

# Cálculo tamaño sombra de la Tierra a partir de un Eclipse Total de Luna

## Cálculo tamaño sombra de la Tierra a partir de un Eclipse Total de Luna

### Autores

Dr. **Miquel Serra-Ricart**. Astrónomo del Instituto de Astrofísica de Canarias.

Sr. **Juan Carlos Casado**. Astrofotógrafo [tierrayestrellas.com](http://tierrayestrellas.com), Barcelona.

Sr. **Miguel Ángel Pío Jiménez**. Astrónomo del Instituto de Astrofísica de Canarias.



### 1 – Objetivos de la actividad

Mediante esta actividad aprenderemos a medir el tamaño de la sombra que crea la Tierra sobre la superficie de lunar en un eclipse total de Luna. Para ello mediremos los tiempos de entrada y de salida de la sombra en su paso por encima de

varios cráteres lunares o la relación de curvaturas de la sombra terrestre frente a la de la Luna. Ambos métodos están descritos en ésta unidad.

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes:

- Conocer y describir la fenomenología básica de los eclipses.
- Conocer y aplicar técnicas de medida en imágenes.
- Tener nociones básicas de los movimientos reales y aparentes de los astros.
- Aplicar ecuaciones básicas de la física a datos que se obtienen de imágenes.
- Verificar la correcta dimensionalidad de las ecuaciones usadas.
- Asegurarse de la correcta utilización de unidades en la medida.

## **2 – Instrumentación**

La práctica o actividad se realizará a partir de imágenes digitales obtenidas durante un Eclipse Total de Luna. La base de la actividad fue el Eclipse Total de Luna del día 15 de abril de 2014.

## **3 – Fenómeno**

### **3.1.- ¿Qué es un eclipse de Luna?**

Un eclipse lunar ocurre cuando la Luna pasa directamente por la sombra de la Tierra. Esto sólo puede ocurrir cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean exactamente, o muy cerca, con la Tierra en el centro de los tres. Por lo tanto, un eclipse lunar sólo puede ocurrir una noche de luna llena.

### **3.2.- Condiciones para que ocurra un eclipse**

La mayoría de las veces la Luna se encuentra por encima o por debajo del plano de la eclíptica (es decir, el plano definido por la órbita de la Tierra alrededor del Sol). Para que se produzca un eclipse, la Luna tiene que estar en el plano de la eclíptica, o muy cerca de él, y la Luna en fase de Nueva (eclipse solar) o Luna Llena (eclipse lunar).

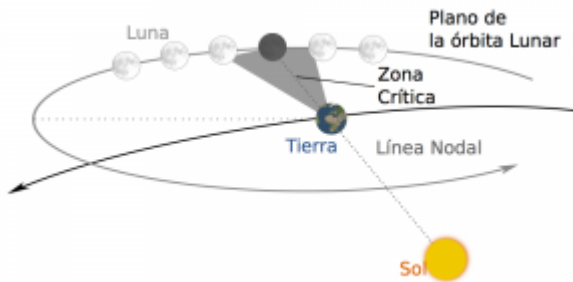


Figura 1: El plano de la órbita de la Luna. La “zona crítica” indica una franja en la que un eclipse puede ocurrir.

Los eclipses de Luna se pueden observar desde cualquier lugar de nuestro planeta desde el que la Luna se encuentre por encima del horizonte a la hora del eclipse. Y al contrario de los eclipses de Sol, en los que el horario de las fases del eclipse depende de la posición geográfica del observador, en los eclipses lunares estos serán los mismos independientemente del lugar de observación.

Además, a la distancia que se encuentra la Luna de la Tierra, el cono de sombra tiene un diámetro aproximado de 9200 km, mientras que el diámetro de la [Luna](#) es de 3476 km. Esta gran diferencia provoca que dentro del cono de sombra entre 2,65 veces la Luna, y en consecuencia, los eclipses permanezcan en su fase total durante un tiempo prolongado.

Para que la Luna pueda ser alcanzada por la sombra de la Tierra es necesario que la longitud al nodo no supere  $12^{\circ} 15'$ . Si es inferior a  $9^{\circ} 30'$ , se producirá un eclipse total de Luna. En latitud, como máximo será  $1^{\circ} 25'$  para eclipses penumbrales y para totales  $24'$ .

