

EL JUEGO DE LA IMAGINACIÓN GALILEO Y LA LONGITUD

Jesús Sánchez Navarro

En la carta del 7 de Septiembre de 1612 de B. Vinta, secretario de estado de Toscana, a Orso d'Elci, embajador del Gran Duque en Madrid, para ser entregada al Rey de España, se lee:

Complace también a S.A.S. hacer llegar a oídos de Su Majestad un nuevo hallazgo que usado en la navegación puede aportar la última perfección que faltaba hasta ahora en tal ejercicio: y ésta es una manera de medir la longitud a cualquier hora de la noche y casi en todo momento del año encontrada por Galileo Galilei, vasallo de esta Alteza y su Primer Filósofo y Matemático; y con más detalle es que por medio de su telescopio, es decir, con el antejo que descubre de muy lejos, ha encontrado muchas novedades en las estrellas y movimientos celestes desconocidas por nuestros antepasados, que habiéndolas hecho ver con gran maravilla muchas veces a su Alteza y a los que en Italia entienden de tal profesión, le han granjeado tanta fe que no tenemos ninguna duda sobre la verdad de cuanto propone y más dependiendo, como él mismo asegura, toda la culminación de esta operación de un nuevo descubrimiento celeste que ha sido inaccesible hasta nuestra época, lo que hará cesar la sorpresa que pudiera nacer en algunos de que los astrónomos y geógrafos del pasado no hayan podido llegar a tal conocimiento. Cuando S.M. desee saber de este asunto, se ordenará al citado Galileo que escriba con claridad una breve información sobre todos los particulares concernientes a este manejo y se le mandará a S.M. para que determine y concluya lo que le plazca.¹

¹ Galileo, *Opere*, ed. A. Favaro, Firenze, Barbèra, 1968, XI, págs. 392-3.

¿Qué importante problema es éste de la longitud que interesa a tan poderosos personajes y que llega a ser utilizado como moneda de cambio en negociaciones diplomáticas?

El problema de la longitud

El problema de la determinación de la longitud de un lugar sobre la superficie terrestre e igualmente el de la ubicación del meridiano de referencia aparece explícitamente planteado en la *Geographia* de Ptolomeo a partir de los trabajos de Marino de Tiro.² La *Geographias Hyphegesis* (*Guía de Geografía*) es un pequeño tratado de cosmografía y geografía matemática compuesto por 8 libros. El libro I incluye una descripción de la naturaleza de la Geografía, de los métodos astronómicos y matemáticos para fijar posiciones y cómo representar posiciones y distancias usando meridianos y paralelos, una explicación de los meridianos y paralelos usados por el propio Ptolomeo y un estudio de técnicas de proyección, además de una detallada discusión de la representación de la Tierra habitada de Marino de Tiro. Los libros II a VII recogen la longitud y latitud en grados y minutos de unos 8.000 lugares. Específicamente, los libros II y III están dedicados a Europa (Occidental y Oriental, respectivamente), el IV a Libia, es decir, África, y del V al VII a Asia (Oriente Próximo, Asia Central y Lejano Oriente, respectivamente). El libro VII incluye también las instrucciones básicas para la construcción de un mapa general y de una esfera armillar con una representación de la Tierra habitada y, finalmente, el VIII las adaptaciones y presuposiciones necesarias para la elaboración de mapas particulares (10 para Europa, 4 para África y 12 para Asia).

Para poder determinarlas, Ptolomeo recurre a una solución tomada de la astronomía y derivada de los trabajos de Eratóstenes, Hiparco y Marino de Tiro³ y consistente en trazar una red de meridianos y paralelos. Primero, suponía 12 círculos máximos que pasaran por los polos y que distaran quince grados entre sí, de manera que dividieran la circunferencia de la Tierra en 24 partes iguales de 15 grados cada una. Los planos de estos círculos ‘meridianos’ podían prolongarse, si se deseaba, hasta cortar la esfera celeste. Esa diferencia de 15 grados equivaldría a una hora de tiempo, de mane-

² Ptolomeo, *Geographia*, ed. J. Lennart Berggren and A. Jones, Princeton, Princeton U.P., 2000, I.3-4 y I.11-14.

³ En su ‘ecumene’ Eratóstenes había utilizado como referencia una línea perpendicular que pasaba por Alejandría y Rodas y otra paralela al Ecuador que pasaba por Rodas, en lo que constituye el primer precedente de meridianos y paralelos. Fue Hiparco quien los definió y utilizó en astronomía y Marino de Tiro los utilizó en su tratado de geografía pero como elementos independientes y dándolos por separado. Ptolomeo fue el primero que definió la longitud y la latitud como conceptos interdependientes que han de darse conjuntamente para determinar una posición.

ra que dos lugares situados en los extremos este y oeste del mismo meridiano estarían separados por 180 grados, es decir, tendrían una diferencia de 12 horas, por lo que cuando en uno fuera el mediodía en el otro sería la medianoche. Lo mismo puede hacerse basándose en la distancia entre los lugares. Una vez calculado el tamaño de la circunferencia terrestre, es posible establecer en cada paralelo la distancia equivalente a la separación de 15 grados entre meridianos. Por ejemplo, un lugar situado en el ecuador a esa distancia al este del primer meridiano tendría una hora menos y estaría situado en el siguiente meridiano hacia el este, y un lugar distante esa misma cantidad hacia el oeste tendría una hora más y estaría en el siguiente meridiano al oeste. Aunque Ptolomeo señala en la *Geographia* 1.22 que pueden trazarse cuantos meridianos se deseen con la única condición de que al trazar el mapa cubran 12 horas y él mismo, al hablar de las técnicas de proyección en 1.24, utiliza 18 meridianos separados 10 grados entre sí, señala que para trazar el mapa “nos ha parecido adecuado poner los meridianos entre sí a una distancia de una tercera parte de una hora equinoccial, es decir, a cinco de las divisiones marcadas en el Ecuador” (*Geographia*, 1.23), es decir, 36 meridianos distantes 5 grados (20 minutos de tiempo).

El problema se complica, sin embargo, cuando los lugares se alejan del Ecuador. Al cortarse los meridianos en los Polos, la distancia entre ellos disminuye a medida que se acercan allí. Para resolver el problema es necesario recurrir a los ‘paralelos’. Estos son círculos paralelos al Ecuador y perpendiculares a los meridianos, de manera que la separación entre dos meridianos sería siempre de 15 grados y una hora (en la propuesta de Ptolomeo, 5 grados y 20 minutos) fijada sobre el paralelo correspondiente y la disminución de la distancia entre ellos se puede calcular a partir de la relación entre el Ecuador y el paralelo. Así, es posible determinar la posición de un lugar y su relación con otros en un mapa indicando el paralelo y el meridiano donde se encuentra, es decir, determinando su latitud y longitud.

La latitud es el arco subtendido por un ángulo desde el centro de la Tierra en dirección N-S entre un punto de la superficie terrestre y el ecuador, de manera que dos lugares con la misma latitud se encontrarían en el mismo paralelo y viceversa, dos lugares situados en el mismo paralelo tendrían la misma latitud. Por su parte, la longitud sólo puede determinarse relativamente respecto a un punto de referencia, pues sería el arco subtendido por un ángulo desde el centro de la Tierra entre los puntos donde el ecuador corta el círculo máximo que pasa por los polos y el lugar de referencia y el que pasa por el lugar cuya longitud se está calculando.⁴ Como en el caso anterior, dos lugares con la misma longitud estarían en el mismo meridiano

⁴ En la *Geographia*, 1.6, comentando el mapa de Marino, indica: “Podemos razonablemente llamar ‘longitud’ a la dimensión de la superficie en cuestión de este a oeste y ‘latitud’ a la de norte a sur, puesto que llamamos con los mismos nombres a las que son paralelas a estas en los movimientos celestes y, además, porque usamos en general ‘longitud’ para la dimensión más grande y todo el mundo está de acuerdo en que la dimensión de este a oeste de la tierra

y viceversa.

La determinación de la latitud es relativamente sencilla y Ptolomeo ya había establecido en el *Almagesto* diferentes métodos: “1) La distancia de los polos del primer movimiento respecto al horizonte o la distancia del zenit desde el ecuador, medida a lo largo del meridiano; 2) para aquellas regiones en que el Sol llega al zenit, cuándo y cuán a menudo ocurre; 3) las ratios entre las sombras y el gnomon en los mediodía solsticiales y equinocciales; 4) el tamaño de la diferencia entre el día más largo y el día más corto respecto al día equinoccial y todos los fenómenos que son estudiados al respecto”, a los que también añade la dirección en que señala la sombra, al Norte o al Sur, en cierto momento del año y las estrellas que son siempre visibles, las que no lo son nunca y las que salen y se ponen.⁵ En la *Geographia*, Ptolomeo utiliza fundamentalmente la elevación del polo y también la duración del día más largo, combinada con la dirección de la sombra del gnomon, para establecer 21 círculos paralelos al norte y 2 al sur del ecuador a los que denomina ‘climata’ (inclinaciones), indicando tanto su distancia en tiempo como en grados respecto al ecuador.⁶ Sólo tres de estos ‘climata’ aparecen relacionados con puntos geográficos: el cuarto, que es el

habitada (ecumene) es mucho más grande que la de norte a sur”. Igualmente, en la *Geographia*, 1.2, Ptolomeo las define brevemente sin citarlas al decir que, para dos localidades, el método astronómico permite determinar “los arcos en que los paralelos [cortan los meridianos] entre ellos y el ecuador y [aquellos que los meridianos cortan] entre sí en el ecuador y en los paralelos”. En la “Proposta per la longitudine”, Galileo dice de la latitud que “no es otra cosa que el arco del meridiano comprendido entre el vértice de un lugar y el círculo equinoccial, el cual arco es siempre igual al arco del mismo meridiano comprendido entre el polo del mundo y el horizonte, es decir, la elevación del polo en aquel lugar” y que “la longitud, a su vez, no es otra cosa que un arco del círculo equinoccial comprendido entre el meridiano de un lugar y el meridiano de otro; y dado que comúnmente los cosmógrafos han establecido que el meridiano que pasa por las Islas Canarias sea el primer meridiano, se dirá por tanto que la longitud de un lugar sea el arco del círculo equinoccial que viene comprendido entre el meridiano que pasa por las Islas Canarias y el meridiano del lugar”; Galileo, *Opere*, V, págs. 419-20, con lo cual no sólo los define, sino que indica la forma de medirlos.

