años después, así Santo Tomás de Aquino (1227-1274) argumentaba que la Tierra debía ser esférica porque la posición de las constelaciones dependía del lugar de observación.

Los trabajos geodésicos griegos, con sus mediciones de la circunferencia terrestre, fueron continuados por los sabios árabes del califato de Bagdad (siglo IX), los cuales, dando por supuesta la esfericidad, llegaron a introducir nuevas metodologías en sus observaciones. Se realizaron varias mediciones de un grado de meridiano entre los ríos Tigris y Éufrates, para contrastar los cálculos efectuados por los griegos. El valor asignado al desarrollo del grado depende de la fuente consultada, pero se acepta que es de 56 2/3 millas.

En el siglo XI Al-Biruni (973-1048) midió el radio de la Tierra por un procedimiento novedoso⁷, luego repetido en Occidente. Los resultados obtenidos, según él fueron análogos a los logrados por los equipos del califa. El radio de la Tierra dado por Al-Biruni fue de 12.851.369 codos⁸, resultando para el grado meridiano 224.388 codos: aproximadamente 56 millas árabes⁹.

La importancia de las operaciones geodésicas realizadas por los árabes se evidencia aún más al pensar que debieron transcurrir varios siglos para que se repitieran en Europa, y concretamente en Francia, cuna de la geodesia moderna.

La incorporación de Occidente a la operación de dimensionar la Tierra se vio indudablemente favorecida por la continuada traducción de los textos árabes, que de ese modo hicieron renacer a los clásicos griegos y muy concretamente a Ptolomeo. Otro factor imprescindible para el desarrollo de los conocimientos geográficos, fue la invención de la imprenta¹⁰.

7 Medida de la depresión del horizonte sensible, realizada desde una montaña con una altitud previamente determinada.

8 Codo: medida de longitud equivalente a 0,42 metros. Distancia media desde el dedo mayor al codo.

9 Milla árabe: medida equivalente a casi 2000 metros.

10 El nacimiento de la imprenta se remonta a China, en el año 593, cuando se reproducen por primera vez y de forma múltiple, dibujos y textos con la ayuda de caracteres de imprenta tallados en tablas de madera (xilografía). Estas técnicas llegaron a Occidente mucho después. El holandés Laurens Coster (S. XIV) será el primero en utilizar tipos móviles de madera, aunque universalmente se considera inventor de la imprenta a Johannes Gutenberg (S. XV), por su creación de los tipos móviles de plomo fundido, mucho más resistentes (tipografía).

La Edad Media termina con el descubrimiento de América, aunque su descubridor muriera sin tener conciencia de ello.

Renacimiento

Colón creyó haber confirmado algunos cálculos medievales del diámetro de la Tierra con sus observaciones. En una nota marginal (núm. 490) a su copia del Imago Mundi, escribió lo siguiente: "Nota que a menudo navegando de Lisboa hacia el sur de Guinea yo he observado con cuidado el trayecto que hacen los capitanes y los marinos; y enseguida he tomado la altura del Sol con el cuadrante y otros instrumentos en varios sentidos, y he encontrado que ella concordaba con los datos de Alfragán, a saber, que a cada grado corresponden 56 2/3 millas; por ello hay que prestar fe a esos cálculos; se puede, pues, decir que el circuito de la Tierra bajo el círculo equinoccial es de 20.400 millas. Es tal como lo habían establecido el maestro, médico y astrólogo José Vicinho y varios otros que fueron enviados expresamente para esto por el Serenísimo Rey de Portugal". Otras notas al margen repiten la cifra de 56,66 millas para el grado.

Colón no determinaba las latitudes en alta mar, sino que navegaba por estima, es decir, apreciando según su parecer la distancia recorrida en veinticuatro horas y registran-

do el rumbo según el compás náutico. Utilizó el cuadrante marino y la plomada para observar la altura de la estrella polar, pero tan sólo como una comprobación de la estima. Para registrar la latitud no hizo uso de fórmulas, sino de una tabla de latitudes correspondientes a los días de solsticio. Por otra parte, logró determinar la longitud mediante la observación de un eclipse de Luna. Sus numerosas observaciones astronómicas le llevaron a la extraña conclusión de que la Tierra no era redonda, sino de forma de pera, con una protuberancia del tipo de un pezón.



