

El problema de la longitud geográfica

Luis J. Santos Pérez

Ingeniero en Geodesia y Cartografía
Ingeniero Técnico en Topografía

Resumen

Este artículo trata de narrar los pasos históricos que llevaron a la humanidad a resolver el problema de la determinación de la longitud geográfica describiendo la dos líneas fundamentales de acercamiento a la solución. Pone especial interés en el invento y desarrollo del cronómetro marino y en las diversas soluciones astronómicas.

Implicaciones catastrales en el problema de la longitud

Todas los fenómenos que tienen relación con la superficie terrestre, han de ser referenciados en un determinado sistema. El utilizado por la ciencia desde hace siglos es el de coordenadas geográficas basadas en la red de meridianos y paralelos, es decir longitud y latitud.

El catastro español utiliza como sistema de ubicación o referenciación geográfica de las parcelas un sistema basado en la Cuadrícula U.T.M. (CUTM) (Cuadrícula de la

Proyección Transversa de Mercator). Esta cuadrícula, sirve de marco de referencia superpuesto a la proyección que fue ideada por el cartógrafo y matemático holandés Gerhard Cramer –latinizado Mercátor– que fue el que, entre otras cosas, primero utilizó la palabra atlas para referirse a la colección de mapas en un volumen encuadernado.

La proyección consiste en utilizar un cilindro tangente a la tierra en los meridianos, por tanto con su generatriz ortogonal al eje de los polos y proyectar sobre él los puntos de la superficie terrestre. De este modo se consiguen disminuir de forma contundente las deformaciones que se producen al proyectar puntos de una esfera sobre un plano así como resolver un problema fundamental en la navegación de altura que es navegar con rumbo constante. Esta línea de rumbo constante se representa por una recta –en esta proyección– que une el punto de salida con el de llegada (loxodrómica), por tanto se puede navegar siguiendo la dirección de la brújula correspondiente al ángulo que forma la línea con los meridianos sobre el mapa.

Por tanto mediante una proyección cartográfica estamos pasando puntos de una esfera a un plano mediante un "artilugio matemático". En este caso, partiendo de las coordenadas esféricas latitud (ϕ) y longitud (λ) obtenemos coordenadas sobre un plano X e Y. Es decir:

$$\begin{aligned} X &= f(\phi) \\ Y &= g(\lambda) \end{aligned}$$

Las funciones utilizadas son de gran complejidad, encadenándose hasta 16 pasos consecutivos para lograr obtener las coordenadas finales. Este es el "problema directo" de la Geodesia, constituyendo "problema inverso" la obtención de latitud y longitud a partir de las coordenadas de la proyección.

$$\begin{aligned} \lambda &= h(X) \\ \phi &= g(Y) \end{aligned}$$

Como antes hemos comentado el sistema utilizado por la Dirección General del Catastro para ubicar geográficamente de forma unívoca y precisa un determinado bien inmueble se basa en la cuadrícula UTM y en el sistema de división de hojas propio de la cuadrícula.

Se estructura en un código formado por 14 dígitos y letras dividido en dos grupos de 7, el primero es la Referencia de Parcela y el segundo la Referencia de Plano; este código recibe el nombre de REFERENCIA CATASTRAL.

Si atendemos exclusivamente a los 7 dígitos de la Referencia de Parcela, se distinguen 4 grupos:

1. Km. y Hm. de la coord. X de la esquina SW del cuadrado CUTM de 100m. (2 dígitos).
2. Km. y Hm. De la coord. Y de la esquina SW del cuadrado CUTM de 100m. (2 dígitos).

3. N.º de cuadrado de 33,3 m. donde se ubica el centroide de la manzana.
4. N.º de la parcela dentro de la manzana.

Podemos apreciar que las coordenadas X e Y UTM se utilizan en los dos primeros grupos. Es decir, las coordenadas geográficas latitud (ϕ) y longitud (λ) están implícitas en la referencia catastral mediante las fórmulas de transformación de proyección antes citadas.

Por tanto el objeto de este artículo, que es el describir la búsqueda, por parte de la humanidad de un sistema viable de calcular la longitud geográfica, está más que justificado en su relación con el Catastro por la conexión arriba descrita.

Introducción

La noche del 22 de octubre de 1707 era especialmente brumosa, la visibilidad en el mar cerca de las Islas Sorlingas (extremo sudoeste de Inglaterra) no alcanzaba los 100 m. La flota inglesa formada por cinco naves y capitaneada por el almirante Clowdisley a bordo del *Association* volvía victoriosa desde Gibraltar. El almirante convocó a sus oficiales para discutir la ubicación del convoy, todos coincidieron en que estaban a salvo y que podían seguir navegando hacia el norte. Pocos instantes después los gigantescos escollos de las Sorlingas se convirtieron en el cementerio de dos mil hombres que minutos antes descubrieron que sus oficiales se habían equivocado en el cálculo de la longitud geográfica.

Primero chocó el *Association* y se hundió en pocos minutos, después el *Eagle* y el *Romney*, cuatro de los cinco buques desaparecieron en unos instantes. Unas horas antes un marinero del buque insignia le comentó al almirante que según sus cálculos –realizados en secreto a lo largo de la travesía– se había acumulado un gran error en el cálculo de la posición. Por toda res-

puesta el jefe de la flota hizo que ahorcaran al marinero por insubordinación.

Este hecho no ocurrió de forma aislada, el no conocer la longitud en el mar casi siempre desembocaba en naufragio, sobre todo en las largas travesías. A las grandes potencias marítimas les urgía poder conocer la longitud geográfica con suficiente precisión, estaban en juego tremendas cantidades de dinero y de vidas humanas y quien primero pudiera calcularla tenía asegurado el dominio de los mares.

Antecedentes del posicionamiento geográfico

Para situar un punto sobre la superficie de la Tierra utilizamos una pareja de coordenadas, latitud y longitud. La latitud representa la distancia angular entre el radio correspondiente al punto y el plano del ecuador. La longitud mide el ángulo que forman dos planos: el meridiano del lugar y el meridiano origen.

Cualquier avezado marino, ahora y decenas de siglos atrás ha sido capaz de calcular la latitud con suficiente precisión. Es un problema fácil de resolver ya que su solución se obtiene midiendo la altura en grados de determinadas estrellas por encima del horizonte o mediante observaciones al Sol en su paso por el meridiano, utilizando instrumentos incluso rudimentarios (cuadrante y ballestina), algo más evolucionados (astrolabio) y más modernos (sextante y octante). Cristóbal Colón intentó llegar a las Indias "caminando por el meridiano" (latitud constante), no pudo llegar porque se le interpuso América.

