

Etchenique, Roberto Argentino (julio 2005). *Midiendo el universo con un palo. De Eratóstenes a la actualidad (I) : Medir la tierra*. En: Encrucijadas, no. 33. Universidad de Buenos Aires. Disponible en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad de Buenos Aires: <<http://repositorioubu.sisbi.uba.ar>>

Midiendo el universo con un palo. De Eratóstenes a la actualidad (I) *

Medir la tierra

Allá por el año 240 a.C., Eratóstenes supo que había un día en el año en que las cosas no daban sombra en la ciudad de Syene (Egipto). Mandó un emisario a esa ciudad mientras él se quedó en Alejandría, y ambos midieron al mismo tiempo la longitud de la sombra que daba un palo. Mediante esa simple medición, y aplicando trigonometría, Eratóstenes calculó qué diámetro debía tener la Tierra, sabiendo la distancia exacta entre Alejandría y Syene. Eratóstenes concluyó que la Tierra era una esfera de 40.000 km de circunferencia (en unidades actuales), y por lo tanto, unos 12.000 km de diámetro. Hoy las mediciones más delicadas dan 40.067 km para el perímetro de nuestro planeta en el ecuador. A partir de esa medición, Aristarco de Samos calculó el diámetro y la distancia a la Luna, obteniendo valores similares a los que se conocen hoy. Estas mediciones fueron la base de nuestro conocimiento actual sobre las dimensiones de los planetas y el sistema solar.

ROBERTO ARGENTINO ETCHENIQUE

Licenciado en Ciencias Químicas, FCEN-UBA. Doctor de la Universidad de Buenos Aires. Profesor Adjunto Regular, DQIAyQF, FCEN, UBA.

Los antiguos griegos conocían bastante bien el mundo en que vivían. Una de las razones de esto es que comerciaban con muchos otros pueblos contemporáneos. Alejandría no quedaba en Grecia, sino en Egipto. Los padres de Eratóstenes debieron haber gustado de Egipto, porque su hijo nació y paso la infancia en Cirene, sobre la costa norte de África, en el Mar Mediterráneo egipcio. Eratóstenes vivió su juventud viajando de acá para allá, y conoció Alejandría, así como muchas otras ciudades, y de joven se estableció en esa gran ciudad.

En aquel entonces, unos 250 años antes de Cristo (250 a.C.), la redondez de la Tierra era considerada un hecho. Los barcos que desaparecían poco a poco –primero el casco, por último el mástil– al alejarse en el horizonte mostraban que no sólo la Tierra, sino también el agua del mar iban curvándose hacia abajo con la distancia. Y la única superficie que se curva hacia abajo en cualquier dirección es la esfera. Esta Tierra esférica que imaginaban los griegos antiguos también les permitía explicar por qué la sombra de nuestro mundo sobre la Luna durante los eclipses era siempre circular.

Una Tierra esférica tiene que tener un diámetro, un tamaño determinado, y si uno se aleja lo suficiente, debería aparecer por el otro lado (esta vuelta a la Tierra recién la pudieron completar los navegantes Magallanes y Elcano, casi dos mil años después).

En época de los griegos, los geógrafos sabían que la Tierra (y el mar también) llegaba al menos hasta lo que hoy es España en el oeste, y hasta la India en el este. La distancia entre estos puntos era de unos 9600 km. Dado que luego de recorrer esa distancia no se había vuelto al lugar de partida, la circunferencia de la Tierra debería ser mayor que esa distancia. Pero, ¿cuánto mayor?

Pero volvamos a Eratóstenes. Había llegado a ser el director de la Biblioteca de

Alejandría, la más importante de la época, y había viajado mucho.

De sus viajes, o de haberlo leído en la biblioteca, él sabía que en la ciudad de Syene, al sur de Alejandría, había un día en el año en que los palos y mástiles no proyectaban sombra al mediodía. Eso significaba que el Sol pasaba ese día justo por encima de las cabezas, por el "cenit". En el resto de las ciudades, como Alejandría o Atenas, el Sol nunca estaba tan alto, y siempre había sombras, todos los días del año.