Página del libro Imago Mundi de Colón

Fuente: www.ewetel.net

Colón fue un agudo observador de las corrientes y vientos oceánicos y, como consecuencia de ello, inauguró las grandes rutas de navegación del Atlántico norte. En su viaje de vuelta, basándose en observaciones previas de marinos portugueses y en las suyas propias extraídas de un viaje a Islandia, navegó con rumbo noreste hasta la latitud de las Azores, antes de encaminarse al Este, porque sabía que allí prevalecían los vientos del Oeste.

Colón tenía un conocimiento de primera mano de la cartografía, el comercio practicado por su hermano Bartolomé en Lisboa; en el diario de su primer viaje afirmaba: "tengo propósito de hacer carta nueva de navegar, en la cual situaré toda la mar y tierras del mar Océano en sus propios lugares, debaxo su viento". De hecho, en los Pleitos de 1514, un testigo daba cuenta de que todos los exploradores de Tierra Firme después de Colón "iban por las cartas aquel dicho Almirante de aquella navegación había hecho e hizo, porque de todo lo que descubriría solía hacer cartas". Debe observarse que, mientras que las cartas de Colón tenían siempre escalas de distancias, carecían de cuadrículas de latitud y longitud, porque continuaba pensando en términos de "climas" ptolemaicos. Colón, como muchos otros autores de la época de los descubrimientos, hizo frecuentes referencias a Ptolomeo y persistió en el intento de hacer nuevos descubrimientos acordes con el sistema ptolemaico.

A pesar de todo ello la cronología documentada de las mediciones de arcos no comienza hasta años más tarde. Leonardo da Vinci (1452-1519) explica un método para determinar el radio de la Tierra, análogo al de Eratóstenes y que ilustra en un gráfico. Contemporáneo suyo fue Antonio de Nebrija (1444-1522) al que se le atribuye la medición de un grado de meridiano.

En esta época también ha de citarse a Carlos V por su relación con la geodesia histórica. El emperador encargó los primeros mapas de los Países Bajos al cartógrafo y topógrafo flamenco Jacob van Deventer (1500-1575). Se empleó entonces por primera vez el novedoso método de la triangulación, que al parecer había sido ideado conjuntamente con él y su discípulo Gemma Frisius (1508-1555). Es de remarcar el interés de Kepler (1571-1630) por determinar las dimensiones de la Tierra, mencionando un método para calcular su radio, basado en la observación recíproca de las distancias cenitales de una cierta visual y el cálculo de la distancia geométrica entre las dos estaciones.

El siglo XVII

En 1635, el matemático inglés R. Norwood (1590-1665) obtuvo para un grado de meridiano 57.300 toesas¹¹ de París, alrededor de 110,72 km. El arco fue el comprendido entre York y Londres, midiendo en su torre la altura meridiana del Sol y haciendo lo propio en la otra ciudad; así calculó la amplitud angular de 2° 28' asociada a los 275 km que midió directamente con una cadena de agrimensor.

La primera medida geodésica de precisión fue la que realizó el abad francés Jean Picard (1620-1682) entre las ciudades de Amiens y Malvoisine, a lo largo de los años 1668 y 1670. El desarrollo del arco de meridiano lo obtuvo gracias a la cadena de 13 triángulos que estableció a lo largo del mismo, introduciendo la escala, con dos bases de 5.663 toesas y de 3.902 toesas, llegó a que un grado de meridiano equivalía a 57.060 toesas. Suponiendo la Tierra esférica obtuvo para su radio un valor de 6.365 km, un resultado nuevo y de suma importancia, asegurándose con frecuencia que sirvió a Newton (1642-1727) para confirmar su hipótesis de la gravitación universal.

La contrapartida que Newton ofreció a la Geodesia fue que consiguió demostrar que el modelo esférico supuesto hasta entonces como ideal para la superficie terrestre debía ser sustituido por otro elipsoidal.

La primera medición de la variabilidad de la curvatura terrestre se realizó cuando se prolongó el meridiano de París en los dos sentidos: al Norte de Amiens y al sur de Malvoisine. El ejecutor del proyecto fue Cassini (1625-1712). La medición duró desde 1683 hasta 1718 y el resultado fue para el desarrollo de un grado de meridiano, los valores siguientes: París-Colliure 57.097 toesas y París-Dunkerque 56.960 toesas.