Pero el problema de la longitud es de un grado superior de magnitud.

Cuando el cálculo de la latitud estaba más o menos resuelto, los marinos confiaban en sistemas claramente inferiores para

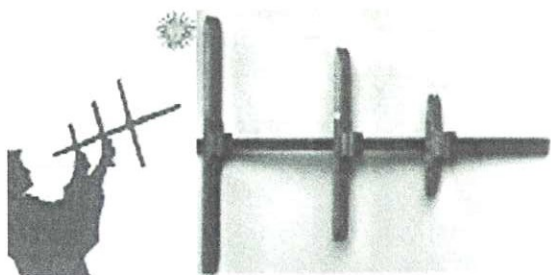


"El hombre no está perdido" (midiendo la altura del Sol para obtener la latitud).

calcular la longitud. Durante siglos, cuando se alejaban de la costa (la navegación costera es mucho más sencilla) calculaban la distancia que habían avanzado mediante una cuerda con nudos cada cierto intervalo, que largaban por la borda. Midiendo un corto periodo de tiempo (t) con un tosco reloj de agua o de arena y contando los nudos, al fin y al cabo una distancia (d) calculaban la velocidad (v).

Es fácil imaginar el desastre que esta práctica producía ya que la velocidad calculada era instantánea y variaba en función del viento, de las corrientes, del trapo desplegado, etc. Por tanto sólo contaban con una "estimación" de su posición. Los viajes se prolongaban de forma intolerable y condenaban a los marineros a la temible enfermedad del escorbuto producida por la falta de verdura y fruta fresca (vitamina C) que deterioraba el sistema vascular de forma irreversible. Todos eran conscientes de que así no se podía navegar.

Otro problema añadido por desconocer la forma de calcular la longitud era que los capitanes no se atrevían a salirse de las rutas establecidas lo que llevaba a su congestión. Quien sacaba partido de ello eran



Ballestilla y modo de utilización.

los piratas que abordaban los buques con mejor cargamento. A modo de ejemplo la nave portuguesa de 1590 *Madre de Deus* fue abordada por una escuadra inglesa y como consecuencia la nación vecina perdió la nave y todo su cargamento valorado en medio millón de libras, más o menos la mitad del valor neto del ministerio de Hacienda inglés en esos tiempos.

Este es un buen momento para refrescar algunos conocimientos geográficos. La Tierra tarda 24h. en completar una revolución esto es en recorrer 360° de ángulo. Aquí vemos una primera relación, que estará presente en toda la exposición, entre ángulo y tiempo. Por tanto en 1h. girará 24 veces menos grados, es decir 15° . Estos grados, considerados como distancia suponen 1000 millas náuticas, es decir 1670 km. Por tanto un grado de longitud equivale a 4 minutos de tiempo que en el Ecuador (en otras latitudes disminuiría) serían 111 Km. Esto nos hace intuir que es necesario conocer la hora con mucha precisión en el mar ya que un solo minuto nos daría una indefinición de ¡27 Km.! en nuestra posición.

Para hacernos una idea de la magnitud del problema de la longitud, podemos decir que mantuvo ocupadas durante trescientos años a muchas de las mejores cabezas de Europa. En el ámbito de las monarquías, los reyes Felipe II, Carlos V, Jorge III de Inglaterra, Luis XIV de Francia dedicaron mucho tiempo y esfuerzos a buscar soluciones. En el entorno científico, grandes figuras intentaron buscar la solución basándose en el universo mecánico, el astrónomo Halley, Sir Isaac Newton, Cassi-

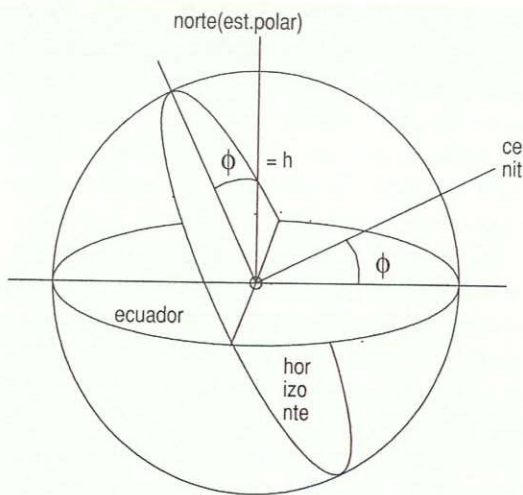
ni, Huygens y Galileo Galilei se quemaron las neuronas de sus brillantes cerebros investigando el cielo para hallar la solución.

La búsqueda de la solución al problema de la longitud siguió dos caminos en apariencia diferentes, por un lado muchos grandes científicos levantaban la cabeza y veían la bóveda celeste, con su inmutabilidad, su perfección y sincronía en la repetición de los movimientos y pensaban que en ella tenía que estar la solución, de ahora en adelante la denominaremos solución astronómica. El otro camino era el control del tiempo, solución mecánica. Como hemos visto antes, longitud y tiempo están íntimamente unidos en el continuo girar de nuestro planeta, de forma que una diferencia de tiempos tiene una directa equivalencia con una diferencia de longitudes. La longitud geográfica, es la distancia angular entre el meridiano del lugar en el que nos encontramos y el meridiano origen, siendo el meridiano el círculo máximo terrestre que pasa por los dos polos y por el lugar de ubicación. A diferencia de la latitud, referida al ecuador (inmutable), la longitud se mide a partir de un meridiano de referencia.

¿Dónde situamos el meridiano origen o de referencia?

La Humanidad ya utilizaba la red de paralelos y meridianos tres siglos antes de Cristo. Fue Ptolomeo quien en el año 150 elaboró un atlas del mundo conocido en el que aparecía una lista exhaustiva con latitud y longitud de múltiples lugares visitados por viajeros y calculadas con toda la precisión que permitían las técnicas conocidas en aquel momento. Él fue quien, en función de sus conocimientos astronómicos tomó el ecuador como paralelo cero (origen de latitudes) también sitúa en su posición los otros paralelos importantes que son los trópicos de cáncer y capricornio (límites norte y sur del movimiento relativo del Sol en su desplazamiento por la eclíptica a lo largo del año).

Es evidente que Ptolomeo era totalmente libre para colocar el meridiano origen donde quisiera y lo situó en el extremo



En este gráfico se aprecia que la latitud q , del lugar de observación coincide con la altura angular de la estrella polar sobre el horizonte.

más occidental del mundo conocido, es decir en las Islas Canarias para que todas las longitudes fueran positivas (muchos siglos después se volvió a colocar el la Isla de Hierro (extremo occidental de las Canarias).

