



ASTRONOMÍA PARA INGENIEROS
INQUIETOS
LA LUNA

Este documento es de uso único e intransferible para el alumno matriculado en el curso. Cualquier reproducción física o digital del documento sin permiso de los autores vulnera los derechos de propiedad intelectual de los mismos.

A decorative graphic at the bottom of the page consisting of numerous thin, light gray lines that curve and flow from the bottom left towards the bottom right, creating a sense of movement and depth.

INDICE

INDICE.....	3
1. LA FORMACIÓN DE LA LUNA	4
2. LAS MAREAS	9
3. LA LUNA SIEMPRE NOS ENSEÑA LA MISMA CARA	18
4. LAS FASES DE LA LUNA	20
5. LA LUZ CENICIENTA	27
6. OTROS EFECTOS DE LA LUNA SOBRE LA TIERRA. EL DÍA DURA CADA VEZ MÁS	30
7. CONDICIONES DE VIDA EN LA LUNA	32
8. ECLIPSES SOLARES Y LUNARES	35
9. FENÓMENO NATURAL DE “LUNA EN SANGRE”	44
10. SUPERLUNA.....	52
11. ECLIPSES DE SOL.....	54
12. PATRONES QUE USABAN LOS ANTIGUOS PARA PREDECIR ECLIPSES. EL CICLO DE SAROS	66
ANEXO I. CALCULO DE LOS CICLOS DE MILANKOVITCH. GLACIACIONES E INTERGLACIACIONES	69

1. LA FORMACIÓN DE LA LUNA

La luna es el único satélite natural de la Tierra. Su origen más probable es debido a un gran impacto de un meteorito contra la Tierra en tiempos en que aún los planetas estaban formándose, desgajando un inmenso volumen de material incandescente que acabaría convirtiéndose en la luna cuando se enfrió.

En efecto, hace 4,500 millones de años la Tierra estaba formada por componentes en estado semilíquido, y antes de haberse enfriado totalmente recibió un gigantesco impacto de un cuerpo inmenso (probablemente del tamaño de Marte).

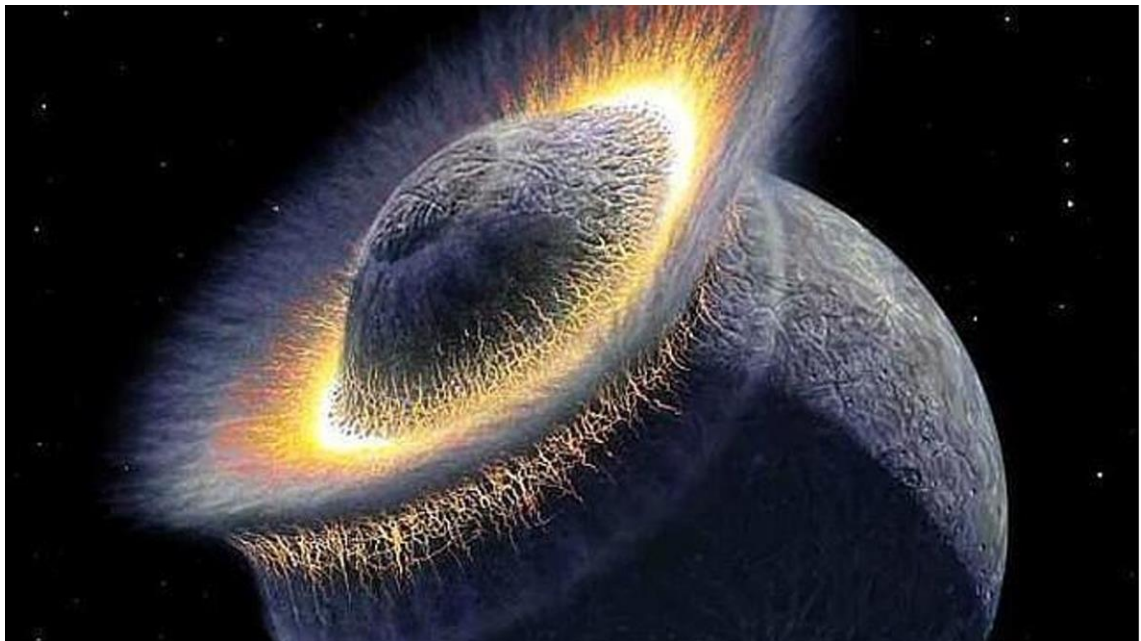


Figura 1

Ambos se fundieron y esparcieron residuos alrededor del planeta fusionado. Estos residuos orbitando formaron la luna.

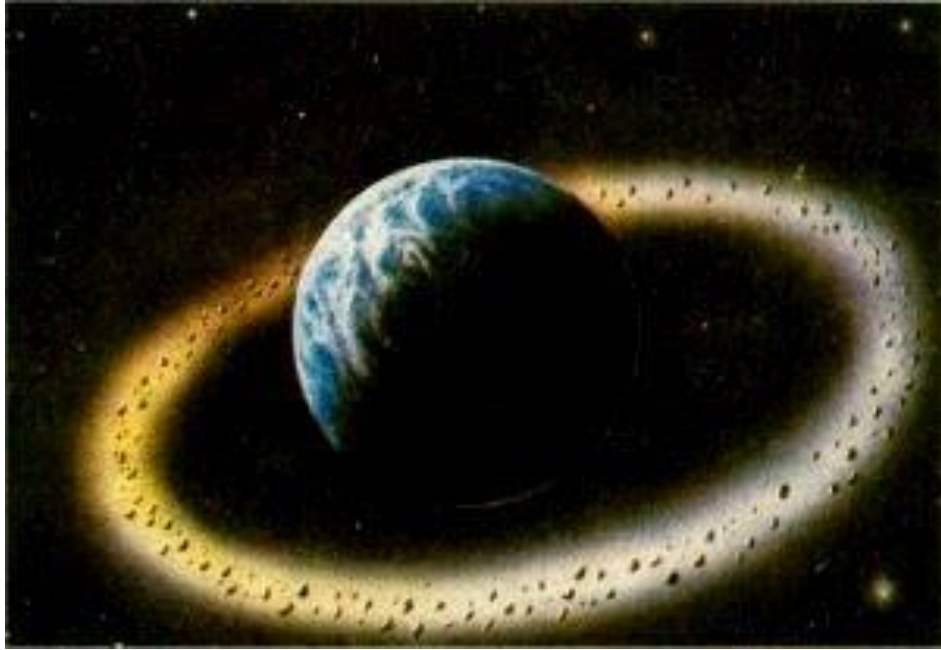


Figura 2

El papel de la luna ha sido fundamental para la formación de la vida, porque la atracción gravitatoria de la luna estabiliza la inclinación del eje de giro de la tierra, el cual solo varía un grado (actualmente su inclinación es de 23 grados como vimos). Ya vimos que la atracción solar hacia la masa del ecuador (más masivo) hacía variar la inclinación del eje. Este efecto podría entrar en resonancia de la misma manera que un padre empuja a su hijo en un columpio. La atracción de la luna provoca el efecto contrario anulando dicha resonancia y estabilizando el eje.

La estabilidad de la inclinación del eje de la tierra es fundamental para evitar cambios radicales en el clima. Sin un clima estable a largo plazo no es posible que las especies tengan tiempo de adaptarse, ya que el proceso de la evolución natural es muy lento, y se extinguirían. Por tanto parece que la luna ha sido clave en la evolución de la vida.

Marte, sin embargo, al no contar con una luna de tamaño suficiente tiene un eje inestable que fluctúa. La inclinación de su eje puede variar en millones de años de 0° a 90° desestabilizando totalmente su clima. Los cálculos matemáticos y físicos demuestran que si no tuviéramos la luna, el eje de la Tierra fluctuaría de forma caótica entre 0° y 90° haciendo imposible la vida en ninguna parte del planeta. Con una inclinación de 90° un hemisferio estaría totalmente congelado y el otro sería un horno. Y seis meses después al revés.

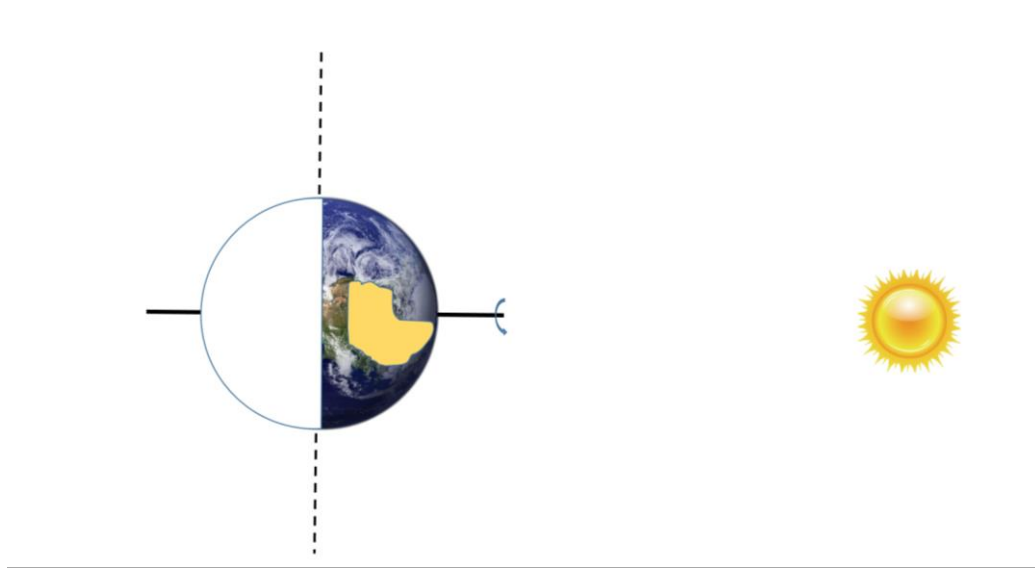


Figura 3

Seis meses después

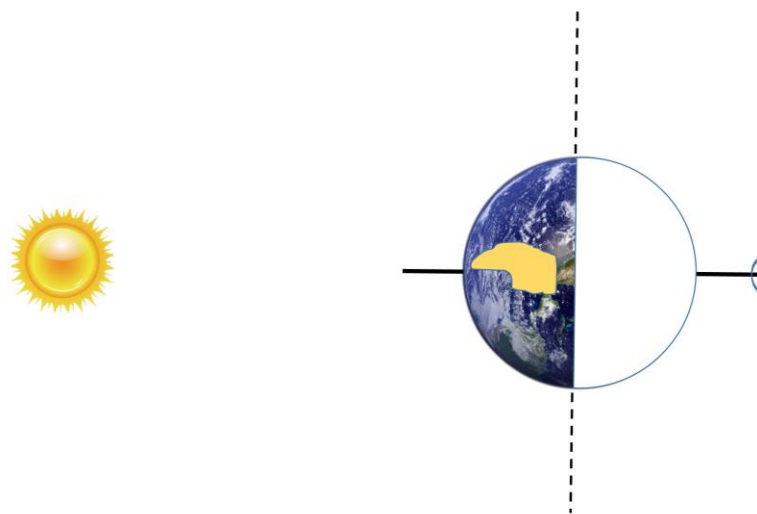


Figura 4

Es fácil considerar la importancia de la inclinación del eje de la Tierra en el clima, si tenemos en cuenta que un cambio en la inclinación de menos de un grado provocó que el Norte de África, antes un vergel, se convirtiera en el Sahara. Recordemos que hace 10,000 años la inclinación del eje de la Tierra era de $24,5^\circ$ y ahora es de $23,5^\circ$.



Figura 5



Figura 6

En los primeros millones de años, la luna y la tierra recibieron innumerables impactos de meteoritos. De hecho, por cada impacto que recibió la luna, la tierra ¡recibió 25!

En la luna es fácil ver la huella de todos estos meteoritos porque allí no hay erosión (por no haber atmósfera) y las huellas quedan para toda la eternidad.



Figura 7: Cráteres de la luna formados por meteoritos antiguos

En efecto, en la luna no hay erosión porque no hay atmósfera, no hay aire, no hay lluvia y no hay agua. En suma, nada se mueve en su superficie y por este motivo no hay erosión. No hay atmósfera debido a que la gravedad de la luna es débil y las partículas de los gases, al calentarse con el sol, alcanzan velocidades superiores a la velocidad de escape orbital.

La huella de Neil Amstrong allí sigue, igual que en 1969.



Figura 8: La huella de Neil Amstrong ahí sigue desde 1969.

2. LAS MAREAS

La luna provoca mareas en los océanos de la Tierra porque su gravedad los atrae. Pero intentemos entender un poco más sobre esto.

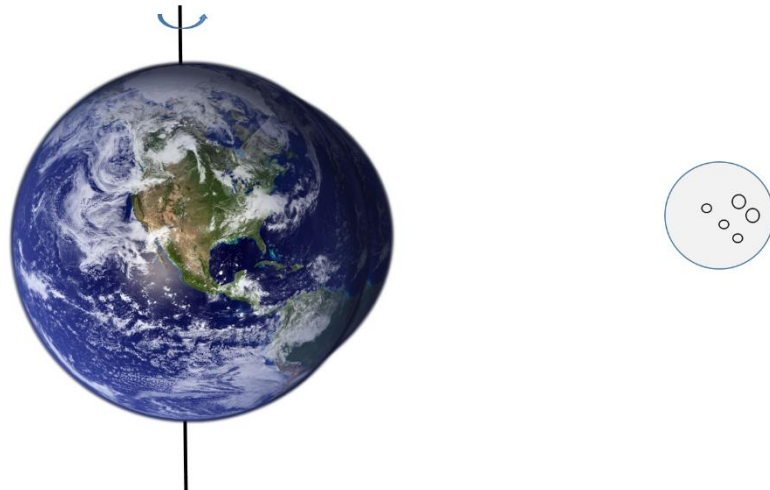


Figura 9

Obviamente en el dibujo hemos exagerado el abombamiento de marea atraído por la luna. Es únicamente con fines didácticos. La tierra gira sobre sí misma en un día, pero la marea permanece mirando a la luna (que se habrá movido muy poquito en ese día). Por lo tanto, según esto, los océanos solo tendrían una subida de marea al día. Sin embargo sabemos que la marea sube dos veces al día ¿Cómo es posible?

Galileo intentó explicar este fenómeno pero erró el tiro. La explicación definitiva solo llegaría con el genio de Newton, que fue quien entendió por primera vez en la historia como funcionaba la ley de gravitación.

Newton explicó que, si bien es verdad que la luna gira alrededor de la tierra por su atracción, también hay que considerar la atracción que la luna ejerce sobre la tierra. Esto hace que las dos esferas bailen alrededor de su centro de gravedad. Obviamente el centro de gravedad de ambas está muy cerca del centro de la tierra (porque la tierra pesa mucho mas) pero ligeramente desplazado hacia la luna. Es decir ambos giran alrededor del punto G del mismo modo que gira un lanzador de martillo y el martillo.

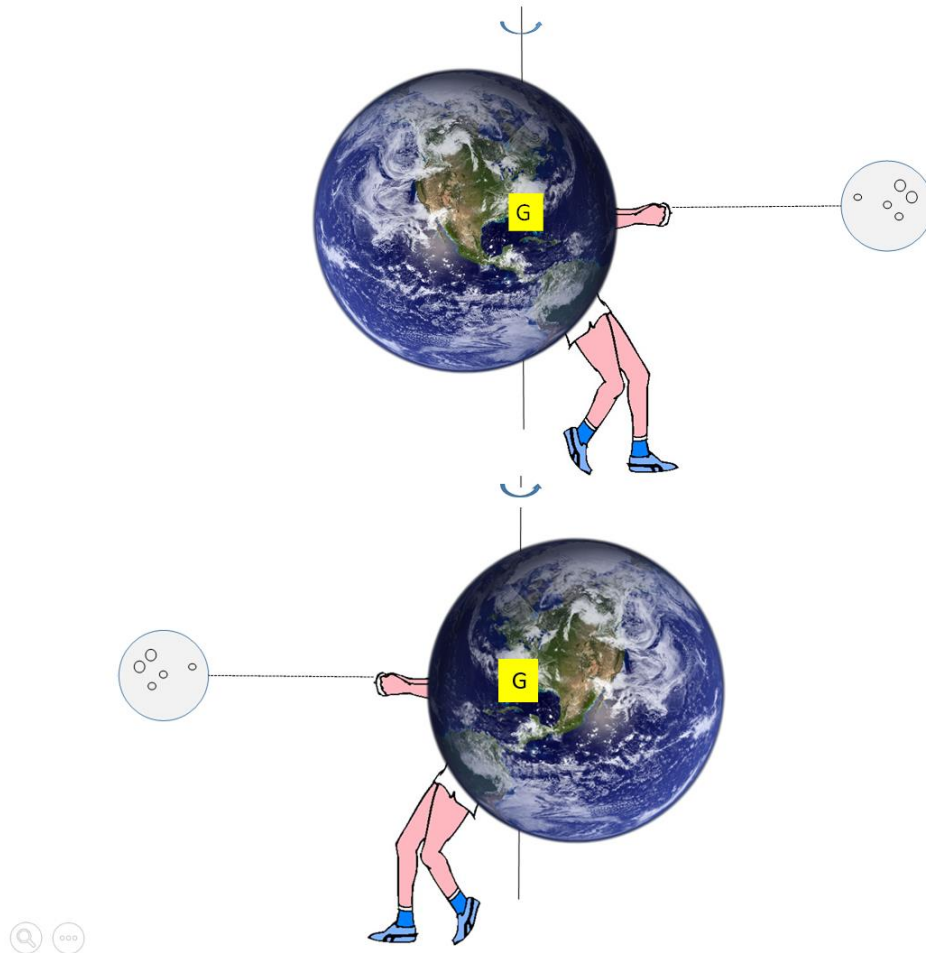


Figura 10: La tierra y la luna bailan alrededor del centro de gravedad de ambas, igual que un lanzador de martillo y su martillo.

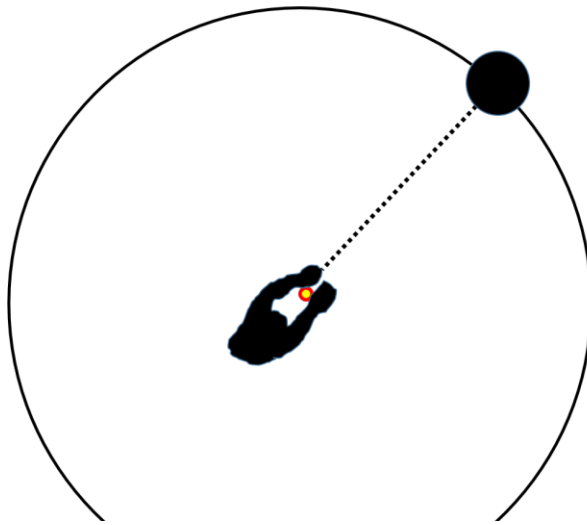


Figura 11

Esto explica por qué, en el lado externo de la tierra también se forma otra marea. Es el equivalente a cuando giramos un vaso de Whisky y se forma una ola en el lado del vaso.



Figura 12

Por tanto, hay dos mareas, una debido a la atracción de la luna, y la otra debido al giro de la tierra alrededor de G. Por este motivo hay dos mareas altas a lo largo del día.

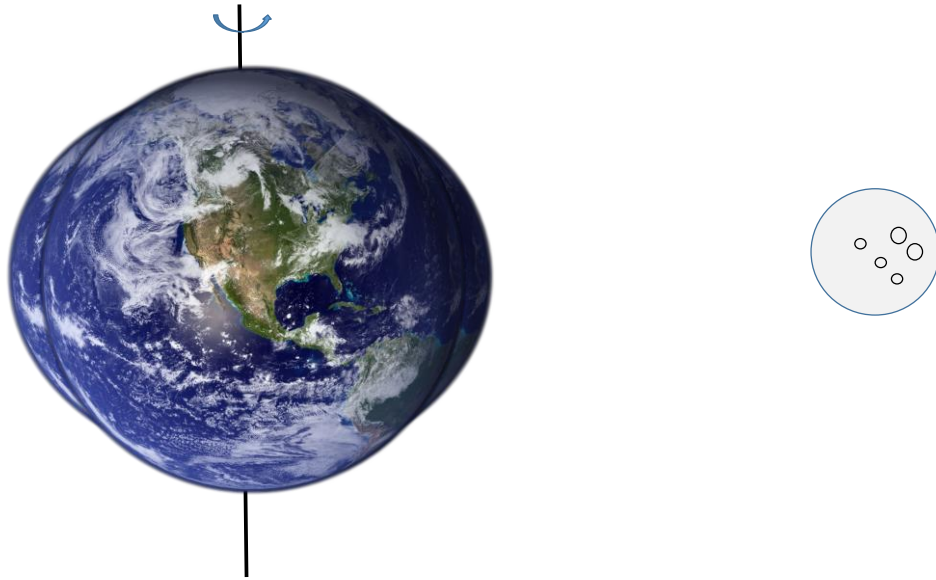


Figura 13

Es evidente que a mitad de camino de cada marea (a un lado y a otro de la tierra) tendremos menos agua porque se ha acumulado en las mareas, por lo que tendremos bajamar. Así tenemos dos ciclos completos a lo largo del día, dos de pleamar y dos de bajamar.

Por idénticos motivos a los expuestos, es fácil entender que cuando es luna llena (el sol en un sitio y la luna en el opuesto) tendremos unos efectos de mareas más agudo, porque la gravedad del sol está también contribuyendo a que se produzca la marea (en el lado cercano al sol) y también otro pico de marea en el lado opuesto debido al giro de la tierra alrededor del sol.



