

Evolución de la Navegación Astronómica en el siglo XIX

Ibáñez Fernández, Itsaso¹

En este trabajo se da a conocer el estado de evolución que la navegación astronómica alcanzó en el s. XIX, algo que fue, en gran medida, resultado de la acumulación de procesos y saberes anteriores, a los que necesariamente debe hacerse referencia para una mejor comprensión y valoración de los avances en este siglo producidos.

Palabras Clave: Historia de la navegación astronómica. Historia de la náutica. Navegación astronómica. Siglo XIX.

Nabigazio astronomikoak XIX. mendean iritsitako eboluzio egoera ezagutzera ematen da lan honetan. Neurri handi batean hori lehengo prozesu eta jakiteak metatzearen ondorioa izan zen; aurreko ezagupen horiek ezinbestean aipatu behar dira, mende horretan gertaturiko aurrerabideak hobeto ulertu eta baloratu baditugu.

Giltza-Hitzak: Nabigazio astronomikoaren historia. Itsasketaren historia. Nabigazio astronomikoa. XIX. mendea.

Dans ce travail on communique l'état d'évolution atteinte par la navigation astronomique au XIX^{ème} siècle, ce qui fut, en grande partie, le résultat de l'accumulation de processus et de connaissances antérieurs, auxquels on doit nécessairement faire référence pour mieux comprendre et mieux évaluer les progrès obtenus au cours de ce siècle.

Mots-Clés : Histoire de la navigation astronomique. Histoire de la navigation. Navigation astronomique. XIX^{ème} siècle.

1. UPV/EHU. ETS de Náutica y Máquinas Navales. María Díaz de Haro, 68. 48920 Portugalete. E-mail: itsaso.ibanez@ehu.es

Desde la más remota antigüedad, los navegantes han recurrido a la observación de los astros visibles para orientarse y conocer su posición. Desde que Hiparco (s. II a.C.) fijara la suerte de la geografía y de la náutica a la de la Astronomía, todo marino ha debido conocer los rudimentos de la mecánica celeste y, a su vez, muchos de los avances en el estudio del movimiento de los astros han sido consecuencia de las propias necesidades que la navegación planteaba.

Durante siglos, la navegación estuvo condicionada por la dificultad de obtener las coordenadas geográficas (latitud y longitud) que definen la situación del buque en la mar. Desde antiguo, se sabía obtener la latitud, con suficiente precisión, por la observación de estrellas próximas al polo o del Sol a mediodía. Sin embargo, mayor problema ofrecía el cálculo en la mar de la longitud, considerado durante siglos “el límite puesto por Dios a la inteligencia humana”, que no sería solucionado satisfactoriamente hasta bien entrado el siglo XVIII.

En las páginas que siguen se da a conocer el estado de evolución que la navegación astronómica alcanzó en el siglo XIX. El desarrollo producido durante este siglo, considerado la “época dorada” de la navegación astronómica, fue, en gran medida, resultado de la acumulación de procesos y saberes anteriores, a los que necesariamente debe hacerse referencia para una mejor comprensión y valoración de los avances en él producidos.

1. NAVEGACIÓN ASTRONÓMICA: ¿DE QUÉ HABLAMOS?

La navegación marítima es una disciplina técnica que tiene por objeto la planificación, la dirección y el control de la derrota con el fin de que la navegación se realice de forma segura y eficaz. Para ello, resulta esencial:

- la disposición de cartografía náutica con la representación sobre un plano de la porción de la superficie terrestre donde se efectúa la navegación;
- la determinación precisa de las coordenadas geográficas, latitud y longitud, que proporcionan la situación del buque, tanto para evitar peligros como para detectar y corregir desviaciones respecto de la derrota planificada.

Precisamente, atendiendo a las técnicas empleadas para determinar la situación, la navegación marítima se divide en distintas ramas, una de las cuales es la navegación astronómica. En ésta, la situación se determina a partir de la observación de la altura de los astros sobre el horizonte (con ayuda del sextante), cuyas efemérides son conocidas (se encuentran en el *Almanaque Náutico*), precisado el instante de la observación (con un cronómetro marino). El cálculo requiere la resolución del triángulo de posición, construido sobre la esfera celeste, en las posiciones del polo, el astro y el zenit (representante del observador en la esfera celeste), utilizando la trigonometría esférica.

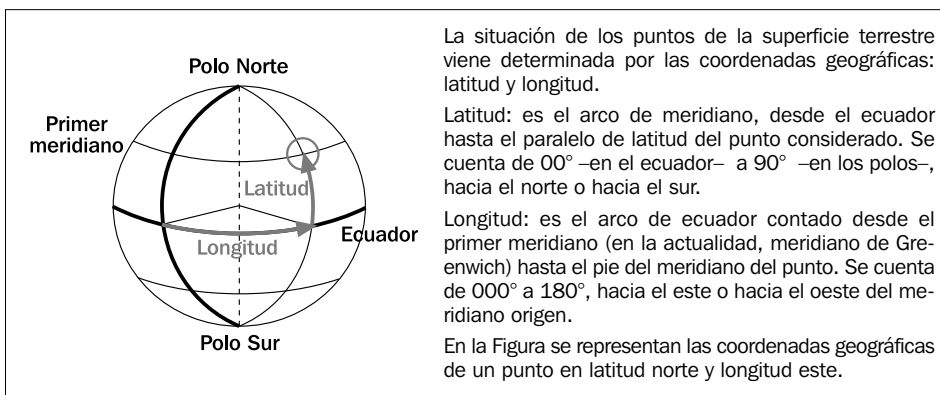


Figura 1. Coordenadas geográficas.

2. ANTECEDENTES: LA NAVEGACIÓN ASTRONÓMICA EN...

2.1. La Edad Antigua

Establecer el origen de la navegación marítima es empresa difícil. Es de suponer que es tan antigua como la humanidad, estando sus inicios condicionados por la localización de los grupos humanos, los recursos que el suelo les proporcionaba y el clima, además de por la disposición de herramientas que les permitiera la fábrica de embarcaciones.

Aunque en esta época prehistórica no pueda hablarse de la existencia de una verdadera técnica náutica, es de suponer que desde los orígenes de la navegación se necesitara disponer de algún elemento orientador, que garantizara un retorno seguro. Por ello, las primeras navegaciones debieron realizarse tan solo a la luz del día, sin alejarse de la vista de la costa.

Más adelante, los conocimientos de astronomía, permitieron ampliar la navegación al período de la noche. La marina fenicia parece haber sido la primera en aplicar sus conocimientos astronómicos a la navegación, utilizando las estrellas circumpolares para conocer la dirección del norte. También puede considerarse iniciadora de la navegación de estima, cuando por motivos comerciales ampliaron sus navegaciones al Mediterráneo occidental, haciendo necesario utilizar nuevos sistemas para situar y dirigir las naves, puesto que las nuevas costas les eran extrañas y no siempre podían mantenerlas a la vista. Incluso, según relata el historiador griego Herodoto (484-420 a.C.), en el siglo VII a.C., los marinos fenicios, al servicio del faraón Neco II, circunnavegaron África desde el Mar Rojo, navegando vía el Cabo de Buena Esperanza y el Estrecho de Gibraltar, concluyendo el periplo en el delta del Nilo al cabo de tres años. Aunque no disponían ni de brújulas, ni de correderas, instrumentos necesarios para conocer la situación por rumbo y distancia navegada, base de la navegación de estima, los fenicios utilizaban procedimientos alternativos: la brújula la sustituían por el conocimiento del movimiento diurno de los astros, y la distancia recorrida la estimaban por la práctica. Por ello, este pueblo ha sido considerado el inventor del “arte de navegar”. Sin embargo, aún era ésta una navegación muy rudimentaria que iría evolucionando a la par que otras ramas del saber humano.

La astronomía, que se venía cultivando de forma rudimentaria desde los comienzos de la Historia, alcanzó un considerable grado de perfección en la antigua Grecia. A Hiparco (s. II a.C.) se le atribuye haber fijado la suerte de la navegación a la astronomía, al proponer situar los puntos de la Tierra como los del firmamento, con un sistema de coordenadas geográficas que, perfeccionado, es el que hoy se emplea. Los conocimientos astronómicos en la Grecia clásica permitieron, ya en el s. IV a.C., obtener latitudes por la altura de estrellas próximas al polo o la observación del Sol a mediodía, siendo Hiparco el primero en utilizar un fenómeno del cielo, los eclipses de Luna, para calcular longitudes en tierra¹.

Sin embargo, los avances de esta ciencia no tenían entonces aplicación directa para la navegación práctica pues se carecía de instrumentos de observación apropiados para su uso a bordo, así como de cartas náuticas donde situar el punto y de técnicas para facilitar los cálculos necesarios. El elemento básico para determinar la derrota era la distancia navegada que medían en estadios y determinaban por la práctica, siendo su principal fuente de información los *periplos*. Semejantes a diarios de viaje, los periplos, que eran escritos o transmitidos oralmente, contenían una descripción de la costa, la distancia entre puertos, los lugares para obtener agua, leña y víveres, advirtiendo, además, de los vientos dominantes.

Por todo ello, sostiene Ricart, “el arte de navegar en la edad antigua fué más cuestión de atrevimiento que de ciencia”².

2.2. La Edad Media

En occidente, el arte de navegar progresó poco en el largo período de crisis que siguió a las migraciones de los pueblos nórdicos hacia el sur de Europa y la posterior irrupción árabe en el Mediterráneo. Aunque la coyuntura durante la Edad Media distara mucho de propiciar el desarrollo científico, se produjeron diversas innovaciones técnicas que favorecieron la aparición de centros comerciales en el norte de Europa. La extensión del comercio se vio acompañada de nuevos descubrimientos en el ámbito náutico, como el timón de codaste y el bauprés que aparecieron en Europa por primera vez en el siglo XIII, en los barcos de la Liga Hanseática. Asimismo, fue un producto de la Edad Media el aparejo de proa a popa que permitía dar bordadas contra el viento. Avances que mejoraron el gobierno de las embarcaciones, lo que permitiría la construcción de grandes veleros que podrían emplearse en la realización de viajes de altura.

1. Se basa esta determinación de longitud en saber en un instante dado la diferencia de hora que cuentan dos lugares, tal como se explica en la Figura 7. En este caso, el instante queda determinado por el comienzo de un fenómeno astronómico, el eclipse de Luna, observable desde distintos puntos de la Tierra. Aunque estas primeras determinaciones de longitud fueron poco exactas, los principios en que el método se fundaba eran excelentes. Perfeccionado con el tiempo el procedimiento de observación, sirvió para determinar longitudes en tierra con mucha exactitud, utilizando ocultaciones de estrellas y los satélites de Júpiter, descubiertos por Galileo en el siglo XVII. En la mar, en cambio, el método era impracticable por el obstáculo que para la observación práctica supone el movimiento del buque, por la dificultad de saber la hora en que sucedió el fenómeno observado en otro meridiano conocido y porque la frecuencia con que se producen estos fenómenos no era suficiente para corregir a menudo los errores de la estima.

2. RICART Y GIRALT, 1918; 326 p.

A los progresos mencionados debe unirse la aparición de la aguja náutica, instrumento que, por sí solo, impulsó la navegación marítima de tal forma que se ha equiparado al invento de la aviación y la aplicación de las técnicas de navegación aérea en nuestros días. En efecto, el problema fundamental que encontraban los modos primitivos de orientación era el de la visibilidad: con la falta de ésta se perdía el elemento orientador, haciendo aconsejable la interrupción de la navegación. Este obstáculo fue soslayado al comenzarse a utilizar la brújula en la mar. Aunque su origen y fecha de invención son muy discutidos, Fernández de Navarrete³ mantiene que en el siglo XII la brújula ya era empleada en la mar, aunque no con carácter general.

La brújula se fue perfeccionando. La utilizada en el siglo XIII se reducía a una varilla de hierro imantada colocada en un listón de madera o corcho que se hacía flotar sobre el agua dentro de una vasija. De entre las primeras, sobresale la mejora, introducida por el napolitano Flavio Gioya, que hizo su uso más sencillo y general entre los navegantes. Gioya, hacia el año 1302, inventó el método de suspender la aguja en un eje perpendicular, sobre el cual pudiese girar libremente y permanecer horizontal, a pesar de los balances del barco. La caja que protegía esta aguja de la intemperie recibió, inicialmente, el nombre de *bossola*, en cuyo fondo se podían grabar los principales rumbos, dando lugar a la *rosa de los vientos*. Más tarde ésta pasaría a ser dibujada en un disco de cartón, manteniéndose la caja en equilibrio por medio de la suspensión actualmente denominada cardán o de Cardano. Las brújulas se guardaban en una caja grande o armario, la *bitácora*, que solía instalarse junto al palo de mesana, de forma que sus indicaciones pudieran ser observadas por el timonel.

El uso de la aguja de marear proporcionó seguridad en el mantenimiento de los rumbos, facilitando acortar las singladuras internándose en alta mar. También tuvo como resultado que los *periplos* se convirtieran en libros *portulanos*, incluyendo, además de la información habitual, los rumbos para navegar entre puertos. Como consecuencia directa de la combinación del portulano y de la aguja, tuvo lugar el origen de las primeras *cartas de marear*, que aparecieron en época no determinada del siglo XIII. Se trataba de *cartas arrumbadas* o *portulanas*, caracterizadas por representar gráficamente la geografía costera, de acuerdo con los rumbos indicados por la aguja y las distancias registradas en los portulanos.