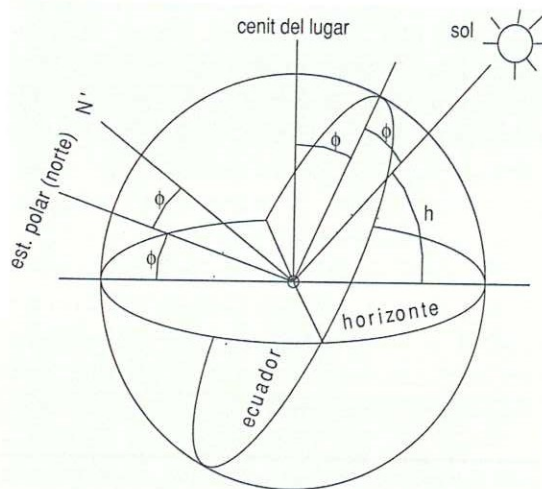
En el transcurrir de la historia, el meridiano origen se fue moviendo a gusto de la nación más poderosa en cada momento, ya que era una decisión puramente política, pasando por las Islas Azores, Roma, Jerusalén, Pisa, París y Filadelfia. Por último como todos sabemos quedó fijado en el observatorio astronómico de Londres, Greenwich, origen desde aquel entonces de los husos horarios y las longitudes para todo el planeta Tierra.

La solución astronómica

Como ya hemos comentado, históricamente la medición de la longitud ha sido un problema irresoluble durante muchos siglos, sirvan de ejemplo las grandes deformaciones que durante toda la historia de la cartografía, al menos hasta el siglo XVII, tenían todos los mapas conocidos.

Aunque la solución está en el cielo, el Sol y las estrellas no se pueden tomar como referencia por si solos, ya que la esfera celeste tiene un movimiento continuo de rotación. Por tanto hay que utilizar la simultaneidad del tiempo en combinación con la observación de los astros. Si queremos conocer la longitud de un punto sobre la superficie de la tierra (P), imaginemos que estamos situados como observadores en el centro de la tierra, con un reloj suficientemente preciso. Observamos que una estrella pasa por el meridiano origen en el momento T1, la tierra sigue girando y observamos que la misma estrella pasa por el meridiano del punto P en el instante T2. Está claro que la diferencia de tiempos equivale a diferencia de longitudes (24h. Serían 360° , 1h serían 15° , etc...).

Ahora bien, es un poco complejo situarse en el centro de la Tierra, lo normal es que estemos sobre la superficie y por tanto la cosa cambia, deberíamos conocer la hora exacta en la que el astro pasa por el meridiano de referencia (se conoce por tablas) y la hora exacta —en el mismo sistema de tiempos— a la que el mismo astro pasa por el meridiano del lugar de observa-



En esta figura podemos apreciar que midiendo la altura angular h del Sol en el momento del paso por el meridiano y conociendo la inclinación de la eclíptica e , podemos calcular la latitud q . ($q = 90 - (h + e)$).

ción. De esta forma, calculando la diferencia de horas obtendríamos la diferencia de longitudes y por tanto la solución del problema.

Pero podemos comprender que hace varios siglos, sin medios electrónicos (Decan, Loran, etc..) ni satélites (GPS) era un poco complicado saber la hora local y simultáneamente la hora del meridiano de referencia (que es el mismo problema descrito antes).

Lo que sí observaban los marinos de hace tres o cuatro siglos era el caminar del Sol en su movimiento aparente, veían que en el orto, surgía por el este, se detenía en su paso por el meridiano como una pelota antes de empezar a caer –paso por el meridiano del lugar– y comenzaba su descenso hasta el ocaso por el oeste. Con este hecho ponían en hora sus rudimentarios relojes de arena o agua que se desajustaban tremendamente en pocas horas. Por tanto sólo les hacía falta un fenómeno astronómico que les indicase la hora en otro lugar (meridiano de referencia).

Esto se daba cuando un eclipse de luna se sabía que se iba a producir a la hora H1 en Londres, si mediante sus rudimentarios relojes ellos en medio del Atlántico observaban el eclipse (simultáneo en toda la tierra) a las H2, diferencia de horas, diferencia de longitudes y problema resuelto. Pero todo es mucho más complejo, primero los eclipses se dan muy de tarde en tarde, no se ven en todo el planeta y necesitamos la longitud diariamente y además un reloj de arena no es el cronómetro ideal.

En estas andaba la humanidad cuando el astrónomo alemán Johannes Werner (1514) inventó uno de los principales métodos astronómico para el cálculo de la longitud, el método de la distancia lunar. La Luna recorre cada hora una distancia aproximadamente igual a su diámetro. Si los astrónomos a lo largo de años dibujan un mapa preciso de qué estrella va “tocando” y a qué hora exacta lo hace en el meridiano origen, observando este caminar

majestuoso desde otro punto cualquiera y con ese mapa en la mano, podríamos de igual forma conocer a qué hora (con relojes de arena muy malos aún) la Luna “toca” esa estrella de la bóveda celeste. Y por tanto, diferencia de horas, diferencia de longitudes y problema resuelto.

Pero también tenemos grandes problemas, no se conocían con precisión todavía los complejos movimientos orbitales de la Luna (precesión, nutación, etc...) y por otro lado no se podían medir distancias angulares de la Luna a las estrellas con suficiente precisión en un barco bamboleante en alta mar. Tiempo después se volvería a retomar el problema con mejores soluciones.

En 1610 aparece la rutilante estrella llamada Galileo Galilei. Como otros científicos él utilizaba parte de su potente cerebro en buscar una solución al problema de la longitud geográfica que no era baladí, incluso los cantantes y poetas de aquellos siglos lo utilizaban en sus “creaciones”, véase a modo de ejemplo la *Balada de Gresham College*:

*Medirá el Colegio en mundo entero,
empresa sin par en su magnitud:
será navegar paseo placentero
el día que al fin halle la longitud.
Cualquier marinero con facilidad
su barco a las antípodas llevará*

Debido a que Galileo fue una de las primeras personas que miró al cielo ayudado de telescopio, allí encontró un –creía él– perfecto reloj sideral, las lunas de Júpiter. El gran planeta tiene cuatro lunas Io, Ganímedes, ————, ————, que orbitan alrededor de él, e inmediatamente se dispuso a encontrar los ciclos de movimiento de estos astros, que hoy conocemos como Lunas Galileanas de Júpiter o Satélites Jovianos. Cada años se producen miles de ocultaciones de estos satélites que desaparecen tras la sombra del gigante y todo esto de forma totalmente predecible, por tanto

era el fenómeno cósmico simultáneo en toda la tierra que se estaba buscando para resolver el problema de la longitud.