Por lo tanto, en estas circunstancias de cercanía al nodo, se abre una “ventana” durante  $37 \frac{1}{2}$  días en los que se darán

condiciones de eclipse. Estas configuraciones tienen lugar dos o tres veces al año -cada 173,31 días- en las llamadas estaciones de eclipses. El año de eclipses (346,62 días) es el tiempo empleado para que se repita una alineación del Sol con la Luna en el mismo nodo y la Tierra, es decir, contiene exactamente dos estaciones de eclipses.

Las líneas orbitales nodales de la Luna (Figura 1) no tiene una orientación fija, pero giran alrededor de  $20^\circ$  por año, dando una vuelta completa en 18,6 años. Esto significa que las fechas en que se producen los eclipses cambian cada año. Por ejemplo, los eclipses de 2001 fueron en los meses de enero y febrero, junio y julio, y en diciembre, los eclipses de 2003 se produjeron en mayo y noviembre y los de 2006, en marzo y septiembre. El movimiento de los nodos orbitales significa que los eclipses se producen a lo largo de la eclíptica.

### 3.3.- Tipos de eclipses lunares

Hay diferentes tipos de eclipse lunares.

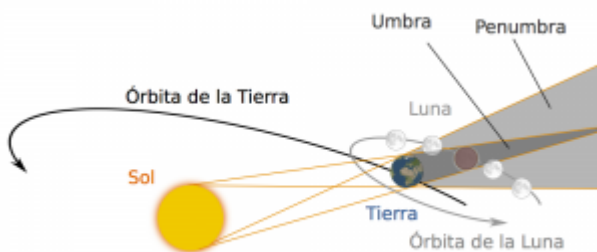


Figura 2: La umbra de la Tierra y la sombra de la penumbra. Dentro de la sombra umbral central, la Luna no recibe luz directa del Sol. Sin embargo, dentro de la sombra de penumbra, sólo una parte de la luz del sol está bloqueada.

**1) Penumbrales:** La Luna solo es tapada, parcial o totalmente, por la penumbra terrestre. En cualquier caso el oscurecimiento de la imagen lunar es muy leve y solo perceptible si hay un gran porcentaje de ocultación (figura 3). Por esta misma razón es muy difícil apreciar los contactos del eclipse. Este tipo de eclipse es poco importante y a menudo no se cita en los calendarios populares.



Figura 3: Imagen de la Luna sin eclipsar (a la izquierda) y eclipsada por la penumbra totalmente (a la derecha) durante el eclipse lunar del 16 de mayo de 2003 (imagen J.C. Casado – tierrayestrellas.com).

**2) Parciales:** Nuestro satélite natural resulta oculto en parte por la umbra terrestre. El borde de la umbra es oscuro, y perfectamente discernible los instantes de los contactos, aunque presenta una borrosidad debido a que la Tierra posee una atmósfera que difumina la definición del contorno de su sombra.

**3) Totales:** La Luna penetra completamente en la umbra de la Tierra. Debido a que el diámetro de nuestro planeta es cuatro veces mayor que el lunar su sombra también es mucho más ancha, por lo que la totalidad de un eclipse lunar puede prolongarse hasta 104 minutos (figura 4).



Figura 4: Composición fotográfica del eclipse lunar del 16 de Mayo de 2003. Imágenes tomadas al comienzo (a la derecha), medio y final (a la izquierda) de la totalidad (imagen J.C. Casado – tierrayestrellas.com).

En la figura 5 se muestra un esquema donde figuran todos los tipos de eclipses lunares y sus contactos o fases.