⁵ Ptolomeo, *The Almagest*, ed. G.J. Toomer, Princeton, Princeton U.P., 1998, 2.1 y 2.6. En el *Almagesto*, 2.6, utiliza estos métodos para indicar los paralelos de la esfera celeste y va señalando al mismo tiempo el lugar por donde pasan: el primero por Taprobana; el segundo por Avalita, junto al mar Rojo; el tercero por Adulis en la costa etiópica; el cuarto por Meroe; el quinto por Napata en Sudán; el sexto por Syena; el séptimo por Ptolemaica; el octavo por el Bajo Egipto; el noveno por Fenicia central; el décimo por Rodas; el once por Esmirna; el doce por el Helesponto, etc...

⁶ *Geographia*, 1.23. Así, según Ptolomeo, en el primer clima el día durará un cuarto de hora más que en el ecuador distando de él 4° 15'; en el segundo tendrá un cuarto de hora más que en el primero, pero sólo distará de él 4° 10'; en el tercero 4° 5'; etc., hasta llegar al de Thule donde la diferencia sería menor de 30'. Por eso, la representación en el mapa queda truncada en el paralelo de Thule. Por la misma razón, y también para mantener una cierta simetría en el plano, cada uno de los primeros 14 ‘climata’ dista un cuarto de hora del anterior (desde 4° 15' hasta 1° 55'); del 15 al 19 media hora (desde 3° 30' hasta 1° 50') y los dos últimos una hora (3° y 2°, respectivamente); los siguientes no se podrían representar. La explicación de todo esto la da en el *Almagesto*, II, 6, 1. Dada la curvatura de la Tierra todos los paralelos son divi-

de Meroe, el sexto, que es el de Syena, y el décimo, que es el de la isla de Rodas. A su vez, el 21, que corresponde a Thule, marca el confín Norte de la Tierra y sería el último especificado en el mapa. El paralelo situado por Ptolomeo al Sur del ecuador (a media hora y $8^{\circ} 25'$), pasaría por el Monte Rhaptum y Cattigara y marcaría el límite Sur de la tierra conocida, mientras que el segundo, el anti-Meroe, situado a la misma diferencia de grados y tiempo que el de Meroe, pero hacia el Sur del ecuador, marcaría el final del mapa.⁷

Por su parte, la determinación de la longitud es más complicada. Ptolomeo mismo habla de dos métodos para determinarla. Uno, puramente astronómico, consiste en comparar la hora local en que se observa un fenómeno astronómico, como un eclipse de Luna, entre dos lugares y es auto-suficiente y preciso, al menos dentro de los márgenes de precisión de los instrumentos de observación y el fenómeno observado. Desgraciadamente, Ptolomeo se queja de que tales fenómenos son poco frecuentes, se han registrado en pocas ocasiones y, cuando se ha hecho, no se ha llevado a cabo en diferentes lugares, ni con el cuidado suficiente.⁸

Otro puramente topográfico, mucho más burdo e incompleto, pero

dados por el horizonte en partes y ángulos desiguales, excepto en el ecuador donde ambos son círculos máximos y se bisecan. Dada, además, la inclinación de la eclíptica, cuando el Sol se encuentra en el solsticio de verano del hemisferio norte será visible durante más tiempo, aunque más bajo en el horizonte, cuanto más al Norte se encuentre un lugar. Pero, por estas mismas razones, la relación entre la duración del día más largo y la distancia en grados al ecuador irá cambiando gradualmente, de manera que la diferencia en grados necesaria para que la duración del día aumente en la misma cantidad de tiempo será cada vez menor. La razón para la elección de estos paralelos también es visual y estética: simularían con cierta aproximación la curvatura observada desde un punto exterior a la Tierra situado sobre Rodas o Alejandría, dando la impresión de una distribución más o menos simétrica de los paralelos.

⁷ La elección de estos tres paralelos no es gratuita. El de la 'isla' de Meroe marca a todos los efectos el límite Sur de la Tierra habitada y sirve para fijar el anti-Meroe; el de Syena se consideraba desde Eratóstenes correspondiente al solsticio de verano y el de Rodas había sido utilizado habitualmente como referencia por Eratóstenes, Hiparco y Marino de Tiro. No es casual, además, que Meroe, Syena y Rodas se encuentren aproximadamente sobre el mismo meridiano ($61^{\circ} 30'$; 62° y $58^{\circ} 20'$ respectivamente) y que esto ocurra también con Alejandría ($60^{\circ} 30'$), situada casi en medio.

⁸ Ptolomeo recurre a este método en el *Almagesto*, 2.1, para probar que la tierra habitada ocupa la mitad del hemisferio norte: "En el caso de la longitud la prueba principal es que las observaciones del mismo eclipse (especialmente un eclipse de Luna) por quienes están en las regiones extremas oriental y occidental del mundo habitado (lo que ocurrirá en el mismo momento) nunca difieren en más de doce horas equinociales" y en la *Geographia*, 1.4, después de lamentar que Hiparco sólo hubiera transmitido la elevación del polo para unas pocas ciudades y que otros de los que le siguieron, como Marino, sólo hubieran indicado algunos lugares que están en el mismo meridiano a partir de que se viaja hacia ellos yendo hacia el norte o el sur, señala: "La mayoría de los intervalos, y especialmente los del este u oeste han sido registrados de una manera más burda, no porque quienes hicieron las investigaciones fueran descuidados, sino quizá porque no se comprendía todavía lo útil que es el modo de investigación más matemático y porque nadie se encargó de registrar más eclipses lunares que fueron observados simultáneamente en diferentes lugares (tal como el que se vio en Arbelá a la

mucho más accesible a través de los informes de viajeros, consiste en establecer las posiciones relativas de los lugares a través del rumbo y la distancia; pero, en este caso, el problema fundamental es la imprecisión tanto de las mediciones, como de la dirección, aparte de que en cualquier caso seguirá siendo necesario conocer la latitud de los lugares para poder fijar su situación en el mapa. De ahí que acabe proponiendo una variante mucho más refinada de este segundo método combinándolo con observaciones astronómicas por medio de instrumentos como el meteoroscopio,⁹ que permite determinar la posición relativa de dos lugares situados en meridianos y paralelos distintos mediante las elevaciones del polo y la dirección. Así, en la *Geographia*, 1.3, dice:

Hemos establecido por medio de la construcción de un instrumento meteoroscópico que el objetivo puede ser alcanzado incluso si consideramos que el círculo a lo largo del intervalo medido es tal que no pasa a través de los polos, sino cualquier gran círculo, observando igualmente las elevaciones [del polo] y los puntos extremos [del intervalo terrestre] junto con la dirección que tiene el intervalo respecto a uno de los meridianos. Usando el meteoroscopio podemos obtener fácilmente, entre otras muchas cosas utilísimas, la elevación del polo norte en el lugar de observación durante cualquier día y noche, y la dirección a cualquier hora del meridiano y de las rutas con respecto a él (esto es, el tamaño de los ángulos que el gran círculo descrito a través de la ruta forma con el meridiano en el punto zenit). Con éstos podemos mostrar directamente en el meteoroscopio el arco en cuestión [del gran círculo a través de los dos lugares], así como el que los dos meridianos cortan en el ecuador cuando son distintos.

A partir de ahí, se puede calcular, para dos lugares A y B, la distancia de este arco en el ecuador; después, y con relación a ésta, la distancia correspondiente al arco del paralelo de A comprendido entre A y el punto donde lo corta el meridiano de B, así como la distancia correspondiente al arco del meridiano de B comprendido entre B y el punto donde lo corta el citado paralelo de A, formando un triángulo cuyo tercer lado es la distancia entre los lugares, que ahora será fácilmente calculable.

Este doble método señala una tensión que permanecerá constante a través de todos los intentos de resolver el problema de la longitud. De una parte, un enfoque estrictamente astronómico en el que el componente representacional y explicativo es fundamental, la precisión y la exactitud están justificadas y garantizadas teóricamente, y es autosuficiente en el sentido de

quinta hora y en Cartago a la segunda hora), a partir de lo cual se habría fijado claramente cuantas unidades de tiempo equinoccial separaban los lugares al este o al oeste”.