Pero volvemos a tener problemas, Felipe III, Rey de España ofrecía una pensión vitalicia para quien resolviera el problema, pero sus asesores rechazaron el método, ya que los marinos no podrían ver los satélites en las horas diurnas, ni con la noche nublada. A ello hay que sumar que la observación es compleja ya en un observatorio en tierra firme con lo cual imaginemos en el mar con el constante balanceo del navío.

Para soslayar estas dificultades Galileo inventó un casco con un anteojo colimador, pero aún así reconoció que simplemente los latidos del corazón del observador situado en tierra firme, bastarían para hacer vibrar la visión del planeta joviano e imposibilitar la observación.

Después de su muerte —como suele ocurrir— se reconoció su invento y durante muchas décadas topógrafos y cartógrafos emplearon las lunas de Júpiter en tierra firme para calcular longitudes y elaborar unos mapas más exactos ya que hasta ese momento las distancias grandes (dentro de una nación) se aumentaban para contentar a los poderosos. Debido a estos nuevos mapas mucho más exactos se conoció la verdadera superficie de las naciones y Luis XIV de Francia dijo su famosa frase en la que se quejaba de “estar perdiendo más territorios a manos de sus cartógrafos que de sus enemigos”.

En 1680 Cassini, astrónomo italiano publicó sus tablas de eclipses de los satélites jovianos, tras muchos años de observaciones. Con ellas se predecía los momentos exactos de los eclipses, pero Roemer (astrónomo danés), comprobó un hecho que revolucionaría la ciencia. En la órbita de la Tierra alrededor del Sol, los eclipses se adelantaban a instante previsto cuando aquella se encontraba más próxima a Júpiter y se retrasaban en su punto más lejano. Esto era debido, como bien dedujo Roemer, al tiempo que la luz tardaba en recorrer el

diámetro de la órbita terrestre. Por tanto conociendo su radio vector medio se podía calcular con bastante precisión la velocidad de la luz, ya que los anteriores cálculos de su velocidad no funcionaron al tomar datos en distancias muy cortas. Con esta distancia “sideral” sí funcionó y la cifró —con muy poco error— en 300.000 Km/s.

Veamos ahora un método basado en las propiedades magnéticas de nuestro planeta, que como sabemos se comporta como un gigantesco dipolo. La humanidad conoce las variaciones magnéticas desde la época de los grandes descubrimientos. Desde siempre, el rumbo se ha trazado en el mar mediante brújulas “suspendidas” en balancines, por tanto se seguían las indicaciones que la brújula daba referidas al polo norte magnético, no al geográfico materializado por la estrella polar (en el hemisferio norte). Esta distinción sólo era vital cuando los marinos comenzaron a usar la latitud como modo de determinar la posición. Cuando navegaban siguiendo un paralelo, notaban que la aguja de la brújula variaba inesperadamente, la posición del norte magnético variaba con la posición del barco.

Ésto fue achacado equivocadamente por los portugueses —espantados al descubrirlo— a una deficiente sujeción de la aguja de la brújula o a movimientos submarinos de los lodos por las corrientes, pero la verdadera razón —sabemos ahora— que son alteraciones en el campo magnético terrestre que cambia de dirección de década en década y de lugar en lugar. El norte magnético cambia de posición continuamente. Imaginemos una bola con dos clavos uno en su polo de rotación y otro en un punto relativamente cercano. Al movernos superficie terrestre, las direcciones a los dos polos no coincidirán en ninguna situación salvo en los puntos situados en el meridiano “verdadero”, sus puntos tendrían la misma dirección para el norte magnético y el geográfico. Esas diferencias crecerían y decrecerían uniformemente a un lado y a otro del mismo.

Por tanto era lógico pensar que la dirección del norte magnético relativa al norte geográfico podría ser predicha en cualquier punto de la tierra, se podría tabular adecuadamente y usada por los barcos para calcular la longitud por comparación con la dirección del norte (medida observando el Sol o la Estrella Polar).

Pero, como viene siendo habitual en nuestra historia tampoco éste era el método ideal, primero el jefe de pilotos de la Flota Portuguesa, Juan de Castro y luego en matemático inglés Gellibrando, confirmaron que esta variación no era constante, dependía no sólo del lugar sino también del tiempo. Aún así Edmund Halley en 1700 trazó un detallado mapa del meridiano verdadero que recorría de este a oeste los actuales EEUU, cosa que produjo desconfianza entre los marinos. Pero hoy en día los satélites artificiales han confirmado la veracidad del mapa de Halley.

En líneas generales los marinos no confiaban en el método de las variaciones magnéticas. Se requería otra solución.

La solución mecánica

Como ya vimos antes, se superpusieron en el tiempo dos soluciones al problema de la longitud y ambas pugnaron por ser la única válida. Esta segunda solución, la más versátil, se conocía desde mucho tiempo antes, el problema era que la tecnología no era lo suficientemente avanzada como para "construir" el artefacto mecánico con suficiente precisión.

Si se lograra —en aquellas épocas— construir un buen marcador de tiempo, los navegantes podrían portar en el barco la hora del puerto base igual que se llevaban bidones de agua o utillaje marino. El astrónomo holandés Frisius (1535) designó al reloj como contendiente de los métodos astronómicos para hallar la longitud en el mar.

El método era sencillo, el reloj se ponía perfectamente en hora en el puerto de par-

tida (longitud conocida). Su marcha debería ser perfecta, de esa forma cuando estuviera la nave en alta mar, bastaría hacer una observación al Sol en su paso por el meridiano del lugar (12:00 h) y leer la hora en el reloj (que conserva el tiempo del puerto de partida); una simple resta de ambas horas nos daría el incremento de longitud entre el punto de observación en el mar y el puerto de partida. Como la latitud es fácil de obtener por observaciones a la estrella Polar o al Sol, el barco tendría una posición perfectamente definida en medio del océano.

