

ARTÍCULO ORIGINAL

Medir el radio de la Tierra. Una experiencia educativa

Francisco Sáez Pastor

fsaezp@uvigo.es

Facultade de Ciencias da Educación e do Deporte. Pontevedra
Universidade de Vigo

RESUMEN: Al cumplirse el cuarto centenario del uso del primer telescopio para la observación astronómica por parte de Galileo, una asociación astronómica de Barcelona planteó a los centros educativos el proyecto de medir el radio de la Tierra según el método de Eratóstenes en la antigüedad. Intervinieron más de seiscientos centros en el proyecto. Cada centro inscrito tenía que tomar unos datos de ubicación y del ángulo de la sombra que proyecta un palo vertical al mediodía del 26 de marzo. Una vez establecidos estos datos, y enviados al centro de coordinación, se halla la distancia media del radio de la Tierra. Aunque los resultados no fueron exactos, sí fueron lo suficientemente satisfactorios, además de una interesante experiencia educativa de investigación científica.

PALABRAS CLAVE: Astronomía, Radio de la Tierra, Gnomon, Mediodía, Centros Educativos.

Measuring the radius of the Earth. An educative experience

ABSTRACT: On the occasion of the 4th centenary of Galileo's first use of the telescope for astronomical purposes, an astronomical association in Barcelona proposed to teaching centers, the project of measuring the radius of the Earth, using ancient Eratostenes method. More than 600 centers took part on the project. Each center had to take data about the positioning and the length of the shadow casted by vertical stick on March 26th. Once the data was taken and sent to the coordination center, the mean distance to the center of the Earth can be measured. Although the results were not precise, they were satisfactory enough. It was also a very interesting educational experience on scientific investigation.

KEYWORDS: Astronomy, Radius of the Earth, Gnomon, Midday, Teaching Centres.

Fecha de recepción 20/10/2010 · Fecha de aceptación 29/10/2010

Dirección de contacto:

Francisco Sáez Pastor

Facultade de Ciencias da Educación e do Deporte

Campus A Xunqueira, s/n. 36005 Pontevedra

1. LOS MOTIVOS

Con motivo de la conmemoración del cuarto centenario de la primera observación astronómica hecha con un telescopio, realizada por Galileo Galilei (1564-1642) a mediados del año 1609, la Asamblea General de la ONU, en su resolución 62/200, declaró el año 2009 como Año Internacional de la Astronomía.



Figura 1. Carteles del Año Internacional de Astronomía (www.astronomia2009.es)

Esta conmemoración no fue baladí; con la utilización del telescopio como herramienta de observación astronómica, se entraba en una nueva dimensión del estudio de la Astronomía. Aquel aparato, adaptado y mejorado por Galileo de un artilugio realizado en Holanda y que consistía en un tubo de madera y cuero con dos lentes, una cóncava y otra convexa que proporcionaba unos cuantos aumentos y permitía que los objetos lejanos apareciesen más cercanos (Bachiller, 2009), era un telescopio refractor rudimentario; muy simple comparado con los telescopios actuales, pero suficiente para abrirle a un espíritu científico e investigador como era Galileo –que poseía una alta formación como matemático y filósofo–, nuevos horizontes en la observación del Universo.

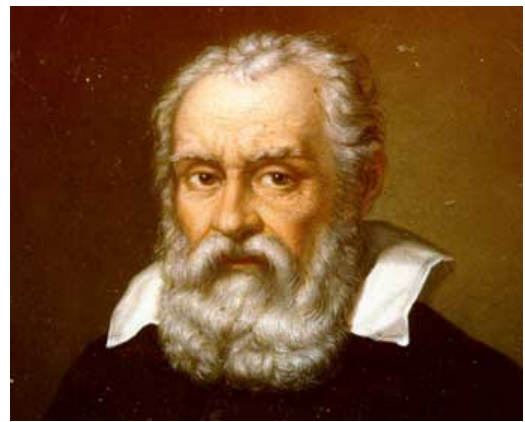


Figura 3. Galileo Galilei. Retrato de Domenico Crespini (www.biografiasyvidas.com)



Figura 2. Telescopio de Galileo (Rafael Bachiller, 2009)

En sus primeras observaciones con este instrumento, dirigidas a la Luna, pudo observar cráteres y montañas. Algo que cuestionaba la perfecta esfericidad de las tradicionales tesis aristotélicas (Sagan, 1995). Después dirigió su telescopio a Júpiter y descubrió sus cuatro satélites principales: *Io*, *Europa*, *Ganímedes* y *Calixto*; nombres de personajes de la mitología griega seducidos por Zeus –Júpiter para los romanos–. Dichos satélites se conocen como “galileanos”, en su honor.