⁹ El meteoroscopio sería una esfera armillar semejante a la descrita por Ptolomeo en el *Almagesto*, 5.1, en la que a los anillos para la eclíptica y el ecuador se añadirían otros para el horizonte hasta llegar a un total de nueve anillos.

que no depende de factores ajenos al desarrollo del conocimiento astronómico, aunque su aplicación práctica sea muy complicada porque depende de fenómenos astronómicos poco frecuentes o difíciles de observar, requiere de desarrollos teóricos complejos (tablas lunares, efemérides precisas, etc.) y tal aplicación exija llevar a cabo cálculos más o menos difíciles. De otra parte, un enfoque más práctico en el que la efectividad, la eficacia y la simplicidad de uso son más importantes que la potencia representacional y explicativa, que no es autosuficiente, sino que depende del desarrollo de factores externos, fundamentalmente instrumentos y aparatos precisos que permitan resolver los problemas prácticos y técnicos involucrados en el problema, y cuyo éxito radica más en la fiabilidad y eficiencia de estos instrumentos que en la justificación teórica. En cierto modo, podría decirse que el primer enfoque es más científico y el segundo más tecnológico. Al primero corresponderían el método de los eclipses lunares, los eclipses de estrellas por la Luna y el de las distancias y movimientos lunares; al segundo, los relacionados con la inclinación o la desviación de la aguja magnética o el de los relojes y cronógrafos marinos.

La razón de este doble enfoque es que tras el problema de la determinación de la longitud subyacen dos objetivos relacionados, pero diferentes. Uno, como señala Ptolomeo, el de construir una representación más o menos realista de la tierra habitada o, de manera más general, una representación geográfica de la superficie terrestre que permita reflejar en un mapa los diferentes lugares, su situación y sus relaciones de dirección y distancia. Otro, más práctico, relacionado con el uso del mapa y que consiste en permitir a un observador o a un viajero localizar su posición en el mapa y, a través de él, en la superficie de la Tierra, para determinar la dirección de su movimiento y, en su caso, la distancia del lugar al que se dirige. Es cierto que esta segunda cuestión no es demasiado grave cuando se viaja por tierra, donde la existencia de frecuentes accidentes geográficos, puntos de referencia, etc., permite resolver el problema, aunque sea aproximadamente, recurriendo a la dirección, y lo mismo ocurre en la navegación costera con el rumbo y los vientos. Por eso los dos métodos propuestos por Ptolomeo pudieron resultar suficientes para sus propósitos y seguirse utilizando, junto con los portulanos, simplemente corrigiendo los errores tanto geográficos como de cálculo a medida que se iban constatando. Sin embargo, el problema se convierte en fundamental en el caso de encontrarse navegando en alta mar, donde se carece de la ayuda de puntos de referencia, de manera que la longitud tiene que conocerse en el momento para poder determinar la posición y trazar el rumbo. En este caso no sirve ninguno de los dos métodos de Ptolomeo; uno, porque no se puede recurrir a observaciones simultáneas, ni se puede esperar a comparar las observaciones en un momento posterior; el otro, porque aún conociendo la latitud, no se puede recurrir a la dirección, ya que eso es lo que se está intentando trazar.

Precisamente esto es lo que ocurrió a partir del s. XVI cuando la navegación al Sur del ecuador, primero, y los viajes transoceánicos, inmediata-

mente después, pusieron en el centro de atención el problema de determinar la longitud en el mar, que se presentaba como un problema científico y técnico fundamental envuelto en un cúmulo de circunstancias e intereses políticos, económicos, comerciales, sociales, etc. La cuestión no era ya sólo determinar con mayor o menor exactitud las coordenadas de un lugar, sino poder fijar en cada momento la posición de un barco en movimiento sin más ayuda que el movimiento de los astros o cualquier instrumento que pudiera desarrollar la inventiva humana, pero de cuya solución dependían vidas, haciendas e incluso imperios coloniales. Hasta tal punto llegó a ser acuciante el problema que, en diversos momentos de los siglos XVII y XVIII, el Rey de España, el Gobierno de Holanda, el Almirantazgo Británico o la Academia de Ciencias de Francia ofrecieron sustanciosos premios a quien lograra resolverlo.¹⁰ En tales circunstancias, no es extraño que ya desde el s. XVI y comienzos del XVII aparecieran numerosas propuestas distintas, unas teóricas y puramente astronómicas, otras prácticas y basadas en la construcción de instrumentos que permitieran determinar directamente la longitud.

Los intentos anteriores a la propuesta de Galileo

Una de ellas, absolutamente evidente y simple, consistía en atacar directamente el problema. Si la forma más directa de determinar la longitud consiste en comparar la hora local del lugar cuya longitud se está determinando con la del meridiano de referencia, entonces el problema puede resolverse sencillamente construyendo un reloj isócrono que registre en cada momento la hora exacta del meridiano de referencia. En este caso, la determinación de la longitud se convierte en una operación elemental: basta conocer la hora local (sea mediante observaciones astronómicas, sea mediante un reloj de arena sincronizado diariamente con el Sol al mediodía,

¹⁰ En la carta de Galileo a d'Elci de Junio de 1617, *Opere*, XII, p. 327, se hace referencia a una oferta del Rey de España cifrada en 2.000 ducados de renta perpetua, que Galileo considera muy inferior a los 6.000 que dice haber pactado con el Cardenal Borgia e insiste en que no sean menos de 4.000 que se reducirían a una renta de 2.000 para sus herederos después de su muerte (a lo que se añadiría ser nombrado caballero de Santiago). A su vez, en la carta de Antonini a Galileo de 25 de Octubre de 1627, *Opere*, XIII, p. 379, avisándole de la convocatoria del premio por los Estados Generales de Holanda, se habla de 30.000 ducados. En Gran Bretaña, el Acta de la Longitud de 1714 fijaba un premio de 20.000 libras. Pero quizá sea más revelador de la importancia que se concedía al problema recordar que el Observatorio de Greenwich se creó para resolver este problema. Así, según el Acta de Constitución de Carlos II del 2 de Junio de 1675: "En orden a encontrar la longitud de los lugares para perfeccionar la navegación y la astronomía, hemos resuelto construir un pequeño observatorio en nuestro parque de Greenwich". M.C. Donnelly, *A Short History of Observatories*. Eugene, U. Oregon P., 1973, p. 20.

como era habitual en los barcos) y luego compararla con la del primer reloj. Esta posibilidad la indica G. Frisius en una fecha tan temprana como 1530. En un alarde de optimismo e imaginación para la época, decía:

Sabemos que en nuestra época se están fabricando pequeños relojes de ingeniosa construcción que son poco molestos para un viajero debido a su pequeño tamaño. A menudo corren con un movimiento continuo durante 24 horas, y si quieres correrán con un movimiento casi perpetuo. La longitud, entonces, puede encontrarse con ayuda de estos relojes según el siguiente método: Primero, debemos tener cuidado de que antes de empezar el viaje el reloj esté ajustado exactamente a la hora del lugar desde el que vamos a viajar. Después, nunca se debe parar durante el viaje. Después de haber recorrido 15 o 20 millas, si queremos saber la distancia que hemos viajado en longitud desde el lugar de partida, debemos esperar a que la aguja del reloj toque exactamente el punto de una hora cualquiera y en el mismo momento calcular el tiempo para nuestra actual localización mediante un astrolabio o un globo. Si coincide al minuto con la hora que muestra el reloj, es seguro que estamos aún en el mismo meridiano o en la misma longitud y nuestro viaje se ha hecho al sur o al norte. Pero si difiere en una hora o en cualquier número de minutos, entonces deben ser convertidos en grados o minutos de grado, tal como hemos explicado en el capítulo anterior, y de esta forma se determina la longitud.¹¹

Es evidente que el planteamiento es irreprochable y que todo el éxito de la empresa descansa en la fiabilidad y eficacia del reloj. Pero eso es, también, lo que la hace impracticable en el momento en que se formula. Aunque la solución universalmente aceptada para la determinación de la longitud en el mar seguiría esta línea de razonamiento, tendrían que pasar más de 100 años antes de que la idea comenzara a tomar cuerpo, primero con el ‘medidor de tiempo’ descrito por Galileo en la carta a Reael de Junio de 1637 (*Opere*, XVII, p. 101-103), que Galileo propone para medir con exactitud los eclipses y conjunciones de los satélites de Júpiter, después con los relojes de precisión de Huygens a partir de 1656 y sus investigaciones posteriores a 1675 sobre otros mecanismos isócronos como el balance de muelle, hasta culminar con los cuatro cronómetros de Harrison construidos entre 1735 y 1760, el último de los cuales, el H4, sería probado con un completo éxito en los viajes de 1761, a Jamaica, y 1764, a Barbados, al comprobar que se

¹¹ G. Frisius, *De principiis Astronomiae et Cosmographiae*, 2, 18; recogido en W.H.J. Andrewes, *The Quest for Longitude*, Cambridge, Mass., Harvard U.P., 1996, Apéndice C, p. 391. S.A. Bedini, *The Pulse of Time: Galileo Galilei, the Determination of Longitude and the Pendulum Clock*, Firenze, Olschki, 1991, págs. 2 sigs., recoge otras referencias relacionadas con el recurso a relojes en el s. XVI y comienzos del XVII. Igualmente, en las págs. 23 sig., estudia los trabajos de Galileo sobre relojes, la relación con los relojes de Huygens y la controversia entre Bouillau y Huygens en torno a la paternidad del reloj de péndulo a cuenta del reloj de Galileo.

desviaban menos de un minuto al mes.