Si en Alejandría hay sombra y al mismo tiempo en Syene no la hay, pensó Eratóstenes, es que en ese momento el suelo de Syene está bien perpendicular a los rayos del Sol, mientras que el suelo de Alejandría debe estar "inclinado". Si la Tierra esférica es muy grande, estará menos inclinado, mientras que si es pequeña la inclinación será mayor. Eratóstenes se dio cuenta de que si podía medir con precisión la sombra en Alejandría al mismo tiempo que no había sombra en Syene, iba a poder determinar el tamaño de la Tierra.

Puso manos a la obra allá por el año 240 a.C. Esperó al solsticio de verano, el día en que no había sombra en Syene al mediodía. Y él, que vivía en Alejandría, midió la sombra al mismo tiempo. En ese instante, aunque el Sol estaba alto en Alejandría y las sombras eran chiquitas, ahí estaban. Un palo de un metro daba una sombra de 12 centímetros, más que suficiente para que Eratóstenes pudiera medirla con precisión, y esa sombra correspondía a un ángulo de 7 grados entre el Sol y la vertical.

A partir de ahí, determinar el tamaño de la Tierra era fácil. Si se sabía la distancia exacta entre Alejandría y Syene, y el ángulo entre las verticales de esas ciudades, haciendo un cálculo sencillo de regla de tres podía determinarse la circunferencia de la Tierra.

Eratóstenes necesitaba la distancia exacta entre Alejandría y Syene, y mandó a un caminante a medir la distancia entre ambas ciudades, contando los pasos. El tipo caminó los 800 kilómetros que hay entre Alejandría y Syene, dos veces la distancia entre Buenos Aires y Mar del Plata, e informó la distancia, claro que no en kilómetros, que no se usaban, sino en una vieja unidad llamada "estadios".

Si 800 km corresponden a 7 grados, los 360 grados de la circunferencia completa necesitarán 40.000 km, y ésa es la circunferencia total de la Tierra. Eratóstenes concluyó que la Tierra era una esfera de 40.000 km de circunferencia, y por lo tanto, unos 12.000 km de diámetro. Hoy las mediciones más delicadas dan 40.067 km para el perímetro de nuestro planeta en el ecuador. Eratóstenes había medido el tamaño de la misma Tierra con menos de 0,5% de error, y había hecho esa proeza... con un palo.

De la Tierra al sistema solar

Eratóstenes había dado el paso más importante: el primero. La medición del único objeto astronómico que los antiguos podían tocar, la propia Tierra, mostraba que era ciertamente muy grande. Habría que andar 40.000 km para volver al mismo lugar, 4 veces más que todo lo que algún griego había viajado alguna vez. La Tierra era efectivamente enorme, y ese tamaño había sido medido con un palo.

Y ahí estaba el segundo paso. El objeto celeste que da la impresión de estar más cerca que los otros. Tal vez inclusive un mundo como el nuestro: la Luna.

Aristarco de Samos era un astrónomo griego, de la época de Eratóstenes. Desarrolló un cálculo para medir la distancia a la cual estaba la Luna, si antes se conocía el diámetro de la Tierra. Otro astrónomo, Hiparco de Nicea (190-120 a.C.) mejoró los cálculos de Aristarco y se dispuso a hacer las mediciones.

Como Aristarco ya había probado, el Sol está mucho más lejos que la Luna. Pero como es muchísimo más grande, desde la Tierra se ven prácticamente del mismo tamaño. Eso hace que en un eclipse total de Sol, la Luna tape exactamente el disco solar. Un eclipse de Sol ocurre cuando la Luna, pequeña y cercana, se pone entre la Tierra y el Sol, tapándolo completamente. Hiparco vio el eclipse que ocurrió en el año 129 a.C. Este eclipse fue total en Hellesponto (el actual estrecho de Dardanelos, Turquía) pero en Alejandría sólo se cubrieron las 4/5 partes del Sol.

Desde Hellesponto, durante aquel eclipse, el borde de la Luna (punto E en el dibujo) coincidía con el borde del Sol (punto D). Pero desde Alejandría el borde de la Luna se veía "corrido" en 1/5 del diámetro del Sol (punto C), o sea unos 0,1 grado, y por lo tanto el eclipse es sólo parcial.

Aplicando trigonometría al triángulo que forman el borde de la Luna, Hellesponto y Alejandría se pudo calcular la distancia al satélite.

