

From the “Estimated Position” To the “Observed Longitude” Resolution: A Brief History of Navigation in the Modern Age

Gabriel Pintos Amengual & Rosa Pintos Guillén

Universitat Oberta de Catalunya

Received: 10.05.2025 | Accepted: 13.06.2025 | Published: 16.06.2025

*Corresponding Author: Gabriel Pintos Amengual

DOI: [10.5281/zenodo.15670022](https://doi.org/10.5281/zenodo.15670022)

Abstract

Original Research Article

During the Modern Age, oceanic voyages fostered significant advancements in astronomical navigation. In this context, the aim is to describe its origins and evolution throughout this period, during which the transition from the art of navigation to scientific astronomical navigation took place. To achieve this, the context in which this shift occurred is analyzed, considering the scientific and technical advancements available at each moment. Additionally, all the elements involved in the process are described until reaching the concept of the "fixed point," regarded by many as the limit imposed by God on human intelligence. Furthermore, the main nautical instruments and techniques used by sailors of that era to calculate the ship's position at sea are examined.

Keywords: Navigation, Cosmography, Modern Age, Art of Navigating, Scientific Astronomical Navigation.

Citation: Pintos Amengual, G., & Pintos Guillén, R. (2025). From the “estimated position” to the “observed longitude” resolution: A brief history of navigation in the modern age. *SSR Journal of Arts, Humanities and Social Sciences*, 2(5), 192-211.

Introducción

Durante los siglos XVI, XVII y gran parte del XVIII, la navegación¹ fue considerada un “arte” hasta que, para determinar la posición a bordo, se abandonó la mera aplicación de reglas matemáticas memorizadas y se empezaron a emplear métodos de cálculo basados en tablas logarítmicas y especiales, instrumentos de reflexión y cronómetros. Este momento marcó la transformación de la navegación en una ciencia.

Los tratadistas del siglo XX, como José Ricart i Giralt, Ignacio Fossi, Ángel de Urrutia, José María Moreu y Enrique Martínez, continuaron clasificándola como una ciencia, mientras que Juan José Achutegui introdujo el concepto de navegación como una “técnica”. Ya en el siglo XXI, Itsaso Ibáñez y Ricardo Gaztelu-Iturri redefinieron la navegación adaptándola a la enseñanza universitaria actual, incorporando términos como conocimientos, técnicas, coordenadas geográficas, seguridad y eficacia². La definición de navegación ha evolucionado con el tiempo en función de los procedimientos, instrumentos y conocimientos utilizados para situar el buque en el mar y

trasladarlo de un punto a otro con seguridad. Sin embargo, siempre ha girado en torno a la necesidad de dirigir la embarcación de manera precisa, aprovechando los avances tecnológicos de cada época.

Este trabajo busca desarrollar la evolución de la navegación en la Edad Moderna a través de los instrumentos y técnicas empleados para determinar la posición del buque. Se analiza el impacto de los viajes oceánicos en el desarrollo de la navegación, impulsados por la apertura de nuevas rutas comerciales en el Atlántico y el Pacífico. Aunque el enfoque principal es la navegación, estos nuevos itinerarios generaron cambios significativos en todos los aspectos relacionados con la disciplina, afectando a pilotos, embarcaciones, instrumentos náuticos y demás elementos clave.

El conocimiento empírico de la costa por donde se navegaba y la navegación de estima (basada en rumbo y distancia) dejaron de ser suficientes para llevar a cabo la travesía, alcanzar el destino y realizar el tornaviaje. La exploración de nuevas rutas comerciales planteó un gran desafío para la navegación oceánica, obligando a los pilotos a adquirir conocimientos científicos que hasta

¹ A efectos de este trabajo se ha seguido el mismo criterio que marcó IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, 2000: 25, en lo que respecta a la diferenciación de los términos náutica y navegación, reservando el de náutica para calificar escuelas, enseñanzas y formación que reciben los marinos, en el que intervienen disciplinas como navegación, maniobra, construcción naval, medios de propulsión del buque, etc. Mientras que el término de navegación

se ha utilizado para lo que se refiere a los conocimientos, instrumentos y técnicas que permiten determinar la situación del buque por medio de coordenadas geográficas y poder trasladarse de un punto a otro con seguridad.

² IBÁÑEZ, y GAZTELU-ITURRI, 2002: 3.

entonces no poseían. Era necesario determinar con precisión la posición del buque y situarlo en la carta, es decir, “echar el punto”.

La navegación empírica, basada en la estima o en la observación directa de la costa, resultaba insuficiente. La regularidad de las rutas, la seguridad de las tripulaciones, la fiabilidad de los medios y la protección de las mercancías transportadas exigían una navegación más precisa, fundamentada en aplicaciones matemáticas. Esto no solo permitía determinar la posición del buque, sino también la de las tierras descubiertas.

Para ello, se recurrió a la observación astronómica, utilizando el Sol (meridiana) y la estrella Polar para medir su altura y calcular la latitud geográfica. Los instrumentos empleados incluían el astrolabio, el cuadrante y la

ballestilla, lo que permitió el paso de la navegación de fantasía (rumbo y distancia) al denominado "punto de escuadría" (latitud observada y rumbo).

Aunque las cartas carecían de coordenadas geográficas, permitían situarse por estima. El rumbo se obtenía de la aguja, lo que determinaba el rumbo magnético, la distancia navegada que para su cálculo intervenían las variables: velocidad del buque y tiempo navegado. La velocidad se calculaba mediante métodos empíricos entre los que intervenían la experiencia del piloto, el conocimiento del buque y su estado, los vientos y corrientes imperantes, así como cualquier otra variable que pudiera influir en la marcha del buque. La determinación del tiempo navegado se calculaba mediante la ampollita o reloj de arena (véase figura 1).

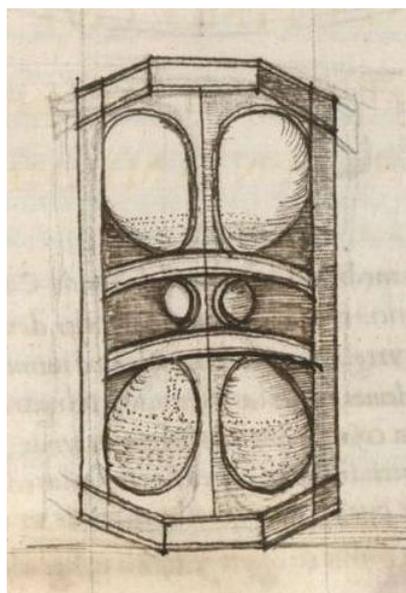


Figura 1. Ampollita. Fuente: Chaves, 1537, fol. s/n.

Con estos métodos aún imprecisos, se obtenía el llamado “punto de fantasía”, el cual se representaba en la carta portulana y servía para fijar el rumbo hacia el puerto de destino. Según Ricardo Cerezo, la ausencia de una escala de latitudes en las cartas portulanas impedía determinar la posición de la nave mediante el punto de escuadría, que se obtenía a partir de la latitud observada y el rumbo.

Las exigencias de la navegación frecuentemente obligaban a desviarse del rumbo de destino, lo que generaba dificultades en el cálculo de la distancia navegada y en el retorno al rumbo inicial. Las tablas de Martelugio (véase tabla 1) facilitaban la navegación por estima al permitir ajustar el rumbo tras varias desviaciones y retomar la trayectoria deseada.

No obstante, Salvador García Franco señala que estas tablas no eran de gran utilidad, ya que pocos pilotos sabían leer y escribir, y menos aún multiplicar y dividir. Se ha documentado la presencia de estas tablas en el atlas de Andrea Bianco (1436) y en un códice de Piero de Versi (1444).

Por otro lado, en el capítulo CXI del *Ars Magna*, Raimundo Lulio desarrolla un planteamiento sobre el cálculo de los avances y los ajustes de retorno en relación con el rumbo a seguir, considerado como un “antecedente del Martelugio”, aunque menos completo. Su propuesta se basa en un sencillo cálculo de trigonometría plana, destinado a determinar cuánto habría avanzado la nave si hubiera mantenido el rumbo inicial³.

Tabla 1. Tabla de Martelugio. Fuente: GARCÍA FRANCO, vol. 2, p. 95.

| R (en cuartas) | α | β | R (en cuartas) | γ | δ |
|----------------|----------|---------|----------------|----------|----------|
| 1 | 20 | 98 | 1 | 51 | 50 |
| 2 | 38 | 92 | 2 | 26 | 24 |
| 3 | 56 | 83 | 3 | 18 | 15 |
| 4 | 71 | 71 | 4 | 14 | 10 |
| 5 | 83 | 56 | 5 | 12 | 6,7 |

³ GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 2: 99.

| R (en cuartas) | α | β | R (en cuartas) | γ | δ |
|----------------|----------|---------|----------------|----------|----------|
| 6 | 92 | 38 | 6 | 11 | 4 |
| 7 | 98 | 20 | 7 | 10,2 | 2 |
| 8 | 100 | 0 | 8 | 10 | 0 |

Para enfrentar los desafíos que planteaba la navegación de altura, la Corona española tomó medidas a través de la Casa de Contratación de Sevilla, considerada uno de los centros europeos más importantes en materia de ciencia aplicada del siglo XVI, junto con el Consejo de Indias y la Academia de Matemáticas de Madrid⁴.

En el seno de la Casa de Contratación se creó en 1508 el cargo de piloto mayor, lo que representó un gran impulso para el desarrollo de la navegación, la formación de pilotos, la elaboración de cartas marinas y la fabricación de instrumentos náuticos. Durante el siglo XVI, la Casa de Contratación se consolidó como un centro de investigación y enseñanza náutica. Bajo la dirección del piloto mayor, colaboraban en las tareas técnicas el cosmógrafo mayor, responsable de la creación de instrumentos náuticos y cartas de marear, así como un catedrático de navegación y cosmografía, encargado de impartir conocimientos sobre el arte de navegar. En este lugar se formaron y examinaron los pilotos de la Carrera de Indias desde 1508 hasta 1681⁵. Si bien el cálculo de la latitud ya era conocido, el de la longitud —es decir, “la altura lesteoeste”— tuvo que esperar un par de siglos más para ser resuelto. No fue un descubrimiento espontáneo, sino el resultado de un largo proceso de investigación desarrollado en distintos países como España, Inglaterra, Portugal y Francia. La importancia de este problema llevó a la oferta de grandes recompensas para quien lograra establecer un método fiable para calcular la longitud geográfica, pues la dificultad para determinarla se había convertido en un verdadero reto para cartógrafos, matemáticos y navegantes, afectando directamente a la seguridad de la navegación.

Tal era su complejidad que muchos lo consideraban un “límite impuesto por Dios a la inteligencia humana”⁶. Como reflejo de esta percepción, algunos tratadistas afirmaban: “Este es el punto célebre que Dios puso como término del ingenio humano para su humillación, como las arenas del mar.”⁷ Esta preocupación persistió hasta la primera mitad del siglo XVIII, y los expertos de la época continuaban abordando el tema en sus tratados⁸.

Finalmente, la aplicación de correcciones a las alturas observadas, junto con avances tecnológicos como la invención de los instrumentos de reflexión (1731), las tablas lunares (1755) y el cronómetro (1772), permitieron la determinación de la longitud en el mar por métodos cronométricos y por distancias lunares. Con estos avances se inició la era de la navegación astronómica científica, revolucionando la manera en que los marinos calculaban su posición en los océanos.

Navegación astronómica

En la primera fase de la navegación astronómica en el Atlántico, la utilización de la latitud observada y la carta náutica para situar la posición del buque no fue simultánea. Según Taylor, lo que se empleó inicialmente fue la diferencia de altura de los astros para determinar el desplazamiento Norte-Sur, mientras que las latitudes de puntos conocidos de la costa se utilizaron como referencias locales⁹.

Incluso se elaboraron tablas con la altura meridiana del Sol para lugares específicos, como Lisboa. De este modo, al calcular la altura meridiana del Sol en el mar y compararla con los valores de dichas tablas, se podía determinar la distancia Norte-Sur respecto a esos puntos de referencia.

Estos procedimientos permitían corregir en el sentido Norte – Sur la estima del camino recorrido y marcar sobre la carta portulana, sin necesidad de que ésta tuviera la graduación de latitudes, la posición correcta del barco”¹⁰.

Sin embargo, para la realización de los viajes oceánicos, el cálculo de la distancia Norte-Sur resultó insuficiente. Esto hizo imprescindible que los pilotos se familiarizaran con el uso de los astros y los instrumentos de medición de alturas como método para obtener las coordenadas geográficas del buque.

La ciencia de la época solo permitía calcular la latitud mediante la observación de la Estrella Polar o el cálculo de su altura meridiana a partir de la posición del Sol. Estos procedimientos quedaron reflejados en los textos utilizados para la formación de los pilotos, consolidando el conocimiento astronómico como una herramienta fundamental para la navegación.