Otra propuesta prematura para la época, pero que está a la base de la que sería la gran alternativa a los cronómetros del s. XVIII, consiste en recurrir a los movimientos de la Luna respecto a las estrellas como fenómeno astronómico de referencia. En último término, la solución al problema desde un punto de vista astronómico consistía, simplemente, en encontrar algún método que permitiera conocer, con la mayor exactitud posible, la posición de los astros observada en el lugar correspondiente del primer meridiano en el preciso momento en que se hacían las observaciones astronómicas en el otro lugar cuya longitud se quería establecer. Puesto que no se podía recurrir a la observación simultánea, la única solución era disponer de tablas que computaran con la mayor precisión las posiciones futuras de los astros en el punto de referencia y la hora exacta a la que tendrían lugar para poder compararla con la hora local. Además, dado que los viajes eran largos, las tablas debían cubrir un amplio periodo de tiempo. Por eso era imprescindible que el fenómeno celeste a utilizar para elaborar las tablas no sólo fuera observable y repetible, sino también frecuente, preciso, regular y predecible. Estas características, en términos generales, las cumplía el movimiento de la Luna respecto a las estrellas. Tenía también la ventaja de que podía ser observado a simple vista y, además, que su desplazamiento respecto a las estrellas era bastante rápido, pues es aproximadamente de medio grado por hora, lo que aumenta la precisión y exactitud.

No es sorprendente, pues, que Werner sugiriera esta posibilidad ya en 1514 y Petrus Apianus en 1524. Así, Werner decía:

Sean dos lugares que están muy lejos entre sí. Pretendemos encontrar la diferencia en longitud entre ellos. Vaya el geógrafo a uno de los lugares y desde allí observe con esta ballestilla de observación en una hora conocida la distancia entre la Luna y una de las estrellas antes mencionadas que diverge poco o nada de la eclíptica. Si dividimos esta distancia por el movimiento verdadero de la Luna durante una hora, resultará o bien la hora en que la Luna estará en conjunción con la estrella fija, si tal conjunción va a ocurrir en el futuro, o bien la hora en que ha ocurrido esa conjunción de la Luna y la estrella observada. Después, calcule el geógrafo esta conjunción de la Luna y la estrella fija para el meridiano de la otra localización distante mediante tablas precisas de los movimientos verdadero y medio para esa localización distante. Finalmente, comparando estas dos horas para los meridianos de estos dos lugares tal como hemos explicado antes para los eclipses lunares, encontrará la diferencia en longitud entre estos dos lugares.¹²

Se pueden considerar variantes de esta propuesta, tanto el recurso a los

¹² J. Werner, *In hoc opere haec continentur...*, 4, nota 8, incluido en W.H.J. Andrewes, *The Quest for Longitude*, Cambridge, Mass., Harvard U.P., 1996, Apéndice C, p. 385. En el mismo sentido va la propuesta de Jean-Baptiste Morin basada en las tablas lunares de Tycho, Kepler y Digges y presentada a los Estados Generales de Holanda, propuesta de la que él mismo había

eclipses de estrellas por la Luna indicado por Kepler y defendido por Hevelius todavía en 1671, como las variaciones angulares de la Luna respecto a dos o más estrellas, que se puede rastrear hasta Regiomontano y que fue el método utilizado por Maskelyne ya a mediados del s. XVIII. En todos los casos, la propuesta es estrictamente astronómica y autosuficiente y el planteamiento teórico exquisito, aunque enormemente complejo. Además, permite volver a encontrar la longitud tantas veces cuantas sea necesario después de haberla perdido y su perfeccionamiento depende exclusivamente del progreso del conocimiento astronómico, incluyendo el desarrollo de mejores instrumentos de observación. Sin embargo, su aplicación práctica exigía llevar a cabo farragosos cálculos para eliminar los problemas de la paralaje y la refracción y, además, para que sus resultados fueran suficientemente exactos era necesario disponer de instrumentos de observación muy precisos, de catálogos estelares y, sobre todo, de un profundo conocimiento de la complicada órbita lunar que permitiera construir tablas lunares anuales exactas, lo que no se consiguió hasta los trabajos de Euler, a partir de los cuales Mayer elaboró sus tablas lunares en 1755. Sólo a partir de entonces se convirtió en una verdadera alternativa para resolver el problema de la longitud. A partir de 1766 y basándose en las tablas de Mayer, Maskelyne publicó el *Nautical Almanac* en el que recogía el desplazamiento angular de la Luna respecto a 9 estrellas y al Sol cada tres horas a lo largo del año. Igualmente, el trabajo de Maskelyne reducía al mínimo la dificultad de los cálculos introduciendo una tabla de correcciones, de manera que el cálculo efectivo de la longitud a partir del Almanac era bastante sencillo y cómodo, pese a la complejidad teórica del método de las variaciones angulares.¹³

Finalmente, una tercera propuesta que alcanzó notoriedad durante el s.

informado a Galileo en carta del 25 de Noviembre de 1634 y a la que también hace referencia Ortensio en su carta a Diodati del 1 de Febrero de 1637 indicando que tiene problemas con la paralaje y la refracción (*Opere*, XVI, p. 158 y XVII, p. 25, respectivamente).

¹³ El problema era que las variaciones angulares tenían que calcularse teóricamente respecto al centro de la Tierra, la distancia angular medirse desde el centro de la Luna y no tomar en cuenta la refracción. Por el contrario, las observaciones de quien estaba calculando la longitud se hacían de hecho desde la superficie de la Tierra, y por tanto con paralaje, la distancia angular se medía con el cuadrante desde la superficie de la Luna opuesta a la estrella y la refracción era inevitable. Eliminar estos factores requería correcciones mediante cálculos matemáticos largos y complejos. Para evitarlo, el Almanac iba acompañado de un segundo volumen, las *Table Requisite...*, que incluía todas las tablas de correcciones, desde la paralaje, el semidiámetro de la luna y el Sol o la refracción hasta las posiciones de las estrellas e incluso las tablas trigonométricas. Esa era precisamente la intención de Maskelyne desde un primer momento. Así, en una carta a su hermano Edmund Maskelyne del 15 de Mayo de 1766, dice: “El comité de longitud ha comprometido a personas para computar una efemérides náutica y astronómica muy completa que saldrá el próximo Septiembre del año 1767 y continuará anualmente. Habrá 12 páginas para cada mes. Se realizarán todos los cálculos lunares para encontrar la longitud en el mar por ese método: y se añadirán otras tablas útiles y nuevas para facilitar todo el cálculo; de modo que los marinos tendrán poco más que hacer que observar cuidadosamente la distancia de la luna al sol o a otra estrella adecuada, de las que van también incluidas en la efemérides, para encontrar sus longitudes”, citado en D. Howse, *Green-*

XVI y parte del s. XVII se basaba en la variación de la aguja magnética. Los primeros navegantes transoceánicos habían observado no sólo la variación de la aguja magnética en un plano horizontal respecto al polo norte verdadero, sino también que cambiaba de este a oeste al pasar cerca de las Azores. Así, cuando el barco se movía en el hemisferio norte entre Europa y las Azores, la aguja se desviaba hacia el noreste, mientras que entre las Azores y América lo hacía hacia el noroeste. En torno a las Azores, la desviación era nula y la aguja señalaba al polo norte verdadero. Esto llevó a muchos a considerar el meridiano de las Azores como el ‘meridiano magnético’, asumiendo que al cruzar su opuesto en el otro extremo de la Tierra, entre América y Asia, la variación volvería a invertirse, pasando allí de noroeste a noreste. Se conjeturaba, además, que la variación cambiaba gradual y progresivamente con la longitud y que era siempre constante para el mismo meridiano. Si todo esto era cierto, la longitud podría determinarse simplemente midiendo la variación magnética. Además, los meridianos, o al menos el primer meridiano, se reificaban convirtiéndose en entidades físicas, en lugar de constructos matemáticos, y su localización se convertía en una cuestión de descubrimiento físico, de un hecho de la naturaleza.¹⁴

En 1600, Gilbert criticaba en el *De Magnete* estas asunciones considerándolas erróneas y negaba que la variación fuera igual en el mismo meridiano, que variara uniformemente al moverse a través de los meridianos y que el ángulo difiriera proporcionalmente a la distancia.¹⁵ Sin embargo, Gilbert creía que la variación se mantenía constante en un mismo lugar y no cambiaba a tra-

wich Time and the Longitude, Londres, P. Wilson, 1997, p. 70; más adelante, en las págs. 157-8, Howse comenta la descripción de una medición de este tipo hecha por un marino desconocido en 1772.

¹⁴ Que esta opinión era frecuente en la época, lo señala Blaeu en la presentación de su mapa de 1622: “Pero en nuestros días muchos piensan que este punto de partida debe estar basado en la naturaleza misma y han tomado la dirección de la aguja magnética como su guía y situado el primer meridiano donde señala al norte verdadero. Pero que esto es una ilusión se prueba por la propiedad adicional de que la aguja magnética no señala igual para todo el meridiano, sino que varía a lo largo del mismo meridiano según esté más cerca una masa de tierra u otra”, citado en D. Howse, *Greenwich Time and the Longitude*, Londres, P. Wilson, 1997, p. 126. Igualmente, que Gilbert dedique todo el capítulo 9 del libro IV del *De Magnete* a discutir “Si se puede encontrar la longitud terrestre a partir de la variación”, que es el título del capítulo, prueba que era una idea extendida y considerada seriamente.

