

# Historia de la Geodesia

Desde los orígenes al final del Imperio Romano.

E. Calero  
Madrid  
2003  
Versión 1.0 12-3-2003.

## 1 Introducción.

Desde el momento que el hombre evoluciona a una criatura pensante ha mostrado su interés por la Tierra. Los fenómenos naturales que le rodean condicionan su comportamiento y la necesidad de comprenderlos ha dado lugar, en una primera época, a las más variadas supersticiones, mitos, ritos y cultos. Es sorprendente el grado de conocimiento alcanzado sobre determinados fenómenos naturales en culturas muy antiguas y cuyas evidencias para nosotros proceden del estudio de los monumentos que nos han legado ( Stonehenge en Wiltshire, sur de Inglaterra, la Gran Pirámide de Egipto, templos y ciudades Indias de América Central, etc). La mayoría de estos fenómenos están relacionados con la Tierra, el Sol. La Luna no pudiéndose separar, en esta primera etapa de la historia, la Geodesia de la Astronomía.

De las civilizaciones más antiguas poca documentación ha pervivido, no obstante, quedan indicios de que en Sumeria, Egipto, China y la India se hicieron observaciones precisas, aunque no se alcanzó un conocimiento profundo, si se adquirieron nociones básicas sobre los movimientos de la Tierra en el espacio.

La primera documentación sobre determinados conceptos es de origen griego, se trata más de noticias que de documentos datables, y se presentarán utilizando la terminología actual, lo que supone una reelaboración de las fuentes originales.

Se establecen cuatro periodos:

1. Desde los orígenes al final del Imperio Romano.
2. Edad Media, Renacimiento hasta la primera mitad del siglo XVIII.
3. Desde Clairaut hasta el comienzo de la Era espacial (1957)
4. La Era espacial

## 2 Desde los orígenes al final del Imperio Romano

### 2.1 Babilonia - Asiría

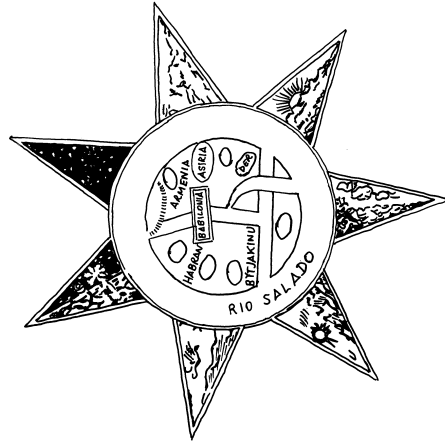
La Tierra es un disco plano que flota en el océano y en cuyo centro se encuentra Babilonia. A esta concepción corresponde el único mapa del mundo que se conoce de esta época. Fue dibujado por un escriba en la parte inferior de una tablilla de arcilla. Los otros mapas babilónicos son de carácter local y reproducen ciudades, barrios, canales o construcciones.



Los instrumentos de observación son el gnomon, la clepsidra y el polos:

El gnomon consiste en una varilla clavada verticalmente y cuya sombra se observa. La sombra más corta corresponde al mediodía (Sol en el punto más alto del horizonte). De las sombras del mediodía la más corta del año se corresponde con el solsticio de verano y la más larga con el de invierno.

Con tan sencillo instrumento puede establecerse un calendario preciso en el que puede fijarse el comienzo exacto de las estaciones. Además de un reloj solar que permite establecer las divisiones del día.



RECONSTRUCCION DEL MAPA MUNDI BABILONICO  
(500 A.C.). BIBLIOTECA DEL CONGRESO U.S.A. ADAPTADO POR  
EL AUTOR.

La clepsidra es uno de los primeros relojes basados en un principio físico sin base astronómica, utilizados por las noches y durante los días nublados. Consiste en un recipiente cilíndrico graduado en el que cae agua de un depósito. Su uso se extendió por todos los pueblos de la antigüedad. Los romanos añadieron flotadores que movían engranajes solidarios con agujas que mostraban las horas en un cuadrante. Se utilizó hasta el siglo XVII.