Figura 14: Esquema de luna llena. Mareas vivas

De igual manera en fase de luna nueva ocurre lo mismo.



Figura 15: Esquema de luna nueva. Mareas vivas

Las mareas solo se producen en aquellos mares que tengan longitud suficiente. Pero además si es longitud excesiva puede llegar a anularse un poco el efecto. En esto tiene que ver el efecto de “resonancia”.

El efecto de resonancia de las mareas es muy similar a un niño jugando a generar olas gigantes en su bañera. El niño enseguida aprende que si se mueve al mismo ritmo que la ola, de un lado a otro, va haciendo que la ola sea cada vez más grande, hasta lograr que la ola desborde, para desesperación de sus padres...

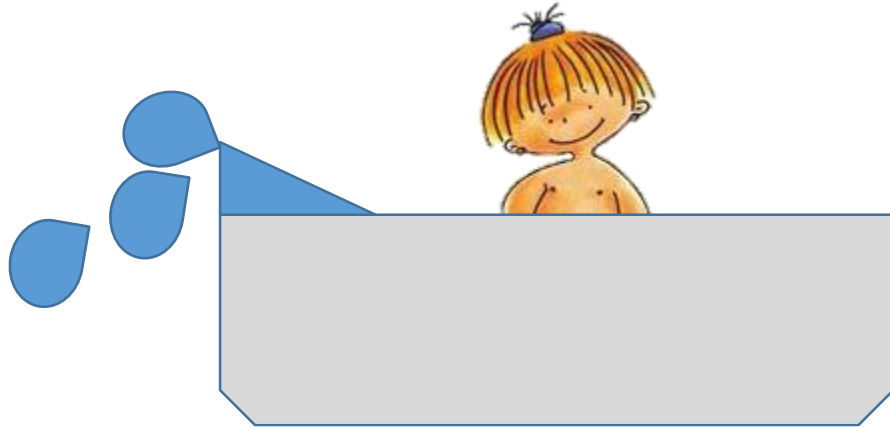


Figura 16

Del mismo modo, si la longitud del mar o del océano encaja con la longitud de onda de la ola de marea, se logra que el empuje que la luna provoca sea en resonancia con la onda de marea.

El Océano Atlántico entre Veracruz y Cabo Bojador abarca aproximadamente 90°
El Mediterráneo solo abarca 40°
El Pacífico entre Panamá y Filipinas abarca 160°

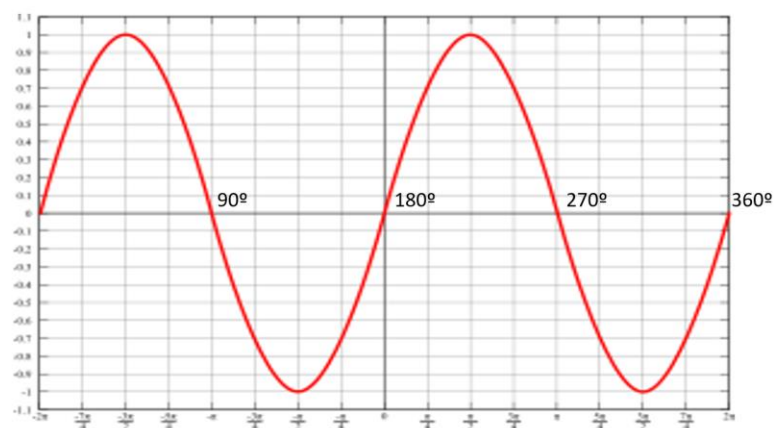


Figura 17

El océano atlántico a la altura de Veracruz tiene unas fuertes mareas porque la longitud del océano aquí es casi exactamente de 90° .

¿Cada cuánto se produce el fenómeno de las mareas?

Para poder responder a esta pregunta necesitamos saber cuánto tarda la tierra en dar una vuelta alrededor de sí misma.

¿Cuánto tarda la tierra en dar la vuelta alrededor de sí misma?

¿Un día? ¿Seguro?

¡No!

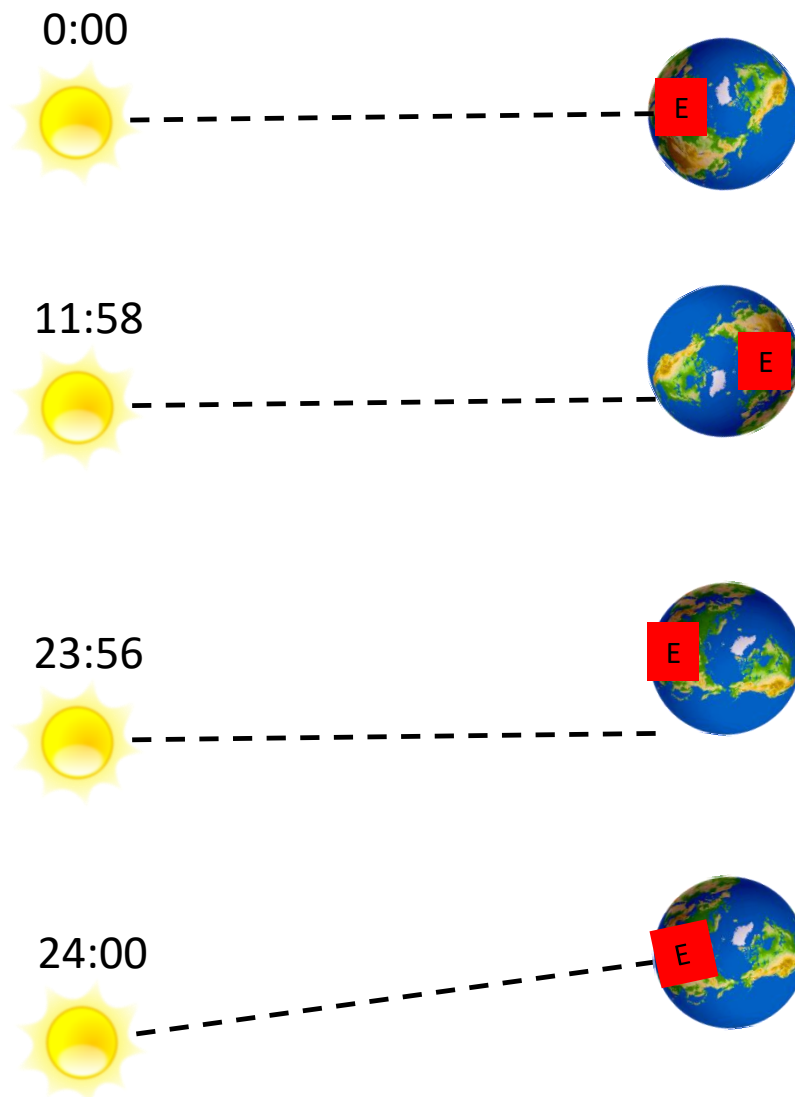


Figura 18

Si nos fijamos en el dibujo, el punto E ha tardado 23 h y 56 minutos en dar una vuelta alrededor de la tierra. Y 4 minutos más hasta que de nuevo ha tenido el sol en frente (igual que en el primer dibujo). Por tanto, si alguien os pregunta cuánto tarda la tierra en dar una vuelta completa alrededor de sí misma ¡Ya sabéis que no son 24 h! ¡Son 23 h y 56 minutos!

¿Y cuántas vueltas da la tierra alrededor de sí misma en un año?

¡En realidad da 366 vueltas en un año! Pero solo 365 veces se encuentra el mismo punto enfrente del sol en un año. Si dividimos el día en 365 nos salen esos 4 minutos que hay de diferencia entre la vuelta de la tierra alrededor de sí misma, y la duración del día.

Ahora podemos ya calcular cada cuánto se producen las mareas.

Dado que la luna gira alrededor de la tierra, las horas de marea alta y baja se retrasan ligeramente de día en día, porque la luna, como gira alrededor de la tierra, alcanza su altura máxima un poco más tarde cada día. Por tanto tendremos la luna en lo más alto con una frecuencia algo superior a 24 h.

En el gráfico vemos como el punto E gira alrededor de la tierra en 23:56 h, pero al haberse movido la luna de su posición inicial, cuando pasa ese tiempo el punto E no tiene a la luna justo enfrente. Debe esperar 54 minutos más hasta mirarla de nuevo enfrente.

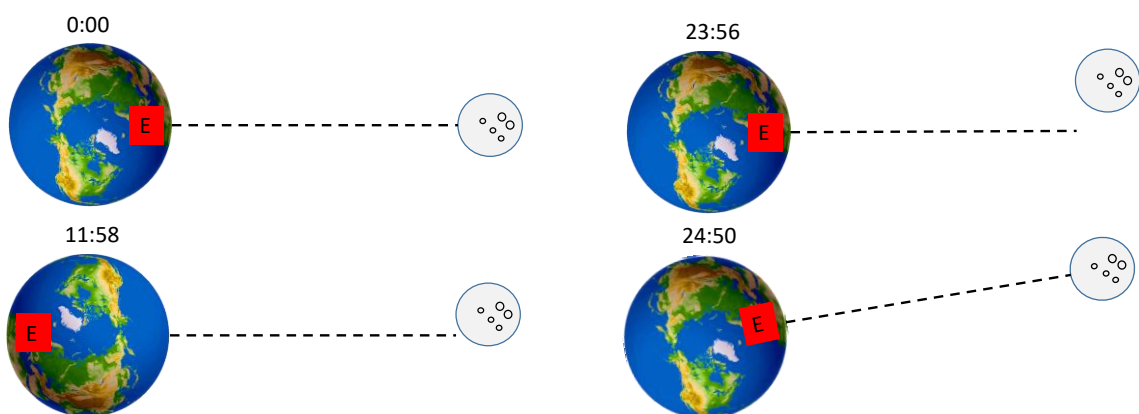


Figura 19

Calcular que esa diferencia es de 54 minutos es muy fácil. La luna tarda en dar una vuelta completa alrededor de la Tierra 27,32 días. Por tanto da 0,0366 vueltas/día. El punto E tarda 23 h y 56 minutos en dar una vuelta, es decir, da 1,0028 vueltas al día.

¿Cuántos días tienen que pasar para que E haya dado justo una vuelta más que la luna?

$$1,0028 \times t = 0,0366 t + 1$$

$$t = 1 \text{ día y } 50 \text{ minutos}$$

Por tanto, dado que se dan dos ciclos de marea por día, el ciclo de marea dura en realidad **12 h y 25 minutos**.

3. LA LUNA SIEMPRE NOS ENSEÑA LA MISMA CARA

PENSAR:

¿Cuál es el motivo por el que la luna solo nos enseña una cara y oculta la otra? ¿Qué pudo provocar este fenómeno?

En la actualidad la luna gira alrededor de sí misma mostrando siempre la misma cara. Pero no siempre fue así. En el origen la luna giraba en torno a sí misma a una velocidad mucho mayor. Eran tiempos tempranos en que nuestro satélite tenía una superficie incandescente y líquida, o al menos era viscosa.

Tal y como ocurre ahora en la Tierra, donde la luna atrae a las mareas, también la Tierra atraía de forma aún más poderosa las mareas de ese material viscoso y muy denso que había en la superficie de la luna.

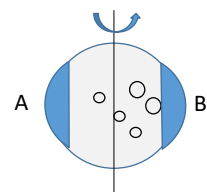


Figura 20

Se creaba por tanto una marea de material viscoso tanto en el punto A (punto cercano a la tierra) como en el punto B (punto más alejado a la tierra)¹. La luna giraba alrededor de sí misma, pero este material denso, que todo el tiempo se quedaba mirando a la tierra, fue frenando el giro de la luna por rozamiento, hasta que el giro de la luna se quedó acoplado a la tierra, enseñando siempre la misma cara. Al enseñar siempre la misma cara, la marea A y la marea B quedaron acopladas a la luna y no existió más rozamiento, ni más freno en su giro.

En la actualidad la luna tiene un doble giro; uno de traslación alrededor de la tierra, y otro de rotación alrededor de sí misma. Ambos giros tienen un período de 27,32 días, por este motivo siempre muestra la misma cara.

Reflexionemos unos segundos para pensar que, si viviéramos en la luna, veríamos siempre a la tierra a la misma altura respecto al horizonte y en el mismo punto y orientación constantemente, a lo largo de toda nuestra existencia (lo mismo que nos ocurre aquí con la estrella polar pero por un motivo distinto).

¹ La explicación de la marea B la daremos más adelante

4. LAS FASES DE LA LUNA

Las fases de la luna son fáciles de entender. Vemos la luna totalmente iluminada cuando tenemos el sol a nuestra espalda (luna llena) y la vemos totalmente oscura cuando el sol está iluminando la cara oculta (luna nueva). Entre ambos hitos la luna se muestra parcialmente iluminada, mostrando una parte en sombra.

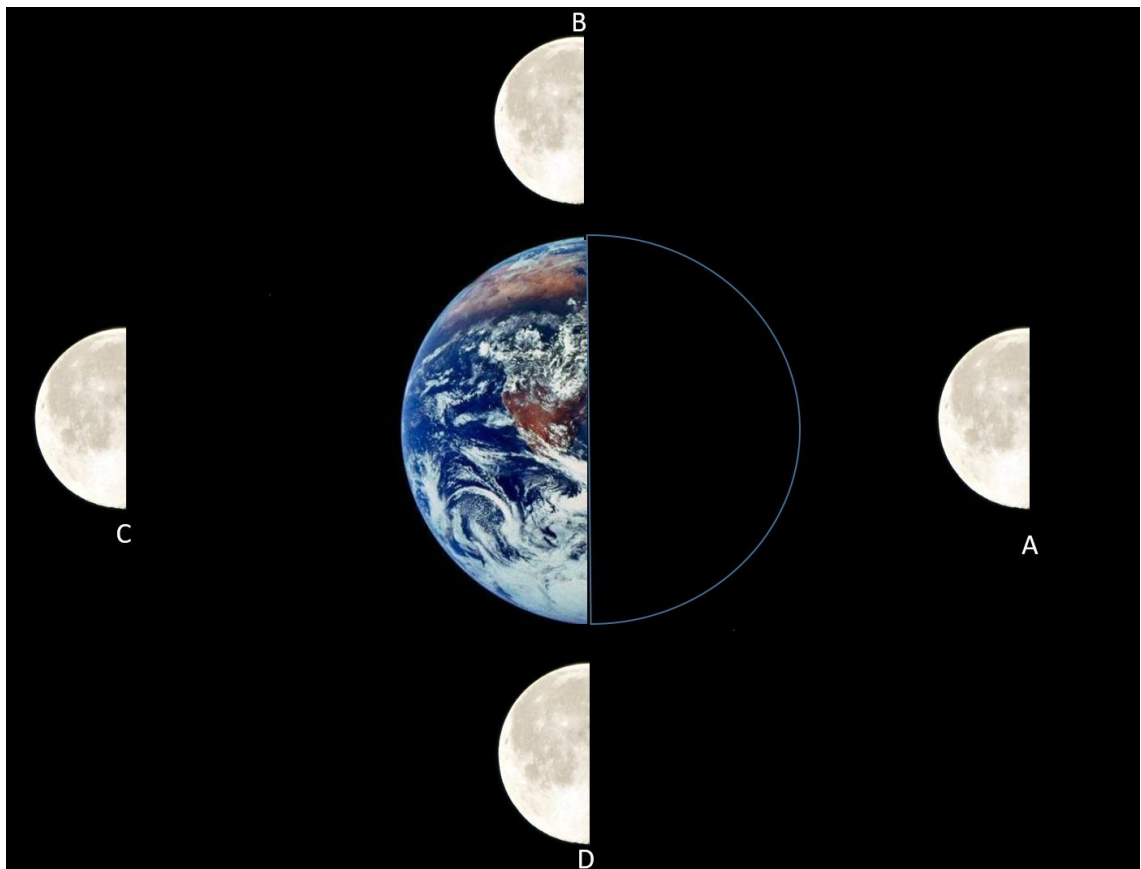


Figura 21

El dibujo muestra cómo se verían la luna y la tierra desde el espacio en cada uno de los cuatro momentos de su rotación. Es evidente que el sol está a la izquierda en el dibujo.

Si es así como se ve desde el espacio, pensemos ahora como se ve desde la tierra. Cuando la luna está en A la vamos a ver totalmente iluminada y la veremos durante toda la noche (luna llena). Cuando la luna esté en B solo vamos a ver la mitad de la cara iluminada y la veremos la mitad del día y la mitad de la noche. Cuando esté en C no la vamos a ver porque no nos muestra la cara iluminada y además solo está presente durante el día (luna nueva).

Como en C no se ve la luna y en A es luna llena, en los hitos intermedios (D) se dice que está en fase “creciente”. Entre A y C se dice que está en fase “decreciente” (B).

Pensemos ahora como se ve la luna **desde la tierra** cuando está en D. Piensa que estamos diciendo como se ve **desde la tierra**.

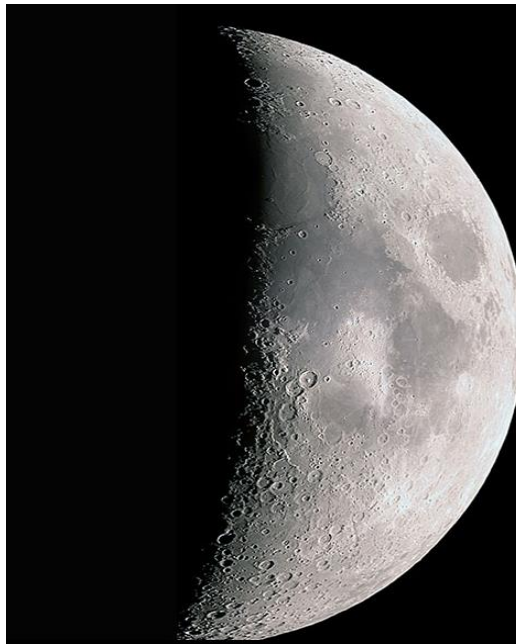


Figura 22: Luna en fase cuarto creciente (momento D)

Es decir, se ve con la parte iluminada a la derecha

En el punto B, que es decreciente, la luna se ve así desde la tierra, parte iluminada a la izquierda:

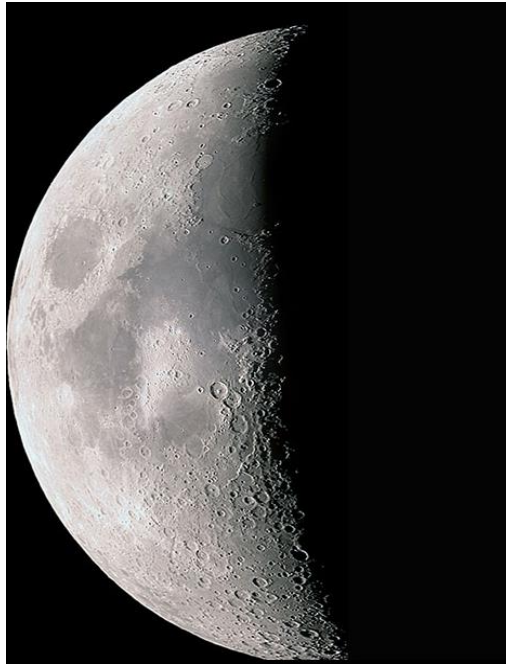


Figura 23: Luna en fase cuarto decreciente (momento B)

Por tanto en los hitos intermedios la vamos a ver parcialmente iluminada. Un buen truco nemotécnico es saber que “la luna es mentirosa”; Cuando la parte iluminada tiene forma de C es Decreciente, y cuando tiene forma de D es Creciente.

Observar la Luna con un telescopio de aficionado es una de las experiencias más bellas posibles. Es especialmente bonito cuando no es luna llena porque las sombras de los cráteres dan mucho más relieve a su superficie. Cuando es luna llena apenas vemos sombras y el efecto es menos espectacular.

Sin embargo, observar la Luna llena con un telescopio tiene una diversión añadida si cuentas con un mapa de la Luna. Puedes localizar fácilmente, por ejemplo, los lugares aproximados donde se han producido los diferentes alunizajes del proyecto Apolo.