El movimiento de traslación de estos satélites alrededor de Júpiter, constituía un sistema parecido a lo que debía ser el Sistema Solar nuestro, según los postulados heliocéntricos de Nicolás Copérnico (1473-1543). Estos descubrimientos, a los que añade las fases de Venus, similares a las de la Luna, supusieron una confirmación empírica de las teorías de Copérnico.

Aquel modesto telescopio abrió el camino a instrumentos más potentes como los creados por **William Herschel** (1738-1822) gracias a los cuales este gran astrónomo pudo descubrir que el conjunto de todas las estrellas que nos rodean tiene unos límites y están agrupadas en forma aplanada: nuestra galaxia (Asimov, 1986).

A principios del siglo XX, con la instalación del gran telescopio reflector Hooker en Monte Wilson, California, de 2,54 metros de diámetro, **Edwin Hubble** (1889-1953) desarrollaría en él una de las investigaciones astronómicas más importantes de todos los tiempos: el descubrimiento de otras

galaxias y su expansión; descubrimiento que sirvió de base para proponer la teoría de la creación del Universo a partir de una gran explosión: el Big-Bang (Henbest, 1982). En honor a sus importantes

descubrimientos, vendría después, como hito significativo, la puesta en órbita del telescopio espacial con un espejo de 2,40 metros de diámetro, que precisamente lleva el nombre de Hubble.

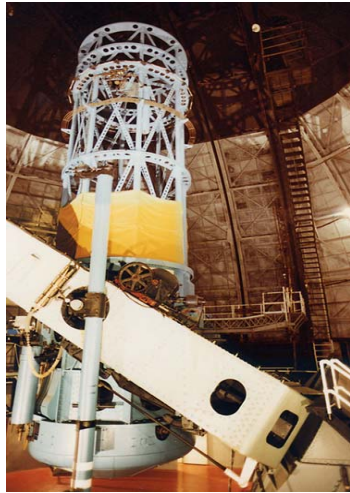


Figura 4. Telescopio Hooker y Edwin Hubble (www astrocosmo.cl).

Actualmente, los telescopios más potentes tienen espejos de más de 10 metros. Es el caso del Gran Telescopio de Canarias, del observatorio de Roque de los Muchachos, con un espejo principal de 10,4 metros, compuesto por 26 segmentos octogonales, que entró en funcionamiento precisamente el año 2009.



Figura 5. Maqueta del futuro E-ELT con un Airbus A340 a escala para apreciar su magnitud. (Bachiller, 2009)

El último proyecto es el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT) con un espejo de 42 metros de diámetro, que se constituirá con un mosaico de más de mil espejos y se instalará en Chile (Bachiller, 2009).

Todo este proceso de investigación y tecnología astronómica empezó en 1609 con Galileo.

2. MEDIR EL RADIO DE LA TIERRA. ANTECEDENTES

Uno de los actos conmemorativos del Año Internacional de la Astronomía fue una iniciativa de **Pere Closas**, coordinador de la agrupación astronómica Aster de Barcelona, que consistió en proponer a los centros educativos españoles y de otros países, una tarea científica de medición del radio de la Tierra por el método que Eratóstenes había utilizado en Egipto en el siglo III a. de C.

Eratóstenes de Cirene (276-196 a. C.), a la sazón, director de la biblioteca de Alejandría, estableció las dimensiones de la esfera terrestre (Sagan, 1982).