El polos es un instrumento específicamente mesopotámico, constituido por una semiesfera de gran diámetro cuya concavidad se orientaba hacia el Sol. Suspendida en el centro de la esfera hay una pequeña bolita que proyecta sus sombra sobre la superficie interna de la semiesfera. El movimiento aparente del Sol se dibuja así en el fondo del polos. Puede leerse directamente la inclinación de la eclíptica, las fechas de los equinoccios, los solsticios, etc...

El polos sería luego perfeccionado por los griegos. En lugar de una semiesfera utilizarían una estructura esférica formada por una banda central, el zodíaco, y círculos de alambre o madera perpendiculares al zodíaco. El resultado es la armilla o esfera armilar que permite la determinación de las posiciones de los astros por comparación directa.

## 2.2 Egipto

Desde las campañas napoleónicas en Egipto se conoce la extraordinaria precisión en la orientación de las caras de algunas pirámides respecto de los puntos cardinales (cardinal procede del nombre que los agrimensores romanos daban a los ejes de sus levantamientos: cardo y decumanus). Las desviaciones son inferiores al grado.

Gran Pirámide de Keops y Pirámide de Kefren	2' 28"
Micerino	9' 12"
Romboidal	24' 25"
Médium	12' 3"

Aunque se dan los valores en segundos, a ojo desnudo, un buen observador no puede apreciar más allá de minuto de arco. Si se tienen en cuenta las dimensiones de esos monumentos los errores resultan despreciables. Hay que admitir que los constructores de estas pirámides disponían de un procedimiento eficaz para la determinación de la meridiana. "No todos los monumentos egipcios están tan rigurosamente orientados como las pirámides de Gizé. Muchos templos y pirámides están orientados con relación al Nilo, existen indicios racionales de que existía la creencia que el Nilo transcurría siempre de sur a norte. ¡ A pesar de los meandros!". (R. Taton .Historia General de las Ciencias.

Todas las especulaciones hechas en torno a las cifras de la Gran Pirámide son puro infantilismo. Hay en Valle del Nilo, desde el delta hasta Sudán, más de 150 pirámides y ninguna presenta una orientación perfecta como las ya citadas. ¿Sólo la de Keops iba a darnos el verdadero valor de  $\pi$ , la dimensión del radio terrestre y la medida exacta del meridiano terrestre?. Véase el trabajo: Adventures in Ancient Egyptian Geodesy by Keith P. Johnson. 1999.

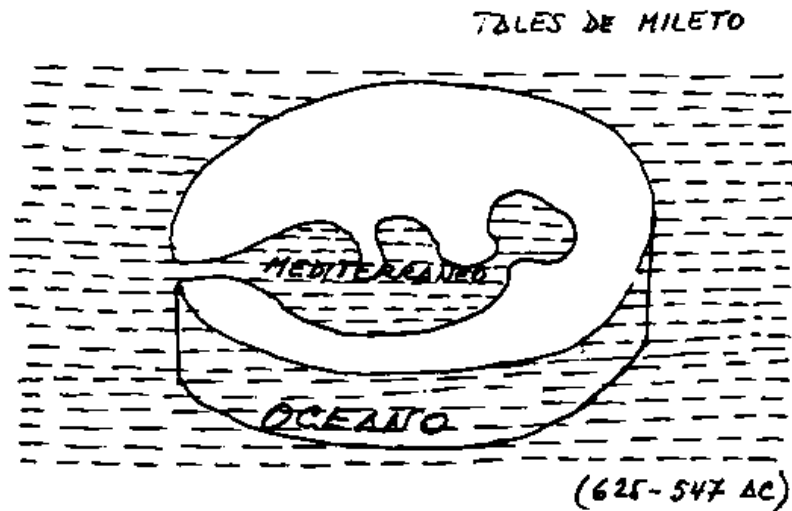
## 2.3 Grecia.

### 2.3.1 La Tierra plana.

En los poemas homéricos (s IX AC) se habla de una Tierra plana.

Tales de Mileto (625 - 547 AC). La Tierra es una especie de disco flotando en un océano infinito, el Mediterráneo ocupa el centro del disco y se comunica con el océano circundante por el estrecho de Gibraltar. Aseguró que la Luna recibe su luz del Sol y que se encuentra próxima a la Tierra. Se le atribuye la predicción de un eclipse que coincidió con el final de la guerra entre Medos y Lidios (585 AC).