Tales resultados llevaron a sus autores y especialmente a los Cassini, a pensar que la Tierra era un elipsoide de revolución alargado según la línea de los polos, con una excentricidad dada por:

$$e^2 = \frac{b^2 - a^2}{a^2} = 0,144$$

¹¹ La toesa era una antigua medida de longitud francesa, equivalente a 1.949 m

¹² El reloj de péndulo de 1657 construido por Christian Huygens mejora la determinación de las longitudes y a finales de este periodo se construye el teodolito altacimutal.

Al ser el modelo experimental opuesto al teórico previamente expuesto por Newton y también por Huygens¹² (1629-1695), se originó una encendida polémica.

El siglo XVIII. La ilustración

Históricamente, medir la longitud geográfica ha sido un problema muy complicado. Las mediciones de longitud geográfica fueron muy inexactas por lo menos hasta me-

diados del siglo diecisiete, lo que hace fácil comprender los deformados mapas que se tenían hasta antes de dicho siglo.

En los siglos XVII y XVIII, el problema de la longitud cobra gran importancia estratégica y ocupa a algunas de las mejores mentes científicas.

La intensa búsqueda de una solución al problema de la longitud duró cuatro siglos en todo el continente europeo. Se fundaron magníficos observatorios en París, Londres y Berlín con el objetivo expreso de calcular la longitud valiéndose del cielo.

A medida que pasaba el tiempo y se apreciaba que ningún método daba resultado, la búsqueda de una solución al problema de la longitud fue adquiriendo proporciones legendarias, resultando comparable a la búsqueda de la fuente de la eterna juventud, el secreto del movimiento perpetuo o la fórmula para convertir el plomo en oro. Los gobiernos de las grandes potencias marítimas (España, los Países Bajos y ciertas ciudades-estado italianas) renovaban periódicamente el entusiasmo ofreciendo enormes premios por un método viable.

En 1714 el Parlamento británico anuncia un premio de 20.000 libras, una suma inmensa en aquellos días, por una solución fiable y John Harrison, un relojero británico, consume décadas intentando conseguirla. Sus dos primeros "cronómetros" de 1735 y 1739, aunque fiables, eran piezas de maquinaria delicadas y voluminosas. Solo su cuarto instrumento, probado en 1761, demostró ser satisfactorio y fueron necesarios algunos años más antes de recibir el premio.

El relojero dedicó toda su vida a esta investigación y logró lo que Newton temía que fuera imposible: inventó un reloj que, cual llama eterna, llevaba la hora exacta desde el puerto de origen hasta cualquier rincón remoto del planeta.

La ilustración, desde el punto de vista geodésico, debe identificarse como la era del elipsoide.

Las continuas discusiones sobre la forma de la Tierra hicieron que la Academia de Ciencias decidiera zanjar la cuestión y subvencionar el proyecto que en el año 1735 le presentara Godin para medir grados de meridiano en el Ecuador.

En 1734 el monarca Felipe V recibió una invitación de su primo el rey Luis XV de Francia para que España participase en la expedición que la Real Academia de Ciencias de París organizaba para viajar a Quito (virreinato del Perú), con la misión de medir la longitud, correspondiente a un grado, de un arco de meridiano terrestre en el Ecuador.

La expedición científica, a las órdenes de Charles de la Condamine y formada también por Louis Godin y Pierre Bouger, con el objetivo de aclarar las teorías de Newton y Huygens sobre la forma y el tamaño de la Tierra; pretendía comparar la medición de Quito con otra medición también de un grado, obtenida en Laponia por el físico y matemático parisiense Pierre Louis Maupertius.

Por decisión de Felipe V, debían ir dos oficiales que fueran capaces de realizar los cálculos por sí mismos, al margen de los cálculos desarrollados por los franceses. Para este trabajo se eligió a dos jóvenes guardia marinas: Jorge Juan y Santacilia y Antonio de Ulloa y de la Torre-Guiral.

