

***EL SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS):  
EN TORNO A LA NAVEGACIÓN***

Discurso leído en el acto de su  
recepción como *Académico de Número* por el

**Dr. D. Abelardo Bethencourt Fernández**

el día 16 de julio de 2003

***EL SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS):  
EN TORNO A LA NAVEGACIÓN***

***EL SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS):  
EN TORNO A LA NAVEGACIÓN***

Discurso leído en el acto de su  
recepción como *Académico de Número* por el  
Prof. Dr. D. **Abelardo Bethencourt Fernández**  
el 16 de julio de 2003

Depósito Legal: M-31986-2003

Imprime:  
Ibergráficas, S.A.  
Lope de Rueda, 11-13. 28009 Madrid

**Arrecife (Lanzarote), Centro Científico-cultural Blas Cabrera**

Difícilmente podría exagerar al expresar el inmenso honor que supone para mí ser nombrado miembro de esta naciente Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote, que debo, más que a mis escasos méritos, a la magnánima generosidad de sus iniciales promotores. Este honor es mayor, si cabe, al verlo cumplido en mi ciudad natal, a dos pasos de la escuela primaria que me acogiera con sólo unos años. Mi gratitud pues, inmensa y sin paliativos, al profesor Francisco González de Posada, quien dotado de una enorme capacidad organizadora y de trabajo, una tenacidad y constancias excepcionales, una clara visión de futuro y una vasta formación científica, humanística, académica y administrativa, ha venido (¿desde el renacimiento?) a hacer brotar aquí, en Lanzarote, con la inestimable colaboración de la profesora Dominga Trujillo Jacinto del Castillo, y como brotan inesperadas las plantas en el malpaís, diferentes instituciones científico-culturales. Gracias por haber tenido la idea (y la voluntad para llevarla acabo) de dotar a Lanzarote de un instrumento como la Academia, que añade a sus bellezas naturales e indiscutibles reclamos turísticos, las gracias simétricas de la Cultura, el Conocimiento y la Ciencia. Que este resurgir (como ave fénix, sobre sus cenizas, y no es metáfora en este caso) de Lanzarote lo sea también de la Ciencia y de la Ingeniería, tan altamente representada en su tiempo por el ilustre isleño D. Blas Cabrera Felipe. Pero a esos sentimientos de honor y gratitud, y al convencimiento en las posibilidades que esta Academia aporta a la vida intelectual de Canarias, corresponde ofrecer mi entrega decidida a las causas que persigue, mi más sincero compromiso de colaboración y mi más sincera promesa de esfuerzo por ser digno merecedor de tanta distinción.

Madrid a 24 de Junio de 2003

... *Todavía no había penetrado en las aguas cristalinas el pino derribado de sus montes para visitar el extranjero, y los hombres no conocían costa alguna a excepción de la suya ...*

*Ovidio: Metamorfosis*

## I. Introducción

¿Dónde estoy? La pregunta hoy parece trivial. Basta un pequeño receptor, del tamaño de un teléfono móvil, que puede adquirirse por precios tan bajos como 100 €, para que cualquiera que sea el lugar del mundo, cualquiera que sea la hora del día, cualquiera que sea el estado atmosférico o bajo cualquier otra circunstancia, podamos saber, sin más conocimientos que aquellos del tipo de los que se necesitan para hacer una llamada telefónica, dónde estamos, con precisiones mejores que 10 m. Con equipos más sofisticados se pueden controlar las flotas de automóviles, de barcos o de aviones, controlar el movimiento remoto de maquinaria, conocer a tiempo real las milimétricas deformaciones de una presa o un puente, seguir el lento movimiento de las placas continentales o las deformaciones tectónicas asociadas con los terremotos. Conviene, sin embargo, recordar que los prodigios científicos y tecnológicos que hacen posible estos logros son el fruto de un largo y tortuoso camino. Conviene también que nos percatemos que condensando todas las facilidades de las que hoy disfrutamos están el esfuerzo y a veces el sacrificio de las mejores mentes de muchas generaciones anteriores. Esta retrospectiva nos enseña a afrontar las no pocas dificultades del presente y nos da perspectiva sobre el siempre incierto devenir. Por lo tanto antes de entrar a exhibir las proezas tecnológicas en que se basa el GPS hagamos un poco de memoria y recordemos.

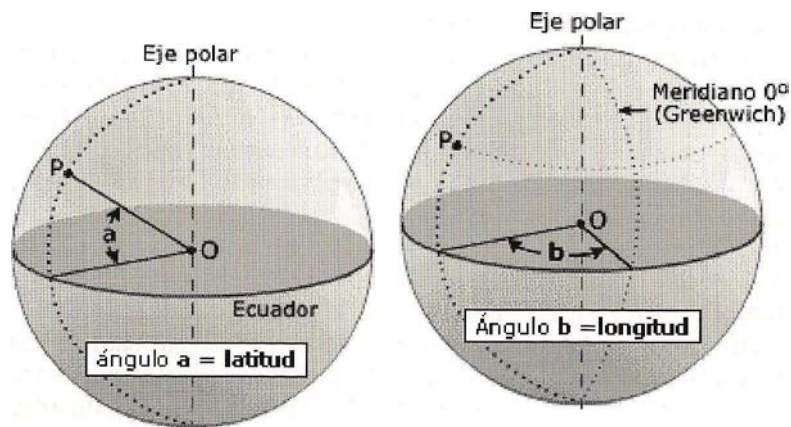
## 2. Los difíciles comienzos

Desde tiempos muy remotos el hombre necesitó encontrar una forma práctica de resolver el problema de saber dónde se encontraba (**posicionamiento**), y también algo que le ayudara a guiarse para llegar allí a donde se dirigiera y por supuesto para encontrar la forma de regresar (**navegación**). Los viajeros terrestres seguían hitos artificiales o naturales y los antiguos marinos seguían las costas para evitar perderse. He dicho los antiguos marinos, pero he de añadir que algunos modernos marinos lanzaroteños, al menos tan modernos como lo sea mi infancia y primera juventud, navegaban aún sin más recurso que las costas y sus marcaciones para guiarse en el piélago marino. Aún en mi memoria puedo ver a los marinos de la Caleta de Famara salir de madrugada, antes de que despunta-

ran los primeros resplandores de la aurora, en sus barcos de 'vela latina' con rumbo norte hacia las islas menores (hacia el *Archipiélago Chinijo*), sin más ayuda que su experiencia, su sentido común y los cielos protectores. Recuerdo la habilidad culturalmente heredada de alguno de ellos para saber la distancia a que se encontraban de la costa aplicando el elemental principio de la perspectiva según el cual cuanto más lejos nos encontremos más pequeña será la percepción de la longitud entre dos accidentes geográficos conocidos. Pero aún me produce asombro cómo algunos de ellos eran capaces de situarse en medio del mar en un lugar exacto. La necesidad de tal hazaña nacía del hecho de que unos peces denominados *meros*, de preciadas carnes y por lo tanto de alto valor económico, viven de forma permanente en cuevas que toman por residencias fijas. Si son descubiertos un día y no pudiera pescarse podrá irse a buscarlos a sus hábitáculos otro día, con posibilidad de encontrarlos. Para la realización de tal proeza hacían uso del postulado de la geometría euclidiana según el cual dos rectas coplanarias no paralelas se cortan en un punto. Puesto que dos puntos definen una recta, bastará tener dos accidentes geográficos alineados con la posición marina a determinar para definir una de las rectas, y otros dos accidentes distintos, también alineados con la posición a determinar para definir la segunda recta, que junto a la primera, definirá indubitablemente el punto que se quiere encontrar en el futuro. Más de un mero fue así capturado. No creo que los marinos de aquellas épocas conocieran a Euclides, ni seguramente a casi nadie que viviera más allá de la Villa de Tegui. Desgraciadamente el analfabetismo fue un mal bastante generalizado. Pero el gran mérito de Euclides fue el dar formalismo y rigor matemático a ciertas reglas geométricas intuitivas que se usaban desde antiguo de forma natural.

Cuando los antiguos marinos comenzaron a navegar en mar abierto se dieron cuenta de que la forma de guiarse era cartografiar su curso siguiendo las estrellas. Así la navegación quedó vinculada con la astronomía tal como había ocurrido ya con la agricultura pues también el sedentario agricultor buscaba respuestas a sus incertidumbres en los fenómenos celestes. Éstos, los agricultores, habían aprendido que cuando ciertos astros entraban en determinadas posiciones del cielo las plantas crecían y los árboles florecían, o que estando en otras, las lluvias arreciaban, soplaban los vientos o la luz del día se acertaba. Los sacerdotes pudieron pronosticar así el tiempo de cultivo y el de la recolección. Extrapolando estas experiencias el hombre en la antigüedad creyó que los astros gobernaban las cuestiones terrestres, y que todas sin excepción podrían ser pronosticadas si se aprendía a leer en los signos celestes. Esta idea arraigó de tal manera que aún hoy son legiones quienes creen que su destino está inscrito en los astros y aceptan las esotéricas deducciones astrológicas. Podemos ver en esto ciertas constantes del conocimiento humano. Los hombres tuvieron deseos de saber y aprendieron a usar los conocimientos para fines prácticos, necesitaron

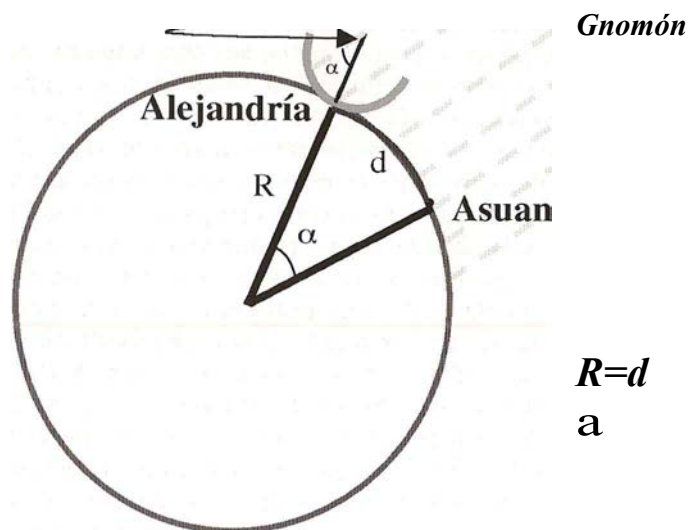
resolver problemas prácticos y por eso llegaron a saber: ciencia y técnica, ciencia básica y aplicada, amor desinteresado al saber e interés práctico, cuestiones siempre dialécticamente implicadas. Además se pueden vislumbrar también las relaciones entre ciencia y mito (esa fe reverencial en la astronomía atribuyéndole atributos adivinatorios o poderes sobre el destino de las personas) y las de ciencia y poder (por cómo los sacerdotes obtenían su estatus de los conocimientos astronómicos, que en muchas culturas se reservaron con celo). A los efectos de la navegación y el posicionamiento, hilo conductor de este discurso, interesa saber cómo y cuándo empezó el hombre a orientarse ayudado por los cielos. Hoy se sabe que ciertas estructuras antiguas tales como las de Stonehenge fueron acompañadas por observaciones astronómicas y que las estructuras mismas se usaron para determinar las efemérides de los eventos celestes, tales como el equinoccio vernal. La exactitud en la orientación de las grandes construcciones egipcias, en particular las de sus pirámides, orientadas hacia el norte verdadero con una desviación menor de un grado (la de Kefrén, por ejemplo, con un error de 2' 28" Y de 9' 12" la de Micerino) permite pensar que disponían de procedimientos fiables de orientación, que debieron ser astronómicos, pues no conocían la brújula. Puesto que el método astronómico de la longitud de las sombras arrojadas por el Sol en posiciones correspondientes, tan usado en la antigüedad, no proporciona resultados tan precisos, es necesario admitir que conocían algún otro método más exacto. Todo hace pensar que se orientaban mediante la observación de la 'estrella polar' de la época, que hace 4000 años correspondía a  $\alpha$  Draconis. No debe deducirse de lo anterior que los egipcios tuvieran conocimientos astronómicos muy desarrollados y desde luego no debe llevar a sustentar que conocieran la precesión de los equinoccios antes de que lo hiciera Hiparco.



