

¿Dónde estoy? Pregúntale al Sol

Un experimento concebido por C. Morisset, J. Garcia-Rojas, L. Jamet, A. Farah – Instituto de Astronomía UNAM

1. Introducción

El propósito del experimento que hemos diseñado para que el profesor plantee a sus alumnos es el de ubicarse en la Tierra (con coordenadas de latitud y longitud) a partir de mediciones del tamaño mínimo de la sombra de un varilla proyectada sobre un papel y de la hora a la que se produce dicha sombra mínima. No se requiere hacer cálculos, ya que están implementados directamente en la página de Internet donde se registran los resultados.

Desde hace siglos se sabe que la Tierra no es plana, sino que es casi esférica esfera. También se sabe que la Tierra da una vuelta alrededor del Sol aproximadamente cada 365.25 días, y que gira sobre si misma cada 24 horas (en promedio), siendo este giro sobre un eje inclinado 23.5° con respecto al plano de traslación alrededor del Sol.

Hoy en día, sabemos que la inclinación del eje de la Tierra es la causa de que tengamos estaciones, debido al diferente ángulo con el que nos llegan los rayos de Sol en cada época del año. Además, las estaciones son diferentes en los hemisferios norte y sur de la Tierra (ver Figura 1). Esto se traduce en diferentes posiciones relativas del Sol en el cielo en cada época del año.

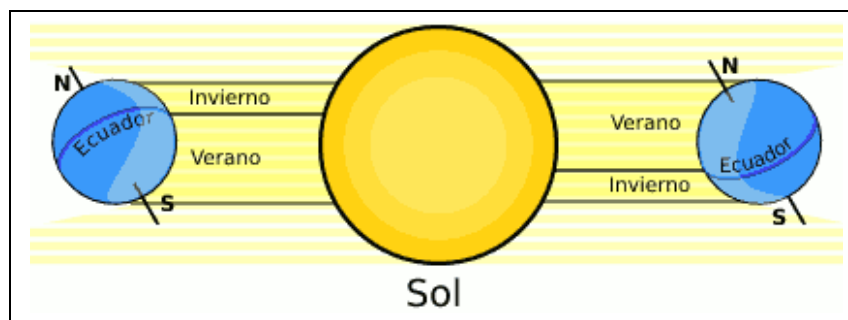


Figura 1. Las estaciones se producen debido a la inclinación del eje de la Tierra; esto hace que los rayos de Sol lleguen más inclinados a la superficie en invierno que en verano.

El estudio de la sombra proyectada por un gnomon (una varilla colocada verticalmente en el suelo) en diferentes lugares de Egipto, permitió a Eratóstenes (astrónomo griego del Siglo III-II a.C.) determinar el tamaño de la Tierra, bajo la hipótesis que esta esférica. Sabía que el Sol no producía sombra a los objetos al mediodía del solsticio de verano en Siena (hoy Asuán, Egipto), mientras que en Alejandría el mismo día a la misma hora si se proyectaba una sombra. Con los tamaños de la sombra y del gnomon y la distancia entre las dos ciudades, aplicó trigonometría básica y midió la circunferencia de la Tierra (ver Figura 2).

El movimiento relativo del Sol es el principio básico de los relojes solares. El Sol proyectará la sombra más corta del día al mediodía solar y la sombra será más larga tanto antes como después de ese

momento (ver Figura 3). La dirección de la sombra (opuesta a la dirección del Sol) y su tamaño indican la hora. Además, a una hora de una fecha dada, el tamaño y orientación de dicha sombra dependerá del lugar en el que nos encontremos.

Nuestro propósito en este experimento es invertir el principio del reloj solar: vamos a obtener el lugar a partir de las sombras, la hora y la fecha.

