

Eclipse, umbra, penumbra y antumbra
Guía para la XXVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra
para estudiantes de preparatoria de Baja California
Viernes 31 de mayo de 2024
Salón de usos múltiples del CICESE
Ensenada, Baja California

INTRODUCCIÓN

Los eclipses de Sol duran apenas unos minutos pero están presentes indirectamente en nuestras vidas todos los días. Por citar un ejemplo, en los sistemas de posicionamiento global (GPS) de los celulares. Otro ejemplo: en los globos flotantes que adornan las fiestas de cumpleaños. Y otro más: en las fotografías. ¿Cuál es la relación en cada caso? Hacia el final de la guía se darán más pistas. Por ahora revisaremos un concepto de geometría muy antiguo y muy simple. Todos lo manejamos a diario y a todas horas cuando inconscientemente estimamos distancias y tamaños de objetos a nuestro alrededor. Matemáticamente se expresa simplemente como la división de una distancia entre otra. Se utilizará más adelante para predecir si un eclipse será total o de otro tipo. Comenzamos por desmentir el dicho popular de que no se puede tapar el Sol con un dedo, porque de hecho sí se puede. Basta con acercar un dedo lo suficiente al ojo para tapar el Sol. Y lo mismo pasa en un eclipse. El diámetro de la Luna es muchas, muchísimas veces más pequeño que el del Sol, y sin embargo lo eclipsa porque se encuentra mucho más cerca de la Tierra. Una cosa compensa a la otra. Los antiguos griegos que todo lo reducían a fórmulas matemáticas entendían esta compensación diciendo que ambos objetos, el cercano y el lejano, tienen el mismo tamaño angular como se muestra en la Figura 1a. Dada una abertura entre las líneas rectas el arco que

subtiende la abertura es mayor en el círculo de mayor radio. Viendo los arcos desde el centro del círculo el más pequeño eclipsará exactamente al más grande. De hecho, un arco de un milímetro muy cerca del centro eclipsaría al arco mayor. Este tipo de observaciones llevaron a los griegos a identificar que dividiendo la longitud de un arco entre el radio del círculo que le corresponde da siempre lo mismo sin importar el tamaño del círculo. Esta división o razón del arco al radio caracteriza la abertura o ángulo que forman las dos rectas. Según esta definición, el ángulo α no tiene dimensiones porque se divide una longitud entre otra longitud. Sin embargo, por conveniencia se dice que el ángulo tiene unidades de radianes para distinguirlo de la otra convención en que se utilizan grados. Esta otra convención viene de Babilonia hoy Irak donde en lugar de utilizar una base de 10 como lo hacemos ahora utilizaban una base de 60. Su influencia está presente entre nosotros en que aún dividimos un ángulo de 1 grado en 60 minutos y un minuto en 60 segundos. Y lo mismo dividimos una hora en 60 minutos y un minuto en 60 segundos. Por otro lado, la vuelta completa en un círculo corresponde a 360 (60×6) grados lo cual equivale al valor de 2π radianes. Esto es porque la circunferencia de un círculo de radio r es $2\pi r$, la cual al dividirla por r nos da el valor de 2π . Esto nos lleva a que la razón $360/2\pi$ debe ser igual a la razón α_g/α_r , donde α_g es cualquier ángulo en grados y α_r el correspondiente ángulo en radianes. Multiplicando la igualdad en ambos lados por α_r sigue siendo una igualdad pero ahora mucho más útil porque el término $(\alpha_g/\alpha_r)\alpha_r$ es simplemente α_g . El resultado es la fórmula para pasar de radianes a grados. En algunas situaciones como es el caso de los eclipses es muy fácil calcular tamaños angulares en radianes. Cuando el tamaño angular es pequeño se puede reemplazar el arco por una recta como se muestra en la Figura 1b. El tamaño angular

del Sol y de la Luna en radianes se pueden calcular conociendo sus diámetros y distancias a la Tierra y luego expresarlo en grados que es la unidad más familiar.