Anaximandro de Mileto (611 - 545 AC) La Tierra es un disco cilíndrico cuyo eje está orientado de Esta a Oeste. Hay otros que le atribuyen que es esférica



o al menos una superficie curva. Introdujo la idea de la esfera celeste que aún continua utilizándose en Astronomía de Posición.

La Tierra está en el centro de la esfera celeste. Estando en el centro no necesita soporte debido a que equidista de todos los puntos. La relación entre el radio y la altura del cilindro es de 3 a 1. Sobre la superficie cilíndrica se extiende un inmenso océano donde hay dos grandes bloques Europa y Asia. El eje del cilindro está inclinado respecto a la trayectoria del Sol.

Anaximenes, discípulo de Anaximandro, mantiene la idea de Tales del disco y el océano circundante, pero sostenido por una capa de aire comprimido que no escapa debido a las grandes dimensiones del disco.

### 2.3.2 La era esférica.

**Desde el siglo VI AC a la Fundación del Observatorio de Alejandría.**

El razonamiento de Pitágoras y su escuela (s. VI AC) es que siendo el Sol y la Luna esféricos, la Tierra también lo es. Se le atribuyen razonamientos del tipo: La esfera y el número diez son perfectos, un mundo perfecto consistirá

en diez planetas de forma esférica. Hay quien afirma que fue el primero en sugerir que la Tierra gira alrededor del Sol.

Filolao, que vivió en la centuria siguiente (450 AC) compiló los trabajos de los pitagóricos y sus escritos son casi la única fuente sobre ellos. Fue el primero en afirmar que el universo no era geocéntrico. El Sol y todos los otros cuerpos giran alrededor de un fuego central (Hestia). Explicó la sucesión de los días y las noches postulando la rotación terrestre.

Parménides (hacia 470 AC) afirma que la Tierra es un cuerpo esférico, aislado en el espacio en el que se sostiene ya que no hay ninguna razón para que caiga a uno u otro lado.

Platón (429 - 348 AC) admite que la Tierra es redonda, inmóvil en el centro del universo y de grandes dimensiones.

Por la considerable influencia que ha ejercido la cosmología griega hasta el siglo XVI, se imponen incluir unas notas en esta breve historia de la Geodesia. La pregunta fundamental que se hace la cosmología griega es la siguiente:

¿Qué movimientos regulares y ordenados hay que suponer para salvar las apariencias observadas en el movimiento de los planetas?

Por movimientos regulares y ordenados debe entenderse movimientos circulares y uniformes. Salvar las apariencias es tanto como explicar los movimientos observados.

El modelo desarrollado por Eudoxo de Cnido (368 AC), y ampliamente divulgado por Platón y Aristóteles, supone que cada planeta (astro errático, que no sigue el movimiento de rotación uniforme de la esfera celeste) es un globo arrastrado por una esfera diáfana que es su "cielo". Estas esferas están incluidas una en otras y la más alejada de la Tierra, que ocupa el centro, es la de las estrellas fijas. Esta representación perdurará durante muchos siglos y Copérnico solo cambiará al Sol por la Tierra como centro de los cielos. Muchas de las teorías cosmológicas estarán basadas más en visiones filosóficas del mundo que en datos de observación, a pesar de ello hay que tenerlas en cuenta por las repercusiones que han tenido a lo largo de la historia.

Teoría de las esferas homocéntricas.

- Los astros están adheridos a esferas concéntricas cuyo centro es el de la Tierra que permanece inmóvil.

- La esfera mayor es la de las estrellas fijas, que gira con movimiento uniforme alrededor del eje del mundo de Este a Oeste.

- Para explicar los movimientos aparentes del Sol, la Luna y los planetas se postula la existencia de cuantas esferas sean necesarias, estando el astro pegado a la esfera más interior, para explicar su movimiento. Así se necesitan tres esferas para la Luna, tres para el Sol y cuatro para cada uno de los cinco planetas entonces conocidos (Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno).

- En el caso de los planetas la esfera más exterior gira con movimiento uniforme alrededor del eje del mundo; la siguiente esfera, en orden de proximidad al centro, gira alrededor de un eje normal a la eclíptica. Las otras dos

esferas explican con su giro las aceleraciones y retrogradaciones del movimiento del planeta. Dicho en términos modernos, el movimiento del planeta queda explicado por la composición de cuatro movimientos uniformes de rotación.