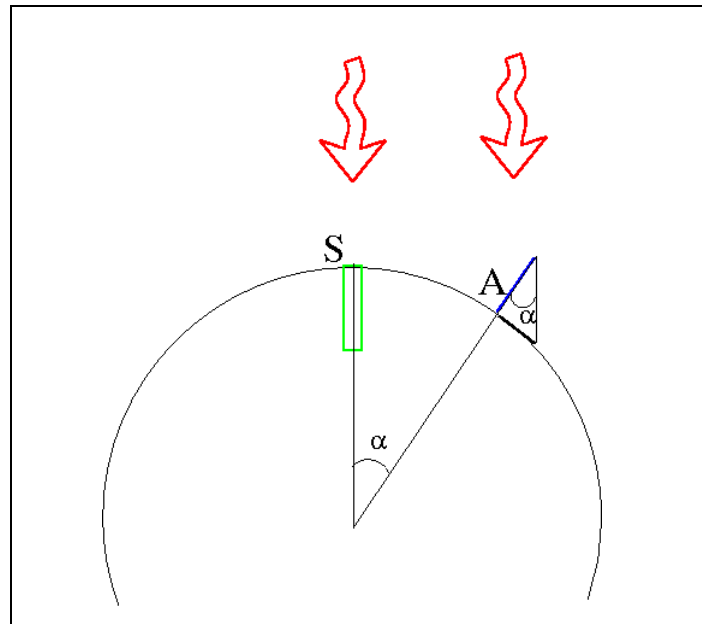


Figura 2. Esquema del experimento de Eratóstenes. En Siena (S), observó que no había sombra de la luz del Sol en un pozo (en verde). Conociendo la distancia entre Siena y Alejandría (A) y midiendo la sombra del gnomon en Alejandría el mismo día del año, se puede determinar la circunferencia de la Tierra: el ángulo α entre el gnomon y su sombra es de 7,2 grados. Se necesitan 50 veces 7,2 grados para hacer 360 grados (círculo entero); entonces, la circunferencia de la Tierra es 50 veces la distancia entre las 2 ciudades (AS).

2. Conceptos básicos

La latitud y la longitud son dos coordenadas definidas para ubicarnos en la esfera terrestre.

La latitud es la distancia angular que hay entre el ecuador terrestre y la posición en la que estemos. La latitud del ecuador es de 0° y la de los polos de 90° . Todos los demás puntos en la Tierra tienen valores de latitud entre 0° y 90° . A este valor se le añade norte (+) o sur (-) para diferenciar entre los dos hemisferios terrestres. A las líneas imaginarias en la esfera terrestre con igual latitud se las denomina paralelos. Unos paralelos muy importantes son los que marcan los trópicos, que son los que están a latitudes de 23.5° (norte) y -23.5° (sur). A latitudes mayores a las de los trópicos, el Sol tendrá su recorrido máximo en el cielo el día del solsticio de verano, y nunca pasará por el cenit (el punto más alto del cielo). A latitudes menores a las tropicales, el Sol pasa dos veces al año por el cenit, y esos son los días que mayor recorrido tiene en el cielo.

La longitud es la distancia angular entre el meridiano cero y la posición en la que estemos. Un meridiano es una circunferencia imaginaria que rodea a la Tierra, que pasa por los polos y que es perpendicular al ecuador terrestre. En 1884, se estableció que el meridiano cero es aquel que pasa por Greenwich (Reino Unido). La longitud se representa entre 0° y 180° , positivos si se está al este del

meridiano cero y negativos si se está al oeste.

Un concepto que a veces no está muy claro es el de mediodía. El momento del paso del Sol por la línea imaginaria que une los puntos norte y sur de la esfera celeste (meridiano de lugar) se conoce como mediodía local. Por otra parte, el mediodía civil es el correspondiente a las 12:00 de la hora civil, y no suele coincidir con el mediodía local. Así, el Sol en su trayectoria diaria, sale por la zona este del horizonte, culmina (mediodía local) y se pone por la zona oeste del horizonte (ver Figura 4).

En el mediodía local, la altura sobre el horizonte a la que está el Sol, está relacionada con la latitud del lugar, mientras que la longitud está relacionada con la diferencia entre el mediodía local y el mediodía civil (ver Figura 5).

Basándonos en estos conceptos, se puede realizar un sencillo experimento en el que se midan sombras mínimas y tiempos para deducir la posición en la Tierra.



Figura 3. Dibujo de las sombras un día dado. Mientras el Sol se encuentre más cerca del cenit la sombra será más corta.

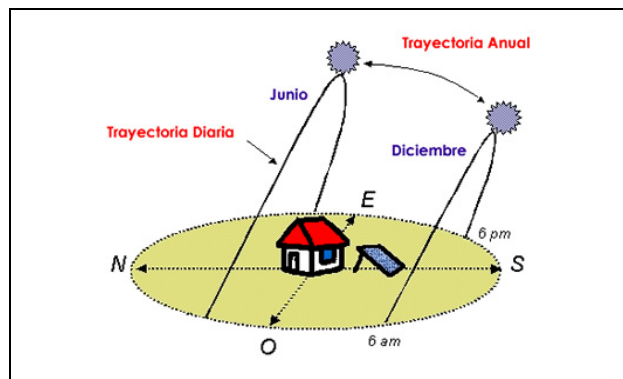


Figura 4. La posición del Sol en el cielo se cambia a lo largo del día, y a lo largo del año. En este ejemplo del hemisferio norte, en una zona por encima del trópico, el recorrido del Sol será más corto en diciembre (cuando se produce el solsticio de invierno, que es el día en el que el Sol sale y se pone más al sur en el hemisferio norte, o más al norte en el hemisferio sur) y más largo en Junio (cuando se produce el solsticio de verano, el día en el que el Sol sale y se pone más al norte en el hemisferio norte y más al sur en el hemisferio sur). En los equinoccios de primavera y otoño, el Sol saldrá justo por el este y se pondrá por el oeste.