La medición del grado de meridiano se prolongó desde 1736 a 1743 debido a las grandes dificultades que tuvieron

que superar. Allí se les conocía como los caballeros del punto fijo. El sistema seguido consistía en una serie de triangulaciones que requerían poner señales en puntos o bases elegidas, tanto en el llano como en las cumbres de 5.000 metros de altura. Las ciudades de Quito y Cuenca, situada tres grados más al sur de la primera, limitaron los extremos de la medición geométrica o triangulación; entre ambas, una doble cadena de montañas paralelas facilitaba la elección de vértices a una y otra parte del gran valle que las une.

Decidieron separarse en dos grupos, Godín con Juan, la Condamine y Bouguer con Ulloa; ambos grupos efectuarían las medidas en sentido contrario, con el fin de comprobar su exactitud. La medida empleada era la toesa. Después de varias comprobaciones, había que complementar estas observaciones físicas con las astronómicas; además, el instrumental adolecía de graves defectos, por lo que hubo que repetir numerosas veces los cálculos, llegando a tener que construir Godín, Juan y el relojero Hugot, un instrumento de 20 pies de largo para facilitar las mediciones

Su larga estancia estuvo alterada por muchos incidentes, pero la empresa mereció tales sacrificios. A partir de entonces, con el conocimiento exacto de la forma y magnitud de la Tierra, se podía cartografiar situando correctamente longitud y latitud.

Maupertius dirigió la expedición a Laponia, contando con la colaboración de personajes tan ilustres como Celsius o Clairaut. La operación duró poco más de un año (entre 1736 y 1737). Los resultados calculados sobre el terreno permitieron estimar en 111.949 metros el desarrollo lineal de un grado de meridiano. De vuelta a Francia, Maupertius y Clairaut calcularon de nuevo el desarrollo hallando, 111.452 metros. Las operaciones pendulares de Clairaut confirmaron que la longitud del péndulo, era menor en París que en Kittis.

Ambos matemáticos aseguraron que la Tierra era un elipsoide achatado por los polos, determinando incluso su aplastamiento $\alpha \cong 1:178$.

Comparando las mediciones de las dos expediciones científicas (Condamine y Maupertius), se pudo determinar que la Tierra tiene forma de un elipsoide de revolución achatado por los polos, pues las longitudes de los arcos de un grado de meridiano van creciendo desde el Ecuador hacia aquellos.

Los desarrollos lineales asociados a un grado fueron dispares, aunque sus resultados originales se expresaron en toesas, su equivalencia en metros sería la siguiente:

Godín	110.651 m.
Bouguer	110.639 m.
La Condamine	110.645 m.
J.Juan	110.633 m.
A.Ulloa	110.648 m.

Los resultados de estas dos expediciones científicas, tan fundamentales en desarrollo posterior de la geodesia, marcaron la ciencia de todo el siglo XVIII al hacer prevalecer finalmente el modelo newtoniano (elipsoide oblat¹³), aunque todavía no se conociera muy bien su aplastamiento, frente al modelo de Tierra cartesiano (elipsoide prolato¹⁴).

¹³ aplastado o achatado
¹⁴ alargado

Esa circunstancia hizo que Voltaire, con su habitual sarcasmo, le comunicara a Maupertius que con el resultado de su expedición no sólo había aplastado la Tierra sino también a los Cassini.

Jorge Juan y Antonio de Ulloa realizaron cuarenta de las cien cartas modernas del mundo. Juan estableció como valor del grado de Meridiano contiguo al Ecuador, 56.767,788 toesas, en un cálculo que fue el más aproximado de todos. La unidad de medida pasó a ser el metro, y con ello un sistema métrico decimal adoptado universalmente.

En los años siguientes la base teórica de la Geodesia fue perfeccionada, en primer lugar por Lambert (Determinación del Achatamiento de la Tierra a través de la presión y nutación) y también por Laplace.

El siglo XIX

En el siglo XIX se asiste al progreso de la geodesia práctica. Aparece por primera vez la palabra geoide para designar la figura física de la tierra.

La geodesia se convierte en soporte imprescindible para las representaciones cartográficas de cada uno de los países. Comienzan por tanto a surgir, los Centros Cartográficos Nacionales. Aunque permanecen en líneas generales, los métodos del siglo XVIII: triangulación, astronomía esférica, gravimetría y medida del tiempo, se realizan las observaciones con instrumentos mucho más precisos y con un rigor extremo en la metodología empleada. Empezaron a configurarse las redes geodésicas de acuerdo con el criterio de las cadenas principales a lo largo de meridianos y paralelos.

