

ASPECTOS GEODESICOS Y CARTOGRAFICOS DURANTE EL SIGLO XVII Y LA PRIMERA MITAD DEL XVIII

Rafael Ferrer Torío, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

La cartografía es una herramienta imprescindible para la Ingeniería Civil. Casi todas las grandes actuaciones se inician sobre un mapa o plano.

Representar la superficie de la Tierra sobre un plano, ha dado lugar al nacimiento de la Ingeniería Cartográfica que ha estado presente desde el florecimiento de las antiguas civilizaciones.

En el presente artículo se destaca la gran revolución en las Ciencias Cartográficas durante el siglo XVII y parte del XVIII donde se hizo el diseño de una cartografía basada en mediciones geométricas sobre una superficie que, por vez primera se probó científicamente, era muy aproximada a un elipsoide de revolución.

1. El despertar de un siglo repleto de expectativas

1.1. Renovación en Astronomía y Geodesia

El siglo XVII fue una época de renovación en Astronomía y Geodesia, planteando unos objetivos que hasta ese momento no se habían podido establecer. De las observaciones acumuladas por los astrónomos anteriores se obtuvieron formulaciones de leyes, de asombrosa simplicidad, que catapultaron a la ciencia moderna. Por una parte las leyes de confirmación, y por otra la nueva instrumentación, permiten el descubrimiento de aspectos insospechados del Universo, confirmando y completando audaces predicciones de Copérnico (1472-1543).

Tras la observación viene la medida y se determinan cuantificaciones que fomentan el constante perfeccionamiento instrumental, elemento fundamental para la exactitud de las determinacio-

El siglo XVII fue una época de renovación en Astronomía y Geodesia, planteando unos objetivos que hasta ese momento no se habían podido establecer.

nes. Por primera vez se acometerán serias labores de medidas para llegar a un conocimiento más real de la superficie terrestre lo que permite plasmar sobre un mapa la realidad medida.

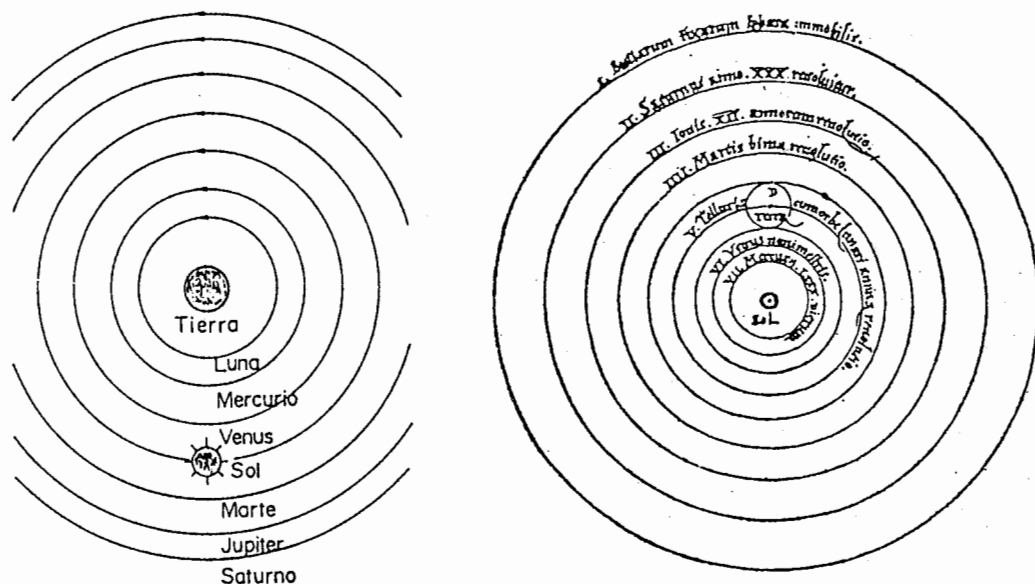
Al mismo tiempo que Kepler (1571-1630) extendía sus descubrimientos (leyes del movimiento planetario...) un modesto fabricante de lentes de Middleburgo, construía el anteojo. Difundida la noticia por Europa, halla en Galileo (1564-1642) el perfeccionador del nuevo instrumento, tras analizar las combinaciones, de forma adecuada, entre lentes convexas y cóncavas. De esta forma se inicia la campaña de observación que irá completando el equipamiento constitutivo del anteojo astronómico, que fue proporcionando descubrimientos tan relevantes como las manchas del sol, la observación de la primera nebulosa, las fases del planeta Venus y la determinación y estudio de otros muchos fenómenos importantes de la física celeste.

1.2. Etapa de transición cartográfica

La evolución de la cartografía se dejó sentir a principios del siglo XVII en Francia y otros países. En Francia, la familia Sanson realizó una amplia

* Profesor Titular de Universidad de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Cantabria.

Fig. 1. Cambio en el modelo conceptual del universo.



gama de mapas y atlas de clara finalidad geográfica, aunque también confeccionaron otros de carácter histórico. Los mapas de esta casa tienen toques similares a los holandeses aunque son más científicos, abundando las notas descriptivas y aclaraciones informativas.

Nicolás Sanson (1600-1667) finalizó en 1643 un mapa de Francia de treinta hojas.