Para determinar la latitud mediante la altura meridiana del Sol, era necesario medir la altura del astro sobre el horizonte, lo cual se realizaba comúnmente con un astrolabio y el conocimiento de la declinación solar obtenido a través de tablas.

En el caso del cálculo de la latitud utilizando la Estrella Polar, el procedimiento consistía en medir la altura del astro con una ballestilla o un cuadrante, aprovechando su proximidad al polo celeste. Aplicando una pequeña corrección, se podía determinar la latitud del observador. Esta corrección dependía de la posición específica que ocupaba la Polar en su movimiento diurno aparente alrededor del polo celeste.

Para calcular el valor de dicha corrección, los pilotos se guiaban por la posición de las estrellas *Kochab* y *Pherkad*,

⁴ Para ver la importancia científica de esta institución consultar: PUENTE OLEA, 1900.

⁵ PULIDO RUBIO, 1950: 15.

⁶ Véase: SALVÁ y SAINZ DE BARANDA, 1852: 221-222; REY PASTOR, 1970: 82.

⁷ ZARAGOZA Y VILANOVA, 1675: 249.

⁸ CEDILLO Y RUJAQUE, 1745: 102.

⁹ LAGUARDA TRÍAS, 1959: 8.

¹⁰ LAGUARDA TRÍAS, 1959: 9.

conocidas como las "guardas del polo", pertenecientes a la Osa Menor.

La exactitud de la altura observada de cualquier astro sobre el horizonte dependía de dos factores fundamentales: la precisión del instrumento y la pericia del observador. Además, hoy sabemos que, para obtener la altura verdadera, era necesario aplicar una serie de correcciones que en la época no se tenían en cuenta. De hecho, estas correcciones no se formalizaron en la enseñanza náutica en España hasta que Pedro Manuel Cedillo las incluyó en su tratado en 1745, aunque ya en 1731, Antonio Clariana y Gualbes había incorporado algunas de ellas en su *Resumen Náutico de lo que se practica en el teatro naval, ó Representación sucinta del arte de marina*¹¹.

Para calcular la altura verdadera del Sol, era necesario aplicar varias correcciones a la altura instrumental (altura observada), entre ellas: Paralaje, Refracción astronómica, Depresión del horizonte, Semidiámetro solar.

En el caso de estrellas y planetas, la altura observada solo requería corrección por refracción y depresión del horizonte (excepto para Venus y Marte, en los que la paralaje podía ser apreciable).

La falta de aplicación de estas correcciones, sumada a la imprecisión de las tablas de declinación solar, provocaba numerosos errores en el cálculo de la latitud observada mediante la meridiana del Sol.

En este sentido, un estudio realizado por Felipe Louzán analiza la exactitud de las observaciones realizadas con algunos de los primeros instrumentos de medición astronómica, empleados en la navegación y precursores de los modernos sextantes, como el astrolabio, el cuadrante y la ballestilla¹².

El conocimiento de la latitud era fundamental para fijar en la carta náutica el punto de escuadría. En *Arte de Navegar* (1545), Pedro Medina, en el capítulo XII titulado *Cómo se ha de echar punto en la carta para saber el lugar en el que la nao está*, describe el procedimiento para situar el punto mediante el rumbo seguido por la embarcación y la altura calculada.

En el *Regimiento de Navegación* (1552), aparece por primera vez el término "por escuadría" para referirse a este método de posicionamiento. En la regla tercera del notable primero, se explica: "Cómo se ha de echar punto en la carta (por escuadría, que es conforme con la altura que se toma)."¹³

Este método consistía en calcular la posición del buque en las cartas planas, mediante la intersección del paralelo correspondiente a la latitud calculada y el rumbo seguido por la nave.

Durante el siglo XVII tuvo lugar la llamada "Revolución científica", término acuñado por Alexandre Koyré en 1939¹⁴ para describir la época en la que los conocimientos existentes en campos como la astronomía, física, química, biología y medicina fueron cuestionados y reemplazados por nuevos paradigmas.

Entre los pensadores más influyentes de esta revolución destacaron:

- Nicolás Copérnico (1473-1543), con su teoría heliocéntrica del sistema solar.
- Johannes Kepler (1571-1630), con sus leyes sobre el movimiento planetario.
- Galileo Galilei (1564-1642), quien formuló la primera ley del movimiento y perfeccionó la observación astronómica.
- Isaac Newton (1642-1727), con su ley de gravitación universal y aportes que revolucionaron la comprensión de las matemáticas y la física.

En este contexto, la trigonometría se convirtió en una disciplina esencial tanto para la navegación como para la astronomía de posición. Sus raíces se remontan a las matemáticas de Babilonia y Egipto, siendo los egipcios quienes establecieron la medición de los ángulos en grados, minutos y segundos.

Entre sus primeros exponentes destacan:

- Hiparco de Nicea (190-120 a. C.), quien compiló una tabla trigonométrica para la resolución de triángulos.
- Claudio Ptolomeo (100-170), quien en su *Almagesto* incluyó una tabla de cuerdas, con un margen de error menor a 1/3.600 de unidad. También formuló el "teorema de Menelao", clave para resolver triángulos esféricos.

Aproximadamente en el siglo XII, la trigonometría fue introducida en Occidente a través de traducciones de textos árabes de astronomía. El primer trabajo importante en Europa sobre trigonometría fue el tratado *De Triangulis*, realizado por el matemático y astrónomo alemán Johann Müller (1436-1476), más conocido como Regiomontano, fue una obra fundamental en el desarrollo de la trigonometría. Posteriormente, en *Canon Mathematicus* (1570), el matemático francés François Viète dio a la trigonometría su forma moderna.

Sin embargo, fue a principios del siglo XVII cuando los cálculos trigonométricos se simplificaron significativamente gracias a la invención de los logaritmos, descubiertos en 1614 por el matemático escocés John Napier (1550-1617). Tal fue su impacto que Vicente Vázquez Queipo, en el prólogo de su *Tablas de logaritmos vulgares*, afirmó:

Entre las admirables invenciones del género humano, pocas acaso han influido más que la de los logaritmos en los rápidos progresos que, en estos últimos siglos, han hecho las ciencias exactas, y en especial la astronomía y la navegación¹⁵.

Con la invención de los logaritmos y la construcción de tablas logarítmicas de senos y tangentes, la mecánica logarítmica alcanzó un desarrollo notable, lo que llevó a su integración en la navegación. Como señala un estudio: "La maravillosa mecánica logarítmica aparece, pues, en todo su esplendor, y es lógico que haga también su presentación en la Náutica, como desde el primer instante se adueñó de la Astronomía."¹⁶

¹¹ PINTOS, 2023: 122-123.

¹² LOUZÁN LAGO, 2005: 616-629.

¹³ MEDINA, 1545: s.n.

¹⁴ Véase: KOYRÉ, 1990.

¹⁵ VÁZQUEZ QUEIPO, 1967: s.n.

¹⁶ GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1: 188.

En España, los logaritmos aparecieron por primera vez en 1646 en el manuscrito *Arithmetica* de Hugo Sempil (1589-1654), seguido por José Zaragoza (1627-167) con sus obras *Arithmetica Universal* (1669) y *Trigonometría Española* (1672). Más tarde, Juan Caramuel (1606-1682) abordó el tema en *Architectura Civil Recta y Oblicua* (1678)¹⁷.

En el ámbito de la navegación, los logaritmos encontraron una aplicación fundamental gracias a Edmund Gunter (1581-1626), quien en 1620 diseñó una regla denominada "Regla de Gunter", la cual incorporaba escalas de logaritmos de números, senos y tangentes de arcos. Este instrumento fue ampliamente utilizado por los ingleses, mientras que franceses y españoles prefirieron el método del cuadrante de reducción¹⁸.

La invención de este cuadrante se atribuye a Blondel Saint Aubin, quien en 1676 publicó *Tresor de la Navigation*, donde explicaba el método de navegación con el cuartier o cuadrante de reducción¹⁹.

En España, Gaztañeta, a través de su obra *El Norte de la Navegación* (1692), es considerado el introductor del cuadrante de reducción y de la corredera, instrumento destinado a medir la velocidad del buque, cuyo diseño ya había sido descrito en *A Regiment for the Sea* por William Bourne en 1574.

Por la adopción de adelantos técnicos provenientes del extranjero, Martín Fernández de Navarrete consideró que España dependía de la producción industrial y del conocimiento científico de otras naciones. Durante el siglo XVII, la navegación continuó con características similares a las del siglo XVI, en la que, como se afirmaba: "El piloto dispone de altura, carta y aguja."²⁰

Los avances en matemáticas, astronomía y física tuvieron una repercusión limitada en la navegación práctica. El punto en la carta se seguía calculando por escuadría, aplicando correcciones en caso de discrepancia entre el punto de fantasía y el punto de escuadría.

Durante la primera mitad del siglo XVII, la latitud se determinaba mediante diversas técnicas, entre ellas²¹:

- La altura meridiana de una estrella.
- La amplitud ortiva de las estrellas.
- Dos alturas extrameridianas del Sol y el tiempo transcurrido entre ambas.
- Dos alturas del Sol o de una estrella, junto con la distancia entre los correspondientes verticales.
- Alturas simultáneas de dos estrellas.
- Dos estrellas con orto o ocaso simultáneo.
- Alturas correspondientes.

¹⁷ NAVARRO LOIDI, 2008: 149.

¹⁸ Véase: GAZTAÑETA YTURRIBALZAGA, 1692: 1, .Entre los muchos instrumentos, que fe han inventado para el vso de las ciencias Matematicas, el mas admirable, y vniversal entre ellos, es el Quadrante de Reduccion, por muchas razones llamado: Quadrante Dorado, por lo general en sus operaciones, y facil en fu resolucion, que fin mucha necesidad de la Arithmetica fe refuelven por el, aun las queftiones mas dificultofas de la Aftronomia, y Geometria, fin mas inteligencia, que el conocimiento de los terminos convenientes para refolucion de las propoficiones. Mediante el cuadrante de reducción se resolvían los problemas de la navegación de estima y posibilidadaba reducir las leguas navegadas por un paralelo a a grados y minutos de longitud.

Según Itsaso Ibáñez, en esta época comenzaron a aplicarse correcciones por refracción, semidiámetro y paralaje a las alturas observadas. Asimismo, se introdujeron en la navegación conceptos de astronomía y triángulo esférico, lo que le llevó a afirmar: "El siglo XVII supuso un siglo de transición para el arte de navegar."²²

En definitiva, la aplicación de los avances en matemáticas, física y astronomía descubiertos en el siglo XVII allanaría el camino hacia la navegación astronómica científica que se desarrollaría en el siglo XVIII.

Uno de los principales exponentes de esta evolución fue Pedro Manuel Cedillo, de quien Horacio Capel comentó: "Cedillo fue una de las más destacadas figuras científicas ligadas al Colegio de Sevilla."²³

Cedillo fue el primer autor en publicar un tratado sobre trigonometría aplicada a la navegación, editado en 1718, mientras ejercía como maestro de Arte de Navegación en el Real Colegio Seminario de San Telmo, en Sevilla²⁴. A partir de este período, los autores de tratados de navegación comenzaron a fundamentar sus soluciones cada vez más en principios matemáticos, consolidando la influencia de la ciencia en el desarrollo de técnicas náuticas.

La aplicación de las correcciones a las alturas observadas en el mar se fue normalizando, lo que permitió reducir progresivamente los errores en el cálculo de la latitud observada. A partir de la segunda mitad del siglo, el estudio de aritmética, geometría y trigonometría plana y esférica se instituyó de manera obligatoria en la formación de los pilotos.

La transición de la navegación basada en la experiencia práctica hacia un enfoque fundamentado en la ciencia y la técnica fue un proceso largo y complejo. Los pilotos, acostumbrados a métodos tradicionales adquiridos a lo largo de años de profesión, tardaron en adoptar los nuevos conocimientos. Este cambio marcó el fin del arte de navegar como disciplina empírica y culminó con la posibilidad de calcular la longitud en el mar, un problema que había sido de gran preocupación para los navegantes. La dificultad para determinar la longitud geográfica no solo afectó la seguridad de la navegación, sino que también tuvo implicaciones comerciales y políticas. Un claro ejemplo fue el conflicto entre España y Portugal tras la firma del Tratado de Tordesillas en 1494, que estableció una línea divisoria entre los territorios descubiertos por ambas potencias. Para su trazado, se encargó al cosmógrafo catalán Jaime Ferrer definir con precisión dicha línea²⁵.

Los avances científicos y tecnológicos finalmente

¹⁹ LLOMBART PALET y IGLESIAS MARTÍN, 1998:531.

²⁰ GUILLÉN TATO, 1935: 38.

²¹ Véase: CEDILLO Y RUJAQUE, 1717: 13, La Amplitud ortiva, es el Arco de Horizonte, entre el punto donde sale el Afro, y el verdadero Levante. La Amplitud fiembre es de la especie de la Declinación. GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1:184-186. Recibe la denominación "por alturas correspondientes" la calculada por dos alturas iguales del astro, una a cada lado del meridiano.

²² IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, 2000: 88.

²³ CAPEL, 1982: 106.

²⁴ ARROYO RUIZ-ZORRILLA, 1989: 109-110.

²⁵ REY PASTOR, 1970: 78-79.

permitieron resolver la determinación de la longitud en el mar mediante el uso de distancias lunares²⁶ y el cronómetro²⁷. Impulsado por los Estados, se promovió la investigación con la creación de sociedades científicas y observatorios astronómicos, además de establecer premios y recompensas destinadas a quienes lograran soluciones eficaces.

Fomentada por los Estados, la investigación se promovió mediante la creación de sociedades científicas y observatorios astronómicos, además de la instauración de premios para incentivar avances en la determinación de la longitud en el mar.

En España, se estableció un premio de 6.000 ducados en 1567, cantidad que fue aumentada en 1598 con 2.000 ducados adicionales.

El 8 de julio de 1714, el Parlamento de Inglaterra promulgó el Decreto de la Longitud, que establecía:

- 20.000 libras para quien descubriera un método práctico para determinar la longitud, con un margen de error no superior a medio grado de un círculo máximo.
- 15.000 libras para un método con un error no superior a dos tercios de grado.
- 10.000 libras para un método con un error no superior a un grado.

En Francia, se ofreció una recompensa de 100.000 libras en 1716.

Estos incentivos económicos promovieron el estudio y la investigación entre matemáticos, cosmógrafos, astrónomos, mecánicos e inventores. Atraídos por la cuantía de los premios, se presentaron soluciones de todo tipo, algunas de ellas impracticables e incluso absurdas, concebidas únicamente con el propósito de obtener un

beneficio económico.

El relojero inglés John Harrison logró resolver el problema en 1772, desarrollando cronómetros de precisión que permitieron a cualquier buque conocer la hora exacta en alta mar. Sin embargo, el método del cronómetro planteaba un reto considerable: el diseño de un reloj portátil y altamente preciso que pudiera mantener a bordo la hora del primer meridiano.

Harrison logró este objetivo con su modelo H4, por lo que en 1773²⁸ recibió el premio del Parlamento inglés. Una vez comprobada la fiabilidad del cronómetro en los buques, este método facilitó significativamente el cálculo de la longitud.

Por otro lado, el método de distancias lunares ofrecía diversas ventajas en la determinación de la longitud. Dependía de una única observación, no requería una gran precisión en la medición ni un horizonte despejado, y se apoyaba en datos de efemérides, lo que simplificaba los cálculos²⁹.

Según Itsaso Ibáñez, el desarrollo de este método se vio favorecido por la convergencia de varios factores, entre ellos³⁰:

- La capacidad de elaborar tablas exactas de distancias lunares.
- La mejora en la precisión de las mediciones.
- La disponibilidad de Tablas Náuticas.

Entre los numerosos procedimientos propuestos, destacó el desarrollado por J. C. Borda (1733-1799), publicado en 1787. Según Achútegui (1996), este método fue el más utilizado en la práctica por los marinos.

Finalmente, José Mendoza y Ríos evaluó en 1797³¹ un total de cuarenta procedimientos de cálculo de la longitud, determinando que el de Borda era el más ventajoso entre

²⁶ Véase: GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1: 308-333; COTTER, 1968: 195-237; IBÁÑEZ, 2000: 93-119; SELLÉS, 2000: 177-214. El método de las distancias lunares permite obtener la hora del primer meridiano en cualquier instante. Para lo que se necesita disponer de tablas lunares que permitan conocer, para las horas de un determinado meridiano de referencia, las distancias angulares verdaderas entre el centro de la Luna y el centro del Sol y de las estrellas zodiacales principales. Además, es necesario realizar simultáneamente tres observaciones distintas (realizadas con un instrumento de reflexión): la distancia angular Luna – estrella/Sol, altura estrella y altura Luna (a las que hay que corregir por refracción y paralaje, para convertirlas en verdaderas). Estos datos nos permiten resolver el triángulo esférico formado en la posición del Zenit (Z) y por las posiciones aparentes de la Luna y la estrella, en el que se conocen los tres lados (D_o = distancia observada Luna – estrella/Sol, A_o = altura observada Luna, A_o^* = altura observada estrella), datos con los que obtenemos el valor del ángulo en el Zenit mediante la fórmula $\cos D_o = \frac{\sin A_o(\sin A_o^* + \cos A_o(\cos A_o^* \cos Z))}{\cos A_o(\cos A_o^*)}$. Despejando $\cos Z$, tenemos $\cos Z = \frac{\cos D_o - \sin A_o(\sin A_o^*)}{\cos A_o(\cos A_o^*)}$. Calculado el ángulo en el Zenit (Z), se pasa a calcular la distancia verdadera Luna – estrella (D_v) en el triángulo esférico referido a las posiciones verdaderas, mediante la fórmula $\cos D_v = \frac{\sin A_v(\sin A_v^* + \cos A_v(\cos A_v^* \cos Z))}{\cos A_v(\cos A_v^*)}$. Conocida D_v , entrando en las tablas de distancias Lunares se obtiene la hora del meridiano de referencia en el instante de la observación que restada de la hora local (calculada en el momento de la observación) permite conocer la longitud del lugar.

²⁷ Véase: GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1: 354-390; COTTER, 1968: 254-267; IBÁÑEZ, 2000: 120-125; SELLÉS, 2000: 141-176; SOBEL, 1998. Por cronómetros, la determinación de la longitud, queda reducida a calcular la diferencia entre la hora del buque y la de un meridiano conocido en el mismo instante, debido a que la diferencia de los meridianos se determina por la diferencia de las horas y las partes de la hora que uno considera al mismo tiempo debajo de cada uno; de modo que 15° de diferencia meridiana hacia el este, cuentan una hora más, y 15° grados hacia el oeste, una hora menos, la cuestión de las longitudes se puede reducir a esta. Sabiendo la hora en que se encuentra el buque y la misma hora en un meridiano de referencia. El cálculo de la longitud por este método, MAZARREDO, 1790: 153, lo concentra en conocer el movimiento del reloj, lo que adelanta o lo que atrasa sobre el tiempo medio en cada día y saber el estado del reloj un día dado, que son los elementos por los que se sabe la hora que es en el meridiano de salida y averiguar la hora en el buque. Para una mayor amplitud y comprensión del cálculo de la longitud por el método de distancias lunares.

²⁸ Véase: SOBEL, 1998.

²⁹ GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1: 304.

³⁰ IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, 2000: 93.

³¹ Véase: MENDOZA Y RÍOS, 1797: 68. Encontraba este autor que si bien con algunos de los métodos existentes se podía reducir la distancia lunar verdadera con exactitud y sencillez, esta operación podría hacerse de forma más ventajosa utilizando los senos-versos naturales, según el método propuesto por él mismo en 1795. Sin embargo, para poder utilizar estas funciones trigonométricas habría que emplear las tablas que había elaborado y que no vieron la luz hasta 1800.

aquellos que empleaban tablas logarítmicas.

Instrumentos utilizados para fijar la posición en la mar

Los instrumentos para medir alturas han sido y siguen siendo determinantes para obtener la posición geográfica del observador, ya que permiten calcular la altura de los astros. El primer navegante del que se tiene constancia en el uso de uno de estos instrumentos fue Bartolomé Díaz, quien, en 1488, al llegar a la bahía de Santa Elena, realizó mediciones astronómicas³².

Desde aquella época y hasta el siglo XVIII, se emplearon diversos instrumentos de observación, entre ellos:

- Astrolabio (siglo II a. C.).
- Cuadrante (siglo II d. C.).
- Ballestilla (1342).
- Cuadrante de dos arcos (1594).
- Octante (1731).
- Sextante (1763)³³.

El astrolabio marino (véase figura 2) es una adaptación del astrolabio astronómico, diseñado específicamente para la medición de la altura de los astros en navegación. Este instrumento solía fabricarse en metal o madera y estaba dividido en cuatro partes iguales mediante dos diámetros. Una de estas partes se subdividía en 90 segmentos, graduados de 0° a 90°.

En el centro del círculo se ubicaba la alidada, provista en sus extremos superior e inferior de una pínula, que servía para marcar la altura del astro. Su parte exterior contaba con una anilla, que permitía suspenderlo para su uso.

Para realizar la medición, el astrolabio se colgaba de la anilla en un lugar del buque donde estuviera menos expuesto a los balanceos. Luego, se giraba la alidada en dirección al astro hasta que la imagen, que entraba por el agujero de la pínula superior, coincidiera con la de la pínula inferior. En ese momento, se leía la graduación que marcaba la pínula, obteniendo así la altura del astro.

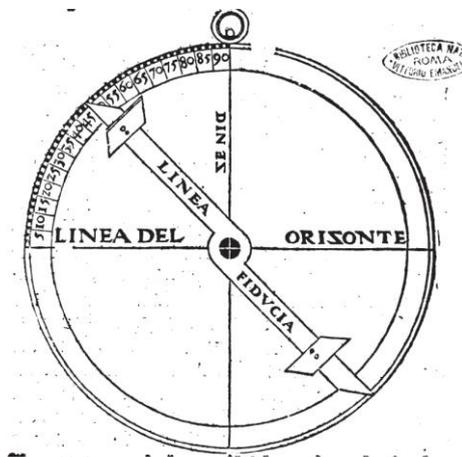


Figura 2. El Astrolabio. Fuente: Martín Cortés, 1551, fol. lxxvii, r.

El cuadrante (véase figura 3) es un instrumento diseñado para medir la altura de los astros, empleado tradicionalmente en navegación y astronomía. Construido en madera o metal, consta de varios elementos esenciales que permiten su correcto funcionamiento.

Su estructura principal está formada por un sector circular, cuyo arco de circunferencia abarca 90°, dividido en 90 partes iguales. En uno de sus radios extremos, se

encuentran dos pínulas perforadas, utilizadas para encuadrar el astro. Además, dispone de una plomada, cuya función es indicar la altura en grados.

Para realizar una medición, el observador debe alinear el astro a través de las pínulas, situadas cerca de los extremos de uno de los radios del cuadrante. Una vez encuadrado el astro, se obtiene su altura sobre el horizonte mediante la graduación marcada por el hilo de la plomada.

³² BARROS, 1628: 64.

³³ LOUZÁN LAGO, 2005: 34, 232, 240, 246, 262.

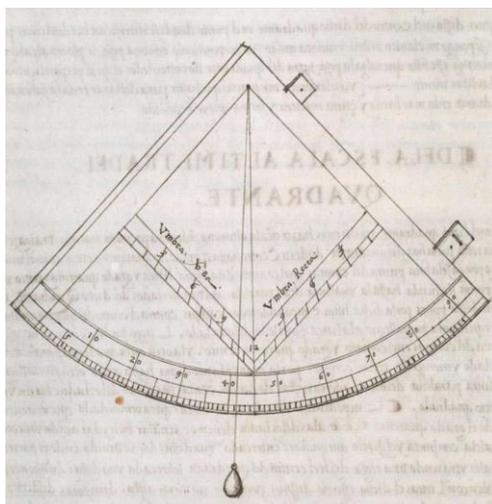


Figura 3. El Cuadrante. Fuente: Chaves, 1537, p. s/n.

La ballestilla (véase figura 4 y 5) es un instrumento de madera, constituido por una vara de sección cuadrangular de aproximadamente un metro de longitud, que va graduado de 0° a 90° y con una sonaja de madera, también llamada transversario, deslizante y proporcionada a la longitud de la vara.

La configuración de la ballestilla, fue evolucionando mediante la introducción de varias sonajas de distintas dimensiones, lo que requería la utilización de graduaciones diferentes para cada una de ellas, que iban grabadas en cada cara de la vara. La introducción de los distintos tamaños de la vara facilitó la observación de ángulos pequeños o grandes, tal como nos muestra Andrés García de Céspedes (1606) en la fabricación de la ballestilla que sirvió de padrón para los pilotos, en la que puso tres sonajas de diferentes tamaños, la pequeña para observar astros con una altura entre 6° y 12°, la mediana de 12° a 24° y la grande de 24° hasta 70°, con lo cual conseguía una mayor exactitud en las observaciones.

Sobre el uso de este instrumento, Alonso de Chaves advertía que no se podía utilizar para tomar la altura del Sol, fijaba su uso para observar estrellas, distancia entre

ellas o para tomar la altura de edificios³⁴.

Sin embargo, Martín Cortés cuando se refiere a su uso dice que sirve para observar estrellas en la mar, que no sirve para tierra, ni para el Sol a excepción que exista un horizonte claro y una delgada nube³⁵.