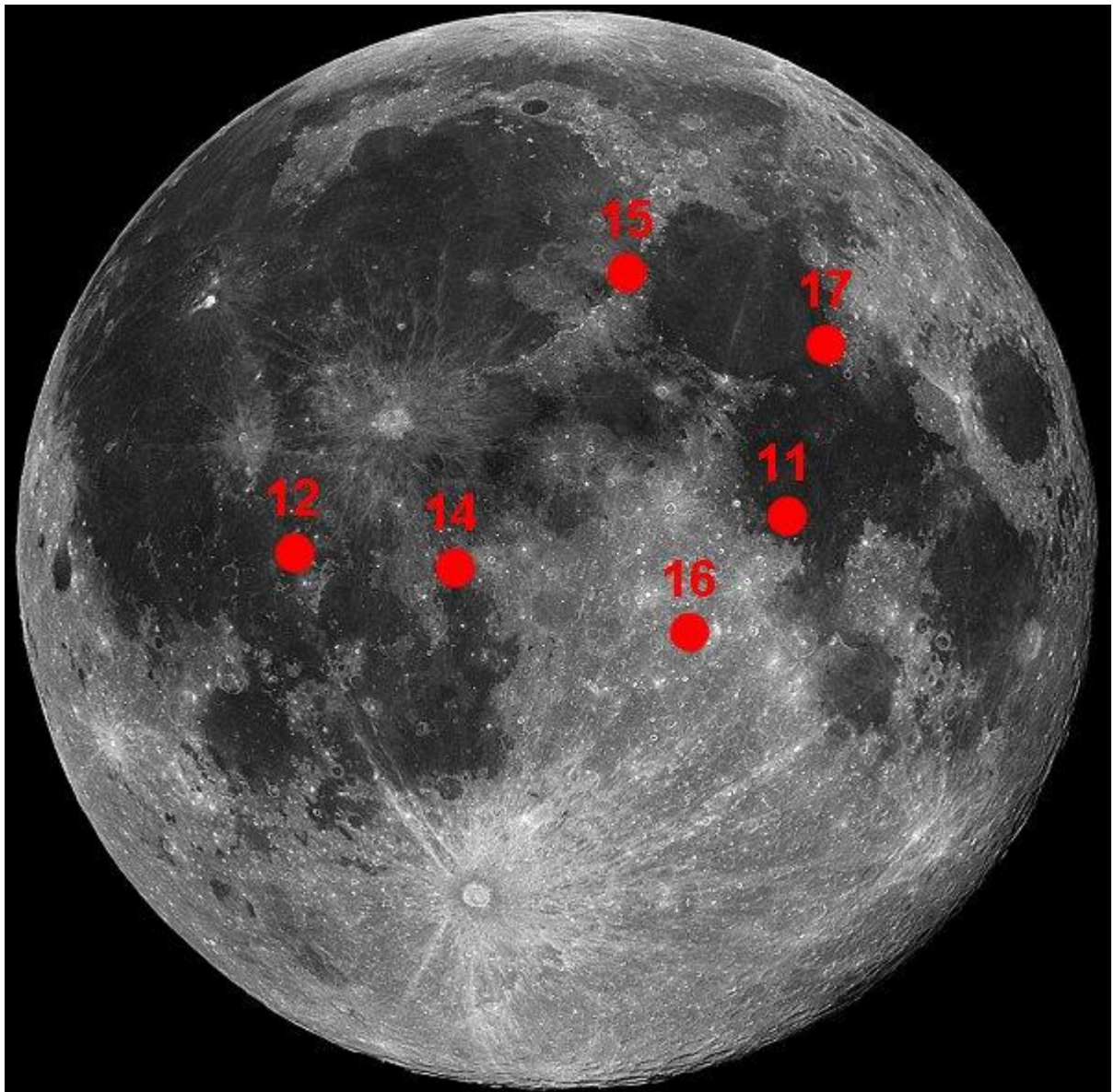


Figura 24: Lugares de alunizaje del proyecto Apolo. Es especialmente entretenido intentar localizarlos un día de luna llena con un telescopio de aficionado. Sin embargo, ¡ojo!, ¡ten en cuenta que cuando lo ves por el telescopio, lo vemos todo al revés! Lo de arriba se ve abajo, y lo de la derecha a la izquierda.

PENSAR:

¿Sabrías ahora decir cómo se ve La Tierra desde la luna en cada uno de los casos?

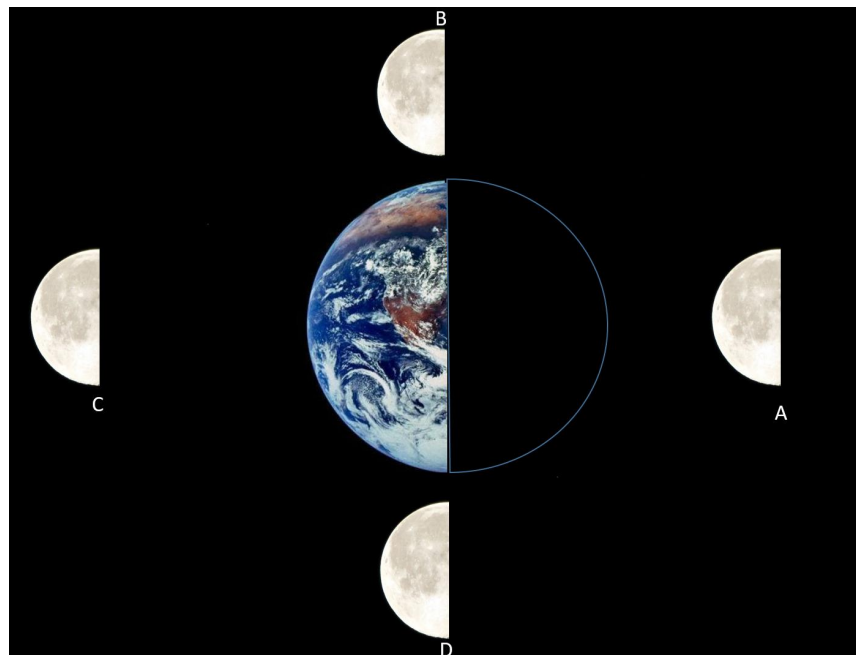


Figura 25

Es realmente interesante pensar cómo se ve La Tierra desde la luna en cada uno de los casos. En el momento A, la tierra no se ve porque la parte iluminada queda del otro lado. En el momento B la tierra está en fase creciente y se ve solo parcialmente iluminada.



Figura 26: La Tierra parcialmente iluminada vista desde la luna (momento B)

En el momento C la tierra se ve totalmente iluminada, pero ¡Ojo!, si la quieres ver tendrás que estar en la cara oscura de la luna (es decir en la noche de la luna).

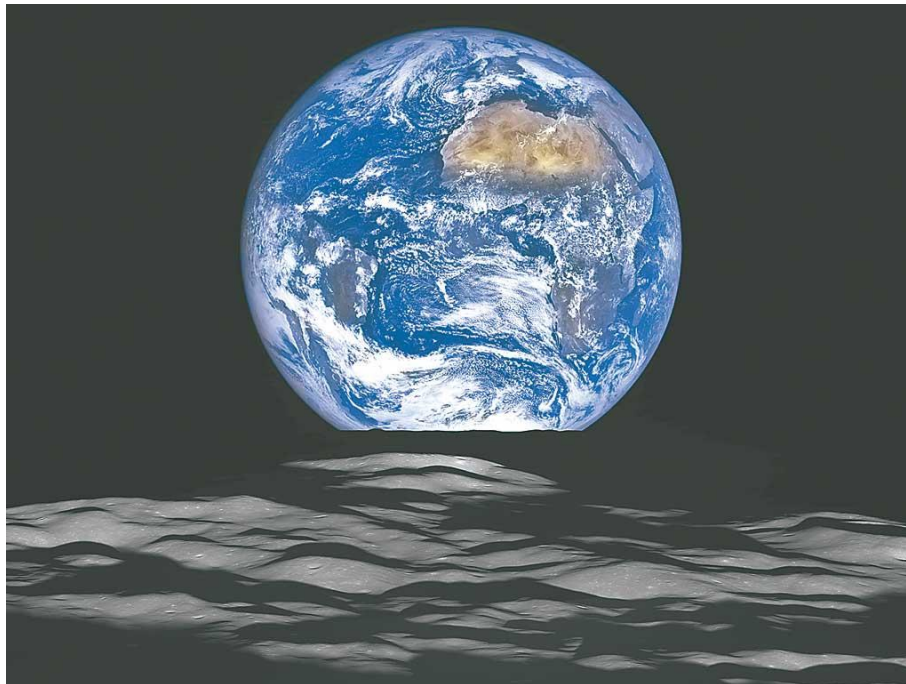


Figura 27: Tierra llena vista desde la luna (momento C)

¿Cada cuánto se repiten las fases de la luna?

Por último, falta explicar por qué las fases de la luna se repiten cada 29,53 días. ¿No habíamos dicho que la luna tardaba 27,32 días en girar alrededor de la tierra?

Debemos tener en cuenta que en las fases de la luna están interviniendo tres astros; la luna, la tierra y, desde luego, también el sol, que es quién las ilumina.

Tengamos ahora en cuenta que, a la vez que la luna está girando alrededor de la tierra, la tierra está también girando alrededor del sol.

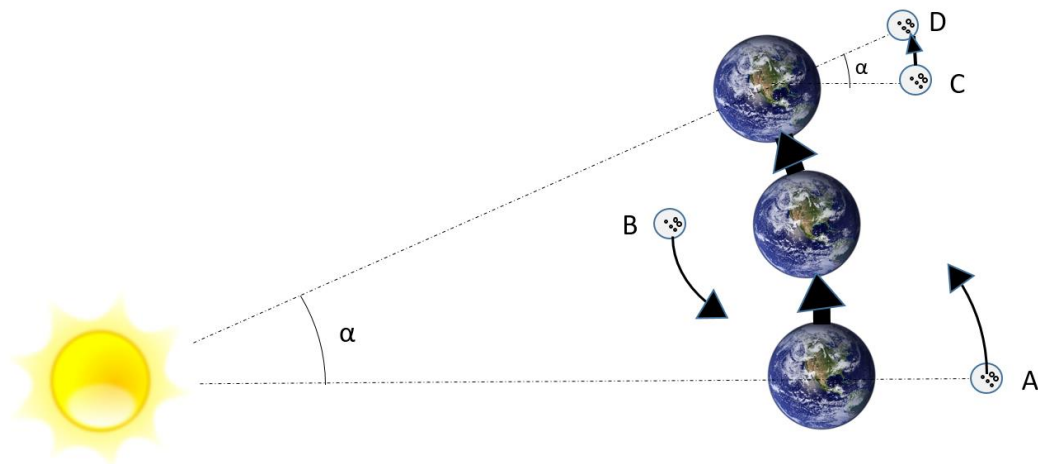


Figura 28: A la vez que la luna gira alrededor de la tierra, la luna gira alrededor del sol. Por eso cuando la luna ha completado un giro no es luna llena aún

Cuando la luna se encuentra en el punto A es luna llena (desde la tierra vemos la luna totalmente iluminada). La luna continuará girando alrededor de la tierra, pasando por el punto B hasta llegar al punto C, habiendo completado un giro en 27,32 días. Pero ¡ajo! en el punto C no hay luna llena. Hay que esperar aún un pucio a que la luna alcance el punto D para que sea luna llena. Esta es la razón por la que el ciclo de lunas llenas es de 29,53 días en lugar de 27,32 días.

$$\omega_{Luna} = \frac{2\pi}{27,32 \times 24 \times 3600}$$

$$\omega_{tierra} \times t = \omega_{Luna} \times t + 2\pi$$

$$\omega_{tierra} = \frac{2\pi}{365,256 \times 24 \times 3600}$$

$$t=29,53 \text{ días}$$

Curiosamente este ciclo coincide exactamente con el ciclo medio de la menstruación femenina. Los antropólogos consideran que la especie humana se adaptó al ciclo de la luna llena porque los hombres salían por la noche en luna llena a cazar. En luna nueva no cazaban y la mujer debía ser fértil en ese momento.

5. LA LUZ CENICIENTA

Reflexionemos ahora un instante. En capítulos anteriores habíamos visto el tamaño relativo con el que se ve la Luna desde la Tierra. Habíamos explicado que, para ello, bastaba con dividir el diámetro entre la distancia

- Diámetro de la luna: 3.500 Km
- Diámetro de La tierra: 13.000 Km
- Distancia de la Luna a la Tierra: 384.000 Km

Por tanto el ángulo que ocupa la Luna en el cielo es de: $3.500/384.000 = 0,0091$ radianes

Ya vimos que sorprendía la coincidencia de que el tamaño relativo de la luna era idéntico al tamaño relativo del sol.

Pensemos ahora en cómo se ve de tamaño la Tierra desde la Luna:

Tierra: $13.000/384.000 = 0,0339$ radianes

¡Esto supone un diámetro aparente casi cuatro veces (3,7) el de la Luna!

Es decir, si un planeta similar al de la Tierra (llamémosle “terra”) se viera desde la tierra igual que se ve desde la luna, el paisaje nocturno sería así:



Figura 29: *Tamaños relativos de la tierra y la luna tal y como se ven ellos recíprocamente.*

¡Impresionante! Los días de “terra llena” sería difícil dormir por la luz que daría. Se podría perfectamente jugar al fútbol por la noche... Si además tenemos en cuenta que el albedo de la Tierra es más de cuatro veces el de la Luna, y que la superficie que ocupa la Tierra en el cielo lunar es 14 veces superior ($3,7^2$) al que ocupa la Luna en el cielo terrestre ¡la luz que emite la Tierra en la luna es $14 \cdot 4 = 55$ veces superior a la luz que emite la luna en la Tierra!

Y ahora volvamos a la luna. La noche lunar iluminada por semejante enormidad azul debe ser impresionante, de hecho se puede distinguir el terreno lunar sin ninguna dificultad. Si es posible hacer excursiones con luna llena en la tierra, mucho más fácil será hacerlas con tierra llena en la noche lunar.

Pongamos ahora el caso de que la Tierra está casi llena, y la luna está por tanto casi nueva. En ese momento la noche lunar está iluminada por una tierra gigantesca casi llena. Por eso, desde la tierra, la luna se ve con solo una pequeñísima parte iluminada por el sol. Y el resto del disco lunar estará iluminado por la Tierra. Esta luz tenue que proviene de la Tierra y que ilumina a la luna se llama luz cenicienta.



Figura 30: Luna casi nueva, con luz cenicienta (iluminada por una tierra llena)

Fijémonos en que la foto está tomada cuando la luna está en el horizonte. Obviamente esto solo puede ser así, porque al ser luna casi nueva, está en ese momento casi en la misma dirección del sol. El fotógrafo ha aprovechado el breve ratito en que la luna está en el cielo sin el sol (en la foto va a amanecer enseguida).

Finalmente hagamos una última reflexión. Cuando estamos en España y vemos la luna nueva justo después del atardecer, la luz cenicienta que vemos en la luna es la que produce el reflejo de una tierra llena con el océano atlántico, el pacífico y el continente americano totalmente iluminados (en España ya ha atardecido pero en América es pleno día).

Sin embargo, cuando vemos la luna nueva justo antes del amanecer (como en la foto), la luz cenicienta que vemos en la luna es la que produce el reflejo de una tierra llena con el vasto continente euroasiático iluminado (en España estamos justo al final de la noche pero en Asia es medio día). Curiosamente refleja mucho más luz el continente que el mar, por este motivo la luz cenicienta de la luna vista desde España es mucho más potente justo antes del amanecer, es decir en fase decreciente (luz cenicienta provocada por el reflejo del continente euroasiático) que justo después del atardecer, en fase creciente (luz cenicienta reflejada por los grandes océanos Atlántico y Pacífico).

El primero en explicar la luz cenicienta fue Galileo y lo hace de forma magistral en el libro recomendado en capítulos anteriores.

6. OTROS EFECTOS DE LA LUNA SOBRE LA TIERRA. EL DÍA DURA CADA VEZ MÁS

Todos hemos tenido la experiencia de ver, cuando estamos en la playa, que las mareas altas no se dan exactamente justo en el momento en que la luna está en su máxima altura, sino que suceden una o dos horas más tarde. Esto es debido a que el mar tiene mucha inercia y rozamiento y cuesta moverlo. La luna arrastra al mar.

El hecho de que la luna produzca mareas en la Tierra tiene un efecto secundario realmente sorprendente. Dado que la acumulación de agua de marea se queda mirando a la luna mientras la tierra gira, se produce un rozamiento provocado por esa masa de marea que se queda atrás, de manera que ¡se va frenando el giro de la tierra!

Se está frenando el giro de la tierra

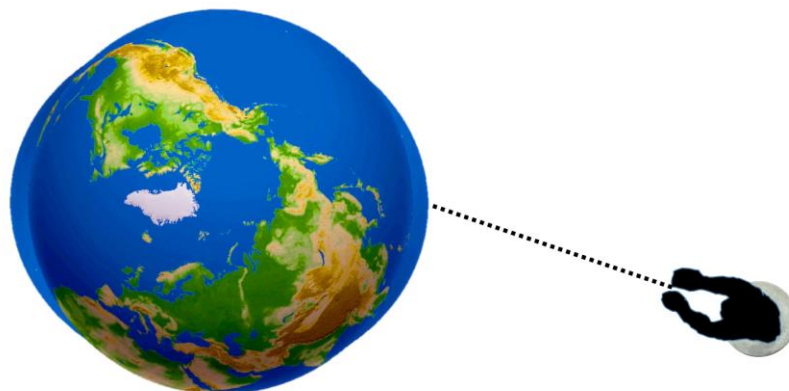


Figura 31

En efecto, en épocas de los dinosaurios, hace 80 Millones de años, el día duraba 2 horas menos. Ha sido la luna la que ha logrado que la Tierra gire a un ritmo razonable para permitir la evolución de formas de vida complejas. Hace miles de millones de años el día duraba solo unas pocas horas.

Pero por el principio de acción y reacción, si la Luna está frenando el giro de la Tierra,... ¡la Tierra está acelerando a la Luna! Como consecuencia la luna se está alejando de nosotros². Es decir, dentro de un tiempo, serán mucho más frecuentes los eclipses anulares, porque la luna se verá más pequeña que el sol, y no lo tapará del todo. Además, al alejarse la luna iremos perdiendo su efecto estabilizador sobre el eje de la Tierra provocando que el eje varíe con más intensidad, complicando los climas de la Tierra. Pero eso será dentro de muchos millones de años.

Tarde o temprano, dentro de miles de millones de años, se alcanzará un punto de equilibrio. En ese estado, la Luna por supuesto seguirá ofreciendo siempre la misma cara a la Tierra, pero además ésta, habiendo reducido enormemente su rotación, también ofrecerá siempre la misma cara a la Luna.

En ese estado, si no hay influencias exteriores, se producirá por fin el estado orbital perfecto, sin variaciones de ningún tipo y permaneciendo, esta vez sí, perfectamente estable por toda la eternidad. Quizás por entonces solo en América se podrá ver la luna (tanto de día como de noche) y en Europa será imposible verla nunca.

Como ejemplo de esta situación podemos observar en nuestro sistema solar el caso de Plutón y su satélite Caronte. Siendo ambos cuerpos de un tamaño bastante similar (astronómicamente hablando) y girando ambos a una muy corta distancia el uno del otro, han tenido ya tiempo para alcanzar el equilibrio orbital de mínima energía, formando un sistema binario en el que ambos cuerpos recorren una órbita circular alrededor del centro común del sistema y ambos con períodos de rotación idénticos, ofreciéndose siempre la misma cara el uno al otro.

Video de la rotación de Plutón y Caronte:

<https://www.youtube.com/watch?v=LzS1ks3IDtI>

(Nótese cómo desde Plutón Caronte siempre se ve a la misma altura respecto al horizonte, al igual que se ve la tierra desde la luna).

En los videos que están disponibles en la plataforma hemos realizado algunos casos prácticos que nos permiten aprender a orientarnos, e incluso saber en qué punto del globo terrestre nos encontramos, con solo mirar a la luna.

² Solo unos centímetros al año

7. CONDICIONES DE VIDA EN LA LUNA

Si vas a vivir en la luna por un tiempo, debes tener en cuenta una serie de singularidades que te llamarán la atención. Estos conocimientos te servirán también para detectar fallos en películas o falsificaciones y fotos trucadas.

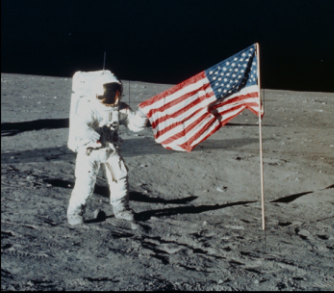
Las mayores singularidades se dan por el hecho de que no hay atmósfera. Y como consecuencia de ello:

Necesitarás siempre un suministro de oxígeno

Como no hay aire, ningún sistema de paracaídas funcionará, por lo que tu artilugio espacial debe ser capaz de alunizar por medio de motores que controlen el descenso.

- Por supuesto tampoco hay viento. Cualquier bandera que coloques para decir que estuviste allí quedará colgando flácida hacia abajo y sin moverse (muy poco estético). A no ser que utilices algún tipo de material rígido.

Condiciones de vida en la luna



- No hay atmósfera. No hay oxígeno
- No hay aire. No funcionan los paracaídas. Es necesario alunizar por medio de motores que controlen el descenso.
- No hay viento. Cualquier bandera que coloques para decir que estuviste allí quedará colgando flácida hacia abajo y sin moverse (muy poco estético). A no ser que utilices algún tipo de material especial
- Además, por el mismo motivo, no se puede transmitir el sonido. Si tu compañero da palmadas o te grita nunca lo oirás (a menos que tengas la radio conectada).
- Por último, al no haber atmósfera, el cielo se ve siempre negro y no azul.

Figura 32: En la luna no hay viento

- Además, por el mismo motivo, no se puede transmitir el sonido. Si tu compañero da palmadas o te grita nunca lo oirás (a menos que tengas la radio conectada).

- Por último, al no haber atmósfera, el cielo se ve siempre negro y no azul.

Ten en cuenta también que el día en la luna dura 650 horas, la mitad de día y la mitad de noche. Y si quieres vistas a la tierra no olvides que hay todo un hemisferio en la luna desde donde nunca se ve (la cara oculta).

Todo el suelo de la luna es polvo. Está originado por continuos impactos de micrometeoritos que provienen del espacio. Y por supuesto el relieve está plagado de cráteres provocados por el impacto de meteoritos de mayor tamaño.

Por último consideremos la temperatura en la luna y cómo es la gravedad allí.

PENSAR:

¿A qué temperatura teórica se encuentra la superficie de la luna? ¡Téngase en cuenta que su albedo es solo del 7%!