También en Inglaterra se dio un fuerte impulso a la cartografía a partir de los trabajos realizados por Cristóbal Saxton. Pero la producción de mapas holandeses continúa, creándose una serie de empresas editoriales. Destaca la de Willem Janszoon Blaeu, cuya obra más significativa es el No-

vus Atlas, dividida en seis tomos, con 400 mapas. También son interesantes las obras de Frederik De Wit; gracias a todas estas publicaciones alcanzó la cartografía holandesa unas cotas de calidad cuyo rasgo más representativo es el valor decorativo de la cartografía, con el concurso de los dibujos alegóricos y adornos bordeando los márgenes. Hacia 1635 publicó De Wit el primer plano conocido de Madrid. Con anterioridad, Joao Bautista de Lavanha, hizo un mapa de Aragón en 1615 y Pedro Sierra en 1620 hace un mapa de Galicia y de varias regiones más.

Fig. 2. La antigua Galia. Mapa de Nicolás Sanson.



2. Avance significativo de la instrumentación

Al cumplirse el primer tercio del siglo XVII se intenta aplicar el anteojo a los instrumentos graduados existentes con el fin de dotar de gran precisión a las determinaciones astronómicas. Tras infructuosos intentos se ejecutan varias series de observaciones astronómicas con ayuda del micrómetro, obteniendo buenos resultados, al mismo tiempo que era perfeccionado el retículo del instrumento; estaba éste formado por una malla cuadrada de finos hilos de plata, cuyas distancias aparentes evaluaba, sirviendo a la vez de referencia en las observaciones angulares y de micrómetro en las mediciones de pequeñas distancias.

Al inicio del segundo tercio el micrómetro ya se componía de varios hilos paralelos y uno transversal, fijos y de otro movable por medio de un tornillo (micrométrico), aunque el estado de las técnicas mecanizadas de la época hizo desviar el primitivo funcionamiento hacia otros sistemas, dado que la igualdad de los pasos de rosca no estaba perfeccionada. Los cuadrantes y restantes sectores de círculo, dotados de anteojos astronómicos con micrómetro, graduados cada vez con mayor exactitud, ofrecían a los astrónomos

potentes herramientas de trabajo para lograr exactas determinaciones. Un último avance, en el siglo, fue el logro de instalar tornillos de coincidencia y arcos supletorios, convenientemente graduados, para apreciar fracciones de arco.

Fue a mediados del siglo XVII cuando comenzaron a utilizarse los aparatos físicos destinados al análisis de la atmósfera, en la mayor parte de los casos para corregir o aproximar más la medición obtenida por la observación astronómica. El termómetro, usado ya en 1641 en Italia, el barómetro, descubierto por Torricelli en 1644 y el higrometro, configuraron elementos de apoyo imprescindibles en el arte de la buena observación. También destacan los descubrimientos en el campo de la medición del tiempo. La relojería debe su progreso a la aplicación que hizo Huyghens (1629-1695) en 1656 del péndulo a los relojes. El péndulo ya había sido aplicado por Galileo para medir intervalos de tiempo, y supuso un perfeccionamiento notable. En 1665, Huyghens incorpora el muelle espiral a los relojes. El mismo astrónomo, estudiando la doble refracción de la luz en un cristal, descubrió trece años más tarde la polarización, abriendo brecha en el amplio pasillo que conduce a los oscuros fenómenos de la astronomía física.

3. Las dimensiones de la Tierra

También a mediados del siglo XVII se suscita la polémica de determinar la forma y dimensiones de la Tierra. Un simple razonamiento teórico de Newton, trajo como consecuencia el establecimiento del equilibrio relativo de una masa homogénea en rotación uniforme. A partir de aquí surgió la controversia de las dos diferentes tipologías de tratamiento: fundamento físico o fundamento geométrico para determinar la forma de la Tierra.