Pero los relojes de 1560 eran notablemente imperfectos, podían, perfectamente, atrasarse o adelantarse de forma imprevisible hasta 15 minutos al día, por tanto no valían para estos menesteres. Fue Huygens, famoso físico heredero intelectual de Galileo, el que fabricó un primer reloj de péndulo y lo embarcó en naves que fueron a las islas de Cabo Verde con buenos resultados, pero en siguientes travesías revelaron que para funcionar relativamente bien necesitaban unas condiciones atmosféricas favorables, para evitar este problema, Huygens inventó una alternativa al péndulo, que se sigue conservando hoy en día, el muelle espiral de volante, que hace continua y regular la marcha de los relojes.

“Rarities”. Soluciones curiosas

1. Polvo de la simpatía.- Como ya hemos visto, el problema de la longitud era tan acuciante que se tenía por tema de conversación y discusión en las calles. Por tanto aparecieron oportunistas y charlatanes que ofrecían soluciones dignas de ellos. Esta es la más “original”. Según el francés Sir Digby, el polvo de la simpatía permitía “curar a distancia”. El método de uso era tomar un vendaje del ser herido (persona o animal) e impregnarlo del polvo milagroso. Sin necesidad de volver a ponerlo en la herida, ésta cicatrizaba pero no sin grandes dolores.

Aprovechando la curiosa propiedad, su inventor pensó en herir a un perro con un arma blanca, vendar la herida, retirar el vendaje y dejar éste en el puerto de partida. Cada día a una hora determinada, un "propio" impregnaría la venda con el polvo en cuestión, de esta forma, a cientos de millas de distancia ¡el perro ahullaría!. Esto quería decir que es la hora "H" en el puerto de partida, y con diferencia de horas, diferencia de longitudes y de nuevo problema resuelto.

Para que se pudiera emplear el método, no habría que permitir que curara la herida del perro o bien inferirle otras. Un poco cruel, la verdad.

2. Barcos Aislados.- Imaginemos un barco situado inmóvil en medio del océano durante meses en aquellos tiempos, con la misma tripulación y todas las inclemencias del mar. Esta era la base del método inventado por dos matemáticos ingleses, Whiston y Dutton que se dieron cuenta que el sonido en el mar se transmitía de forma óptima.

Se trataba de situar barcos en medio del mar que dispararan cañonazos en el momento que oyeran el estrépito del inmediatamente anterior. De esa forma se formaría una cadena de cientos de millas que irían transmitiendo los sonidos de forma que calculando la hora del primer cañonazo en el puerto y las distancias entre los barcos inmóviles y aplicando la velocidad de transmisión del sonido se podría calcular la longitud en cualquier punto de las proximidades de tal cadena. Idearon combinar los sonidos con luz (bengalas en las verticales de los barcos).

Pero está claro que las pegadas eran muchas, por un lado estaba el problema de las cadenas de las anclas. Se pensaba que la profundidad máxima del Atlántico era de 500m. cuando en realidad la media está en 3500m. con fosas de más de 6000 m. Por otro lado, existía el riesgo de ser abordados por barcos piratas, muy abundantes en aquellos días. El método, pues, contaba

con dificultades insuperables.

Todo esto hizo que "los capitanes de los navíos de Su Majestad Británica, los comerciantes de Londres y los capitanes de los buques mercantes" redactaron un documento en el que se pedía al Parlamento Británico que ofreciera una cuantiosa recompensa a quien fuera capaz de dar una solución al problema de la longitud.

El decreto de la longitud

El documento de petición antes citado, llegó al Palacio de Westminster en mayo de 1714 y en junio se formó una comisión parlamentaria para estudiar su conveniencia. Como primera medida se consultó a Isaac Newton y a su amigo Edmund Halley.

Newton en primer lugar se refirió al método del reloj "solución mecánica" para dejarla de lado y referirse después a sus soluciones astronómicas. Desechaba al reloj diciendo que era imposible construir un aparato que no fuera influido por los movimientos del barco ni por las diferencias de presión atmosférica ni de temperatura. Pero en su informe tampoco apoyaba un método por encima de otro, hacía hincapié en estar abiertos a cualquier solución de cualquier rama de la ciencia y grupo social o nación.

Reinando la reina Ana, el 8 de julio de 1714 se promulgaba el decreto de la longitud en el que aparecían varios premios en el orden siguiente:

- Si el método permite una indeterminación en el cálculo de la longitud menor que medio grado (50 Km. en el ecuador); 20.000 libras esterlinas (unos 5 millones de dólares actuales).
- Si la indeterminación es menor a 2/3 de grado; 15.000 libras.
- Si la indeterminación es menor a 1 grado; 10.000 libras.

Como podemos ver la precisión es muy baja y los premios enormes, ésto hace ver la desesperación de esta potencia marítima, que veía peligrar su economía al no contar con un buen sistema de cálculo de la longitud.

El Consejo de la Longitud, estaba compuesto por el director del Real Observatorio, el presidente de la Royal Society, el ministro de Marina, el presidente de la Cámara de los Comunes, el delegado del Ejército y varios catedráticos. A parte de esta ilustre composición, podían entregar premios como incentivos a algunos investigadores. Este poder de financiación hacía al consejo de la longitud el primer organismo oficial de investigación del mundo que se prolongó durante un siglo y gastó unas 100.000 libras.

La comprobación a la que debían someter el método propuesto consistía en ponerlo a prueba a bordo de una barco de la armada y soportar una travesía de Inglaterra a las Indias Occidentales y vuelta, obteniendo resultado en los límites fijados.

A lo largo de las décadas que se mantuvo en funcionamiento el Consejo, se estudiaron cientos de propuestas muchas de ellas –la mayoría– soluciones ridículas de personas de toda calaña, pero cabe destacar a Thacker (Inglaterra) que a la vez que ridiculizaba otros métodos, ponía un nombre a un reloj de su invención que proponía dos nuevos avances, una cámara de vacío cubierta con un cristal y un sistema de cuerda que permitía que la maquinaria no se parase al darle más cuerda (ambos inventos se mantienen hasta nuestros días), él lo llamó *crónometro*. Pero su reloj no soportaba los cambios de temperatura y podía tener errores, como el mismo reconocía de hasta seis segundos al día.

En esos momentos, Newton, se impacientaba por encontrar la solución, y opinaba que un buen reloj de los que tenían en esos años podría valer para mantener conocida la posición en el mar durante “unos pocos días” pero una vez perdida la posi-

ción en el mar, ningún reloj podría volverla a encontrar.

El carpintero relojero

Entra en escena el personaje más pintoresco e importante en esta pequeña historia de la longitud, John “longitud” Harrison. Como hemos visto, se sabía que con relojes precisos el problema que tratamos estaría resuelto, los cronómetros de Harrison fueron los primeros capaces de conservar el tiempo en un barco con suficiente precisión.