Cuando hablamos de la Tierra vimos que ésta recibía 1368 w/m^2 en lo alto de su atmósfera. Obviando el hecho de que la luna a veces está un poco más cerca del sol y otras un poco más lejos, consideremos que la luna recibe la misma cantidad de energía solar por m^2 que la Tierra.

Si esta energía debe calentar toda la superficie de la luna, debemos dividirla entre cuatro (porque la superficie de una esfera es cuatro veces la superficie de un disco de su mismo radio). Por tanto recibe 342 w/m^2 y, dado que no hay atmósfera, todo llega a su superficie. Solo el 7% es reflejado y por tanto tenemos 318 w/m^2 efectivos para calentarnos. Esta será la cantidad de energía emitida por la luna dado que su temperatura permanece estable. Según la Ley de Stephan Boltzman la temperatura que debe alcanzar para emitir 318 w/m^2 es de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, curiosamente justo la temperatura de fusión del agua. Esta temperatura es la media entre el día y la noche.

Sin embargo, en la luna se da la peculiaridad de que el día dura 14 días terrestres y la noche otros tantos. Por tanto quizás merezca la pena calcular qué temperatura hace durante el día. Durante el día los 1368 w/m^2 solo se deben repartir entre la semiesfera que da al sol y por tanto solo hay que dividirlo por la mitad (porque la semiesfera tiene el doble de superficie que el disco del mismo radio). Y por tanto, teniendo en cuenta el albedo del 7%, recibe durante el día $1368 \times 0,5 \times 0,93 = 636 \text{ w/m}^2$. La temperatura que alcanza la luna para emitir esta cantidad de energía y alcanzar el equilibrio durante el día sería de $52,5 \text{ }^\circ\text{C}$ de media en la zona iluminada.

Sin embargo en la zona del ecuador de la luna que encara directa al sol, donde se reciben el 93% de los 1368 w/m² íntegros, se pueden alcanzar temperaturas de 114 grados centígrados.

En la noche de la cara vista (cuando es luna nueva) la Luna se enfriará muy rápidamente por no tener atmósfera e irá perdiendo su temperatura de forma muy rápida, de hecho alcanza temperaturas de -150°C. En los desiertos de la tierra ocurre algo semejante porque no hay vapor de agua ni nubes que produzcan efecto invernadero y la tierra del desierto se enfría muy rápidamente.

PENSAR:

¿Cómo es la gravedad de la luna en comparación con la tierra, si tenemos en cuenta que el radio de la tierra es 3,62 veces más grande y la masa de la tierra es 81 veces superior?

La gravedad es proporcional a la masa del planeta e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por tanto $81/(3,62 \times 3,62) = 6,15$.

Por tanto la gravedad en la luna es 6,15 veces menor que en la tierra. Sería como pesar 13 kg en lugar de 80 kg. Podríamos dar grandes saltos.

8. ECLIPSES SOLARES Y LUNARES

Para este apartado y para todos los temas que vienen a continuación, es muy recomendable la descarga de la aplicación SOLAR WALK, disponible en Apple store y en Google Play (solo dos euros). Esta aplicación te permitirá entender de manera muy eficaz el modo en que los diferentes astros se mueven en el sistema solar. Y podrás combinarla con la aplicación STAR WALK para poder ver cómo se ven los astros desde cualquier lugar de la tierra en un día y una hora determinada.

Cuando explicamos las fases lunares seguramente muchos tuvieron una inquietud. ¿Por qué cuando la luna se pone entre la tierra y el sol (luna nueva) no se produce un eclipse de sol?, y ¿por qué cuando hay luna llena no hay siempre un eclipse de luna?



Figura 33: Fenómeno de luna nueva. ¿Por qué no se produce un eclipse de sol siempre?



Figura 34: Fenómeno de luna llena. ¿Por qué no se produce un eclipse de luna siempre?

En efecto, cada 14 días habría un eclipse de luna y 14 días después un eclipse de sol, si no fuera porque la órbita de la luna está inclinada ligeramente respecto al plano de la eclíptica (está inclinada 5° y $9'$). Las intersecciones de la curva que describe la luna alrededor de la tierra con el plano de la eclíptica se llaman nodos.

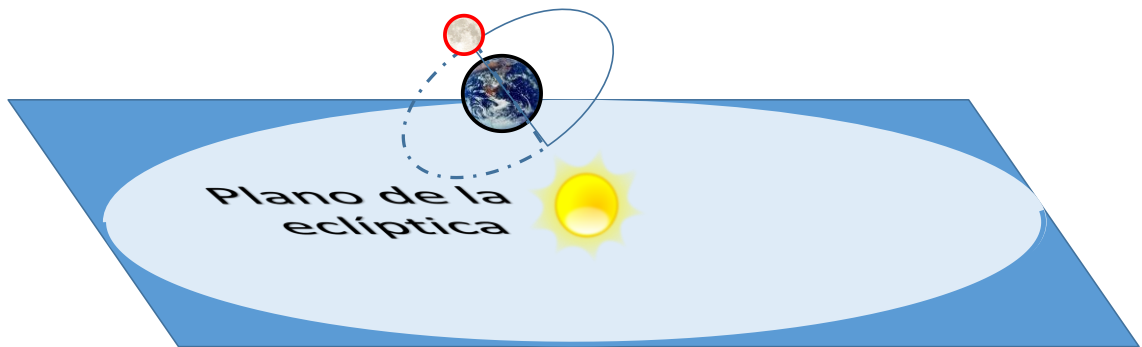


Figura 35

Las intersecciones de la curva que describe la luna alrededor de la tierra con el plano de la eclíptica se llaman nodos.

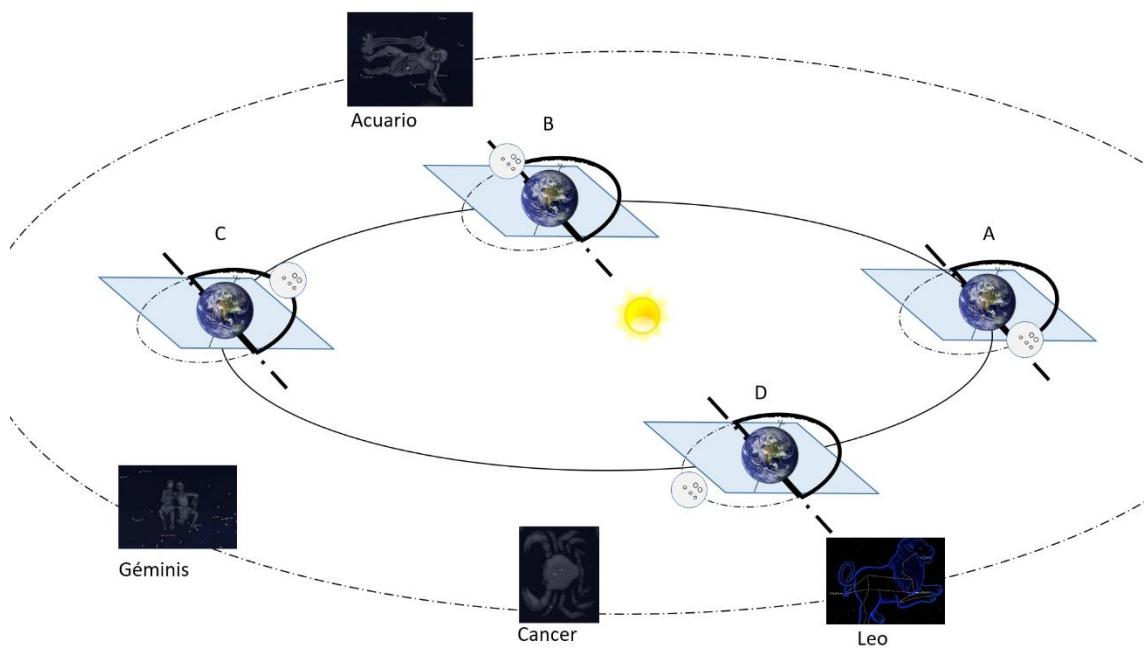


Figura 36: Diferentes posiciones de la tierra y la luna para el análisis de posibles eclipses. Los nodos de la luna apuntan a acuario y a Leo en el año 2017. Por razones didácticas en esta ocasión colocamos a Géminis y Cáncer abajo para tener una visual de la inclinación de los nodos. En el dibujo la Tierra gira en el sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del sol.

Vemos en el gráfico anterior que la curva que describe la luna alrededor de la tierra está en un plano ligeramente inclinado respecto al plano de la eclíptica. Por esta razón, cuando la Tierra está en A o en C, o en cualquier otro punto de su órbita, es imposible que haya eclipses porque la luna nunca podrá tapar al sol, ni la tierra tapar a la luna. Solo cuando la tierra esté en los puntos B o D será posible un eclipse, porque es cuando los nodos están apuntando hacia el sol. En 2017 los nodos apuntan a Acuario y a Leo. Por eso solo cuando el sol esté en Acuario (Febrero) o en Leo (Agosto) será posible un eclipse. Pero como veremos, los meses de eclipse van variando poco a poco con el paso de los años.

Pero además se tiene que dar la coincidencia de que, cuando la Tierra esté en B o en D, justo la luna esté pasando por el nodo.

En el gráfico de la figura (que es solo didáctica) vemos que, en ese año, se produce un eclipse de luna (la tierra da sombra a la luna) en la posición B, en Agosto. Téngase en cuenta que la posición B se corresponde con Agosto porque el sol está en Leo (desde la tierra el sol se ve en Leo). Sin embargo en la posición D (en Febrero, cuando el sol se ve en Acuario), según la figura, no se produciría un eclipse porque la luna no está en ese momento en el nodo.

EJERCICIO:

¿Se produce algún eclipse en el año de la figura siguiente? ¿En qué mes? ¿Es de sol o de luna?

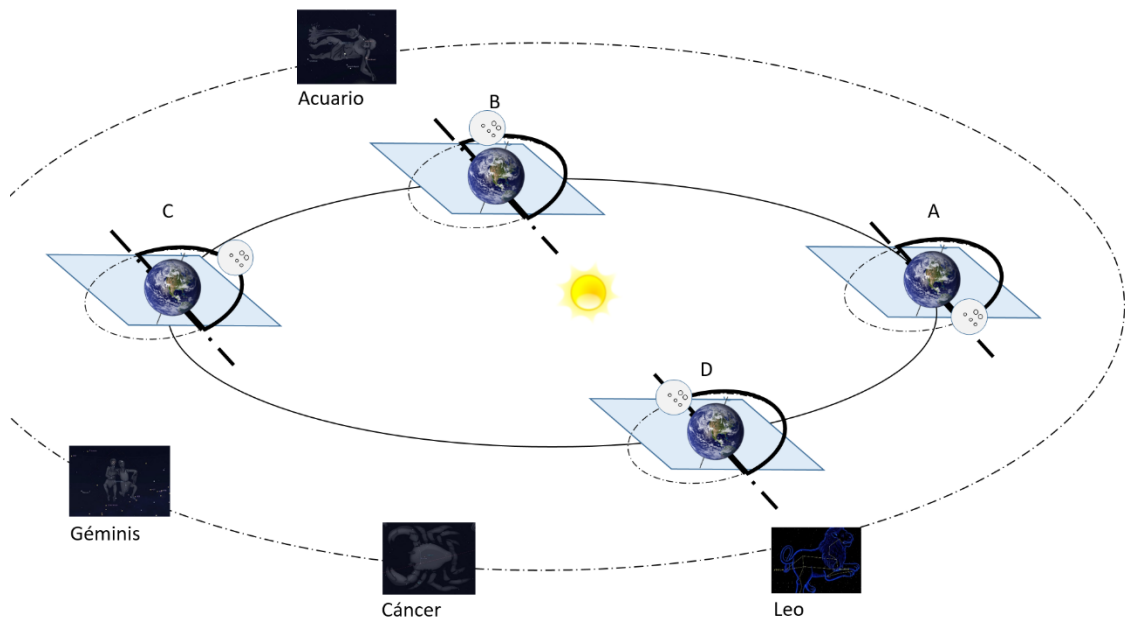


Figura 37

¿Se produce algún eclipse en el año de la figura siguiente?, ¿en qué mes?, ¿es de sol o de luna?

Según la figura de arriba, en la posición B (Agosto), cuando el sol está en Leo, no se produce ningún eclipse porque la luna no está en el nodo. Sin embargo en la posición D, cuando el sol está en Acuario (Febrero) si hay un eclipse de sol (la luna tapa al sol porque se encuentra en el nodo).

Giro de los nodos. Clave para predecir un eclipse

Téngase en cuenta además que la línea de nodos va girando poco a poco, de manera que completa una revolución en 18,6 años. Es decir la línea de nodos gira cada año $19,35^\circ$ que equivalen a 19,62 días en el giro de la tierra alrededor del sol. De manera que con el paso de los años los eclipses comienzan a producirse en otras constelaciones.

El problema es que el retraso en las fechas de los eclipses de año a año no se produce uniformemente cada 19,62 días. Si no que se puede producir a veces con 10-11 días y otras veces con 25-26 días (esto segundo es un poco más frecuente). La media de retrasos es de 19,62 días por año. Explicamos a continuación por qué se dan con esos saltos.

Eclipses cercanos:

Vemos en la siguiente tabla que las fechas de los eclipses (de sol y de luna indistintamente) se van retrasando de año en año, con saltos de 25/26 días o de 10/11 días:

2017	2018	2019	2020	2021
26-feb.	31-ene.	21-ene.		
21-ago.	27-jul.	2-jul.	21-jun.	26-may.
		26-dic.		
Salto de fechas (en días)				
	-26	-10		
	-25	-25	-11	-26
		-26		

Tabla 1: Primera tabla: Fechas de eclipses de cada año (en negrita los de sol)

Segunda tabla: Retrasos en la fecha del eclipse respecto a al eclipse del año anterior

Dado que el giro de los nodos ya hemos visto que es de 19,6 días por año, serán más frecuentes los saltos de 25/26 días que los de 10/11 días. De manera que la media será de 19,6 días.

Se indica a continuación la siguiente tabla de eclipses de sol:

FECHA	TIPO	DURACIÓN MÁXIMA	MÁXIMO ECLIPSE TUJ	ZONA GEOGRÁFICA DE VISIBILIDAD DEL ECLIPSE TOTAL / ANULAR
3 Octubre 2005	Anular	4m 31s	10h 28m	España, Portugal, Argelia, Túnez, Libia, Sudán, Etiopía, Kenia
29 Marzo 2006	Total	4m 7s	10h 15m	Costa de Marfil, Nigeria, Níger, Libia, Turquía, Rusia
22 Septiembre 2006	Anular	7m 9s	11h 41m	Guyana, Surinam, Guayana francesa
7 Febrero 2008	Anular	2m 1s	03h 55m	Antártida
1 Agosto 2008	Total	2m 27s	10h 25m	Canadá, Groenlandia, Siberia, Mongolia, China
26 Enero 2009	Anular	7m 53s	07h 57m	Sumatra, Borneo
22 Julio 2009	Total	6m 39s	02h 37m	India, Nepal, Bhutan, China (Shangai), Océano Pacífico
15 Enero 2010	Anular	11m 08s	07h 10m	República Centroafricana, Zaire, Kenia, Somalia, Océano Índico, India, Sri Lanka, Birmania, China
11 Julio 2010	Total	5m 20s	19h 30m	Océano Pacífico, Chile, Argentina
20 Mayo 2012	Anular	5m 46s	23h 53m	China, Japón (Tokio); USA Continental: Oregón, California, Nevada, Arizona, New Mexico
13 Noviembre 2012	Total	4m 02s	22h 12m	Norte de Australia, Océano Pacífico
10 Mayo 2013	Anular	6m 04s	00h 30m	Australia, Nueva Guinea, Islas Salomón, Océano Pacífico
3 Noviembre 2013	Anular/Total	1m 40s	12h 43m	Gabón, Congo, República Dem. Congo, Uganda, Kenia, Etiopía
20 Marzo 2015	Total	2m 47s	09h 51m	Océano Atlántico, Islas Faroe, Islas Spitzbergen
9 Marzo 2016	Total	4m 10s	01h 58m	Sumatra, Borneo, Islas Célebes, Océano Pacífico
1 Septiembre 2016	Anular	3m 06s	09h 08m	Congo, Zaire, Tanzania, Mozambique, Madagascar
26 Febrero 2017	Anular	1m 02s	14h 05m	Chile, Argentina, Océano Atlántico, Angola, Zaire, Zambia
21 Agosto 2017	Total	2m 40s	18h 27m	USA continental: Oregón, Idaho, Wyoming, Nebraska, Missouri, Tennessee, North and South Carolina
2 Julio 2019	Total	4m 32s	19h 2m	Océano Atlántico, Chile, Argentina
26 Diciembre 2019	Anular	3m 40s	05h 21m	Arabia, India, Sri Lanka, Borneo, Malasia (Singapur), Sumatra
21 Junio 2020	Anular	1m 02s	06h 40m	China, India, Pakistán, Arabia, Etiopía, Sudán, Zaire
14 Diciembre 2020	Total	2m 10s	16h 16m	Chile, Argentina
10 Junio 2021	Anular	3m 51s	10h 44m	Canadá, Groenlandia, Siberia
4 Diciembre 2021	Total	1m 5s	07h 32m	Antártida
2 Abril 2023	Anular/Total	1m 16s	04h 23m	Australia, Timor, Nueva Guinea
14 Octubre 2023	Anular	5m 18s	17h 56m	USA continental: Oregón, California, Nevada, Arizona, New Mexico, Tejas, Yucatán, Belice, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Colombia, Brasil
8 Abril 2024	Total	4m 28s	18h 21m	Méjico, USA Continental: Tejas, Oklahoma, Missouri, Illinois, Indiana, Ohio, New York, Canadá (Montreal)
2 Octubre 2024	Anular	7m 25s	18h 46m	Chile, Argentina (Patagonia)
17 Febrero 2026	Anular	2m 20s	12h 13m	Antártida
12 Agosto 2026	Total	2m 18s	17h 47m	Ártico, Groenlandia, Islandia, España
6 Febrero 2027	Anular	7m 51s	16h 00m	Chile, Argentina, océano Atlántico
2 Agosto 2027	Total	06m 23s	10h 07m	España, Marruecos, Argelia, Libia, Egipto, Arabia Saudí, Yemen, Somalia
26 Enero 2028	Anular	10m 27s	15h 08m	Ecuador, Perú, Brasil, Surinam, Portugal, España
22 Julio 2028	Total	05m 10s	02h 56m	Australia, Nueva Zelanda
1 Junio 2030	Anular	05m 21s	06h 29m	Argelia, Túnez, Grecia, Turquía, Rusia, norte China, Japón
25 Noviembre 2030	Total	03h 44m	06h 51m	Botswana, Suráfrica, Australia

Tabla 2: Tabla de eclipses de sol. Fuente www.vigiacosmos.es

A continuación indicamos la tabla de eclipses de Luna:

FECHA	TIPO	COMIENZO TOTALIDAD FIN TOTALIDAD (TU)	CONSTELACIÓN	ZONA GEOGRÁFICA DE VISIBILIDAD DEL ECLIPSE TOTAL
16 Mayo 2003	Total	03 13 / 04 06	ESCORPIÓN	Europa, América del Norte y Sur, Pacífico
9 Noviembre 2003	Total	01 06 / 01 30	TAURO	Asia Central, África, Europa, América del Sur
4 Mayo 2004	Total	19 51 / 21 08	LIBRA	Australia, Asia, África, Europa, América del Sur
28 Octubre 2004	Total	02 23 / 03 44	ARIES	Asia, África, Europa, América del Norte y Sur
3 Marzo 2007	Total	22 42 / 23 57	LEO	Asia, África, Europa, América del Sur
28 Agosto 2007	Total	09 51 / 11 21	ACUARIO	América del Norte y Sur, Australia, Sureste de Asia
21 Febrero 2008	Total	02 59 / 03 50	LEO	África, Europa, América del Norte y Sur
21 Diciembre 2010	Total	07 38 / 08 52	GÉMINIS	América del Norte y Sur, Sureste Asia, Australia
15 Junio 2011	Total	19 21 / 21 02	OFIUCO	Asia, África, Europa, América del Sur
10 Diciembre 2011	Total	14 04 / 14 57	TAURO	Australia, Asia
15 Abril 2014	Total	07 05 / 08 24	VIRGO	América del Norte y Sur
8 Octubre 2014	Total	10 23 / 11 23	PISCIS	América del Norte y Sur
4 Abril 2015	Total	11 53 / 12 05	VIRGO	América del Norte y Sur, Australia, Asia
28 Septiembre 2015	Total	02 09 / 03 22	PISCIS	África, Europa, América del Norte y Sur
31 Enero 2018	Total	12 50 / 14 07	CÁNCER	Australia, Asia
27 Julio 2018	Total	19 28 / 21 12	CAPRICORNIO	Asia, África, Europa
21 Enero 2019	Total	04 39 / 05 42	ACUARIO	África, Europa, América el Norte y Sur
26 Mayo 2021	Total	11 08 / 11 26	OFIUCO	América del Norte y Sur, Australia, Asia
16 Mayo 2022	Total	03 27 / 04 53	ESCORPIÓN	África, Europa, América del Norte y Sur
8 Noviembre 2022	Total	10 15 / 11 40	ARIES	América del Norte y Sur, Australia, Asia
14 Marzo 2025	Total	06 24 / 07 30	VIRGO	América del Norte y Sur, Australia, Asia
7 Septiembre 2025	Total	17 29 / 18 52	ACUARIO	Asia, África, Europa
3 Marzo 2026	Total	11 04 / 13 17	LEO	Nueva Zelanda, Australia, Asia
31 Diciembre 2028	Total	16 26 / 17 27	GEMINIS	Europa, África, Asia, Australia, Pacífico
26 Enero 2029	Total	02 31 / 04 13	TAURO	América del Norte y Sur, Europa, África, Asia
20 Diciembre 2029	Total	22 15 / 23 08	TAURO	América del Norte y Sur, Europa, África, Asia

Tabla 3: Tabla de eclipses de luna. Fuente www.vigiacosmos.es

Los antiguos no comprendían totalmente estos fenómenos pero tuvieron la paciencia de anotar con cuidado cada vez que se visualizaba uno, generando tablas históricas de eclipses del pasado. A partir de dichas tablas buscaban patrones matemáticos que encajaran. El ciclo de 18,6 años lo conocían perfectamente y los saltos de fecha de 25-10 días también. Aun así, tiene un gran mérito, porque lo que nosotros apuntamos en las tablas es la fecha en que se produce un eclipse en algún punto de la Tierra, de manera que podemos comprender mucho más fácilmente los ciclos. Sin embargo los antiguos solo podían anotar los eclipses de los que tenían noticia (muy pocos), es decir aquellos que se podían ver desde algún punto cercano o comunicado con su ciudad.