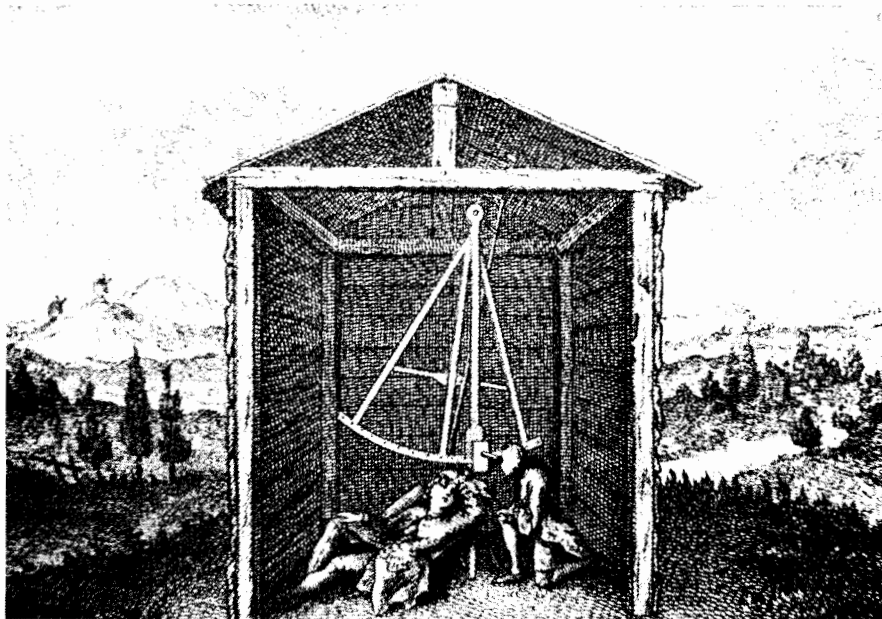
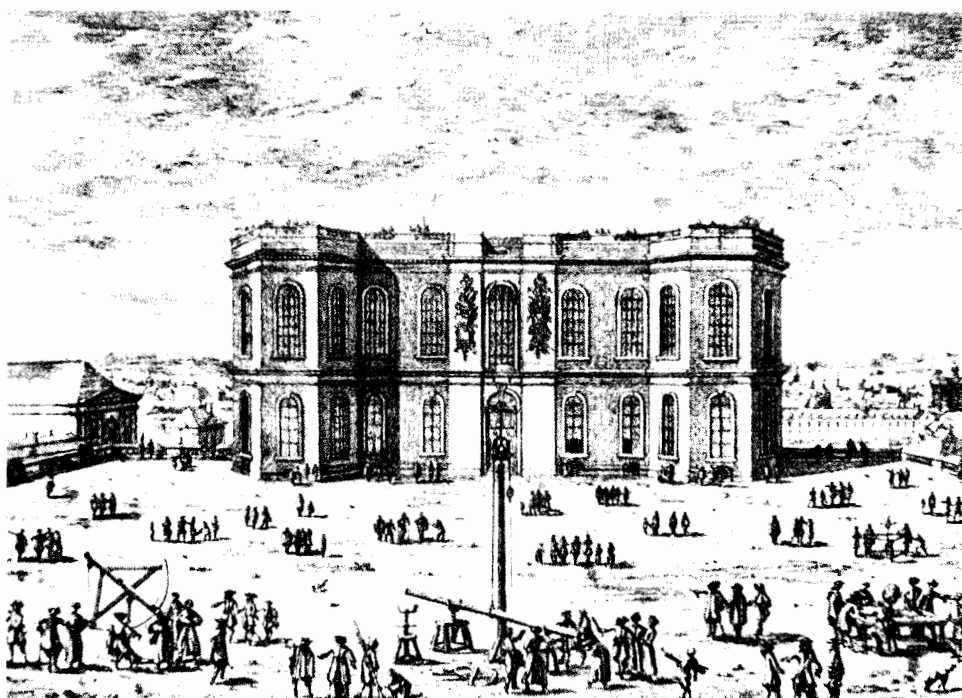


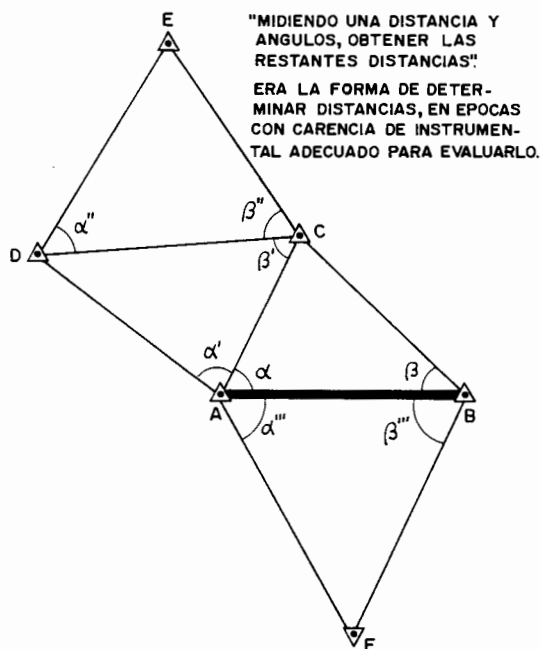
Fig. 3. Observación a los astros.

En 1666 se crea en París la Academia de Ciencias, auténtico foco de saber astronómico y geodésico que hace tomar hegemonía a Francia, en estas técnicas en apogeo. Seis años más tarde, se funda el observatorio de París y tres años después el de Greenwich; por esta época se completan campañas de observación y cálculo con el objetivo de evaluar las dimensiones y establecer la forma de la Tierra, a partir de determinaciones astronómicas y terrestres.

Picard (1620-1683) realiza en 1670, por iniciativa de la Academia de Ciencias, una medición del arco de meridiano de París, utilizando un telescopio con hilos reticulares y apoyado en una trian-

Fig. 4. La Academia de Ciencias y el observatorio de París.





"MIDIENDO UNA DISTANCIA Y
ANGULOS, OBTENER LAS
RESTANTES DISTANCIAS".
ERA LA FORMA DE DETER-
MINAR DISTANCIAS, EN EPOCAS
CON CARENCIA DE INSTRUMEN-
TAL ADECUADO PARA EVALUARLO.

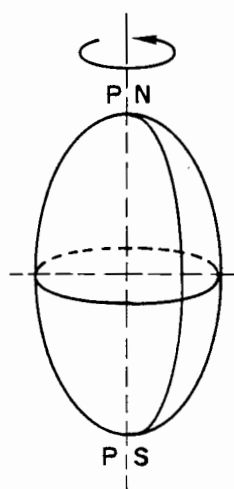
MIDIENDO LA DISTANCIA AB Y CALCULANDO LOS
ANGULOS α Y β SE DETERMINA LA POSICION DE
C. Y POR TANTO LAS DISTANCIAS AC Y BC.
POR NUEVAS OBSERVACIONES ANGULARES α' β'
SE OBTIENE D Y POR LO TANTO LAS DISTANCIAS
AD Y CD Y ASI SUCESIVAMENTE: ($\alpha''\beta''$), ($\alpha'''\beta'''$)....