Estas primeras cartas, que carecían de coordenadas geográficas, estaban dibujadas bajo un entramado de rectas de vientos o rumbos y permitían señalar las derrotas a seguir, disponiendo, asimismo, de los *trancos de leguas* con módulos de distancia para medidas itinerarias. Su reducido tamaño impedía la generosidad en detalle, por lo que los libros portulanos fueron su complemento perfecto, llegando a nuestros días con el nombre de derroteros.

La carta portulana utilizada en los mares europeos permitía navegar por estima: según el rumbo de la aguja de marear y la distancia, estimada “a ojo”. Con esta información, se situaban en la carta, obteniendo el denominado *punto de fantasía*, utilizando para trazar la derrota alguno de los rumbos dibujados en la carta portulana y la distancia estimada medida en el tronco de leguas.

3. FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, 1846; 62 p.

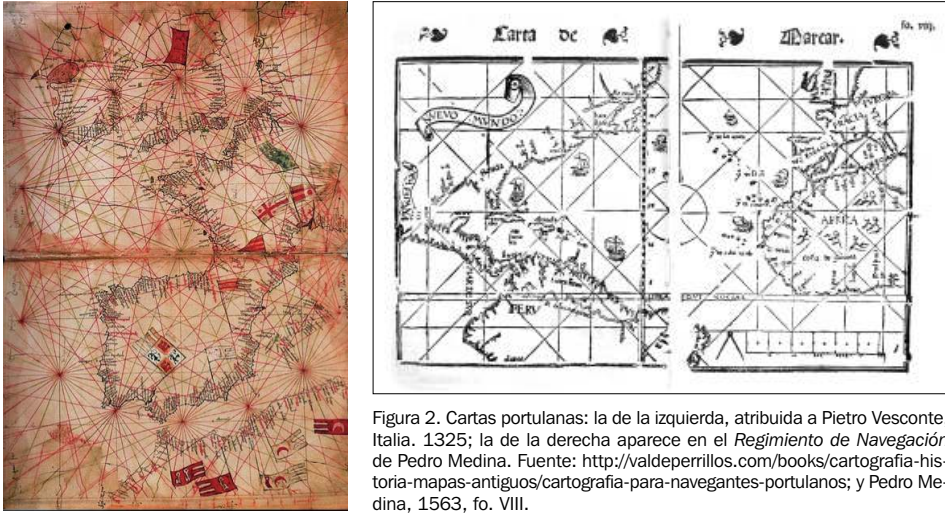


Figura 2. Cartas portulanas: la de la izquierda, atribuida a Pietro Vesconte, Italia. 1325; la de la derecha aparece en el *Regimiento de Navegación* de Pedro Medina. Fuente: <http://valdeperrillos.com/books/cartografia-historia-mapas-antiguos/cartografia-para-navegantes-portulanos>; y Pedro Medina, 1563, fo. VIII.

Pero, si bien la aguja facilitaba una orientación aproximada, no permitía situarse con exactitud en la mar. Los defectos de esta navegación no fueron relevantes hasta la época de los descubrimientos. En este período, al alejarse los barcos mucho de la costa, para poder situarse con cierta precisión, se hizo necesario desarrollar la navegación astronómica.

2.3. La época de los grandes descubrimientos

Los escasos progresos que experimentó la náutica en la Edad Media, fueron suficientes para permitir emprender la conquista de los océanos⁴. Y, a su vez, los problemas que fue planteando la navegación oceánica produjeron un avance considerable en la técnica náutica.

La navegación, costera o de altura, por los mares de Europa recurría al cálculo de la situación por estima (rumbo y distancia), obteniendo el punto de fantasía que se trazaba en las cartas portulanas, lo que bastaba para llegar al puerto de destino de forma segura. El cálculo de la latitud por la observación de la estrella Polar servía para recalcar a un lugar de la costa de latitud conocida, pero no se utilizaba para trazar la situación en la carta.

La navegación de fantasía (por rumbo y distancia) resultaba adecuada cuando las naves no se alejaban mucho de costa, pero no era suficiente en alta mar, donde transcurrían días sin divisar tierra. En estas circunstancias, para determinar la derrota a seguir, hacía falta conocer el lugar preciso donde se encontraba la nave. Para obtener mayor exactitud

4. Hay que mencionar en este punto que la visión de la época de los grandes descubrimientos europeos debe ser revisada a la luz de los trabajos de Gavin Menzies, que muestran cómo Dias, Colón, Magallanes o Cook, no hicieron sino navegar tras la estela de las grandes flotas del tesoro chinas que cartografiaron el mundo tras los viajes que realizaron entre 1421 y 1423.

al “echar el punto”, se hizo necesario recurrir a la observación de los astros. Se adoptó un nuevo punto, llamado de *escuadría*, obtenido por rumbo navegado y latitud observada, que ofrecía más confianza que el de *fantasía*.

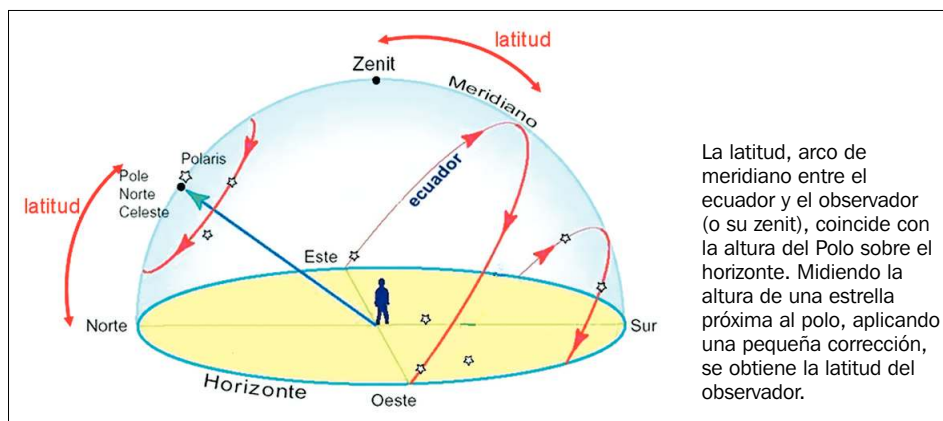


Figura 3. Cálculo de la latitud por la observación de la altura del Polo sobre el horizonte. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen en: <http://belenos.wordpress.com/2007/12/28/localizando-la-estrella-polar/>

El arte de navegar renacentista se caracterizó por la utilización de todos los recursos a disposición de los navegantes, combinando fundamentos técnicos con prácticas empíricas, sin diferenciar claramente la navegación por estima de la astronómica. La novedad más importante de la navegación oceánica fue el recurso a la observación de la altura de los astros, aunque reducido casi exclusivamente a la determinación de la latitud geográfica. Los navegantes del siglo XVI calculaban la latitud, con bastante aproximación, con ayuda del astrolabio, cuadrante y ballestilla, por la observación de estrellas próximas al polo o del Sol a mediodía. La introducción en el arte de navegar de este último método se considera una innovación portuguesa, cuando al navegar por la costa africana dejaron de ver la estrella Polar.

Las cartas de marear se adaptaron. La introducción de la latitud geográfica como coordenada para el cálculo de la situación trajo consigo la necesidad de incluir una escala de latitudes en las cartas portulanas. Pero, éstas estaban construidas de forma que eran isógonas –o conformes, esto es que los ángulos sobre la superficie terrestre eran iguales a los representados en la carta– sólo cuando se utilizaban en la navegación de fantasía y dejaban de serlo si el trazado de los rumbos se hacía entre puntos determinados por latitud observada, no adaptándose adecuadamente, por tanto, a las exigencias de la navegación de *escuadría*.

Por ello, las cartas portulanas se sustituyeron por las cartas planas que, pese a sus deficiencias, servían mejor a las nuevas exigencias. Orientadas hacia el norte verdadero, se construían en base a las coordenadas geográficas ortogonales, latitud y longitud, obteniéndose esta última en tierra, aprovechando los eclipses de Luna u otras efemérides astronómicas. A pesar de que se utilizaron en la navegación hasta el siglo XVIII, estas

cartas, que utilizaban escalas de partes iguales para medir la latitud y la longitud, no tenían la propiedad de conformidad, no eran isógonas, por lo que los rumbos no podían ser representados por líneas rectas.

La carta plana, con paralelos equidistantes, no resolvía uno de los problemas de la navegación: que la trayectoria de un barco con rumbo fijo pueda representarse en la carta por una línea recta. Esto planteaba dos cuestiones distintas: la curva que describe sobre la superficie terrestre el buque que navega con un rumbo fijo; y la construcción de la carta de manera que esa curva esté representada por una recta.

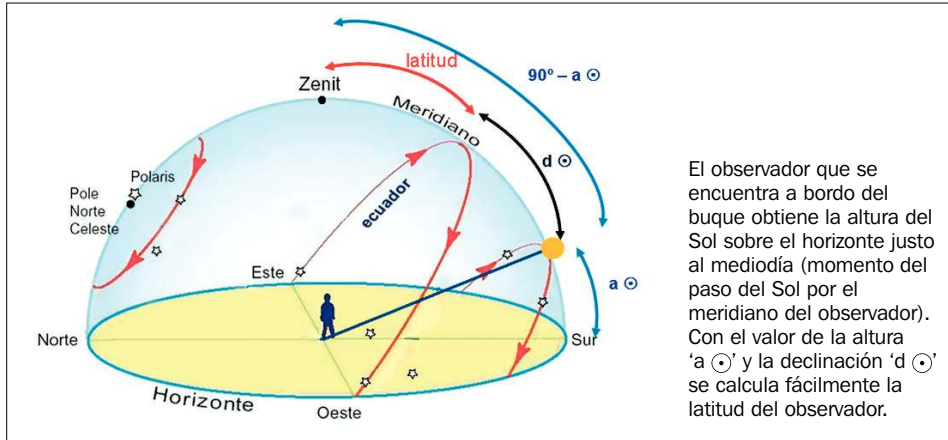


Figura 4. Cálculo de la latitud por la observación del Sol a mediodía. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen en: <http://belenos.wordpress.com/2007/12/28/localizando-la-estrella-polar/>.



Libro segundo de la altura del Sol.



Libro tercero de la altura del Norte.

Figura 5. Observación con astrolabio y ballestilla. Fuente: Pedro Medina, 1563.

Las bases para superar los defectos inherentes al sistema de proyección de las cartas planas las sentaría el portugués P. Núñez (1502-1578) y el flamenco G. Mercator (1512-1594). Núñez formuló la noción de loxodromía o línea espiral sobre la esfera que corta los meridianos que atraviesa con un ángulo constante. La navegación según un rumbo verdadero, se denominaría loxodrómica y con este nombre ha llegado a nuestros días. Su práctica sería facilitada si esta línea pudiera trazarse en las cartas planas como una línea recta, como sucedía en las cartas arrumbadas; pero, Núñez no alcanzó a realizar esta transformación. La representación que solucionaría este problema fue ideada por Mercator en 1569, al conseguir una proyección conforme, de latitudes proporcionalmente aumentadas, en función de la secante de la latitud, basada en un desarrollo policilíndrico directo de la esfera terrestre, que utilizaba como meridiano cero el de las Islas Canarias.

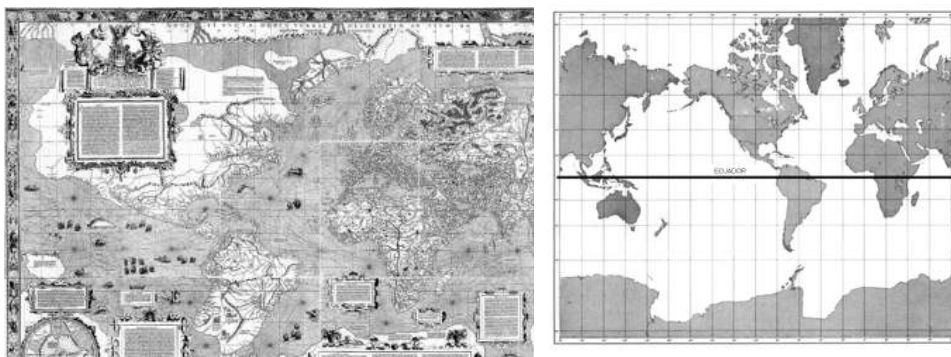


Figura 6. Carta Mercator de 1569: “*Nova et aucta orbis terrae descriptio ad usum navigatium emendata et acomodata*”; y una representación actual de la superficie terrestre sobre una carta de proyección Mercator. Fuente: calighula.wordpress.com/.../01/mercator-falaz/; e Ibáñez y Gaztelu-Iturri, 2002; 61 p.

A diferencia de la latitud, la obtención de la longitud en la mar, constituyó un problema que no tendría solución práctica hasta bien entrado el siglo XVIII.

En el siglo XVI, como se ha visto, los navegantes sabían calcular la latitud con bastante aproximación, sin embargo, las dificultades existentes para encontrar un procedimiento para hallar la longitud, también denominada en la época *altura del este-oeste* o *punto fijo*, llevaron a algunos a decir que éste “era el límite puesto por Dios a la inteligencia humana”⁵.