El único problema es que la Luna está mucho más lejos que esas ciudades entre sí, y el ángulo es tan chico que es difícil medirlo con precisión, de modo que para estar seguro, Hiparco utilizó un segundo método. Esperó a un eclipse de Luna y midió el tiempo y la curvatura que la sombra de la Tierra proyecta sobre nuestro satélite. La sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse es definitivamente redonda, pero el diámetro de esa sombra, varias veces mayor que la Luna, es difícil de medir con exactitud. Pero como la Luna se mueve alrededor de la Tierra a una velocidad constante, dando una vuelta completa en algo menos de 30 días, se puede medir el tamaño de esa sombra mediante el tiempo que tarda la Luna en cruzarla, que en un eclipse total es de varias horas.

Midiendo este tiempo, Hiparco llegó a la conclusión de que la Luna estaba a una distancia de unos 30 diámetros terrestres. Como tenía los datos del diámetro de la Tierra que había medido Eratóstenes, esta distancia es de $30 \times 12.800 \text{ km} = 384.000 \text{ km}$.

Esta medida es excelente aun comparada con las mediciones actuales con instrumentos de última generación (láseres, haces de microondas, sondas espaciales) que indican una distancia media de la Tierra a la Luna de 384.317 km, que varía un poco de acuerdo con la posición de la Luna en su órbita.

Ésa fue la primera medición de una distancia astronómica. Hiparco la midió con transportadores y cálculos, usando sólo la medición del diámetro de la Tierra, que había sido medida con un palo.

También nos permite conocer el tamaño de la Luna, ya que ocupando también un ángulo de 0,5 grados en el cielo, y estando a una distancia de 384.000 km, se puede deducir que su diámetro es de unos 3500 km. Más chica que la Tierra, por cierto, pero tan grande como todo el mundo conocido por los griegos.

Pero Aristarco de Samos no se había quedado en la Luna, sino que también había

propuesto un método para calcular la distancia al mismo Sol. Cuando la Luna está exactamente en un cuarto (creciente o menguante), el Sol, la Tierra y la Luna están en los vértices de un triángulo rectángulo, y por eso aparece iluminada exactamente la mitad de la Luna llena.

Sabiendo que este ángulo mide exactamente 90 grados, y la distancia de la Tierra a la Luna, es posible calcular la distancia de la Tierra al Sol mediante un poco de geometría. Para eso, sólo es necesario medir otro ángulo: el ángulo que tienen la Luna y el Sol cuando están vistos desde la Tierra.

Aristarco intentó medir este ángulo y dijo que era de 87 grados. Eso corresponde a una distancia realmente grande para el Sol: 20 veces la distancia Tierra-Luna. Como desde la Tierra, el Sol se ve del mismo tamaño que la Luna, debía necesariamente ser 20 veces más grande que ésta y por lo tanto unas seis veces más grande que la Tierra. Aristarco empleó este argumento para proponer que la Tierra giraba alrededor del Sol, y no al revés, ya que creía ridículo que un planeta pequeño fuera el centro alrededor del cual giraba un Sol mucho más grande.

Esta enorme distancia fue estimada a partir de la distancia de la Luna, la cual fue medida utilizando el diámetro de la Tierra, que había sido medida con un palo.

Pero aún los números de Aristarco se quedaban cortos. Sus cálculos y su teoría geométrica eran perfectos, pero sus medidas no. Es casi imposible, sin telescopios, determinar exactamente cuándo es el cuarto de Luna, y la medición de un ángulo cercano a 90 grados en el cielo es también muy difícil.

El ángulo en esas condiciones no es de 87 grados sino de 89,9 grados, y esa diferencia de menos de dos grados hace que los cálculos de Aristarco estén mal. El Sol no está a 20 veces la distancia a la Luna, sino a casi 400 veces esa distancia, y su diámetro es gigantesco: más de 100 veces el de la Tierra.

Pero los números grandes siempre asustan, y a los griegos incluso la cifra conservadora de Aristarco les parecía enorme, no le creyeron. Ni siquiera Hiparco aceptó esa enormidad, y con el tiempo, aquella sabiduría se perdió.