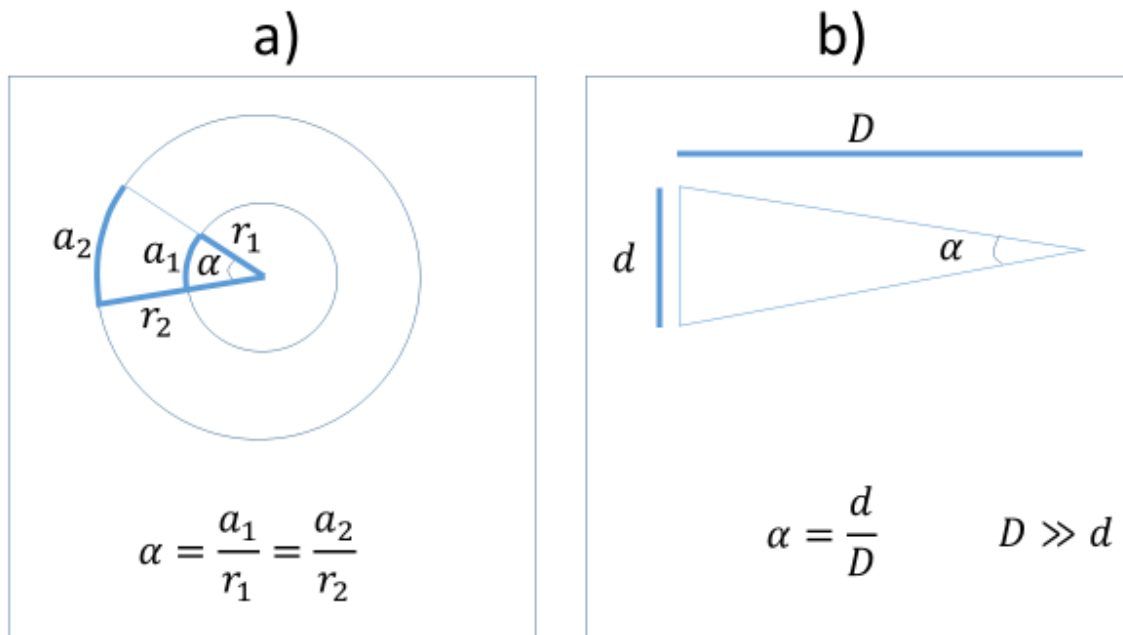


Figura 1. a) Definición de ángulo en radianes. b) Aproximación para ángulos pequeños.

UMBRA, PENUMBRA Y ANTUMBRA

La Figura 2 tomada de Wikipedia muestra un esquema de la Luna y el Sol en dos situaciones, a la izquierda la Luna está muy cerca de la Tierra la cual está representada por la línea horizontal. Salen dos líneas de cada lado del Sol que a su vez pasan por ambos lados de la Luna. Estas líneas definen dos tipos de sombra, una más acentuada y la otra más tenue. A la primera la llaman umbra y a la segunda penumbra. A la derecha se presenta la misma situación pero la Luna está más alejada de la Tierra. En este caso las líneas que salen de los lados del Sol definen un tercer tipo de sombra al que llaman antumbra. Representan con la letra A la umbra, con la B la antumbra y con la C a la

penumbra. En la parte inferior de la figura se identifica a la A con un eclipse total de Sol, a la B con uno anular y a la C con uno parcial.

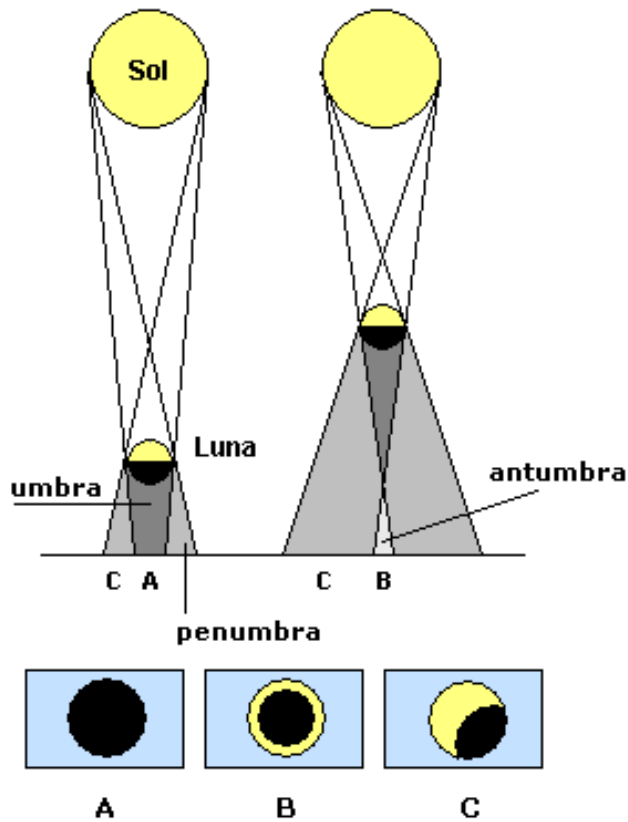


Figura 2. Esquema de un eclipse solar. Eclipse total A, eclipse anular B y eclipse parcial C. Ni las distancias ni los tamaños están a escala. (Tomado de Wikipedia)