El final del siglo fue marcado por los grandes trabajos de mediciones de arcos meridianos de los geodestas junto con los astrónomos, para determinar los parámetros de aquel elipsoide que tiene la mejor aproximación con la tierra física. Los elipsoides más importantes eran los de Struve, Bessel y de Clarke.

Struve proyectó una y observó una cadena de 258 triángulos para medir el gran arco de meridiano ruso, comprendido entre el Danubio y el Mar Glacial Ártico. En 1860, comparando la magnitud del desarrollo de su arco con los previamente hallados en otras latitudes, obtuvo su propio elipsoide¹⁵.

¹⁵ Sobre el elipsoide de Struve se calcularían las coordenadas de la red geodésica española, representándolo en el Mapa Topográfico Nacional mediante el sistema poliédrico y a escala 1:50.000. Así vino sucediendo hasta que se sustituyó por el elipsoide internacional de Hayford.

Gauss, uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos. Ideó en 1808 el método de alturas iguales para determinar simultáneamente la longitud y la latitud. Gauss reconoció en 1828, al igual que había hecho antes Laplace (1802) y haría después Bessel (1837) que el modelo elipsoidal no es válido si se pretende obtener una gran exactitud. Lo que se traduce en la necesidad de considerar otra superficie que se ajuste mejor a la forma real de la Tierra. Esa superficie que se refería Gauss la acuñaría años después (1873) Listing, el cual junto a Fischer y Bruns inicia las teorías sobre la ondulación del geoide, fijando entre 800 m y 1 km la separación máxima entre ambas superficies; unas magnitudes que no serían fiablemente revisadas hasta el desarrollo de la geodesia espacial, considerándose hoy día que la altura máxima del geoide es próxima a los 100 m.

Al ser su expresión matemática sumamente complicada, se prescindió del geoide como superficie de referencia y se tomó otra más asequible al cálculo. El problema no se solucionaría hasta el siglo siguiente, gracias a los trabajos de Helmert y Hayford.

Mención especial merece la Red Geodésica de la España peninsular del siglo XIX. El Real Decreto del 11 de enero de 1853 crea la Dirección de la Carta geográfica de España, con el consiguiente inicio de la triangulación geodésica. En ese mismo año se insta a Carlos Ibáñez de Ibero y a Frutos Saavedra para que preparen el proyecto de un aparato para medir la que sería base central de la triangulación. El aparato se construye en el taller de los hermanos Brunner, en París, bajo la supervisión de los dos españoles.

A finales del año 1858 ya estaba medida la base de Madrideojos, una operación que contribuyó a acelerar las operaciones geodésicas de nuestro país. En 1870 se crea el Instituto Geográfico, un organismo que a partir de entonces se encargaría sin interrupción de los trabajos geodésicos y de la investigación con ellos relacionada. La organización de los trabajos consistió en la división del territorio en los llamados distritos geodésicos. Dentro de cada uno de ellos había integradas varias provincias en las que se realizaban los trabajos bajo la atenta coordinación de un único jefe facultativo.

El diseño de la red geodésica obedeció al criterio francés, adoptándose por lo tanto el sistema de las cadenas principales a lo largo de los meridianos de Salamanca, Madrid, Pamplona y Lérida, con un incremento longitudinal de 2° aproximadamente, así como tres cadenas correspondientes a los paralelos de Palencia, Madrid y Badajoz, separados también alrededor de 2°. Por otra parte se realizaron las llamadas cadenas de costa extendidas por el Norte, Este y Sur. Todas ellas se apoyaron en seis bases medidas directamente: Madrideojos, Vich, Cartagena, Arcos de la Frontera, Lugo y Olite. La observación de la red se culminó en el año 1892 dentro del cuadrilátero de Cáceres.

Las altitudes de vértices se obtuvieron tras enlazar con las señales de la Red de Nivelación de Precisión, cuyos trabajos se habían iniciado en el año 1871 eligiendo como origen el nivel medio del mar proporcionado en principio por una regla y después por el mareógrafo instalado en Alicante (1874), empleando niveladas simples o sencillas y en algunos casos simultáneas. Una vez finalizadas las observaciones de la R.N.P. hubo que modificar todo el proyecto para incluir la nivelación de las líneas de ferrocarril. Ello produjo una demora en los trabajos que se prolongó hasta 1925.