Mas de 300 años después, Claudio Ptolomeo desarrolló una astronomía que ponía a la Tierra en el centro del universo, y al Sol a girar alrededor de ella, algo más lejos que la Luna. Esta astronomía perduró 1800 años sin que el conocimiento del hombre sobre las dimensiones del universo progresara.

El Renacimiento

La edad de oro de la ciencia griega pasó, y los mismos griegos dejaron lugar a otras potencias culturales. Los romanos utilizaban la astronomía para hacer calendarios, pero no generaron ideas novedosas en ese campo, y los cientos de fracciones en que se dividió el imperio luego de su caída tampoco lo hicieron, sumidas en la noche de la Edad Media, cuando cualquier pensador que osara discutir alguna frase perdida de la Biblia podía ser enviado a la hoguera por el solo hecho de atreverse a exponerlo.

Hubo que esperar hasta 1543, en que un polaco llamado Nicolás Copérnico propusiera, en un libro publicado el mismo día de su muerte, que era el Sol, y no la Tierra, el centro

del universo. Y unos años más tarde, que Johannes Kepler, usando los datos de su maestro Tycho Brahe, determinara que los planetas no se mueven en círculo sino en unos óvalos que los matemáticos llaman “elipses”. A la luz de los nuevos descubrimientos, surgió nuevamente la idea de medir la distancia a la que se hallaban los planetas y el Sol. Y acá volvemos a uno de los viejos métodos de Hiparco: el paralaje.

Si colocamos un dedo delante de los ojos contra un fondo lejano que no sea uniforme, y abrimos un ojo y después el otro, vemos que el dedo aparece contra fondos diferentes. Esto se debe a que entre los ojos hay una separación de algunos centímetros, y esa distancia hace que el ángulo entre el ojo, el dedo y el fondo lejano no sea el mismo con un ojo o con el otro. Cuanto más próximo el dedo a los ojos o cuanto más separados tengamos los ojos, mayor es el efecto. De este efecto de paralaje y conociendo la separación entre los ojos podemos calcular la distancia de la cara al dedo.

Podríamos intentar medir la distancia a la Luna guiñando los ojos de esta forma, usando como fondo el cielo estrellado, ya que las estrellas están mucho más lejos que la Luna. Pero como la Luna está a miles de kilómetros y la distancia entre los ojos es de sólo unos centímetros, la variación sería tan minúscula que no veríamos diferencia alguna.

Pero si bien no podemos acercar la Luna, podemos “alejar los ojos”. Mirando el borde de la Luna durante un eclipse de Sol desde Heliópolis y Alejandría, Hiparco había hecho la primera medición de paralaje. Ahora habría que hacer lo mismo con un planeta, pero los planetas están más lejos que la Luna, así que era necesario alejar aún más los “ojos”. La primera medición de un paralaje planetario se hizo en 1671. Uno de los “ojos” era el astrónomo francés Jean Richer, que se fue a Cayenne, en la Guayana Francesa, el otro ojo era el italiano Giovanni Cassini, que se quedó en París. A las noches ambos se quedaban viendo el planeta Marte y registrando su posición día tras día, hora tras hora. Conociendo la distancia entre Cayenne y París, cosa fácil sabiendo sus coordenadas y el tamaño de la Tierra (que había sido medida con un palo), pudieron calcular la distancia entre la Tierra y Marte en esos días. A partir de esa distancia y conociendo las órbitas con el modelo que había hecho Kepler, se calculó la distancia al Sol, que resultó ser de unos 140.000.000 de km, sólo un 6% más chica que la aceptada como válida en la actualidad. La distancia entre la Tierra y el Sol era efectivamente 390 veces la distancia Tierra-Luna, que era 30 veces el diámetro de la Tierra, que se había medido con un palo.

Una vez teniendo la distancia al Sol y los períodos de los planetas en dar la vuelta alrededor de éste, las distancias a todos los planetas conocidos eran fáciles de calcular. Saturno, por entonces el planeta más lejano que se conocía, orbitaba a 1428 millones de km del Sol, unas 10 veces más alejado que la Tierra.

** Dada la extensión de este artículo, lo hemos dividido en tres partes. En el próximo número publicaremos la segunda parte, dedicada a la historia del conocimiento de nuestra galaxia.*