Para entender mejor el esquema de Wikipedia es conveniente considerar otras situaciones como se ilustra en la Figura 3. La Figura 3a muestra cómo sería la sombra de la Luna sobre la Tierra si los rayos de luz del Sol fueran exactamente paralelos entre sí. La sombra sería del tipo umbra y su proyección sobre la Tierra sería del mismo tamaño que la luna, o sea de varios miles de kilómetros de diámetro. Sabemos que la sombra no es tan grande porque no cubrió al mismo tiempo ciudades tan cercanas como Mazatlán y Torreón que se encuentran a 400 km una de la otra. La Figura 1b muestra el caso de

suponer que el Sol es muy pequeño y que está relativamente cerca de la Tierra y la Luna. La sombra en este caso sería mucho más grande que en el caso anterior por lo que tampoco este modelo explica lo que pasa en un eclipse real. En el eclipse del 8 de abril de 2024 Mazatlán estuvo en la umbra y Tijuana en la penumbra. Ninguna de las suposiciones mostradas en las Figuras 3a y 3b explica la penumbra, la zona medio oscura medio iluminada, y tampoco la antumbra que corresponde a un eclipse anular (anillo).

En la Figura 2 ni las distancias ni los tamaños están a escala. Tampoco los ángulos. En realidad los rayos son casi paralelos pero debido a las largas distancias es que se forman los conos. Dos rectas casi paralelas eventualmente convergen en un punto y a la vez, por el lado opuesto, se separan cada vez más. En el cuento El Escarabajo de Oro de Edgar Allan Poe escrito en 1843, el autor intermezcla varias ideas muy interesantes en la búsqueda del tesoro enterrado de un pirata famoso. Una de las ideas, la crucial para encontrar el tesoro, tiene que ver con el trazado de una línea recta desde el tronco de un árbol. Un pequeño error cerca del tronco lleva con la distancia al lugar equivocado. Para muchos críticos literarios es el mejor cuento del escritor. Tiene apenas cinco páginas y lo pueden encontrar en pdf en el Internet.

Recordarán que según se discutió en la olimpiada del año pasado Eratóstenes estimó el radio de la Tierra suponiendo que las rayos de luz del Sol llegaban paralelos a la Tierra porque el Sol se encuentra muy lejos. Si bien esta suposición es correcta para su problema no es aplicable al caso de los eclipses. Verán por qué. En la Figura 3c se

representan rayos saliendo de diferentes partes del Sol. Los que salen de la parte central son obstruidos por la Luna resultando una sombra relativamente grande como la de la Figura 3b. Las líneas de color negro que salen de las partes superior e inferior delimitan una especie de cono de sombra cuyo diámetro se hace más pequeño al acercarse a la Tierra. Dentro de ese cono no se puede ver el Sol porque no llega luz ni de arriba ni del centro ni de abajo. Esta es la umbra: sombra total. La clave para entender la penumbra es la línea amarilla que sale del polo superior y que pasa cerca del círculo que representa la Luna. Los rayos que representa esta línea iluminan la sombra grande de la Luna que definen los rayos que salen del ecuador del Sol. Esta zona está entonces oculta para una parte del Sol pero no para otra. O sea, está medio oscura y medio iluminada. Esta es la penumbra. Y lo mismo para la línea amarilla que sale del polo inferior, ahora iluminando la zona por debajo de la umbra. Pero esto no es todo, la penumbra se extiende todavía más hacia arriba y hacia abajo. Esto se ilustra en la Figura 3d donde las líneas gruesas que salen de los polos del Sol y pasan tangenciales a los polos opuestos de la Luna definen una nueva sombra. Pueden comprobarlo trazando rayos en cualquier dirección desde cualquier punto entre los polos del Sol. Las líneas oscuras delimitan una nueva sombra sobre un área que estaba iluminada. Como esta sombra se extiende más allá de la penumbra de la Figura 3c, a una zona que estaba iluminada entonces tendremos una nueva penumbra. Esto es, una zona de sombra que por otro lado también está iluminada.