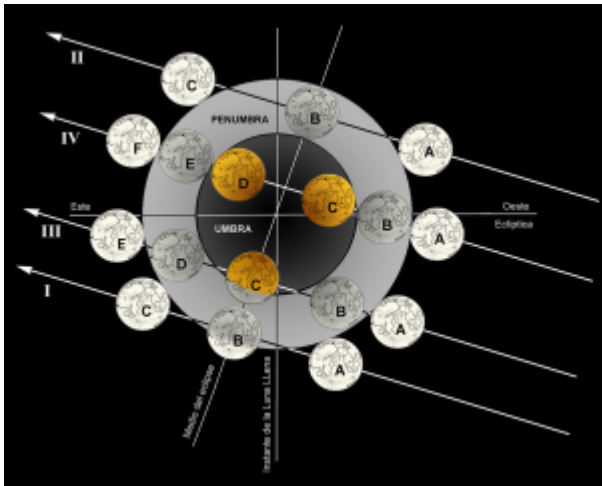


Figura 5: Diferentes tipos de eclipses lunares. Se nombran con letras los diversos contactos de cada eclipse y la posición en el medio del fenómeno excepto en el eclipse total (IV). Trayectoria I (eclipse penumbral parcial), A: comienzo del eclipse, B: medio del eclipse penumbral, C: final del eclipse. Trayectoria II (eclipse penumbral total), en este eclipse no se indica el comienzo y final de la fase penumbral, por coincidir casi con el medio. A: comienzo del eclipse, B: medio, C: final del eclipse. Trayectoria III (eclipse parcial), A: comienzo del eclipse penumbral, B: comienzo del eclipse umbral o del eclipse parcial, C: medio del eclipse parcial, D: final del eclipse parcial o del eclipse umbral, E: final del eclipse penumbral. Trayectoria IV (eclipse total), A: comienzo del eclipse penumbral, B: comienzo del eclipse umbral, C: comienzo de la totalidad, D: final de la totalidad, E: final del eclipse umbral, F: final del eclipse penumbral (esquema de J.C. Casado).

### 3.4.- Secuencia de los eclipses

**Eclipse penumbral:** como se ha mencionado más arriba no resultan distinguibles los contactos. Tan solo es perceptible una ligera atenuación en el brillo del disco lunar, sobre todo en la zona más cercana al borde de la umbra.

**Eclipse parcial:** Después de la fase penumbral, que dura aproximadamente una hora, la umbra se muestra oscura y bien visible su borde curvado, aunque éste presenta una falta de definición. Con el telescopio es posible apreciar el avance de la umbra tapando la superficie lunar y sus detalles orográficos, como cráteres y montañas.

**Eclipse total:** El eclipse se inicia como un eclipse penumbral, continuando con una fase de eclipse umbral. Una vez que la umbra cubre por completo el disco de la Luna, éste no desaparece sino que toma una coloración rojiza, aunque los tonos y el brillo en esta fase de totalidad varían de un eclipse a otro. Por término medio la iluminación de la Luna desciende unas 10.000 veces en la totalidad, haciéndose visibles todas las estrellas del firmamento como si no hubiera Luna. La causa de que el disco lunar aún presente una iluminación se debe a la atmósfera terrestre, que actúa como una lente refractando rayos solares y desviándolos hacia la Luna. La coloración rojiza se produce por una absorción en la atmósfera de nuestro planeta, más acusada en el azul que en el rojo. La capa de ozono, la presencia de polvo de origen volcánico y estado de la atmósfera por la zona donde pasan los rayos solares durante el eclipse, así como la actividad solar, son los principales responsables de los cambios observados de un eclipse a otro en cuanto a la luminosidad y la coloración del disco lunar totalmente eclipsado. Tras la totalidad la umbra se retira como en un eclipse parcial y termina con una fase penumbral (figura 6)



Figura 6: Desarrollo del eclipse total de Luna del 4 de Abril de 1996 durante casi cuatro horas, fotografiado a intervalos regulares desde las Bardenas Reales (Navarra) (imagen J.C. Casado – tierrayestrellas.com).

### **3.4.- Mapas de eclipses lunares. Eclipse 15 abril 2014**

Al igual que en los eclipses solares, para representar las zonas de la Tierra donde será visible el eclipse de Luna se

emplean unos mapas del mundo donde se trazan unas curvas que muestran las regiones afectadas por el eclipse.

La proyección cartográfica que se emplea es la cilíndrica de Mercator, la más común para representar el mundo globalmente. En ella se muestran fielmente las zonas ecuatoriales, pero deforma y aumenta las distancias paulatinamente hacia las regiones polares.

Como ejemplo vamos a ver una imagen del eclipse total de Luna del próximo 15 de abril del 2014 (figura 7).