Fig. 5. Objetivo de la triangulación.

A la derecha, fig. 6. la guerra de los elipsoides de revolución.

gulación. Obtiene un valor del radio de la esfera terrestre con un error de 0,01 %, y permite que Newton verifique la ley de gravitación universal que había formulado con anterioridad. Años después se prolongó la medición para extenderlo desde La Mancha hasta el Mediterráneo. También por esa época Richer observó en una expedición realizada a Cayena, que debían acortar la longitud del péndulo, previamente ajustado en París, para que batiese segundos, obteniendo la conclusión de la existencia de un incremento del valor de la gravedad en los polos respecto al ecuador.

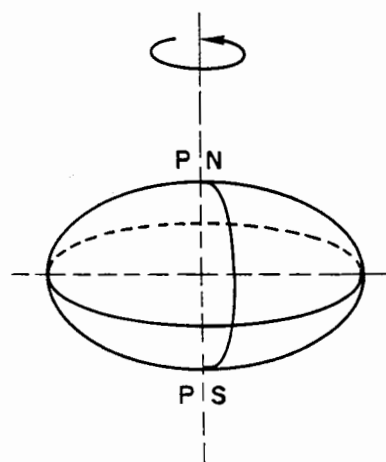
Newton (1643-1727) y Huyghens, basándose en los trabajos de Richer y en los suyos propios, desarrollaron modelos terrestres, basados en fundamentos físicos, con los polos achatados. De esta forma, Newton en 1687, en consecuencia con su ley de gravitación universal, obtiene un elipsoide de revolución como la figura de equilibrio, para una tierra homogénea, fluida y sometida a la rotación. A partir de esa afirmación aparecen dos grandes escuelas portadoras de un elipsoide de revolución, pero con dos configuraciones bien diferenciadas. La inglesa de Newton, defendiendo el modelo naranja, es decir, la figura elipsoide achatada por los polos, y la francesa de Jacques Cassini (1677-1756), que propugna por un elipsoide achatado por el ecuador. Llegó a este convencimiento al prolongar el arco de Picard y obtener un achatamiento negativo de la figura de la Tierra. A partir de este momento ya es aceptada una forma de Tierra no esférica, pero había diferencias en cuanto a la interpretación de su



MODELO JACQUES CASSINI

LIMON

ESCUELA FRANCESA



MODELO NEWTON

NARANJA

ESCUELA INGLESA

"VERDADERA PUGNA ENTRE CIENTIFICOS DE LA EPOCA"

configuración. La defensa de uno u otro modelo originó una verdadera pugna entre los científicos de la época de ambas escuelas.

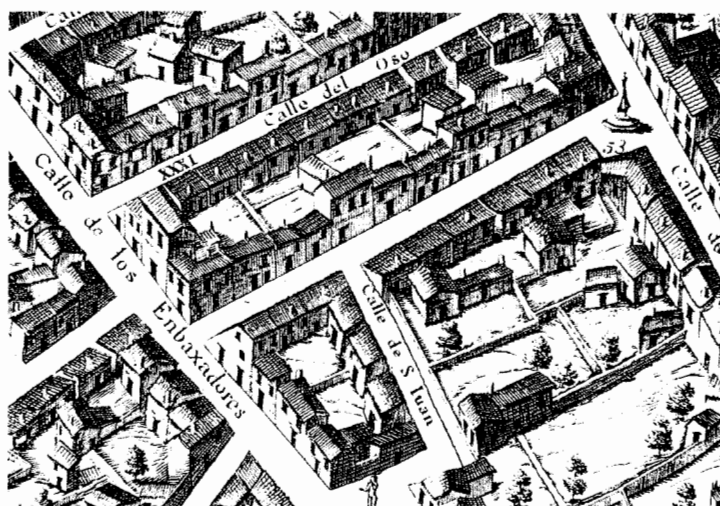
4. Cambios metodológicos e instrumentales

4.1. Nuevos esquemas cartográficos

Mientras, la cartografía tradicional continuaba su remodelación hacia una expresión más académica, fundamentada en mediciones cada vez más exactas. En el último tercio del siglo XVII se extendió el uso de los mapas ingleses, destacando el trabajo publicado en 1683 por Halley (1656-1742), consistente en una carta magnética. También destacan en esa época, los globos terráneos de hasta cinco metros de diámetro, contruidos por el cartógrafo Vicente Coronelli.

En España hay que destacar el plano de Madrid realizado por Pedro Texeira en 1656 y el mapa general de España realizado por Francisco Ferrer en 1696.

La cartografía francesa de los siglos XVII y XVIII está ligada al apellido Cassini. La familia Cassini había llegado a Francia con la creación de la Academia de Ciencias, siendo Jean-Dominique Cassini (1625-1712), traído por Colbert desde Italia, como el primer director del observatorio de París, a quien se encomendó la configuración del mapa del país, que se publicó en 1693, rectificando la anterior cartografía, en sentido desfavorable para



las extensiones territoriales francesas. Luis XIV, el Rey Sol, reprochaba a Cassini, diciendo que había hecho perder más territorio a Francia con sus precisas mediciones que el obtenido por sus generales en las conquistas. Su hijo Jacques, director del observatorio a la muerte de su padre, encabezó la pugna, por parte de la tendencia francesa, al mismo tiempo que eran descubiertos los fenómenos de aberración y comprobados los movimientos de nutación por Bradley (1693-1762), que fue nombrado director del observatorio de Greenwich a la muerte de Halley.