Nuestro héroe nació en 1693 en Yorkshire (Inglaterra) y durante sus primeros treinta años fue un perfecto desconocido que los empleó en formarse de modo autodidacta compaginando el estudio con su profesión de ebanista.

Antes de cumplir los veinte años construyó su primer reloj de péndulo sin haber sido aprendiz de relojero y aún existe; con una peculiaridad, está realizado en madera con pequeñas piezas de latón. Basándose en sus estudios de obras de matemáticos famosos unió al reloj una “tabla de la ecuación de tiempos”. Con ella se podía corregir la hora solar o verdadera para obtener la hora media. Esta corrección varía con la época del año.

No se sabe como le llegó a Harrison la noticia del Premio de la Longitud pero sí que él se lo tomó como un problema y le dedicó mucho tiempo de estudio incluso antes de que se creara el Consejo. En aquellos años recibió el encargo de un reloj para la torre de Brocklesby Park, que aún sigue dando la hora en nuestros días. Su principal peculiaridad es que la maquinaria no necesita aceite ya que la madera es guayaacán, que exuda una sustancia que sirve de perfecto lubricante.

Los “inventos” que hacían que los relojes de Harrison marcaran la hora con una inusitada precisión para la época eran dos, el primero la “parrilla”, consistente en un péndulo compuesto por varillas de dos diferentes metales alternados que podía so-

portar las diferencias de temperatura sin alterar la marcha del reloj, compensando dilataciones y contracciones. El segundo de los inventos fue el escape de "saltamontes", con él se controla el movimiento continuo que la energía de la cuerda transmite al mecanismo, de forma que va marcando el paso regular y perfecto del tiempo. La precisión que estos artilugios daban al reloj, era comprobada noche a noche por Harrison, basándose en el movimiento relativo de determinadas estrellas que entraban en el campo visual de su rudimentario observatorio 3 minutos y 56 segundos antes que la noche anterior y demostraban la perfección de su invento.

Mientras que los mejores relojes de bolsillo de la época tenían una variación en su marcha de aproximadamente 1 minuto al día la del reloj de Harrison se cifraba en 1 segundo al mes.

Con ese objetivo conseguido, Harrison se planteó el reto de la fabricación de un reloj marino. Pensando en ese fin, eliminó de su proyecto la idea del péndulo que no sería utilizable en el mar por el fuerte oleaje y desarrolló un dispositivo de engranajes que obtendría la energía necesaria de un muelle comprimido. Tras dedicar cuatro años a ese desarrollo se dirigió a Londres para presentar sus ideas al Consejo de la Longitud.

Ya en Londres, Harrison buscó la dirección del Consejo de la Longitud, pero no existía como tal y fue a visitar al director del Real Observatorio de Greenwich —Sir Edmund Halley— que le recibió con gran amabilidad y le indicó que visitara a George Graham, el mejor fabricante de relojes de la época. Tras su conversación, Harrison volvió a su pueblo con los ánimos de seguir con el proyecto recibidos de Graham y con un generoso préstamo sin intereses y sin fecha de devolución.

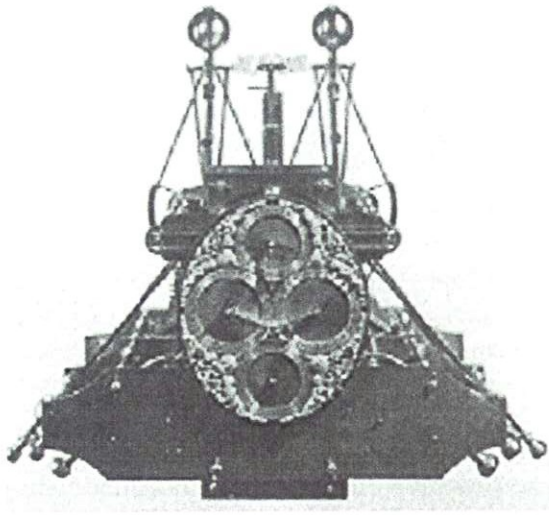
Los cinco años posteriores los dedicó Harrison a la fabricación del que se conoce como Harrison 1 (H-1), el primer reloj marino de la historia.

Al ver el reloj, parece que estamos delante de un extraño artilugio, mitad galera mitad máquina del tiempo ideada por un fantasioso novelista. Está fabricado en bronce con engranajes en madera. La esfera está compuesta a su vez por cuatro pequeños círculos, que miden las horas, minutos y segundos y el otro los días del mes. El artefacto pesa 34 Kg. y estaba cubierto por una caja acristalada cúbica de un metro de lado. En nuestros días el reloj se puede ver en el Museo Marítimo Nacional (U.K.) en una urna de cristal blindado, funcionando perfectamente y sin fricciones mecánicas.

Cuando el reloj estuvo terminado, Harrison entregó el reloj a Graham que lo presentó no al Consejo sino a la Royal Society en pleno que lo recibió con honores de héroe. El paso siguiente era realizar la prueba oficial exigida por el Consejo consistente en viaje de ida y vuelta a las Indias. Pero la orden del Ministro de Marina hizo que embarcara a Lisboa. El viaje de ida fue rápido (una semana) pero no así el de vuelta que debido a las calmas duró un mes. Cerca ya de la costa inglesa, gracias a su reloj, Harrison corrigió un grave error de posición que cometió el capitán, lo que le valió el reconocimiento del Consejo que se reunió por primera vez en veintitrés años para examinar el ingenio.

En esa reunión, estaban varios científicos y marinos, todos apoyaron el reloj a excepción de Harrison, que con su exacerbado perfeccionismo se dedicó a sacar pegadas técnicas a su creación. La oferta que hizo al Consejo consistió en disminuir el tamaño del reloj y mejorar aún más su precisión, para eso pidió 500 libras y dos años de trabajo. El Consejo aceptó entregar la mitad del dinero y propuso un viaje de prueba a las Indias a la vuelta del cual el reloj pasaría a ser propiedad del Consejo y por extensión del Estado.

Los dos años siguientes los empleó Harrison en realizar su siguiente proyecto, el H-2 que resolvería los problemas del H-1. El nuevo reloj estuvo terminado en 1739.



Cronómetro marino H-1.