¹⁵ Gilbert, *De Magnete*, ed. D.J. Price, New York, Basic Books, 1958, IV, 9, p. 166 y IV, 4, p. 161. Por el contrario, afirmaba que “el arco de variación cambia de diferentes formas erráticamente, tanto en diferentes meridianos como en el mismo meridiano, y cuando, de acuerdo con la opinión de recientes escritores, debería desviarse hacia el este, repentinamente, en un cambio gratuito de lugar, va del norte al oeste, como en las regiones del norte cerca de Nueva Zembla” (*De Magnete*, IV, 1, p. 152). En el libro IV, 4, 5 y 9, págs. 161 sigs., enumera las causas de la declinación y de este comportamiento impredecible: que la aguja es afectada por las masas de tierra, aunque no por las islas; por la combinación de latitud y longitud; por la altitud de los picos de tierra o la profundidad del mar, etc. Igualmente, en *De Magnete*, IV, 1, p. 154, rechaza la existencia del supuesto meridiano magnético y dice que la aguja “en los espacios intermedios [entre las masas continentales], por así decir, como por ejemplo en las Azores occidentales, apunta al

vés del tiempo. En tal caso, podría utilizarse la variación como una ayuda para la navegación y para la determinación de la longitud. Bastaría con encontrar líneas con la misma variación (es decir, isogónicas) y representarlas en un mapa entre las líneas de latitud y longitud en una proyección de Mercator. Como las líneas isogónicas no eran rectas, sino que se curvaban a través de los meridianos y paralelos, la medición de la latitud y la variación ayudaría a localizar la longitud y la posición en el mapa. Ese fue el encargo fundamental del doble viaje de Halley a bordo del *Paramore* en 1698 y cuyo resultado fueron los mapas de isogónicas del Atlántico y del Índico de 1701 y 1702. Desgraciadamente, el valor de estos mapas era provisional y bastante relativo porque, contra lo supuesto por Gilbert, la variación en un lugar dado cambiaba con el paso del tiempo, como ya había indicado Gellibrand en 1633.¹⁶

Una variante de este método era utilizar la declinación de la aguja magnética en lugar de la variación, o combinándola con ella. La declinación, descubierta por R. Norman en 1581, consistía en la desviación de la aguja magnética en un plano vertical, desviación que era nula en el ecuador y extrema en los polos. Gilbert, que dedica el libro V del *De Magnete* a estudiar la declinación, había construido, siguiendo a Norman, un aparato para medirla (V, 1, págs. 184 sigs.) y consideraba que podía utilizarse para determinar la latitud e incluso, combinando variación y declinación, la longitud (V, 8, p. 200 sigs.).¹⁷

La propuesta de Galileo

La solución para el problema de la longitud propuesta por Galileo está basada en la utilización de los movimientos de los satélites de Júpiter, descubiertos por Galileo en 1611, como fenómeno astronómico de referencia

polo verdadero. Que un cuerpo magnético varíe de la misma manera en las mismas regiones de la Tierra no es debido al meridiano o a la coincidencia del meridiano con algún polo magnético, como la tropa filosófica supone, pues eso no ocurre así a lo largo de todo el meridiano”.

¹⁶ Como consecuencia de este cambio perpetuo, aunque lento, de la variación en todos los lugares, los mapas tendrían que ser revisados periódicamente. El valor anual de la variación no fue fijado hasta finales del s. XVIII por Cassini. Irónicamente, el mismo Halley era partidario de determinar la longitud mediante el método de las distancias lunares, como se recoge en los extractos de los diarios de la Royal Society referidos a Halley, en E. Halley, *Correspondence and papers*, ed. E.F. MacPike, Londres, Taylor and Francis, 1937, apéndice 8, págs. 220 y 238.

¹⁷ En esta dirección iría también la propuesta de Guillaume de Nautonier a que se refiere la carta de Antonini a Galileo de Noviembre de 1627 (*Opere*, XIII, p. 379), según la cual habría presentado a los Estados Generales de Holanda un libro publicado en 1603 “sobre la Mecometría por medio de las variaciones y declinaciones de la aguja imantada, pero al final se descubre que todo lo que muestra no vale nada”. A diferencia de Gilbert, Nautonier parece utilizar la variación y la declinación independientemente y por separado. También en 1676, H. Bond propuso determinar la longitud mediante un método parecido al estudiado por Halley en la expedición del *Paramore*, pero utilizando la declinación en lugar de la variación, y en 1768 Wickle trazó un mapa de líneas de declinación magnética (isoclinas).

y se enmarca dentro del grupo de las propuestas astronómicas, como lo están también la propuesta clásica de los eclipses de Luna de Ptolomeo, la de los movimientos lunares y los eclipses de estrellas de Kepler o la de las distancias lunares de Werner y, más tarde, Maskelyne. Tiene, sin embargo, una importante diferencia con ellas. Desde un punto de vista teórico es mucho más simple, precisa, manejable y útil, como el mismo Galileo se encarga de recalcar constantemente, sea porque los eclipses de los satélites de Júpiter son muchísimo más frecuentes que los del Sol o la Luna, sea porque se pueden determinar con mucha mayor precisión que éstos o que los eclipses de estrellas por la Luna, sea porque las efemérides y tablas de los movimientos de los satélites son mucho más fáciles de elaborar que las tablas lunares. Al mismo tiempo, la imposibilidad de poder observar los satélites de Júpiter a simple vista y la necesidad de recurrir al telescopio, hacen que la aplicación de la propuesta se encuentre con diversos problemas prácticos, especialmente a la hora de aplicarla a la navegación. Para enfrentarse a estos problemas, Galileo se ve obligado a buscar soluciones técnicas y a diseñar aparatos e instrumentos como el *cellatone*, la silla flotante o el contador de tiempo, lo que aproxima su propuesta al grupo de soluciones prácticas, y podríamos decir tecnológicas, como la utilización por Ptolomeo del meteoroscopio combinado con las distancias y rumbos, la declinación y variación de la aguja magnética de Gilbert o la propuesta del reloj de G. Frisius y, más adelante, los relojes marinos desde Huygens hasta Harrison.

Esto pone a la propuesta galileana en una situación complicada, pues a medida que se va desarrollando se ve obligada a satisfacer dos grupos diferentes de valores difíciles de equilibrar: de una parte, los valores teóricos clásicos exigidos a las propuestas astronómicas, como los de verdad, explicatividad, capacidad predictiva, precisión o regularidad; de otra, los exigidos a las propuestas prácticas, como eficacia, simplicidad, efectividad, disponibilidad y fiabilidad. Esta tensión marca la evolución de la propuesta desde la “Proposta per la longitudine” o la “Relazione Generale” de 1616 hasta la propuesta general enviada a los Estados Generales de Holanda en Agosto de 1636 o la detallada exposición de sus soluciones a los cuatro problemas prácticos en la carta a Reael de Junio de 1637.¹⁸ Lo que comienza siendo una propuesta estrictamente astronómica, autocontenida y autosuficiente, la de sustituir como fenómeno de referencia los eclipses de Luna por los eclipses, conjunciones, etc., de los recién descubiertos satélites de Júpiter, mucho más frecuentes, exactos, regulares y predecibles, de manera que la propuesta se presenta como la sucesión y superación natural de la propuesta clásica de Ptolomeo adaptada, integrada y comprometida con la

¹⁸ Desde el comienzo de las negociaciones con España si, como convincentemente conjetura Favaro, la “Proposta per la longitudine” es de 1612. Ambas, la “Proposta” y la “Relazione” en *Opere*, V, págs. 419 sigs. La carta a los Estados Generales en *Opere*, XVI, págs. 336 sigs. y la carta a Reael en *Opere*, XVII, págs. 96 sigs.

nueva ciencia merced al recurso al telescopio y a los nuevos descubrimientos astronómicos, se va convirtiendo, a lo largo del tiempo y con la aparición de problemas prácticos para su aplicación concreta, en una propuesta práctica, en la que los instrumentos y aparatos, su efectividad y eficacia, juegan un papel fundamental. Y aunque Galileo también presentará el diseño de estos aparatos como un triunfo de la nueva ciencia, de la que se derivarían, no conseguirá convencer a sus interlocutores de su superioridad.

En general, se pueden distinguir dos partes o dos formulaciones de la propuesta cada una de ellas situada en un contexto diferente:

1. La propuesta y consiguiente negociación con España, entre 1612 y 1618, llevada a cabo indirectamente y a través de medios diplomáticos (Picchena, d'Elci, Argensola) sólo relativamente comprometidos con Galileo y
2. La propuesta y negociación con los Estados Generales de Holanda, entre 1636 y 1637, llevada a cabo por un amigo comprometido e influyente como Diodati y en la que el propio Galileo puede entrar en contacto directo con algunos de los encargados de tomar la decisión (Ortensio, Reael).