EJERCICIO:

Viendo estas tablas, ¿podrías aventurarte a predecir cuándo serán los eclipses de 2022?

2017	2018	2019	2020	2021
26-feb.	31-ene.	21-ene.		
21-ago.	27-jul.	2-jul.	21-jun.	26-may.
		26-dic.		
Saltos de fechas (en días)				
	-26	-10		
	-25	-25	-11	-26
		-26		

Tabla 4

En 2022 podríamos tener un eclipse el 15 o 16 de Mayo (26 de Mayo – 10/11 días) o bien el 1 de Mayo o el 30 de Abril (26 de Mayo – 25/26 días).

Y también podríamos tener un eclipse en Noviembre. Para hacer este cálculo tengamos en cuenta que el último eclipse en estas fechas se produjo en 2019, aunque en 2020 no se produjera un eclipse también hay que considerarlo en los cálculos de las restas de días. Por tanto, en 2022 podríamos tener un eclipse, bien el 19 o 20 o 21 de Noviembre (26 de Diciembre – 25/26 días – 11/10 días) o bien el 4, 5 o 6 de Noviembre (25/26 de Diciembre – 25/26 días – 25/26 días).

Es decir, las fechas posibles de eclipse serían:

15-16 de Mayo

1 de Mayo o 30 de Abril

19-20-21 de Noviembre

4-5-6 de Noviembre

Si miramos la tabla vemos que los eclipses de 2022 se producen el 8 de Noviembre y el 16 de Mayo (ambos de Luna). La fecha del 8 de Noviembre es una excepción porque supone restar dos veces 24 días.

Luego seguiremos profundizando en el cálculo y predicción de los eclipses.

9. FENÓMENO NATURAL DE “LUNA EN SANGRE”



Figura 38: Fenómeno natural de luna en sangre

Este fenómeno debió ser realmente espectacular para las personas que lo han contemplado a lo largo de la historia de la humanidad. El efecto es exactamente como si la luna estuviera manchada de sangre, y además, solo se da en luna llena por lo que la imagen es aún más asombrosa.

Se da siempre asociado a un fenómeno de eclipse de luna. El color rojo es debido a que los rayos de sol que iluminan la luna durante el eclipse han tenido que atravesar la atmósfera terrestre y la luz refractada que atraviesa el Nitrógeno y el oxígeno queda con mayoría de frecuencia en el rojo. Es el fenómeno equivalente a cuando atardece en la tierra, donde los rayos de sol están atravesando mucha más atmósfera.



Figura 39: Atardecer rojo

Pero hay una diferencia notable entre ambos fenómenos. En el caso del atardecer rojo, el sol se ve rojo desde la tierra, pero desde el espacio está perfectamente normal. Sin embargo en el caso de la luna en sangre, la luna realmente se ve roja ¡también desde el espacio!



Figura 40: Luna en sangre vista desde el espacio

A continuación explicamos cómo se produce este fenómeno:

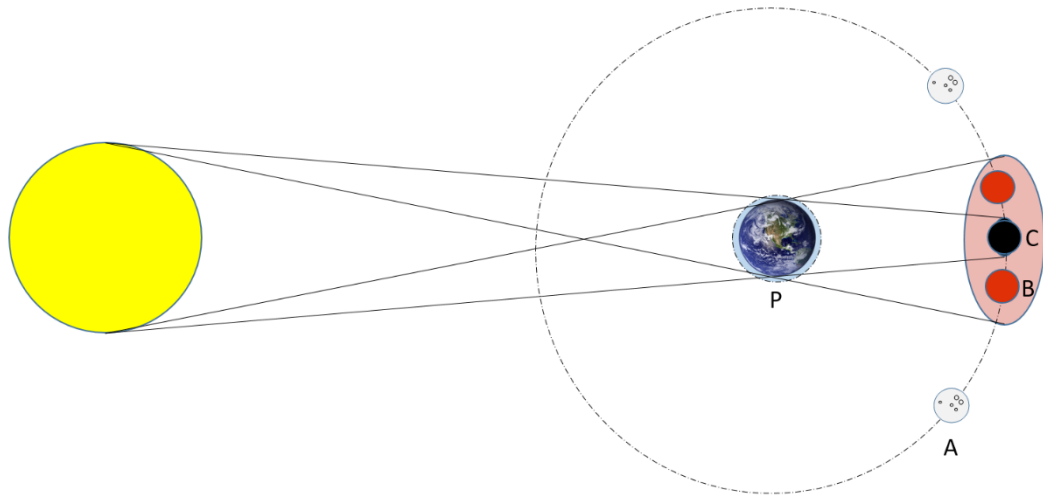


Figura 41: Explicación del fenómeno de la luna en sangre, durante un eclipse de luna.

La luna va girando alrededor de la tierra pasando por los puntos A, B y C. La tierra está entre el sol y la luna. El sol es bastante más grande que la tierra y por tanto genera una sombra completa (umbra) y una sombra difusa alrededor de ella (penumbra). La penumbra es consecuencia de que los rayos que salen del sol y pasan por P logran entrar en la zona tenue, si bien no todos. Cada vez que la luna se va acercando al punto C va recibiendo menos rayos solares. En el punto B, la luna sigue siendo Luna Llena pero va perdiendo intensidad.

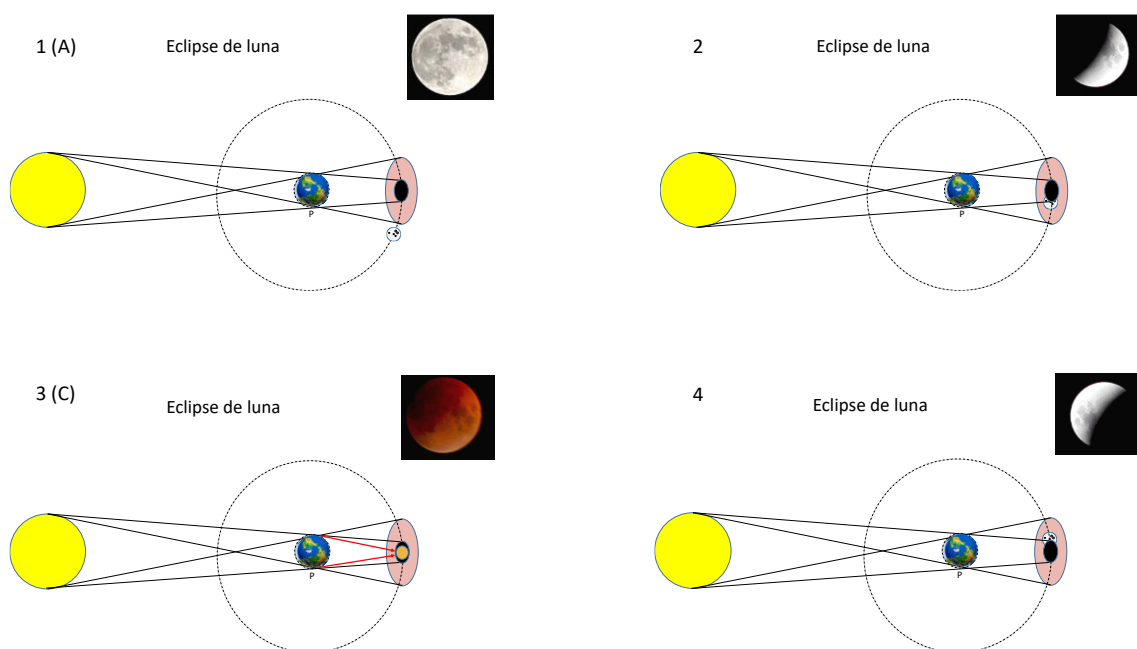


Figura 42

Cuando la luna alcanza el punto C, en teoría no debería haber ningún rayo del sol capaz de alcanzar a la luna, de manera que se produciría un eclipse total. Sin embargo los rayos al cruzar la atmósfera terrestre se refractan y cambian su dirección logrando alcanzar la luna y tintados del rojo característico de nuestra atmósfera.

Eclipse de luna

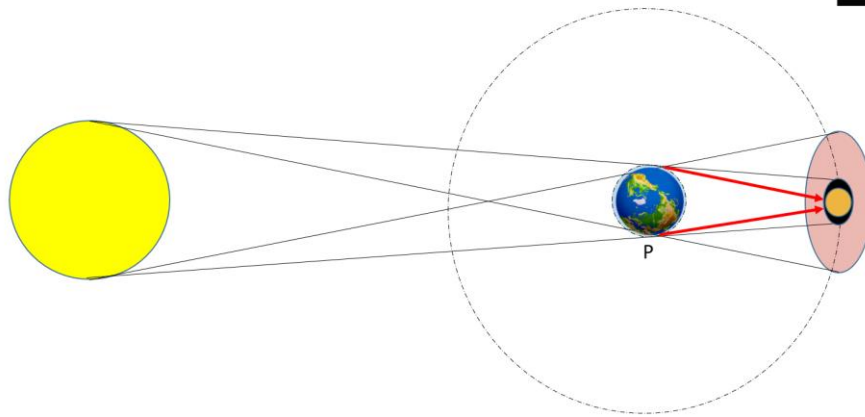


Figura 43

En realidad, cuando la luna se encuentra iluminada en sangre, desde ella vemos un eclipse de sol, de manera que la tierra se está poniendo delante del sol.



Figura 44: Eclipse de sol desde la luna

Los eclipses de luna se ven desde toda la tierra (siempre que toque que sea de noche), porque es un fenómeno que se ve en realidad desde el espacio exactamente igual.

PENSAR:

¿Por qué es físicamente imposible que hubiera habido un eclipse de sol el día de la muerte de Jesús de Nazaret? ¿Qué pudo haber ocurrido?

La muerte de Jesús de Nazaret, según los evangelios, se produce en plena Pascua judía, justo antes del Sabbat de Pascua. La Pascua se fija según el calendario lunar de manera que siempre coincida en luna llena. Con todo lo estudiado sabemos que no puede haber un eclipse de sol un día de luna llena (porque la Tierra estará entre el sol y la Luna, y no la Luna entre la Tierra y el sol).

Pero analicemos un poco más la cuestión, que como el lector se podrá imaginar, ha sido muy debatida.

¿Qué dicen exactamente los evangelios? *“Hacia el mediodía las tinieblas cubrieron toda la región hasta las tres de la tarde. El sol se oscureció”* (Lc 23, 44-45) (Mt 27,45). Según Marcos *“Cuando vino la hora sexta, hubo tinieblas sobre toda la tierra hasta la hora novena”*.

Como aclaración previa, indicar que los romanos consideraban el amanecer la primera hora del día. La hora sexta era el medio día, con el sol en lo más alto. La hora nona eran las tres de la tarde (hora solar).

Como se sabe, en la Pascua judía siempre es luna llena (desde hace 3,000 años los judíos siguen un calendario lunar para que así suceda) y ya sabemos que es imposible que hubiera habido un eclipse de sol en luna llena. Además sabemos que un oscurecimiento de tres horas no puede ser debido a un eclipse. Sin embargo, los evangelios hablan claramente de un oscurecimiento del sol, ¿debido a qué?

En la carta apócrifa de Poncio Pilatos a Tiberio se dice esto “Y mientras le crucificaban, sobrevinieron unas tinieblas que cubrieron toda la Tierra, quedando oscurecido el sol a mediodía y apareciendo las estrellas, en las que no había resplandor; la luna cesó de brillar, como si estuviera teñida en sangre”.

No se conoce ningún fenómeno que haya podido ocultar el sol durante tres horas de manera que se vean las estrellas, y que además haya afectado a toda la Tierra. Ya hemos visto que los eclipses afectan solo a una parte pequeña del globo. ¿Pero qué pasó con la luna, que cesó de brillar y se tiñó de sangre?

San Pedro, según Hechos de los apóstoles, el día de pentecostés dice a la multitud de Jerusalén: *“esto es lo que fue dicho por el profeta Joel: (...) el sol se convertirá en tinieblas y la luna en sangre, antes que venga el día del Señor, (...) prodigios y señales que Dios hizo entre vosotros por medio de él, como también vosotros habéis visto”*.

Lo curioso es que Joel ya profetizaba algo que era imposible, una luna en sangre a la vez que un eclipse de sol. Pero San Pedro parece estar explicando esto a testigos que al parecer vieron acontecimientos naturales extraños el día de la muerte de Jesús y por eso termina diciendo “como también vosotros habéis visto”.

Quizás valga la pena obviar de momento el oscurecimiento del sol y analizar la posibilidad de que, en efecto, se hubiera producido un eclipse de luna con efecto de luna en sangre.

¿Qué eclipses de luna se dieron en esos años?

Tenemos uno que es realmente interesante. El 3 de Abril del año 33

Con la app Solar Walk podemos simular este fenómeno para ese día. Y en efecto, en Judea, en el atardecer se debió ver una luna llena apareciendo por el Este, de color rojo levantándose en el horizonte.

El eclipse había tenido su máximo a las 17:15, pero a esa hora la luna aún no se veía en Jerusalén. Hubo que esperar hasta las 18:20 para que se asomara por el horizonte. El eclipse de luna finalizó 30 minutos después.

Se da la circunstancia, además, que el viernes 3 de Abril fue viernes de Pascua.



Figura 45: Luna en sangre amaneciendo el 3 de Abril del año 33 a las 18:20 h. En ese momento Jesús de Nazaret ya llevaba tres horas muerto, puesto que murió a las tres de la tarde (hora nona). En el momento de la aparición de este fenómeno de luna en sangre sobre el horizonte estarían descendiéndolo de la cruz dadas las prisas por enterrarlo antes del inicio del sábado de Pascua.

La explicación de la ocultación del sol cabe encontrarla en una posible tormenta de arena, pero esto no explicaría que el sol se hubiera ocultado “en toda la Tierra”, y mucho menos que se vieran las estrellas.

10. SUPERLUNA

La luna gira alrededor de la tierra en una órbita elíptica que es casi circular pero no llega a serlo. El eje de la órbita elíptica apunta a Aries y Escorpio.

En Noviembre de 2016 se dio la circunstancia de que además el Perigeo (cuando la luna está más cerca de la Tierra) ha coincidido con Luna Llena, de manera que el sol y la tierra atraían a la vez a la luna.

En Noviembre de 2016, el perigeo (cuando está más cerca), se da cuando la luna está en Aries, y en ese momento la luna se encuentra en su punto más bajo respecto al plano de la eclíptica (se encuentra en el punto medio entre nodos). Y el apogeo se da cuando está en Escorpio encontrándose en ese momento la luna en el punto más alto respecto al plano de la eclíptica (también en el punto medio entre dos nodos).

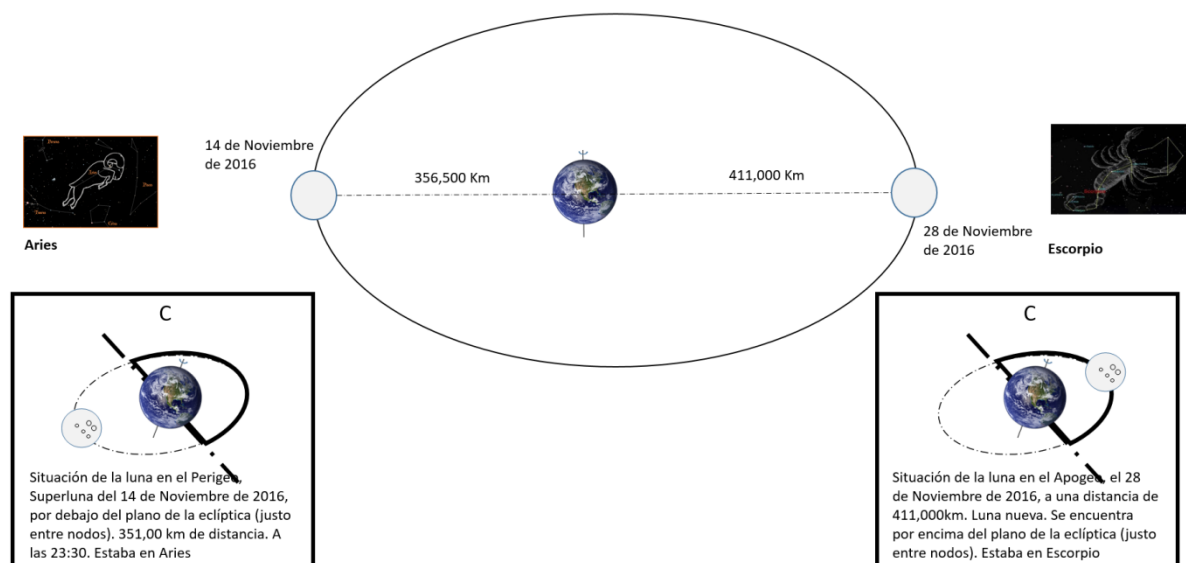


Figura 46: El 14 de Noviembre de 2016 se dio una superluna. Era luna llena (en Noviembre el sol está en Escorpio) y además la luna se encontraba muy cerca de la tierra.



Figura 47: Diferencia de tamaño visible. Luna en el perigeo (pto más cercano de la tierra) y en el apogeo (lejos)

11. ECLIPSES DE SOL

Los eclipses de sol se producen por el fenómeno contrario al eclipse de luna.

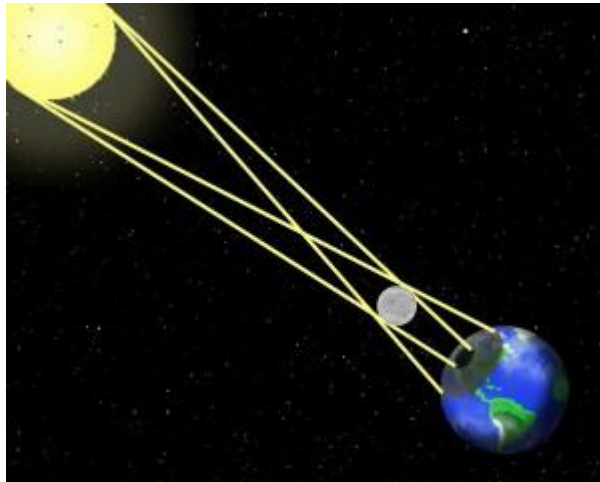


Figura 48: Explicación de un eclipse de sol

En un eclipse de sol, la luna se coloca entre el sol y la Tierra. De nuevo se produce el mismo fenómeno, la luna produce una sombra totalmente oscura (umbra) rodeada de una sombra tenue (penumbra). En este caso, dado que la luna no tiene atmósfera, la tierra no se tinte de rojo. Esta sombra recorre la tierra mientras dura el eclipse.

La sombra oscura de eclipse total (umbra) tiene un tamaño mucho menor que la propia luna.

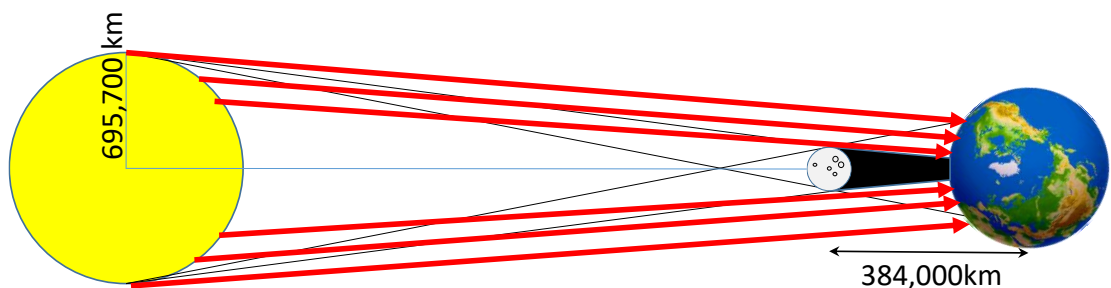


Figura 49

El dibujo explica por qué la sombra (umbra) de la luna es más pequeña que la propia luna.

El tamaño de la sombra en realidad es variable y depende de la distancia de la luna a la tierra en ese momento y también de la distancia de la tierra al sol en ese momento. Así, cuando coincide que la Tierra se encuentra más cerca del sol, y hay un eclipse, entonces no existe umbra (porque hay eclipses anulares y no totales). Sin embargo, cuando el sol se encuentra más lejos, la sombra puede ser de unos 250 km de diámetro.