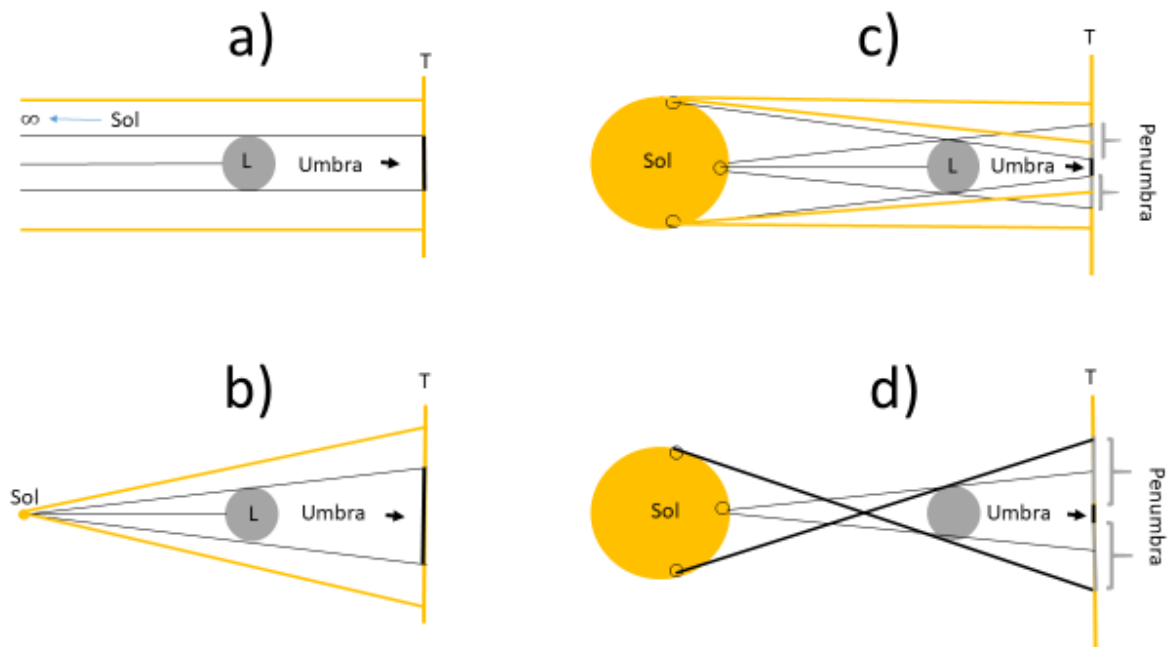


Figura 3. a) Sombra de la Luna en caso de rayos paralelos. b) Sombra de la Luna en caso de Sol pequeño y cercano. c) Formación de la penumbra debido a que el Sol es una fuente extendida. d) Crecimiento de la penumbra debido a fuentes opuestas.

La Figura 4 es una fotografía de un arreglo casero que muestra la formación de la umbra y la penumbra. En Internet podrán encontrar otras versiones del arreglo. En la fotografía el diámetro del círculo pequeño es 1 cm y el del grande es 3.7 cm. Tienen la misma proporción que los diámetros de la Luna y la Tierra por lo que también pueden simular eclipses lunares. Sin embargo, se darán cuenta que es muy difícil simular a escala las distancias y también los tamaños si se incluye al Sol. Para esto necesitarán datos que están disponibles en Internet. Estos son: diámetros de la Tierra, la Luna y el Sol; distancias de la Tierra a la Luna y al Sol. Si la Luna se simula con un diámetro de 1 cm encontrarán que esto corresponde a un diámetro de la Tierra de 3.7 cm, como se mencionó anteriormente. Aplicando la misma regla encuentren cuál sería la distancia a

escala entre la Tierra y la Luna, y entre la Tierra y el Sol, así como el tamaño del Sol. Ahora párense en la puerta de su casa con el círculo de 3.7 cm que representa la Tierra y pídanle a alguien que se coloque a la distancia que calcularon para la Luna. Lo que falta sería colocar a alguien a la distancia correspondiente al Sol con el círculo respectivo. Hacer los cálculos necesarios.