Volviendo a nuestros navegantes, es fácil suponer que aprendieron desde muy antiguo a usar las estrellas (y el Sol) para determinar la *latitud*, es decir, la distancia angular del radio geocéntrico del punto de observación al ecuador. En noches despejadas las constelaciones les mostraban hacia donde habían de dirigirse. De día el Sol les indicaba su dirección y además les indicaba la hora, pues al llegar al punto de su máxima altura sobre el horizonte, el Sol parece detener su recorrido, de forma semejante a una pelota que, lanzada al aire, se inmoviliza un momento en equilibrio entre el ascenso y el descenso, marcando de este modo el mediodía. Así ajustaban sus relojes de arena en los días despejados. Si embargo la *longitud* o ángulo que forma el meridiano del lugar con el meridiano que se tome como origen, fue un problema sin solución hasta bien avanzado el siglo XVIII. Hubo pues de esperar miles de años para que fuera resuelto.

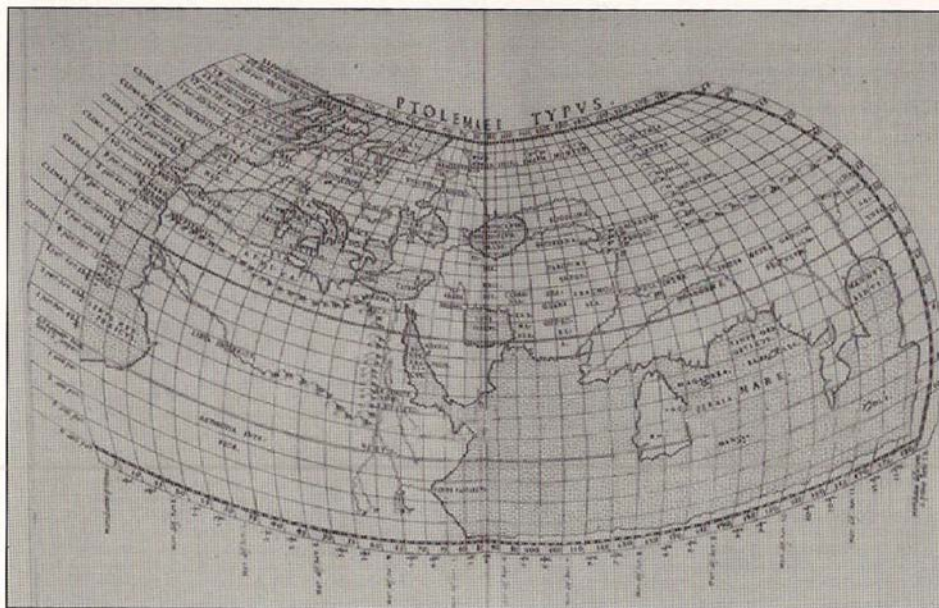
De la inmensa aportación de la civilización griega al tema que nos ocupa, como a tantas otras materias, destacaré sólo algunas de mayor relieve. Pitágoras (~600 a.C) y sus seguidores sostuvieron la afirmación trascendente de que la Tierra era redonda. Así lo defendió el propio Pitágoras, que la consideraba también aislada en el espacio. Dando un inmenso salto que pasa a través del grueso de la cultura griega hemos de destacar la medida rigurosa del radio de ese *modelo esférico* de Tierra realizada por Eratóstenes de Cirene (275-195 a.C). Fue discípulo de Arquímedes y director de la biblioteca de Alejandría y fue un hombre polifacético que destacó en historia, poesía, gramática, matemática, astronomía, cartografías, etc. En la teoría de números aún se cita su método de determinación de números primos denominado 'la criba de Eratóstenes'. Calculó la oblicuidad de la eclíptica con enorme precisión y se le atribuye ser el primero en confeccionar un mapamundi basándose en el dibujo de meridianos y paralelos. Sin embargo se le recuerda actualmente por haber sido el primero en medir de forma precisa el radio de la Tierra. Eratóstenes sabía que por encontrarse Siena (actualmente la ciudad de Asuan) en el trópico de Cáncer, el Sol culminaba en su cenit a mediodía del solsticio de verano. Admitiendo que Alejandría se encontraba en el mismo meridiano (cosa que sólo es aproximadamente cierta) y midiendo allí en ese instante (es decir, a mediodía del solsticio de verano) el tamaño de la sombra arrojada por un gnomón sobre un cuenco semiesférico (el primer medidor de ángulos), pudo determinar que la diferencia de latitudes entre ambas ciudades era 1/50 de la circunferencia, es decir 7° 12'. Conocida la distancia entre las dos ciudades resulta elemental el cálculo del radio de la Tierra mediante la consabida fórmula que da el radio de una circunferencia como el cociente del arco y el ángulo subtendido. Eratóstenes tomó de los agrimensores la longitud de 5000 estadios como distancia entre las dos ciudades por lo que dedujo para la Tierra un radio de 39789 estadios. Admitiendo para el estadio utilizado por Eratóstenes la equivalencia del estadio egipcio de 157.5 kilómetros, resulta que obtuvo para la Tierra un radio de 6267 km. Este valor se separa del radio medio terrestre

Rayos de sol



(6371 km) en aproximadamente -2%. Independientemente de la asombrosa precisión del resultado, lo más sobresaliente de la medida fue el método utilizado (explicado en su obra *Medida de la Tierra*), que ha venido siendo aplicado de modo prácticamente interrumpido hasta nuestros días. Se dice que una de las formas en que pudo haberse medido la distancia entre Alejandría y Siena fue contando el número de pasos de camellos dado por las caravanas de comerciantes que transitaban entre las dos ciudades. Se asegura que el paso de los camellos es muy estable. Quizás esto sea fácil de comprobar aquí, en Lanzarote, donde una multitud de camellos realizan de forma sistemática la misma ruta. Hemos visto pues que en esos casi 400 años que van desde Pitágoras a Eratóstenes se ha asentado la idea de que la Tierra es redonda, y admitido ese modelo se han podido determinar sus parámetros, en este caso su único parámetro: el radio. Conviene recordar que aunque aparentemente la ciencia moderna hace cosas más complicadas (y ciertamente con algo más de celeridad) éstas pueden resumirse en este ejemplo. Se construyen modelos cuyos parámetros se adecuen a los datos empíricos. Cuando los datos disponibles encajan, ese modelo se convierte en nuestra visión científica de la realidad, si no encajan, éste ha de ser sustituido por otro y así 'ad infinitum' ¿Y el mundo real, no trata la ciencia con la realidad?

Uno de los sabios antiguos más representativos de la época alejandrina fue Hiparco de Nicea (161-127 a.C.) A él se debe la primera teoría numérica del movimiento del Sol y de la Luna, la reducción paraláctica al centro de la Tierra de las observaciones astronómicas, la confección del primer catálogo estelar (con más de mil estrellas) con coordenadas ecuatoriales y eclípticas o el descubrimiento de la precesión de los equinoccios (al comparar sus observaciones con las efectuadas anteriormente). En el aspecto cartográfico utilizó la proyección este-reográfica y parece ser que se adelantó a Tolomeo en la idea de representar a los meridianos por rectas convergentes y a los paralelos por arcos circulares, el antecedente directo de los desarrollos cartográficos cónicos. De todas sus aportaciones quiero destacar, por su relación con el tema de la navegación y el posicionamiento que nos ocupa, el hecho de que fuera él quien por primera vez determinó las longitudes geográficas por medio de los eclipses lunares. Detengámonos un momento en esta cuestión: el problema de la determinación de la longitud está íntimamente ligado al problema de la medida del tiempo. Efectivamente, como consecuencia de la rotación de la Tierra el Sol o cualquier otro astro o fenómeno celeste irán pasando por los meridianos terrestres, de este a oeste, de forma sucesiva. La diferencia del tiempo de paso entre un meridiano y otro es proporcional a la diferencia de longitud. Puesto que a  $360^\circ$ , es decir a una vuelta completa, le corresponde una diferencia de 24 horas, cada hora de diferencia equivale a  $15^\circ$ , lo que se denomina huso horario. Así pues, si se observa un mismo fenómeno celeste (en este caso un eclipse) desde dos lugares geográficamente diferentes y en ambos se anota la hora local en que ese fenómeno ocurrió (por la altura del Sol por ejemplo), la diferencia de tiempo, convertida en ángulo según la regla anteriormente dada, proporcionará la diferencia de longitudes entre ellos. Por ejemplo, si está previsto un eclipse en Madrid a las doce de la noche y unos marineros que se dirigen a las Indias Occidentales lo observan a las once de la noche según el reloj del buque, pueden deducir que llevan una hora de atraso con respecto a Madrid y por consiguiente que se encuentran a  $15^\circ$  de longitud al oeste. Esta fue la idea de Hiparco y la única forma de determinar la diferencia de longitud durante muchísimo tiempo. Lo malo de este método es que los eclipses no son fenómenos suficientemente frecuentes ni se observan a la vez desde lugares muy distantes, por lo que, aunque relativamente válido para sus aplicaciones terrestres, este método tiene escaso valor en navegación. La obtención de un método para la determinación de la longitud, como todos los adelantos científicos o técnicos que dependen del tiempo, hubo de esperar debido a la escasa capacidad técnica para medirlo. Así, por ejemplo, el conocimiento de sus herramientas básicas, la regla y el compás, permitió a los griegos avanzar enormemente en geometría, de tal forma que hay que llegar al siglo XIX para superar lo que ellos hicieron en ese campo. Sin embargo, el concepto de aceleración (variación de la variación de la posición espacial con el tiempo) y todos los que con él se rela-



Mapamundi de Tolomeo

cionan (en general toda la cinemática y toda la dinámica), por depender del tiempo, del que no se tenía instrumentos suficientemente buenos para su determinación, fueron absolutamente desconocidos y como consecuencia muchos fenómenos malinterpretados.

El último gran astrónomo griego y sin duda el más influyente a lo largo de toda la Edad Media fue Tolomeo (90-168 d.C.). Su obra astronómica es portentosa. En los trece tomos del *Almagesto* el autor describe la estructura geocéntrica del Universo, con los diferentes movimientos celestes (libros I y II), la teoría del Sol y de la Luna, especificando sus dimensiones y las de la Tierra (libros III y IV), la descripción de la esfera celeste y el catálogo estelar, ampliando el de Hiparco y corrigiéndolo por efectos de precesión (libros VII y VIII), para terminar con las teorías de los pequeños planetas (libros XI-XIII). Tolomeo no sólo recopiló el saber astronómico hasta esa fecha sino que hizo grandes aportaciones, como por ejemplo la de los ciclos y epiciclos para el análisis de las órbitas planetarias o el empleo de la trigonometría esférica por resultarle inadecuados los métodos gráficos. Además puede considerársele como el padre de la geografía, perdurando ciertas afirmaciones suyas, entre ellas algunas desafortunadamente erróneas, hasta el siglo XIX. Su aportación más importante a la cartografía matemática fue su estudio de las proyecciones, contribuyendo con nuevos métodos para la representación plana de la Tierra. Fue el primero en hablar de longitudes

en términos semejantes a los actuales, situando el meridiano origen aquí, en las Islas Canarias, exactamente en el punto más occidental de la isla del Hierro, que por ser el extremo más occidental conocido, tomado como origen hacía a las longitudes de todo lugar conocido hasta entonces positivas. Esta costumbre de tomar el Hierro como el origen de meridianos en los mapamundis perduró hasta el siglo XIX en que fue reemplazado por el de Greenwich. Tolomeo, debiéndole parecer muy grande el radio de la Tierra medido por Eratóstenes, tomó el determinado por Posidonio (150-50 a.C) que de 5000 estadios lo redujera a 3750, permaneciendo este valor erróneo hasta el Renacimiento. Esta desafortunada reducción alteró de manera sustancial las dimensiones relativas del mundo conocido e incluso la propia historia de la geografía pues ese error de subestimar el tamaño del planeta se transmitió durante muchos siglos. Para Tolomeo el mundo que debía representar estaba comprendido entre los paralelos 25° S y 65° N, y entre los meridianos del Hierro (tomado como origen) y el situado a 180° del mismo, en el extremo más oriental (la mítica ciudad de Catinga), legando así a la posteridad una falsa imagen del ecumene con un ensanchamiento longitudinal de Asia de consecuencias conocidas en la época del descubrimiento.