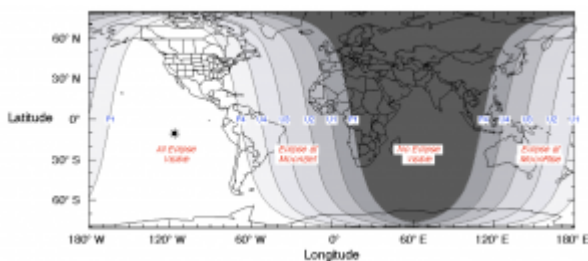


Figura 7: Mapa del eclipse total de Luna del próximo 15 de Abril 2014

La región donde será visible por completo todo el desarrollo del fenómeno (zona central más sombreada) aparece despejado. Por el contrario las zonas de la Tierra donde no será visible el eclipse se indican con la zona sombreada. El grupo de regiones situadas a la derecha del mapa, en las zonas azul claro con el texto "Eclipse at MoonRise". Significa que una determinada fase del eclipse ocurre cuando la Luna esté saliendo por el horizonte local. Análogamente, a la izquierda del mapa, hay otras zonas delimitadas de azul claro con el texto "Eclipse at MoonSet", que indica las regiones de la Tierra donde ocurre una fase del eclipse en la puesta de Luna por el horizonte local.

La duración del eclipse será de 3h34m (totalidad 1h17m) con los siguiente tiempos:

- Comienzo de la Parcialidad-U1: 15:58 UT (0:58 local Perú, 6:58 Canarias, 7:58 CET).
- Comienzo de la Totalidad-U2: 7:06 UT (2:06 local Perú,



8:06 Canarias, 9:06 CET).

- Máximo Totalidad: 7:45 UT (2:45 local Perú, 8:45 Canarias, 9:45 CET).
- Final de la Totalidad-U3: 8:24 UT (4:24 local Perú, 9:24 Canarias, 10:24 CET).
- Final de la Parcialidad-U4: 9:33 UT (4:33 local Perú, 10:33 Canarias, 11:33 CET).

#### **4.- Cálculo del tamaño de la sombra de la Tierra. Metodología**

El tamaño de la sombra de la Tierra en un Eclipse Total de Luna depende del estado de nuestra atmósfera, sobretodo, de sus capas más altas.

El experto en astronomía planetaria [Erich Karkoschka](#) ha desarrollado un modelo de atmósfera terrestre que incluye la capa de ozono. El modelo muestra que durante un eclipse total de Luna si la Antártida se encuentra en una posición tal que los rayos solares atraviesan su atmósfera camino hacia la luna, el “agujero de ozono” debe refractar la luz de forma que la sombra terrestre aparecerá mayor que la derivada de los cálculos geométricos. Si los rayos solares atraviesan zonas más cercanas al ecuador, donde la densidad de ozono es mayor, el tamaño de la sombra terrestre será menor.

A continuación detallaremos los principales métodos para el cálculo del tamaño de la sombra terrestre a partir de imágenes de un eclipse lunar.

##### **4.1 Método 1. Tiempos de contactos en cráteres lunares**

###### **→ Observación con Telescopio propio**

El observador debe reconocer a la perfección los cráteres que vaya a cronometrar. Es más conveniente atenerse a unos pocos bien identificados que intentar abarcar una lista más extensa.

Se puede considerar como ejemplo la observación de uno de los

cráteres más fáciles de identificar: Platón (aproximadamente en el medio de la figura 7). Este cráter de 101 Km. de diámetro se encuentra cerca del centro del disco lunar pero situado hacia el borde o limbo norte de éste. Muy cerca de él se hallan los montes Tenerife, una cadena montañosa que alcanza 1.450 m de altitud, extendiéndose más de 100 Km.

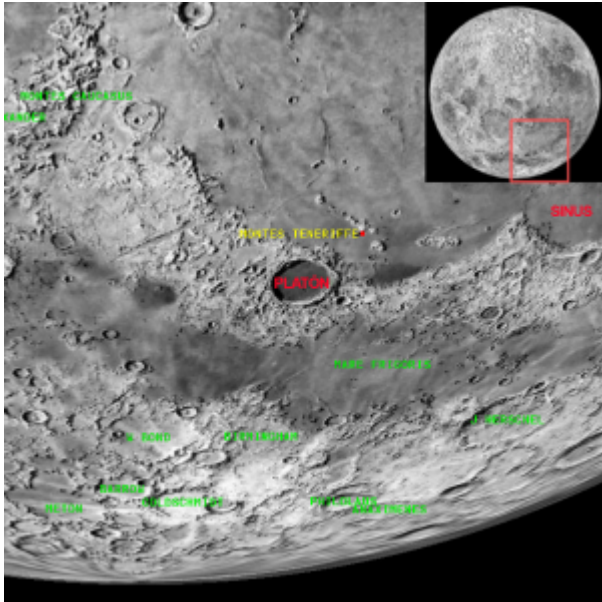


Figura 8: Posición y aspecto del cráter Platón y los montes Tenerife en el disco lunar (arriba a la derecha). Imagen extraída del programa Virtual Moon Atlas.