A continuación intentamos explicar con mayor detalle cuándo se pueden producir eclipses anulares o eclipses totales, e intentamos calcular en cada caso el tamaño de la sombra que proyecta la Luna sobre la Tierra.

En este análisis es clave tener en cuenta tres cosas:

- Que para hallar la distancia de la luna a la superficie de la Tierra es necesario restar el radio de la Tierra
- Que la luna gira alrededor de la tierra en una órbita elíptica (casi circular) con la tierra en un foco.
- Que la tierra gira alrededor del sol también en una órbita elíptica con el sol en un foco.

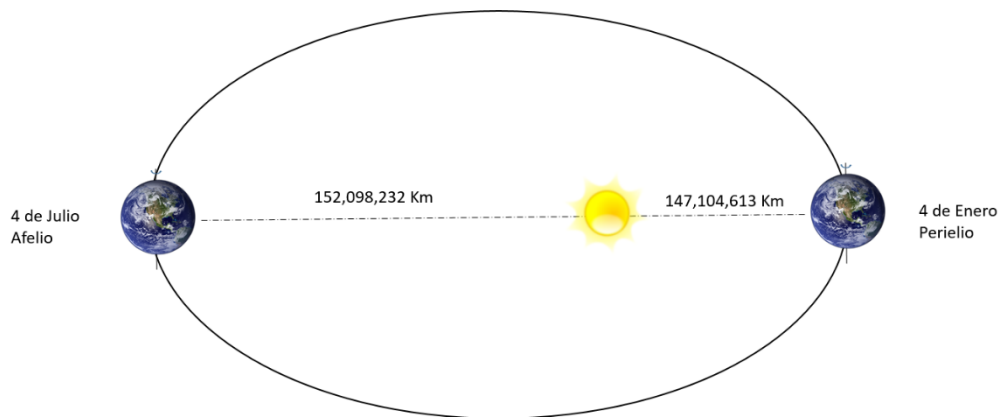


Figura 50

Intentemos calcular cuál es el máximo radio que puede llegar a tener la sombra oscura de la luna (umbra). Esto se dará cuando se produzca la coincidencia de que haya un eclipse de sol en un momento en que la luna esté en su perigeo (cerca) y la tierra en su afelio (lejos del sol).

El radio de la umbra se puede calcular a partir de sencillas operaciones trigonométricas hasta llegar a la siguiente fórmula:

		Perelio de la tierra		Afelio de la tierra	
		Perigeo de la luna	Apogeo de la luna	Perigeo de la luna	Apogeo de la luna
	Radio de la luna	1.737	1.737	1.737	1.737
	Radio del sol	695.700	695.700	695.700	695.700
	Distancia de la luna	351.000	411.000	351.000	411.000
	Distancia del sol	147.104.613	147.104.613	152.098.232	152.098.232
	Radio de la tierra	6.370	6.370	6.370	6.370
A	Radio sol-Radio Luna	693.963	693.963	693.963	693.963
B	Dist soltierra - tierraluna	146.753.613	146.693.613	151.747.232	151.687.232
	A/B	0,004729	0,004731	0,004573	0,004575
C	Dist tierraluna - radiotierra	344.630	404.630	344.630	404.630
D	(A/B)*C	1.630	1.914	1.576	1.851
RADIO UMBRA	Radioluna-D	107	-177	161	-114
DIAMETRO UMBRA	Diametro Umbra	215	-354	322	-228
		ECLIPSE TOTAL	ECLIPSE ANULAR	ECLIPSE TOTAL	ECLIPSE ANULAR

Figura 51

Es decir el radio de la sombra de la luna en la tierra (umbra) alcanza como muchísimo 322 Km, pero la mayor parte de las veces es mucho menor o bien no existe (eclipse anular). Es por tanto un verdadero privilegio tener la suerte de poder ver un eclipse total.

Vemos que el radio de la umbra, cuando la tierra está cerca del sol y/o la luna está lejos de la tierra, es negativo. Es decir, no hay umbra porque se da un eclipse anular y no se llega a producir oscurecimiento total.

Existe otro tipo de sombra que proyecta la luna. Se trata de la “penumbra”. Es la que se produce en todos aquellos lugares de la tierra donde están viendo el sol solo parcialmente oculto.

Distancias medias de la tierra y el sol

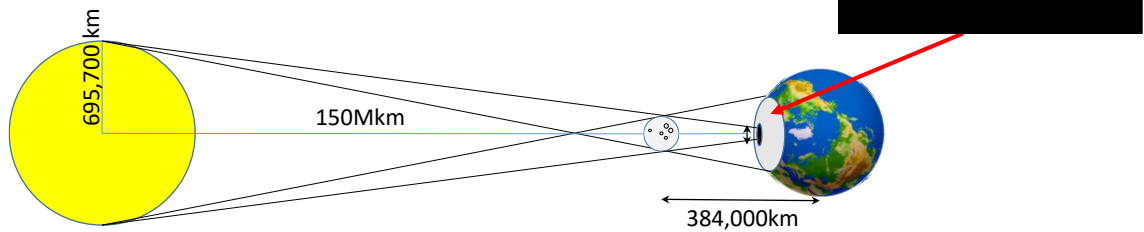


Figura 52

En el dibujo se entiende por qué el diámetro de la penumbra es más grande que la propia luna. De hecho es fácil poder disfrutar de varios eclipses parciales a lo largo de una vida, porque la sombra de la penumbra es muy grande y abarca una parte importante del globo.

A continuación dibujamos el esquema de un eclipse anular, donde el sol se encuentra muy cercano (y se ve muy grande) y la luna se encuentra muy lejos (se ve más pequeña). Por este motivo la luna no es capaz de ocultar totalmente el sol y se percibe un anillo de luz a su alrededor:

Apogeo de la luna (lejos) Perielio de la tierra (cerca)

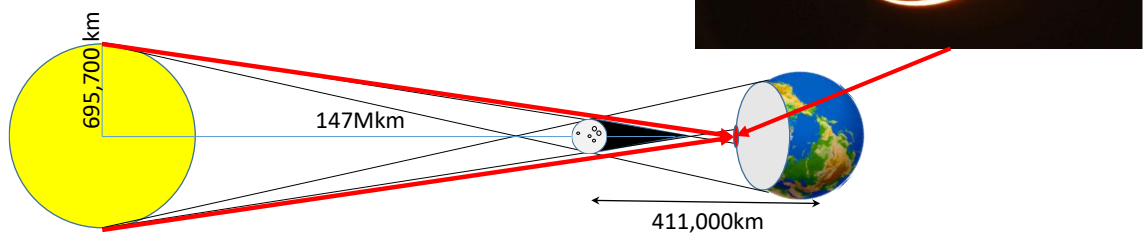


Figura 53

EJERCICIO:

¿Cuánto duraría el eclipse total en las condiciones en que la sombra de la luna es la más grande posible?

Si sabemos que la sombra ocupa 322 km, necesitamos saber la velocidad con la que viaja la sombra por la tierra. Para eso basta con conocer la velocidad con que viaja la luna respecto a la Tierra. La luna tarda 27,32 días en dar la vuelta alrededor de la Tierra. Dado que su distancia media a la Tierra es $R = 384.400$ km, la Luna viaja a una velocidad media respecto a la Tierra de

$$V = \omega \times R$$

$$\omega_{Luna} = 1 \times 3,14 \times 2 / (27,32 \times 24 \times 3600)$$

$$V_{Luna} = 1,02 \text{ km/s}$$

La luna viaja a una velocidad media respecto a la tierra de 1,02 km/s alrededor suyo. Su sombra viaja a la misma velocidad, por tanto a 1,02 km/s de Oeste a Este.

Pero debemos tener en cuenta que nosotros en la tierra también nos desplazamos de Oeste a Este, debido al giro de la Tierra sobre sí misma. Dado que tardamos 24 h en dar una vuelta y que el radio de la Tierra es de 6.370 km, tenemos que viajamos en la tierra (por rotación) a la siguiente velocidad (de Este a Oeste):

$$V = \omega \times R$$

$$\omega_{SupTierra} = 1 \times 3,14 \times 2 / (24 \times 3600)$$

$$V_{SupTierra} = 0,46 \text{ km/s}$$

Dado que ambas velocidades van en la misma dirección, se compensan. Por tanto la velocidad relativa (la resta) es:

$$V = 1,02 - 0,46 = 0,56 \text{ km/s}$$

Como la sombra máxima es de 322 km de radio, el mayor eclipse posible durará $322 \text{ km} / 0,56 \text{ km/s} = 575 \text{ s}$. Es decir, como muchísimo, un eclipse total en la tierra puede durar 9 minutos y medio, y para ello se tienen que dar las siguientes circunstancias:

- La tierra está en el afelio
- La luna está en el perigeo
- La luna se encuentra exactamente en su nodo, en el momento en que los tres astros están alineados
- El observador se encuentra en el ecuador, y la sombra pasa exactamente por el ecuador.
- El centro de la sombra pasa justo por donde está el observador.

Es decir, nunca veremos un eclipse total de esa duración.

(*) En realidad cuando la luna está en el perigeo su velocidad de giro alrededor de la Tierra alcanza su máximo (es por tanto un poco mayor que $1,02 \text{ km/s}$) y, por tanto, la duración del eclipse máximo es menor que la calculada. La calcularemos más adelante de manera más exacta cuando estudiemos el movimiento orbital de KEPLER.

Sin embargo, tengamos en cuenta que un eclipse anular sí puede durar algo más porque, como hemos visto en los cálculos anteriores, la “sombra” de un eclipse anular puede llegar a tener un diámetro de 354 km.

Sabiendo dónde y cuándo se produce el perigeo y el apogeo de la luna, y dónde y cuándo se produce el perihelio y afelio de la tierra, podemos calcular cuándo los eclipses durarán más o menos tiempo. Cuando el sol está cerca (perihelio) y cuando la luna está lejos (apogeo) se producirán espectaculares eclipses solares que durarán mucho tiempo.

EJERCICIO:

Explicar por qué el eclipse anular de 14 de Enero de 2010 fue el de mayor duración (de los eclipses anulares)

Si nos fijamos en la tabla de eclipses solares vemos que el del 14 de enero de 2010 fue anular y duró ¡11 minutos! Esto es debido a que la tierra estaba realmente cerca del perielio (que es el 4 de Enero) y el sol se veía muy grande. Y la luna se encontraba prácticamente en su apogeo a una distancia de 406.000 Km de la tierra (muy lejos) y, por tanto, se veía muy pequeñita. En ese momento los nodos apuntaban a Sagitario (que es donde está el sol en esa fecha), y el eje de la órbita de la luna también, (por eso estaba casi en su apogeo).

EJERCICIO:

Explicar por qué el eclipse total de sol del 26 de Julio de 2009 fue el de mayor duración, de los eclipses totales

El eclipse total de sol de mayor duración de los indicados en la tabla se dio el 22 de Julio de 2009 y duró 6 minutos y medio. En ese momento la tierra se encontraba muy cerca de su afelio (que es el 4 de Julio) y por tanto el sol se veía pequeño. Sin embargo la luna se encontraba cerca de su perigeo (a 359,000 km) y su silueta al ponerse delante del sol se veía enorme. En aquel momento los nodos apuntaban a cáncer (constelación que corresponde a esa fecha) y el eje de la luna apuntaba también a cáncer (por eso la luna estaba cerca de su perigeo).

El giro de los nodos

Por último, para una total comprensión y para lograr predecir eclipses debemos entender un último movimiento. Consideremos por último que también el eje de la órbita de la luna (el eje de la elipse) gira con el tiempo. Hemos visto como en 2016, el eje mira por un lado a Escorpio, y por otro a Aries. Cuando la luna estaba en Aries estaba cerca, y cuando estaba en Escorpio lejos. Pero al girar el eje de la elipse, esta situación va cambiando. El eje completa una vuelta entera en 8,8 años.

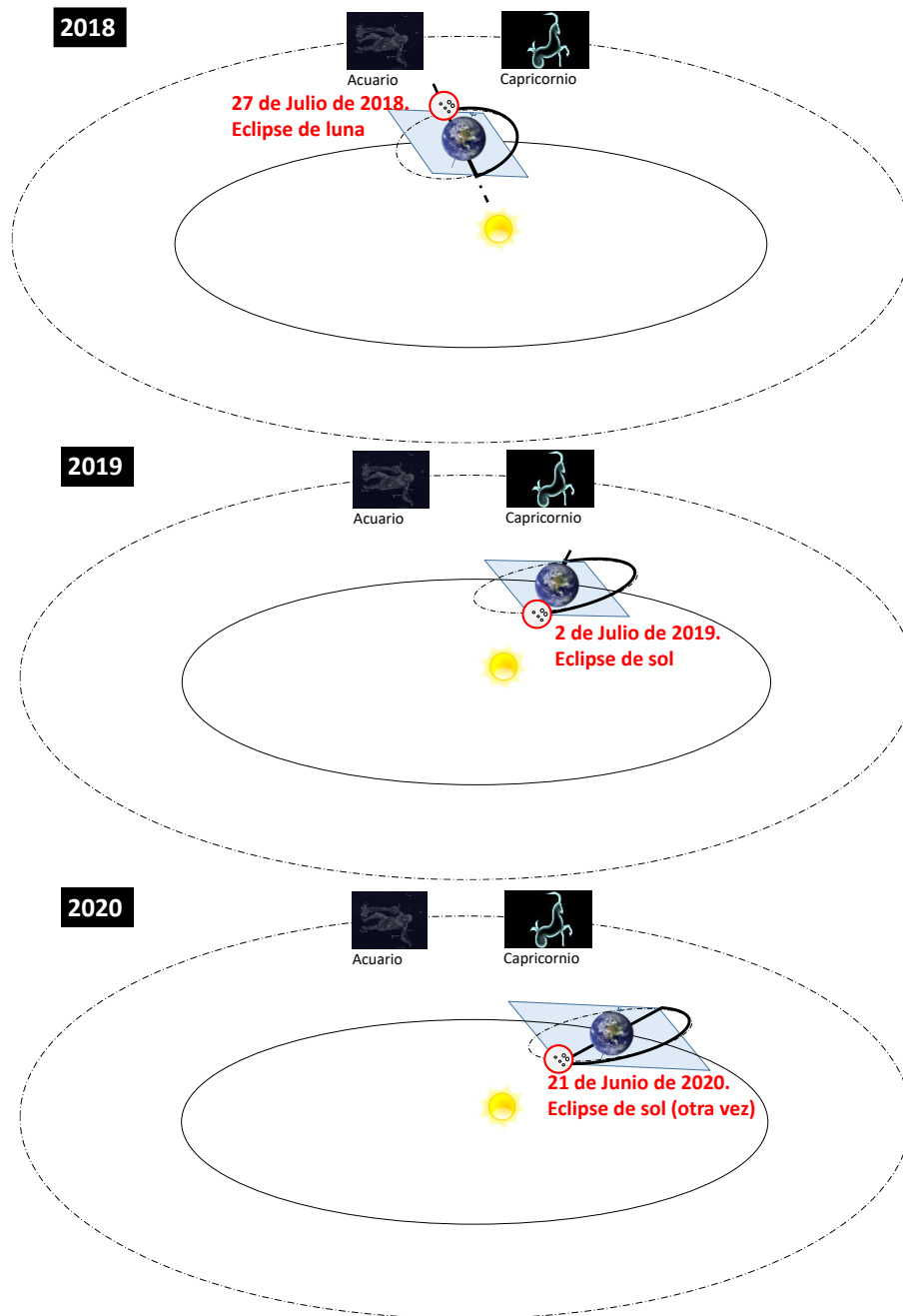


Figura 54

Vemos que en 2018 los nodos de la órbita de la luna se proyectan en Acuario, y en efecto la luna está en Acuario en el eclipse del 27 de Julio. En 2019 los nodos se proyectan en Capricornio y en 2020 han vuelto a girar.

Considerando que el eje de los nodos tarda 8,8 años en dar un giro completo, cada año habrá girado el equivalente a $365 \text{ días} / 8,8 = 41,59 \text{ días}$. Es decir cada año la línea de los nodos apuntará directamente al sol 41,6 días antes.

Partiendo del eclipse de luna que tuvo lugar el **27 de Julio de 2018**, intentemos predecir los siguientes.

Ya hemos visto que los nodos se adelantan 41,6 días. Por tanto la línea de los nodos apuntará directamente al sol el día 8 de Julio de 2019. Pero ¿dónde estará la luna en ese momento?

Dado que han pasado 346,615 días desde el eclipse anterior, ¿cuántas vueltas ha dado la luna?

En 346,615 días la Luna ha dado $346,615 / 27,32 = 12,68$ vueltas

Es decir, no ha dado 13 vueltas completas. Se ha quedado a algo más de mitad de vuelta de la treceava. Por tanto esta es la situación el 8 de Julio:

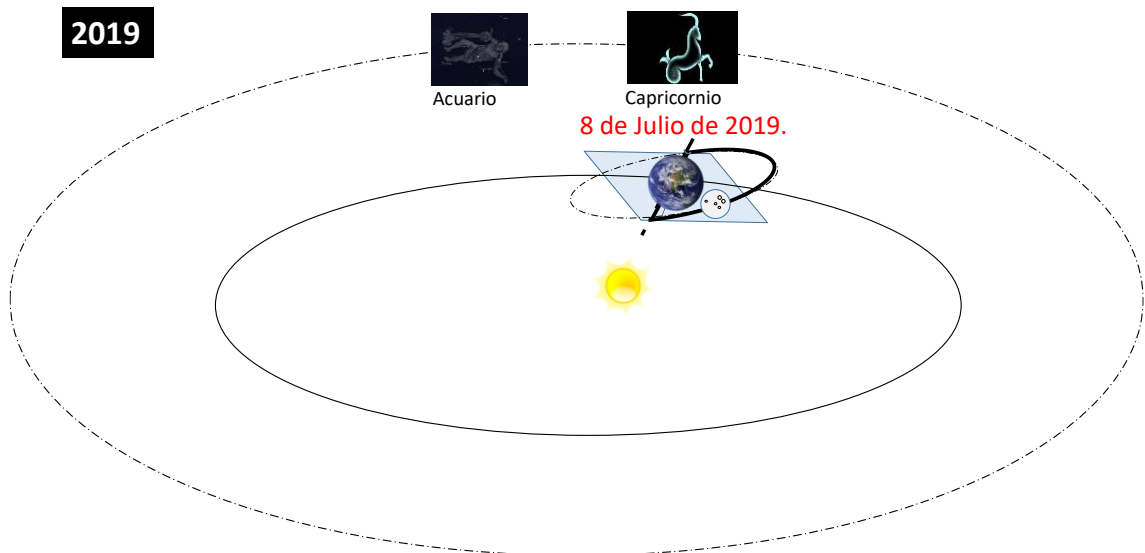


Figura 55

Vemos que la luna ya ha dado mitad de vuelta y está comenzando la segunda mitad. Para que se dé un eclipse, la luna tiene que haber dado o bien mitad de vuelta (exacta) o bien vuelta completa (exacta), para que se encuentre o bien en un nodo, o bien en el otro. Por tanto las posibilidades del eclipse de luna de Julio de 2019 son:

- El 26 de Julio de 2019 (habrá dado 13 vueltas completas)

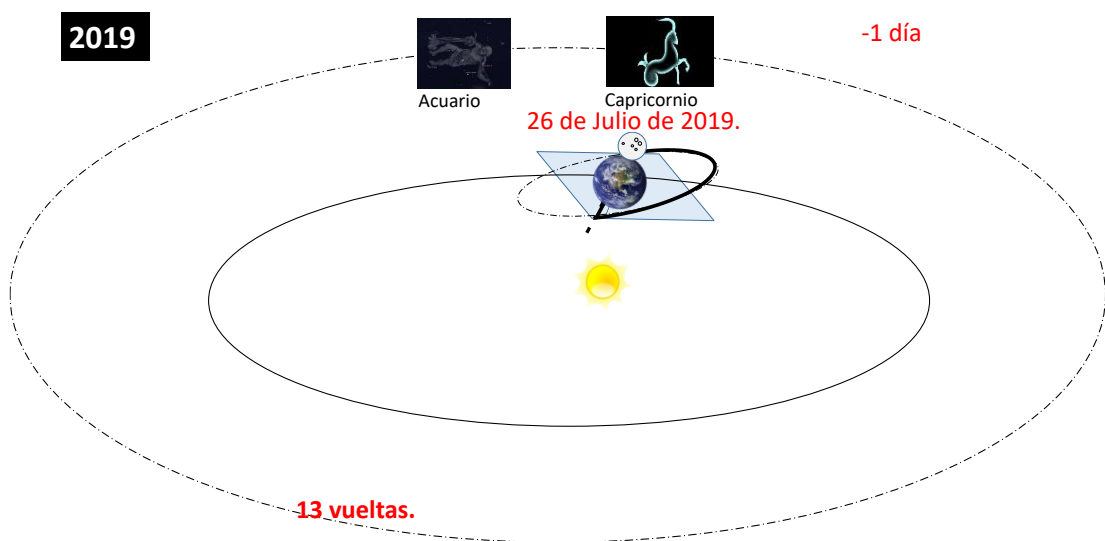


Figura 56

- O bien el 2 de Julio de 2019 (habrá dado 12,5 vueltas exactas)

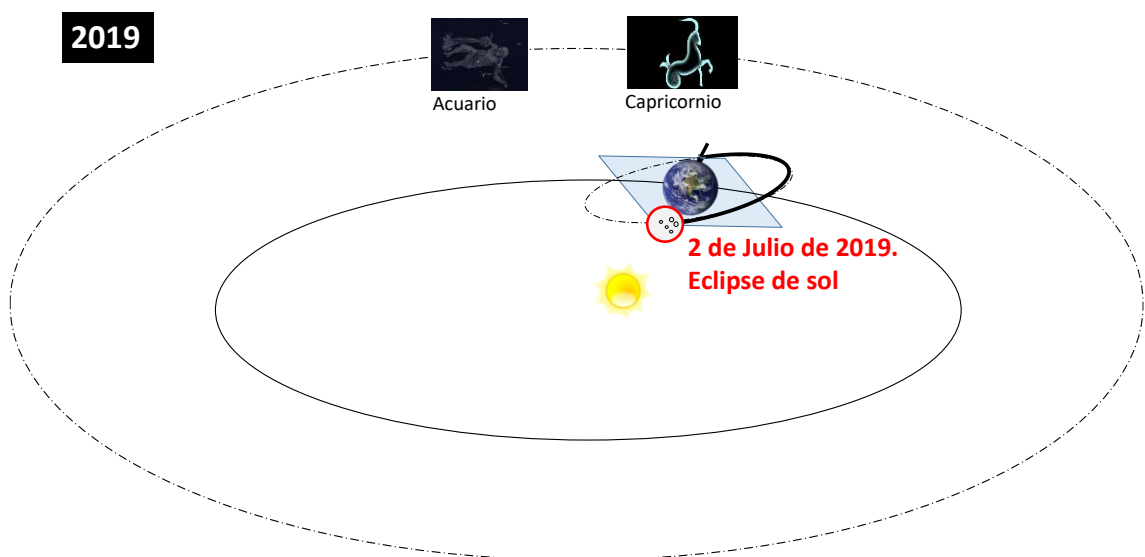


Figura 57

La fecha que está más cerca del 8 de Julio es la segunda, y por tanto es esta la que realmente produce el eclipse. ¿Pero es de sol o de luna?