Mientras que Pedro Manuel Cedillo explica que hay dos modos de observar el Sol con la ballestilla, uno cara al Sol pero que por sus inconvenientes es poco usado y otro de espaldas al Sol³⁶. Para observar de espaldas al Sol, se seleccionaba la sonaja de acuerdo con la altura del Sol en ese instante, en el extremo inferior de la sonaja se colocaba una chapa de latón con un orificio para poder mirar el horizonte, a través del cual se iba ajustando la sombra del extremo superior de la sonaja y los grados que marcasen la vara en ese momento, correspondía a la distancia zenital. Mientras que, para observar de cara a la estrella, se seleccionaba la sonaja correspondiente a la altura y se situaba la vara sobre el hueso debajo del ojo, deslizándose la sonaja hasta que por la parte inferior se divisaba el horizonte y por la superior la estrella, en ese instante se tomaba la lectura de la vara que correspondía a la altura de la estrella sobre el horizonte.

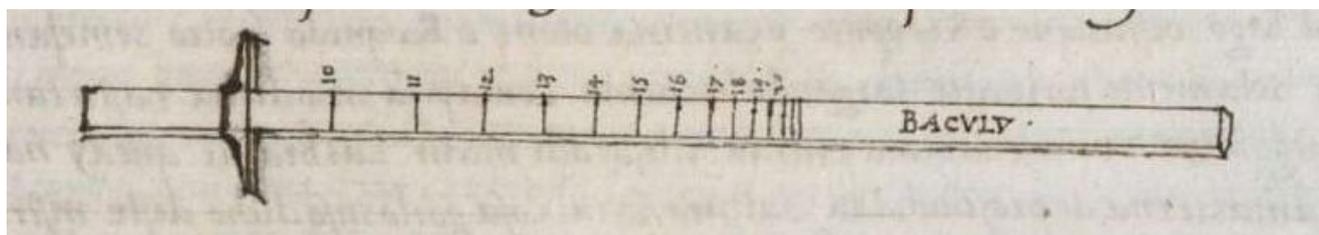


Figura 4. La Ballestilla. Fuente: Chaves, 1537, p. s/n

³⁴ CHAVES, 1537: 22 V.

³⁵ CORTÉS, 1551: lxxxii R.

³⁶ CEDILLO, 1745: 120.

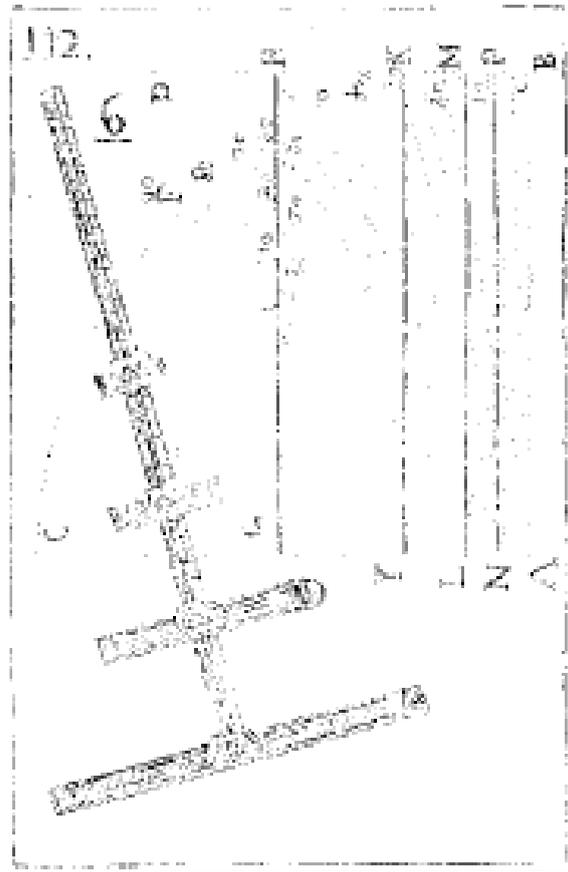


Figura 5. Ballestilla de 4 sonajas. Fuente: Sánchez Reciente, 1749, p. 112.

El modelo de cuadrante de Davis (véase figura 6) que describimos en este apartado corresponde al considerado segundo modelo, que Jhon Davis (1552-1605) ideó en 1595, para superar la limitación que tenía el primer instrumento que construyó en 1594 que solo permitía medir alturas entre 15° y 45° . Este cuadrante se caracterizaba por tener dos arcos con un centro común, el menor contenía 60° y el mayor abarcaba el complemento a 90° que son 30° .

La graduación de los dos arcos, no necesariamente estaban siempre distribuidos en esa proporción, en algunos casos se dividieron en $65^\circ / 25^\circ$, $75^\circ / 15^\circ$, $70^\circ / 20^\circ$. La

denominación de arco menor y mayor, no guardaba relación con la magnitud de su graduación, si no con la física³⁷. Completaban el cuadrante tres pinulas horadadas, una situada en el centro común de los dos arcos, lo que permitía ver el horizonte, las otras dos estaban situadas una cada arco. Para realizar la observación, se orientaba el cuadrante de cara al astro, haciendo coincidir el orificio de la pínula del sector pequeño con la correspondiente a la del horizonte, instante en el cual se movía la pínula del segundo sector hasta hacerla coincidir con el astro y este, estuviera sobre el horizonte. La altura del astro se obtiene mediante la suma de la lectura de los dos arcos.

³⁷ SÁNCHEZ RECIENTE, 1749: 94.

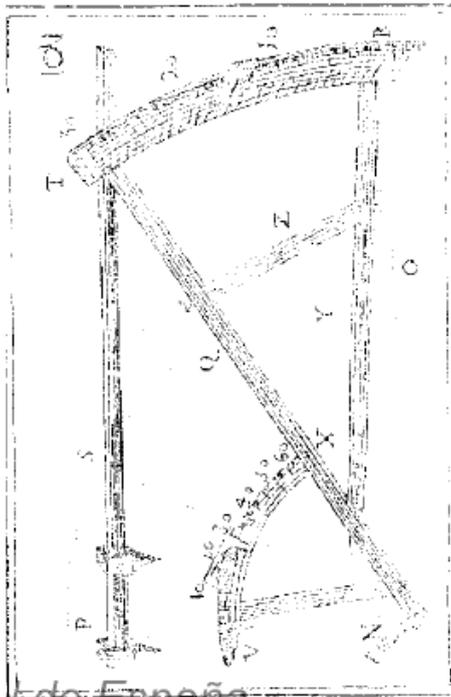


Figura 6. El Cuadrante de Davis. Fuente: Sánchez Reciente, 1749, p. 112.

En lo que se refiere al octante, en este caso, de los dos que John Hadley (1688-1744) presentó en las sesiones de los días 6 y 13 de mayo de 1731 celebradas por la Real Sociedad de Londres nos vamos a referir al segundo que presentó, de técnica muy parecida a un sextante (véase figura 7). Nos hemos decantado por este modelo que fue el que Miguel Archer explica, referenciando a Antonio Ulloa, en su libro *Lecciones Náuticas* (1756)³⁸.

El octante está constituido por una armadura de madera, en forma de sector circular soportada por dos radios, con un ángulo de circunferencia de 45° dividido en 90° partes iguales. Desde el centro hasta el arco graduado baja una alidada que permite leer el ángulo observado y sobre la cual va afianzado un espejo perpendicular a su plano. En el radio exterior cuenta con otro espejo, cuya mitad más próxima al sector está azogada también perpendicular al plano del instrumento, dotado de una ligera rotación que le permite ponerse paralelo al otro espejo cuando la alidada

se sitúa en 0°. En el radio interior hay una pínula que permite visualizar las imágenes de los objetos representados en el espejo situado en el radio exterior.

Para observar los astros con este instrumento se siguen los pasos siguientes: se sitúa el observador cara al astro y se procede a rectificar el instrumento, primero se pone la alidada sobre 0°, con el octante vertical y el arco hacia abajo, después se visualiza el horizonte a través de la pínula y la parte no azogada del espejo, comprobando si las dos imágenes, la vista por reflexión en la parte azogada y la vista directamente coinciden formando una línea recta. Rectificado el instrumento, el observador se sitúa de cara al astro y mirando por la pínula al horizonte y la parte no azogada del espejo, se mueve la alidada hasta que la imagen doblemente reflejada del astro se ve proyectada encima del horizonte, en ese instante la graduación señalada por la alidada corresponde a la altura del astro.

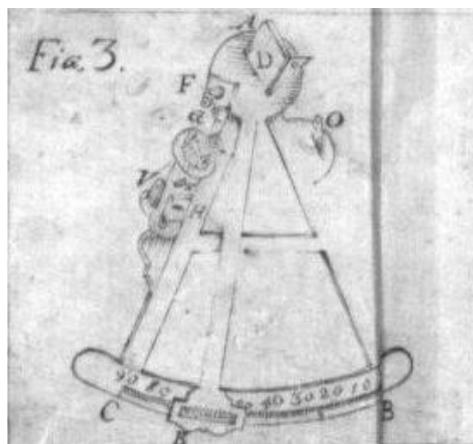


Figura 7. El Octante. Fuente: Archer, 1756, p. s/n.

³⁸ ARCHER, 1756: 132.

Itsaso Ibáñez cuando se refiere del octante al sextante (véase figura 8), señala que desde que se dio a conocer en 1731 el cuadrante de reflexión fue motivo de una constante evolución hasta convertirse en la actualidad en un instrumento preciso. Por su parte Salvador García Franco destaca que la evolución de este instrumento fue acometida por Hadley desde la fecha en que se inventó corrigiendo las originarias imprecisiones causadas por el anteojo que amplificaba los defectos relativos al paralelismo de las caras de los espejos, disminuyó el tamaño del octante que originariamente tenía un radio de 50 cm e introdujo el nonius en la escala.

Hadley desde su invención, ya había manifestado la aplicación del octante en la medición de las distancias

lunares, aunque como no medían arcos mayores de 90°, se construyeron sextantes que medían hasta 120°, llegándose a ampliar hasta círculos enteros de reflexión³⁹. Para medir la altura de un astro con un sextante el observador se sitúa cara al astro manteniendo el sextante vertical dirigirá una visual al horizonte a través del anteojo, aproximadamente en la zona donde cae el pie del vertical del astro. Desplazando la alidada hasta que la imagen del astro doblemente reflejada quede en las proximidades del horizonte, en el instante en el que en el campo de visión tengamos la imagen directa del horizonte y la doblemente reflejada del astro, con un ligero movimiento de muñeca tangentearemos el astro sobre el horizonte obteniendo la altura instrumental del astro.



Figura 8. Sextante. Fuente: Louzán, 2005, p. 463.

Correcciones a las alturas observadas

La altura, es el arco de vertical que va desde el horizonte al astro. En la mar las alturas de los astros que se observan con los instrumentos de tomar alturas están referidas al horizonte visible. Para lo cual hay que tener en

cuenta (al margen de las correcciones que se deben aplicar a la altura instrumental del astro: corrección de índice y corrección instrumental para transformarla en observada), las correcciones por: depresión del horizonte, semidiámetro, refracción astronómica y paralaje. Para pasar de la altura instrumental a la verdadera se procede según la siguiente fórmula⁴⁰:

$$Av = Ai + Ci - Da \pm Sa - R + p$$

Conocidas las correcciones a realizar por paralaje y semidiámetro desde que Hiparco (siglo II a.C.) las dedujo en un eclipse de Sol y establecidos los preliminares de la refracción astronómica por Arquímedes (siglo III a. C.), Regiomontano y Walther manifestaron la importancia de la refracción astronómica a bajas alturas hasta llegar a Ticho Brahe (1602) que estableció la corrección aplicar por refracción⁴¹.

El cronómetro Marino

El método de los relojes propuesto por Hernando Colón en 1524 en la llamada junta de Badajoz, celebrada debido a que el tratado de Tordesillas (1494) no había fijado el antimeridiano que tenía que marcar la línea divisoria en el Pacífico, fue donde Hernando Colón, como sostiene José María López Piñero, realizó una formulación

impecable para calcular la longitud mediante relojes⁴². Mientras, en 1530 Gemma Frisius (1508-1555) también propuso el método de la utilización de relojes portátiles para el mismo fin, pero el problema, era la difícil medición del tiempo en la mar, debido a las condiciones del medio y a la inexactitud de los relojes de péndulo⁴³. Este método para calcular la longitud en la mar por medio de relojes también fue contemplado en el libro de texto para pilotos escrito por Andrés de Poza en 1585, titulado *Hydrografia*, en donde enseñaba a calcular la longitud de llegada del buque, mediante el uso de relojes de arena⁴⁴.

Conocida la teoría para calcular por este método la longitud, faltaba contar con los relojes, adecuados para poder ser utilizados en los buques, que pudiesen soportar las inclemencias del tiempo, tanto de las originadas por las condiciones del mar, los cambios bruscos de temperatura

³⁹ MACARTE Y DÍAZ, 1801: 259.

⁴⁰ Donde: Av=Altura verdadera; Ai=Lectura del instrumento; Ci = Corrección de índice; Da=Depresión del horizonte; Sa=Semidiámetro en altura; R=Refracción astronómica; p=Paralaje en altura.

⁴¹ GARCÍA FRANCO, 1947, vol. 1: 329-330.

⁴² LÓPEZ PIÑERO, 1979: 208.

⁴³ TOUS MELIÁ, 2001: 254.