Para cada cráter hay que cronometrar el paso de la sombra por uno de los bordes, o un punto de referencia en el mismo que se determine a priori, esto es, los cronometrajes de contacto a la llegada de la umbra (inmersión) y a la salida (emersión), aunque en este segundo caso resultará más difícil el cronometraje por estar oculto el cráter por la umbra terrestre.

Debe tenerse en cuenta que el borde de la umbra es difuso y seguramente provocará una ligera indeterminación en la apreciación del contacto. Como hemos mencionado se deberá disponer de un reloj sincronizado con algún patrón horario.

#### → Observación con imágenes de archivo

En este caso, el observador tendrá en cuenta los tiempos de toma de cada una de las imágenes. Para el eclipse del 15 de

abril de 2014 el proyecto GLORIA realizará una emisión en directo y en la web del fenómeno. Las imágenes estarán disponibles en la web y la hora se indicará en el propio nombre del archivo (ver ref12).

Realicemos ahora un caso práctico, y tomemos como referencia las imágenes tomadas para el eclipse total de Luna que se produjo el 3 de marzo del año 2007.

En primer lugar seleccionamos un cráter con el que hacer la observación. En este caso se ha elegido Timocharis, en el interior de una gran explanada llamada Mare Imbrium (ver la figura 9, imagen que se ha obtenido utilizando el software Virtual Moon Atlas, ver ref9).

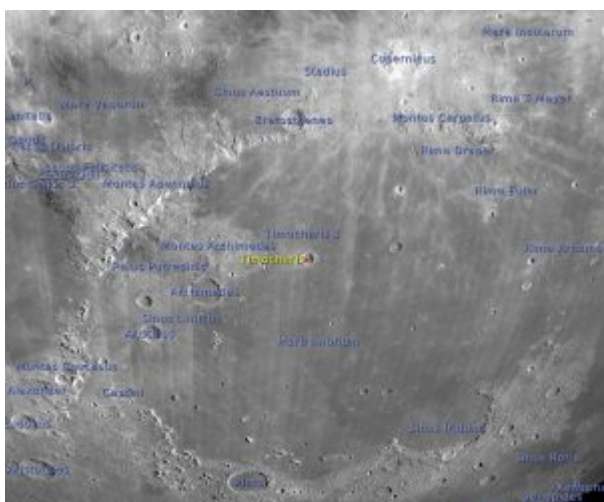


Figura 9: Mapa del Sur-Este Lunar donde se ha marcado la localización del cráter Timocharis, elegido para realizar el ejemplo. Imagen obtenida con el software de Virtual Moon Atlas (ver ref9)

A partir de las imágenes tomadas en el eclipse total (ver figura 10) calculamos la diferencia entre la inmersión y emersión de la sombra lunar que es igual a 2,76 horas.

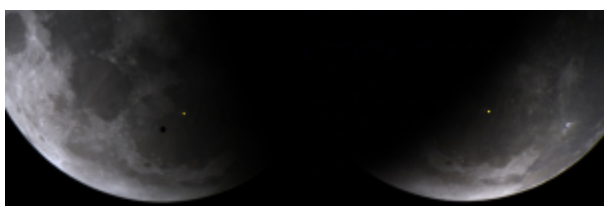


Figura 10: El punto amarillo indica la posición de la marca de referencia en el cráter que se ha utilizado de referencia para

el ejemplo. La imagen de la izquierda corresponde a la entrada de la sombra a las 21:50:30 UT, y la de la derecha corresponde a la salida, 0:36:6 UT (imágenes OGS-IAC).

### **Cálculos finales**

Para determinar el valor del tamaño de la sombra de la Tierra, debemos conocer unos datos adicionales.

Calculemos la velocidad de traslación de la Luna utilizando, el tiempo sidéreo de la Luna.