- El sistema lunar comporta tres esferas. La primera (exterior) gira con las estrellas fijas de Oriente a Occidente. La segunda gira en sentido contrario de Oeste a Este con un período de 223 lunaciones. La tercera gira de E a O con un período de 27 días. La combinación de estos tres movimientos da una aproximación razonable a los movimientos de la Luna, explica el paso por los nodos (puntos de intersección con la eclíptica y permite una previsión razonable de los eclipses.

En el caso de los planetas los resultados no son tan satisfactorios como con la Luna. Ya en la misma época se propusieron correcciones por Calipo (335 AC) y por Autólico de Pitana( fines del siglo IV AC).

#### El Sistema del Mundo de Aristóteles ( 384 - 322 AC)

La Tierra ocupa el centro del Universo y está fija. A su alrededor se suceden las regiones del agua, del aire y del fuego. Este conjunto constituye el mundo sublunar. Más allá se extiende el éter incorruptible y las esferas celestes, la más próxima es la de la Luna y la más alejada la de las estrellas fijas. Fuera de esta última no existe nada, el UNIVERSO ES FINITO Y LIMITADO. Ofrece gran número de argumentos sobre la inmovilidad de la Tierra. Uno de ellos, que aún se discutía en el Renacimiento, es relativo a la caída de los graves: si se lanza un objeto verticalmente y la Tierra se moviese caería en un lugar diferente. La experiencia da la razón a Aristóteles. Habrá que esperar a la introducción del concepto de inercia para refutar este argumento. Es el primero en considerar, junto con la explicación matemática, la explicación física de las observaciones: no hay espacio vacío. Esto le obliga a introducir un conjunto de esferas compesatorias que garanticen la independencia de las esferas de Eudoxo. El número de esferas asciende ya a 56, jen espera de la contribución de Ptolomeo, ya en el período alejandrinoj. Como la última esfera es un cuerpo material. Introduce el concepto del primer motor inmóvil. Las aguas adoptan la forma esférica si la esfera es el centro del universo, las tierras emergidas no la adoptan debido a su rigidez, pero tienden a ella.

Afirma la forma esférica por la sombra de la Tierra sobre la Luna durante los eclipses y por la aparición y desaparición de constelaciones cuando se marcha de norte a sur o viceversa . Estima que la circunferencia de la Tierra mide 400.000 estadios (la longitud de un estadio griego varia entre 154 y 215 metros según la época y la zona geográfica); dada la incertidumbre sobre el valor del estadio poco puede afirmarse de la exactitud de este número. Su discípulo Dicearco de Mesina (350 - 290 AC) da unos valores diferentes para el mundo entonces conocido. Desde las Columnas de Hércules (Estrecho de Gibraltar) al Ganges 60.000 estadios. Desde el Alto Egipto (nacimiento del Nilo) a la Península de los Dardanelos 40.000 estadios. A Dicearco se le atribuye también la determinación de la altitud de los montes del Peloponeso.

Adrastias de Afrodisias. Miembro de la escuela peripatética, aduce prue-

bas similares a las de Aristóteles. Deduce de la aparición de nuevas constelaciones al marchar en sentido norte sur que la tierra es convexa de norte a sur. La convexidad en el sentido este oeste está demostrada por la aparición de los cuerpos celestes en el horizonte en los lugares situados al este antes que en los situados al oeste. En el caso de un eclipse de luna en un lugar se observa a primeras horas de la noche, mientras que en otro situado al oeste del primero, se observa ya de madrugada. Si la tierra fuese plana, en los dos lugares se observaría a la misma hora. [John Kirtland Wright. Geographical lore of the time of the Crusades. American Geographical Society. RS n° 15, pp 368-369].

### **El período Alejandrino**

Hacia el año 300 AC Ptolomeo Soter, rey de Egipto, funda en Alejandría la Biblioteca, el Observatorio y el Museo. Por primera vez la actividad científica es patrocinada por el estado, Ptolomeo intenta reunir a los mejores científicos de la época en estas instituciones.