Durante la medición de la base de Madrideojos comentó Ibáñez de Ibero a Laussedat¹⁶ la conveniencia de concienciar a los gobiernos español y francés acerca de la viabilidad del enlace geodésico y astronómico entre los continentes europeo y africano.

16 En la medición de la base de Madrideojos, el gobierno francés mandó como observador al coronel de ingenieros Aimé Laussedat.

Los estudios previos no se realizaron hasta pasados veinte años, en el verano de 1878, y a propuesta del director del Instituto Geográfico, cargo que ostentaba Ibáñez de Ibero desde su fundación en 1870.

Por otro lado, a finales de siglo se empezó a profundizar en

el campo de la gravimetría, técnica que nos permite conocer la diferencia de gravedad que existe en distintos puntos sobre la Tierra. Desde que Newton descubrió que todos los objetos del universo se atraen, se comenzó a investigar el efecto de la gravedad en la superficie terrestre. Las primeras mediciones gravimétricas con cierta precisión fueron realizadas por Plantamour en el año 1864 en Suiza. En España fueron llevadas a cabo por Barraquer y Rovira casi veinte años después, en 1883, usando un péndulo de Repsold, propiedad del Instituto Geográfico y Estadístico.

La tendencia de los investigadores en la materia fue la de determinar con la mejor precisión el valor de la gravedad "g" que se tomó como medio para confirmar el achatamiento de la tierra. Se sabe que la variación del valor de "g" permite concluir que nuestro planeta no es esférico, sino un cuerpo irregular de forma parecida a un elipsoide, cuyo eje menor está alineado al de rotación de la tierra y el mayor al del plano ecuatorial, de donde resulta que el valor de "g" es máximo en los polos y mínimo en el ecuador.

En geodesia, el conocimiento del valor de la gravedad es aplicable a:

- las separaciones entre el geoide y el elipsoide, que hacen posible la reducción de distancias al elipsoide
- la desviación de la vertical
- el refinamiento del geoide a partir de anomalías de gravedad, o bien combinando datos gravimétricos con observaciones realizadas a través del GPS
- las alturas ortométricas precisas

La Geodesia en el Siglo XX

En el siglo XX desaparece el concepto de geodesia clásica y aparece la geodesia espacial, que utiliza en gran medida los fundamentos matemáticos que ya estaban establecidos para la geodesia tradicional.

Con las nuevas tecnologías, aparecen nuevas posibilidades y gracias a las técnicas espaciales se puede determinar la forma de la Tierra o determinar las coordenadas de puntos sobre la superficie terrestre.

La geodesia espacial se basa en observaciones de puntos fuera de la superficie de la Tierra, que no tienen porque ser visibles. En un principio debían serlo, pero gracias a las señales de radio no es necesario.

Desde que en 1957 el lanzamiento del Sputnik-1 supuso el comienzo de la era de los satélites artificiales y su posterior uso en aplicaciones para el interés de la comunidad mundial, la tecnología ha avanzado en este aspecto de manera espectacular, y uno de los campos en los cuales se ha manifestado especialmente dicho avance, es en las aplicaciones que conciernen a las ciencias de la Tierra, y dentro de ellas, de manera notable en el estudio de su forma y dimensiones.

Dentro de los grupos de Sistemas de Geodesia Espacial, destacan la Constelación Navstar (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) y la Constelación Glonass (Sistema Global de Navegación por Satélite). Ambas constelaciones fueron creadas por los Departamentos de Defensa de los Estados Unidos y Rusia, respectivamente, y su principal cometido era poder posicionar un objeto en la superficie de la Tierra a través de las señales emitidas en forma de ondas de radio por los satélites de dichas constelacio-

nes, que dicho objeto procesaba en la superficie, determinando así su posición con una precisión en función del tipo de información recibida, tiempo de recepción y condiciones de la emisión.



Sputnik 1
Fuente: encarta.msn.com

Este posicionamiento se produce sobre un sistema de referencia inercial cartesiano, que en el caso de usar la constelación americana Navstar corresponde al sistema WGS-84, y en el caso de usar la constelación rusa Glonass corresponde al sistema PZ-90.

Las aplicaciones de estos sistemas de posicionamiento por satélite son muy variadas.