⁴⁴ POZA, 1585: 32-37.

como los movimientos propios del buque en navegación. Todos estos inconvenientes, logró solucionarlos el relojero inglés John Harrison, prescindiendo del péndulo y utilizando los materiales adecuados para resistir las diferentes temperaturas, manteniendo constante la marcha del reloj.

De acuerdo con lo expresado por Dava Sobel, fue en 1730 cuando Harrison empezó a trabajar en los relojes marinos, para cinco años más tarde finalizar el modelo H-1 que pesaba 34 kilos, ubicado dentro de una caja cuadrada acristalada de 125 centímetros. Las pruebas de mar del H-1 se realizaron en 1736, primero en el río Humber antes de iniciar viaje de Spithead a Lisboa a bordo del buque de la Armada inglesa *Centurion*, mandado por el capitán Proctor, que no pudo emitir informe sobre el comportamiento del H-1 por su fallecimiento a la llegada del buque a puerto.

El tornaviaje lo hizo a bordo del *Orford* mandado por Roger Wills, en donde el H-1 fue determinante para identificar la posición del buque, ya que, al acercarse a tierra, Wills calculó una posición que fue enmendada por Harrison, hecho que impresionó a Wills, lo que le llevó a firmar un documento en el que reconocía la precisión del H-1. Con este certificado se presentó el 30 de junio de 1737 ante el Consejo de la longitud, en donde Harrison fue el único que expuso los puntos débiles que tenía y solicitó dos años más y un adelanto de 500 libras para seguir

trabajando en el proyecto, el Consejo de la longitud le concedió la mitad del adelanto comprometiéndose a entregarle el resto a la presentación del nuevo modelo. Terminados los trabajos con el H-2, lo presentó ante el Consejo en 1741, teniendo que superar unas durísimas pruebas que se realizaron en condiciones extremas de temperatura, así como de balances, cabezadas y pantocazos, aun así, no satisfizo a Harrison que inició la construcción del H-3, en la que estuvo trabajando 20 años. Al H-3 le sucedió el H-4, cronómetro con el que obtuvo el premio de la longitud⁴⁵. Después de ciertos retrasos en la comprobación de la fiabilidad del H-4, por fin en noviembre de 1761, Harrison hijo, embarcó en el puerto de Londres en el buque *Deptford*, con destino a Jamaica. El H-4 demostró su fiabilidad, desde el inicio del viaje, al fijar con exactitud la posición de Madeira. El 19 de enero de 1762, al llegar el buque a Jamaica, se realizó una comparación entre la hora del mediodía local, obtenida mediante métodos astronómicos, y la registrada por el H-4, el resultado fue brillante, el reloj, en 81 días de viaje se había atrasado 5''. Impedimentos burocráticos le alejaron del premio, exigiéndole nuevas pruebas. Estas se realizaron en 1772 con el H-5, que demostró su exactitud hasta de un tercio de segundo al día. Por lo que para este trabajo estableceremos la fecha de 1772 cuando la ciencia estuvo en disposición de poder calcular la longitud en la mar por el método de relojes.



Figura 9. Cronómetro marino de finales del siglo XVIII. Fuente: Navegar y Navegar⁴⁶.

Tablas de la declinación del Sol

En los siglos XI, XII y XIII, los astrónomos hispanoárabes perfeccionaron los instrumentos y los métodos de observación, elaborando tablas astronómicas tan precisas y completas que serían utilizadas en todo el mundo durante varios siglos. Las principales figuras de esta etapa fueron: Ibn al-Sid al Batalúsi (1052-1127),

Azarquiel (1029-1100), Avempace (1106-1138), Geber (?-1140), Averroes (1120-1198), Maimónides (1135-1204) y Alpetragio (?-1200). Como científico más destacado de esta etapa, está Azarquiel, que interesado en los movimientos de los astros, estudia la precesión de los equinoccios, obteniendo un valor de 46'' por año, muy próximo a lo admitido hoy en día, y la oblicuidad de la eclíptica, que hace variar entre 23° 33' y 23° 53'. Sus Tablas Toledanas fueron traducidas al latín, de utilidad

⁴⁵ SOBEL, 1998: 106.

⁴⁶ Disponible en:

<http://www.armada15001900.net/navegarynavegar.htm>

durante más de un siglo para el cálculo del movimiento de los planetas. Figura imprescindible en el desarrollo de la ciencia y de la astronomía fue el Rey Alfonso X el Sabio (1221-1284). Creó una estructura de centros de estudio y traducción alrededor de Toledo, en la cual se tradujo un número extraordinario de obras en árabe y, en menor medida, en hebreo en las que se encontraba gran parte del legado científico y filosófico de la antigüedad griega clásica, india y árabe.

Los Libros del Saber de Astronomía de Alfonso X el Sabio constituyen su obra más relevante, en la que se establece una clara diferenciación entre astronomía y astrología, siguiendo el enfoque de Ptolomeo en el *Almagesto* y el *Tetrabiblos*.

La obra está compuesta por catorce tratados, que abarcan diversos aspectos del conocimiento astronómico y la construcción de instrumentos de observación: *Libro de la*

octava esfera (cuatro obras), *Libro del Alcora*, *Libro del astrolabio redondo*, *Libro del astrolabio plano*, *Libro de la lámina universal*, *Libro de la açafeha*, *Libro de las armellas*, *Libro de las láminas de los siete planetas*, *Libro del cuadrante*, *Libros de los relojes* (cinco obras).

En estos tratados se exponen conocimientos sobre cosmografía, proyección y el diseño de instrumentos astronómicos, esenciales para la observación y el análisis del cielo.

Se desarrollaron diversos instrumentos astronómicos con el objetivo de verificar y mejorar observaciones anteriores. Estas mejoras permitieron perfeccionar la teoría de Arzaquiel, lo que llevó a la sustitución de las Tablas Toledanas por las Tablas Alfonsíes, utilizadas en toda Europa hasta principios del siglo XVII, cuando fueron reemplazadas por las Tablas Rudolfinas, publicadas por Johannes Kepler en 1627.

AÑO PRIMERO. 17

| Enero. | | | Febrero | | | Março | | |
|--------------|-------|------|-------------|-------|------|--------------|-------|------|
| Declinacion. | | | Declinacion | | | Declinacion. | | |
| Dias. | Gras. | Min. | Dias. | Gras. | Min. | Dias. | Gras. | Min. |
| 1 | 21 | 50 | 1 | 14 | 5 | 1 | 3 | 49 |
| 2 | 21 | 41 | 2 | 13 | 45 | 2 | 3 | 25 |
| 3 | 21 | 31 | 3 | 13 | 25 | 3 | 3 | 2 |
| 4 | 21 | 20 | 4 | 13 | 5 | 4 | 2 | 38 |
| 5 | 21 | 9 | 5 | 12 | 45 | 5 | 2 | 14 |
| 6 | 20 | 58 | 6 | 12 | 24 | 6 | 1 | 51 |
| 7 | 20 | 47 | 7 | 12 | 3 | 7 | 1 | 27 |
| 8 | 20 | 35 | 8 | 11 | 42 | 8 | 1 | 3 |
| 9 | 20 | 23 | 9 | 11 | 21 | 9 | 0 | 39 |
| 10 | 20 | 11 | 10 | 11 | 0 | 10 | 0 | 16 |
| 11 | 19 | 57 | 11 | 10 | 39 | 11 | 0 | 8 |
| 12 | 19 | 43 | 12 | 10 | 17 | 12 | 0 | 32 |
| 13 | 19 | 29 | 13 | 9 | 54 | 13 | 0 | 55 |
| 14 | 19 | 15 | 14 | 9 | 32 | 14 | 0 | 18 |
| 15 | 19 | 0 | 15 | 9 | 10 | 15 | 1 | 42 |
| 16 | 18 | 44 | 16 | 8 | 48 | 16 | 2 | 5 |
| 17 | 18 | 30 | 17 | 8 | 25 | 17 | 2 | 29 |
| 18 | 18 | 15 | 18 | 8 | 3 | 18 | 2 | 57 |
| 19 | 17 | 59 | 19 | 7 | 40 | 19 | 3 | 10 |
| 20 | 17 | 43 | 20 | 7 | 17 | 20 | 3 | 39 |
| 21 | 17 | 26 | 21 | 6 | 54 | 21 | 4 | 3 |
| 22 | 17 | 9 | 22 | 6 | 31 | 22 | 4 | 26 |
| 23 | 16 | 52 | 23 | 6 | 8 | 23 | 4 | 49 |
| 24 | 16 | 35 | 24 | 5 | 45 | 24 | 5 | 12 |
| 25 | 16 | 17 | 25 | 5 | 22 | 25 | 5 | 35 |
| 26 | 15 | 59 | 26 | 4 | 59 | 26 | 5 | 58 |
| 27 | 15 | 41 | 27 | 4 | 36 | 27 | 6 | 20 |
| 28 | 15 | 22 | 28 | 4 | 13 | 28 | 6 | 43 |
| 29 | 15 | 3 | | | | 29 | 7 | 5 |
| 30 | 14 | 44 | | | | 30 | 7 | 28 |
| 31 | 14 | 25 | | | | 31 | 7 | 51 |

Figura 10. Tablas de declinación del Sol. Fuente: Zamorano, 1581: 17.

El destacado astrónomo Salmantino Abraham Zacuto (ca. 1450 – 1510) publicó su obra *Hibbur ha-gadol* (Compilación Magna) sobre 1473, pero fue su discípulo, José Vicinhu publicó su obra *Almanach Perpetuum* (Almanaque Perpetuo), el cual se trata de un resumen de su *Compilación Magna* al que añadió las efemérides del Sol, la Luna y los planetas. En su almanaque perpetuo utilizó el valor de 23° 33' para la oblicuidad de la eclíptica, dato en el que se fundamentaron los regimientos de navegación⁴⁷ hasta Rodrigo Zamorano (1581) que utilizó como máximo valor de la declinación del Sol 23° 28', siguiendo los cálculos realizados por “los mas excelentes Mathemáticos y Afrologos de nueftros tiempos”⁴⁸.

En el prólogo del *Compendio de la Arte de Navegar* refiere como ha observado el valor de la máxima declinación siguiendo los cálculos efectuados por Georgio Pubarchio, Juan de Monte Regio, Nicolás Copérnico y Erasmo Reynoldo entre otros. El valor de la declinación máxima

del Sol no logró poner de acuerdo a los tratadistas del siglo XVIII, que adoptaron los siguientes valores, Pedro Manuel Cedillo (1717, 1745): 23° 30'; Juan Sánchez Reciente (1749): 23° 30'; Miguel Archer (1756): 23° 29'; Jorge Juan (1757): 23° 28' 30"; Francisco Barreda (1766): 23° 30'. De lo que se desprende que los profesores del Colegio de San Telmo de Sevilla siguieron el valor adoptado por Cedillo.

Tablas de distancias lunares

En tierra el cálculo de la longitud geográfica no presentaba un problema mayor, ya que se calculaba mediante la observación de los eclipses de Sol o de Luna, en la que después de realizar observaciones simultáneas, la simple comparación entre las horas locales en que se habían realizado, se determinaba la diferencia en longitud. Pero este método exigía cálculos muy laboriosos de difícil

⁴⁷ Como excepción cabe señalar que Martín Cortés en su *Arte de Navegar* (1551) basándose en Nunes utilizó el valor de 23° 30' para la oblicuidad de la eclíptica.

⁴⁸ ZAMORANO, 1581: 16R.

ejecución a bordo de los buques. Por lo que se adoptó un método mucho más sencillo, el de las distancias lunares, que ya había sido ideado por John Werner de Nuremberg (1468-1528), en su obra *Annotations on the first book of Ptolomy's Geography* editada en 1514, ya recomendaba el uso del astrolabio para calcular la distancia entre la Luna y otro astro y así determinar la longitud⁴⁹.

Por lo que, John Werner de Nuremberg es considerado por Itsaso Ibáñez como el primero que recomendó el método de las distancias lunares para el cálculo de la longitud, aunque su método teórico no se pudo poner en práctica debido a los insuficientes conocimientos de la mecánica

celeste, la inexistencia de instrumentos de observación adecuados y que el aparato matemático no estaba desarrollado lo suficiente como para poder facilitar los cálculos necesarios. Estos serían facilitados por los estudios realizados por Johannes Kepler (1571 – 1630), Edmund Halley (1656 – 1742) y el Abad de la Caille (1713 -1762) desembocando en la confección de las Tablas lunares por Tobías Mayer en 1767.

En España, la Armada, en el *Estado General de Marina para el año 1786* incluyó bajo el título de Almanak Náutico las Tablas de distancia lunares para 1786 y 87, que estaban referidas al meridiano de Paris.

6

| DISTANCIA DEL CENTRO DE LA LUNA AL SOL Y Á LAS ESTRELLAS. | | | | | |
|---|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Dias. | Estre-llas orient. | 0 ^h 9' 20'' | 3 ^h 9' 20'' | 6 ^h 9' 20'' | 9 ^h 9' 20'' |
| | | G. M. S. | G. M. S. | G. M. S. | G. M. S. |
| 1 | α γ | | | | |
| 2 | | 87.39.51 | 85.56.54 | 84.13.48 | 82.30.33 |
| 3 | | 73.52. 8 | 72. 8. 3 | 70.23.53 | 68.39.35 |
| 4 | | 59.56.48 | 58.12. 1 | 56.27.10 | 54.42.17 |
| 5 | | 45.57.20 | | | |
| 6 | α γ | 78.29.35 | 76.45.28 | 75. 1.21 | 73.17.13 |
| 7 | | 64.30.32 | 62.52.29 | 61. 8.28 | 59.24.32 |
| 8 | | 50.45.59 | 49. 2.36 | 47.19.23 | 45.36.22 |
| 9 | | 37. 4.40 | 35.23.10 | 33.42.13 | 32. 1.49 |
| 10 | | 23.50.25 | | | |
| 11 | β Π | 64.28.23 | 62.43.23 | 60.58.27 | 59.13.36 |
| 12 | | 50.30.46 | 48.46.33 | 47. 2.29 | 45.18.35 |
| 13 | | 36.41.31 | 34.58.43 | 33.16.13 | 31.34. 2 |
| 14 | α Ω | 59.33.17 | 57.50.28 | 56. 7.50 | 54.25.25 |
| 15 | | 45.56.25 | 44.15.15 | 42.34.20 | 40.53.39 |
| 16 | | 32.34. 3 | 30.54.56 | 29.16. 7 | 27.37.36 |
| 17 | α Π | 73.28.19 | 71.51. 4 | 70.14. 6 | 68.37.25 |
| 18 | | 60.38. 9 | 59. 3. 7 | 57.28.20 | 55.53.51 |
| 19 | | 48. 5.26 | 46.32.32 | 44.59.53 | 43.27.29 |
| 20 | | 35.49.18 | 34.18.22 | 32.47.40 | 31.17.13 |
| 21 | α Π | 69.25. 7 | 67.55.12 | 66.25.25 | 64.55.48 |
| 22 | | 57.29.34 | 56. 0.35 | 54.31.41 | 53. 2.50 |
| 23 | | 45.39.19 | 44.10.40 | 42.42. 1 | 41.13.10 |
| 24 | | | | | |
| 25 | γ | 122.28. 7 | 121. 5.48 | 119.43.37 | 118.21.36 |
| 26 | | 111.33.21 | 110.11.58 | 108.50.40 | 107.29.24 |
| 27 | | 100.43.51 | 99.22.48 | 98. 1.44 | 96.40.39 |
| 28 | | 89.54.45 | 88.33.22 | 87.11.52 | 85.50.19 |
| 29 | | 79. 0.43 | 77.38.21 | 76.15.48 | 74.53. 5 |
| 30 | | 67.56.34 | 66.32.35 | 65. 8.22 | 63.43.53 |
| 31 | | 56.37.33 | 55.11.21 | 53.44.57 | 52.18.11 |
| I.F. | α γ | 44.59.35 | 43.30.51 | 42. 1.47 | 40.32.21 |
| I.F. | | 64.23.36 | 62.35.54 | 60.48. 6 | 59. 0.13 |
| I.F. | | 50. 0. 2 | | | |

Extractado del Almanak Náutico Ingles.

Figura 11. Tabla de distancias lunares 1786. Fuente: *Almanak Náutico y Estado General de Marina para el año de 1786*, 1786: 6.

Las cartas de marear

En sus inicios, las cartas náuticas no incorporaban coordenadas geográficas. Según Ricardo Cerezo, las primeras representaciones en las que se incluye la línea

equinoccial son la carta de Juan de la Cosa (1500), la carta de Cantino (c. 1502) y la carta de King-Hamy (c. 1502)⁵⁰. La del piloto Juan de la Cosa⁵¹, también fue la primera en

⁴⁹ ROBERTSON, 1780: ii.

⁵⁰ CEREZO MARTÍNEZ, 1994: 56.

⁵¹ Juan de la Cosa (1460 – 1510), junto con Vicente Yañez Pinzón (1462 - 1514), Juan Díaz de Solís (1470 - 1516) y Américo Vespucio (1454 – 1512), según narra Veitia Linage (1672) fueron convocados en 1507 por el Rey Don Fernando el Católico,

nombrando piloto mayor a Americo Vespucio, por ser el más práctico. Continúa Veitia Linage (1672) que se les despacharon títulos de pilotos a Vicente Yañez Pinzón y a Juan Díaz de Solís, sin embargo no hace referencia al nombramiento de piloto que también se le otorgó a Juan de la Cosa, como así consta en AGI, Indiferente, 1961, L.1, F.20V-21. El de Vicente Yañez Pinzón en

mostrar el contorno conocido de la costa americana y según José Pulido Rubio marcó el comienzo de la cartografía de ese continente. Tres hechos fundamentales marcaron la labor cartográfica, que se mantuvo hasta la primera mitad del siglo XVIII, la creación de la Casa de Contratación de Sevilla (1503), la del piloto mayor (1508) y la del Padrón Real (1512), que se trataba de “[...] un inventario de las tierras descubiertas.”⁵²

Mediante Real provisión, al piloto mayor Juan Díaz de Solís y al piloto Juan Vespucio se les encargó la realización de un padrón real en el que se tenían que consignar todas las tierras descubiertas con la información aportada por los pilotos al regreso de sus viajes, para servir de base en la confección de una carta de marear, por la que se debían guiar los pilotos de la carrera de Indias⁵³. Un reflejo del trabajo científico de la Casa de Contratación fue la fabricación de cartas de marear y mapas en donde se representaba el contorno del mundo conocido en 1529.

La necesidad de situar la latitud geográfica en la carta llevó a la incorporación de una escala de latitudes en las cartas portulanas. Estas cartas, por su construcción, eran conformes, ya que conservaban en el mapa los rumbos medidos en tierra, lo que las hacía aptas para establecer el punto de escuadría (rumbo seguido y latitud observada). Ante esta particularidad y la necesidad de situarse en el mar mediante el método de escuadría, además de corregir el rumbo de aguja afectado por la declinación magnética

para convertirlo en rumbo verdadero, Diego Gutiérrez diseñó cartas con doble graduación.

Estas cartas mostraban dos escalas de latitudes: Una situada en un meridiano a 100 leguas al poniente de las Azores, con el origen de latitudes sobre la línea equinoccial; Otra con origen a 3° al norte sobre la línea equinoccial, ubicada 50 leguas al este de la isla de Guadalupe.

Las cartas de doble graduación tuvieron una gran aceptación entre los pilotos, ya que les permitían trazar el rumbo sin necesidad de calcular la variación magnética, además de facilitar el cálculo del punto de escuadría⁵⁴.

Según Cesáreo Fernández Duro, estas cartas de doble graduación presentan dificultades para su explicación. Por ello, recurrió a la interpretación dada en la crítica de Hernando Colón, reflejada en el coloquio entre Fulgencio y Teodoro, donde el primero formula preguntas y el segundo responde⁵⁵.

Para garantizar que Diego Gutiérrez no fabricara cartas náuticas que no estuviesen ajustadas al padrón real, se emitió una Real Cédula en Valladolid el 22 de febrero de 1545 con esta disposición⁵⁶.

Según Ricardo Cerezo (1994), la presencia de la carta de marear en *Arte de Navegar* (1545) de Pedro de Medina y *Arte de Navegar* (1551) de Martín Cortés indica que este formato era el modelo oficial, ajustado al padrón real⁵⁷.

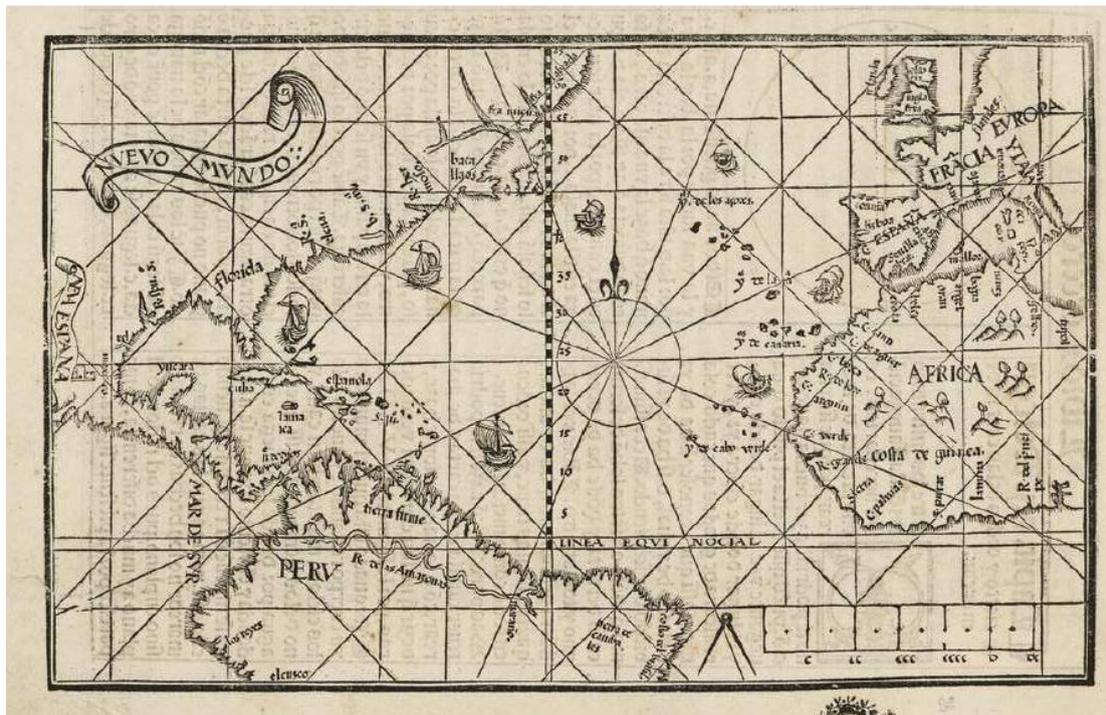


Figura 12. Carta de marear. Fuente: Medina, 1545, s/n.

AGI, *Indiferente*, 1961, L.1, F.21R(1) y el de Juan Díaz de Solís en AGI, *Indiferente*, 1961, L.1, F.21R(2). Los tres títulos están datados en Burgos a 22/03/1508.

⁵² PULIDO RUBIO, 1950: 255.

⁵³ AGI, *Indiferente*, 418, L.3, F. 326V-328V. Ver: *Puente Olea* (1900). Para el importante trabajo geográfico realizado por la Casa de Contratación de Sevilla.

⁵⁴ CEREZO MARTÍNEZ, 1994: 207.

⁵⁵ FERNÁNDEZ DURO, 1881: 509.

⁵⁶ AGI, *Archivo General de Indias, Indiferente*, 1963, L.9, F.176V. Real Cédula a Diego Gutiérrez, cosmógrafo, vecino de Sevilla, para que no haga cartas de marear que no estén conformes con el patrón general. 1545-02-22, Valladolid.

⁵⁷ CEREZO MARTÍNEZ, 1994: 262.

Siguiendo a Ricardo Cerezo, la adopción de la dirección del norte verdadero como eje de orientación en las cartas, junto con la importancia de la longitud para determinar la posición, dio lugar a la creación de las cartas planas de grados iguales, basadas en las coordenadas ortogonales, latitud y longitud.

Esta proyección presentaba una serie de errores, cuya magnitud dependía de la diferencia efectiva entre paralelos, meridianos y la latitud del paralelo medio. Además, carecía de la propiedad de conformidad, lo que significaba que no era isógona, impidiendo que los rumbos pudieran representarse mediante líneas rectas, salvo en latitudes bajas, donde la medida de los grados de latitud y longitud era prácticamente la misma.

El problema de no conformidad de las cartas planas no tuvo solución hasta 1569, cuando Gerhard Kremer (1512-1594), conocido por su apellido latinizado Mercator, desarrolló la proyección que lleva su nombre. Fundamentada en la proyección cilíndrica centrográfica⁵⁸, esta solución evitaba la deformación angular en la representación cartográfica⁵⁹. Mercator aplicó un aumento proporcional de los paralelos en relación con el Ecuador, incrementando los grados de latitud hacia los polos.

Con esta proyección, todas las loxodrómicas⁶⁰ pudieron

representarse en la carta como líneas rectas, cortando todos los meridianos bajo un mismo ángulo. En 1594, Edward Wright (1561-1615) perfeccionó este método, justificando matemáticamente la idea propuesta por Mercator. Su demostración mostró que la separación de los paralelos hacia los polos aumentaba en proporción a la secante de la latitud.

Mientras tanto, los cosmógrafos de la Casa de Contratación, ajenos a esta nueva proyección, continuaron fabricando cartas planas de grados iguales, basadas en el padrón real.

Hacia finales del siglo XVI, tanto el padrón real como los instrumentos de navegación seguían arrastrando errores. Para corregirlos, en 1596 se nombró a Andrés García de Céspedes (1561-1611) piloto mayor de la Casa de Contratación de Sevilla⁶¹.

Una vez finalizados sus trabajos, García de Céspedes presentó una nueva carta de marear, denominada "Mapa general", junto con nuevos instrumentos de navegación. Tras ser sometidos al Consejo Real y examinados por expertos con reconocida capacidad teórica y práctica, se ordenó que, a partir de ese momento, todas las cartas debían fabricarse conforme a este modelo⁶².

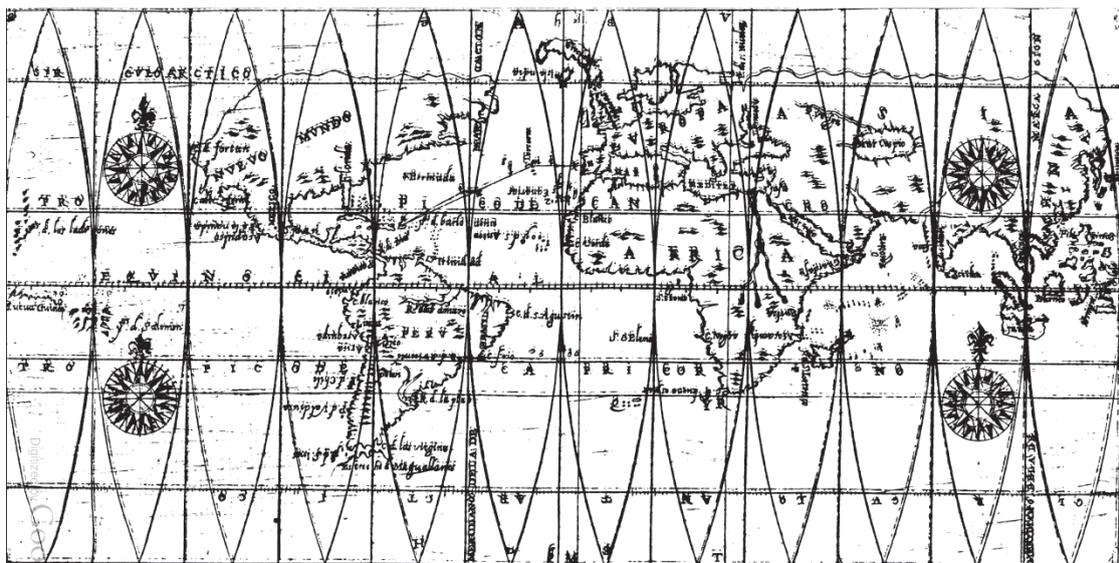


Figura 13. Mapa general. Fuente: García de Céspedes, 1606, entre pp 125-126 .

A finales del siglo XVI el padrón real quedó prácticamente terminado, José Pulido Rubio describió la labor realizada por la Casa de la Contratación y la participación de pilotos,

cosmógrafos y pilotos mayores de la siguiente forma:
Se equivocaron en las localizaciones geográficas los técnicos, los hombres

⁵⁸ FOSSI GUTIÉRREZ, 1949: 303. La proyección cilíndrica centrográfica consiste en proyectar los puntos de la superficie terrestre en un cilindro circunscrito a la Tierra en el ecuador, tomando como centro de proyección el centro de la Tierra.

⁵⁹ Véase entre otras referencias: FOSSI GUTIÉRREZ, 1949: 303-308; MOREU CURBERA, C. N. Y MARTÍNEZ JIMÉNEZ, C.N., 1987: 330-338; URRUTIA, s/f: 125-128.

⁶⁰ La línea loxodrómica es la curva que trazada sobre la esfera corta a todos los meridianos con ángulos iguales. Por lo tanto, el navegar sobre ella supone ir a rumbo constante MOREU CURBERA, C. N. Y MARTÍNEZ JIMÉNEZ, C.N., 1987: 339.

⁶¹ AGI, Archivo General de Indias, Contratación, 5784, L.3, F.94. Nombramiento de Andrés García de Céspedes como Piloto Mayor de la Casa de la Contratación. 1596-06-13, Toledo.

⁶² Andrés García de Céspedes en la segunda parte del Regimiento de Navegación, denominada Hydrografía, explica el procedimiento seguido para la fabricación del "Mapa general" y del Padrón de la navegación de la Carrera de Indias, cómo corrigió los múltiples errores que contenía y añadió las nuevas tierras que iban apareciendo.

dedicados a los estudios superiores de Cosmografía; no supieron precisar bien las observaciones los pilotos de las naves, pero no por esto cundió el desmayo, sino que, por el contrario, la obra se continuó con el mismo tesón, se enmendaron los errores en el Padrón Real, se les dio a los pilotos una instrucción técnica que fuera la antorcha que iluminara sus conocimientos prácticos, y al finalizar el siglo XVI, el de los grandes Pilotos mayores, la obra estaba casi perfecta, constituyendo el mayor timbre de gloria para la Casa de Contratación de Sevilla⁶³.

Durante el siglo XVII, la Casa de Contratación de Sevilla continuó fabricando cartas planas, manteniendo su labor cosmográfica hasta su traslado a Cádiz en 1717, momento en el que todas sus funciones pasaron a depender de la Armada.

Bajo esta nueva administración, el desempeño de sus funciones como centro de investigación científica y Escuela Náutica generó corrientes y opiniones encontradas, reflejadas en los informes

de Antonio Porlier y Francisco Machado⁶⁴, así como en el de Luis María de Salazar⁶⁵.

Mientras tanto, España participó en una expedición para medir el arco del meridiano terrestre en el Ecuador, representada por Jorge Juan y Antonio de Ulloa. Esta misión tuvo una duración de 11 años y dio lugar, en 1748, a la publicación de Observaciones astronómicas y físicas hechas de orden de S. Mag. en los Reynos del Perú.

Desde esta expedición hasta 1800, se llevaron a cabo aproximadamente 60 expediciones a América y Filipinas, que, a diferencia de siglos anteriores, fueron dirigidas por científicos en lugar de expertos sin una preparación técnica suficiente. Estos viajes tuvieron como principales objetivos el estudio de la geografía y la historia natural⁶⁶.

La última de estas expediciones geográficas fue liderada por Vicente Tofiño entre 1783 y 1789, quien realizó el levantamiento cartográfico de las costas españolas, representadas en el Atlas Marítimo de España, complementado con los derroteros del Atlántico y del Mediterráneo⁶⁷.

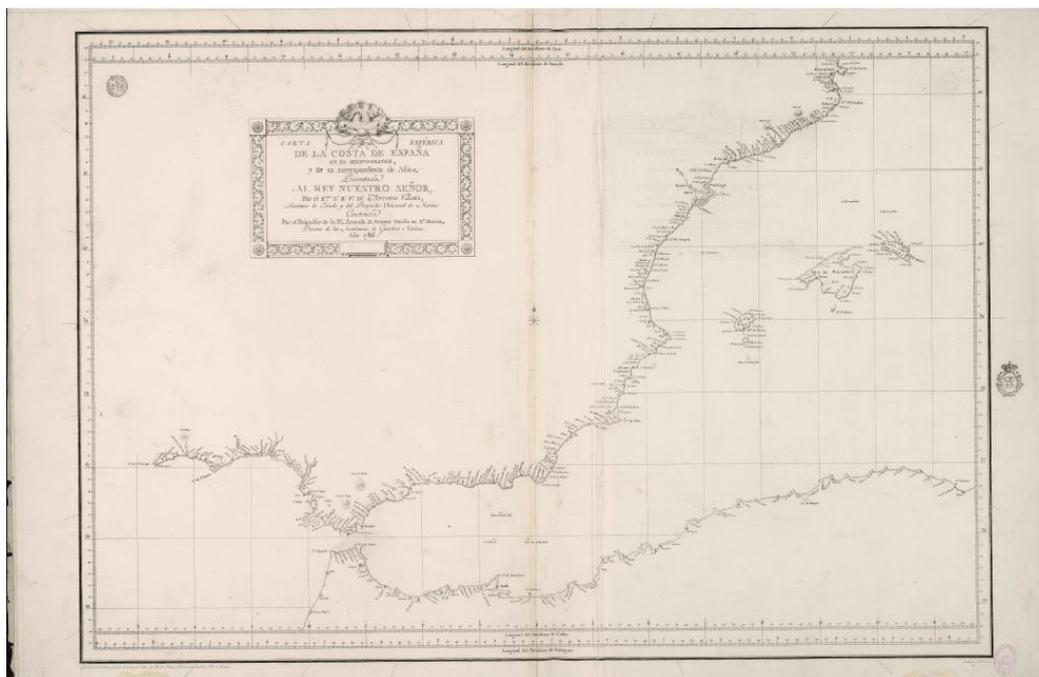


Figura 14. Carta esférica de la costa de España en el Mediterráneo [...], 1786. Fuente: Tofiño, 1789⁶⁸.

Consideraciones a modo de conclusión

Las nuevas rutas comerciales emprendidas en el siglo XV, dirigieron sus derrotas alejadas de la costa obligando a los pilotos a abandonar los viejos métodos

empiristas y mirar al cielo para fijar la posición de la nao. Para ello fue necesario transitar del empirismo a lo espucalitivo. Lo que significó un cambio de paradigma en la profesión de piloto, no fue fácil y transcurrió de forma lenta, llegando incluso a enfrentar a cosmógrafos y pilotos

⁶³ PULIDO RUBIO, 1950: 289-290.

⁶⁴ AGMAB. Colegio de San Telmo. Legajo 988. Informe De Porlier y Machado, 1785.

⁶⁵ SALAZAR, 1809.

⁶⁶ MARTÍNEZ RUIZ, 2003: 43-65.

⁶⁷ ALMONACID RAMIRO, 2015.

⁶⁸ Disponible en: <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000000294>

por tener concepciones diferentes sobre los métodos empleados en la navegación, en la que los cosmógrafos abogaban por incorporar métodos científicos, frente a la practicidad empleada por los pilotos. En este proceso intervino de forma directa la Corona española mediante la creación de la Casa de la Contratación de Sevilla y del cargo de piloto mayor, encargado de instruir, examinar a los pilotos y confeccionar el padrón real, considerado como el primer cargo científico que se creó en España.

La labor conjunta del piloto mayor, los cosmógrafos y la de los pilotos de la Carrera de Indias mediante su aportación de la práctica de la navegación, información sobre nuevas tierras y su localización geográfica posibilitaron un mejor conocimiento del mundo, que en esa época estaba en constante ensanchamiento, sin olvidar su contribución al desarrollo de la técnica de la navegación a través de la publicación de Regimientos de Navegación y manuales.

La formación del piloto fue evolucionando constantemente, a partir de sus dos componentes básicos, el práctico y el teórico. La transición a la navegación astronómica científica no llegó de forma simultánea a la ciencia, a la formación de los pilotos y a los textos donde estudiaron, ni tampoco a los distintos centros donde se formaron. En cuanto a la ciencia hemos situado el inicio a la transición en 1731, instante en el que se inventó el octante y esta, estaba preparada para acceder al cálculo de la longitud por distancias lunares y cronómetros. Los avances científicos aplicados a la navegación llegaron tarde a los textos españoles dedicados a la formación de los pilotos, cuando ya llevaban mucho años implantados como se ha podido ver en el presente trabajo. Durante ese período, la navegación dejó de ser un arte empírico para transformarse en una disciplina científica, sustentada en las matemáticas y la física. También se consolidó la formación de los pilotos, incorporando rigurosos conocimientos técnicos y científicos en su proceso de instrucción.