En el primer caso, la propuesta inicial de Galileo es general y se centra básicamente en los aspectos teóricos, en la discusión de los defectos y limitaciones de los métodos usados tradicionalmente, derivados de Ptolomeo (dirección y distancia y eclipses lunares), y en lo útil que sería una alternativa astronómica, para acabar formulando su solución de manera críptica:

El Sr. Galileo Galilei, ...ha llegado a descubrir en el cielo algo totalmente desconocido en los siglos pasados y que equivale a más de mil eclipses lunares cada año observables con precisión muy minuciosa y, lo que es más importante, reducibles a cálculos y tablas exactas y cuidadosas.¹⁹

La propuesta se mantiene en línea con la de Ptolomeo en el sentido de

¹⁹ Galileo, *Opere*, V, p. 421. En la "Relazione" (*Opere*, V, p. 424-5) es algo más explícito, aunque no demasiado: "El medio que adoptaré en esta investigación es precisamente mediante observaciones celestes, pero de estrellas que no han sido observadas ni vistas por otros antes de mí, las cuales tienen movimientos propios velocísimos y periodos que yo con largas vigiliias y fatigas he descubierto y calculado cuidadosamente. Sólo esto faltaba para la total perfección de arte tan grande y útil, y esto es lo que yo he descubierto y le ofrezco a S.M. Estas estrellas tienen entre sí conjunciones, separaciones, eclipses y otros accidentes, los cuales superan infinitamente la utilidad de los eclipses lunares para la presente materia; puesto que donde los eclipses lunares son tan raros que, en promedio, no llegamos a tener uno por año que nos sirva, de éstos tenemos más de mil utilísimos por año, de modo que no pasa ninguna noche en que no tengamos 2, 3 e incluso tal vez 4 y más. En cuanto a la precisión son todos tan momentáneos y veloces que, sean las conjunciones, separaciones, ocultaciones, apariciones o eclipses, cada una se despacha en un momento de tiempo, así que en su aprehensión no se puede errar más de medio minuto de hora, y en suma son tan exactos que no habrá persona alguna de mediana inteligencia que no sea competente, puesto que con este medio se describirán sobre los mapas y cartas náuticas todos los sitios del mundo sin error ni de 4 millas incluso en las regiones más remotas. Además, por medio de efemérides calculadas por mí hora a hora en las

estar más orientada hacia el problema de la representación geográfica del mundo y la elaboración precisa de mapas. Su enfoque es el de un astrónomo o geógrafo y evalúa su propuesta sólo desde el punto de vista de su justificación teórica sin plantearse los problemas prácticos y técnicos que pueda tener su aplicación, de ahí que los únicos problemas que cita sean el de la observación de los satélites y el de las tablas. Sólo colateralmente se refiere a la navegación, que es precisamente el objetivo del premio, pero lo hace desde ‘fuera’, sin llegar a plantearse seriamente el segundo objetivo citado más arriba al hablar de Ptolomeo: el de poder fijar la posición de hecho en las circunstancias reales de un barco en movimiento para trazar el rumbo a seguir. Da la impresión de que la propuesta no está demasiado elaborada, que Galileo no se ha parado a pensar en los detalles, ni en los problemas concretos asociados con su aplicación y, sobre todo, que lo que se exige no es una solución teórica, sino una solución práctica a un problema técnico: cómo encontrar de hecho la longitud en el mar de manera efectiva, eficaz, simple y fiable.

Es cierto que la ambigüedad y la falta de concreción de la propuesta puede deberse a que Galileo está especialmente interesado en el premio y no quiere revelar detalles que puedan usar otros en su propio provecho; a que tanto el telescopio como los satélites de Júpiter eran, en ese momento, descubrimientos demasiado recientes y poco conocidos para ser más explícito por carta; incluso a que Galileo creyera que el Rey de España estaría más interesado en cartografiar con precisión sus inmensas posesiones que en la navegación misma. Pero no es menos cierto que en esta primera propuesta parece haber minusvalorado la importancia y dificultad de los problemas prácticos, especialmente el del uso del telescopio a bordo de un barco en alta mar, y que a lo largo de la negociación irá completando la propuesta a remolque de las dificultades que le irán planteando.

Así, en la carta a d’Elci del 13 de Noviembre de 1616 (*Opere*, XII, p. 291) en la que le envía información concreta para anticipar objeciones, habla ya claramente del telescopio (“llamo telescopios a estos anteojos con

que se contengan para largo tiempo futuro los momentos de las conjunciones, separaciones y eclipses, se llegará en la navegación misma, a la hora de la noche que se quiera, a la certeza de la verdadera longitud y en consecuencia al verdadero sitio donde se encuentra la nave, y esto durante diez meses de cada año, pues ocurre que durante dos meses como máximo tales estrellas permanecen invisibles, que es cuando el Sol se encuentra en su vecindad. Haré ver las citadas estrellas a S.M. y a quien me ordene; mostraré sus movimientos, los continuos cambios de aspecto, así como las conjunciones, separaciones, eclipses y otros accidentes, noche por noche y cuanto le plazca, previstos y calculados por mí desde mucho tiempo antes, de manera que cada uno quede seguro de la certeza de mis predicciones y de la precisión de mis tablas y cálculos; enseñaré no sólo el uso, sino la composición de esas tablas y el modo de ajustarlas en todos los siglos por venir, expondré las aplicaciones de estas observaciones celestes a la descripción exacta y puntual de todos los reinos de S.M. y de todos los continentes, mares e islas del mundo y, finalmente, la manera de servirse de mis invenciones incluso en la misma navegación de manera que los demás estén seguros en cualquier momento del lugar donde se encuentran”.

los que multiplico 40 o 50 veces la visión natural”), se compromete a enseñar su uso y a elaborar tablas para cada día y hora e incluso a escribir un tratado sobre la nueva astronomía para que aprendan a hacerlas otros, afirma tajantemente que ha superado todas las dificultades para el uso del telescopio en tierra y que “también he encontrado medios de poderlo hacer en una nave remediando la distorsión de la agitación del agua”. Lo sorprendente de esta afirmación es que 4 meses después, en la carta del 22 de Marzo de 1617 a Picchena (*Opere*, XII, p. 311-2) le comunica que está en Livorno intentando probar en un barco en movimiento un aparato acerca del cual dice:

Este que he hecho no es verdaderamente uno de los dos en que tengo más confianza que pueda servir en la nave para la longitud”, en lo que constituye la primera referencia al *celatone*. Igualmente, en la carta a d’Elci de Junio de 1617 (*Opere*, XII, p. 321) le dice: “Mientras estaba pensando en las maneras de superar la dificultad que retarda llevar a efecto mi descubrimiento acerca de navegar por la longitud, ha ocurrido que me he encontrado con otra invención de grandísima utilidad para la navegación de las galeras por estos mares nuestros y de la que quiero servirme para facilitarme ante S.M. la conclusión de la otra idea.²⁰

Todavía en la carta del 17 de Noviembre de 1617 (*Opere*, XII, p. 353) d’Elci informa a Picchena de sus dudas:

Pero para saber esto, es forzoso y necesario ver primero las citadas estrellas y sus aspectos, lo cual no sé cómo se podrá hacer en el mar o al menos tan frecuente y rápidamente como necesita quien navega; porque, dejando aparte que el uso del telescopio no podrá tener lugar en los navíos por su movimiento...

lo que indica que el problema seguía sin resolverse, y en la carta de respuesta a d’Elci del 25 de Diciembre de 1617 (*Opere*, XII, p. 360-1), Galileo, perdida la paciencia, irritado y a la defensiva, responde:

Concedo también que en la calma el mismo uso [del telescopio] sería difícil si yo no hubiese pensado en el modo de desprenderse de la conmoción universal de que participan todas las cosas que están en la nave; pero a esto le

²⁰ Este otro invento son los binoculares, “una forma de antejo diferente de la otra, con la que se encuentran los objetos con la misma rapidez que con el ojo libre y una vez encontrados se siguen cuanto se desee sin perderlos, ...pues esta nueva forma mía aumenta la visión más de diez veces por encima de lo natural ...y se mira con ambos ojos al mismo tiempo”. También se refiere a ellos d’Elci en la carta al Duque de Lerma de 11 de Septiembre de 1617 (*Opere*, XII, p.345), diciendo que se los regalará al Rey. Parece estar relacionado con el experimento de los dos telescopios móviles unidos a que hace referencia la carta de Castelli de 24 de Mayo de 1617 (*Opere*, XII, p. 319).

he encontrado remedio, como V.E. oirá en su momento

e inmediatamente se defiende reivindicando las virtudes cartográficas de la propuesta:

Por otra parte hay otros 2 notabilísimos usos que obtendremos en tierra firme: uno de los cuales es la corrección y ajuste preciso de todas las cartas náuticas y geográficas de modo que las distancias más lejanas no diferirán de la verdad más de una legua, y para los descubrimientos de tierras incógnitas, cuyo verdadero sitio se tendrá en una noche.