La falta de un método que proporcionara la segunda coordenada geográfica planteaba dificultades no solo para la seguridad y el desarrollo de la navegación, afectando tanto a los marinos como a los intereses comerciales, sino también de índole política. Esta cuestión adquirió gran relevancia a consecuencia del Tratado de Tordesillas (1494), por el que se fijaba la línea divisoria para el reparto, entre españoles y portugueses, de las nuevas tierras descubiertas y por descubrir. El meridiano de demarcación se situaba

5. MARTÍNEZ HIDALGO, 1946; 75 p.

370 leguas al oeste de las Islas de Cabo Verde: todos los territorios situados al oeste de la misma pertenecerían a Castilla, mientras que los ubicados al este serían de Portugal. La comisión hispanoportuguesa encargada de fijar la línea se encontró con el problema de medir las 370 leguas hacia poniente, desde Cabo Verde. Además, no se excluían futuras discrepancias pues no quedó establecido, en el Pacífico, el correspondiente antimeridiano de demarcación. Surgió entonces la disputa por las apreciadas Islas de las Especierías –Islas Molucas– y para solucionar la contienda, se celebró, en 1524, la Junta de Badajoz, en la que toda la discusión se centró en la verdadera longitud del grado de meridiano. Por parte española asistieron a la junta el cartógrafo Diego Ribero (-1533) y Hernando Colón (1488-1539). Allí, el hijo del descubridor expuso el método de los relojes portátiles para determinar la longitud, pues si se dispusiera de un instrumento que midiera:

horas e cuartas e fracciones, y con el instrumento comenzar a caminar desde el lugar do comienza la partición al punto del mediodía, y cuanto caminase más al Oriente por cada quincena parte de hora que el mediodía viniese al caminante antes de haber corrido 24 horas, diremos que había caminado un grado hacia el Oriente o, por el contrario, hacia el Occidente⁶.

Hernando Colón fue el primero en indicar el método del reloj portátil al que poco más tarde, en 1530, también se referiría Gemma de Frisia (1508-1555) en su obra *De principiis astronomiae et cosmographiae*.

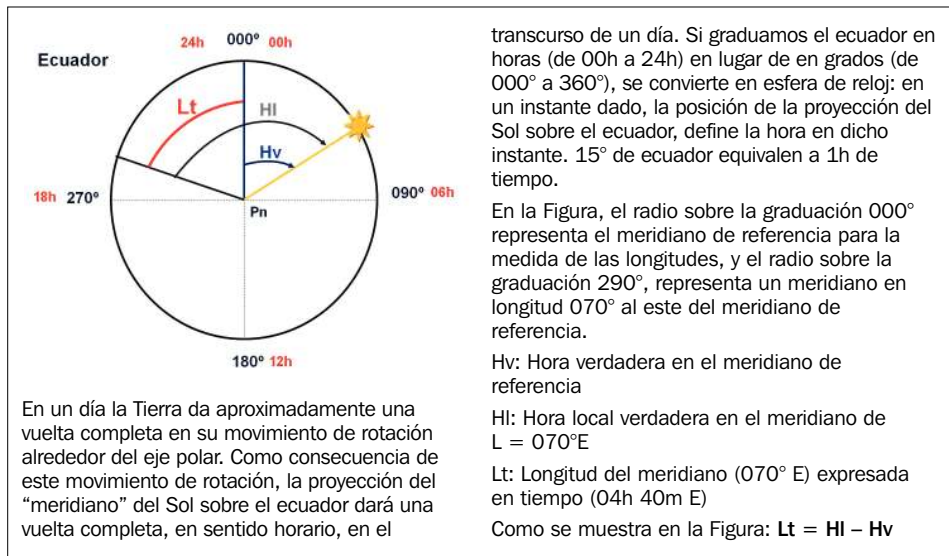


Figura 7. La longitud es la diferencia de horas que se cuentan en dos lugares en un instante dado.

6. Tal como se cita en LÓPEZ PIÑERO, 1979; 194 p.

El problema estaba claramente definido: de la comparación entre la hora a bordo, y la que tiene, en el mismo instante, otro lugar de longitud bien determinada, se obtiene la diferencia en longitud entre ambos lugares. Los marinos sabían cómo calcular la hora a bordo, para lo que disponían de algunos instrumentos –astrolabio, nocturlabio, reloj solar universal– y, posteriormente, de la resolución del triángulo de posición, tras observar la altura de un astro. Pero, la resolución del problema requería, además de la hora local, el conocimiento de la hora de un meridiano de referencia.

Para este fin, además de la solución del reloj mencionada, se propuso una solución astronómica. John Werner de Nuremberg, parece haber sido el primero en recomendar el método de observar la distancia de la Luna a las estrellas para determinar la longitud de los lugares. En las anotaciones que hizo sobre el primer libro de la *Geografía* de Ptolomeo, que publicó en 1514, Werner argumentaba que la distancia angular entre la Luna y las estrellas próximas al camino que parece recorrer en la esfera celeste, varía rápidamente, por lo que si, para un meridiano determinado, la posición de la Luna se pudiera predecir con exactitud, se sabría qué hora es en ese meridiano, y comparando ésta con la hora local, se tendría la diferencia en longitud entre ambos lugares. Casi al mismo tiempo, Pedro Apiano (1495-1552), profesor de matemáticas en Ingolstadt, escribía en su *Cosmografía* que el mejor medio de determinar las longitudes era observar la distancia de la luna a una estrella, poco distante de la eclíptica⁷.

Aunque resuelto en teoría, debido a la deficiente precisión de los rudimentarios instrumentos disponibles y al insuficiente conocimiento de la mecánica celeste, la solución al cálculo de la longitud en la mar resultaba impracticable en la época.

2.4. La transición a la navegación científica

El siglo XVII supuso un siglo de transición para el arte de navegar. Los textos comenzaron a tener en cuenta las refracciones, paralaje y semidiámetro para la corrección de las alturas observadas, aunque con imprecisiones tanto conceptuales como en los valores asignados, que normalmente eran despreciadas por la mayoría de los pilotos. La astronomía y el triángulo esférico también comenzaron a introducirse, intentando los manuales de navegación de la época persuadir a los marinos de las ventajas que obtendrían de la aplicación de la trigonometría esférica.

Aunque las tablas de funciones trigonométricas se conocían desde la antigüedad, el cálculo se facilitó notablemente gracias a los logaritmos, dados a conocer, en 1614, por su inventor, el escocés John Napier (1550-1617).

La astronomía también recibió en este siglo un impulso importante. En 1543 había aparecido en Nuremberg la obra *De revolutionibus Orbium Coelestium* en la que N. Copérnico (1473-1543) daba a conocer su sistema heliocéntrico. Aunque el sistema copernicano no fuera perfecto, postulando el movimiento anual de la Tierra iniciaría el proceso de re-

7. FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, E. 1852; 14 p.; COTTER, 1969; pp. 23-24.

forma de la Astronomía medieval, abriendo el camino para el completo desarrollo matemático de un nuevo sistema. A partir de Copérnico, se intensificaron los estudios astronómicos, siendo los más significativos en el proceso de cambio los trabajos de Tycho Brahe (1546-1601) y Johannes Kepler (1571-1630).

Brahe realizó su obra principal en Uraniborg, el observatorio especialmente construido para él en Dinamarca. Su principal contribución al progreso de la astronomía se produjo en el campo de la observación. Su trabajo más importante fue el registro de sus precisas observaciones de los planetas, que servirían de base a su discípulo Kepler para elaborar sus leyes de la mecánica celeste. Además de enunciar las tres leyes de los movimientos planetarios, Kepler intentó, sin éxito, formular una nueva cosmología en la que éstas pudieran encajar. Problema que sólo sería resuelto cuando Isaac Newton (1642-1727) formuló su teoría de la gravitación universal –*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687– en la que combinaba las leyes planetarias de Kepler con la dinámica terrestre de Galileo Galilei (1564-1642).

Además de por sus trabajos sobre el movimiento de los cuerpos, Galileo es conocido por su dedicación a la astronomía, aplicando a la observación de los fenómenos celestes un instrumento óptico inventado en la primera década del siglo XVII: el telescopio⁸. A partir de entonces, indica Cohen,

[...] la astronomía jamás volvió a ser lo que era. Pero estos cambios revolucionarios (que incluyen la demostración visual de la falsedad del sistema de Ptolomeo) no fueron “producto” del telescopio sino de la mente de Galileo al extraer conclusiones copernicanas y heterodoxas de sus observaciones con el instrumento⁹.

En efecto, partidario de la teoría heliocéntrica, Galileo utilizó sus descubrimientos¹⁰ para probar la veracidad del nuevo sistema del mundo, por lo que finalmente tendría que enfrentarse a la Inquisición.

De la mano de Galileo, Kepler y Newton, la astronomía iniciaría una nueva etapa que, en lo que a la navegación se refiere, contribuiría a posibilitar la determinación de la situación en la mar, pues el conocimiento preciso de las leyes que rigen la mecánica celeste permitiría preparar tablas de efemérides con un alto grado de exactitud.

A pesar de que en el siglo XVII se produjeron estos importantes avances en el cálculo y en la astronomía, que allanarían el terreno para el avance de la náutica en el siglo XVIII, los progresos producidos en el arte de navegar fueron en realidad pocos en lo puramente práctico. Tanto es así que, en opinión de Guillén, a finales del siglo XVII podría haber constituido actualidad la frase de Hernando Colón: “en el arte de la navegación hay tres cosas principales que en ella sirven, que son altura, carta y aguja”¹¹, que en poco se di-

8. Galileo fue el primero en utilizar el telescopio para observar el cielo. Aunque lo perfeccionó, él no inventó este instrumento, debido al parecer a Lippershey, H. (1570-1619), un fabricante de lentes holandés.

9. COHEN, 1989; 25 p.

10. Descubrimientos que sería publicados en su mayor parte en 1610 en su obra *Sidereus nuncius*.

11. GUILLÉN TATO, 1935; 494 p.

ferenciaban de los elementos que los marinos usaban en el ejercicio de su arte cuatro siglos antes, a saber: “carta, compás, aguja, y la estrella del mar”, citados por Ramón Llull en su obra *Arbol cuestional*¹².

2.5. El siglo XVIII: la resolución del “punto fijo”

El principal progreso que en materia náutica tuvo lugar en el siglo XVIII fue la resolución al problema que el cálculo de la longitud en la mar venía planteando de forma real desde el siglo XV. Sin duda, una influencia decisiva para este feliz desenlace fue el apoyo institucional a la investigación, a través de la concesión de sumas elevadas para recompensar a quien propusiera una solución adecuada al problema, la creación de sociedades científicas o la fundación de observatorios.

El premio ofrecido en España en 1598 y los que se ofrecieron en Portugal, Venecia y Holanda durante los diez años siguientes, no dieron los frutos deseados. Inglaterra y Francia, donde más tarde se imitaría esta iniciativa, dedicaron en principio sus esfuerzos a organizar una investigación sistemática. Así, teniendo como antecedentes las Academias italianas, en 1660, Carlos II de Inglaterra (1630-1685) fundó la *Royal Society of London*. Poco después, siguiendo el modelo británico, pero imprimiendo un mayor control estatal, Luis XIV (1638-1715) fundó en Francia, en 1666, la *Académie Royale des Sciences* y el Observatorio de París.

En 1674, Carlos II de Inglaterra concedió audiencia a un francés, Le Sieur de St. Pierre, quien, rechazando el sistema de las lunas de Júpiter que hacía furor en Francia, proponía hallar la longitud por el método de las distancias lunares que ya J. Werner había avanzado hacía más de un siglo y medio. Para estudiar esta propuesta el rey solicitó el informe pericial de un joven astrónomo, John Flamsteed (1646-1719). Según éste, el método era sensato en teoría pero impracticable, puesto que aún no existía un mapa correcto de las estrellas ni se conocía la ruta de la Luna. Flamsteed propuso el establecimiento de un observatorio para que se realizara el trabajo necesario que permitiera la aplicación del método. El rey aceptó y, en 1675, fundó el Observatorio de Greenwich, específicamente establecido con el objeto de perfeccionar la navegación y la astronomía, al frente del cual colocó al propio Flamsteed, de quien se requería dedicara

the most exact care and diligence to rectifying the tables of motions of the heavens, and the places of the fixed stars, so as to find out the so-much desired longitude at sea, for perfecting the art of navigation¹³.

La Academia francesa, puede considerarse pionera en la determinación de la longitud en Tierra. Esta institución, además, organizaría, durante la primera mitad del siglo XVIII, expediciones a Perú (1734-1743) y a Laponia (1736-1737) para la medición de la ex-

12. Según cita FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, 1846; 70 p.

13. Royal Warrant de 4 de marzo de 1675, dirigida por Carlos II a John Flamsteed, según se cita en: SOBEL, 1995; 31 p.

tensión del grado de meridiano terrestre en las proximidades del ecuador y lo más al norte posible, información que serviría para determinar la verdadera forma y dimensiones de la Tierra¹⁴.

Inglaterra, sin embargo, aventajaría a Francia en la solución al cálculo de la longitud en la mar. Los episodios de naufragios por el desconocimiento de tan conflictiva coordenada se venían sucediendo, cayendo la gota que colmó el vaso la noche el 22 de octubre de 1707, cuando murieron dos mil hombres al hundirse la flota del Almirante C. Shovell (ca. 1650-1707) en las rocas de las Sorlingas¹⁵. La proximidad y magnitud de este suceso, en el que desaparecieron cuatro buques de guerra en aguas inglesas, convirtieron el asunto en un escándalo público, lanzando el tema de la longitud al primer plano de los intereses nacionales. En 1714 el sector naviero en pleno solicitó al Parlamento inglés un incentivo institucional que favoreciera el descubrimiento de la longitud.