Le habían comentado que en la ciudad de Siena –la actual Asuán–, situada a 800 km. al sur de Alejandría, el día 21 de junio –solsticio de verano–, cuando el Sol del mediodía se encontraba en el cénit, las columnas del templo no proyectaban sombra y los rayos del sol incidían directamente en el agua de un profundo pozo¹.

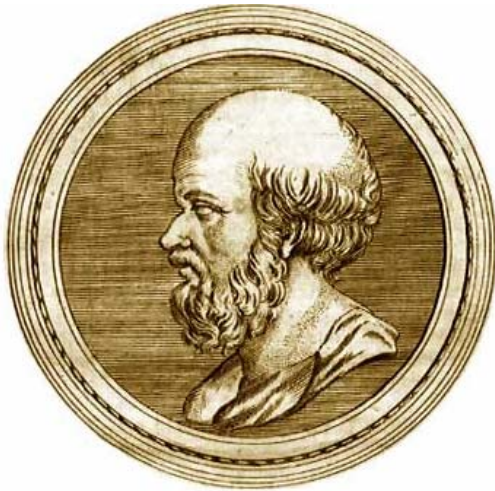


Figura 6. Eratóstenes
(www.biografíasyvidas.com)

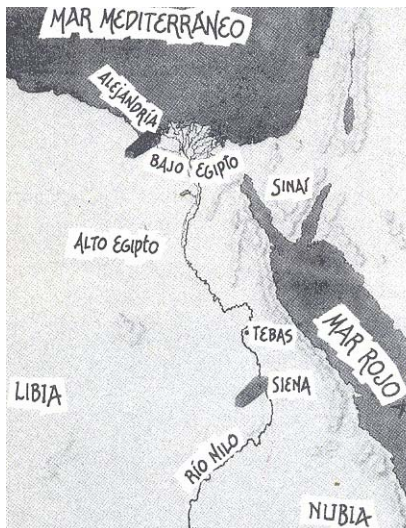


Figura 7. Mapa del antiguo Egipto (Sagan, 1982)

Al año siguiente estuvo atento por si esos hechos se producían también en Alejandría en la misma fecha. Comprobó que un poste vertical clavado en el suelo proyectaba una sombra de unos 7° al mediodía del solsticio de verano. Como los griegos de aquella época ya tenían los conocimientos matemáticos suficientes, Eratóstenes calculó, con estos datos, el radio de la Tierra -6.400 km , y una circunferencia de 40.000 km , con una diferencia de sólo ¡ 34 km ! de la medida real (Sagan, 1982); más achacable ésta quizás, al error en la medición de la distancia entre Siena y Alejandría que a sus propios cálculos. Enorme proeza científica.

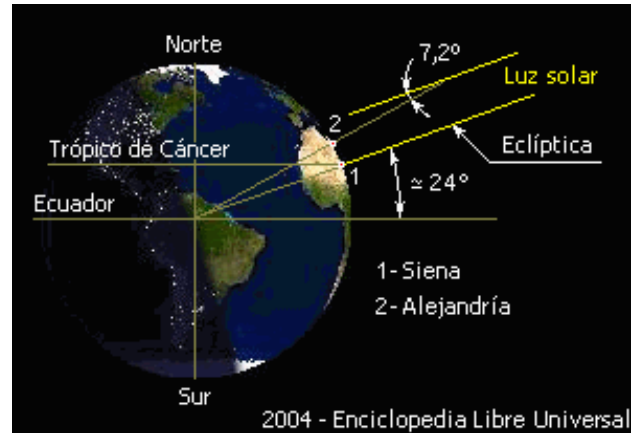


Figura 8. Ilustración de la inclinación de los rayos solares
(www.biografíasyvidas.com)

En la Grecia clásica ya sabían que la Tierra era esférica. Los astrónomos griegos, en sus observaciones de los eclipses de Luna, dedujeron que el Sol se situaba en el lado opuesto a ésta, y que la sombra de la Tierra se proyectaba sobre la Luna, eclipsándola; observaron que esta sombra era circular, independientemente de las posiciones de la Luna y del Sol. El único cuerpo sólido que proyecta una sombra con sección circular en todas direcciones es una esfera. Luego, la Tierra debía ser esférica. El que pareciera plana sólo se debería a la enorme dimensión de la misma. Fue **Filolao de Tarento** quien primero sugirió la idea de la esféricidad de la Tierra hacia el año 450 a. C. (Asimov, 1986).