Con la llegada del siglo XVIII se incrementa el rigor científico, fomentado por el perfeccionamiento de los medios técnicos a disposición del navegante, cartógrafo y astrónomo. La puesta a punto de los instrumentos permitió determinar latitudes y longitudes y calcular altitudes con una gran exactitud. Con las buenas determinaciones, la representación cartográfica era más perfecta. A esta tendencia se orientó la escuela de los cartógrafos franceses, imponiendo el rigor a otras consideraciones. Mientras la escuela holandesa seguía ejecutando mapas con clara orientación comercial, primando la rapidez de publicación al rigor en la medición. Importaba más la buena presentación que la fidelidad de los datos plasmados en las hojas, resultando un negocio completo dada la ausencia de gastos en la toma de datos. Las planchas eran reutilizadas y la copia de mapas existentes fue un objetivo para muchos.

4.2. Nuevos avances en las técnicas instrumentales

La medición del tiempo reclamaba de la física un medio de evitar las continuas variaciones que experimentaban los relojes por los cambios de temperatura. En 1721 se produjo la compensación, alcanzando poco a poco una mejora significativa, incorporando el volante circular compensado y el muelle espiral isócrono, que constituyeron los elementos básicos para el logro de una admirable regularidad en los relojes, no sólo para usos en tierra sino también en el mar, puesto que en el primer cuarto del siglo XVIII, los relojes mecánicos adquirieron el suficiente grado de exactitud y portabilidad como para posibilitar el uso a

bordo. Para entonces el navegante disponía de métodos de gran exactitud para determinar la hora local. Todos los cálculos se fundamentan en el cálculo trigonométrico que se había simplificado en gran manera tras la puesta en uso de los logaritmos.

La nueva cartografía utilizaba nuevos instrumentos. Por esta época se perfeccionan los instrumentos para medir, desde una embarcación,

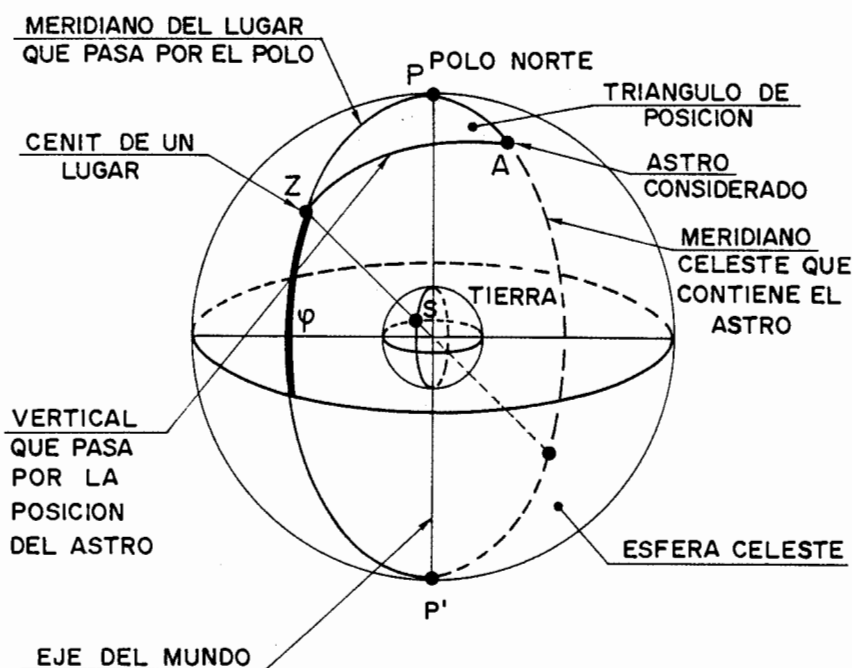
Fig. 7. Mapa de declinaciones magnéticas de Halley (1702).

A la derecha.
Fig. 8. Fragmento del plano de Madrid, de Texeira (1656).

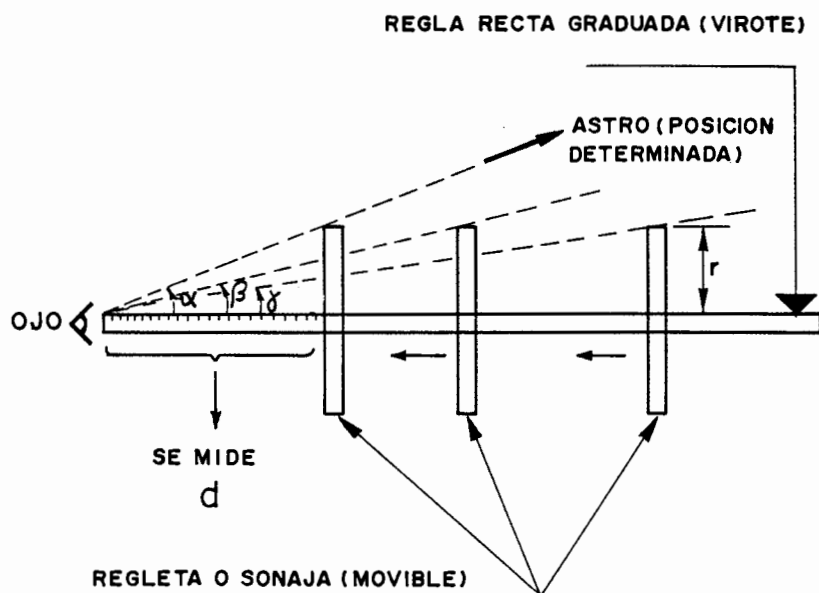
Abajo, fig. 9. Triángulo de posición.