Tabla 1: Error diario del cronómetro permitido en un viaje de 40 días para conseguir la exactitud en la longitud especificada en el Acta de la Reina Ana (1714)

Premio (£)	Precisión en longitud minutos de arco de ecuador (')	Error total permitido en la hora en 40 días minutos (m) segundos (s)	Error diario permitido en la hora segundos (s)
10.000	60'	4 m	6 s
15.000	40'	2 m 40 s.	4 s
20.000	30'	2 m	3 s

Fuente: BERTELE, 1991; 32 p.

El Parlamento oyó un informe de Newton al respecto: los eclipses de los satélites de Júpiter no eran adecuados para este fin por las dificultades de su observación a bordo; la teoría de la Luna no era aún suficientemente exacta para permitir utilizar el método de las distancias lunares; ni tampoco se tenía aún la tecnología necesaria que permitiera fabricar un reloj marino de precisión que no se viera afectado por los movimientos de buque, las variaciones de temperatura y humedad o las diferencias de gravedad en diferentes latitudes. Este fue el origen del famoso Decreto de la Longitud, promulgado por la reina Ana (1665-1714) el 8 de julio de 1714, en el que se establecían tres premios: 20.000 libras esterlinas para un método que determinara la longitud con un error no su-

14. Las expediciones geodésicas organizadas por la Academia de París tenían como objeto aclarar definitivamente la cuestión de la verdadera figura de la Tierra, y así poner fin a la polémica existente entre newtonianos, defensores de una Tierra achatada por los polos –parecida a una naranja–, y algunos astrónomos franceses como Picard, La Hire o los Cassini, que habían llegado a la evidencia experimental de que la Tierra estaba achatada por el ecuador –como un limón–.

15. Este caso y otros similares han sido magníficamente relatados por SOBEL, 1995; pp. 11-20.

perior a medio grado; 15.000 si el error no era superior a dos tercios de grado y 10.000 si el error no excedía de un grado¹⁶.

Enormes sumas para métodos a los que no se pedía gran exactitud (el margen de error concedido era de aproximadamente 55 km. para el premio mayor y 111 km. para el menor, en latitudes ecuatoriales). Sólo el deplorable estado de la navegación explica que un gobierno estuviese dispuesto a conceder tales sumas, cuya importancia ilustra Williams¹⁷ señalando que Flamsteed comenzó como astrónomo real con un sueldo anual de 100 libras esterlinas, debiendo adquirir con cargo a este estipendio los instrumentos necesarios para equipar el Observatorio.

Con el transcurso de los años, se producirían los avances científicos y tecnológicos necesarios que permitieron materializar la solución al problema de la longitud a través de dos métodos: las distancias lunares y el cronómetro. Como es sabido, el problema de las longitudes se reduce a determinar en un instante dado, la diferencia de horas que se cuentan en dos lugares. Conocidos por el marino los procedimientos para obtener la hora a bordo, solo restaba poder saber en cualquier momento la hora que se cuenta en un meridiano de longitud conocida.

2.5.1. Las distancias lunares

Fue éste el primer procedimiento astronómico que proporcionaba una longitud de confianza en la mar. Al igual que con el cronómetro, con la aplicación de este método se perseguía obtener la hora del primer meridiano en cualquier instante. Si se conocen con exactitud las posiciones de las estrellas y el movimiento de la Luna, pueden tabularse las posiciones de ésta respecto de aquéllas a intervalos regulares. Precisamente en esto consistían las denominadas tablas de distancias lunares, que ofrecían, para las horas de un meridiano de referencia, las distancias angulares verdaderas entre el centro de la Luna y el centro del Sol y de las estrellas zodiacales principales.

El método requería, además de la obtención de la altura de los astros sobre el horizonte, la observación de la distancia angular a que se encontraba la Luna de ciertas estrellas, con una precisión dentro del minuto de arco.

La parte más complicada era la reducción de la distancia observada (D_o) a verdadera (D_v). En la actualidad, se resolvería sin dificultad utilizando una calculadora, pero en la época, requería el uso de tablas logarítmicas o de senos naturales. Por ello, la aplicación práctica del método asustaba a la mayor parte de los pilotos quienes, en general, tenían una formación matemática muy precaria. Los esfuerzos se encaminaron a simplificar las fórmulas y abreviar los cálculos.

16. El Decreto creaba también el Consejo de la Longitud (*Board of Longitude*) que, bajo el control del Almirantazgo inglés, se encargaría de evaluar las propuestas recibidas. Newton seguiría siendo influyente sobre esta materia debido, en parte, al hecho de que fue encargado de establecer los tres niveles de exactitud especificados en el Acta de 1714 (un grado, dos tercios de grado y medio grado), siendo, asimismo, “el desafortunado académico” a quien el Secretario del Almirantazgo enviaría, para ser examinadas, buena parte de las propuestas recibidas. v. ANDREWES, 1998; 190 p.

17. WILLIAMS, 1994; 81 p.

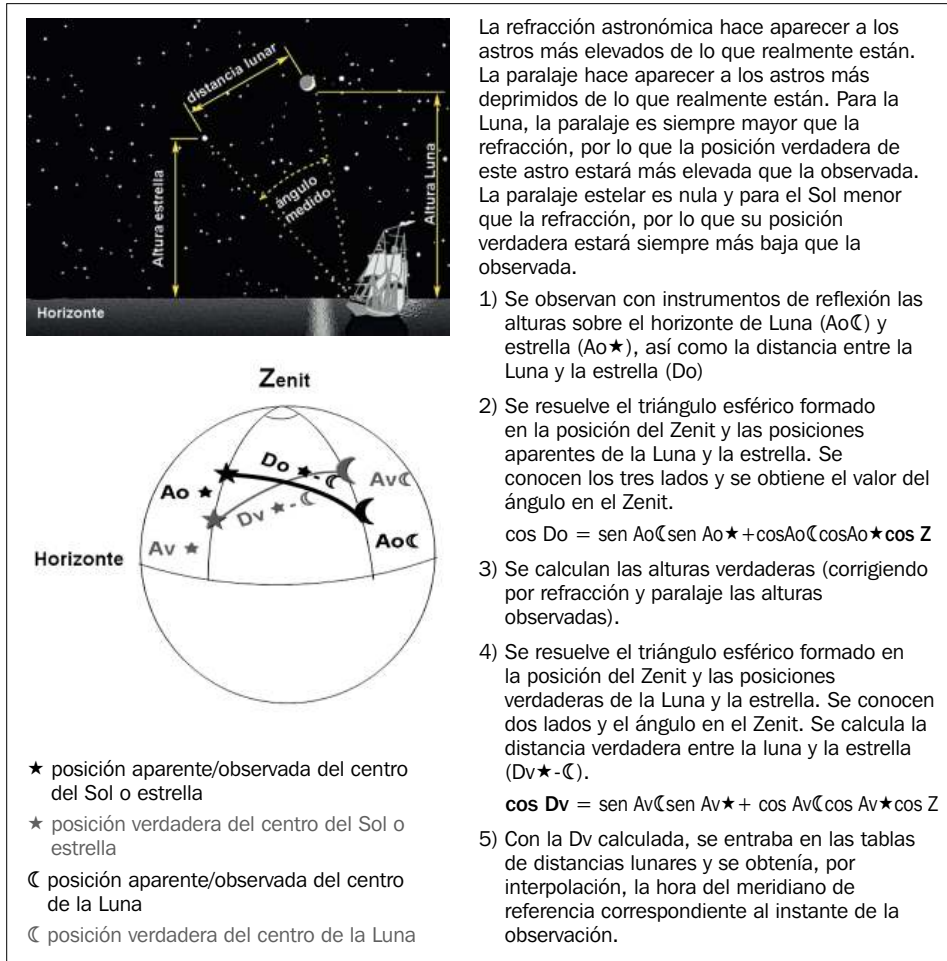


Figura 8. Método de las distancias lunares. Fuente: Elaboración propia, excepto la imagen, que ha sido tomada de http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia_lunar, y arreglada.

En resumen, la aplicación del método de las distancias lunares para la determinación de la longitud, fue propiciada por la concurrencia de diversos factores, entre los que se incluyen:

- la capacidad de elaborar exactas tablas de distancias lunares que, por una parte, hubieron de ser calculadas y, por otra, puestas a disposición de los marinos a través de publicaciones especializadas;
- la precisión en la medida de la altura de los cuerpos celestes sobre el horizonte, así como de la distancia angular entre astros, conseguida gracias a los instrumentos de reflexión y a la corrección de las alturas observadas; y
- la disposición de los medios adecuados para facilitar los cálculos necesarios.

Las tablas de distancias lunares alcanzaron un grado de exactitud suficiente para las necesidades de la navegación gracias al trabajo de Tobias Mayer (1723-1762), quien elaboró unas tablas lunares que envió al *Board of Longitude* inglés en 1755. Una vez comprobada su precisión, Nevil Maskelyne (1732-1811) en 1765, año en que fue nombrado astrónomo real, publicó por primera vez el *Nautical Almanac* para el año 1767, incluyendo estas efemérides astronómicas para ser empleadas por los marinos¹⁸.

Basados en los principios ópticos de la reflexión de la luz en los espejos planos, los instrumentos de reflexión proporcionaron la precisión necesaria para la medida de la altura de los cuerpos celestes sobre el horizonte, así como de la distancia angular entre astros. Con los nuevos instrumentos, se conseguía, además, reunir horizonte y astro en una misma visual, observando uno directamente y el otro reflejado en un espejo, lo que supuso un notable progreso respecto de sus predecesores. Aunque no se pueda considerar a John Hadley (1682-1744) como el inventor de los instrumentos de reflexión, su segundo diseño de octante, presentado en 1731 en la *Royal Society* londinense, es el que ha llegado a la actualidad, tras sufrir diversas transformaciones y convertirse en 'sextante'. Fue el capitán J. Campbell (1720-1790) quien, tras probar en la mar el octante de Hadley, concluyó en la necesidad de aumentar el arco de éste y, en 1757, encargó al instrumentista John Bird (1709-1776) la construcción de un sector de reflexión de 60 grados, lo que supuso el nacimiento del sextante.

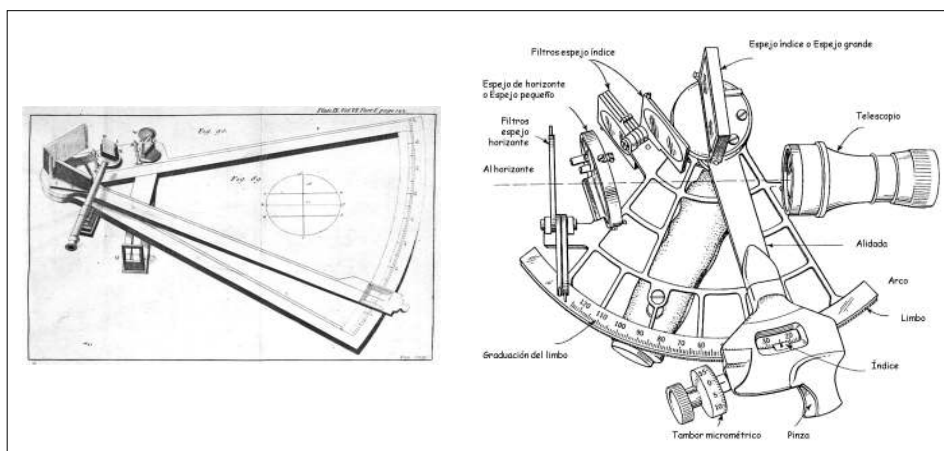


Figura 9. Segundo modelo de octante de Hadley y un sextante moderno. Fuente: Octante: *Transactions of the Royal Society*, nº 420, 1733. En: Sellés, 1994; 113 p. Sextante: Ibáñez y Gaztelu-Iturri, 2002; 473 p.

18. Sin embargo este no era el primer almanaque náutico publicado, pues en Francia J. Picard (1620-1682) comenzó a publicar la *Connaissance des Temps* en 1679. Desde 1761, la *Connaissance* ofreció, para intervalos de doce horas, las posiciones de la Luna, que eran calculadas según el método de Mayer. No obstante, esta publicación no incluiría de forma sistemática tablas de distancias lunares hasta el año 1774, reproduciendo entonces las del *Nautical Almanac*, arregladas para el meridiano del Observatorio París. La publicación de tablas en España siguió la línea de las iniciadas por ingleses y franceses. En 1786, el *Estado General de la Armada* comenzó a publicar un apéndice con las tablas de efemérides astronómicas extraídas de la *Connaissance des Temps*. En 1791 se imprimió en Madrid el primer *Almanaque Náutico* español para el año 1792.

Por otra parte, la mejora de los instrumentos y la aplicación del método de las distancias lunares, fueron los hechos fundamentales que obligaron a introducir entre los pilotos la práctica de corregir debidamente las alturas observadas. Tablas con estas correcciones se incluirían en manuales, almanaques y colecciones de tablas náuticas.

Por último, para que el método lunar fuera practicable, resultaba imprescindible proporcionar a los marinos medios de cálculo, a la vez sencillos y suficientemente precisos, para reducir la distancia lunar verdadera. Fueron numerosos los procedimientos que se desarrollaron para este fin, entre los que destaca el método dado a conocer por J. Mendoza y Ríos (1763-1816), en 1795. Este método fue ampliamente aceptado y sus célebres tablas –necesarias para su aplicación– estuvieron listas en 1800 y, posteriormente, fueron editadas en varios idiomas.