Figura 4. Formación de umbra y penumbra utilizando materiales caseros.

EL TAMAÑO ANGULAR

La Figura 2 implícitamente supone que estamos observando a la Tierra y también a la Luna y al Sol desde muy lejos. Sin embargo, nosotros todo lo vemos desde la Tierra por lo que es necesario completar el análisis en términos de los tamaños angulares del Sol y la Luna. Un eclipse total de Sol solo será posible si el tamaño angular de la Luna es mayor que el del Sol. Suponiendo que hay alineamiento de los tres astros existen cuatro escenarios posibles. La Figura 5a muestra el caso cuando los tamaños angulares de la Tierra y el Sol son exactamente iguales. El eclipse sería total pero duraría muy poco porque estaríamos en el vértice que define a la umbra y ésta se mueve rápidamente sobre la superficie. Para ser testigos del eclipse total las personas tendrían que hacer una fila de una sola línea a lo largo del trayecto de la umbra. En realidad el tamaño angular de la Luna fue un poco mayor que el del Sol en el eclipse del 8 de abril de este 2024. Esto no se debe a que el Sol se haya alejado, de hecho la distancia Tierra-Sol es prácticamente la misma. Es la distancia Tierra-Luna la que es menor que en el caso exacto según se muestra en la Figura 5b. En este caso la Tierra está dentro del cono que define a la umbra. Se puede apreciar que hay espacio de más para que el Sol se quede oculto sin tener que salir inmediatamente de esa zona como en el caso del eclipse total exacto. Sucede lo contrario cuando la Luna se aleja más allá del caso exacto como se muestra en la Figura 5c. El tamaño angular de la Luna es menor que el del Sol por lo que no puede ocultarlo completamente, nos encontramos en la zona de antumbra. El máximo ocultamiento es cuando los círculos son concéntricos y la parte brillante forma un anillo, de allí el nombre de eclipse anular. Se puede calcular el porcentaje de oscuridad dividiendo el área oscura entre el área total del Sol y multiplicando por 100, de

tal manera que una oscuridad del 100 % es un eclipse total, y un eclipse anular de un 90 % es que el área oscura es el 90 % del área total del Sol. Conociendo las distancias a la Luna y el Sol y sus diámetros se puede calcular este porcentaje. Por último, en la Figura 5d se muestra el caso de un eclipse parcial el cual corresponde a que la Tierra o el observador se encuentran en la zona de penumbra. Como se vio en relación con las Figuras 3c y 3d en la penumbra la Tierra está solo parcialmente oscura porque parte del Sol la sigue iluminando. Esto fue lo que pasó en Baja California en el eclipse pasado.