Ya desde el siglo IV a. C. ningún científico dudaba de que la Tierra fuese una esfera. Desde entonces ha sido admitido por todo hombre culto del mundo occidental. Por tanto, las observaciones de Eratóstenes tenían un buen fundamento. Sabía qué estaba buscando. Posteriores mediciones de los griegos rebajaron dichas dimensiones a 4.950 km . Las obtenidas por Eratóstenes se les antojaban excesivas. Y éstas últimas fueron las que prevalecieron durante toda la Edad Media, según los escritos de **Claudio Tolomeo** (90-168 d. C.), que **Cristóbal Colón** (1451?-1506) utilizó para demostrar que era factible la ruta hacia el Oeste para llegar a Asia desde Europa (Sáez-Pastor, 2006).

3. LA TAREA ESCOLAR DE MEDICIÓN

Bien, pues la tarea de Pere Closas para los centros escolares que se apuntaran a dicho trabajo era la de realizar una medición del radio de la Tierra de manera colectiva el día 26 de marzo de ese año — 2009— siguiendo el mismo principio de Eratóstenes. ¿Por qué esa fecha y no la que utilizó este sabio

griego? La fecha elegida fue más por cuestiones logísticas de organización escolar, puesto que para el solsticio de verano, con exámenes, notas y vacaciones, no existe ambiente propicio para esta experiencia.

Se habían inscrito para participar en la experiencia del orden de 930 centros escolares, repartidos por el territorio español, por su entorno geográfico inmediato y también por América Latina.

Finalmente se recogieron datos de 639 centros escolares. Estos datos proceden básicamente de España (632) o su entorno geográfico próximo (Andorra, Italia, Francia y Marruecos aportan datos de un centro cada uno); los centros de América Latina finalmente inscritos suministraron datos de tres centros escolares –dos de México y uno de Colombia– (www.astronomia2009.es).

El procedimiento para cada grupo de trabajo era bastante sencillo: medir el ángulo de la sombra que proyectaba un *gnomon* –la varilla de un reloj de Sol– en ese día. Había que hallar el punto exacto de la proyección de la sombra al mediodía puesto que ese momento no tiene por qué coincidir necesariamente con las 12 de la mañana, como es la creencia general.



Figura 9. Procedimiento de medición de la sombra del gnomon

El gnomon consistía en un humilde recogedor como se puede apreciar en la figura 9. El único requisito que se precisaba era que estuviese vertical. La medición comenzaba desde las diez de la mañana hasta las 6 de la tarde, aproximadamente, y se iban haciendo marcas en un papel extenso puesto en el suelo. Se realizaban marcas de los puntos del extremo de la sombra del gnomon cada poco tiempo.

La unión de dichas proyecciones dibujaba una ligera curva.

Después, por procedimientos geométricos se hallaba la mediatriz, que daba la hora exacta del mediodía de esa fecha en esa localización geográfica. El mediodía, esto es, cuando el sol alcanza el cenit, se produce en momentos diferentes para cada día para una misma ubicación.

4. LA EXPERIENCIA DEL INSTITUTO DE POIO. PONTEVEDRA.

Este Instituto fue uno de los centros escolares que se sumó al proyecto, y de donde adquiere la experiencia quien suscribe este artículo. Y el trabajo desarrollado para esta medición se planificó con días de antelación. Un grupo de alumnos de bachillerato y de 4º de Secundaria, predominantemente, dirigidos por D. Benigno Pintos, profesor de Matemáticas del Centro, buscaron una superficie plana y horizontal al aire libre, fuera de zonas de tránsito. Colocaron un papel de embalaje de un metro de ancho y unos cinco metros de largo; también el cogedor, gnomon, a una distancia intermedia (Figura 10).