Era más alto y más pesado (39 Kg.) pero tenía menos fondo cosa muy necesaria en un pequeño camarote. Las principales innovaciones fueron el "remontorio" que aseguraba que la fuerza sobre el escape era constante y un dispositivo más sensible para compensar los cambios de temperatura. Este reloj se sometió a durísimas pruebas en tierra pero nunca salió a la mar por dos motivos, el primero porque Harrison pensaba que era mejorable y el segundo porque los ingleses temían que pudiera ser capturado por los españoles.

Buscando esa perfección mediante las mejoras que creía necesarias en el H-2, Harrison se encerró en 1741 nada menos que durante 20 años para construir el H-3 su "curiosa tercera máquina". Sus apariciones eran breves y esporádicas con el fin de pedir al Consejo 500 libras y pasar a recogerlas. Pero durante este largo periodo el H-1 seguía maravillando a propios y extraños de forma que relojeros de todo el mundo viajaban a Londres para estudiarlo y hasta el gran pintor y escritor inglés Hogarth describe en su libro "Análisis de la Belleza" el H-1 como "uno de los mecanismos más exquisitos jamás realizados".

Con el H-3 buscaba la marcha perfectamente uniforme, idea utópica pero que la

mente perfeccionista de Harrison era la única que aceptaba. Era algo más pequeño y ligero que su antecesor y sustituyó las barras por "ruedas catalinas". Un freno bimetálico sustituyó a las parrillas metálicas para absorber las variaciones de temperatura. Pero tenía el serio inconveniente de ser imposible de ajustar sin desarmarlo y volverlo a montar lo que exigía gran habilidad y mucho tiempo.

La solución astronómica no se desecha

Como vimos al principio, las dos soluciones al problema de la longitud ocupaban a gran parte de los científicos del mundo. A mediados del siglo XVIII el método de la distancia lunar empezó a ser viable y fiable gracias a la unión de los esfuerzos de multitud de hombres de ciencia que colaboraron en esta gran empresa mundial. Muchos investigadores de todo el planeta aportaron su grano de arena, Hadley inventó el cuadrante, Flamsteed realizó 40.000 observaciones lunares y estelares, Tycho Brahe elabora un atlas del cielo, Halley descubrió las mutuas influencias entre Tierra y Luna.

Parecía que tuviera lugar una carrera entre los métodos astronómicos y mecánicos, de forma que en los anales de la ciencia se da igual importancia a las dos soluciones. El perfeccionamiento de la solución astronómica se logra gracias al cuadrante de Hadley que permitía medir mediante espejos la altura angular sobre el horizonte (materializado artificialmente para cuando no se viera el natural) de dos cuerpos celestes así como la distancia también angular entre ellos.

El cuadrante evolucionó hasta convertirse en sextante con telescopio y un mayor rango de medición. Con los detallados mapas estelares y el sextante, el navegante se posicionaba de pie en el puente del barco y medía la distancia angular

entre la Luna y una estrella o entre dos estrellas y la cotejaba con las tablas. Si había medido un ángulo " α " entre la Luna y la estrella " α -centáuro" a las "H" hora local (conocida por un reloj de mediana calidad puesto en hora cada día al paso del Sol por el meridiano del lugar de observación), buscaba a qué hora del lugar de origen (el puerto de partida de longitud conocida) se veían con ese mismo ángulo la Luna y la estrella y diferencia de horas, diferencia de longitudes.

Por otro lado Harrison daba la solución a tan complejo problema en una caja llena de engranajes. Como otras muchas veces en la Historia, en vez de recibir con plenitud los honores merecidos, se le sometería a multitud de desagradables pruebas que empezaron en 1759 recién terminada su obra magna, el cuarto reloj marino: el H-4.

El reloj perfecto

El siguiente objetivo de Harrison era disminuir el tamaño de sus relojes aunque nunca pensó en hacer uno tan minúsculo como para que cupiera en el bolsillo del capitán. Pero la idea de la disminución drástica del tamaño llegó de la mano de un artesano contratado por él, John Refferys. Siguiendo las indicaciones técnicas de Harrison, este relojero le regaló un instrumento de bolsillo para el uso personal de su maestro.

En este reloj se basó Harrison para realizar el reloj que definitivamente tuvo el premio de la longitud, el H-4 es grande para ser de bolsillo 133 mm. De diámetro y pesaba 1.300 g. Pero representaba la esencia de la sencillez, elegancia y precisión. Por primera vez se introducen diamantes y rubies para evitar el rozamiento sustituyendo a los "saltamontes" mecánicos de sus relojes grandes. Tiene un periodo de funcionamiento de 30 horas al darle una vez cuerda y no se para al realizar esta operación. Hoy en día no funciona ya que está considerado reli-



Cronómetro marino H-4.

quia casi sagrada, se le considera el reloj más importante jamás construido. Una de sus características es que Harrison no logró miniaturizar las ruedas antifricción y se vio obligado a ponerle lubricante.

La prueba de fuego del H-4 comenzó en octubre de 1761 cuando embarcó en el *Deptford* rumbo a Jamaica. El viaje duró dos meses y al llegar a Port Royal se determinó por medios astronómicos un retraso de 5 segundos, que corresponde a un error de longitud de 1,25 minutos (unas dos mil metros) muy por debajo de los dieciséis Km. que exigía el Consejo para entregar el premio de 20.000 libras.

Es bien cierto que Harrison tendría que haber recogido en ese momento el premio íntegro de la Longitud, pero diversas circunstancias lo apartaron de él. En la siguiente reunión del Consejo, se introdujeron tres nuevos matemáticos y se espetó al capitán que llevó el H-4 a Jamaica que porqué no se estableció la longitud de Port Royal con el método de las lunas de Júpiter, cosa que no sabía el capitán y tampoco lo hubiera sabido hacer.

El dictamen del Consejo en 1762 fue que "..... los experimentos realizados con el

H-4 no han sido suficientes para determinar la longitud en el mar...” el reloj ha de ser sometido a otra prueba hasta las Indias Occidentales. En vez de 20.000 libras Harrison sólo recibió 1.500 ya que aunque no se consideraba del todo fiable para calcular la longitud, sí tenía “utilidad pública”.

El verdadero “enemigo” de Harrison en aquel tiempo era Maskelyne que defendía con uñas y dientes el método de la distancia lunar y pretendía relegar el H-4 a ser mero comparsa en las mediciones astronómicas mejorando a los relojes normales. Y por ende, Maskelyne era uno de los principales encargados de juzgar el reloj de Harrison.

En 1764 el *Tartar* zarpó rumbo a Barbados con el H-4 y a la vuelta del viaje el Consejo dejó pasar varios meses sin dar un solo veredicto esperando que los astrónomos terminaran los cálculos para la medida de la precisión. Al final dieron la lacónica noticia de que “el reloj había funcionado con suficiente corrección”.