Es fácil entender que cuando la luna se ha quedado a media vuelta respecto al eclipse anterior cambia el tipo de eclipse. Si el del 27 de Julio de 2018 fue un eclipse de luna, y desde entonces la luna ha dado 12,5 vueltas, entonces el siguiente eclipse del 2 de Julio de 2019 será de sol.

En el video explicamos con mayor exactitud estos cálculos, de manera que podemos saber cuándo podemos esperar un eclipse total, y cuándo un eclipse parcial.

También explicamos en el video cómo saber qué partes de la tierra podrán disfrutar de cada eclipse solar o lunar. Como todo el mundo sabe solo algunos privilegiados del globo pueden disfrutar de cada eclipse.

PENSAR:

¿Cada cuánto se repetirá un eclipse total de larga duración?

Considerando las velocidades de giro del eje de la luna y del eje de los nodos podemos calcular cuando van a apuntar al mismo sitio y saber así cuándo se producirán los eclipses más espectaculares. Como uno tarda 8,8 años en dar una vuelta y el otro tarda 18,6 años (que es casi el doble), podemos decir que 18 años después de 2009 podría producirse otro eclipse solar total espectacular. Y en efecto, si miramos la tabla, el 2 de Agosto de 2027 tenemos otro de 6 minutos y medio, donde vuelven a darse circunstancias muy similares que en 2009.

Vemos que, en realidad, se repiten las condiciones cada 18 años y 11 días (ciclo que está entre el periodo de giro de los nodos que es 18,6, y el doble del periodo de giro del eje de la luna que es 17,6). Téngase en cuenta que tiene que ser un ciclo también múltiplo del ciclo entre lunas nuevas (29,53 días). Al cabo de 18 años y 11 días se habrán producido 223 lunas nuevas exactamente. $(18 \times 365 + 4 \text{ días bisiestos} + 11 \text{ días}) / 29,53 = 223$ lunas.

Pero también debe darse un número entero de veces en que la luna pasa por el nodo. La luna pasa por el nodo cada 27,32 días.

$(18 \times 365 + 4 \text{ días bisiestos} + 11 \text{ días}) / 27,32 = 241$ pasos por el nodo.

Este ciclo de 18 años y solo 11 días tiene además la fortuna de que es casi 18 años, es decir, ¡la tierra estará TAMBIEN en un lugar muy similar en su órbita!

Por tanto cada 18 años y 11 días tendremos:

- La luna en la misma fase exactamente (tras 223 lunas nuevas)
- La luna de nuevo en el nodo (tras 241 pasos por el nodo)
- Y la tierra casi en el mismo sitio (tras 18 años casi exactos)
- El eje de los nodos apuntando casi al mismo sitio (a pocos meses de que el eje vuelva a estar exactamente en la misma posición)
- El apogeo-perigeo casi en el mismo sitio (solo cuatro meses antes el eje de apogeo-perigeo había estado exactamente en el mismo sitio después de haber dado dos vueltas exactas)

12. PATRONES QUE USABAN LOS ANTIGUOS PARA PREDECIR ECLIPSES. EL CICLO DE SAROS

El ciclo que hemos encontrado en el capítulo anterior, de 18 años y 11 días, es el conocido ciclo de Saros.

En Irak se encuentra el registro más antiguo de los ciclos de saros. En efecto los astrónomos caldeos ya sabían que los eclipses cumplían un ciclo de 18 años. El descubridor de este ciclo según Eusebio de Cesarea fue el astrónomo caldeo Beroso (350-270 a. C.). Así lo afirma Eusebio (275-339) en su libro Crónica, donde menciona por primera vez la palabra saros, que debía de hacer referencia a una antigua unidad de medida mesopotámica que podría haber tenido el valor de 3,600.

Por tanto es muy fácil, si sabes la fecha de un eclipse, calculas 18 años y 11 días y encontrarás otro eclipse muy similar. Lo único que cambia es por dónde pasará la sombra...

COMPRUEBA:

Comprueba tú mismo, usando las tablas, que cada 18 años y 11 días se repite el ciclo de eclipses.

Si miramos la tabla de los eclipses de sol podemos comprobar cómo cada 18 años y 11 días se repite el mismo eclipse:

FECHA	TIPO	DURACIÓN MÁXIMA	MÁXIMO ECLIPSE TU	ZONA GEOGRÁFICA DE VISIBILIDAD DEL ECLIPSE TOTAL / ANULAR
3 Octubre 2005	Anular	4m 31s	10h 28m	España, Portugal, Argelia, Túnez, Libia, Sudán, Etiopía, Kenia
29 Marzo 2006	Total	4m 7s	10h 15m	Costa de Marfil, Nigeria, Níger, Libia, Turquía, Rusia
22 Septiembre 2006	Anular	7m 9s	11h 41m	Guyana, Surinam, Guayana francesa
7 Febrero 2008	Anular	2m 1s	03h 55m	Antártida
1 Agosto 2008	Total	2m 27s	10h 25m	Canadá, Groenlandia, Siberia, Mongolia, China
26 Enero 2009	Anular	7m 53s	07h 57m	Sumatra, Borneo
22 Julio 2009	Total	6m 39s	02h 37m	India, Nepal, Bhutan, China (Shangai), Océano Pacífico
15 Enero 2010	Anular	11m 08s	07h 10m	República Centroafricana, Zaire, Kenia, Somalia, Océano Índico, India, Sri Lanka, Birmania, China
11 Julio 2010	Total	5m 20s	19h 30m	Océano Pacífico, Chile, Argentina
20 Mayo 2012	Anular	5m 46s	23h 53m	China, Japón (Tokio); USA Continental: Oregón, California, Nevada, Arizona, New Mexico
13 Noviembre 2012	Total	4m 02s	22h 12m	Norte de Australia, Océano Pacífico
10 Mayo 2013	Anular	6m 04s	00h 30m	Australia, Nueva Guinea, Islas Salomón, Océano Pacífico
3 Noviembre 2013	Anular/Total	1m 40s	12h 43m	Gabón, Congo, República Dem. Congo, Uganda, Kenia, Etiopía
20 Marzo 2015	Total	2m 47s	09h 51m	Océano Atlántico, Islas Faroe, Islas Spitzbergen
9 Marzo 2016	Total	4m 10s	01h 58m	Sumatra, Borneo, Islas Célebes, Océano Pacífico
1 Septiembre 2016	Anular	3m 06s	09h 08m	Congo, Zaire, Tanzania, Mozambique, Madagascar
26 Febrero 2017	Anular	1m 02s	14h 05m	Chile, Argentina, Océano Atlántico, Angola, Zaire, Zambia
21 Agosto 2017	Total	2m 40s	18h 27m	USA continental: Oregón, Idaho, Wyoming, Nebraska, Missouri, Tennessee, North and South Carolina
2 Julio 2019	Total	4m 32s	19h 2m	Océano Atlántico, Chile, Argentina
26 Diciembre 2019	Anular	3m 40s	05h 21m	Arabia, India, Sri Lanka, Borneo, Malasia (Singapur), Sumatra
21 Junio 2020	Anular	1m 02s	06h 40m	China, India, Pakistán, Arabia, Etiopía, Sudán, Zaire
14 Diciembre 2020	Total	2m 10s	16h 16m	Chile, Argentina
10 Junio 2021	Anular	3m 51s	10h 44m	Canadá, Groenlandia, Siberia
4 Diciembre 2021	Total	1m 5s	07h 32m	Antártida
2 Abril 2023	Anular/Total	1m 16s	04h 23m	Australia, Timor, Nueva Guinea
14 Octubre 2023	Anular	5m 18s	17h 56m	USA continental: Oregón, California, Nevada, Arizona, New Mexico, Texas; Yucatán, Belice, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Colombia, Brasil
8 Abril 2024	Total	4m 28s	18h 21m	Méjico, USA Continental: Texas, Oklahoma, Missouri, Illinois, Indiana, Ohio, New York, Canadá (Montreal)
2 Octubre 2024	Anular	7m 25s	18h 46m	Chile, Argentina (Patagonia)
17 Febrero 2026	Anular	2m 20s	12h 13m	Antártida
12 Agosto 2026	Total	2m 18s	17h 47m	Ártico, Groenlandia, Islandia, España
6 Febrero 2027	Anular	7m 51s	16h 00m	Chile, Argentina, océano Atlántico
2 Agosto 2027	Total	06m 23s	10h 07m	España, Marruecos, Argelia, Libia, Egipto, Arabia Saudí, Yemen, Somalia
26 Enero 2028	Anular	10m 27s	15h 08m	Ecuador, Perú, Brasil, Surinam, Portugal, España
22 Julio 2028	Total	05m 10s	02h 56m	Australia, Nueva Zelanda
1 Junio 2030	Anular	05m 21s	06h 29m	Argelia, Túnez, Grecia, Turquía, Rusia, norte China, Japón
25 Noviembre 2030	Total	03h 44m	06h 51m	Botswana, Sudafrica, Australia

Tabla 5

Por ejemplo:

- El eclipse del 3 de octubre de 2005 (eclipse anular de 4 minutos) se repite el 14 de Octubre de 2023. Pero no pasa por lugares similares
- El eclipse del 29 de Marzo de 2006 (eclipse total de 4 minutos) se repite el 8 de Abril del 2024.
- Y así sucesivamente

De hecho, el único eclipse de sol que yo he podido experimentar de manera relevante, el famoso eclipse del 11 de Agosto de 1999 (el último eclipse del milenio, que fue el eclipse más visto de la historia de la humanidad), tuvo su gemelo el 21 de Agosto de 2017 (eclipse total).

Cálculo del lugar de paso de la sombra de la luna durante un eclipse

Sabemos cómo calcular el tamaño de la sombra que hace la luna sobre la tierra, ya lo hemos visto. Sin embargo calcular el lugar por donde pasará excede el alcance de este curso (son números más complejos). Sugiero descargarse una app que indique el lugar exacto. Por ejemplo la app “Eclipses”.

A continuación indicamos un ejemplo de la trayectoria que hace la sombra de la luna proyectada sobre la tierra, durante un eclipse.

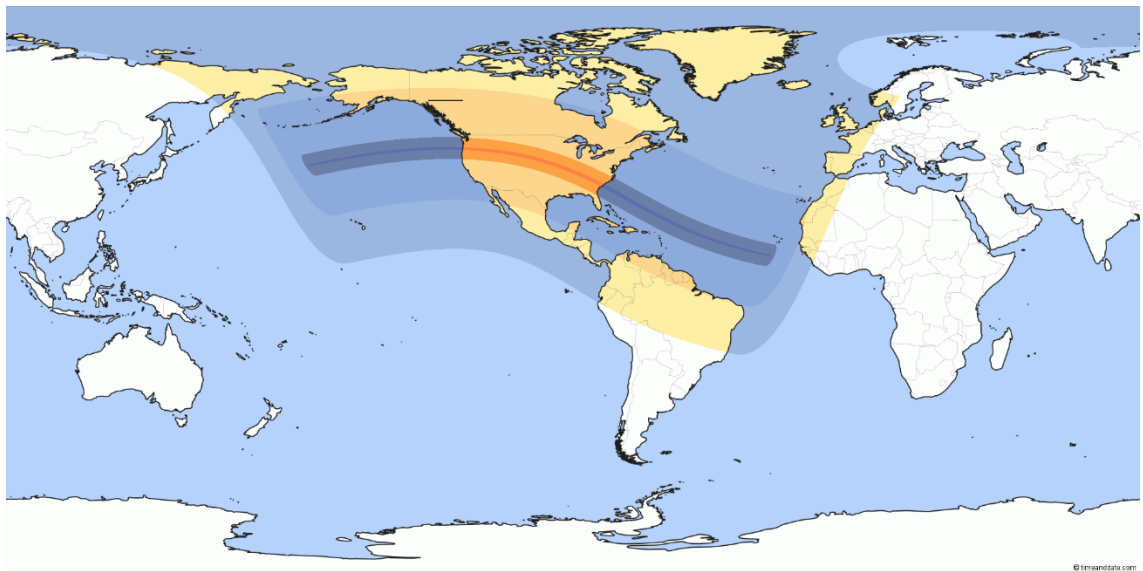


Figura 58: Trayectoria de la sombra de la luna en un eclipse de sol. La línea estrecha es la de la umbra (tiene una anchura de menos de 200km)

ANEXO I. CALCULO DE LOS CICLOS DE MILANKOVITCH. GLACIACIONES E INTERGLACIACIONES

A continuación explicamos cómo obtener los gráficos de evolución de la insolación estival³ en el hemisferio norte en dependencia con las variaciones orbitales analizadas por Milankovitch, lo cual nos ayudará a comprender cómo estas variables astronómicas originaron las distintas glaciaciones e interglaciaciones que la Tierra ha experimentado en el último millón de años.

Como vimos, los tres factores que Milankovitch analizó como causa posible de las glaciaciones fueron: la precesión de los equinoccios, la inclinación del eje de la Tierra y la excentricidad de la órbita terrestre. La evolución en el tiempo de estas tres variables se conoce con exactitud, se conoce el pasado, el presente y el futuro porque cumplen precisas leyes físicas. De hecho la física astronómica es la ciencia que tradicionalmente ha cosechado más éxitos a la hora de contrastar con la experiencia sus teorías.

Las causas de evolución de estas variables son físicas y se deben a la interacción gravitatoria entre los planetas, la luna, la tierra y el sol.

El objetivo ahora, insistimos, es por tanto calcular cómo **varía la energía solar que alcanza al polo Norte en el solsticio de verano**.

La precesión climática

Ya vimos que el fenómeno de la precesión de los equinoccios se originaba debido a que el eje de la Tierra giraba como una peonza. Hoy el eje de giro de la Tierra apunta a la estrella Polar, por ello esta estrella siempre indica el Norte y las demás estrellas aparentemente giran en torno a ésta.

Pero eso es sólo en la actualidad. Anteriormente apuntaba a alfa del Dragón y hace 13.000 años apuntaba a Vega. En realidad el eje de la Tierra gira en un ciclo de 25.776 años.

Debemos a continuación añadir una complicación adicional que no hemos explicado en su momento. Resulta que además, el eje de la elipse se mueve también, lo cual hace que si bien la estrella que indica el Norte volverá a ser la estrella polar dentro de 25.776 años, el verano se producirá sin embargo en un punto distinto de la elipse.

³ Me refiero a la insolación en verano

El eje de la órbita de la Tierra también gira, esto hace que aunque el eje de la Tierra apunte al mismo lugar, la posición del verano se modifica. En la situación A, el verano se produce cuando la Tierra se encuentra más lejos, pero en la situación B el verano se produce en un lugar más cercano al sol.

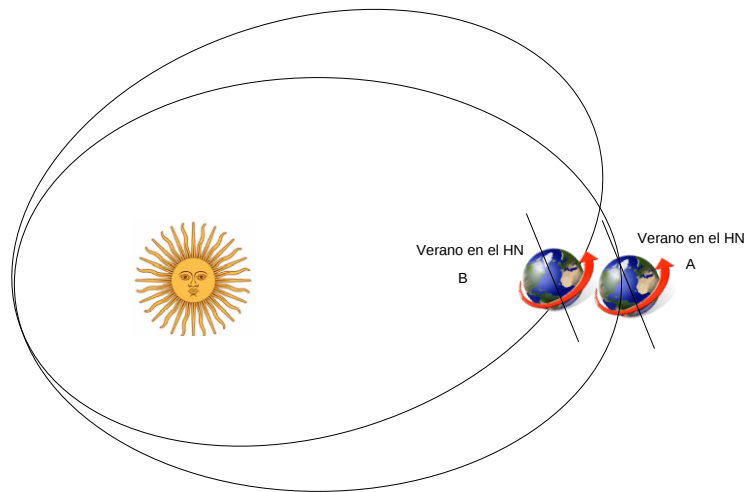


Figura 59

A nosotros nos interesa conocer cuánto tiempo debe transcurrir para que se produzcan situaciones idénticas desde el punto de vista climático, aunque el eje en realidad apunte a una estrella distinta. Teniendo en cuenta ambos efectos, el ciclo es en realidad de unos 23.000 años. Este ciclo se denomina “precesión climática”. Obviamos a partir de ahora el movimiento de la elipse y consideramos solo la precesión climática que es de 23.000 años.

Llamemos alfa al ángulo de giro de la precesión. Consideramos $\alpha=0$ a la posición en que el eje apuntaba a una estrella cercana a Vega, momento en el cual, el verano del hemisferio Norte se producía en el lugar más cercano al sol.

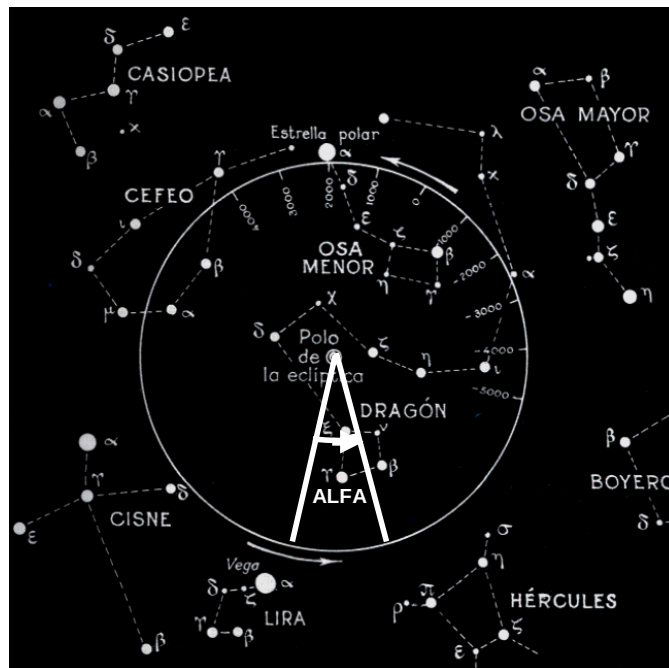


Figura 60

Cuando la precesión climática haya avanzado ese ángulo alfa, el verano se producirá en una situación diferente, y como vemos en la figura, el radio de giro dentro de la órbita habrá avanzado también un ángulo igual a alfa respecto al sol.