Por el contrario, la propuesta a los Estados Generales de Holanda está perfectamente elaborada, se desarrolla con todo lujo de detalles, muestra con toda precisión la forma de utilizar los satélites de Júpiter y distingue claramente la propuesta teórica de los problemas prácticos relacionados con su uso en la navegación, acerca de cuya solución da una información general.²¹ ¿Qué ha cambiado? En parte que Galileo tiene más de 70 años, se siente

²¹ “Sabemos, por tanto, como en torno al cuerpo de Júpiter van girando perpetuamente cuatro estrellas menores, con distinta velocidad en cuatro círculos de diferente tamaño; a partir de los movimientos de estas estrellas tenemos en cada día natural 4, 6, 8 y aún más vueltas repetidas, accidentes que cada uno de ellos no es menos adecuado para la investigación de la longitud, sino mucho más, que si fueran eclipses lunares, dado que siendo su duración de poco tiempo, no dan ocasión de equivocarse en el cómputo de las horas y de sus partes. Los accidentes en fin son los siguientes. Primero, por ser el cuerpo de Júpiter no menos tenebroso que la Tierra y resplandeciendo sólo por la iluminación del Sol, extiende en la parte opuesta al Sol su sombra en forma de cono por la que pasa cada uno de sus cuatro satélites mientras recorre la parte superior de su círculo y estando ellos a su vez, a guisa de 4 lunas, privados de luz y resplandeciendo sólo por la iluminación del Sol, se eclipsan al entrar en el cono de sombra de Júpiter, y por su pequeñez la inmersión en las tinieblas se hace en un tiempo de alrededor de un minuto de hora; de manera semejante, saliendo de la sombra algunas horas después, recuperan el esplendor en otro brevísimo tiempo: a partir de lo cual es evidente que los observadores de tales eclipses no pueden diferir entre sí, en cuanto al tiempo de la observación cuidadosa, en más de un minuto de hora. Aparte de los eclipses están, en segundo lugar, los contactos de sus cuerpos con el de Júpiter, donde se puede observar el momento exacto en que aparecen tocando el disco de Júpiter, como también, por el contrario, es observable su separación del mismo disco; y tales conjunciones y separaciones son observables sin error de medio minuto de hora merced a la velocidad de su movimiento y el pequeñísimo momento que media entre tocarlo y no tocarlo. En tercer lugar, son observables las conjunciones y separaciones de los mismos satélites entre sí, los cuales, mientras se afrontan con movimientos contrarios, recorriendo estos la parte superior de sus círculos y aquellos la inferior, se dirigen a la conjunción exacta, la cual tiene lugar en menos de un minuto de hora, así que su punto medio es perceptible con toda exactitud, sin error ni de unos pocos segundos. Estos son los frecuentísimos accidentes todas las noches en cualquier parte de todo el globo terrestre y en todo el tiempo del año en que Júpiter es visible y observable; a partir de estos accidentes, cuando se elaboren las efemérides por expertos astrónomos, calculadas en cualquier meridiano establecido, como, v. g., el meridiano de Amsterdam, de las que los navegantes tengan copia cerca de sí, haciendo las observaciones en los momentos oportunos y confrontándolas con los tiempos anotados en las efemérides, podrán a partir de la hora computada por ellos y la hora anotada en la efemé-

viejo y sabe que se está quedando ciego, de modo que tiene poco tiempo para negociar; que le interesa el premio, pero le interesa más el reconocimiento a su descubrimiento; que en Holanda tiene un prestigio del que 20 años antes carecía en España y sabe que su propuesta se valorará seriamente; que su intermediario, Diodati, es un amigo probado y fiel en el que puede confiar y que lo defenderá en todo momento; que Holanda es un imperio comercial basado en la navegación; que han pasado 25 años desde la fabricación de su primer telescopio y su descubrimiento de los satélites de Júpiter y son lo suficientemente conocidos para poder hablar de ellos e incluso, como sabrá más adelante, que quienes juzgarán su propuesta son expertos marinos, cartógrafos y matemáticos (Blau, Ortensio, Reael), que admiran su trabajo y con los que podrá hablar claramente. Pero también ha cambiado su planteamiento del problema, que ahora comprende en sus menores detalles; sabe que es una combinación de problemas teóricos y prácticos; que aún más que la justificación teórica, se valoran la efectividad y la eficacia de las soluciones propuestas y que en su propuesta concreta, ambos componentes son inseparables.

Más aún, sabe que los problemas prácticos de su propuesta son cuatro: a) la descripción teórica precisa del movimiento de los satélites para poder calcular las efemérides; b) la construcción de telescopios precisos; c) la dificultad de usar un telescopio en un barco en movimiento y d) la necesidad de un medidor de tiempo exacto para poder medir con precisión los eclipses y las otras interacciones de los satélites. Precisamente, en la carta a Reael de Junio de 1637 (*Opere*, XVII, págs. 96 sigs.) expone detalladamente la forma de resolverlas. Desde el principio insiste en que la mayor dificultad de todas es que el movimiento de la nave impide operar el telescopio para observar los satélites y para resolverla describe dos aparatos, el *celatone* y la silla flotante, cuya concepción se remonta a la época de sus negociaciones con España. En efecto, ante las objeciones transmitidas por d'Elci acerca de la utilización del telescopio en un barco en movimiento, Galileo había

rides, comprender la distancia del meridiano en que se encuentran del primer meridiano de Amsterdam, que es la longitud buscada. Es manifiesta y utilísima la seguridad y la gran utilidad de poder reformar y corregir en tierra todas las cartas geográficas y náuticas de modo que no difieran de la verdad ni medio grado, ni (casi diría) una legua; porque sin efemérides ni otros cálculos basta que uno, en el lugar donde se encuentra, vaya observando durante algunas noches los accidentes antes citados anotando la hora de su aparición, la cual consultada con las mismas observaciones hechas y anotadas, con sus tiempos, en Amsterdam o en otro lugar, darán las diferencias de los meridianos... Pero respecto al uso en la navegación quedan por lograr 4 particularidades. Primera, la teórica cuidadosa de los movimientos de esas estrellas mediceas que rodean a Júpiter, a partir de la cual los astrónomos expertos puedan calcular y distribuir en efemérides todos los accidentes citados. En segundo lugar, se requieren telescopios de tal perfección que hagan claramente visibles y observables esas estrellas. Tercero, conviene encontrar una manera de superar la dificultad que otros pueden creer que ocasionará la agitación de la nave para el uso del telescopio. En cuarto lugar, se necesita un reloj preciso para medir la hora y sus minutos, a meridie o ab occasu solis” Carta de Galileo a los Estados Generales de 15 de Agosto de 1636, *Opere*, XVI, págs. 464 sigs.

escrito a Picchena el 22 de Marzo de 1617 que se encontraba en Livorno intentando probar en un barco un antejo y un aparato que había diseñado para enfrentarse al problema del movimiento del barco. Este sería sólo un prototipo aproximado del verdadero aparato, porque insiste en que no es ninguno de los dos que cree le permitirían resolver el problema en el caso de la longitud, pero que su buen funcionamiento le hace concebir esperanzas y que lo ha construido porque puede ser útil para que las galeras puedan descubrir e identificar otros barcos.²² Este sería el prototipo del *celatone* al que Castelli hace referencia en su carta a Galileo del 7 Febrero 1618 (*Opere*, XII, p. 372):

Primero, le doy cuenta que he estado más veces con el Sr. G. de Medici y que por orden del Sr. Picchena le he mostrado el *celatone*, visto y probado por SS con grandísimo placer y juzgada esta invención más importante que el hallazgo del antejo mismo. Le ruego otra vez que me mande los antejos pequeños (*occhialini*) de un palmo o menos de largo a fin de que a la menor ocasión pueda ir a Livorno a entrenar a algunos de aquellos jóvenes ya seleccionados.

Este prototipo de *celatone* sería, pues, una especie de casco combinado con un antejo de pequeño tamaño y no demasiada potencia que podría usarse en un barco para la identificación de buques en el mar. Otra referencia al aparato parece ser la de la carta a Leopoldo de Austria del 23 de Mayo de 1618, en la que Galileo describe como se combinan el antejo y el *celatone*: el primero está ajustado a la medida en el segundo, a la altura del ojo y totalmente inmovilizado, como si fuera una prolongación del ojo.²³ El verdadero *celatone* a utilizar para el problema de la longitud tendría que ser

²² “Fui a Livorno y dado que no había ningún barco fuera del muelle, no pude ver el efecto del antejo (*occhiale*) más que sobre una barcaza dentro del muelle, donde el movimiento del agua era poco aunque el viento fuese fortísimo y aquel poco movimiento no aportaba impedimento alguno a la utilización de ese antejo, quiero decir sin ninguna ayuda de instrumento que remediase ese movimiento, a partir de lo cual llego a tener más confianza en superar la dificultad con ayuda del aparato que he diseñado, del cual ya he hecho uno aquí en el arsenal y que someteré a prueba a la menor ocasión. Este que he hecho no es verdaderamente uno de los dos en que tengo más confianza que puedan servir en la nave para la longitud, pero lo he querido hacer porque creo que puede servir muy bien para las galeras de SAS para descubrir y conocer bajeles navegando en el mar”. Carta de Galileo a Picchena, 22 Marzo 1617, *Opere*, XII, p. 311-2.