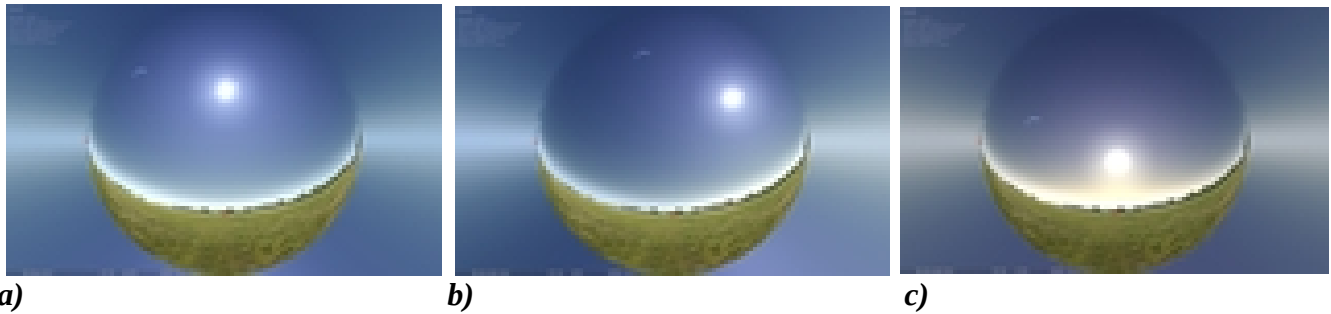


Figura 5. a) El cielo visto el día 4 de Febrero 2009, a las 12h51, desde la ciudad de México. El Sol esta a su punto de culminación. b) El cielo visto el mismo día a la misma hora, desde un lugar de la isla de Cuba a la misma latitud que Ciudad de México, pero con distinta longitud: el Sol ya pasó su punto de culminación y esta bajando hacia el Oeste. c) El cielo visto el mismo día a la misma hora, desde un lugar en Canadá, a la misma longitud que Ciudad de México, pero mucho más al norte (distinta latitud): el Sol esta culminando mucho más cercano del horizonte. Las imágenes han sido extraídas del programa de planetario Stellarium (www.stellarium.org)

3. El experimento

La idea de este experimento es la de medir la sombra mínima de un gnomon y la hora exacta en la que se produce dicha sombra, es decir, determinar la hora civil en la que se produce el mediodía local.

Ante de todo, se requiere un día soleado y de escaso viento.

Material

El material necesario para realizar las mediciones es:

- Una superficie horizontal (por ejemplo una mesa) bien iluminada por el Sol. Se usará un nivel para asegurarse de la horizontalidad de la superficie que usamos.
- Lo necesario para construir un gnomon vertical. Nosotros presentamos a continuación una posibilidad para realizar un gnomon. Se requieren pedazos de madera, clavos y un hilo.
- Una cartulina (folder). Se requieren tijeras para cortar la cartulina y hacer un orificio donde pasara el hilo del gnomon.
- Una pluma y unas hojas para apuntar los resultados.
- Un reloj (sincronizado con la hora civil, ver abajo).
- Una computadora con una conexión a Internet.

Descripción del experimento

En esta sección explicamos con detalle los pasos a seguir durante el experimento. Queremos dejar claro que la configuración que se muestra en las imágenes es sólo una sugerencia. Dejamos a criterio del profesor y los alumnos el sistema que consideren más adecuado para el experimento, siempre que se garantice la horizontalidad de la superficie y la verticalidad del gnomon.

- Instalar el plano horizontal (mesa) afuera, de tal maneja que sea al Sol el día entero. Es muy importante garantizar la horizontalidad de la superficie en la que vamos a colocar el sistema; para ello podemos usar un nivel (Foto 2).
- Para garantizar la verticalidad del gnomon, la configuración más segura es hacer un gnomon

colgante (ver Foto 1). Este consiste en un hilo, con un peso en el extremo y con un nudo (que va a ser nuestra marca) a una altura entre 10 y 20 centímetros por arriba del plano horizontal. Esto nos garantiza la verticalidad ya que el peso hace que el hilo apunte al centro de la Tierra. Hay varias maneras de armar el soporte del hilo, se puede ayudar de las fotos de este artículo o crearlo.