Figura 10. Grupo de alumnos del IES de Poio con su profesor durante el proceso de medición el día 26 de marzo

Durante los días anteriores se fueron haciendo prácticas de la medición de la sombra del extremo del gnomon con marcas en el papel, donde se apuntaba la hora exacta de cada medición. Para poder hacer dicha medición a lo largo de todo el día, se iban turnando diferentes miembros del equipo. Uniendo todas las marcas de las mediciones, se establecía una línea curva, puesto que a medida que iba ascendiendo el Sol, la longitud de la sombra del gnomon disminuía; curiosamente, esta curva fue menos acentuada de lo que esperábamos. Una vez

establecida la mediatriz, se hallaba el ángulo de la proyección de la curva por procedimientos matemáticos.

Para el día 26 de marzo ya estaba el equipo preparado, después de haber resuelto los pequeños inconvenientes que habían surgido de la aplicación de esta técnica. Estos datos se pasaron al centro de recepción, coordinado por Pere Closas. Debían enviarse también las coordenadas del punto de ubicación del Centro así como la distancia de éste al paralelo 40°. Eran los datos que cada centro participante tenía que aportar para poder unificarlos.

Para el Instituto de Poio, Pontevedra, el mediodía del 26 de marzo se produjo a las 13 horas 40 minutos. Las coordenadas de su ubicación geográfica son:

- Latitud 42° 26' 37,32" norte
- Longitud 8° 41' 24,48" oeste

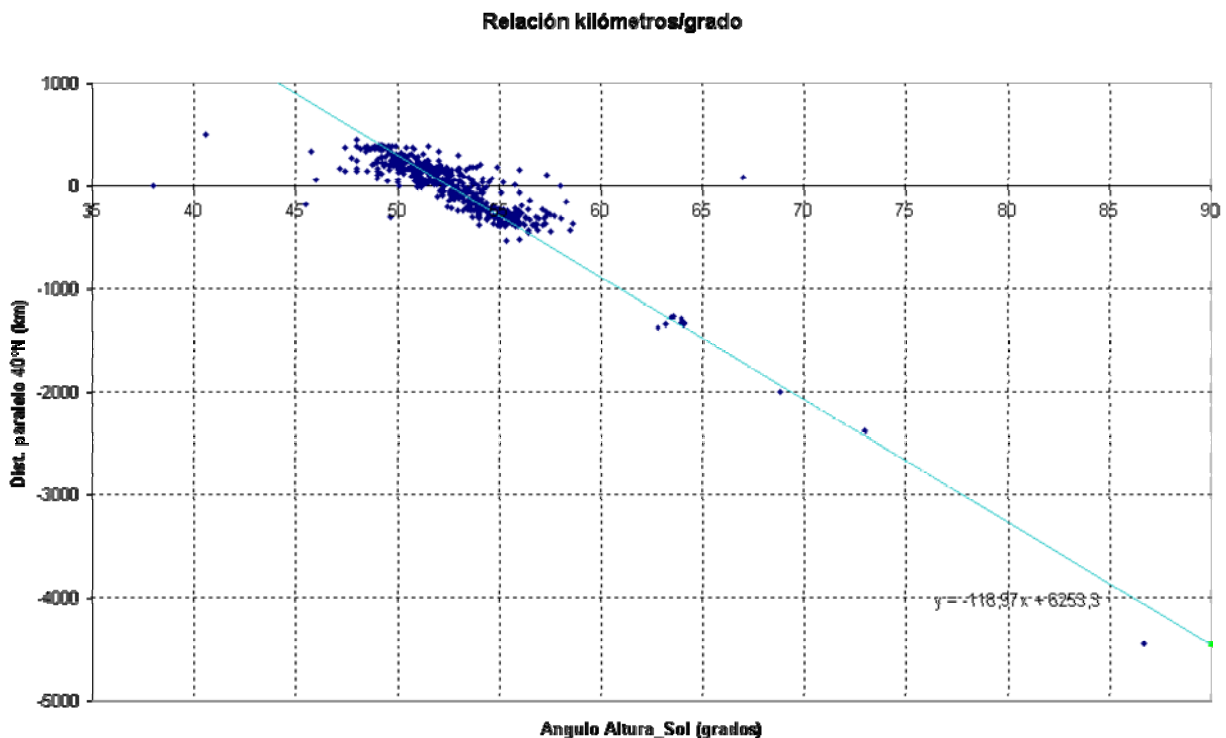
El ángulo formado por la sombra del gnomon en este Centro, al mediodía del 26 de marzo, fue de: 50°

30' 11,54". La distancia al paralelo 40 es de 270 kms. Dicho paralelo atraviesa la Península Ibérica de oeste a este, aproximadamente por su centro. Pasa por el norte de Lisboa, roza Talavera de la Reina, pasa entre Madrid y Toledo, y llega al mar por la ciudad de Castellón.