²³ “Le mando también otro tubo pequeño (*cannoncino*) fabricado en un cabezal (*testiera*) de latón; pero éste está hecho sin adorno alguno porque no puede servirle a V.A. más que como modelo y ejemplar para hacer fabricar otro que cuadre mejor a la forma y tamaño de la cabeza de quien lo vaya a utilizar; no es posible acomodar el citado instrumento y mecanismo sin ayuda de la presencia de la cabeza y los ojos del individuo que debe usarlo, porque el ajuste consiste en diferentes posiciones de más alto o más bajo, más o menos inclinado a la derecha o a la izquierda, casi como inseparable; y a V.A. no le faltarán artífices que le servirán exquisitamente a partir de este modelo. Le suplico encarecidamente que lo tenga tan oculto como pueda, por ciertos intereses míos”. Carta a Leopoldo de Austria, 23 de Mayo de 1618, *Opere*, XII, p. 390.

parecido, pero más grande, porque debería soportar un telescopio mayor capaz de permitir observar los satélites de Júpiter. Por eso más que un casco, sería una especie de armadura de metal que cubriera hasta la espalda y el pecho de quien lo usara y en la cual quedara perfectamente ajustado el telescopio a la altura del ojo, casi como una prolongación. Por su parte, el otro ojo quedaría libre actuando como una especie de buscador con el que localizar Júpiter. Este es el artefacto descrito en la carta a Reael de 1637.²⁴

El *celatone*, no obstante, no posibilitaría por sí solo el uso del telescopio en un barco. Era necesario algún otro artefacto que combinado con él eliminara la “influencia” de los bandazos y cabeceos del barco sobre el observador y a esto se referiría el segundo aparato de que se habla en la carta a Picchena escrita en Livorno. Tal aparato sería la silla flotante, cuya construcción se describe con todo detalle en la carta a Reael.²⁵ Se trataría de un recipiente semiesférico situado en el barco que se llenaría con agua o aceite

²⁴ “Yo ya hice al principio, para uso de nuestras galeras, cierto gorro (*cuffia*) en forma de celada (*celata*) que teniéndolo el observador en la cabeza y habiendo fijado en él un telescopio, ajustado de modo que miraba siempre al mismo punto al cual el otro ojo libre dirigía la vista, sin hacer más, el objeto que miraba con el ojo libre se encontraba siempre enfrente del telescopio. Podría construirse un aparato similar que se fijase inmóvilmente no sólo sobre la cabeza, sino sobre la espalda y pecho del que mira, en el cual estuviese fijo un telescopio del tamaño necesario para distinguir bien las pequeñas estrellas de Júpiter y acomodado correspondiendo de tal manera a uno de los ojos que hendiera el objeto visto por el otro ojo libre, de modo que simplemente con dirigir la vista al cuerpo de Júpiter, el otro ojo lo encontrase con el telescopio y en consecuencia viese las estrellas cercanas a él”. Carta de Galileo a Reael, Junio de 1637, *Opere*, XVII, p. 99.

²⁵ “Pero en lo que respecta a las agitaciones medianas pienso que puede reducirse el estado del que debe hacer las observaciones a una placidez semejante a la de tranquilidad y bonanza del mar; y para conseguir tal beneficio he pensado colocar al observador en un lugar de la nave preparado de tal manera que no sólo las conmociones de proa a popa, sino también las laterales dejen de sentirse: y mi pensamiento tiene el siguiente fundamento. Si la nave estuviera siempre en agua placidísima y sin ninguna fluctuación, no cabe duda que el uso del telescopio sería tan fácil como en tierra firme. Ahora bien, quiero situar al observador en una pequeña nave, situada dentro de la nave grande, que tenga dentro una cantidad de agua conforme al menester que a continuación diré. Aquí, primeramente es evidente que el agua contenida en el bote pequeño, aunque la nave grande se incline o recline a derecha e izquierda, adelante y atrás, se conservará siempre equilibrada, sin subir ni bajar en ninguna de sus partes, sino que se mantendrá siempre paralela al horizonte; de modo que si en esta pequeña nave situamos otra más pequeña flotando en el agua contenida, vendría a encontrarse en un mar placidísimo, y en consecuencia permanecería sin oscilar; y esta segunda navicilla ha de ser el lugar donde debe colocarse el observador. Quiero que el primer recipiente que debe contener el agua sea como un gran barreño en forma de media esfera y que el recipiente menor sea similar a éste y solamente mucho más pequeño, que entre su superficie convexa y la cóncava del que lo contiene no quede un espacio mayor que el del grosor del dedo pulgar, por lo que ocurrirá que una poquísima cantidad de agua bastará para sostener el recipiente interior no menos que si estuviera situado en el amplio océano, tal como demuestro en mi tratado sobre las cosas que flotan en el agua, lo que verdaderamente parece a primera vista maravilloso e increíble. El tamaño de estos recipientes ha de ser tal que el interior y más pequeño pueda sostener sin sumergirse el peso de quien ha de hacer las observaciones, junto con el asiento y los otros utensilios

y dentro del cual se situaría flotando otro recipiente con la misma forma, pero más pequeño, cuyas paredes distaran un dedo entre sí y que, además, estarían separados por muelles para que uno no tocara nunca al otro. En el más pequeño se situaría un banco en el que se sentaría el observador con el *celatone*, de manera que quedaría aislado del movimiento del barco.

Tras este derroche de imaginación, el medidor de tiempo, derivado del *De Motu* y regulado mediante un péndulo rígido, que describe a continuación en la misma carta, se convierte en un diseño bastante sencillo a pesar de su importancia y la influencia que pudiera tener en los relojes de Huygens, hijo. Lamentablemente, todo el esfuerzo resultaría en vano. En la carta de Diodati a Galileo del 7 de Julio de 1637 (*Opere*, XVII, págs. 127 sigs.) le avisa que ha sido demasiado generoso descubriendo todos sus secretos en la carta a Reael y que ni Reael, ni Ortensio comprenderán del todo, y mucho menos podrán construir, el *celatone*, la silla y el reloj y al final de la carta dice:

V.S. verá a partir de la carta del Sr. Reael que la mira principal de estos Estados en esta empresa es que ha de ser utilizada en la navegación, que son sus intereses primordiales, y que conceden poca estima al beneficio cierto que ha de alcanzar para la reforma de la geografía como cosa que consideran que no es importante para su comercio, habiéndome dicho lo mismo el Sr. Huygens ..., por mi parte considero que habiendo presupuesto S.S. que la invención de V.S. no puede ser puesta en uso en el mar, esa sea una de las principales causas de su tibieza.

En realidad, ni siquiera pudieron fabricar un buen telescopio, hasta el punto de que Galileo, en un último intento desesperado, propuso a Reael enviarle el suyo propio ante la desesperación de Diodati.²⁶

El planteamiento de Galileo era optimista incluso respecto a la construcción de las efemérides, pues las tablas de los satélites de Júpiter no estuvieron disponibles hasta que las elaboró Cassini en 1668. El método de los

adecuados para la colocación del telescopio. Y a fin de que el recipiente contenido esté siempre separado de la superficie del continente sin tocarla nunca, de modo que no pueda ser conmovido del modo en que el continente es conmovido por la agitación de la nave, quiero que en la superficie interna y cóncava del recipiente continente o bien en la convexa del contenido, se ajusten algunos muelles, en número de 8 o 10, los cuales impidan la aproximación de los dos recipientes, pero sin llegar a impedir que el interior deje de obedecer los levantamientos y abatimientos de los bordes del continente, y si en lugar de agua quisiéramos poner aceite, serviría mucho mejor y la cantidad no sería mucha, porque dos o tres barriles serían bastante” Sigue diciendo que puede hacerse la prueba con dos pequeños lavamanos de cobre, poniendo arena en el más pequeño y poniendo una aguja clavada en la arena; se verá que al inclinar el mayor, la aguja permanece siempre en la misma posición sin inclinarse. Carta de Galileo a Reael, Junio de 1637, *Opere*, XVII, págs. 97-98.

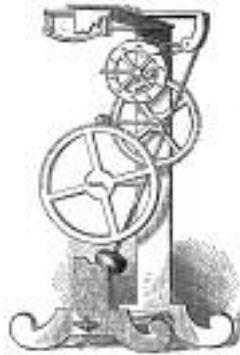
²⁶ Carta de Galileo a Reael, 22 de Agosto de 1637 y de Diodati a Galileo, 15 de Septiembre de 1637; *Opere*, XVII, p. 174 y 181.

satélites de Júpiter se utilizó entonces habitualmente para determinar la longitud en tierra. ¿Hubiera podido funcionar también en el mar, como pretendía Galileo? Según *Connoissance des Temps* de 1771, para llevar a cabo las observaciones eran necesarios un reloj de péndulo, un telescopio simple de 15 a 18 pies y un cuadrante de madera. Además, según las instrucciones de Cassini a los integrantes de la expedición a Cabo Verde de 1681:

Las mejores observaciones para determinar la longitud son las inmersiones y emersiones del primer satélite en o desde su sombra. Antes de la inmersión total se le ve disminuir poco a poco. Si es posible, se deben contar los segundos que pasan desde el momento en que se le empieza a ver disminuir claramente hasta que desaparece por completo. En el instante en que desaparece se debe empezar a contar de nuevo y si resulta que después de haber empezado a contar vuelve a aparecer, lo que ocurre a veces, se debe volver a comenzar a contar cuando deja de aparecer. Y cuando se está seguro de que ya no aparece se continúa contando hasta ver que el reloj está marcando los segundos. Después se le resta lo que se ha contado desde la última vez que el satélite desapareció y eso es lo principal que debe anotarse.²⁷

Si el proceso es tan complicado en tierra, ni el *celatone*, ni la silla flotante, ni el medidor de tiempo hubieran servido en alta mar. Por eso, del intento galileano de determinar la longitud en el mar sólo cabe decir el verso de Góngora:

Sombras suele vestir de bulto bello.



²⁷ A. Van Helden, "Longitude and the Satellites of Jupiter", en Andrewes, W.H.J., *The Quest for Longitude*, Cambridge, Mass., Harvard U.P., 1996, p. 95-96.