REFERENCES

- ACHUTEGUI, J.J., *La construcción naval y la navegación*, I Simposio de Historia de las Técnicas: Cantabria 26, 27 y 28 octubre 1995, 227-252.
- ALMONACID RAMIRO, Carlos. *Carta esférica de las costas de la península de España. Construida en la Dirección Hidrográfica. Año 1801*, Madrid, Universidad Autónoma de Madrid, 2015.
- ANÓNIMO, *Almanak Náutico y Estado General de Marina para el año de 1786*. Madrid, En la Imprenta Real, 1786
- ARCHER, Miguel, *Lecciones náuticas, explicadas en el Museo Matemático del M.N. y M.L. Señorío de Vizcaya, Noble Villa de Bilbao*, Bilbao, Antonio de Eguzquiza Impresor de dicho M.N. y M.L. Señorío, 1756.
- ARRANZ MÁRQUEZ, Luis, *Cristóbal Colón misterio y grandeza*, Madrid, Marcial Pons, Ediciones de Historia, S.A., 2006.
- ARROYO RUIZ-ZORRILLA, Ricardo. *Apunte para una historia de la enseñanza de la náutica en España*, Madrid, Centro de Publicaciones del Ministerio de Transportes Turismo y Comunicaciones, 1989.
- BARREDA, Francisco, *El marinero instruido en el arte de navegación especulativo, y práctico, según el método, con que se enseña a los Colegiales del Real Seminario de Sr. San Telmo, extra muros de la Ciudad de Sevilla*, Sevilla, 1765.
- BARROS, Joao de, *Dos feitos que os portugueses fezerao no descobrimento & conquista dos mares & terras do oriente (Década primera)*, Lisboa, Iorge Rodriguez, 1628.
- BONMATÍ SÁNCHEZ, Virginia, «El tratado de la Esfera (1250) de Juan de Sacrobosco en el Introductorium Cosmographiae de Antonio Nebrija (c. 1498)», *Cuadernos de filología clásica: Estudios latinos*, (15), 509- 513, 1988.
- BROSSARD, Maurice. De, *Historia Marítima del Mundo*, 2 Volúmenes, Barcelona, Amaika, S.A., 1976.
- CAPEL, Horacio, *Geografía y Matemáticas en la España del siglo XVIII*, Barcelona, oikos-tau. s.a., 1982.
- CEDILLO Y RUJAQUE, Pedro Manuel, *Compendio de la Arte de Navegar*, Sevilla, Lucas Martín de Hermosilla, 1717.
- CEDILLO Y RUJAQUE, Pedro Manuel, *Tratado de de cosmografía y náutica*, Cádiz, En la imprenta Real de Marina, y Casa de la Contratación de Don Miguel Gómez Guiraun, 1745.
- CEREZO MARTÍNEZ, Ricardo, *La cartografía náutica española en los siglos XIV, XV y XVI*, Madrid, CSIC, 1994.
- CHAUNU, Pierre. *La Expansión Europea (siglos XII al XV)*, Barcelona, Labor, S.A., 1977.
- CHAVES, Alonso, *Quatri partitu en cosmografía practica, y por otro nombre espejo de navegantes*, Sevilla, Manuscrito, 1537.
- CORTÉS, Martín, *Breve compendio de la fpha y de la arte de navegar / con nuevos infrumentos y reglas/ ejemplificado con muy subtiles demostraciones: compuesto por Martin Cortes natural de burjaraloz en el reyno de Aragon y de prefente vezino de la ciudad de cadiz: dirigido al invictiffmo Monarcha carlo Quinto Rey de las Epañaes etc. Señor Nuestro*, Sevilla, En Casa de Antonio Álvarez, 1551.
- COTTER, Charles, *A history of nautical astronomy*, London-Sydney-Toronto, Hollis y Carter, 1968.
- ELENA, Alberto, *La revolución astronómica*. Madrid, Akal, S.A., 1995.
- FERNÁNDEZ DE ENCISO, Martín, *Suma de geographia q trata de todas las partidas y provincias del mundo: en espezial de las indias. y trata largamete del arte del*

marear:juntamete con la epera en romace: con el regimieto del fol y del norte: nuevamente hecha. Sevilla, Jacobo Cromberger, 1519.

FERNÁNDEZ DE NAVARRETE, Martín, *Disertación sobre la historia de la náutica y de las ciencias matemáticas. Que han contribuido á sus progresos entre los españoles*, Madrid, Imprenta de la viuda de Calero, 1846.

FERNÁNDEZ DURO, Cesáreo, *Disquisiciones Náuticas. Arca de Noé*, Volumen 6, Madrid, Imprenta, Estereotipia y Galvanoplastia de Aribau y C. Sucesores de Rivadeneyra, 1881.

FOSSI GUTIÉRREZ, Ignacio, *Tratado de Náutica*, Madrid, Dossat, 1949.

GARCÍA DE CÉSPEDES, Andrés. *Libro de instrumentos nuevos de Geometría muy necesarios para medir distancias, y alturas, sin que interuengan numeros como se demuestra en la practica: demas desto se ponen otros tratados, como es vno, de conduzir aguas, y otro vna question de artiller*, Madrid, Juan de la Cuesta, 1606.

GARCÍA DE CÉSPEDES, Andrés, *Regimiento de navegacion que mando hacer el Rei nuestro Señor por orden de su consejo Real de las Indias a Andres Garcia de Cespedes su Cosmografo Mayor siendo Presidente en el dicho consejo el conde de Lemos*. Madrid, En casa de Iuan de la Cuesta, 1606.

GARCÍA DIEZ, Eulogio et al, *Primera travesía Colombina: Aspectos meteorológicos*. Salamanca, Universidad de Salamanca, 1990.

GARCÍA FRANCO, Salvador, *Historia del arte y ciencia de navegar. Desenvolvimiento histórico de los cuatro términos de la navegación*, 2 Volúmenes, Madrid, Instituto histórico de Marina, 1947.

GAZTAÑETA YTURRIBALZAGA, Antonio de, *Norte de la navegación hallado por el cuadrante de reducción. Sevilla: por Juan Francisco de Blas impresor mayor de dicha ciudad*, 1692.

GUILLÉN TATO, Julio. F, *La Náutica española en el siglo XVII*, Madrid, Gráfica Universal, 1935.

HUMBOLDT, Alexander von, *Cristóbal Colón y el descubrimiento de América. Historia de la geografía del nuevo continente y de los progresos de la astronomía náutica en los siglos XV y XVI*, Volumen 1, Madrid, Sucesores de Rivadeneyrad, 1883.

IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, Itsaso, *La difusión de conocimientos náuticos en la España decimonónica: La navegación astronómica en los textos de náutica españoles del siglo XIX*, (Tesis doctoral), Bilbao, Universidad del País Vasco, 2000.

IBÁÑEZ, Itsaso. Y GAZTELU-ITURRI, Ricardo, *Fundamentos de navegación marítima*, Bilbao, Universidad del País Vasco, 2002.

KOYRÉ, Alexandre. *Estudios galileanos*, Quinta edición. Madrid, Siglo veintiuno de España Editores, S.A., 1990.

LAGUARDA TRÍAS, Rolando, *Comentarios sobre los orígenes de la navegación astronómica*, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Histórico de Marina, 1959.

LÓPEZ PIÑERO, José María, *Ciencia y técnica en la sociedad española de los siglos XVI y XVII*, Barcelona, Labor, S.A., 1979.

LOUZÁN LAGO, Felipe, *Génesis y evolución de los instrumentos de alturas usados en navegación: Análisis de los errores cometidos durante las observaciones* (Tesis doctoral), A Coruña, Universidade da Coruña, 2005.

LLOMBART PALET, José y IGLESIAS MARTÍN, María Asunción, *Las aportaciones vascas al "arte de navegar" en algunos libros de náutica. Itsas memoria: revista de estudios marítimos del País Vasco*, (2), 525-536, 1998.

MACARTE DÍAZ, Dionisio, *Lecciones de Navegación ó principios necesarios a la ciencia del piloto*, Madrid, Imp. de Sancho, 1801.

MARTÍN MERÁS, Luisa, *Cartografía Marítima Hispana. La imagen de América*, Madrid, Lunwerg, 1993.

MARTÍNEZ RUIZ, Enrique, «La delimitación de espacios y aperturas de horizontes: Las expediciones españolas del siglo XVIII», *Cuadernos monográficos del Instituto de historia y cultura naval*, (43), 43 – 65, Madrid: Gráficas Lormo, S.A., 2003.

MAZARREDO ZALAZAR, José, *Lecciones de navegación para el uso de las compañías de Guardias Marinas*, Isla de León, Imprenta de su Academia, 1790.

MEDINA, Pedro de, *Arte de navegar en que fe contienen todaslas Reglas, Declaraciones, y Avisos, q a la buena navegacio fon neceffarios, y fe debe faber, hecha por el maestro Pedro de Medina. Dirigida al fereniffimo y muy efclarefido feñor, don Phelipe príncipe de Epaña, y de las dos Sicilias*.yc, 1545.

MEDINA, José, *Una historia breve de la astronomía*, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá, Servicios de publicaciones, 2008.

MELÓN RUIZ DE GORDEJUELA, Armando, «El primer manual español de geografía», *Estudios geográficos*, 30 (146-147), 225-242, 1977.

MENDOZA Y RÍOS, José, *Tratado de navegación*, 2 Volúmenes, Madrid, Imprenta Real, 1787.

MENDOZA Y RÍOS, José, *Recherches sur les solutions des principaux problèmes de l'astronomie nautique*, Lues à cette société et publiées dans ses Transactions Philosophiques, Londres, 1797.

- MOREU CURBERA, C. N., Y MARTÍNEZ JIMÉNEZ, C.N., *Astronomía y Navegación*, Volumen 1, Vigo, Librería San José, 1987.
- NAVARRO LOIDI, Juan, «El número e en los textos matemáticos españoles del siglo XVIII». *Quaderns d'història de l'enginyeria*, 2008, vol. IX, p. 145-166.
- ORDÓÑEZ, Javier. et al, *Historia de la ciencia*, Barcelona, Espasa Libros, S.L.U., 2013.
- ORTEGA VILLOSLADA, Antonio, *La marina mercante medieval y la casa de Mallorca: Entre el Mediterráneo y el Atlántico*, Lleida, Pagès editors, 2015.
- PINTOS AMENGUAL. Gabriel, «Las correcciones a las alturas observadas en los libros de navegación españoles en la Edad Moderna», *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, Vol. 46, N° 92, 2023.
- POZA, Andrés de, *Hydrografía la mas curiosa que hasta aquí ha salido a luz, en que de mas de un derrotero general, fe enfeña la navegación por altura y derrota, y la del Efte Oefte: con la Graduacion de los puertos, y la navegación al Catayo por cinco vías diferentes. Compuefto por el Licenciado Andres de Poça natural de la ciudad de Orduña abogado e el muy noble leal Señorío de Vizcaya*, Bilbao, Mathias Mares, 1585.
- PUNTE OLEA, Manuel, *Los trabajos geográficos de la casa de la contratación*, Sevilla, Escuela tipográfica y librería Salesianas, 1900.
- PULIDO RUBIO, José, *El Piloto Mayor de la casa de Contratación de Sevilla. Pilotos mayores, catedráticos de cosmografía y cosmógrafos*, Sevilla, Escuela de Estudios Hispano Americanos, 1950.
- REY PASTOR, Julio, *La ciencia y técnica en el descubrimiento de América*, Buenos Aires, Espasa Calpe, 1970.
- RICART Y GIRALT, José. *Historial de la Escuela Especial y Provincial de Náutica de Barcelona*, Barcelona, Imp. de Subirana Hermanos, 1901.
- ROBERTSON, John, *The elements of navigation; containing the theory and practice*, London, J. Nourse, Boofeller to his Majesty, 1780.
- ROGERS, F. M., «The Vivaldi expedition». *Annual Reports of the Dante Society*, (73), 31-45, 1995.
- SALAZAR, Luis María, *Discurso sobre los progresos y estado actual de la hidrografía en España*, Madrid, En la Imprenta, 1809.
- SALVÁ, Miguel y SAINZ DE BARANDA, Pedro. *Colección de documentos inéditos para la historia de España*, Volumen 21, Madrid, Imprenta de la Viuda de Calero, 1852.
- SÁNCHEZ RECIENTE, Juan, *Tratado de navegación y theorica, y practica fegun el orden, y Methodo, con que fe enfeña en el Real Colegio Seminario de Sr. S. Telmo, extramuros de la Ciudad de Sevilla*, Sevilla, 1749.
- SELLÉS GARCÍA. Manuel, *Navegación Astronómica en La España del Siglo XVIII*, Madrid, UNED, 2000.
- SOBEL, Dava, *Longitud*, Madrid, Debate, S.A., 1998.
- SOLÍS, Carlos y SELLÉS, Manuel, *Historia de la ciencia*, 4ª edición, Barcelona, Espasa Libros, S.L.U., 2015.
- TOFIÑO DE SAN MIGUEL, Vicente, *Atlas Marítimo de España*, Madrid, 1789,
- TOUS MELIÁ, Juan, «La isla de el Hierro y el meridiano origen», *Estudios Canarios: Anuario del Instituto de estudios canarios*, (46), 249-288, 2001.
- URRUTIA, Ángel, *Astronomía náutica y navegación: apuntes [en línea]. [s.l.]: [s.n.], [19--]. Disponibles: <http://hdl.handle.net/2099.4/1228>*
- VÁZQUEZ QUEIPO, Vicente, *Tablas de los logaritmos vulgares de los número desde 1 hasta 20.000 y de las líneas trigonométricas*, Madrid, Librería y casa editorial Hernando, S.A., 1967.
- VEITIA Y LINAJE, José. *Norte de la Casa de Contratación de las Indias Occidentales*, Sevilla, Juan Francisco de Blas, 1672.
- ZAMORANO, Rodrigo, *Compendio de la Arte de Navegar de Rodrigo Çamorano, Afrologo y Matematico, y Cofmografo de la Mageftad Catolica de Don Felipe fegundo Rey de Epaña, y fu Catedratico de Cofmografia en la cafa de las Indias y de la Ciudad de Sevuilla*. Sevilla, Alonso de la Barrera, 1581.
- ZARAGOZA Y VILANOVA, José, *Esfera en común celeste y terráquea*, Madrid, Juan Martín del Barrio, 1675.