Euclides enseña geometría en el Museo, compila sus Elementos, enuncia las leyes del movimiento diurno y señala que en la constelación de las Osas hay una estrella que no cambia su posición. Ya entre los navegantes griegos era conocido que la altura sobre el horizonte de esta estrella daba un indicio de la latitud en el mar.

Aristarco de Samos. No parece probable que visitase Alejandría, aunque, sí como se afirma, fue discípulo de Estratón debió serlo durante la estancia de este último en Atenas como director de la Academia. A Aristarco se le ha llamado el Copérnico del mundo antiguo. Colocó el centro del universo en el Sol y no en la Tierra. Parece que tuvo problemas con los sacerdotes de su época cuando afirmó que el Sol era más grande que el Peloponeso. No fue seguramente el primer científico al que ocurrió tal cosa y, desgraciadamente, no iba ser el último. Nació hacia el año 300 AC y que en el 280 AC escribió un tratado que nos ha llegado íntegro: "Sobre las dimensiones y distancias del Sol y de la Luna".

El estilo recuerda el de los elementos de Euclides, el rigor también, desgraciadamente los datos de observación son muy deficientes.

- 1.- La Luna recibe su luz del Sol
- 2.- La Tierra se puede considerar un punto en relación con las dimensiones de la esfera en la que se mueve la Luna. Con esta hipótesis se evita la consideración del paralaje.
- 3.- Cuando la Luna está en su primer cuarto, ó en el último, el círculo máximo que separa la parte iluminada de la sombra está en la dirección de visual de la Tierra a la Luna.
- 4.- Cuando la Luna está en su primer cuadrante, ó en el último, la distancia angular de la Luna al Sol es menor que un cuadrante en un treintavo de cuadrante.  $87^\circ$



5.- El ancho de la sombra de la Tierra es de dos Lunas (recorrido de la Luna durante un eclipse).

6.- La Luna subtiende un quinceavo de signo del zodiaco ( $2^\circ$ ).

Las hipótesis 4 y 6 no son correctas, la distancia angular Sol-Luna es  $89^\circ 50'$  y no de  $87^\circ$ , el diámetro aparente de la Luna es de  $30'$  y no de  $2^\circ$ . Con el ángulo de  $87^\circ$  la distancia Sol-Tierra es 19 veces la distancia Tierra-Luna, con el valor correcto 400 veces. El cálculo lo realizó sin emplear trigonometría (aún no se había inventado) usando ingeniosísimas razones geométricas.

Como afirma G. Sarton, (Historia de la Ciencia, Eudeba. Buenos Aires. 1967. Tomo III, pp 54-57), -del que estoy tomando la mayor parte de la información sobre el mundo griego-,: "el hecho de establecer una medida, por errónea que fuese, es asombroso para su época. Los valores obtenidos son menos importantes que el método empleado para obtenerlos".

La mejor fuente de información sobre Aristarco es Arquímedes (joven contemporáneo), quién en el Arenario escribe:

"Tú sabes que el Universo (Cosmos) es el nombre dado por la mayoría de los astrónomos a la esfera cuyo centro es el centro de la Tierra, y cuyo radio es igual a la distancia entre el centro del Sol y el centro de la Tierra. Esta es la expresión común, tal como la oyes de los labios de los astrónomos. Pero Aristarco de Samos ha hecho un libro que contiene algunas hipótesis, según las cuales, como consecuencia de los supuestos admitidos, el [verdadero] universo es muchas veces mayor que el que acabamos de mencionar. Sus hipótesis son: que las estrellas fijas y el Sol se mantienen inmóviles; que la Tierra gira alrededor del Sol sobre una circunferencia de círculo; que el Sol permanece en el centro de la órbita; y que la esfera de las estrellas fijas, que tiene aproximadamente el mismo centro que el Sol, es tan grande que el círculo sobre el cual él supone que la Tierra gira, mantiene tal proporción con la distancia de las estrellas fijas como la que el centro de la esfera mantiene con su superficie.".(G.Sarton Tomo III, pag. 57).