Es el triángulo PAZ configurado por tres vértices:

POLO CELESTE, ASTRO Y CENIT



INSTRUMENTO PARA CALCULAR EL ANGULO DE ELEVACION DE UN ASTRO BALLESTILLA: La vara de Jacob



PARA UNA POSICION DEL ASTRO SE MUEVE LA SONAJA HASTA LA UBICACION CORRECTA.
EN ESA SITUACION SE MIDE LA LONGITUD d. COMO r ES CONOCIDA :

$$\text{tg } \alpha = \frac{r}{d} \rightarrow \alpha = \text{arc tg. } \frac{r}{d}$$

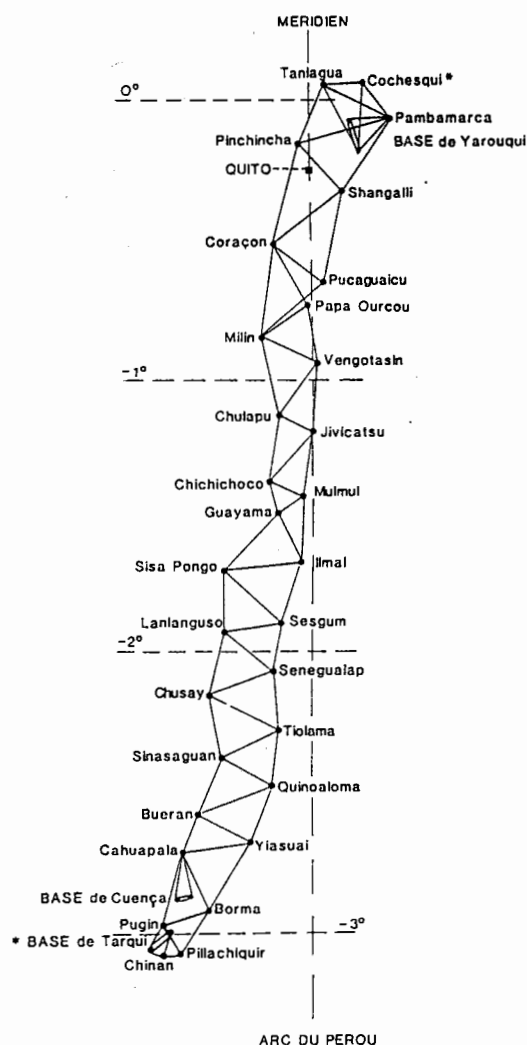
Fig. 10. Fundamento de la ballestilla.

A la derecha, fig. 11. Medición del arco de meridiano de Perú.

los ángulos necesarios para resolver el triángulo de posición y caracterizar la posición por observación a los astros.

Mientras que las observaciones en tierra eran sencillas, al efectuar las observaciones sobre una cubierta inestable, aparecían dificultades que no fueron completamente resueltas hasta la puesta a punto del cuadrante de reflexión de Hadley. Hasta entonces se habían empleado astrolabios, ballestillas, kamales y cuadrantes.

Es de destacar el cuadrante de Davis, una de cuyas variantes tiene la enorme ventaja de efectuar las observaciones al Sol, aprovechando su sombra, es decir, de espaldas al mismo, en lugar de su observación directa, obteniendo una precisión mayor. Tanto el cuadrante de Davis, limitado al Sol, como todos los demás instrumentos de observación fueron desplazados por el instrumento de reflexión, conocido como cuadrante de Hadley. El instrumento tiene una gran similitud con los