2.5.2. El cronómetro marino

El procedimiento del cronómetro entrañaba una única, aunque no pequeña, dificultad: el diseño de un reloj portátil, de precisión, para mantener a bordo la hora del primer meridiano.

En el siglo XV, ya se habían construido algunos relojes mecánicos portátiles, pero podían presentar errores de hasta quince minutos al día. Habría que esperar tres siglos para que se inventara un reloj con la precisión suficiente que hiciera posible el cálculo de la longitud en la mar.

Los relojes mecánicos constaban fundamentalmente de un mecanismo oscilador, generador de la base de tiempos, cuyos movimientos debían ser isócronos y un sistema transmisor de éstos a una aguja que señalaba la hora sobre una muestra. La falta de isocronismo del oscilador en estos primeros relojes era la principal causante de su inexactitud, que sólo sería superada en la segunda mitad del siglo XVII con la introducción del péndulo y del balancín con resorte.

Galileo ya había concebido la idea de utilizar un péndulo como regulador del movimiento de un reloj, aunque al parecer fue C. Huygens (1629-1695) el primero en utilizar correctamente este artificio en 1657. Las pruebas realizadas a partir de 1662 mostraron que los relojes de péndulo no son adecuados para su uso en la mar pues se ven afectados por el movimiento del buque. Además, una expedición científica francesa demostró, en 1673, que el período de oscilación de un péndulo varía con la latitud, destruyendo así las posibilidades de los relojes de péndulo de convertirse en relojes de longitud.

Huygens abandonó el péndulo y en 1675 empleó el resorte espiral como mecanismo regulador del movimiento isócrono del balancín¹⁹. Sin embargo, aunque el de Huygens fue el mejor reloj marino en su momento, tampoco era adecuado para ser empleado en la mar, debido fundamentalmente al error producido por los cambios de temperatura. A

19. El balancín consistía básicamente en un disco o rueda que venía a reemplazar al péndulo (y a otros dispositivos anteriores) como mecanismo oscilador, al acoplarle un resorte en espiral que le suministraba la fuerza necesaria para mantener un movimiento de oscilación isócrono en torno a su eje.

pesar de ello, gracias a Huygens la relojería sufrió una transformación y, como señala García Franco: “ya pudo ser realidad la utilización en la mar del reloj mecánico, y se abrió una nueva era a la navegación. Faltaba sólo conseguir regularidad en la marcha de estos relojes portátiles”²⁰.

Los premios ofrecidos en Inglaterra y Francia constituyeron un incentivo real para la producción de nuevas ideas, algunas de las cuales implicaron pequeñas mejoras en los relojes marinos. Entre estas contribuciones destacan las debidas a J. Thacker (ca. 1714), el primero en utilizar el término cronómetro, inventor del resorte auxiliar que mantenía la máquina en funcionamiento mientras se le daba cuerda, o H. Sully (1680-1728), quien montó su último modelo sobre una suspensión cardán, pero ninguno de los relojes producidos demostraron ser utilizables en la mar²¹.

El primer cronómetro marino de probada eficacia fue el cronómetro número uno (H-1) de John Harrison (1693-1776). Pero, Harrison no acababa de estar satisfecho ni con éste y ni con otros dos modelos (H-2 y H-3) que diseñó en los años siguientes, que resultaban grandes y excesivamente pesados²². En 1759 Harrison acabó su célebre H-4 que se asemejaba a un reloj de bolsillo, con un diámetro de 127 milímetros y tan solo 1.360 gramos de peso. El H-4 se probó en 1761 a bordo del *HMS Deptford*, en un viaje de Portsmouth a Jamaica. Tras ochenta y un días en alta mar, el H-4 sólo se había retrasado cinco segundos, lo que le daba derecho a la recompensa de 20.000 libras esterlinas. Sin embargo, Maskelyne estaba probando las tablas de Mayer y el método de las distancias lunares estaba casi a punto. El *Board of Longitude*, compuesto fundamentalmente por astrónomos, decidió conceder 1.500 libras a Harrison, requiriendo pruebas más estrictas para el H-4. Finalmente, en 1773 y tras la intervención personal del rey Jorge III (1738-1820), J. Harrison recibiría la parte de la recompensa que le faltaba por recibir.

Al tiempo que Harrison resolvía en Inglaterra²³ el problema de la longitud en la mar, se producían progresos notables en Francia en el mismo sentido, con F. Berthoud (1727-1807) y P. Le Roy (1717-1785), aspirantes al premio señalado en su país en 1720 a quien diese un procedimiento seguro para hallar durante la navegación el punto de la nave con un error inferior al medio grado en seis semanas. Retirado el primero, la Academia francesa aprobó el modelo de Le Roy en 1773, aunque no recibió premio en metálico. El cronómetro marino diseñado por Le Roy era superior al H-4 de Harrison y sería tomado como modelo incluso por los relojeros ingleses.

La navegación astronómica, que implica la obtención de la latitud y longitud por medio de la observación de astros, fue posible a partir del momento en que el método de las

20. GARCÍA FRANCO, 1947, I; 354 p.

21. Las propuestas que se realizaron a consecuencia de los premios ofrecidos pueden encontrarse en GOULD, 1923; pp. 32 y ss.

22. Para detalles técnicos de los tres primeros cronómetros marinos de Harrison, véase, por ejemplo: ANDREWES, 1998; pp. 189-234.

23. Hay que mencionar que, además de Harrison, otros relojeros ingleses se dedicaron a diseñar cronómetros marinos, entre los cuales destaca Thomas Mudge (1715-1794), cuya labor llegó incluso a ser recompensada por el *Board of Longitude*.

distancias lunares se hizo asequible a los marinos. Este procedimiento sería de ordinario utilizado para el cálculo de la longitud en la mar hasta mediados del siglo XIX, cuando los cronómetros comenzaron a ser instrumentos habituales en los barcos, al poder adquirirse a un precio asequible: a finales del s. XVIII los buenos cronómetros eran escasos y podían costar unas 500 libras esterlinas, mientras que un buen sextante y las publicaciones necesarias para el método lunar podían adquirirse por 20 £.

3. PROGRESOS DE LA NAVEGACIÓN ASTRONÓMICA EN EL S. XIX

Al comenzar el siglo XIX, por tanto, ya estaba al alcance de los marinos la determinación de las dos coordenadas geográficas de la posición del buque por medios astronómicos. Pero, el rápido progreso de la navegación a vapor y el constante aumentar de la velocidad, trajo consigo la necesidad de vigilar con más frecuencia la situación de la nave, lo que exigía la mejora de los procedimientos de la navegación astronómica.

No obstante, a pesar de los defectos inherentes a la navegación de estima, en esta época era un recurso imprescindible pues, a diferencia de la navegación astronómica, proporcionaba la situación del buque en cualquier instante, estando en ocasiones los pilotos obligados a confiar exclusivamente en ella. Con la llegada de los buques rápidos y la consiguiente importancia que el factor tiempo adquirió en el comercio marítimo, cobró gran importancia la exactitud en el rumbo y la distancia navegada, pues un pequeño error en la estima podía dar, al finalizar la singladura, una diferencia notable en la situación de la nave, aún sin tener en cuenta el efecto de la ignorada corriente marina. En este sentido, la fiabilidad de las indicaciones de compases, correderas y relojes, adquirió la máxima importancia.

En lo que se refiere a la navegación astronómica, en las décadas finales del siglo XVIII, gracias a J. Arnold (1734-1799) y T. Earnshaw (1749-1829), los relojes marinos fueron perfeccionados, mejorándose igualmente el proceso de fabricación. Mediado el siglo XIX, una vez pudieron ser producidos en cantidad suficiente, a un coste asequible, su uso se extendió en la mar, siendo normal a partir de entonces encontrar dos, tres o incluso más cronómetros a bordo de buques en rutas transoceánicas.

Durante el siglo XIX, los pilotos depositaron su confianza en los cronómetros y fueron abandonando paulatinamente las distancias lunares, método que se seguiría utilizando durante algún tiempo para comprobar los cronómetros. Las tablas de distancias lunares se dejaron de publicar en el *Almanaque Náutico* español en el volumen calculado para 1905, y en el *Nautical Almanac* inglés para el año 1906.

Aunque la determinación simultánea de latitud y hora local era posible, el trabajo analítico a realizar ofrecía demasiada complicación y requería mucho tiempo, por lo que, en la práctica de la navegación, se tendía a determinar de forma aislada e independiente cada una de las coordenadas geográficas, operando con fórmulas más sencillas que proporcionaban buenos resultados, si se tenía la precaución de observar en circunstancias favorables. Así, a mediados del siglo XIX, era una práctica habitual la obtención del punto al mediodía por el método conocido como “meridiano y horario”.

3.1. Método “meridiano y horario”

778. EJEMPLO I.—El 12 de Mayo de 1874, á las 8 de la mañana, se tomó una serie (*) de alturas de Sol, navegándose desde dicha hora hasta el medio día al S. 54° O. corregido, distancia 34 millas.

Elevación del observador 20 pies. Error de índice del instrumento = 35".

Fatido absoluto del cronómetro el día 12 á 0^h de T_m en S. Fernando +1^h 20^m 19^s.

Movimiento diario = 4", 5.

Latitud observada al medio día 34°. 32'.. 30" N. Se pide la longitud á medio día.

Parte del cálculo que se hace antes del medio día.

PROMEDIO DE LA SERIE.

Altura de ☉= 34°. 48' .. 20"	Hora del cronómetro = 21 ^h .. 12 ^m .. 14 ^s , 6
" "= 34 .. 50 .. 30	" "= 21 .. 12 .. 47
" "= 34 .. 53 .. 10	" "= 21 .. 13 .. 16, 6
Suma= 152 .. 00	Suma= 38 .. 18
½ Suma= 34 .. 50 .. 49	½ Suma= 21 .. 12 .. 46

Hora verdadera de S. Fernando y elementos de las efemérides.

Estado absol. ^o día 12 á 0 ^h +1 ^h 20 ^m 19 ^s , 6	☉ día 12 á 0 ^h= +18°. 10' .. 02", 6
Parte prop. mov. por 22 ^h , 5 = 4, 3	V. h. +37, 70 × 22, 5 = +14 .. 08, 3
Estado el día 12 á 22 ^h , 5 = +1 .. 20 .. 15, 2	☉ corregida= +18 .. 24 .. 10, 9
Hora del cronómetro = 21 ^h 12 ^m 46 ^s	Δ= 71 .. 35 .. 49, 1
Estado absoluto= +1 .. 20 .. 15, 2	Ec. ^o de tiempo el 12 á 0 ^h = -3 .. 02", 33
Hora media en S. Fer. = 22 .. 33 .. 01, 2	V. m. h. = 0 ^o , 05 × 22 ^h , 5 = -1 .. 13
Ecuación de tiempo= + 3 .. 53, 6	Ecuación corregida= -3 .. 53, 46
H. en San Fernando = 22 .. 36 .. 54, 7	

Determinación de la altura verdadera.

Altura observada= 34°. 50' .. 40"	Error del instrumento= - 35
Altura aparente ☉= 34 .. 50 .. 05	
D = -4' .. 24" }= - 5 .. 39	
-R + P = -1 .. 16. }	
Altura verdadera ☉= 34 .. 44 .. 26	
Semi-diámetro= + 15 .. 01	
Altura verdadera central ☉= 35 .. 00 .. 17	

(*) Cuando se observan varias series, se halla la longitud correspondiente á cada una de ellas y se toma después el promedio de los resultados.

Parte del cálculo que se hace después del medio día.

DETERMINACION DEL PUNTO DE ESTIMA.

Humbro corregido = S. 54° O. Dist. = 34'. Dif. en lat. = 20' S. Apart. = 27', 5 O.
Lat. el día 13 á medio día = 34°. 32'. 30" N. Lat. media = 34° } Dif. long. 33' O.
Dif. en latitud estimada = + 20. 00 S. Apartam. = 27', 5 }
Latitud el día 12 á 20 ^h = 34 .. 52 .. 30

Cálculo de la hora verdadera del observador. ()*

Altura verdadera ☉ = 35° .. 00' .. 17" cosec = 0,02280
Δ= 71 .. 35 .. 49 sec = 0,08397
Latitud= 34 .. 52 .. 30	
Suma= 141 .. 28 .. 36	
½ Suma= 70 .. 44 .. 18 cos = 0,51838
Diferencia= 35 .. 44 .. 01 sen = 0,76642
Horario Oriental= 3 ^h .. 58 ^m .. 40 ^s versos = 0,39357
21 ^h - Hor. ^o Or. ^o = hor. ^o Oc. ^o = 20 .. 01 .. 20	

Determinación de la longitud.

Hora verdadera en S. Fernando= 22 ^h .. 36 ^m .. 54 ^s , 7	
Hora verdadera del observador= 20 .. 01 .. 20	
Long. el día 12 á 20 ^h = Diferencia= 2 .. 35 .. 34, 7 = 38°. 53' .. 40" O.	
Diferencia de longitud estimada= + 33 .. 00 O.	
Longitud del observador el día 13 de Mayo a 0 ^h= 39 .. 26 .. 40 O.	

Figura 10. Ejemplo práctico del cálculo de la situación por el método “meridiano y horario”. Fuente: Fernández Fontecha, 1875, II, pp. 262-263.

Este procedimiento requería una observación de la altura del Sol en las proximidades del vertical primario (preferiblemente por la mañana, aunque también podía tomarse por la tarde), y otra a su paso por meridiano. Ésta proporcionaba la latitud y aquélla la longitud, que se trasladaba por estima para tener la situación al mediodía.