Las mediciones obtenidas de altimetría a partir de satélites sumadas a los datos gravimétricos obtenidos en la superficie son las observaciones más innovadoras desde el punto de vista global.

Nos da la posibilidad de obtener todo tipo de anomalías gravimétricas en los océanos al igual que el estudio de las órbitas nos da información sobre la variación del campo gravitatorio terrestre durante largos periodos de tiempo. Debido a que la Tierra no es un elipsoide perfecto, el campo gravitatorio no es homogéneo.

Una de las principales aplicaciones de la gravimetría en el campo de la geodesia es la determinación de altitudes geopotenciales para la representación de la forma real de la Tierra y la definición de la forma real de las superficies de nivel, en particular el geoide y la curvatura del campo gravitatorio.

La Geodesia en el Siglo XXI

La geodesia en el siglo XXI da un paso adelante con el ambicioso proyecto Galileo.

Galileo es la iniciativa europea surgida para desarrollar un Sistema Global de Navegación por Satélite, de titularidad civil, que proporcione a Europa independencia respecto a los sistemas actuales: GPS (EEUU) y Glonass (Federación Rusa).

El funcionamiento de Galileo es similar al de sus competidores; todo se basa en una constelación de satélites que en pocas horas dan la vuelta al mundo. La componente espacial de Galileo está constituida por 30 satélites repartidos en tres planos orbitales de 23.600 Km de altura y 55° de inclinación, diseño que mejora su cobertura en latitudes extremas (cerca de los polos) con respecto a los otros sistemas.

Hay cuatro parámetros característicos que sirven para evaluar las prestaciones de todos los Sistemas Globales de

Navegación por Satélite "GNSS": la disponibilidad de la señal (que exige que siempre haya al menos cuatro satélites a la vista del receptor), la continuidad (que la emisión de la señal no sufra interrupciones), la precisión (grado de incertidumbre de la posición que proporciona el sistema) y la integridad (veracidad de la información que proporciona el sistema incluida la alarma cuando el sistema no esté funcionando correctamente).

Los niveles que ofrecen los sistemas respecto a esos cuatro parámetros no alcanzan los mínimos requeridos por algunos usuarios, especialmente la aviación civil. Tanto el GPS como el Glonass son de origen militar. Aunque las aplicaciones civiles del GPS se han generalizado, el uso y control del sistema sigue y seguirá siendo militar. Es decir, en situaciones de crisis, las autoridades que lo gestionan pueden anular o degradar la señal limitando su precisión a aquellos usuarios militares que posean la autorización adecuada. Aunque en mayo de 2000 Estados Unidos decidió dar una mayor precisión a los usuarios civiles del GPS (que ya conseguían con técnicas de aumentación), eliminando el error deliberado que hasta entonces emitían para los usuarios civiles (disponibilidad selectiva), el GPS sigue siendo insuficiente para multitud de aplicaciones, debido principalmente a las siguientes razones:

- Ausencia de garantía y de compromiso de responsabilidad en la calidad y continuidad del servicio para usuarios civiles. No se puede reclamar a nadie un error en la señal GPS.
- Precisión insuficiente en la determinación de la posición para aplicaciones que exigen un posicionamiento rápido.
- Pobre disponibilidad en regiones de elevada latitud o áreas urbanas en las que la constelación GPS no tiene cobertura.
- Carencia de integridad. Los usuarios del GPS no son informados de eventuales fallos o errores del sistema, de forma que la posición obtenida del GPS puede estar dando errores de kilómetros sin saberlo.

Debe destacarse que uno de los puntos clave de este programa se encuentra en la implicación del sector privado en la financiación del proyecto. La participación financiera de la industria privada comenzó a finales de la Fase de Desarrollo (a finales de 2003) y va aumentando hasta asumir en la Fase de Despliegue los 2/3 de los costes a través de un modelo concesional para la construcción y operación del sistema. Durante la fase de operación (a partir de 2008), la aportación pública se mantendrá en forma de pagos al concesionario, que irán disminuyendo en el tiempo a medida que el Sistema genere sus propios ingresos.

El coste de la Fase de Desarrollo (2002-2005) se cifra en torno a los 1.100 millones de euros, que se distribuirán a partes iguales entre la ESA y la CE. Para la Fase de Despliegue (2006-2007), los costes se estiman en 2.100 millones de euros.

Se estima que a partir de 2008 el sistema se encontrará completamente operativo, debiendo llevarse a cabo el mantenimiento y la renovación periódica de los satélites de la constelación.

Conclusiones

Con las nuevas tecnologías, aparecen nuevas posibilidades y gracias a las técnicas espaciales se puede determi-

nar la forma de la Tierra o determinar las coordenadas de puntos sobre la superficie terrestre.

La geodesia espacial ofrece enormes ventajas, ya que se basa en observaciones de puntos fuera de la superficie de la Tierra, que no tienen porque ser visibles. En un principio debían serlo, pero gracias a las señales de radio no es necesario.

En la discusión sobre el porvenir próximo de la Geodesia, se encuentra la determinación del geoide como superficie equipotencial arriba y abajo de la superficie física de la tierra y la Geodesia dinámica para determinar la variación de la figura terrestre con el tiempo para fines teóricos y prácticos (determinación de terremotos, etc.).

Bibliografía

RUIZ MORALES, Mario; RUIZ BUSTOS, Mónica (2000): Forma y dimensiones de la tierra. Síntesis y evolución histórica. Ediciones del Serbal. Barcelona
FRANCO REY, Jorge. Nociones sobre Geodesia. [http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/Geodesia/Seccion_Temas_de_Geodesia/nociones_de_geodesia_y_gps.pdf]
Diversos artículos sobre Geodesia. [<http://www.cartesia.org/categories.php?op=newindex&catid=3>]
CALERO, Enrique. Historia de la Geodesia. Desde los orígenes hasta el final del Imperio Romano. Publicado en [<http://ecalero.tripod.com/id10.html>]. Versión 2003
CALERO, Enrique. Historia de la Geodesia. Edad Media y Renacimiento hasta la primera mitad del siglo XVIII. Publicado en [<http://ecalero.tripod.com/id10.html>]. Versión 2005
Artículo "Medición de la latitud". [<http://centros5.pntic.mec.es/ies.arzobispo.valdes.salas/alumnos/navega2/latitud.htm>]
Artículos sobre Geodesia sacados de la enciclopedia libre de internet Wikipedia: [<http://es.wikipedia.org/wiki/>

[wikipedia/geodesia](http://es.wikipedia.org/wiki/wikipedia/geodesia)]

CAGLIANI MARTÍN, A. La forma de la tierra.

[<http://www.saber.goleen.com.ar/laforma.htm>]

CARRASCO LICEA, Esperanza; CARRAMIÑANA ALONSO, Alberto. Artículo "El problema de la longitud y las líneas de Júpiter", publicado el 10 de junio de 1997 en el diario Síntesis.

[<http://http://www.inaoep.mx/~rincon/longitud.html>]

Información sobre Galileo suministrada por el Ministerio de Fomento.

[http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/PROGRAMAS/GALILEO/ges_galileo.htm]

MARTÍNEZ ROSIQUE, J.A.; FUSTER ESCUDER, J.M. (1995): El Sistema de Posicionamiento Global GPS. Principios Básicos de Funcionamiento. Ediciones: Servicio de Publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia (SPUPV-95.827).

NÚÑEZ-GARCÍA, A; VALBUENADURÁN, J.L; VELASCO GÓMEZ, J. (1992): GPS La Nueva Era de la Topografía, Ediciones de las Ciencias Sociales. Madrid.

Documentos de Internet publicados por el Laboratorio Lincoln de Massachusetts, el Coordinational Scientific Information Center ruso y por el DLR-DFD Neustrelitz Remote Sensing Ground Station en Alemania, Noviembre 1997.

[<http://www.geo.ign.es/servidor/grav/grav.html>]

[http://www.igme.es/internet/sigeof/inicio_spa.html#gravi]

[<http://www.geognosia.com/grav.html>]

LOZANO CALVO, L. (1948): Las anomalías gravimétricas en España según la teoría Airy. Revista de Geofísica.

INGLADA, V. (1923): Las observaciones gravimétricas. Instituto Geográfico y Catastral.

LAFUENTE, A; MAZUECOS, A. (1987): Los caballeros del punto fijo. Ediciones del Serbal / CSIC

DAVA SOBEL. (1995): Longitud. Debate