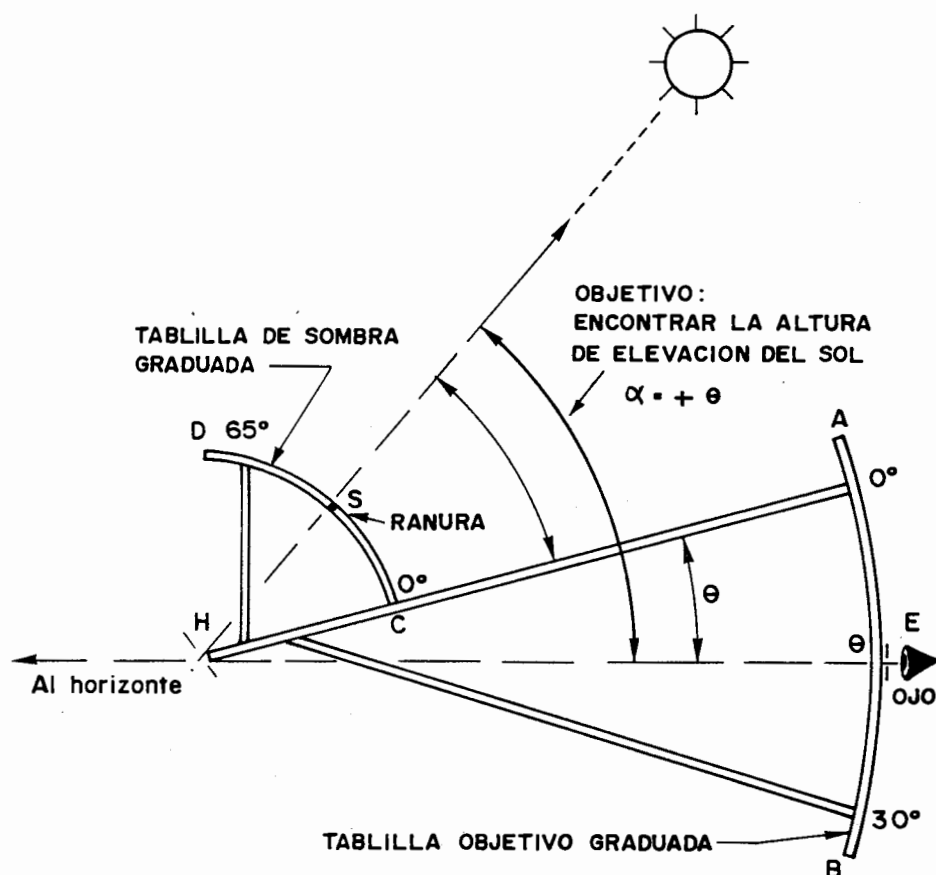


instrumentos actules y tuvo la aceptación unánime de los navegantes. Siendo en realidad un octante, debido a su constitución óptica que se funda en recorrer el limbo sobre la alidada un ángulo de 45°, facultando al aparato para medir ángulos de hasta 90°, circunstancia a la que debe su denominación de cuadrante.

5. El fin de un gran enigma

Continuando la polémica de la configuración de la Tierra, la Academia de Ciencias de París nombró en 1735 una comisión encargada de medir un arco de meridiano en el ecuador, al sur de Quito (expedición de Perú) y un arco de meridiano en las cercanías del círculo polar (expedición de Laponia). La primera fue dirigida por Louis Godin, Bouguer y La Condamine participando muy notablemente en los trabajos geodésicos Jorge Juan

Fig. 12. Cuadrante de Davis.



y Antonio de Ulloa ya que al ser territorio perteneciente al virreinato de Perú, de la corona española, Felipe V impuso la presencia de los dos marinos hispanos. La medición, repleta de dificultades, duró casi diez años y en ella se trianguló un arco de meridiano de más de tres grados, realizando profundos estudios sobre la constitución física de la atmósfera, que demostraron la necesidad de introducir los datos de presión y temperatura para realizar las oportunas correcciones de refracción. El astrónomo Bouguer puso operativo al regreso de la aventura (1748) el heliómetro de dos objetivos, cuyo prototipo, mejorado por Savery, fue muy empleado por Bessel en sus destacados trabajos sobre el paralaje de las estrellas.

La expedición de Laponia fue dirigida por Maupertuis y duró tan solo un año. Acompañaban a la misma Clairaut (1713-1765) y Celsius, que en 1742 propuso la escala de temperaturas que lleva su nombre. Clairaut en su obra «Teoría de la figura de la Tierra» define el valor del achatamiento a partir de mediciones de la gravedad, en lugares de diferente latitud geográfica, introduciendo el método gravimétrico o geodesia física. La aplicación práctica de su teoría no pudo llevarse a cabo con cierta calidad hasta tiempos actuales debido a la carencia de instrumental adecuado para hacer medidas precisas del valor de la gravedad. El resultado final de ambas expediciones confirmó el modelo de Tierra de Newton, lo que dio pie a Voltaire para afirmar que la expedición había aplastado los polos y a Cassini.

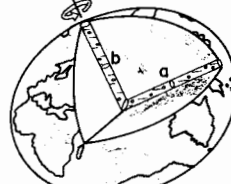
FIGURA APROXIMADA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