El modo de operar era el siguiente: observada la altura de la mañana y anotada la correspondiente hora del cronómetro, se empezaba el cálculo del horario, el cual quedaba sin terminar por no conocerse la latitud; pero se ganaba tiempo, adelantando parte del trabajo a realizar. Al mediodía se observaba la altura meridiana del Sol, de la cual se deducía inmediatamente la latitud; se pasaba de ésta a la latitud estimada para el momento de la observación de la mañana; con ésta se obtenía la longitud estimada para dicho instante y, finalmente, aplicando a esta última la diferencia en longitud estimada, se obtenía la correspondiente longitud a mediodía. El procedimiento empleado queda documentado en la Figura 10, con el ejemplo resuelto por F. Fernández Fontecha (1834-1886) en la primera edición de su *Curso de astronomía náutica y navegación* (1875).

En 1847, este procedimiento fue perfeccionado con la aplicación del “coeficiente Pagel”, que facilitaba una más rápida obtención de la situación a mediodía²⁴.

24. La deducción y empleo del coeficiente Pagel puede consultarse en: IBÁÑEZ, 2002; pp. 132-135.

3.2. Otros cálculos de latitud y longitud

Aunque el método “meridiano y horario” fuera el más utilizado, otras soluciones se habían propuesto para la obtención de las coordenadas geográficas, antes de que se hiciera factible calcularlas de forma simultánea²⁵.

En lo que se refiere a la latitud, destacan en este siglo los avances producidos para obtener esta coordenada por dos métodos preexistentes, basados en observaciones extrameridianas de los astros: por alturas circunmeridianas y por dos alturas del Sol y el intervalo entre las observaciones, conocido como “problema de Douwes”.

El cálculo de la latitud por alturas circunmeridianas, cuya historia se remonta a mediados del siglo XVIII, adquirió en el s. XIX su forma actual. La esencia de este procedimiento es conseguir, a partir de la observación de un astro en las proximidades del meridiano, la altura meridiana con la que obtener la latitud. El método de reducción al meridiano dado a conocer por Delambre (1749-1822) en 1814, fue el que trascendió y, con pequeñas variaciones, es el procedimiento que puede encontrarse en los tratados de navegación del siglo XX.

El cálculo de la latitud por dos alturas extrameridianas del Sol y el intervalo de tiempo transcurrido entre ambas observaciones, se hizo asequible cuando C. Douwes dio, hacia 1740, su procedimiento indirecto. A pesar de no dar siempre resultados suficientemente exactos, la solución de Douwes tuvo gran aceptación entre los marinos pues consiguió reducir el cálculo considerablemente. Este procedimiento fue luego estudiado, entre otros, por J. Sánchez Cerquero (1784-1850), quien, en 1823, ofreció a los pilotos una solución sencilla y exacta.

En cuanto a la obtención de la longitud, ya se ha comentado que el procedimiento cronométrico “meridiana y horario” fue el preferido por los pilotos, y para ello resultaba fundamental la exactitud de la hora proporcionada por estos instrumentos. Antes de que se dispusiera de radioseñales horarias, se utilizaban diversos procedimientos para comprobar o “arreglar” los relojes. Además del mencionado método de las distancias lunares, entre los utilizados para este fin destaca el procedimiento de las alturas correspondientes que, al igual que el método lunar, servía también para obtener la longitud. Este método, que ya había sido utilizado para calcular la corrección de los relojes en el siglo XVII, era en realidad un caso particular del problema de Douwes, basado en la observación de dos alturas iguales de un astro, una a cada lado del meridiano.

En 1863, C. L. Littrow dio a conocer un método para conseguir una longitud cronométrica por alturas correspondientes. De originalidad discutida, la única novedad del procedimiento residía en que las observaciones debían hacerse en las proximidades del meridiano.

Las alturas correspondientes permitían la determinación simultánea de las coordenadas geográficas, pero si bien el procedimiento resultaba muy acertado para la obtención de la hora y, por tanto, de la longitud, no era muy útil para una exacta determinación de la latitud.

25. Una explicación más amplia de los cálculos de latitud y longitud que se mencionan a continuación, puede encontrarse en: Ibáñez, 2002; pp. 135-149.

Pronto, todos estos avances quedarían anticuados, al producirse el mayor adelanto del siglo en esta materia, la denominada “nueva navegación astronómica”, cuyo inicio está marcado por el procedimiento descubierto en 1837 por T. H. Sumner (1807-1876).

3.3. La Nueva navegación astronómica

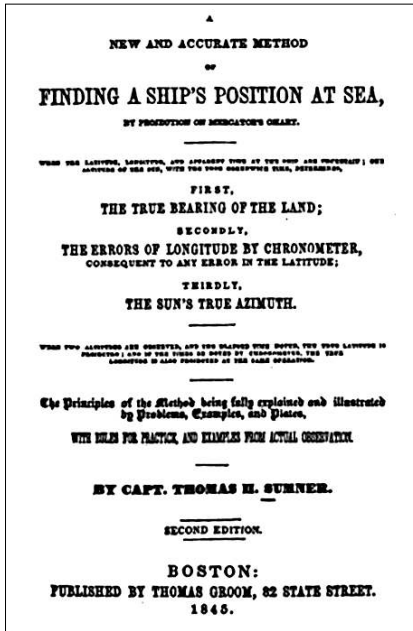


Figura 11. Portada del trabajo de Sumner.

Al estudiar el progreso de la náutica en el siglo XIX, se encuentra un descubrimiento trascendental que marca el inicio de lo que la mayoría de autores coinciden en denominar “nueva navegación astronómica”. El capitán de la Marina Mercante de los Estados Unidos, Thomas H. Sumner, descubrió casualmente, en 1837, un procedimiento con el que, por primera vez, podían obtenerse simultáneamente las dos coordenadas geográficas (latitud y longitud) de la situación del buque, de forma sencilla y breve. Sumner dio a conocer su método en Boston, en 1843, con la publicación del folleto titulado *A new and accurate method of finding a ship's position at sea, by projection on Mercator's chart*.

3.3.1. El descubrimiento de la recta de altura por Thomas H. Sumner

Describe el propio Sumner²⁶ cómo el descubrimiento se produjo el 17 de diciembre de 1837, cuando, procedente de Charleston (E.E.U.U.) con destino a Greenock (Escocia), recalando en el canal St. George, se encontraba, a bordo de su navío *Cabot*²⁷, cerca de la costa de Irlanda, en una situación crítica, después de haber navegado, con mal tiempo del sur, unas 700 millas sin haber podido obtener la posición de su buque. Sobre las diez de la mañana, pudo observar una altura de Sol y la hora de cronómetro. Con su latitud de estima, calculó por cronómetro una longitud. Pero, por pensar que su estima era bastante errónea, repitió el cálculo, con la misma altura, para latitudes diez y veinte minutos más al norte. Los tres puntos obtenidos quedaban en línea recta sobre la carta, en la dirección del Faro Small. Se dio cuenta Sumner que la misma altura debía haber sido observada, en el mismo instante, en los tres puntos, en el Faro Small y en su

26. SUMNER, 1843; pp. 37-38.

27. Pequeño velero de escasas 400 toneladas y 35 metros de eslora.

buque; siguió entonces la dirección en que se encontraba el faro y, en menos de una hora, apareció su luz, casi por la proa.

Sumner había deducido que con una sola altura se podía obtener el lugar geométrico de la posición del buque, representado por una recta en la carta mercatoriana, de donde deriva el nombre de “recta de altura” para las líneas de posición de la nueva navegación.

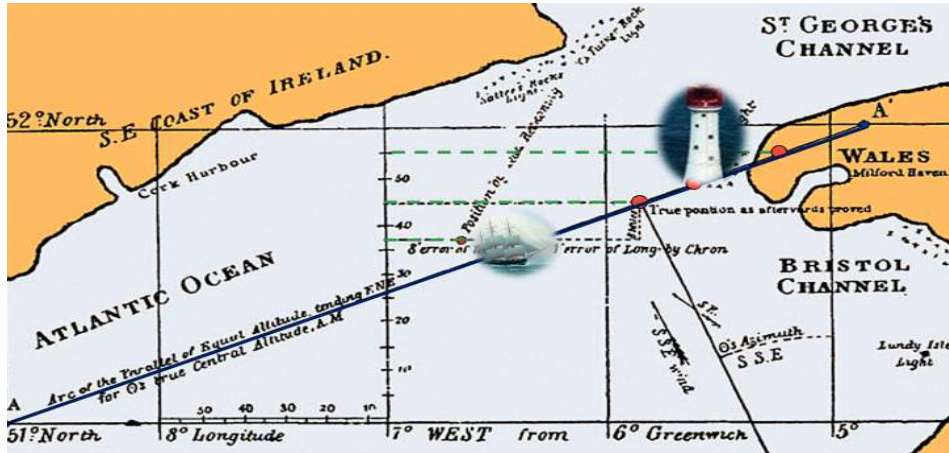


Figura 12. El descubrimiento de Sumner. Fuente: Elaboración propia a partir de Richardson, 1946.

En aquel tiempo, era ya conocido que los puntos de la Tierra desde los que, en un instante dado, se observa un determinado astro con la misma altura, se encuentran sobre una circunferencia menor cuyo centro es la proyección terrestre del astro, siendo su radio equivalente a la distancia cenital, complemento de la altura del astro sobre el horizonte. Sumner confirmó esta teoría, denominando a estas circunferencias *paralelos de alturas iguales*, y demostrando prácticamente que una pequeña parte de éstos se puede representar en la carta de Mercator mediante una línea recta.

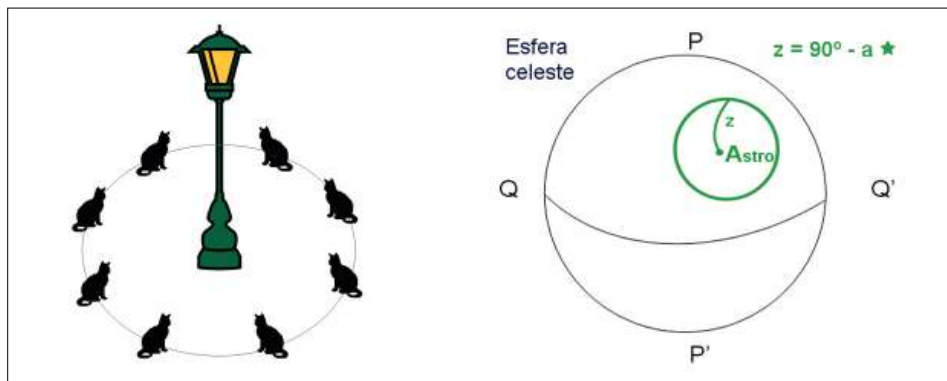


Figura 13. Circunferencia de alturas iguales.

La recta trazada por Sumner era, sencillamente, una secante a la circunferencia de altura donde se encontraba su buque, ya que las dos longitudes calculadas, con sus correspondientes latitudes supuestas, determinaban dos puntos de dicha circunferencia. Por ello, esta recta de altura ha llegado a nosotros con el nombre de "secante Sumner".

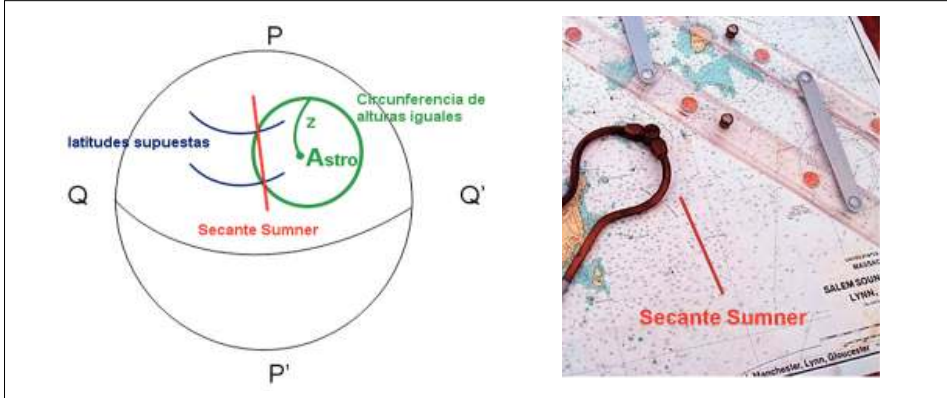


Figura 14. Secante Sumner.

Con dos alturas y la indicación del cronómetro del instante de las observaciones, el método de Sumner permitía una práctica y simultánea determinación de latitud y longitud, por medio del cálculo analítico de cuatro longitudes y un sencillo trazado gráfico en la carta. Pero, posiblemente, la mayor ventaja del nuevo procedimiento, que fue perfeccionado posteriormente, se encuentra en que cualquier altura, tomada en cualquier instante, ofrece una línea como lugar geométrico de la posición del buque, lo cual resulta especialmente útil cuando el buque se encuentra próximo a la costa.

CÁLCULO DE LA LONGITUD POR CRONÓMETRO

Al ser hora cronómetro: Hcr = ...; en latitud de estima: le = ... se observa una altura del Sol: av ⊙ = ... Cronómetro: estado absoluto: EA [00h Hm S. Fernando] = ...; movimiento diario: m.d. = ...