5. RESULTADOS

Los centros escolares participantes fueron 639, de los cuales 626 fueron validados al cumplir todos los protocolos solicitados. Después de aplicar las técnicas expuestas, la medición resultante del radio de la Tierra fue de 6.561 km.

Como es sabido, el radio medio de la Tierra, establecido por los métodos actuales más precisos, es de 6.366,2 km. El error medio de la medición de los escolares fue de 195 km: el 3%. Un resultado satisfactorio, según opinión de los promotores del proyecto, si tenemos en cuenta los aparatos tan sencillos y faltos de precisión con que se hicieron las mediciones.



Figura, 11.- Gráfico de los centros que intervinieron, con la distancia al paralelo 40 (www.astronomía2009.com)

6. CONCLUSIONES

Si el resultado de estas mediciones es considerado como satisfactorio por los organizadores del proyecto escolar —opinión muy respetable, puesto que, suponemos, tienen suficiente experiencia en este tipo de trabajos—, ¿cómo podemos calificar la medición que hizo Eratóstenes hace 2.200 años con la dificultad y la lógica imprecisión de establecer la distancia entre Alejandría y Siena, y cuyo error fue de sólo de 40 km (Sagan, 1982); esto es: ¡¡el 0,62%!!? Una magnífica e impresionante proeza.

En todo caso, y más allá de la comparación con Eratóstenes, y del resultado de la experiencia, ésta permitió que los escolares se enfrentasen, en estrecha colaboración con sus profesores, a una prueba científica que les ponía en contacto, a través de la Astronomía, con los grandes sabios de la Antigüedad, y les demostraba el gran avance de nuestro tiempo, al permitir, a unos alumnos de instituto llevar a cabo una investigación que hace 2.000 años, sólo estaba al alcance de los más eminentes científicos

El jueves 26 de marzo de 2009 fue, sin duda, una fiesta de la Ciencia.

NOTAS

1. Ahora sabemos que por la zona de Asuán pasa el Trópico de Cáncer y que en esa latitud los rayos del Sol inciden perpendicularmente justo en el mediodía del solsticio de verano.

BIBLIOGRAFÍA

- AÑO INTERNACIONAL DE ASTRONOMÍA (2009). *Agenda de actividades* [En línea]. [Fecha de consulta: 5 de octubre de 2010]. Disponible en http://www.astronomía2009.es/Proyectos_de_ambito_nacional/La_medicion_del_Radio_de_la_Tierra.html
- Asimov, I. (1986). *El Universo*. Madrid: Alianza Editorial.
- Bachiller, R. (2009). *Astronomía. De Galileo a los telescopios espaciales*. Madrid: Editorial LUNWERG
- BIOGRAFÍAS (2002). *Edwin P. Hubble* [En línea]. [Fecha de consulta 25 de septiembre de 2010]. Disponible en <http://www.astrocosmo.cl/biografia/>
- BIOGRAFÍAS (2004). *Galileo Galilei y Eratóstenes* [En línea]. [Fecha de consulta 5 de octubre de 2010]. Disponible en <http://www.biografiasyvidas.com>
- Henbest, N. (1982). *El Universo en Explosión*. Madrid: Debate.
- Henbest, N. y Couper, H (2003). *Enciclopedia del Espacio*. Madrid: Debate.
- Sáez Pastor, F. (2006): La Percepción del Universo. *Revista de Investigación en Educación*. Universidad de Vigo, 2, 127-174.
- Sagan, C. (1980). *Cosmos*. Barcelona: Planeta.
- Sagan, C. (1995). *Un punto azul pálido*. Barcelona: Editorial Planeta.