MODELO LIMON

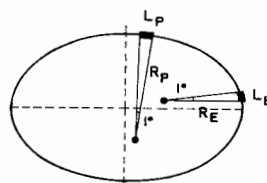


$a < b$

MODELO NARANJA



$a > b$



CLAVE DE LOS RESULTADOS

El radio de curvatura es mayor en el polo que en el ecuador

$$R_P > R_E$$

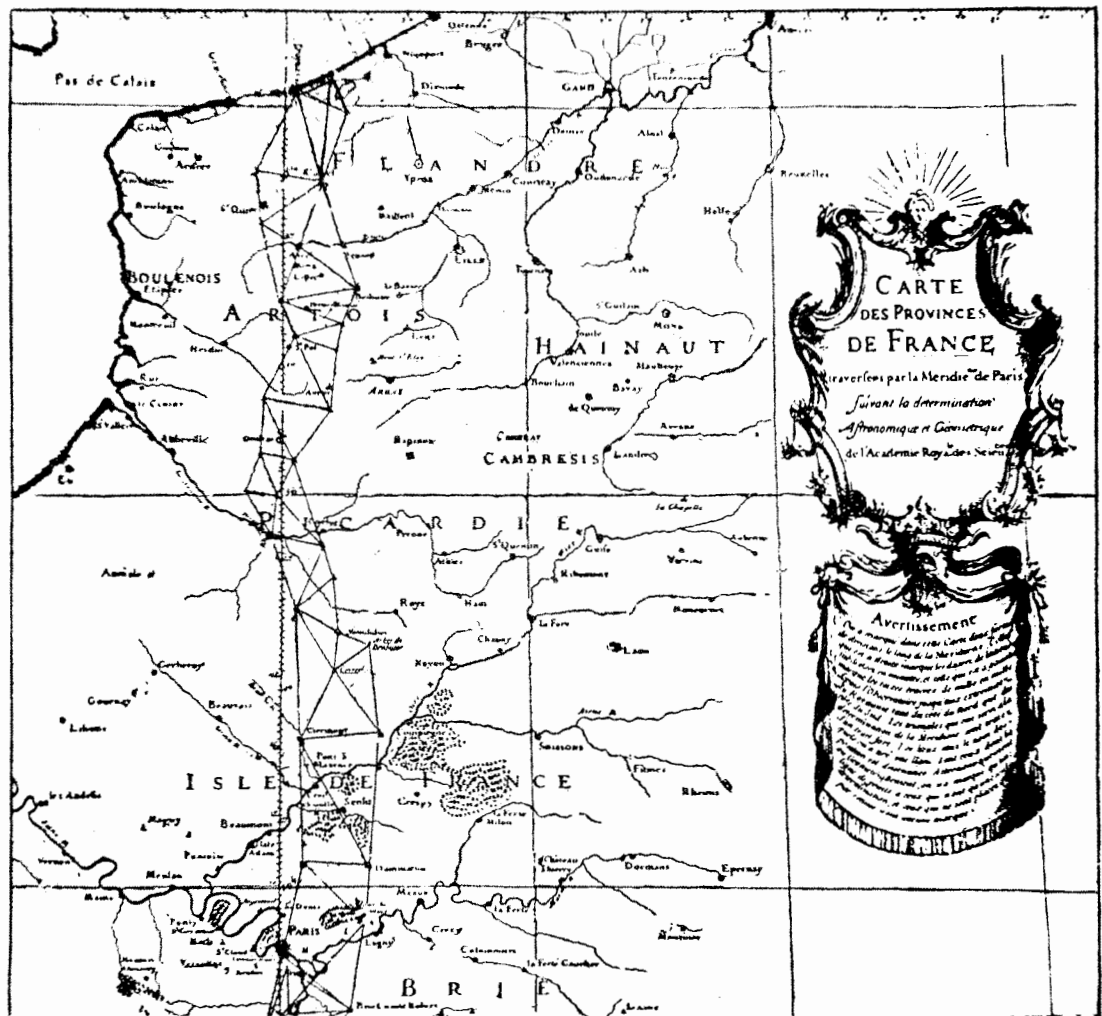
Para una misma medida angular tiene que resultar:

$$L_P > L_E$$

Esta es la comprobación que se realizó en Perú y Laponia

Fig. 13. Triunfo de la expedición del Perú.

Fig. 14. Primera triangulación de Francia, por Cassini, en 1744.



6. La cartografía geométrica

La cartografía se aprovechó de los logros de la geodesia, aunque progresó más lentamente. Desde entonces, los mapas de detalle se apoyaron en observaciones astronómicas serias y en triangulaciones cada vez más densas.

Hasta la segunda mitad del siglo XVIII no se inició el primer gran mapa geométrico de un país, utilizando una metodología sistemática.

La Carta de Cassini, confeccionada a escala 1/86.400 es el ejemplo más ilustrativo por su temprano inicio, y su apoyo en la red triangulada con anterioridad. Ya en 1740 la malla estaba constituida por 400 triángulos y sirvió de soporte para confeccionar un mapa a escala 1/870.000 de Francia con un total de 18 hojas. El mapa geométrico de Francia, en cuya confección participaron tres Cassini (Jacques, César François y Jacques Dominique) había completado en 1789, 165 hojas.

Las últimas hojas del mapa se entregaron en 1793 y representan la culminación de un proyecto de medida y descripción exacta de un territorio: fue ejemplo y referencia obligada para el resto de los mapas topográficos nacionales. ■

Bibliografía consultada

1. *Enciclopedia Diderot y D'Alambert*. Gráficos y comentarios presentados por Jacques Proust.
2. *Historia general de las ciencias*. René Taton. Ediciones Destino. Barcelona.
3. *Cartografía*. Erwin Raisz. Ediciones Omega. 1965.
4. *Geodesia*. Wolfgang Torge. Ediciones Diana. 1968.
5. *Enigmas seculares del cielo*. A. Gursthein.
6. *Geodesia y cartografía matemática*. Fernando Martín Asín. Editorial Paraninfo. 1983.
7. *Historia del telescopio*. Isaac Asimov. Alianza Editorial. 1986.
8. *Lectura de mapas*. F. Vázquez Maure y J. Martín López. Instituto Geográfico Nacional. 1987.
9. *Fotointerpretación*. F. Vázquez Maure y J. Martín López. Instituto Geográfico Nacional. 1987.
10. *Astronomía de posición*. R. Ferrer Torío y B. Piña Patón. Servicio de Publicaciones. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1987.
11. *Mesurer la Terre*. J. J. Levallois. Presses de D'Ecole National des Ponts et Chaussées.
12. *Metodologías topográficas*. R. Ferrer Torío y B. Piña Patón. Servicio de Publicaciones. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1991.
13. *Instrumentos topográficos*. R. Ferrer Torío y B. Piña Patón. Servicio de Publicaciones. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1991.