Si la Luna tarda 27,3 días (655,2h) en dar una vuelta completa alrededor de la Tierra, y una vuelta son  $360^\circ$ , la velocidad de la Luna en su giro es de:

$$v = 360^\circ / 655,2 \text{ h} = 0,549 \text{ [}^\circ / \text{h]}$$

o lo que es lo mismo:

$$w = 2\pi / 655.2 \text{ [1 / h]} = 9.6 \times 10^{-3} \text{ [radianes / h]} = 9.6 \times 10^{-3} \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

En mediciones angulares, el radián es una cantidad adimensional es decir, que no tiene ninguna unidad asociada con ella. Esto surge de la definición de un radián como el arco cuya longitud es igual a la del radio. Dado que las unidades de medida se cancelan, esta cantidad no tiene dimensiones.

Para pasar de velocidad angular a velocidad lineal en km/h,  $v$ , usamos la relación que existe para un objeto en movimiento circular,  $v=Rw$ , donde  $R$  es el radio medio de la órbita y  $w$  es la velocidad angular en radianes/h. En este caso  $R = 384.352$  kilómetros, la distancia media de la Luna a la Tierra

Entonces:

$$v = 384,352 \text{ [km]} \times 9.6 \times 10^{-3} \text{ [h}^{-1}\text{]} \rightarrow v = 3682.8 \text{ [km / h]}$$

Considerando el tiempo medido del paso de la sombra, y aplicando un poco de cinemática:

$$D_{\text{Sombra}} = v t = 3682,8 \times 2,7h = 9943,56 \text{ km} \quad R_{\text{Sombra}} = D_{\text{Sombra}} / 2 = 4971,78 \text{ km}$$

donde  $D_{\text{Sombra}}$  es el diámetro de la sombra en km, y  $R_{\text{Sombra}}$  su radio.

Tener mucho cuidado en mantener las mismas unidades durante todo el cálculo.

## 4.2 Método 2. Método de Hiparcos

Vamos a seguir los pasos de este célebre personaje de la historia, y a determinar la relación existente entre los tamaños de la Tierra y la Luna, y determinar así el radio de la Tierra (en realidad de su sombra) a partir de imágenes tomadas durante un eclipse total de Luna.

Partiendo de una imagen de la fase parcial de un eclipse total de Luna, determinamos el valor del radio de la sombra de la Tierra por un lado y por otro, en la misma imagen, determinaremos el radio de la Luna. Así, podremos sacar una relación entre los radios de la sombra de la Tierra y de la Luna, y conociendo el radio real de la Luna, podremos determinar entonces el radio de la sombra de la Tierra.

Hiparco en realidad, para poder realizar los cálculos consideró que el Sol se encontraba en el infinito y por ello sus rayos llegaban al conjunto Tierra/Luna de forma paralela, por lo que la sombra proyectada sobre la Luna de la Tierra tendría el mismo tamaño que la propia Tierra y así calculó la relación entre el radio de la Tierra y la Luna, y de ahí el radio de la Luna, pues tenía una estimación hecha por Eratóstenes (Cirene) del radio de la Tierra. En realidad sabemos que esta premisa no es cierta, y que el tamaño de la sombra de la Tierra varía por muchas razones, pero las más relevantes quizás serían las propias variaciones de la atmósfera Terrestre, o el propio cambio en la distancia entre la Tierra y la Luna que no es constante.

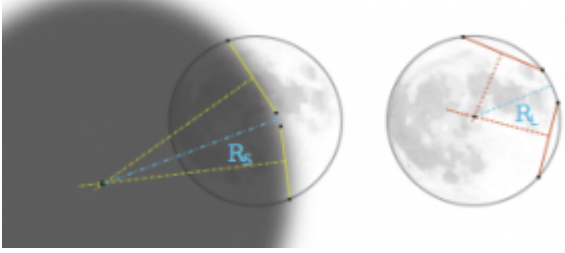


Figura 11: Diagrama de cómo medir el radio de la sombra de la Tierra y de la Luna a partir de una imagen impresa o utilizando un software de tratamiento de imágenes.

Hiparco llegó a la conclusión que la relación entre el radio de la Tierra y la Luna era de 3,7 veces y tomando el valor del radio de la Tierra que calculó Erastóstenes (276-194 a.C.) de 6366 km, le permitió deducir que el radio de la Luna era de 1719 km, errando en solo 3 km con el valor medio real.

En nuestro caso, aplicaremos la relación en sentido contrario y a partir del radio de la Luna (1.722 km), y la relación entre los radios de la sombra de la Tierra y de la Luna, calcularemos el valor del radio de la sombra.