- Preparar la hoja de medidas (cartulina o folder): para que el hilo pase a través de nuestra cartulina, se debe hacer un orificio con una tijeras. Es muy importante asegurarse de que no toque el agujero de la cartulina por el que pasa (Foto 3) y tampoco que el peso toque el piso.
- Se deben sincronizar nuestros relojes con un reloj de referencia para tener la mayor precisión posible en la determinación de la hora. Hace unos años esto habría sido muy complicado, pero hoy en día existen varios sitios en Internet en los que podemos encontrar la hora dada por relojes atómicos. Se recomienda hacerlo antes del experimento y, para asegurarnos, volverlo a hacer después. Una página web en la que encontraremos la hora dada por un reloj atómico es: <http://www.la-hora.org>

Experimento:

Una vez el sistema montado, podemos comenzar el experimento:

- Realizar una medida de la posición de la sombra del nudo en el folder cada 5 o 10 minutos, a partir de las 11h30 de la mañana hasta las 14h30. Marcar el punto y anotar la hora (Foto 5). Cuando veamos que el Sol se está acercando a su punto más alto en el cielo (o que la sombra se acerca más del orificio donde pasa el hilo), podemos hacer mediciones con mayor frecuencia (2 o 3 minutos). En cualquier caso es recomendable que se hagan bastantes medidas para asegurarnos del éxito del experimento.
- Por último hay que medir la longitud del gnomon, es decir, la distancia (en centímetros y milímetros) entre el orificio por lo cual paso el hilo y el nudo. Cuidado que el folder sea bien horizontal al hacer esta medida.

Análisis de los resultados

La secuencia a seguir para el análisis de los resultados es:

- Debemos encontrar a qué hora civil (del reloj) se produjo la mínima sombra del gnomon (ver Foto 6). Anotamos la hora (o interpolamos entre dos puntos) y el tamaño de la sombra.
- Cuando tengamos todos los datos, procederemos a introducirlos en una página Internet (<http://132.248.1.102/Donde/>). Hay que rellenar un formulario en el que se nos va a solicitar el nombre de la escuela, el tamaño del gnomon y de su sombra en centímetros, la hora de la sombra mínima, y el estado en el que está la escuela si estamos en la República de México, o la diferencia entre nuestro horario civil y el horario UTC de tiempo universal en el caso de no estar en México (Figura 6).
- El resultado saldrá en forma de mapa de *google maps* (Figura 7) en el que se nos indica la posición que hemos obtenido a partir de los datos introducidos.

Para detalles acerca de las fórmulas que se han usado para determinar latitud y longitud, ir a la página Internet del experimento. Para profesores de bachillerato pueden ser útiles, ya que implican desarrollos trigonométricos elaborados.

4. ¿Por qué no ubiqué bien mi lugar? Las incertidumbres en el experimento.

Un concepto muy importante que se debe tener en cuenta es el del error experimental. Los jóvenes alumnos deben de tener claro que la realización de un experimento implica errores, lo cual no quiere decir que el experimento se haya hecho mal, sino que hay una serie de incertidumbres, como la horizontalidad de la base, la verticalidad del gnomon, la exactitud de la hora del reloj, la precisión en la marca de cada punto, etc. que pueden hacer que las medidas no sean todo lo precisas que uno desearía.

En nuestro experimento podemos identificar unas fuentes de error y asociarlas con los resultados: un error en la determinación de la hora de la sombra mínima se traduce en un error en la longitud. Un error en la medida de los tamaños (de la sombra o del gnomon) se traduce en un error sobre la determinación de la latitud.

Una incertidumbre relativamente normal sería de aproximadamente 100-150 km en línea recta. Si tenemos en cuenta que nuestro laboratorio es la Tierra (cuyo radio es de aproximadamente 6350 km) estamos equivocándonos en factores muy pequeños.

5. Conclusiones

Este experimento es bastante sencillo de realizar ya que no requiere mucho material. Por lo tanto puede ser el punto inicial de varias actividades didácticas para casi todos los niveles de alumnos. Se puede, por supuesto, hablar de geografía, de astronomía de posición, de historia (como se ubicaron los navegadores del siglo XVII), de matemáticas (trigonometría), etc.

Para animar los alumnos, se puede realizar un concurso para ver qué grupo obtiene la ubicación más cercana a la ubicación real de la escuela.

Nosotros, con mucho ánimo, hemos realizado el experimento en la terraza del Instituto de Astronomía. Como resultado, nos ubicamos en un lugar entre la ciudad de México y la ciudad de Puebla (70 km al este de México).

Se puede repetir el experimento varias veces para aumentar la precisión del resultado al tomar el promedio de las distintas longitudes (y latitudes) obtenidas.

6. Agradecimientos

Agradecemos a Julieta Fierro, Rafael Costero y Leonid Georgiev, del Instituto de Astronomía de la UNAM sus comentarios y sugerencias.



Foto 1. El sistema.



Foto 2. Verificación de la horizontalidad de la mesa.

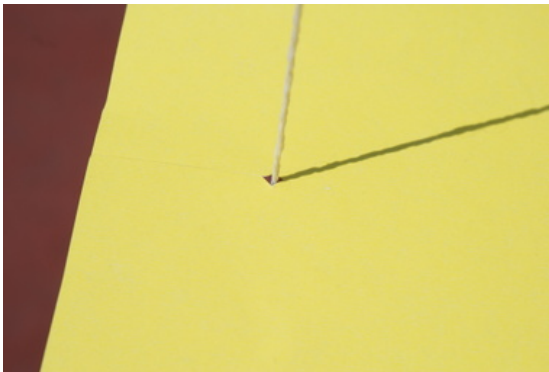


Foto 3. Verificar que el hilo se mueve libre en el agujero.

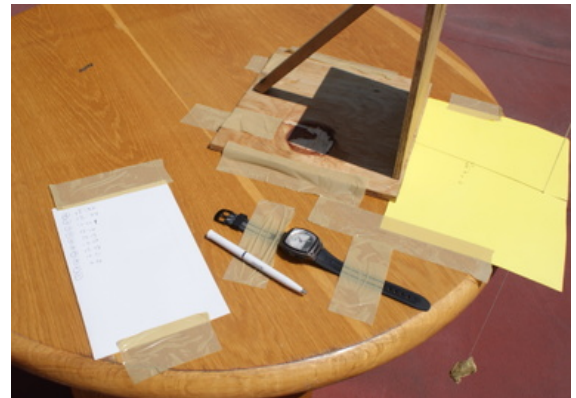


Foto 4. La mesa de trabajo con el reloj y la hoja donde se marcan los tiempos de cada medida.



Foto 5. Marcando la posición de la sombra del nodo cada 2 minutos.

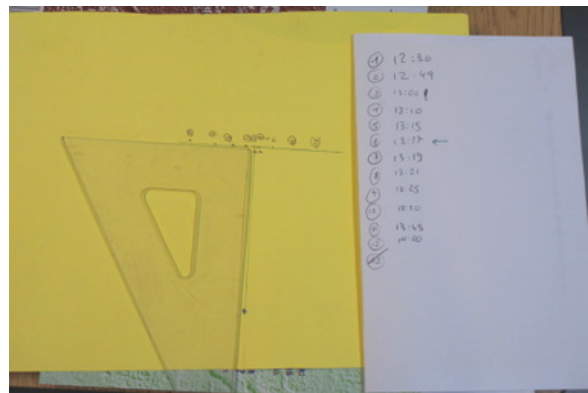


Foto 6. El resultado final, con la determinación del tamaño mínimo de la sombra y la hora correspondiente.

Escribe aquí el nombre de tu escuela:

Tu e-mail:

En que ciudad está tu escuela:

En que país está tu escuela:

Indica el tamaño del gnomon que usaste (en centímetros y milímetros, usando el punto para separar la parte decimal. Ejemplo: 9.4):

Indica si la sombra estaba en la dirección del norte o del sur:

Cuál es el tamaño mínimo de la sombra que mediste (en centímetros y milímetros, usando el punto para separar la parte decimal. Ejemplo: 9.4):

Si estás en la República de México, selecciona el estado donde estás:

Si no estás en México, se debe calcular la diferencia entre la hora de tu reloj y la hora UTC (que ahora vale 22h 31 m 06 s).
 Por ejemplo, si tu reloj indica ahora mismo 14h 31 m 06 s, la diferencia es de -8.
 Si estás en México, ya debes haber seleccionado un estado arriba. Si no, indica la diferencia con la hora UTC:

A qué hora (de tu reloj) ocurrió la sombra de tamaño mínimo:

Horas	Minutos	Segundos
<input type="text" value="13"/>	<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="17"/>

Cuál es la fecha de tu experimento:

Día	Mes	Año
<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="2008"/>

Tienes algún comentario:

Figura 6. Ejemplo del Formulario a rellenar en internet una vez se ha realizado el experimento.



Figura 7. Ejemplo de resultado del experimento. La latitud y longitud obtenidas son introducidas automáticamente en google maps y se nos muestra un mapa marcando el resultado.