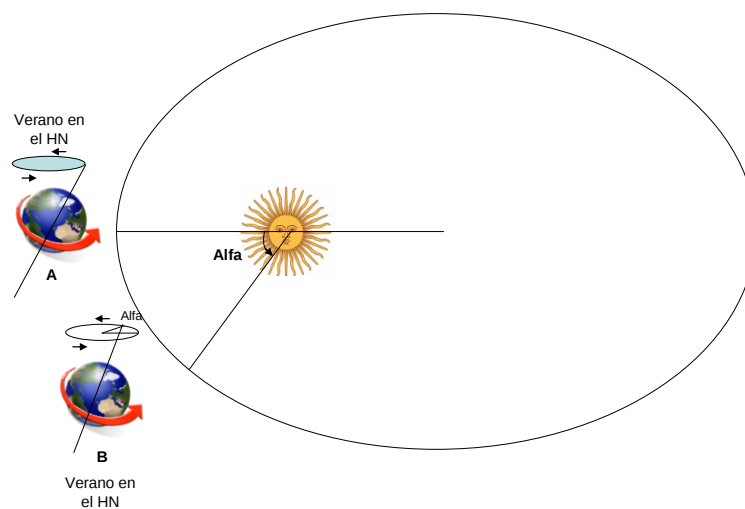


Figura 61

A continuación introducimos en una tabla de Excel cómo evoluciona el coseno de alfa en el tiempo. El resultado es este, el ciclo en efecto se produce cada 23,000 años:

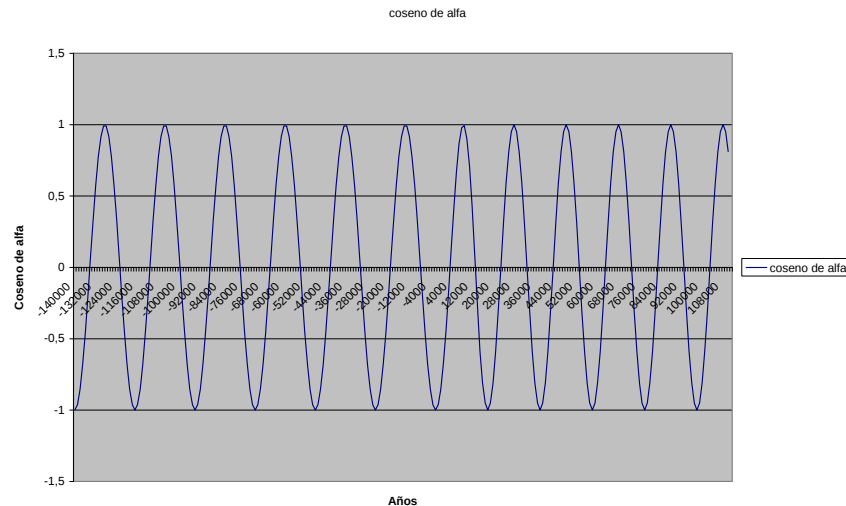


Figura 62

En la situación actual, el coseno de alfa es casi -1, es decir alfa valdría casi 180° . La Tierra se encuentra en el solsticio de verano en la posición más alejada respecto al sol.

Recordemos que lo que estamos calculando es la energía que recibe el polo Norte en la posición de solsticio de verano, la cual depende de:

- La distancia de la Tierra al Sol en el momento del solsticio de verano. La energía que recibimos del Sol es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.
- El ángulo de inclinación del eje (en adelante Beta). Cuanto mayor sea el ángulo más energía recibe por metro cuadrado

Para calcular la distancia de la Tierra al Sol en cada posición de la órbita, debemos conocer las características esenciales de la elipse.

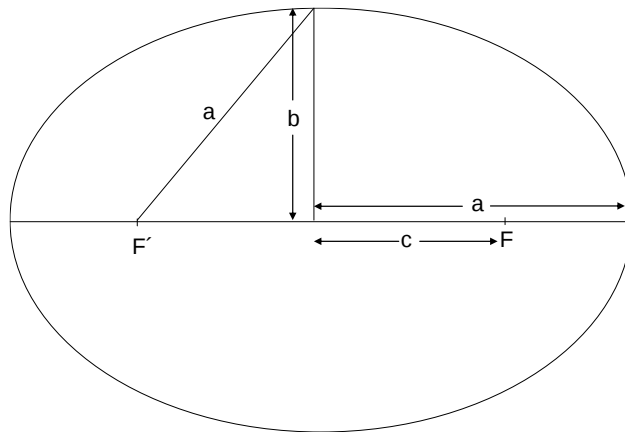


Figura 63

a: semieje mayor. Su valor hoy es: 149.597.887,5 Km. Ojo, este no es el valor de la distancia máxima al sol, porque habría que sumarle la distancia desde el centro de la elipse al foco.

b: semieje menor. Su valor hoy es: 149.576.999,8 Km

c: semidistancia focal. Su valor hoy es: 2.499.815,05 Km

La excentricidad de la órbita

La excentricidad de la elipse se define con la siguiente fórmula:

$$e = \frac{c}{a}$$

Cuando los focos se encuentran en el centro de la elipse ($c=0$) la excentricidad es nula, es el caso de una circunferencia perfecta. Cuanto más se alejan los focos del centro de la elipse, más se achata.

La excentricidad de la órbita de la Tierra en realidad es siempre muy similar a cero, pero varía con el tiempo. A continuación indicamos como varía la excentricidad según los datos proporcionados por la NASA.

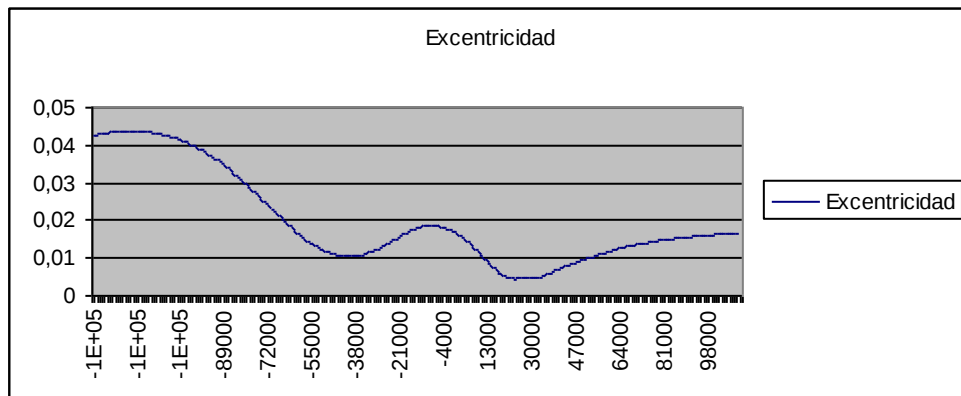


Figura 64

En la situación actual, el valor de la excentricidad es de 0,01671 pero hace 124.000 años la excentricidad era muy superior y llegó alcanzar el valor de 0,044, es decir, la elipse era más achatada que hoy y había mayores diferencias en la distancia al sol entre el afelio y el perihelio.

Actualmente, en el solsticio de verano, la distancia del Sol a la Tierra es casi la máxima (a+c). Exactamente su valor es de 151,64 M Kms.

Teniendo en cuenta la fórmula de la elipse, podemos calcular con fórmulas trigonométricas la distancia del Sol a la Tierra en cualquier punto, ya que sabemos que el Sol se encuentra en uno de los focos.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

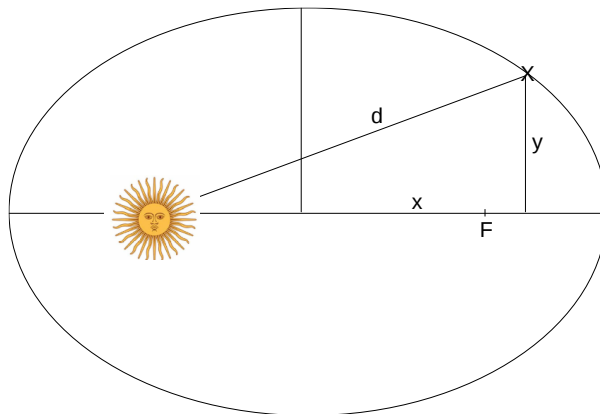


Figura 65

Teniendo en cuenta todos estos datos, y sabiendo que atendiendo a las leyes de Kepler la media entre el eje mayor y el menor es constante, podemos calcular como varía la distancia del Sol a la Tierra en el solsticio de verano, en función de las variaciones que se producen en la excentricidad y en la precesión climática (alfa).

El resultado es este:

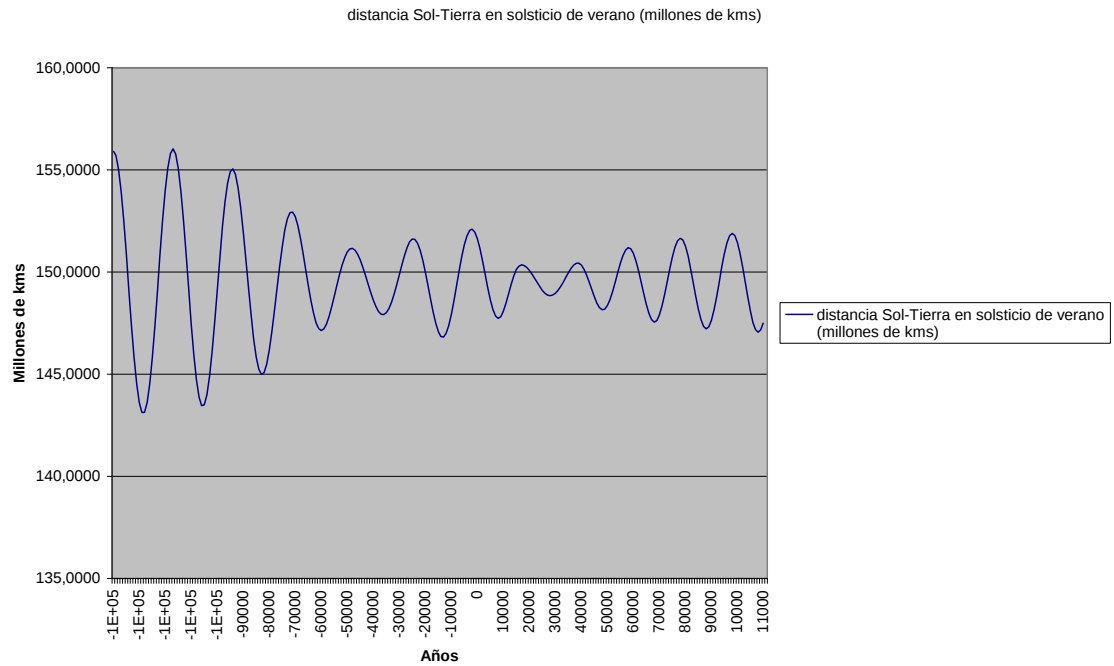


Figura 66: Variaciones de la distancia de la tierra al sol en el solsticio de verano debido a la precesión y la excentricidad

A continuación indicamos cómo varía la inclinación del eje de la Tierra (Beta) a lo largo del tiempo, según los datos proporcionados por la Nasa:

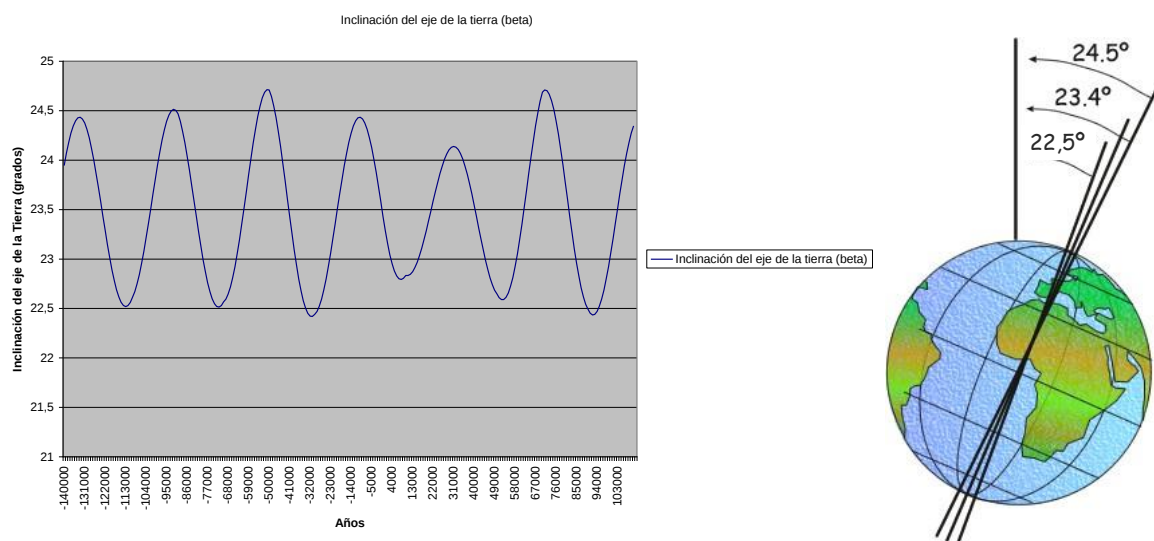


Figura 67: Variaciones de la inclinación del eje de la tierra al pasar miles de años

En la actualidad, la inclinación es de $23,4^\circ$ pero bajará a $22,8^\circ$ dentro de 7.000 años.

La NASA resume todos estos factores con la siguiente gráfica. Como vemos, los gráficos son idénticos a los que hemos obtenido:

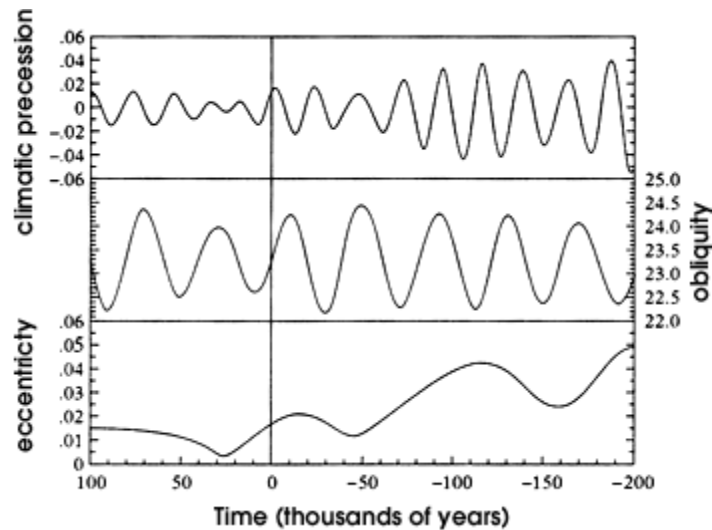


Figura 68: Curva de la evolución de los tres factores astronómicos analizados por Milankovitch. Fuente: NASA

Ya disponemos de los datos suficientes para calcular como varía la energía que recibe la Tierra en el polo Norte cada año en el solsticio de verano. Para ello solo necesitamos conocer el valor de la energía que emite el Sol y tener en cuenta que a nosotros nos llega disminuida en función de la distancia al cuadrado.

Como ya hemos visto, la energía que emite el Sol es la que corresponde a un cuerpo a una temperatura de 5.500°C y considerando las dimensiones de la superficie del sol, el valor de la potencia solar vimos que era de $P = 3,8 \times 10^{26}\text{W}$

Ahora debemos calcular qué parte de esta potencia alcanza la Tierra. Para ello debemos dividirlo entre $A = 4\pi D^2$ (siendo D la distancia de la Tierra al Sol)

El resultado es el valor de la “constante solar” en el momento del solsticio de verano de cada año. Como vemos en el gráfico, en realidad no es tan constante:

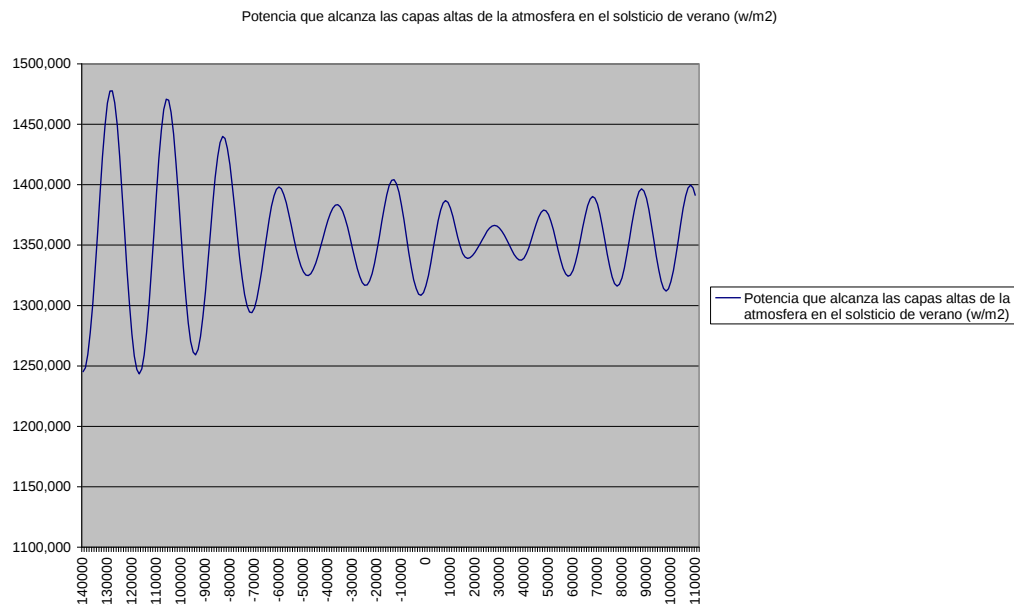


Figura 69: Valor de la constante solar fuera de la atmósfera en el solsticio de verano de cada año

Es lógico que la gráfica sea muy similar a la que calculamos para la distancia del Sol a la Tierra ya que depende exclusivamente de esta variable. Como vemos, en la actualidad la constante solar vale aproximadamente 1320 w/m2 durante el solsticio de verano.

Por último, para calcular la energía que alcanza al polo Norte, basta con multiplicar estos valores por el Seno de Beta (inclinación del eje de la Tierra), el cual, como hemos visto, varía.

El resultado es este:

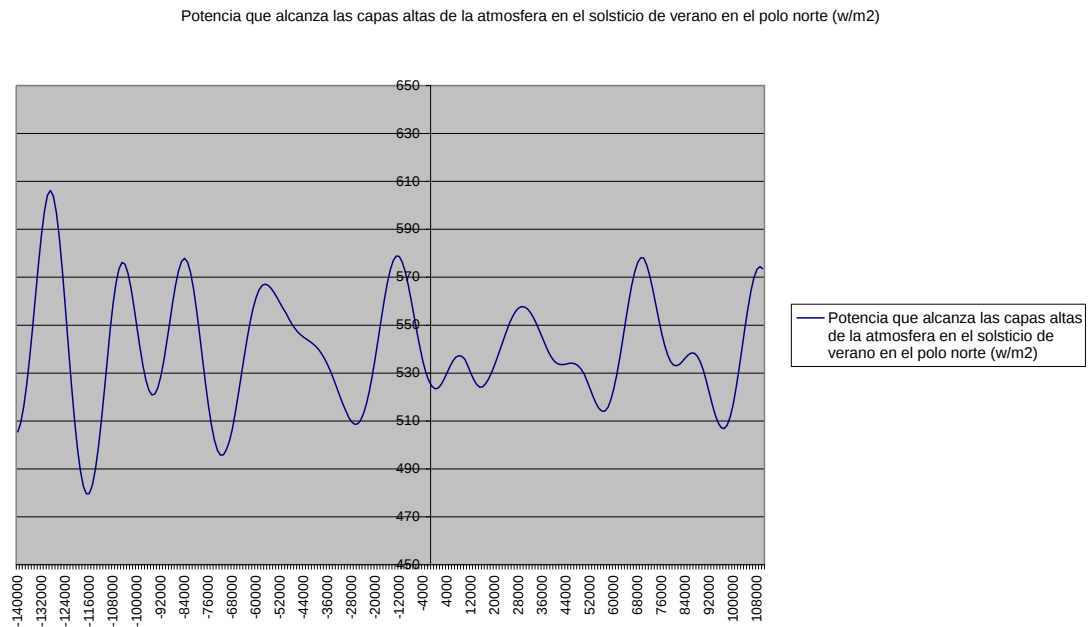


Figura 70

Esta es la famosa gráfica que representa los ciclos de Milankovitch. Coloquemos ahora esta gráfica junto a la evolución de la temperatura global en la Tierra.

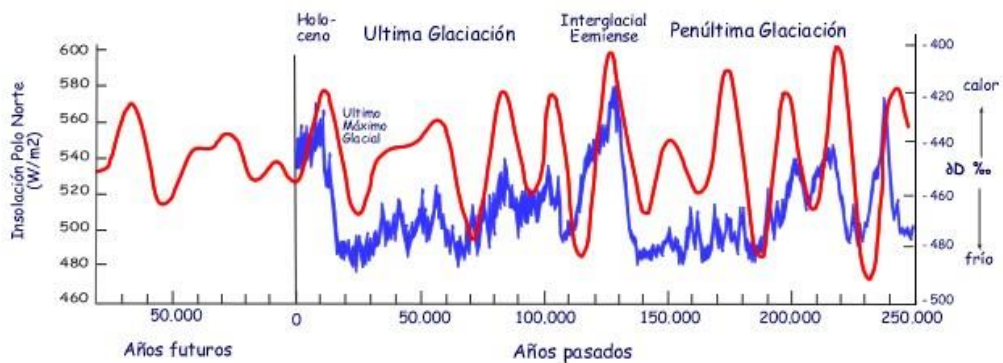


Figura 71: Correlación entre la insolación en el Polo Norte en el equinoccio de verano debida a los ciclos de Milankovitch y la evolución de la temperatura media global calculada a partir de la proporción de deuterio en los hielos de la Antártida. Fuente: Petit et al., 1999, *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, Nature*, 399, 429-436

La correlación a lo largo de los últimos 150.000 años es asombrosa.

Tengo que reconocer que esta gráfica me maravilla. Hemos calculado, por un lado, la evolución de la temperatura global a partir de registros geológicos o por sondeos en los hielos perpetuos de la Antártida. Y por otro lado hemos calculado la variación en la energía calorífica que nos llega del Sol con métodos matemáticos y astronómicos, y la correlación entre ambas gráficas ¡es casi impecable!, al menos para los últimos 150.000 años. Como vemos, cuando la línea roja (potencia calorífica del sol en el verano del hemisferio norte) sube por encima de su valor medio, se observa siempre en el mismo momento una subida de la temperatura global de la Tierra evidenciada en el registro geológico.

Por tanto, parece que es muy plausible que sean las condiciones astronómicas las que determinan los cambios en la temperatura global de la Tierra, al menos cuando manejamos tiempos de miles o decenas de miles de años.