El siguiente paso importante en el largo camino científico-técnico que conduce a la determinación eficiente de la localización y la navegación, fue el descubrimiento de la brújula. Las piedras magnetizadas fueron conocidas desde muy antiguo, tanto en Occidente, donde Tales de Mileto las cita en el siglo VI a.C, como en la China, en que se les llamaban *Tzhu shih*, o piedras del amor porque se atraían mutuamente (¿tiene imán el mismo origen etimológico que amar?). Sin embargo la primera referencia segura en Occidente al aprovechamiento de sus propiedades directivas para su uso como brújula se debe a A. Neckam que la cita en su tratado *De naturae rerum* en 1187, aunque de la descripción que él realiza se deduce que ya era empleada anteriormente como ayuda a la navegación. La fecha más lejana en que se puede asegurar de forma rigurosa que los chinos conocían la brújula es la de 1093 y se cree como más probable que fueran los comerciantes árabes quienes la introdujeran en Europa, aunque el hecho de que en la literatura china se refieran siempre a ella como indicadora del Sur, mientras que en Occidente se la describa señalando el Norte, ha servido de argumento de peso para sostener que fue un descubrimiento independiente. La idea más generalizada en la edad Media era que la brújula obtenía *su virtud* de la estrella polar a la que se veía impelida a apuntar. Sabemos que en 1451 los constructores de relojes de sol transportables (de bolsillo diríamos hoy) conocían la **declinación**, ángulo que forma el norte magnético y el norte geográfico, pues en ellos aparecen dos marcas, una señalando al norte verdadero y otra desplazada varios grados. Existen evidencias de que esta diferencia la consideraban como errores constructivos, debidos a las agujas magnéticas o a la magnetita utilizada en su imantación, y se empeñaban vanamente en corregirlas mediante diferentes taras colocadas en las agujas.



Algunos atribuyen erróneamente a Colón el descubrimiento de la declinación, pero lo que sí parece cierto es que fue el primero en registrar que la declinación variaba con la longitud, fenómeno que observó en su primer viaje en el que al cruzar por primera vez en la historia la línea ágena (línea de declinación cero), en aquel entonces en medio del Atlántico, pudo comprobar que la declinación cambiaba de sentido, lo que causó gran consternación entre la tripulación. De acuerdo con la versión de sus diarios, Colón creyó, sin embargo, que lo que cambiaba era la posición de la estrella polar. Veamos lo que indica Las Casas de este suceso ocurrido a finales de Octubre de 1492:

*"... notó Cristóbal Colón una cosa, de que se admiró: que las Guardas, en anocheciendo, estaban junto el brazo izquierdo, que es la parte de Occidente, y cuando amanecía estaba en la línea debajo del brazo derecho, por manera que toda la noche no anda sino tres líneas, que son nueve horas, y esto cada noche. También de otra cosa los pilotos de los tres navíos recibieron mucho temor, sospechando algún peligro, hasta que él les dio la razón y es que las agujas noruestaban una cuarta entera en anocheciendo y en amaneciendo estaban fil con fil de la estrella. Dióles la causa de esta diferencia Cristóbal Colón diciendo que aquello causaba el movimiento de aquella estrella que llamamos Norte hace con su círculo alrededor del verdadero Norte o Polo, por manera que aquella estrella se muda o tiene un movimiento violento de Oriente a Occidente como las otras, y las agujas siempre señalan el verdadero Norte o Polo, mostrando la verdad ..."*

Las primeras declaraciones seguras sobre las variaciones espaciales de la declinación se deben a G. Hartman en 1510, quien también descubrió en 1544 la **inclinación** magnética (ángulo que forma con la vertical una aguja magnetizada libre de girar en un plano meridiano). Aquí nace un nuevo intento de resolver el persistente problema de la longitud. Si la declinación magnética depende de ésta, una carta de declinación permitirá determinarla. Durante el siglo XVI los marinos españoles y portugueses hicieron numerosas medidas de la declinación en sus viajes alrededor del mundo. El boticario sevillano Felipe Guillén desarrolló en 1520 un nuevo y mejor método para la determinación de la declinación, consistente en hallar el acimut magnético del Sol a iguales altitudes antes y después del mediodía mediante un estilete colocado en la parte central de los relojes de sol con brújula magnética (compás magnético) en uso habitual por aquellos tiempos. Con él realizó, entre 1538 y 1541, 43 determinaciones de la declinación en el oeste de la India y el mar Rojo. Los mapas de declinación de aquellas épocas, de los que hay constancia, no han llegado apenas hasta nuestros días pues debido a su evidente valor estratégico se guardaban con gran secreto.

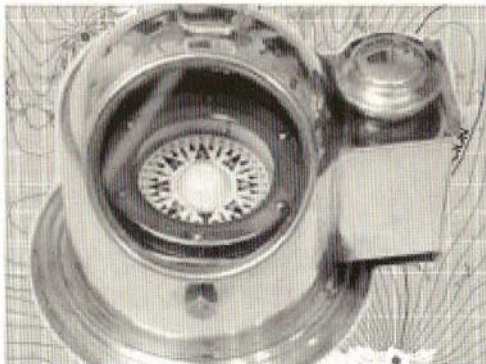
Antes de pasar de período quiero rescatar de entre los muchos relegados al olvido al que la brevedad obliga al gran geógrafo Gerard Krämer (1512-1594), mundialmente conocido como Mercator, una latinización de su apellido. Realizó una vasta producción cartográfica, aunque su mapa más conocido y por el que pasó a la posteridad es el mapamundi de 1569, editado en Duisberg con el título: *Nava et aucta orbis Terrae descriptio as usam navigation emendate accomodata*, un desarrollo *cilíndrico directo y conforme* que resolvió un problema secular de la navegación ya que en esta proyección las imágenes de las loxodrómicas (curvas que sobre la superficie de la Tierra cortan bajo el mismo ángulo a todos los meridianos y sirven para navegar con rumbo constante) son líneas rectas que cortan bajo el mismo ángulo a las imágenes rectilíneas y paralelas de los meridianos terrestres. Además de su interés constante por la construcción de mapas y globos estuvo durante toda su vida interesado por el magnetismo por su especial incidencia en la navegación.

### 3. La revolución científica

La culminación de los estudios sobre geomagnetismo se producen con la publicación en 1600, hace pues cuatrocientos tres años, del libro *De Magnete* escrito por William Gilbert (1544-1603), considerado por algunos como el primer libro científico de la historia. En él no sólo recopila toda la información existente hasta entonces acerca del geomagnetismo, sino que describe sus exhaustivos y rigurosos experimentos en la materia. Así comparando la similitud del comportamiento de una pequeña aguja imantada frente al campo creado por una esfera uniformemente magnetizada (*terrella*, pequeña tierra, le llamaba) con el correspondiente al de las brújulas respecto a la Tierra, le permitió llegar a la conclusión de que *magnus magne ipse est globos terrestris* (el globo terrestre mismo es un imán), bajando desde los cielos *la virtud* de la que los imanes obtenían su poder. Con esta afirmación se establece la segunda propiedad atribuida a la Tierra en su conjunto (la primera fue la redondez y la siguiente será la gravitación universal, que tardará en aparecer aún 87 años). La historia del geomagnetismo seguirá unos derroteros por los que yo no entraré en lo que sigue, así que añadiré aquí que aún hoy no se conoce con todo detalle el campo magnético de origen interno (el que tiene su origen en las regiones del núcleo terrestre), ni otros fenómenos relacionados con él, tales como la capacidad de orientación de ciertos animales (palomas, ballenas etc.).

Edmond Halley (1656-1742), célebre por la predicción de la fecha de retorno del cometa que lleva su nombre (también por ser quien animó a Newton a la publicación de su celebre *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* y le sufragó los gastos de la primera edición, o por ser el segundo astrónomo del

famoso Observatorio Real de Greenwich) se cruza en nuestra historia del posicionamiento emergiendo desde muy diferentes ángulos, lo que es congruente con su carácter de hombre renacentista interesado por todo lo humano y abarcando todo el saber. En lo que atañe al geomagnetismo hay que decir que construyó un observatorio de declinaciones magnéticas, en su casa, cuando sólo contaba con 16 años, por lo que desde muy joven fue conocido por sus estudios del campo geomagnético. En 1683 demostró que el modelo de dipolo inclinado no podía dar cuenta de sus medidas. También, observando la deriva secular hacia el este del campo geomagnético, planteó la hipótesis de que la Tierra podría no ser rígida, sino que una esfera interior, concéntrica, giraba hacia el oeste con respecto a la capa superior, anticipando con esto la rotación diferencial del núcleo, que es la base de la teoría actual del origen del campo de origen interno o *campo principal*. A fin de refinar su modelo Halley llegó a la conclusión de que necesitaba más datos y con la energía y titánica perseverancia que le caracterizaba persuadió al gobierno británico para que le proporcionara uno especialmente construido para tal propósito (piénsese que tal barco no debía tener elementos metálicos magnetizados). El argumento de persuasión de Halley fue que una carta de declinación del atlántico resolvería el gravísimo problema del emergente imperio naval en que Inglaterra se estaba convirtiendo: la determinación de la longitud. Halley hizo dos viajes, en 1688 y en 1689, a lo largo y ancho del Atlántico en el *Paramore Pink* y publicó la carta de isógonas (líneas de igual declinación) en 1700. Desgraciadamente la líneas isógonas discurrían en aquel entonces a lo largo de paralelos, haciéndolas inútiles para la determinación de la longitud. En éste, como en otros episodios de la vida de Halley, se da un bello ejemplo de las relaciones entre ciencia y técnica, entre las necesidades sociales, en este caso la de los comerciantes interesados en que sus mercancías llegaran desde América sin dilaciones ni contratiempos, y las científicas, manifestadas por el afán de conocimiento de Halley, por su necesidad de entender el funcionamiento del campo geomagnético.



Aunque la brújula no pudo resolver el problema de la navegación, produjo una gran mejora, ya que además de su capacidad para definir el rumbo o acimut magnético permitió introducir una técnica de navegación, mantenida por los marinos hasta hace bien poco, denominada navegación 'a estima'. Consiste esta técnica en navegar anotando en el cuaderno de bitácora las distancias recorridas a partir de un tosco velocímetro o cuentarrevoluciones denominado *corredera* y los rumbos obtenidos de la brújula. A partir de estos datos y de las correcciones debidas a las corrientes, los vientos y otros factores, el simple ejercicio de adición vectorial permite determinar la variación en longitud de un recorrido, aunque extremadamente impreciso.

Agotado el camino de la declinación como vía de solución eficiente para el gran problema que suponía la determinación de la longitud, retornemos al camino basado en los eclipses lunares, propuesto por Hiparco. Aunque este método se aplicaba en tierra, en el mar no daba buenos resultados. En el libro de la *Efemérides* de Regiomontano o en el *Almanaque Perpetuo* de Zacuto figuraban los tiempos en que se producían los eclipses totales, referidos a Nuremberg o Salamanca. Al restarlos luego de aquel en que fueron observados (según el tiempo de sol local), en otros lugares, y multiplicando por quince, para convertir el tiempo en grados, se podía calcular la longitud referida al meridiano de referencia del almanaque. Pero aunque parezca un procedimiento sencillo, Colón se equivocó en dos ocasiones, como casi todos los que lo intentaron en ese siglo. Tanto se equivocó Colón al tratar de hallar la longitud de la Tierra firme americana, que alguien creyó que falsificaba los datos a fin de que nadie la encontrara. Pero, además, como ya señalamos, los eclipses no se producen con suficiente frecuencia como para ser de utilidad en la navegación. Ésta requiere un acontecimiento celeste que se reproduzca más frecuentemente. En 1514, el astrónomo alemán Johannes Werner señaló un método consistente en aplicar los movimientos de la Luna a este problema. Efectivamente, la Luna se desplaza por el cielo una distancia aproximadamente igual a su diámetro cada hora. Supongamos que se construyen unas tablas con las que predecir, para cada instante de tiempo, las distancias de la Luna a ciertas estrellas y al Sol tal y como se observan en un determinado lugar (cuya longitud serviría de origen). Entonces cotejadas estas tablas con la hora local a la que se observa el mismo fenómeno en otro lugar, podrá averiguarse la diferencia de tiempos locales en que desde ambos lugares se observa el mismo fenómeno y hallarse la longitud multiplicando dicha diferencia en horas por 15°. El problema fundamental de este método era que entonces ni las posiciones de las estrellas podían determinarse, ni los movimientos de la Luna podían predecirse con la precisión necesaria, pues sin la poderosa capacidad explicatoria y predicativa de la ley de la Gravitación Universal, que aún había de tardar doscientos años, la mecánica del sistema Tierra-Luna (fundamentalmente el fenómeno de nutación), no era entendible. Por añadidura los marinos

carecían de los instrumentos capaces de medir la distancia de las estrellas a la barco bamboleante. Hasta aproximadamente doscientos cincuenta años después no pudo aplicarse este método de manera rutinaria.

La alternativa al *método de las distancias lunares*, como dio en llamar-se, era la de los relojes: comparar la hora local en el barco, determinada por la altura del Sol o similar, con la hora del puerto de partida, mantenida con un reloj. Esta idea fue expresada por primera vez por Gemma Frisius (1508-1555) en 1553. Pero en el siglo XVI un buen reloj de cuerda cometía un error de aproximadamente diez minutos diarios. Teniendo en cuenta que una diferencia de cuatro minutos de tiempo local es equivalente a un grado de diferencia de longitud, bastaría unas cuantas semanas de navegación para que la desorientación fuese total. También este método hubo de esperar, como el de las efemérides de la Luna, muchos años antes de ser resuelto. Ambas soluciones coincidieron en la misma fecha, hacia finales del siglo dieciocho.

Galileo (1564-1642) descubrió que el periodo de oscilación de un péndulo de longitud constante no depende de la amplitud de su movimiento ni del peso o naturaleza del cuerpo suspendido, (lo que hoy llamamos isocronías del péndulo) y sugirió que podría ser aplicado para regular el ritmo de los relojes mecánicos. Más tarde el gran científico alemán Christian Huygens (1629-1696), introdujo en 1656 el péndulo como elemento básico de los relojes precisos. Con estos adelantos los buenos relojes llegaron a alcanzar un error tan sólo de diez segundos al día. Si embargo resulta claro que estos relojes de péndulo no funcionaban en un barco.

Pero Galileo creyó poder resolver el problema de la navegación aún de otra forma. Cuando apuntando su telescopio hacia el cielo, descubrió los satélites de Júpiter, que él bautizara con el nombre de estrellas mediceas, comprobó que las ocultaciones y salidas se producían miles de veces al año de forma predecible, por lo que podrían usarse como 'reloj cósmico'. Con algunos meses de observación realizó unas tablas con las desapariciones y reapariciones de los satélites y le comunicó su proyecto a Felipe III (1578-1621) rey de España, Portugal y las dos Sicilias, pues éste había establecido en 1598 un premio de 6000 ducados, más 2000 de pensión vitalicia y 1000 para las costas al *descubridor de la longitud*. Desgraciadamente para Galileo, quien siempre estuvo necesitado de dinero (incluso hubo de meter sus dos hijas a monjas por su imposibilidad de darles dote para la boda), el rey estaba ya harto de propuestas disparatadas y rechazó su descubrimiento alegando, razonablemente en este caso, que su proyecto era poco realista, pues no resultaba fácil que los marinos pudieran reconocer los satélites de Júpiter desde sus navíos, y aún si esto fuera posible, tal reconocimiento no se produciría con la frecuencia ni facilidad necesaria como para que les sirviera de guía. Galileo no se arredró y mantuvo toda su vida el interés por estos satélites, hoy denominados galileanos, sin conseguir llegar a ganar

adeptos. Sin embargo la rápida mejora en la calidad óptica y mecánica de los telescopios hizo que su método para determinar la longitud fuera aceptado de forma generalizada entre los cartógrafos a partir de 1650. Después, por lo tanto, de su muerte. Con él se pudo determinar por primera vez, en tierra (realmente en los observatorios astronómicos), la longitud con precisión, y por lo tanto la forma real de la Tierra.

Puesto que la medida del tiempo fue y es la clave de la solución del problema del posicionamiento y la navegación, es justo decir antes de dejar a tan gran personaje como fuera Galileo, que fue él quien mejor lo midiera en aquel entonces y por mucho tiempo. Galileo en sus experimentos sobre los desplazamientos de bolas por planos inclinados midió el tiempo mediante un cronómetro de agua. Tapaba y habría con el dedo un tubo por el que circulaba agua, recogéndola en un recipiente mientras la bola caía. Luego pesaba el agua vertida. El peso del agua equivalía al tiempo transcurrido. Las reproducciones actuales de estos experimentos demuestran que Galileo, con un poco de práctica, pudo llegar a obtener precisiones de dos décimas de segundo. Salvo en contadísimas ocasiones, estas medidas no fueron mejoradas hasta el siglo XX.

Es tal el cúmulo de descubrimientos y acontecimientos trascendentes respecto al tema que nos ocupa en las fechas a las que hemos llegado en este relato, que sería necesario mucho más que una breve conferencia para poder simplemente citarlos, y no digo lo que fuera necesario si además quisiéramos analizarlos, criticados, extraer enseñanzas o conclusiones. Así pues, a sabiendas de las tremendas injusticias que por omisión o falta de detenimiento en determinadas cuestiones he de cometer, resumiré, telegráficamente casi, los acontecimientos de esta época gloriosa, llena de personajes admirables, gestas individuales y colectivas asombrosas y enseñanzas inagotables y por tanto una época digna de un estudio pormenorizado y detenido.

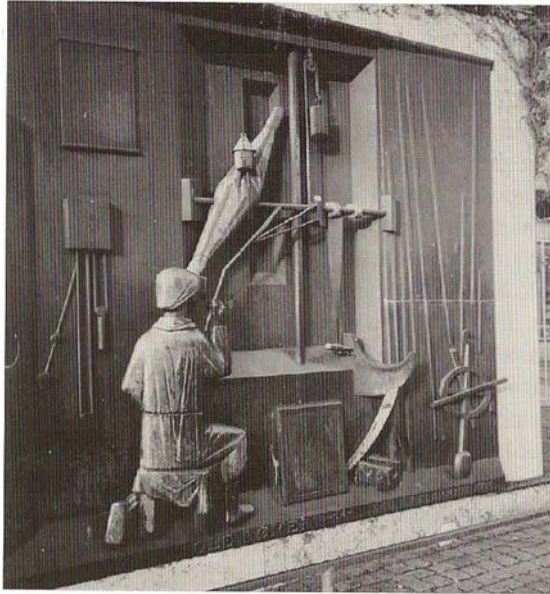
En 1662, en Inglaterra, se crea la primera academia de ciencias, la Royal Society. Desde sus inicios esta academia fue fuertemente presionada por los comerciantes para que resolviera el 'problema de la longitud', pues éstos veían cómo sus barcos, con las preciadas mercancías que transportaban, se perdían, con las graves consecuencias que el escorbuto producía cuando por tal pérdida tardaban en llegar a puerto. O cómo en otras ocasiones se hundían por arribar a zonas de escollos o arrecifes desconocidos. O cómo por navegar, a fin de no perderse ni naufragar, por rutas conocidas, y por tanto muy transitadas, chocaban unos con otros o eran presa fácil de los piratas. Por todo ello se construyó en 1675, bajo los auspicios de la Academia, el Observatorio Real de Greenwich, nombrando de director-observador a John Flamsteed (1646-1719), a quien el rey encargó se dedicara "con cuidado y diligencia a rectificar las tablas de los movimientos de los cielos, y los lugares que ocupan las estrellas fijas, con el fin de hallar la tan deseada longitud en el mar, para perfeccionamiento del arte de la navegación".

Algunos años después, en 1666, Luis XIV siguiendo los consejos de su ministro de hacienda Jean Baptiste Colbert (1619-1683) y del cardenal Richelieu (1585-1682) impulsó la creación de la Real Academia Francesa de las Ciencias. Colbert creía firmemente que una institución de este tipo sería un órgano consultivo de interés para el gobierno pues ayudaría a incrementar la productividad del país juzgando la utilidad de ciertas invenciones y sugiriendo las formas en las que la ciencia podría servir a la nación. Estaba convencido de que el cultivo de la ciencia y el predominio en el mar eran las formas de conseguir grandes cosas para Francia. Bajo sus auspicios se creó el Observatorio de París con la finalidad de cartografiar de forma precisa los dominios del monarca, mejorar las cartas náuticas y avanzar en la ciencia de la navegación. Fue inaugurado el 21 de Junio de 1667, el día del solsticio de verano. Colbert estaba determinado a contar en estas instituciones con los mejores científicos del momento, así que envió cartas de invitación, ofreciendo grandes cantidades de dinero, tanto en salario personal como para investigación, a los más grandes científicos y matemáticos de entonces. A su llamada respondió, entre otros, el ya citado Christian Huygens, que fue nombrado miembro fundador de la Academia. Permaneció en París desde 1666 hasta 1681 en que se volvió a Holanda. Durante su estancia en París publicó su célebre *Horologium Oscilatorium* (1673), un brillante trabajo, dedicado al rey Luis XIV, en el que desarrolla la teoría matemática del péndulo. Huygens encontró que el período de un péndulo oscilando bajo pequeños ángulos es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud. Además estableció una relación entre el período y el movimiento de caída libre. De sus proposiciones podemos derivar la fórmula actual  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ , salvo que en su trabajo la gravedad  $g$  no aparece de forma explícita ya que no imaginó que fuera variable. (Tanto es así que propuso la medida del período del péndulo como patrón de longitudes). Huygens afirmaba en su libro que su reloj era el instrumento adecuado para la determinación de la longitud y dedicó durante años muchos esfuerzos a fin de adaptarlo a las condiciones de la navegación marina sin éxito. También deben destacarse sus estudios de óptica, sobre las fuerzas centrífugas debidas a la rotación de la Tierra o sus teorías sobre la atracción de los cuerpos.

De Bolonia, en cuya universidad era profesor de astronomía, vino a París en 1669 Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), que fue el primer director del observatorio astronómico de París. Aunque el senado de Bolonia, el Papa y el propio Cassini creyeron que su estancia sería de corta duración, permaneció en Francia el resto de sus días. Cassini había publicado en 1668 unas tablas con las efemérides de los satélites de Júpiter, que había compilado durante 16 años de trabajo en Italia. Animó a todos los astrónomos a que usando sus tablas calcularan y les enviaran las posiciones de sus observatorios con las longitudes deter-

minadas por el método de los eclipses de los satélites galileanos. En la cúpula del observatorio de París Cassini mandó dibujar un gran mapa circular de aproximadamente 7 m de diámetro. Tenía proyección acimutal, centrada en el polo Norte; con meridianos y paralelos cada diez grados y origen en la isla del Hierro. Para una rápida colocación de los datos recibidos, una cuerda atada al centro del mapa (al Polo Norte) colgaba siguiendo cualquier meridiano y un aditamento podía desplazarse sobre ella a la adecuada latitud. Para determinar la escala del mapa, era necesario tener un valor preciso de las dimensiones de la Tierra que permitiera pasar de unidades angulares a lineales. Ya que la Tierra, nadie lo dudaba entonces, era esférica, la determinación de la medida de un arco de meridiano debería de ser tan útil como la medida de un arco en el aquel entonces inaccesible ecuador. En 1668 se le encargó a Abad J. Picard (1620-1682), miembro destacado de la Academia y gestor de la construcción del observatorio, el trabajo de realizar esta medida. Picard utilizó el método de Eratóstenes, pero con adelantos científicos e instrumentales considerables. Adrien Auzout (1622-1691) que estuvo en el observatorio de 1666 a 1668 y Huygens habían trabajado en la mejora de las lentes y los espejos y habían desarrollado para sus observaciones nuevos telescopios, introduciendo y perfeccionando el uso del micrómetro. Picard utilizó estas mejoras del telescopio no sólo para determinar la diferencia de latitudes ente los extremos de arco a medir, sino que por primera vez lo hizo (con instrumentos diseñados por él), como teodolito para la medida de ángulos horizontales. Además empleó el método *de triangulación*, introducido por Gemma Frisius y aplicado con este mismo fin por Willebrord Snell (1591-1626). Mediante el método de triangulación, es suficiente medir los ángulos de una cadena de triángulos y el lado de sólo uno ellos, para determinar la distancia entre dos puntos cualesquiera. Puesto que los ángulos se medían con mucha más precisión y eficiencia que las distancias, este método suponía una mejora a los existentes hasta entonces. Observó una cadena de 13 triángulos, con los que pudo medir el arco de meridiano entre Amiens y París. Encontró para la Tierra un radio de 6365 Km, muy próximo al de 6371 Km que se acepta en la actualidad como valor medio del radio terrestre. Esta medida, la más precisa jamás realizada hasta entonces del radio terrestre, sirvió a Newton posteriormente para confirmar su *Ley de la Gravitación Universal*.

El observatorio de París tuvo una actividad científica febril, de la que sólo puedo destacar algunas de las más importantes. El científico danés Ole Christensen Roemer (1644-1710), también atraído por Colbert a París, observando a lo, uno de los satélites galileanos, encontró una variación de los tiempos de ocultación y salida que dependía de la posición relativa Tierra-Júpiter. La atribuyó, acertadamente, a la finitud de la velocidad de la luz, que logró medir por primera vez. Halló 200000 km/s (Galileo lo había intentado con un rudimentario experimento del que solo saco la conclusión de que si no instantánea, debería ser



Relieve de Ole Roemer con su círculo meridiano

muy rápida, *'por lo menos diez veces mas rápida que el sonido*). Otra medida importante fue la de la variación de la gravedad con la latitud. Se produjo de forma no buscada. Efectivamente, ya que las dimensiones de la Tierra eran conocidas con precisión, fue posible abordar el siguiente paso lógico que consistió en medir las distancias entre los miembros del Sistema Solar. Para ello Cassini y Picard mandaron, en el año 1672, a un joven 'estudiante', Jean Richer (1630- 1696) a Cayena (situada en el Atlántico Norte, cerca del ecuador, cp" „4°) , en la Guayana francesa, a fin de determinar la paralaje de Marte. La paralaje es un método para medir las distancias a los cuerpos celestes muy usado en astronomía. Consiste en que si conocemos la distancia lineal entre dos puntos de la Tierra y medimos desde sus extremos, de forma simultánea, los ángulos bajo los que se observa un cuerpo celeste podremos resolver el triangulo definido por dicho cuerpo y los dos puntos terrestres y determinar así su distancia. Conocida la distancia a uno de los planetas, a partir de la tercera ley de Kepler (que relaciona el semieje mayor con los períodos de revolución de las trayectorias elípticas que describen los planetas en su giro alrededor del Sol), se puede dar escala a todo el Sistema Solar. La cuestión que más nos concierne aquí es que en dicha expedición Richer llevó un reloj de péndulo que había sido regulado para que batiera segundos en París. Descubrió que la magnitud con la que había que acortar la longitud de este péndulo para que batiese segundos en Cayena era mayor

que la que podía justificarse por el aumento de las fuerzas centrífugas. Esta sorprendente experiencia no pudo ser explicada de inmediato. Cassini y Picard se inclinaron a pensar que Richer había cometido algún descuido o error. En el año 1682, el año de la muerte de Picard y diez años después de la experiencia de Richer, una nueva expedición a las islas de Cabo Verde y a la de Guadalupe, confirmaron los resultados. Veremos enseguida la explicación.

Habíamos dejado a Inglaterra, con su Royal Society y su observatorio recién creados y con el meticuloso Flamsteed como observador, dedicado exclusivamente a las medidas de las distancias lunares. En 1672 fue nombrado miembro de la Royal Society alguien que no necesita presentación: Isaac Newton (1643-1727). La presidió ininterrumpidamente desde 1703 hasta el final de sus días. Newton ha sido el científico más reconocido y homenajeado durante su vida y después de ella, como quizá sólo lo fuera anteriormente Aristóteles y posteriormente Einstein. Baste decir pues que a instancia de Halley, Newton escribe en 1684 el libro titulado *De motio*, que mejorado y completado se convertiría después en el acertadamente titulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), *Principios matemáticos de la filosofía natural*, uno de los trabajos más importantes de la historia de la ciencia. En él establece las leyes de la Mecánica y la de la Gravitación Universal. La Ley de la gravitación, de enunciado sencillo, es sin embargo una de las leyes más asombrosas de la física, tanto por su capacidad de explicar la multitud de fenómenos que van desde la expansión del Universo a las causas de las mareas, como por su capacidad de predicción de los fenómenos celestes. Permitió ver por primera vez que ciertos fenómenos celestes, tales como el movimiento de los astros, seguían las mismas leyes que otros fenómenos terrestres como la caída de los 'graves', unificando así dos realidades, la celeste y la terrestre, que se creían hasta entonces de distinta naturaleza y gobernada por lo tanto por leyes diferentes. Sin embargo las fuerzas gravitacionales, a pesar de los avances recientes, siguen siendo las más enigmáticas de todas las fuerzas conocidas, y el hecho de que dos cuerpos pudiesen atraerse sin nada que les conectase parecía en aquel entonces una explicación mágica, y por lo tanto un inadmisibles retroceso en el racionalismo emergente. La mecánica de Newton suponía una visión alternativa a la física cartesiana, dominante en aquel entonces, y la definitiva estocada a las teorías físicas aristotélicas, con las importantes repercusiones teológicas que, vía Santo Tomas, esto significaba. Por todo ello la Ley de la Gravitación Universal tuvo un casi universal rechazo fuera de Inglaterra, en el continente europeo.

Volviendo al tema de la inexplicada variación de la gravedad con la latitud observada por Richer veamos cómo en sus *Principia*, Newton da una explicación al mismo. Así en la proposición 19 del libro tercero, establece que la Tierra debió ser en principio una masa homogénea fluida que rotando alrededor de un eje y sometida a la ley de la Gravitación universal debería adquirir la forma

de un elipsoide de revolución y mediante un ingenioso razonamiento concluye que el aplanamiento,  $\frac{a-b}{a} = \frac{1}{229}$ , siendo  $a$  el radio ecuatorial y  $b$  el radio polar. En la proposición siguiente demuestra que la longitud del péndulo habría de ser acortada en la cantidad  $1/2$  de pulgada entre París y el ecuador para que en ambos lugares batan segundos. Nace aquí un nuevo modelo para la Tierra, el *modelo elipsoidal* y una forma, alternativa a la de medir arcos de meridiano, para determinar su figura. Por otra parte, en 1690, tres años después de la aparición de los *Principia* de Newton, Huygens, que no admitía la atracción recíproca de la materia, publicó su libro *Discours de la cause de pesanteur*. En él, adoptando una modificación de la física cartesiana, había encontrado, como Newton, que la Tierra debía tener la forma de un elipsoide oblongo, pero con un aplanamiento de  $1/578$ , mucho menor que el deducido por Newton. Sin embargo en 1723 se publican, en un libro titulado *La grandeur et la Figure de la Terre*, los resultados de las medidas de la prolongación del meridiano de París, hacia el norte hasta Dunkerke y hacia el Sur hasta Perpiñan. Según estas medidas la longitud del arco de meridiano correspondiente a un grado disminuía hacia el sur, lo que implica que la Tierra debía ser un elipsoide aplastado... ¡por el ecuador!. Es decir, un elipsoide con el eje polar mayor que el eje ecuatorial. El ser este modelo contrario al que se deducía de las teorías de Newton, dio lugar a una encendida polémica. Lo que estaba en juego no era sólo la figura de la Tierra sino fundamentalmente la cosmovisión y la filosofía que subyacía tras la mecánica de Newton. La comunidad científica se dividió en dos sectores claramente enfrentados, los newtonianos, esencialmente los ingleses, y por supuesto su academia, de un lado, y por el otro el resto de los europeos, especialmente los franceses y su academia, aunque con valientes y honrosas excepciones. En esta discusión se implicó por primera (¿y única?) vez toda la sociedad, guiada especialmente por razones de patriotismo más que de interés científico. Lo cual es lógico, ya que los razonamientos seguidos por Newton en sus *Principia*, son, incluso en la actualidad, muy difíciles de seguir, por lo que (como habría de pasar después con la relatividad) solo un pequeño grupo de científicos tenía la capacidad de entenderlos. Las continuas y a veces virulentas discusiones sobre la forma de la Tierra hizo que la Academia francesa tratara de zanjar esta cuestión enviando dos expediciones científicas, una a Laponia y otra al Ecuador, con el objetivo de medir la longitud correspondiente a un grado de arco de meridiano en ambos lugares y salir de esta forma de la duda. Esta primera expedición científica de la humanidad fue en aquel entonces tan compleja y con consecuencias científicas, equivalentes a las más difíciles y provechosas de las que hoy puedan realizarse; comparable sin duda con la que en estos días viaja sin tripulación a Marte en busca de agua y quizás vida. Los resultados obtenidos por la expedición de Laponia, que regresó

en 1737, no dejó lugar a dudas, pues allí la longitud del arco de meridiano correspondiente a un grado era mucho mayor que en París, zanjando definitivamente la cuestión. La Tierra sin duda era aplanada por el polo y las teorías de Newton correctas. La cartografía hubo de adaptarse, rectificando las proyecciones, a este hecho, con lo que los mapas se volvieron más precisos.

En la primavera de 1714 llegó a Westminster una carta firmada por *los capitanes de los navíos de Su Majestad, los comerciantes de Londres y los capitanes de los buques mercantes* exigiendo que el gobierno prestara atención al problema de la longitud, y sugería que ofreciera una cuantiosa recompensa a quien lograra establecerla en el mar con método viable y preciso. En Junio se formó una comisión que solicitó un informe pericial al ya venerable anciano Sir Isaac Newton y a su amigo Edmund Halley. Aunque en este informe Newton repasó todos los posibles métodos para resolver el problema sin tomar partido explícito por ninguno, se notaba que su personal opinión era que serían los métodos astronómicos, especialmente el de la medida de las distancias lunares, los que habían de dar con la solución. El 8 de Julio de 1714 se promulga el 'Decreto de la Longitud' que establece un primer premio de 20.000 libras esterlinas, equivalente a varios millones de euros actuales, para el método que determine la longitud con un error no superior a un círculo de medio grado (unos cincuenta kilómetros), después de un viaje a las indias occidentales (lo que equivalía, de resolverse el problema mediante reloj, a guardar el tiempo con una precisión de 3 segundos diarios) y otros dos premios también cuantiosos para métodos menos precisos. El Decreto de la Longitud nombró un jurado de especialistas que se conoció con el nombre de 'Consejo de la Longitud' (¿el primer organismo de I+D existente?). El consejo de Longitud prolongó sus actividades hasta un siglo después, exactamente hasta 1828, en que resuelto el problema se disolvió. Durante ese período hubo de oír innumerable cantidad de pretendidas soluciones, de tal forma que en la imaginaria popular 'descubrir la longitud' llegó a ser una frase cuyo significado era equivalente a 'pretender lo imposible', algo así como el sentido con el que aún hoy muchos utilizan para la expresión 'la cuadratura del círculo'.

La solución del problema de la longitud entra en su recta final cuando un ebanista inglés autodidacta, de nombre John Harrison (1693-1776), se encaminó en 1730 a Londres para mostrar su invento: un reloj preciso, sin necesidad de péndulo capaz de funcionar en el mar. Más tarde a estos instrumentos se les llamaría cronómetros. Su reloj evitaba la fricción para no tener que usar como lubricante los espesos aceites de entonces que, al variar su viscosidad con la temperatura, originaban alteraciones en su marcha. Combinando en sus diferentes piezas metales de coeficientes de dilatación distintos, consiguió equilibrar los efectos mutuos para que el reloj no variase de marcha cuando estas piezas se dilataban o encogían con las variaciones de temperatura. Harrison se entrevistó con Halley, que era miembro del Consejo de la Longitud y había sucedido a

Flamsteed como director del observatorio de Greenwich, quién quedó impresionado gratamente por su invento. A pesar del apoyo de Halley, el Consejo de la Longitud, formado especialmente por astrónomos, algunos de ellos con intereses en la solución alternativa de las distancias lunares, negaron con argucias a Harrison las virtudes de su reloj. Aún cuando habían demostrado sobradamente sus méritos en numerosos viajes en barco alrededor del mundo, ni siquiera bajo la decidida protección del rey Jorge III, fue Harrison reconocido merecedor del premio, y aunque el parlamento le dio el dinero correspondiente al premio después de muchas vicisitudes en 1773, poco antes de su muerte, lo hacía por benevolencia y muy a pesar del Consejo de la Longitud.

Habíamos visto que la solución al problema de la longitud mediante el método astronómico, requería el conocimiento preciso del movimiento de la Luna. La ley de la Gravitación Universal mejoró significativamente el conocimiento de las causas de su movimiento, pero al aplicarla al sistema Tierra-Luna aisladamente daba un error de 5', de nivel inaceptable. El problema lunar es el aún hoy difícil problema conocido como *de los tres cuerpos*, en cuya solución hay que hacer intervenir también al Sol. El desarrollo de esta teoría por Leonard Euler (1707-1783) en 1748, fue uno de los logros matemáticos más grandes del siglo dieciocho. En 1767 el entonces director del observatorio Greenwich, sucesor de Halley, Nevil Maskelyne (quien tan villanamente luchara para que no le fuesen reconocidos a Harrison sus méritos y los derechos al premio estipulado) publica el primer *Almanaque Náutico*, con las precisas distancias lunares. Pero a pesar de la energía puesta en la batalla por introducir este método, la guerra estaba perdida a favor del cronómetro.

A lo largo de los siglos diecisiete y dieciocho se introdujeron numerosas mejoras en los cuadrantes, los octantes y sextantes. Especialmente cabe citar la de los espejos reflectores que permitían observar el horizonte y una estrella, o dos estrellas, simultáneamente, permitiendo medir su distancia mutua. Estos instrumentos dotados con telescopio, espejos, prismas, escalas de vernier, horizontes artificiales, etc. se convirtieron en aparatos de precisión. A finales del siglo dieciocho, los elementos esenciales de navegación eran pues: un sextante con el que medir la elevación sobre el horizonte de los cuerpos celestes, un reloj preciso para determinar el tiempo de las observaciones, un almanaque náutico para determinar y predecir las posiciones de los cuerpos celestes y un compás magnético para determinar el acimut y mantener el rumbo entre las observaciones celestes.

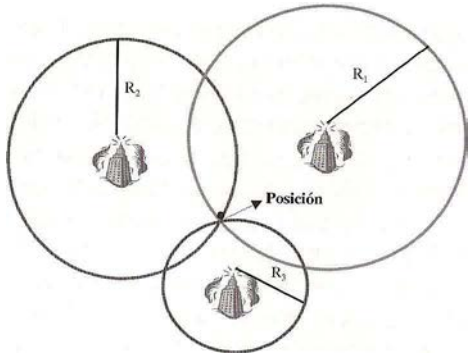
#### 4. Los desarrollos del siglo XX

Durante el siglo XIX la madera fue lentamente reemplazada por metal en la construcción del casco de los barcos. La magnetización de dicho metal, junto,

muchas veces, con la de la propia carga que llevaban, hizo pronto inútil a la brújula. Se necesitaba un compás no magnético. El problema no fue del todo resuelto hasta el siglo XX, con el denominado girocompás. El girocompás es simplemente una masa rotatoria, montada en una articulación (denominada articulación Cardan) que permite al eje de rotación girar en cualquier dirección. La característica del giróscopo es que si su eje de rotación está apuntando a una estrella, continuará apuntándola aún cuando la rotación de la Tierra produce un cambio aparente en su posición. En otras palabras, su eje de rotación mantiene la dirección en el espacio. La idea del giróscopo surgió en el siglo diecinueve, pero su construcción precisa hubo de esperar al veinte. Un giróscopo cuyo eje apunte al norte es lo que se denomina girocompás.

Los sucesores del girocompás son los actuales Sistemas de Navegación Inercial (INS) que son equipos que constan de tres acelerómetros y tres giróscopos, cada juego montado en tres direcciones mutuamente perpendiculares. La integración numérica de las aceleraciones proporciona, a tiempo real, la velocidad y una segunda integración, el desplazamiento. A su vez los tres giróscopos facilitan las variaciones de los tres ángulos (cabeceo, alabeo y guiñada) de orientación de un objeto en el espacio. La integración de ambas medias proporciona las coordenadas del vehículo. Un INS es un sistema pequeño y auto suficiente (en el sentido de que no requiere para su funcionamiento apoyo del exterior). Estas características le han hecho especialmente atractivo para usos militares. Los aviones, los submarinos, los satélites, y los misiles dependen de los sistemas inerciales de navegación y difícilmente podrá subestimarse el papel desempeñado por esta tecnología en el siglo veinte. Hay quien ha afirmado que de haber sido más baratos no hubiesen nacido los sistemas de navegación por satélite. Los desarrollos actuales de esta tecnología son extraordinarios: la sustitución de los giróscopos mecánicos por giróscopos láser o de bombeo óptico, con o sin plataformas estabilizadas, o los recientes desarrollos de giróscopos con las técnicas de los sistemas microelectromecánicos (MEMS) que usan métodos de fabricación propios de los circuitos integrados, están permitiendo integrar estos productos en equipos de gran consumo (estabilización de videocámaras, automóviles, robótica, etc.) y se predice un amplio rango de aplicaciones, bien solos o integrados con los sistemas de navegación espacial.

Aunque desde su nacimiento, a principio de siglo, se usó la radio como ayuda a la navegación, los progresos más importantes se dieron durante y después de la segunda guerra mundial. Las radiofrecuencias utilizadas en navegación van desde las bajas frecuencias (LF Low Frequency, 30 - 300 kHz) a las súper altas frecuencias (SHF Super Height Frequency, 3 - 30 Ghz). Con las ondas radioeléctricas de altas frecuencias pueden conseguirse mejores precisiones, pero sólo a cortas distancias, pues se propagan en línea recta y no se observan más allá del horizonte. Las frecuencias más bajas, debido a los efectos de refracción, pue-



den seguir la curvatura de la Tierra, pero con ellas se consigue un posicionamiento menos preciso. Los sistemas de radionavegación terrestre usan pues bajas y muy bajas frecuencias, mientras que los *sistemas de guía* (que señalan la dirección a seguir, sin facilitar la posición) utilizan las señales de corto alcance que requieren visibilidad mutua entre el receptor y el emisor. Estos últimos sistemas, tales como el Instrument Landing System (ILS), el Microwave Landing System (MLS) o VHS Omnidirectional Radio Range (VOR), se utilizan especialmente en las maniobras aéreas de aproximación y aterrizaje y, como ya hemos dicho, no son un sistema de posicionamiento. Los sistemas de posicionamiento basados en radionavegación en sentido estricto son de dos tipos: los sistemas *terrestres*, tales como el Loran (Long Range, Navigation System), el Omega o el Decca, y los sistemas de radionavegación *espacial* tales como el Navy Navigation Satellite System o sistema Transit, el Navigation System with Time and Ranging, Global Positioning System (NAVSTAR GPS), el Global Navigation Satellite System (GLONASS) o, en el inmediato futuro, el GALILEO.

El más simple de los procedimientos para determinar la posición con los sistemas de radionavegación se basa en la medida de las distancias a varias fuentes emisoras de radiofrecuencia cuyas posiciones son o bien conocidas de antemano, o bien ellas mismas transmiten sus coordenadas modulando las ondas que radian. En principio bastaría conocer tres distancias para hallar nuestra posición. De ahí que el método se denomine *trilateración*. Puesto que las ondas viajan a velocidad conocida, para medir la distancia basta conocer el tiempo de viaje desde el emisor al receptor, pues, multiplicándolo por la velocidad, proporcionará la distancia. Para conocer el tiempo de viaje de las ondas es necesario que los relojes de los transmisores y del receptor estén sincronizados. Las señales de radio viajan aproximadamente a  $3 \times 10^8$  m/s, por lo que un error de sincronización de una millonésima de segundo ( $1 \mu\text{s} = 10^{-6}$  s) produciría un error de 300 m. Para que los usuarios puedan mantener esta precisión es necesario utilizar relojes de alto precio, lo que es contrario a la necesidad de uso masivo de estos sistemas.

Los sistemas de radionavegación terrestres han evitado este problema mediante el uso de *posicionamiento hiperbólico*, basados en medir la diferencia de tiempos de llegada de la señal proveniente de dos estaciones transmisoras. Los relojes del receptor tienen que medir en este caso la diferencia de tiempos con precisiones de mili segundos y no tienen que estar sincronizados con los relojes de los transmisores. Los sistemas Loran y Omega, son de este tipo. La idea en que se basa este sistema es la siguiente: el lugar de los puntos que tienen la misma diferencia de distancias a dos emisores de posiciones conocidas es una hipérbola. La medida de la diferencia de distancia a un segundo par de antenas proporcionará otra hipérbola en cuya intersección se encontrará el observador. Se necesitan como mínimo tres emisores, formando dos pares de estaciones.

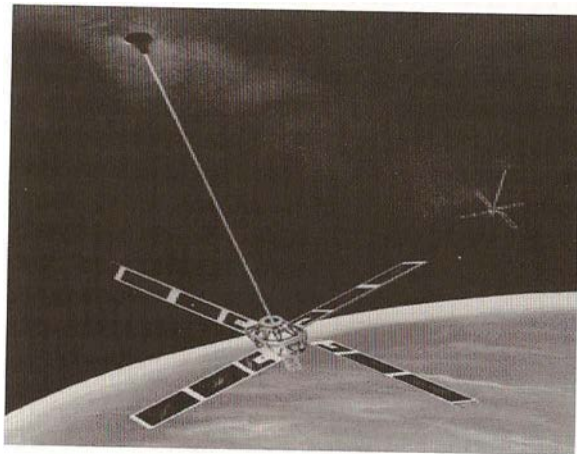
## 5. La navegación por satélite

El 4 de Octubre de 1957, la Unión Soviética lanzó el Sputnik I, dando el pistoletazo de salida de la carrera espacial. Poco después de este acontecimiento, Guier y Weinffebach, que trabajaban en el laboratorio de física aplicada de la universidad de Johns Hopkins, demostraron que con los datos de una sola pasada del satélite se podía determinar el conjunto de los parámetros orbitales necesarios para determinar su posición con precisión suficiente. Ello era posible analizando las medidas del desplazamiento doppler de la señal estable de 20 Mhz con que este satélite emitía. El diecisiete de marzo del año siguiente, Frank McClure (1916-1973), director científico del centro, les preguntó si podrían invertir la solución, es decir, determinar la posición de la estación admitiendo conocida la posición de los satélites. La primera simulación de este problema inverso, posteriormente denominado problema de navegación, indicaba no sólo que era posible, sino además que lo era con gran precisión. Recibidos estos resultados, McClure diseñó ese fin de semana lo esencial del primer sistema de navegación por satélite: múltiples satélites en órbita polar emitirían dos frecuencias ultra estables y, codificadas en ellas, sus parámetros orbitales. Dado que la posición de los satélites era sólo predecible a muy corto plazo, un sistema de estaciones terrestres, de posiciones conocidas, recibirían estas mismas señales, resolverían el problema directo y actualizaría con regularidad su propia posición. La ejecución de esta idea fue sufragada con un millón de dólares por la armada de Estados Unidos, que necesitaba un sistema capaz de proporcionar posicionamiento preciso en cualquier lugar de la Tierra e instante de tiempo. Esta necesidad nacía de que, con la finalidad de adquirir ventajas estratégicas frente a la Unión Soviética, había instalado en los submarinos Polaris (dispersos y ocultos bajo el agua), sus misiles (atómicos) balísticos intercontinentales. La única manera de lanzar, en cualquier lugar y momento, un misil hacia un obje-



tivo, requería como premisa previa conocer su propia posición. Así nació el NNSS (Navy Navigation Satellite System), también conocido como sistema Transit, según algunos el más importante avance en navegación desde el cronómetro.

Los primeros satélites del sistema Transit fueron lanzados en 1961-1962, y el sistema fue declarado operacional en 1964. El sistema estaba compuesto de 4 a 7 satélites de baja altura (Low Earth Orbiter, LEO) situados a 1100 km, en órbitas polares casi circulares, con períodos de 107 minutos. Cada satélite emitía señales a 150 MHz y 400 MHz con una potencia de un watio. Por razones de interferencia de las señales, sólo podía verse un satélite a la vez y los pases sucesivos de los satélites tardaban más de 100 minutos. Después de tener a un satélite a la vista, el receptor debía registrar de forma continua el desplazamiento doppler (cuentas doppler) de la señal recibida y decodificar el mensaje de navegación modulado en la señal para obtener las posiciones del satélite durante su paso, en lo que para cada una se tardaba entre 10 y 20 minutos. Las cuentas doppler proporcionan la diferencia de distancia al satélite entre dos instantes de tiempo. Repitiendo el proceso para diferentes posiciones del satélite y procesando estos datos por el método hiperbólico, se obtiene la posición de un observador estacionario o moviéndose a baja velocidad. La velocidad del usuario, de ser conocida, debía introducirse en los cálculos. Un error de, por ejemplo, un Km/h producía un error en el posicionamiento de 200 m. La emisión de dos frecuencias tenía por finalidad corregir las distancias observadas del retraso debido a la variación de velocidad que sufren las ondas a su paso por la ionosfera, que es dependiente de la frecuencia.



Satélite del sistema Transit

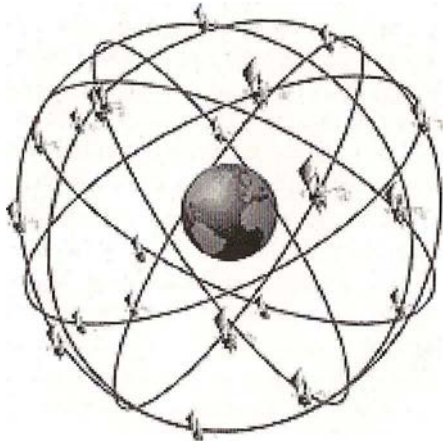
Este sistema fue usado especialmente por la marina de los Estados Unidos para calibrar los sistemas de posicionamiento inerciales de los submarinos de la fuerza navales de los Estados Unidos. Estos equipos inerciales, aunque precisos, tenían una deriva constante, por lo que debían ser actualizados con frecuencia. La precisión del posicionamiento bidimensional con el sistema Transit fue de 25 m (rms) para un observador estacionario. Un receptor estático, que pudiera registrar las señales durante varios días podía llegar a alcanzar una posición tridimensional de 5 m. En posicionamiento relativo, es decir, las diferencias de coordenadas entre dos puntos, podía llegar a obtenerse precisiones de 1 m en distancias de cientos de kilómetros, siguiendo muchos satélites simultáneamente en sus puntos extremos.

Consecuencia de la guerra fría, y como sistemáticamente ocurriera entre uno y otro bando, hubo un sistema análogo, si no idéntico, por parte de la URSS: el *Tsikada*. Este último continúa operativo, mientras que el Transit dejó de ser mantenido en 1996. Estuvo pues en servicio durante 33 años y fue utilizado por 250.000 usuarios. Funcionó adecuadamente para el posicionamiento de barcos que requirieran actualizaciones poco frecuentes y pudieran seguir las señales de los satélites de 10 a 20 minutos. Esta técnica no era pues adecuada para el posicionamiento de aviones o usuarios móviles que necesitaran posicionamiento frecuente o continuo.

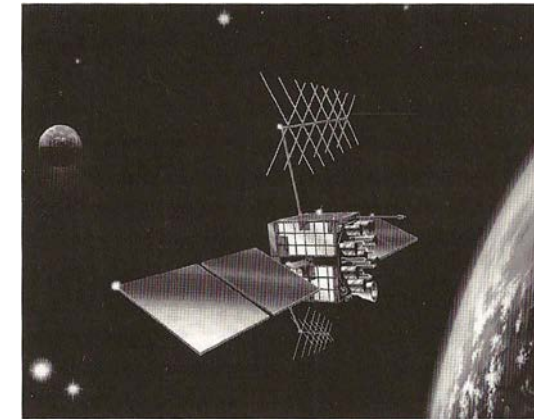
## 6. El Sistema de Posicionamiento Global, GPS.

Apoyándose en las experiencias proporcionadas por *Transit* el ministerio de defensa americano diseñó un nuevo sistema de posicionamiento por satélites: el Navigation System with Time And Ranking, Global Positioning System, (NAVSTAR GPS) conocido como GPS. El objetivo inicial fue obtener un sistema capaz de proporcionar posición, velocidad y tiempo con precisiones de 10 m, 0.1 m/s y 100 ns (rms en todos los casos) respectivamente. Estas medidas deberían ser accesibles simultáneamente a un número ilimitado de usuarios, repartidos por todo el globo, continua y casi instantáneamente. El sistema de defensa americano comprendió que si se quería un sistema de posicionamiento para vehículos de alta dinámica, en vez de medir varias veces la distancia a un mismo satélite era necesario medir simultáneamente las distancias a varios satélites, es decir emplear el antiguo y elemental método de trilateración, ahora en el espacio. La implementación práctica de esta idea simple ha requerido el empleo, y en muchos casos el desarrollo, de la más avanzada tecnología. Efectivamente, este método requiere:

a) Conocer la posición de los satélites respecto a un sistema de coordenadas con origen en el centro de la Tierra de forma precisa. La posición debe ser emitida por los propios satélites, modulando la señal.



Constelación GPS



Satélite GPS

b) Medir las distancias del observador a varios satélites simultáneamente. Para determinar las distancias lo que se mide es el tiempo de viaje de la señal desde el satélite al observador. Este tiempo debe ser medido con elevada precisión, pues su error repercute, multiplicado por la velocidad de la luz, como error en distancia.

c) Los relojes de los diferentes satélites deben estar sincronizados entre sí con altas precisiones.

d) Si han de observarse varios satélites, sus señales no deben interferir entre sí.

e) Los satélites deben estar lo suficientemente altos como para que con un razonable número de ellos se pudiera tener sobre el horizonte y en cualquier lugar de la Tierra, los necesarios (cuatro o más) para determinar la posición. Esto implica que la potencia de recepción de la señal ha de ser baja.

f) Si el sistema había de ser utilizado por un número ilimitado de usuarios concurrentemente, debería ser pasivo, es decir debería restringirse a emitir señales, sin que el usuario pudiera entrar en contacto con él e interrogarle.

La consecución de estos objetivos fue posible gracias a los espectaculares desarrollos de la tecnología de la segunda mitad del siglo XX, entre los que destacan:

- Desarrollo de la tecnología espacial. Especialmente la mecánica de vuelo, el desarrollo de plataformas estables y las técnicas de predicción de las órbitas.
- El desarrollo de relojes atómicos ultra estables.
- Las técnicas de espectro expandido en la modulación de las señales.
- El avance en los circuitos integrados.

La arquitectura básica se decidió y aprobó en 1973 y el primer satélite se lanzó en 1978. El sistema se declaró operativo en 1995. El coste del sistema fue de 1 millón de dólares y el mantenimiento es de 500 millones de dólares anuales.

En la definición de los Sistemas de Navegación por Satélite se distinguen tres partes:

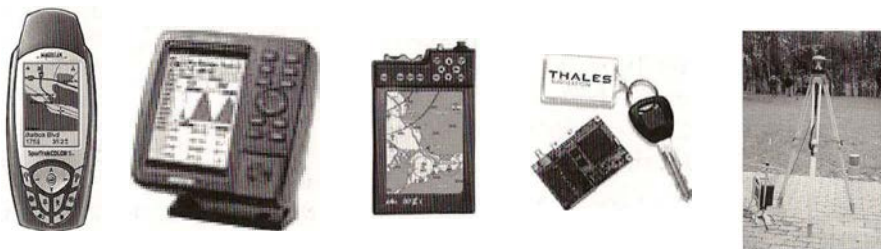
- **El segmento espacial.** Constituido por 24 satélites en órbitas casi circulares, con radio de 26500 km Y período aproximado de doce horas. Los satélites están organizados en seis planos orbitales (con cuatro satélites por plano), inclinados  $55^\circ$  respecto al plano ecuatorial. Como elemento esencial llevan varios relojes atómicos (dos de rubidio y dos de cesio) que generan las señales. Estas señales se modulan con un código de ceros y unos, aparentemente aleatorios (aparentemente, ya pueden generarse algorítmicamente) diferentes para cada satélite, con los que el receptor puede distinguirlos. También se modula en la señal los datos orbitales y otras informaciones con las que el usuario puede calcular la posición del satélite en el instante de la observación.

- **El Segmento de control.** Está constituido por una estación principal y un conjunto de estaciones repartidas por todo el mundo. Las estaciones siguen a todos los satélites, con cuyos datos calculan sus órbitas de forma precisa y calibran sus relojes, actualizando periódicamente la información que posteriormente será transmitidos a los usuarios.

- **El Segmento del Usuario.** Los receptores miden el tiempo requerido para que la señal emitida por el satélite alcance al receptor. Ello se hace midiendo el desplazamiento que debe sufrir el código pseudoaleatorio generado casi sincrónicamente por el receptor (e idéntico al emitido por el satélite) para que se correlacionen. Con estos datos, y con la información que se recibe modulada en

las señales (tales como las efemérides con las que calcula la posición del satélite, los datos para corregir a la señal de los retrasos originados durante su propagación, de los fenómenos relativistas y de otras causas), el receptor calcula su posición tridimensional y la corrección de su reloj. Necesita pues, al menos, cuatro satélites para encontrar sus cuatro incógnitas.

Desde los comienzos, hacia 1980, del GPS, al año 2003, la tecnología de los receptores ha cambiado enormemente. Actualmente se encuentra en el mercado una gran variedad de equipos con prestaciones muy diversas, y cuyos precios oscilan entre los 100€ y los 30.000€. Los más sencillos y económicos permiten precisiones absolutas menores de 10 metros rms el 95%. Esta precisión no es suficiente aún para una multitud de aplicaciones. Piénsese por ejemplo en un avión aterrizando o un barco en aproximación a puerto, etc. Una forma de mejorar la precisión a tiempo real ha dado lugar a un conjunto de técnicas conocidas como *GPS diferencial*. Se basa en el hecho, reconocido desde el comienzo del GPS, de que los errores para usuarios situados no 'demasiado lejos' unos de otros son similares y cambian lentamente con el tiempo. Esto se debe a que tales errores tienen su origen en los efectos de refracción que ejerce la ionosfera y la troposfera sobre la propagación de las ondas y la geometría definida por la posición de los satélites y el receptor (DOP). Ambas afectan aproximadamente igual a usuarios próximos. Por lo tanto si en una estación de coordenadas conocidas calculamos la posición, la diferencia entre la posición conocida y la calculada será el error. Difundiendo este error otros usuarios podrán mejorar su posicionamiento. Para ser usadas en navegación estas correcciones diferenciales han de ser transmitidas en tiempo real, mediante señales de radio. El DGPS permite precisiones métricas, o incluso por debajo, dependiendo de la proximidad a la estación de referencia. Estos requerimientos de precisión son suficientes para muchos de los sistemas de transporte y tráfico marítimo. Las correcciones diferenciales son actualmente accesibles vía satélites de comunicación o mediante la subportadora de las emisoras FM y su uso es generalizado en gestión de tráfico o explotación petrolífera costera por ejemplo. Los sistemas de guardacostas de muchos países



Receptores GPS

proporcionan correcciones diferenciales a través de sus radiobalizas. Para las aplicaciones aéreas están en desarrollo actualmente tres sistemas basados en la emisión de correcciones diferenciales emitidas desde satélites geostacionarios:

- WASS (Wide Área Augmentation System): es el sistema desarrollado por las fuerzas aéreas de los EEUU. Es el sistema más avanzado, de tal forma que ya pueden recibirse señales desde el mismo. Su coste es de 1000 millones de dólares.
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System): desarrollado por la Agencia Europea del Espacio y Eurocontrol. Emite ya en plan experimental a través de los satélites geostacionarios INMARSAT III. Se espera su pronta puesta a punto y tiene un presupuesto de 150 millones de euros.
- MSAS Satellite basado Augmentation System: desarrollado por el departamento de aviación civil de Japón con los mismos objetivos y filosofía que los anteriores.

Otros sistemas en desarrollo son las Estaciones de Referencia de Área Local para las operaciones de aproximación de los aviones a los aeropuertos.

Además del GPS, existe en la actualidad su equivalente ruso, el GLO-NASS, cuyo mantenimiento y futuro desarrollo está, por la situación económica que atraviesa este país, en entredicho.

Aunque el GPS nació para usos militares, los usos civiles han crecido más allá de lo previsible, y siguen a ese ritmo. Es cierto que la posición precisa sólo tiene interés académico. Pero la información sobre la posición puede ser inestimable si se da con relación a la trayectoria, mostrando puntos de interés y posibles peligros: la posición de un senderista con relación a su camino; o un coche moviéndose en un mapa; o un barco en relación con las islas y los obstáculos. Combinado con las tecnologías de la comunicación, por ejemplo la telefonía celular, el conocimiento de la posición puede salvar vidas. La combinación de la telefonía móvil, Internet inalámbrico y localización, está haciendo emerger una nueva área de actividad económica: los 'Servicios Basados en la Localización', consistentes en proporcionar información, o prestaciones específicas, dependientes de la situación del usuario.

Las aplicaciones civiles del GPS pueden, grosso modo, ser agrupadas en:

- Posicionamiento de alto nivel. De milímetro a centímetro.
- Aplicaciones especializadas, en aviación o satélites.
- Transporte terrestre y marítimo
- Productos de consumo

No debemos olvidar que el GPS proporciona también tiempo altamente preciso. Este servicio está creciendo rápidamente en la distribución de energía eléctrica y en la industria de las telecomunicaciones.

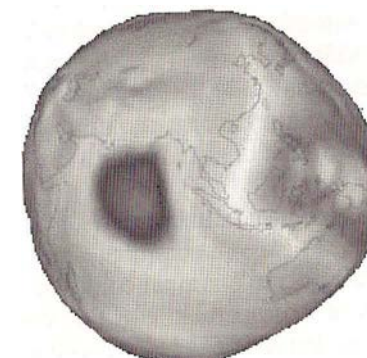
Los geodestas y geofísicos son beneficiarios no intencionados del GPS. No intencionados pues las precisiones que ellos alcanzan no eran previsibles en los diseñadores del sistema. Efectivamente, han adoptado técnicas desarrolladas

anteriormente en radioastronomía para conseguir precisiones a nivel milimétrico en posicionamiento relativo y distancias de cientos de kilómetros. Estas técnicas se emplean actualmente de forma rutinaria en el estudio del movimiento tectónico de placas, en las deformaciones de la corteza originadas por los terremotos, los volcanes, los procesos originados en las capas de hielo o el rebote postglacial y en el estudio de las variaciones en la velocidad de rotación de la Tierra. En estos estudios las respuestas no se requieren en tiempo real y los datos recopilados durante horas o días en diferentes lugares se procesan posteriormente para obtener la posición relativa del vector de posición que les conecta, con precisiones milimétricas. El valor del GPS en los estudios de Geodinámica ha mejorado enormemente con el establecimiento del International GPS Service Por Geodynamics (IGS), que coordina la recopilación y análisis de las medidas GPS registradas de forma continua en cientos de estaciones permanentes repartidas por todo el mundo. Con estos datos calcula y difunde a través de Internet las coordenadas de los satélites GPS con precisiones centimétricas, que pueden ser utilizados en postproceso, es decir, cuando no se trabaja a tiempo real.

Las capacidades de alta precisión del GPS se usan también para vigilar, en tiempo real, las deformaciones de grandes estructuras de ingeniería, como las presas o los puentes. Los estudiosos de la Atmósfera han encontrado en el GPS un medio para caracterizar en tiempo real el contenido de iones en la ionosfera o el de vapor de agua en la troposfera. En el campo de la topografía, la fotogrametría y la cartografía, el GPS se ha convertido en una pieza indispensable por sus grandes mejoras en precisión, eficiencia y economía.

No insistiremos, pues ya lo hemos hablado, en la enorme importancia del GPS en aviación civil. En cuanto a su contribución a las actividades espaciales, la instalación de equipos GPS en satélites de baja altura (LEO) ha permitido la determinación de su posición, velocidad, orientación, variación de orientación, y tiempo, reemplazando así a una serie de equipos, lo que permiten reducir el costo y la complejidad de los satélites. Además los satélites son sensores del campo gravitacional terrestre. Estudiando los movimientos de los satélites equipados con GPS podremos conocer las características del campo. Puesto que la intensidad de campo gravitacional depende de la distribución de las masas que lo generan, se están llevando a cabo actualmente una serie de experiencias que permitirán deducir las variaciones temporales de masas originadas en los cambios del nivel freático o en el transporte atmosférico del vapor de agua. También con estos métodos podrán conocerse en detalle las corrientes marinas. Estos fenómenos son de gran importancia en los estudios del cambio climático. El conocimiento del campo gravitatorio permite además establecer la estructura interior de la Tierra, y la forma de ésta, definida hoy como una de sus superficies equipotenciales: aquella que mejor se ajusta al nivel medio del mar. Se le denomina *Geoide*. Este nuevo modelo para la forma de la Tierra es el de una superficie compleja e irregular cuya dife-

rencia con el elipsoide de revolución (aquél que se estableciera en los tiempos de Newton) no es en ningún punto mayor de cien metros.



El geoide

Las aplicaciones más generalizadas del GPS son las relacionadas con el transporte terrestre, especialmente en la navegación y seguimiento de vehículos: en la gestión de flotas de vehículos comerciales, en el transporte público, en los servicios de emergencia, etc. Los automóviles de últimas generaciones están incorporando rutinariamente sistemas de ayuda en ruta y sistemas automáticos de localización de vehículos. De igual forma se han incorporado en las líneas ferroviarias para la gestión de los ferrocarriles. En estos casos la pérdida de la recepción de la señal debido a la existencia de árboles, edificios, puentes, túneles, etc. exige la complementación del GPS con otros sensores, tales como giróscopos, acelerómetros, odómetros, etc.

A pesar de los grandes logros y las continuas mejoras del GPS, existen cuatro importantes limitaciones:

1) El GPS (como el GLONASS) es de origen militar. Aunque las aplicaciones civiles se han generalizado, el uso y control del sistema sigue siendo militar. Esto implica que en situaciones de crisis las autoridades que lo gestionan pueden anular o degradar la señal limitando su precisión a los usuarios militares que posean la adecuada autorización. Existe pues una ausencia de compromiso de responsabilidad en la calidad y continuidad de los servicios por los usuarios civiles. No se puede reclamar a nadie por un error de funcionamiento en el GPS.

2) La precisión es aún insuficiente para la determinación de la posición en tiempo real.

3) La disponibilidad de la señal es baja o nula en zonas urbanas o de elevada latitud.

1. 4) Carece de integridad. Los usuarios no son informados de los eventuales fallos o errores del sistema, de forma que la posición obtenida puede estar dando grandes errores que pasan inadvertidos.

Todo esto ha llevado a las autoridades europeas al desarrollo de un nuevo sistema de navegación por satélites, compatible con el GPS, denominando GALILEO. Las características diferenciadoras son las garantías de: *disponibilidad* (que exige que siempre haya cuatro o más satélites a la vista del receptor), *continuidad* (que la señal no sufra interrupciones), *precisión e integridad* (veracidad de la información que proporciona el sistema incluida la alarma cuando el sistema no funciona correctamente).

El GALILEO se encuentra actualmente en la fase de desarrollo y validación y se espera que entre en la fase de explotación hacia el 2008. En cualquier caso el GALILEO no debe verse únicamente como un competidor de los sistemas ya existentes, sino complementario e interoperable con los mismos. El posicionamiento será más robusto al contar con dos sistemas independientes, el GPS y el GALILEO, que el usuario recibirá con un único receptor. Estas características mejorarán especialmente en los núcleos urbanos al tiempo que aportará mayor seguridad en las aplicaciones críticas, pues ante el fallo de un sistema, aún subsistirá el otro.

Como conclusión permítaseme decir que los desarrollos en marcha permitirán en un plazo medio el posicionamiento preciso, económico y a tiempo real de cualquier objeto o persona sobre la superficie de la Tierra. En combinación con las telecomunicaciones y el creciente desarrollo de todo tipo de sensores, da lugar a un flujo de información referenciada que pudiera asimilarse a la rudimentaria estructura de un sistema nervioso planetario.

## 8. Algunas conclusiones

Hemos visto la tenacidad con la que el hombre, durante siglos, ha perseguido la solución del problema del posicionamiento y la navegación, hasta llegar a la sofisticada solución actual, basada en complejos conocimientos y capacidades tecnológicas que son transparentes, sin embargo, al usuario, que puede hacer uso de ellas sin conocerlas y en muchos casos sin valorarlas. Esta historia es similar a la de muchos otros descubrimientos científicos o técnicos. En el trasfondo de estas historias se puede observar las siempre complejas relaciones entre la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad, es decir, cómo el quehacer científico se relaciona con los ámbitos económicos, políticos, culturales, militares, etc. Muchas de las situaciones que se dan en esta historia podrían servirnos de pie para preguntarnos acerca del valor de la ciencia, acerca de las relaciones entre la ciencia y la técnica, hacia dónde se dirige, hacia dónde nos lleva, quién conduce sus desarrollos, quién debería hacerlo, cómo nos afectan, o si todo esto hace al

hombre más o menos sabio, más o menos libre o moralmente más o menos elevado. Mi satisfacción al ingresar en esta Academia de Ciencias e Ingenierías que hoy me acoge es inmensa, pues sé que muchas de éstas y otras preguntas de este tipo, encontrarán eco en ella y sin duda algunas surgirán respuestas. Proporcional al inmenso placer que me causa este inmerecido nombramiento es el agradecimiento que quiero reiterar a la Academia, especialmente a su fundador y motor Francisco González de Posada, hacia los miembros que generosamente me acogen en ella y a las autoridades que la alientan y sostienen.

**COLECCIÓN:**  
**DISCURSOS ACADÉMICOS**

- 1.- *La Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote en el contexto histórico del movimiento académico.* (Académico de Número).  
**Francisco González de Posada.** 20 de mayo de 2003.  
Ayuntamiento de Arrecife.
- 2.- *D. Blas Cabrera Topham y sus hijos.* (Académico de Número).  
**José E. Cabrera Ramírez.** 21 de mayo de 2003.  
Ayuntamiento de Arrecife.
3. - *Buscando la materia oscura del Universo en forma de partículas elementales débiles.* (Académico de Honor).  
**Blas Cabrera Navarro.** 7 de julio de 2003.  
Amigos de la Cultura Científica.
- 4.- *El sistema de posicionamiento global (GPS): en torno a la Navegación.* (Académico de Número).  
**Abelardo Bethencourt Fernández.** 16 de julio de 2003.  
Amigos de la Cultura Científica.