A continuación, el Consejo ofreció a Harrison la mitad del dinero con la condición que entregase todos los relojes marinos y desvelara sus secretos y si quería la totalidad del dinero, tendría que supervisar la construcción de dos copias del H-4 con el fin de comprobar que se podía fabricar en serie. Harrison accedió y al final pudo cobrar la mitad del importe del premio, pero pagando el precio de difundir los secretos de su preciada maquinaria.

Por otro lado, el método astronómico de la distancia lunar había sido mejorado en cuanto a la disminución del tiempo necesario para las observaciones. Con las tablas ya difundidas cualquier marino sería capaz de calcular la longitud en treinta minutos en vez de las cuatro horas iniciales.

Cuando Harrison era ya muy mayor y a pesar del mal trato recibido, terminó el primero de los dos relojes pedidos por el Consejo. Este se conoce actualmente como H-5

con gran complejidad mecánica, como el anterior pero un aspecto exterior más serio con gran parecido a una antigua brújula marina. Tardó 3 años en construirlo y lo terminó con setenta y nueve años, no le daba tiempo a realizar el segundo y se le acababa la vida para construir el segundo y no había conseguido el preciado premio al completo.

Pero aparece en escena el rey Jorge III que tenía un vivo interés científico y había seguido la última parte de la odisea de Harrison y en una audiencia que el rey concedió al hijo del relojero, aquel manifestó “...A este hombre le han tratado cruelmente ¡Por Dios, Harrison, yo me encargaré de que se le haga justicia!”. El H-5 se alojó en el observatorio real y no funcionaba correctamente hasta que el rey recordó que había almacenado unos poderosos imanes muy cerca del mismo, una vez retirados recomenzó su preciso latido. Tras arduas comprobaciones se llegó a la determinación de la precisión del reloj, cifrándola en 1/3 de segundo diario. Gracias a la intercesión del rey, Harrison, con la ayuda del Parlamento, recibió del Consejo 8.750 libras que casi totalizaban las 20.000 prometidas. Harrison, con su terquedad habitual no se dio por pagado, y no lo fue nunca en su totalidad, consideró que este dinero era una gratificación, más le llenaron las alabanzas de Cooke a la vuelta de sus viajes a los que se llevó el H-1 calificándolo de “reloj útil y valioso”, “guía infalible” y gracias a él elaboró cartas marinas de las islas del Pacífico sur con mucha mayor precisión que las existentes entonces.

Consecuencias de la resolución del problema de la longitud

Con la muerte de Harrison en 1776, gran cantidad de relojeros de todo el

mundo pretendieron, basándose en sus ideas crear instrumentos que sirvieran para resolver la longitud.

Las mejoras que permitieron construir relojes portátiles fueron tres: la primera sustituir como motor el peso por un resorte elástico equilibrando la fuerza con un husillo llamado "caracol". La segunda la introducción del escape de áncora y la tercera, prescindir del péndulo usando la elasticidad de un muelle.

La nación líder en este campo fue Inglaterra y la industria relojera pasó a ser puntera con todo lo que conlleva de dominio de la fabricación en serie con alta precisión. Esta necesidad de construir un mismo objeto complejo infinitas veces con exigentes criterios de exactitud hizo que se desarrollase de forma exponencial la medición industrial de alta precisión, es decir la **metrología**.

De esta forma los logros técnicos se encadenan, para fabricar relojes de calidad a buen precio hubo de perfeccionar tornos y otros instrumentos mecánicos, es decir, entrar en la mecánica de precisión, lo que unido a la máquina de vapor abrió la increíble puerta de la era industrial. La metrología hizo posible la fabricación en serie y de ese concepto se nutre en nuestros cualquier forma de fabricación de bienes de consumo y equipos.

Es más, mientras que los relojes de Harrison eran estudiados y analizados en detalle los marinos seguían calculando su posición por el método de la distancia lunar, pero en pocos años el precio de los relojes se fue reduciendo hasta que llegó a ser menor su coste que el de formar a un oficial naval en los complejos métodos astronómicos. De tal forma que el cronómetro marino ha sido el instrumento del que se han valido los navegantes hasta la muy reciente aparición de los sistemas de señales sustentados en satélites espaciales (Doppler, G.P.S., etc...)

En 1828 el Consejo de la Longitud se disolvió teniendo, irónicamente como función la supervisión de las pruebas de los

cronómetros y su asignación a los barcos de guerra ingleses. A modo de ejemplo el *Beagle* en 1831 llevaba a bordo veintidós cronómetros. En 1860 la Armada inglesa tenía 800 cronómetros para 200 buques. En poco tiempo el cronómetro pasó de ser algo extraño y maldito a algo cotidiano y esencial y su historia y su inventor quedaron sepultados en la Historia.

Todo lo anterior trajo como consecuencia el dominio inglés de los océanos y la posterior eclosión del Imperio Británico, ya que gracias a la precisión y la rapidez en el cálculo de las posiciones de los navíos los ingleses se adueñaron de los mares.

Por tanto Harrison logró incorporar la cuarta dimensión (el tiempo) a la obtención de nuestras tres dimensiones mantuvo una dura pugna con las estrellas, guardando toda su inmensidad en un instrumento que llevamos en nuestras muñecas.

Bibliografía

CARRASCO, E. & CARRAMIÑANA, Alberto: *Diario Síntesis* 10 junio 1998.

Cehopu, Expomanila. *Cedex. Ministerio de Fomento*.

MEDWIN, Jonathan: *The Discovery of Longitude & Invention of the Chronometer*. Oxford Ed. 1999.

DÉBARBAT, Suzanne: *Historia del enlace de los observatorios de París y Greenwich*. Observatorio de París. 2000.

Astronomy, (1976): *Achievement and Influence of the Royal Observatory Greenwich. 1675-1975*.

MARTÍN ASÍN, F.: *Astronomía*. Ed. Paraninfo. 1982.

DAVA SOBEL: *Longitud*. Ed. Debate. 1998.

HAROLD NAGEL, B.: *Latitud y Longitud terrestres*. Anécdotas. 1999.

HURTADO GARCÍA, J.A.: *Cálculo medieval de la longitud geográfica y la ciencia islámica*. 1999.

MARTÍN LÓPEZ, José: *Historia de la cartografía y de la cartografía*. U.P.M. 1995.

GRANADOS GONZÁLEZ, C.E.: *Historia de la Metrología*. U.P.M. 2000. ■