**Método directo:** Se toma una imagen del eclipse donde aparezca la Luna completa, y como se muestra en la figura 10, se trazan al menos dos rectas secantes entre puntos que marquemos en el perímetro de la Luna por un lado y de la sombra por otro. Después, como se muestra en la figura, se calculan rectas perpendiculares a las secantes y en el punto donde se corten, ahí se encontrará el centro de cada circunferencia para, ya calculado el centro, medir entonces el radio de la Luna por un lado y de la sombra por otro lado. Así sólo restará calcular el ratio de ambos radios, que deberá de ser del orden de 2,8.

**Método indirecto:** En este caso se considera una imagen tomada durante el eclipse y en ella, con un software de tratamiento de imágenes, se obtendrán las coordenadas X e Y en la imagen de hasta 7 puntos en el borde de la Luna (de su circunferencia) y en el borde de la sombra.

Después se tratará de calcular los radios de la circunferencia de la sombra y la luna a partir de un ajuste de mínimos

cuadrados. Para facilitar los cálculos es posible acceder a la siguiente hoja de cálculo:

<http://goo.gl/k07PSa>

En la figura 12 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados a partir de una imagen tomada en la fase de parcialidad del eclipse total de Sol del 3 de marzo del año 2007. Aplicando la hoja de cálculo a los puntos seleccionados que se muestran en la figura 12 se deduce relación de tamaños de 2,72 y suponiendo un radio lunar de 1722 km un radio de la sombra terrestre de 4692 +/- 43 km

	A	B	C	D	E
1					
2		Luna		Sombra Tierra	
3	X [pix]	Y [pix]		X [pix]	Y [pix]
4	156	740		265	1207
5	366	421		637	1232
6	596	234		915	1228
7	916	90		1215	1286
8	1328	72		1569	1322
9	1757	236		1755	1336
10	2040	457		2011	1500
11			Relación tamaños Sombra/Luna:	2.72	
12			Radio de la Sombra de la Tierra (km)	4.692 ± 43	
13			Error estimado (km)	43.39	
14					

Figura 12: Puntos seleccionados para la imagen mostrada en la figura 13.



Figura 13: Fase parcialidad eclipse total de Luna del 3 de marzo de 2007. En la imagen de muestran los 7 puntos seleccionados en el perfil de la sombra y 7 en la Luna para el cálculo del tamaño de la sombra terrestre (imagen J.C. Casado).

## REFERENCIAS

**ref1.** Grupo de extensión científica del IMAF – CSIC. Fundación BBVA. Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna. VI Feria de Madrid por La Ciencia 2005. (<http://www.csicenlaescuela.csic.es/feria.htm>)

**ref2.** NASA Eclipse Website (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>).

**ref3.** REYNOLDS, M.D. y SWEETSIR, R.A. Observe eclipses. Observe Astronomical League Publications, Washington (USA), 1995. Sky and Telescope, Sky Publishing Corporation.

**ref4.** Lunar eclipse preview. Fred Espenak (2012). (<http://www.mreclipse.com/Special/LEnext.html>)

**ref5.** Wikipedia. ([http://es.wikipedia.org/wiki/Eclipse\\_lunar](http://es.wikipedia.org/wiki/Eclipse_lunar)).

**ref6.** Portal web del USNO sobre eclipses, una referencia sobre el tema. Contiene mapas y catálogos de eclipses del pasado y el futuro <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/UpcomingEclipses.php>

**ref7.** Wikipedia. Historia de la observación Lunar ([http://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_la\\_observaci3n\\_lunar](http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_observaci3n_lunar))

**ref8.** Wikipedia. Historia y vida de Hiparcos. ([http://es.wikipedia.org/wiki/Hiparco\\_de\\_Nicea](http://es.wikipedia.org/wiki/Hiparco_de_Nicea))

**ref9.** Full moon atlas: <http://www.lunarrepublic.com/atlas/index.shtml> (mapa on-line cliclable de la Luna llena, identifica cráteres con medidas)

**ref10.** Virtual Moon Atlas (gratuito). Excelente Atlas Lunar disponible para los sistemas operativos Windows, Mac OSX y Linux: <http://www.ap-i.net/avl/en/start>

**ref11.** NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Primer mosaico interactivo del Polo Norte



Lunar: <http://lroc.sese.asu.edu/gigapan/>

**ref12.** Imágenes parcialidad eclipses de Luna ([Directorio FTP](#), <http://goo.gl/YMo5Kt>)