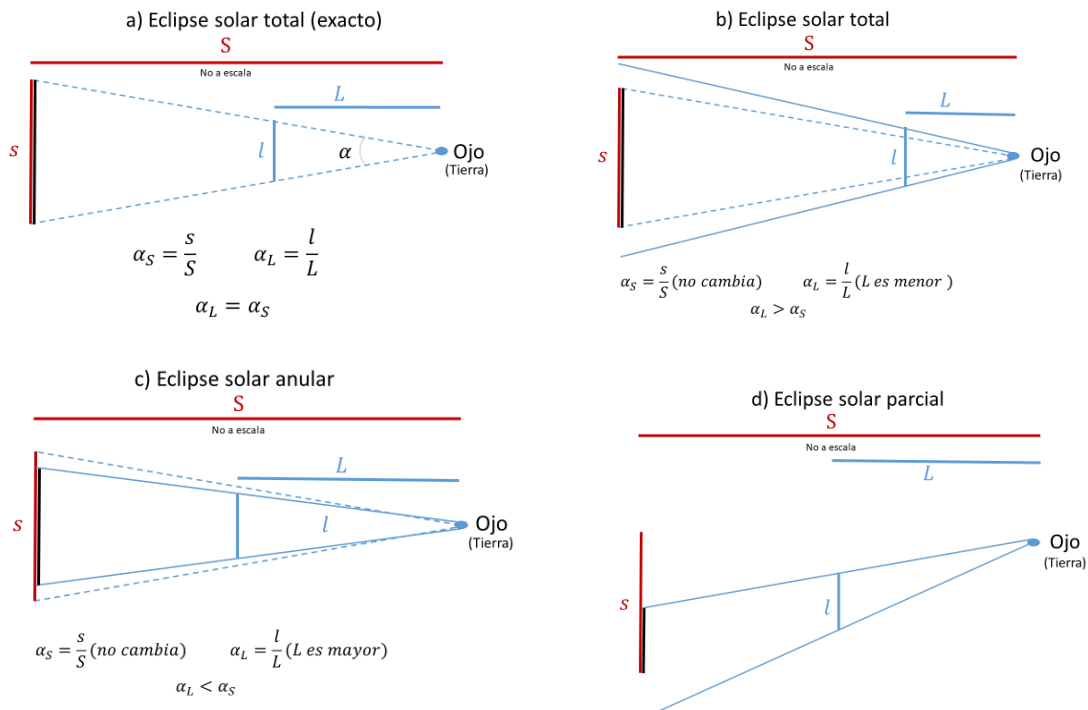


Figura 5. a) Los tamaños angulares del Sol y la Luna son exactamente iguales. b) El tamaño angular de la Luna es mayor que el del Sol. c) El tamaño angular del Sol es mayor que el de la Luna. d) Un eclipse parcial puede observarse tanto desde la penumbra como desde la antumbra.

LOS MOVIMIENTOS DE LA LUNA

La Luna gira alrededor de la Tierra y no lo hace describiendo un círculo sino una elipse como se ilustra en la Figura 6a. O sea que su distancia a la Tierra no siempre es la misma. Además, la elipse gira sobre el plano de la eclíptica con un periodo de varios años de tal forma que los eclipses de Luna y de Sol no suceden siempre a las mismas distancias entre la Tierra y la Luna. En otras palabras, el tamaño angular de la Luna vista desde la Tierra varía en cierto porcentaje máximo que hace que los eclipses de Sol sean de un tipo o de otro.

¿Por qué no hay un eclipse cada mes? Esta pregunta surge en los medios cada vez que hay un eclipse. Es una pregunta válida y muy interesante. Que no haya eclipses cada mes significa que la elipse de la Figura 6a estuvo en el plano de la eclíptica solo ese día, el del eclipse. De hecho, el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra es una especie de espiral que cruza la eclíptica en una y otra dirección con cierta periodicidad. La Figura 6b ilustra en perfil el ángulo de inclinación de la elipse. En el Internet podrán encontrar ilustraciones mejores tanto de la elipse como de su inclinación. Animaciones y videos son incluso más ilustrativos. De cualquier forma, estos son los tres principales movimientos de la Luna, la elipse alrededor de la Tierra, la oscilación de su inclinación y la rotación de la elipse sobre la eclíptica.