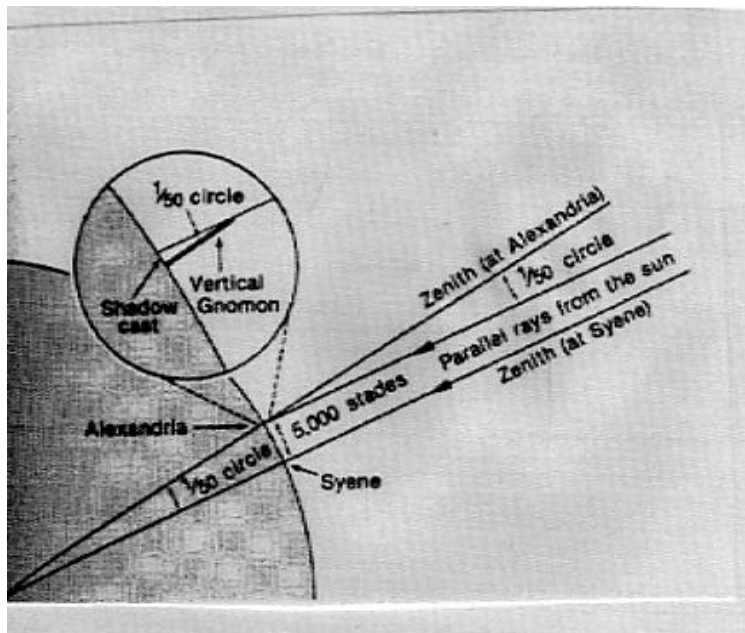
Eratóstenes (275 - 195 AC) es el primero que desarrolla un método científico para calcular el radio terrestre, puede considerársele el fundador de la Geodesia. El punto de partida lo constituyen unas observaciones y unos datos:

El día del solsticio de verano, al medio día los rayos solares inciden perpendicularmente en Syene (Hoy Asuan a la orilla del Nilo) iluminando el fondo de los pozos. En el mismo día y hora, en Alejandría la sombra de un obelisco permite determinar que los rayos solares forman con la vertical un ángulo de  $7^\circ 12'$ ,  $1/50$  de circunferencia.

Supone que los rayos del Sol forman un haz paralelo.

Considera, además, los siguientes datos: El Sol se encuentra exactamente en el Trópico de Cáncer al medio día del solsticio de verano, luego Syene está en el Trópico. Syene se encuentra al sur de Alejandría y en el mismo meridiano. La distancia entre las dos ciudades es de 5.000 estadios.

Concluye que la desviación angular respecto a la vertical en Alejandría es exactamente el ángulo que forman las verticales en el centro de la esfera. Luego el meridiano tiene una longitud de 250.000 estadios. Si se usa el estadio



de 185 metros, obtuvo un valor de 4625000 metros. Un error del 15%. Según los valores que se atribuya al estadio griego, variable en el tiempo y de una región a otra, resulta una precisión entre el 0.6% y el 16%.

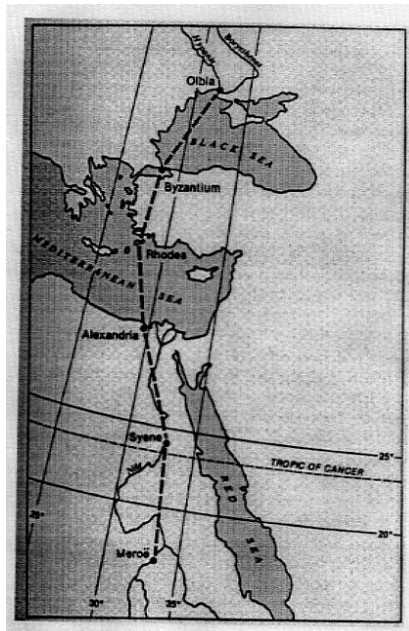
Esta notable exactitud es el resultado de la feliz compensación de algunos errores:

- Aunque es cierto que los rayos solares inciden perpendicularmente al mediodía del día del solsticio de verano en el Trópico de Cancer, Asuán no está exactamente en el Trópico, está 37 millas al norte.
- Asuán no está en el mismo meridiano que Alejandría, la diferencia de longitudes es de  $3^{\circ} 30'$ .
- La diferencia de latitudes es de  $7^{\circ} 5'$  y no de  $7^{\circ} 12'$ .

Existen varias hipótesis de cómo estimó la distancia de 5.000 estadios. Unos dicen que basándose en el hecho de que una caravana de camellos se desplazaba unos 100 estadios/día y que se empleaban 50 días en llegar de una ciudad a otra. Otros que empleó algún mapa catastral egipcio de los que disponía en la Biblioteca de Alejandría, de la que era director. En estos mapas las distancias se medían a pasos regulares por funcionarios especializados.

Hiparcos y los frutos de la observación continua.

Aristilo y Timocasis hicieron observaciones astronómicas en Alejandría al comienzo del siglo III AC. No parece que dispusieran de otro equipo de observación diferente a los que se han citado previamente: gnomos, clepsidras, relojes de sol, esfera armilar. Los círculos de la armilla disponían de divisiones que hoy desconocemos, aunque estuvieron disponibles para Hiparcos aproximadamente



siglo y medio más tarde, que las convirtió en grados sexagesimales. Hiparco fue el primero en utilizar la división en  $360^\circ$  de la circunferencia, heredada de los babilonios.

Las diferencias entre las longitudes observadas por Timocasis y por Hiparco eran de unos dos grados. El intervalo de tiempo transcurrido estaba entre 154 y 166 años. Esto dio para la precesión de los equinoccios un valor comprendido entre  $43''.4$  y  $46''.8$  (El valor moderno es de  $50''.3757$  año). Este valor de Hiparco es mucho mejor que el de Ptolomeo  $36''$ . Este es uno de los primeros resultados importantes basados en observaciones y es consecuencia del esfuerzo combinado de varias generaciones de observadores. Se habían sentado las bases de la Astrometría: estudio de las posiciones de las estrellas, de sus movimientos propios,.... Las medidas realizadas desde satélite (telescopio Hubble) a disminuido el tiempo entre observaciones pero no la validez del método

A Hiparco se le considera el mayor astrónomo de la Antigüedad. Además de la precesión de los equinoccios sus principales contribuciones son:

- La primera teoría numérica del movimiento del Sol y de la Luna.
- La reducción paraláctica de las observaciones al centro de la Tierra.
- El primer catálogo de estrellas
- La utilización de la proyección estereográfica.
- Las primeras determinaciones de las diferencias de longitud basándose en los eclipses de Luna.
- Determina un valor correcto de la inclinación de la eclíptica.
- Introdujo la observación sistemática de los pasos del Sol por el meridi-

ano, determinando la duración del año trópico y de las estaciones.

- La invención de la Trigonometría y la publicación de una tabla de cuerdas subtendidas por los ángulos. Estas tablas, compiladas por Ptolomeo, no fueron superadas hasta los tiempos de Kepler.

Posidonio (134 - 50 AC). Mide la circunferencia terrestre sobre el meridiano de Rodas - Alejandría (trayecto marítimo). Asume también una distancia de 5.000 estadios. La estrella Canopus que en Rodas se ve rasante con el horizonte y no se ve en otras partes de Grecia, en Alejandría alcanza una altura de  $7^{\circ} 30'$  (  $1/48$  de circunferencia). Con esta diferencia de latitud y la distancia, concluye que la circunferencia mide 240.000 estadios.

Julio Cesar, hacia el año 46 AC, con la ayuda del astrónomo Sosígenes de Alejandría fija en 365.25 días la duración del año y establece el Calendario Juliano, que hoy todavía utilizan las iglesias ortodoxas griega y rusa.

Menelao , astrónomo de Alejandría, escribe hacia el año 80 DC su tratado Las Esféricas, estableciendo la trigonometría esférica.

Ptolomeo Claudio (siglo II DC) . Compila en su Almagesto toda la astronomía antigua. Su sistema planetario es geocéntrico y la descripción de los movimientos de los planetas se hace al modo de Eudoxo con numerosas complicaciones añadidas por los diferentes autores que le siguieron. Incorpora una revisión del cálculo de Posidonio que establece que el meridiano tiene una longitud de 180.000 estadios. La influencia de la obra de Ptolomeo se extiende hasta el siglo XVI, en el que Copérnico publica el *De revolutionibus orbium coelestium*, es posible que los datos que en ella aparecen hicieran creer a Colón que Asia se encontraba a 3.000 o 4.000 millas al Oeste de Europa.