Hcr =	> le	
EA =	> av ⊙	
ppm =	> d ⊙	
Hm S. Fernando =	→ A.N. → d ⊙ = ...	
Et =		
Hv S. Fernando =		
Hv S. Fernando =		
Hv observador =		
L observador =		

$$\cos h = \frac{\sin a \cos \delta}{\cos l \cos d} - \frac{\sin \delta \sin l}{\cos d}$$

$$h \ominus = \dots$$

$$HV \text{ observador} = \dots$$

ppm: parte proporcional del momento; Et: Ecuación de tiempo; A.N.: Almanaque Náutico; d ⊙: declinación del Sol

Figura 15. Cálculo de la longitud por cronómetro.

3.3.2. Aceptación y propagación del método de Sumner

El método de Sumner fue adoptado rápidamente por los marinos norteamericanos. Su uso se generalizó gracias a Matthew F. Maury (1806-1873), por entonces director del Servicio Hidrográfico de Washington, quien, en octubre de 1843, escribió a Sumner: “Vuestro método puede considerarse como el principio de una nueva era en la navegación práctica. Se han dado órdenes para que todo buque de la marina se provea de vuestro folleto”²⁸.

En Europa, sin embargo, el método de Sumner se propagó de forma desigual. En 1844, Raper revisó el folleto de Sumner en el *Nautical Magazine* inglés. En Francia se conoció en 1847, gracias a un artículo de Barthet publicado en los *Annales Maritimes et Coloniales*. La tercera edición de la obra de Sumner fue traducida al alemán por Tobiesen, en 1855. En España, la primera noticia la dio Navarro, en 1855, al publicar una traducción del folleto de Sumner en la *Crónica Naval de España*. Sin embargo, no parece que por medio de este artículo trascendiera la nueva navegación debido al escaso número de suscriptores de esta revista. Esto no sucedería hasta 1864, año en que J.S. Montojo insertó una memoria sobre la secante Sumner en *El Departamento* y en el *Anuario de la Dirección de Hidrografía*, que también tuvo tirada aparte. Gracias a este trabajo, con un retraso de 21 años, se difundió en España el procedimiento de Sumner.

Aunque, inicialmente, alguna voz discutiera la originalidad del método de Sumner, la importancia del mismo propició su rápida propagación, despertando el interés de marinos e investigadores. En corto espacio de tiempo, el procedimiento inicial fue perfeccionado, desarrollándose la teoría general de las líneas de posición de altura.

3.3.3. Perfeccionamiento del método de las rectas de altura

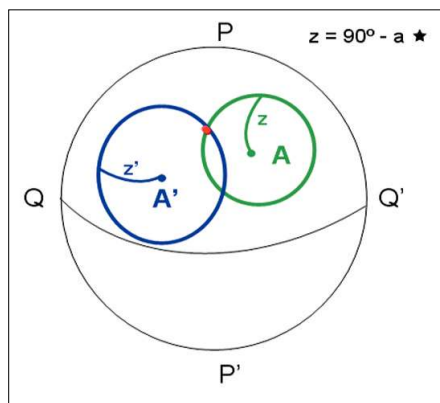


Figura 16. Situación por intersección de dos circunferencias de alturas iguales.

La circunferencia de alturas iguales resuelve el problema del cálculo de la situación del buque en la mar. Si un observador, cuyo zenit se encuentra en “Z”, que conoce la altura ($a \star$) de un astro (A), traza una circunferencia con centro en el astro y radio esférico igual a la distancia cenital, complemento de la altura ($z = 90^\circ - a \star$), determina sobre la esfera celeste el lugar geométrico de los puntos de igual distancia cenital. Ésta es la circunferencia de alturas iguales, que puede definirse como el lugar geométrico de los puntos de la Tierra desde los que en un mismo instante se observa el astro con la misma altura.

28. Según se cita en GELCICH, 1889; 217 p.

Conocidas las posiciones de dos astros observados simultáneamente, si se dispusiera a bordo de una esfera graduada, de dimensiones adecuadas, se podría hacer la construcción gráfica expresada, y así obtener la situación gráfica del buque.

Sin embargo, este método tiene el inconveniente de que toda la operación se ha realizado sobre la esfera. Como la aproximación suficiente en los cálculos de navegación suele ser la milla, hará falta emplear una esfera que tenga tamaño suficiente para apreciar la milla, que resulta ser de unos siete metros de diámetro. Dada la imposibilidad práctica de llevar a bordo una esfera de tales dimensiones, se hace necesario buscar otra solución: el traslado de las circunferencias de altura a las cartas de Mercator.

La propiedad más importante de la circunferencia de alturas es la de ser perpendicular en todos sus puntos al vertical del astro, es decir al círculo máximo que pasa por el astro (A) y por el zenit (Z) (v. Figura 15). El arco "AZ" de este vertical es el radio de la circunferencia de alturas (v. Figura 16). Por tanto, ésta es normal al vertical en todos sus puntos.

La proyección de las circunferencias de alturas sobre la carta mercatoriana dio origen a las curvas de alturas iguales, al parecer, estudiadas por primera vez por A. Fasci²⁹, en 1872. Pero, tampoco son estas curvas las que se emplean en la práctica, dado que son muy complicadas y su representación en la carta muy laboriosa. La propiedad de las circunferencias de altura se verifica también en las curvas de altura. En este caso se enuncia así: la tangente a la curva de altura es, en cualquier caso, perpendicular al vertical del astro.

La dificultad que entraña el trazado de la curva en la carta, llevó a intentar la sustitución de la curva por su círculo osculador, que es el que se confunde con la curva en mayor extensión que ningún otro. En 1877, I. Villarceau y A. de Magnac, publicaron un extenso trabajo teórico y práctico³⁰ sobre los nuevos métodos de navegación. Encargado de la teoría, Villarceau comprobó que la circunferencia osculatriz se confundía sensiblemente con la curva de alturas iguales, sin que la separación máxima excediera en media milla, en longitudes que podían alcanzar las cuatrocientas millas.

Pero, al ir a realizar esta sustitución, se encuentra que las coordenadas del centro, aunque fáciles de calcular, presentan dificultades para su utilización práctica ya que, por ejemplo, el radio de curvatura de la circunferencia osculatriz, tiene normalmente un valor muy grande, alrededor de de unas 2.400 millas. Esto implica que realizar esta sustitución sea imposible en la práctica, pues es difícil que el centro de curvatura se encuentre en la carta náutica empleada.

Se necesitaba, por tanto, encontrar un método más rápido y fácil para que el piloto pudiera obtener la situación del buque. El camino fue la sustitución del arco de circunferencia del círculo osculador por una recta. Esta sustitución es posible siempre que se garantice la aproximación que el navegante necesita.

29. FASCI, A. "Mémoire sur le point observé: la navigation hauturière". En: *Revue Maritime*, XXXIV, 1872. Así lo indica, entre otros, GELCICH, 1893; 42 p.

30. El astrónomo Villarceau realizó la parte teórica, mientras que el marino Magnac se hizo cargo de los aspectos prácticos. La obra fue publicada en 1876 con el título *La nouvelle navigation astronomique*.

En efecto, se demuestra que un arco pequeño de una circunferencia de radio grande, puede sustituirse por una secante o por una tangente, sin grave error (Figura 17).

Como resume Rafael Estrada:

el círculo de alturas iguales pasó de la esfera terrestre a la carta, transformándose en curva; siguiendo su evolución, se convirtió de nuevo en círculo, y en su último paso fué a identificarse con la línea geométrica más elemental, la recta³¹.

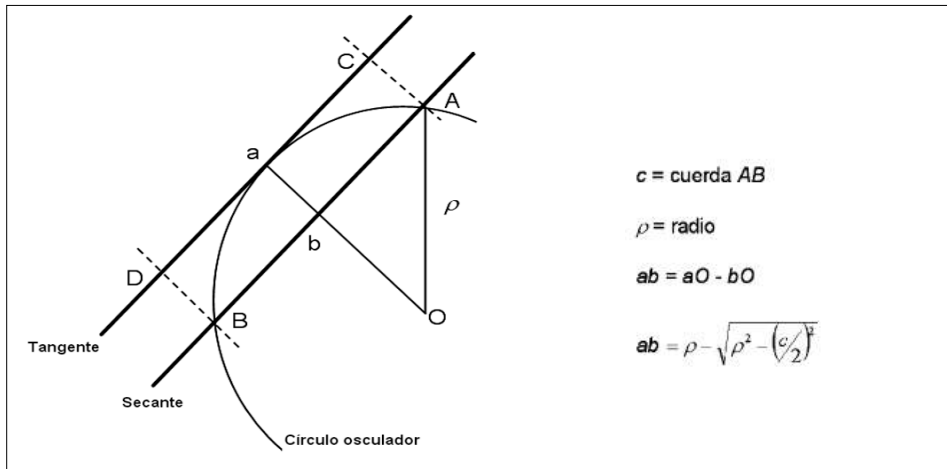


Figura 17. Rectas de altura.

Para el trazado de una secante en la carta son dos los puntos determinantes necesarios (puntos "A" y "B" en la Figura 17); mientras que el trazado de una tangente requiere tan solo un punto determinante (punto "a" en la Figura 17).

Los marinos se decidieron por la tangente. El trazado en la carta mercatoriana de la recta de altura, tangente a la circunferencia de altura, se ve facilitado por la propiedad de ser dichas rectas normales a la dirección del azimut (esto es, la dirección del horizonte por la que el observador ve el astro, que puede obtenerse a bordo con un compás o aguja náutica). Por ello, la obtención de este elemento es indispensable en todas las tangentes, siendo parte del determinante o conjunto de datos suficientes y necesarios para poder trazar en la carta mercatoriana la recta de altura correspondiente a la observación de un astro. Fueron desarrollados diversos métodos para abreviar las operaciones necesarias para el trazado de la recta de altura. Y, en consecuencia, la secante Sumner, pronto se vio superada.

La tangente de altura nació unida al nombre de A. C. Johnson (1828-1909), profesor de navegación en la Escuela Naval inglesa. En 1867, Johnson escribió una serie de artículos

31. ESTRADA, 1923; 760 p.

sobre las rectas de altura en el *Nautical Magazine*, consiguiendo reducir aproximadamente a la mitad los cálculos necesarios. Más tarde, en 1879, completaría su labor con el estudio de los métodos geométricos en otra serie de artículos titulados *Short methods in navigation*, en los que presentó el método directo de la tangente³².

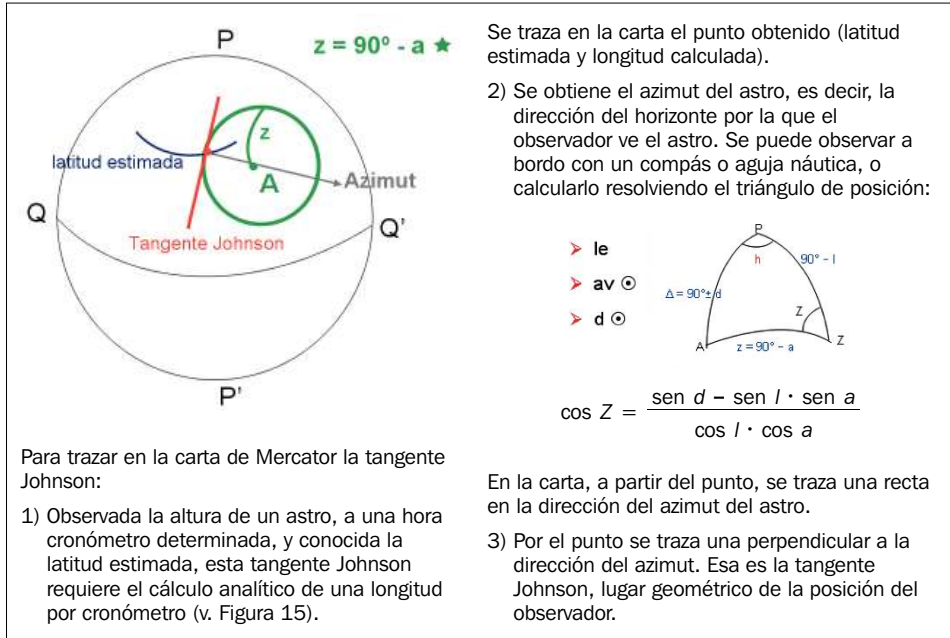


Figura 18. Recta de altura tangente Johnson: método del horario.

En el método de Johnson, para obtener el punto de la recta que se desea trazar, se emplea el método analítico del horario³³ –al igual que la secante Sumner– cuando el astro se encuentra en las proximidades del vertical primario; y el método analítico de la latitud³⁴ cuando el astro se encuentra en las proximidades del meridiano. Determinado de una de estas dos formas el punto de la curva de altura por donde trazarse la

32. Poco después, hacia 1880, Johnson publicó por primera vez su conocido folleto *On finding latitude and longitude in cloudy weather*. En este trabajo, traducido al castellano por F. García en 1901 (del que se dispone un ejemplar de la segunda edición: JOHNSON, 1910), Johnson presentaba su método del horario, sustituyendo el trazado gráfico por un procedimiento analítico con el que obtener el punto de intersección de dos rectas de altura.

33. Se trata de obtener el punto de la circunferencia de altura correspondiente a la latitud de estima, obteniendo para ello la longitud a partir del cálculo del horario local, en función de la latitud de estima, la altura y la declinación del astro.

34. Se trata de hallar el punto de la curva de altura correspondiente a la longitud de estima, que se obtiene resolviendo el triángulo de posición siendo conocidos el horario local (calculado con la longitud), la altura y la declinación del astro.

recta de altura, falta determinar la dirección en que ésta debe trazarse. Ésta se obtiene hallando el correspondiente azimut del astro observado, puesto que la tangente es perpendicular al mismo. La parte analítica del método de Johnson requería, por tanto, el cálculo de un punto y de un azimut, mientras que el de Sumner exigía el cálculo de dos puntos. Por ser similar en ambos casos el trabajo del trazado gráfico, el método de Johnson se hizo más aceptable que la secante Sumner.

El único punto determinante necesario en el método de Johnson provenía bien del horario calculado o de la latitud calculada, por lo que se debía observar en circunstancias favorables. Limitación ésta que fue superada y anulada por el francés Marcq Blond de Saint-Hilaire, en 1875.

3.3.4. La recta de altura tangente Marcq

La moderna navegación astronómica tiene su pilar fundamental en el cálculo de la situación utilizando el corte de dos o tres rectas de altura tangentes Marcq.

En 1875, el marino francés A. L. A. Marcq de Blond de Saint-Hilaire dio a conocer su magistral método del punto aproximado, con el que la recta de altura se obtenía, en todos los casos, resolviendo de un modo general el problema del “punto”, sin limitación de circunstancias. El método había sido ensayado por el autor a bordo del buque escuela *Renommée*, en 1874.



Figura 19. Primera página del trabajo de Marcq Saint-Hilaire, publicado en la *Revue Maritime et Coloniale*, en 1875.

millas, según el sentido conveniente. Así resulta el punto aproximado (D), y trazando por éste una perpendicular al vertical, se obtiene la recta de altura, tangente a la curva de altura.

Hasta entonces, como se ha mencionado, únicamente se consideraban correctas las rectas de altura en las observaciones próximas al vertical primario (método del horario) o en la vecindad del meridiano (método de la latitud). Los marinos se abstendían de observar en la zona intermedia.

El método de la tangente Marcq exige el trazado en la carta del vertical del astro desde el punto de estima. Tomar, luego, sobre él una magnitud, denominada diferencia de alturas (Δa), que representa la diferencia entre la altura verdadera del astro (a_v) –procedente de la observación con sextante– y la que éste alcanzaría visto desde el punto estimado (a_e) –calculada por trigonometría esférica en función de la latitud de estima, la declinación y el horario del astro–. Esto es, se sitúa en la carta el punto de estima (Se); se traza por él una recta según el azimut, sobre la que se mide la diferencia de alturas (Δa) en

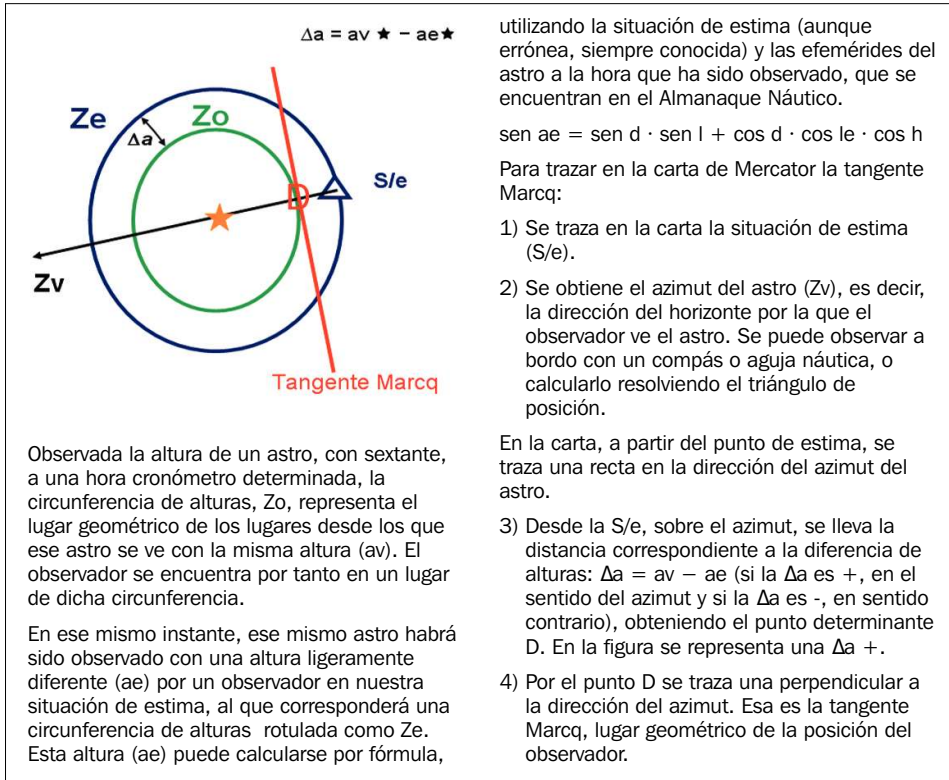


Figura 20. Recta de altura tangente Marcq.

A partir de entonces, como señala Ribera, la recta de altura

se hace dueña de la navegación astronómica, acaparando y desprendiendo de sí, como simples casos particulares, todos los procedimientos para hallar las coordenadas del buque, y haciendo que el tosco descubrimiento del capitán Sumner, afinado y analizado concienzudamente, se vulgarice, hasta ser considerado como único sistema utilizable para la situación en alta mar³⁵.

35. RIBERA Y URUBURU, Ribera y Egea, 1935; p. 571.

4. A MODO DE CONCLUSIÓN

En la segunda mitad del siglo XX, asistimos a una revolución que ha afectado a todas las ramas del saber. En solo unos decenios, se han producido avances espectaculares en los distintos ámbitos científicos y técnicos, propiciados por el desarrollo de la electrónica y de la informática, a los que la navegación no ha sido ajena.

A partir de la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron sistemas de navegación basados en la recepción a bordo de señales electromagnéticas transmitidas desde estaciones en posición fija y conocida sobre la superficie terrestre. En el transcurso de pocos años, buena parte de estos procedimientos han quedado obsoletos, siendo sustituidos por sistemas de navegación por satélite. En esta era espacial, se diseñan y fabrican “estrellas artificiales” con importantes aplicaciones científicas y tecnológicas, que, en lo que a la navegación se refiere, han simplificado notablemente el posicionamiento en la mar, a la par que han permitido alcanzar unas cotas de exactitud impensables hace tan solo tres décadas.

Es aventurado prever lo que deparará el futuro, en un mundo en el que la tecnología progresa a un ritmo fulgurante. De momento, estos importantes avances no han arrinconado la navegación astronómica más tradicional, que no depende del suministro eléctrico, ni su disposición está a merced de otra voluntad que la propia. Por ello, lejos de ser meramente historia, la navegación astronómica, fundada en principios establecidos en la segunda mitad del siglo XIX, no sólo continúa utilizándose hoy, sino que, en el tercer milenio, su importancia ha sido reconocida por la Organización Marítima Internacional, debiendo su estudio formar parte del currículo de los y las pilotos actuales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ANDREWES, W. J. H. (ed.). *The quest for longitude. The proceedings of the Longitude Symposium, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, November 4-6, 1993*, 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: Harvard University, 1998.
- BERTELE, H. von. *Marine & pocket chronometers. History and development*. West Chester, Pennsylvania: Schiff Publishing, 1991.
- CEREZO, R. *La cartografía náutica española en los siglos XIV, XV y XVI*. Madrid: CSIC, 1994.
- COHEN, I. B. *Revolución en la ciencia*. Barcelona: Gedisa, 1989.
- COMELLAS, J. L.; GIL, J. *El cielo de Colón. Técnicas navales y astronómicas en el viaje del descubrimiento*. Madrid: Tabapress, 1991.
- COTTER, C. H. *A history of nautical astronomy*. London-Sydney-Toronto: Hollis & Carter, 1968.
- ESTRADA, R. “La nueva navegación astronómica”. En: *Revista General de Marina*, XCIII; 1923; pp. 755-768; XCIV; 1924; pp. 27-45, 195-213, 471-490, 629-651 y 785-807.
- FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, Eustaquio. “Memoria sobre las tentativas hechas y premios ofrecidos en España al que resolviera el problema de la longitud en la mar”. En: SALVÁ, M.; SÁINZ DE BARRANDA, P.: *Colección de documentos inéditos para la historia de España*, Tomo XXI. Madrid: Imp. de la Vda. de Calero; 1852; pp. 5-241.
- FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, Martín. *Disertación sobre la historia de la náutica y de las ciencias matemáticas que han contribuido a sus progresos entre los españoles*. Madrid: Imp. Vda. de Calero, 1846.

- FERNÁNDEZ FONTECHA, F. *Curso de astronomía náutica y navegación*, 2 vols. Cádiz: Imp. de la Revista Médica, 1875.
- GARCÍA FRANCO, S. *Historia del arte y ciencia de navegar. Desenvolvimiento histórico de los cuatro términos de la navegación*, 2 vols. Madrid: Instituto Histórico de Marina, 1947.
- GARMENDIA BERSATEGUI, I. *Instrumentos astronómicos antiguos y curiosidades varias*, 2ª ed. Victoria-Gasteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 1995.
- GELCICH, E. *Estudios sobre el desenvolvimiento histórico de la navegación especialmente referidos a las ciencias náuticas con apéndices sobre la literatura marítima de los siglos XVI y XVII y la historia del desarrollo de las fórmulas para la reducción de las distancias lunares*. Valencia: Lib. de Pascual Aguilar, 1889.
- GONZÁLEZ, F. J. *Astronomía y navegación en España. Siglos XVI-XVIII*. Madrid: Mapfre, 1992.
- GOULD, R. T. *The marine chronometer. Its history and development*. London: J. D. Potter, 1923.
- GUILLÉN TATO, J. F. "La náutica". En: *Asociación Nacional de Historiadores de la Ciencia Española, Estudios sobre la ciencia española del siglo XVII*. Madrid: Gráfica Universal, 1935; pp. 461-501.
- IBÁÑEZ, I. *La difusión de conocimientos náuticos en la España decimonónica*. Leioa: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002.
- . *Fundamentos de navegación marítima*. Leioa: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002.
- ; LLOMBART, J.; IGLESIAS, A. "Transfer of nautical knowledge from the USA to Europe in the nineteenth century: The case of the Sumner line of position and its introduction into Spain". En: *Journal of Maritime Research*, vol. I, nº 1, 2004; pp. 63-79.
- JOHNSON, A. C. *Método para determinar la latitud y la longitud en el mar en tiempos nublados por... Traducido de la 22ª edición inglesa por Francisco García Núñez de la Marina Mercante española*, 2ª ed. Madrid: Imp. de la Suc. de M. Muniesa de los Ríos, 1910.
- LÓPEZ PIÑERO, J. M. *El arte de navegar en la España del Renacimiento*, Barcelona: Editorial Labor, 1979.
- MARCO SAINT-HILAIRE. "Calcul du point observé". En: *Revue Maritime et Coloniale*, XLVI, 1875; pp. 341-376 y 714-742.
- MARTÍNEZ-HIDALGO, J. M. *Historia de la aguja náutica*. Barcelona: Gustavo Gili, 1946.
- . *Las naves del descubrimiento y sus hombres*. Madrid: Mapfre, 1992.
- MEDINA, Pedro. *Regimiento de navegación* Sevilla, 1563. Ed. Facsímil, Librerías París-Valencia, 1993.
- MENDOZA Y RÍOS, J. *Memoria sobre algunos métodos nuevos de calcular la longitud por las distancias lunares y aplicación de su teórica a la solución de otros problemas de navegación*. Madrid: Imprenta Real, 1795.
- . *Colección de Tablas para varios usos de la navegación*. Madrid: Imp. Real, 1800.
- MENZIES, Gavin. 1421. *El año que China descubrió el mundo*. Barcelona: Debolsillo, 2004.
- . 1434. *El año que una flota china llegó a Italia e inició el Renacimiento*. Barcelona: Debolsillo, 2010.
- RIBERA Y URUBURU, L.; RIBERA Y EGEA, J. L. *Tratado de navegación*, 4ª ed. Madrid: Imprenta del Ministerio de Marina, 1935.

- RICART Y GIRALT, José. *Nueva navegación astronómica en los buques rápidos*. Barcelona: Tip. L'Avenç, 1895.
- . “La navegación geodésica a través de los siglos y su importancia en los actuales buques rápidos”. En: *Vida Marítima*, XVII, 1918; pp. 318-319, 326-327, 347-348, 364-365, 382-383 y 397-398.
- RICHARDSON, R. S. “Captain Thomas Hubbard Sumner (1807-1876)”. En: *Navigation. Journal of the Institute of Navigation*, 1 (2), 1946; pp. 35-40.
- SELLÉS, M. *Astronomía y navegación en el Siglo XVIII*. Madrid: Akal, 1992.
- . *Instrumentos de navegación. Del Mediterráneo al Pacífico*. Barcelona: Lunweg, 1994.
- SOBEL, Dava. *Longitude. The true story of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time*. N. York: Walker and company, 1995.
- SUMNER, Thomas H. *New and accurate method of finding a ship's position at sea, by projection on Mercator's chart*. Boston: Thomas Groom & co., 1843.
- VANVAERENBERGH, M.; IFLAND, P. *Line of position navigation: Sumner and Saint-Hilaire, the two pillars of modern celestial navigation*. Bloomington (Indiana): Unlimited Publishing LLC, 2003.
- WILLIAMS, J. E. D. *From sails to satellites. The origin and development of navigational science*. Oxford-N.York-Melbourne: Oxford University Press, 1994.