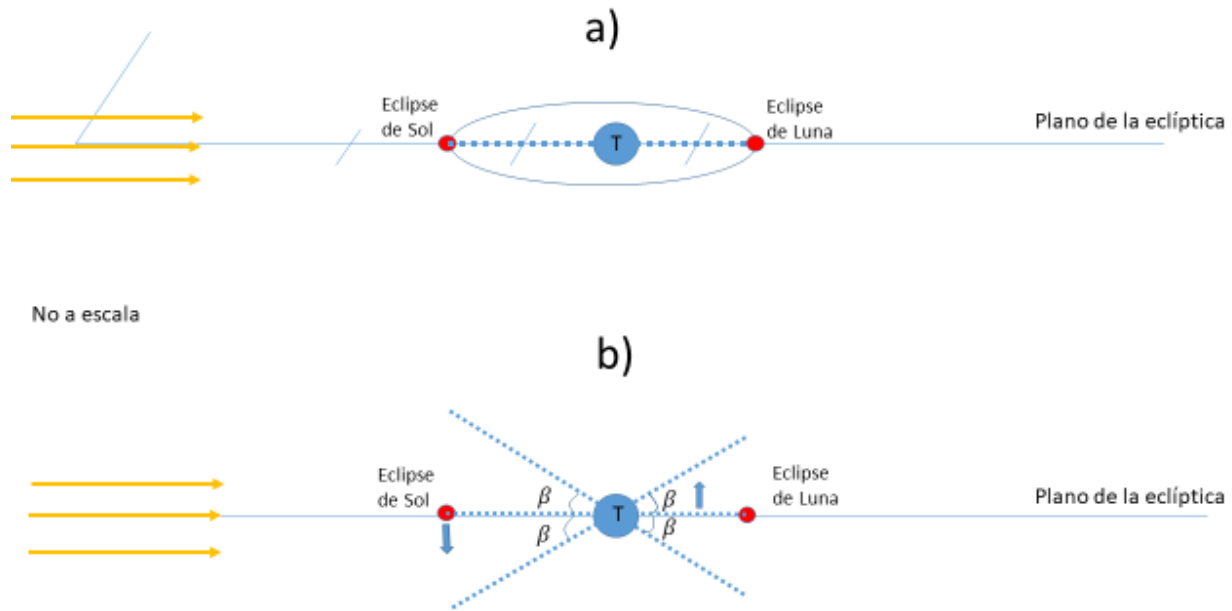


Figura 6. a) Trayectoria elíptica de la Luna alrededor de la Tierra. b) Inclinación de la elipse con respecto al plano de la eclíptica.

LOS ECLIPSES EN LA VIDA DIARIA

Es raro ver una sombra de un árbol completamente cerrada, en el sentido que no tenga aquí y allá pequeñas filtraciones de luz. Estas filtraciones no son simples rayos de luz: son imágenes detalladas y completas del Sol. Cada abertura pequeña entre las hojas hace una cámara oscura natural como las que se construyen con cajas de cartón para observar el eclipse. En la Figura 7 se muestran fotografías de las imágenes que se forman en el suelo durante eclipses recientes. Este fenómeno es poco conocido y a veces en los medios se le reporta como algo misterioso e incomprensible. Y es que casi nadie lo nota porque todos miramos hacia arriba y nadie piensa en acercarse a un árbol y mirar hacia abajo. En el Internet pueden encontrar más fotos y videos al respecto. También

pueden encontrar cómo funciona una cámara oscura y desde cuándo y para qué se construían.



Figura 7. La fotografía de la izquierda fue tomada por Carlos Flores Luna durante el eclipse solar del 8 de abril de 2024 en el jardín de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE. En Baja California este eclipse fue parcial. La fotografía de la derecha fue tomada por David Gerdes en Nuevo México durante el eclipse anular del 14 de octubre de 2023. El apilamiento de anillos cercanos se debe a que el viento mueve ligeramente la abertura.

El tiempo transcurre más lento en la superficie de la Tierra que a 20,000 km de altura en donde transitan los satélites de los sistemas de posicionamiento global (GPS). La diferencia es muy pequeña pero es suficiente para que los relojes en los satélites y en la Tierra pierdan sincronización y no tengamos la localización correcta. La corrección que

se hace se basa en la Teoría de la Relatividad General de Einstein la cual se comprobó con una observación durante un eclipse solar. Buscar cómo, quién y cuándo se hizo esa observación.

Un elemento de la Tabla Periódica se descubrió en el Sol durante un eclipse solar varias décadas antes de que se encontrara en la Tierra. Buscar cuál, cómo, quién y cuándo.

ECLIPSES DE LUNA

Habrán algunas preguntas generales sobre la Luna y sobre eclipses de Luna. Pueden consultar la guía y el cuestionario de la olimpiada de 2011: Aristarco de Samos y la XVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra. También habrá preguntas sobre el tránsito de planetas por el Sol.

RECOMENDACIONES

Leer la guía varias veces y buscar entre líneas las posibles preguntas. Experimentar con el arreglo casero. Practicar el cálculo de tamaños angulares y porcentajes de oscurecimiento. Hagan sus propias versiones de las figuras a papel y lápiz para entenderlas mejor. Discutan entre ustedes y con sus maestros. Vean en YouTube videos al respecto, etc.

EL EXAMEN

El examen consistirá de 50 preguntas y tendrá una duración máxima de 2 horas. Se recomienda traer calculadora.

INSCRIPCIONES

Es muy conveniente que se preinscriban a más tardar unos días antes del concurso, ya sea en forma individual o en grupo por correo electrónico, según se indica en esta página. Haciéndolo así nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, etc.

Por lo general recibimos alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límite, de ser necesario limitaremos a 100 el número de participantes. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 AM serán las

inscripciones. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sísmológica donde se analizan las señales de los sismos que ocurren en Baja California y Sonora principalmente.

Las premiaciones se harán de 2:00 a 3:00 PM.

Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas