

## **La astronomía, las matemáticas y el arte: EL RELOJ SOLAR.**

*“Usamos con toda naturalidad las expresiones “el Sol sale”, “el Sol se pone”, invocando la antigua idea de una Tierra inmóvil. Sabemos que tales afirmaciones son falsas, pero en ellas, inconscientemente, guardamos la base astronómica del ciclo de los días y las noches”.*

*El Sol es el astro más espectacular del cielo, siempre ha llamado la atención del ser humano. Con la observación de su comportamiento en el firmamento, nuestros antepasados sabían “cuando” debían levantar su campamento, y también “hacia donde” dirigirse para encontrar latitudes más benignas. Posteriormente lograron saber el momento en que depositar una semilla en el suelo y que la nueva planta no se helase.*

*El dominio de “Cuando” y “Hacia donde” son las primeras contribuciones que nos da la ciencia más antigua practicada por el hombre: LA ASTRONOMÍA. Si nos paramos a reflexionar un momento, descubriremos que esta actitud científica nos ha facilitado el sustento diario. Una vez asegurado éste, nuestra curiosidad es la que nos domina...*

*En un reloj de sol se dan ambas bases de la astronomía, la medida del tiempo y posicionamiento de un lugar en la corteza terrestre. Podríamos concluir que son aulas de alto nivel donde aprender astronomía. Por tanto, este tipo de instrumentos dado su aspecto histórico, científico y ornamental no pueden caer en el olvido ni en el desprecio, ya que son un gran patrimonio sobre como la curiosidad humana ha indagado para la comprensión del universo.*

### **UN DIÁLOGO CON EL SOL:**

*“...y levantaron piedras y colocaron señales, cuyas sombras y alineaciones alumbraron un nuevo arte: La medida del tiempo”*

La GNOMÓNICA es el arte de construir los relojes solares. También la podríamos definir como el arte y la ciencia de medir el tiempo con las sombras producidas por el Sol.

Para llegar a tal fin, la gnomónica estudia los complejos movimientos del Sol en el cielo y las relaciones matemáticas y geométricas que existen en el “movimiento aparente” de nuestra estrella, ya que es nuestro planeta quien se mueve.

### **EL PASO DEL TIEMPO:**

La noción de tiempo constituye uno de los problemas fundamentales del pensamiento humano, tanto filosófico como científico.

El incesante devenir de las cosas, el nacimiento de nuevos seres y su posterior desaparición, ha originado “esa idea” de algo que transcurre y que es la causa de un “antes y un después”.

Consideramos el transcurrir del tiempo como algo enigmático, siendo una apreciación incómoda para nosotros, ya que es algo que no está sujeto a nuestro dominio.

Muchos filósofos y científicos han intentado librarnos de esta incomodidad, pero nadie lo ha conseguido de forma satisfactoria.

De todos modos, nuestra concepción del tiempo es que transcurre de una manera imparable y continua, independientemente de nuestras actividades y voluntades.

Pero, en cualquier caso el fenómeno más relevante, en todas épocas y latitudes, ha sido siempre el transcurrir del día y la noche debido a la cíclica aparición y desaparición del Sol respecto del horizonte. Esta alternancia nos marca el ritmo de la vida en este planeta y regula todo nuestro contexto, constituyendo la auténtica “unidad natural” de la medida del tiempo: **El Día**.

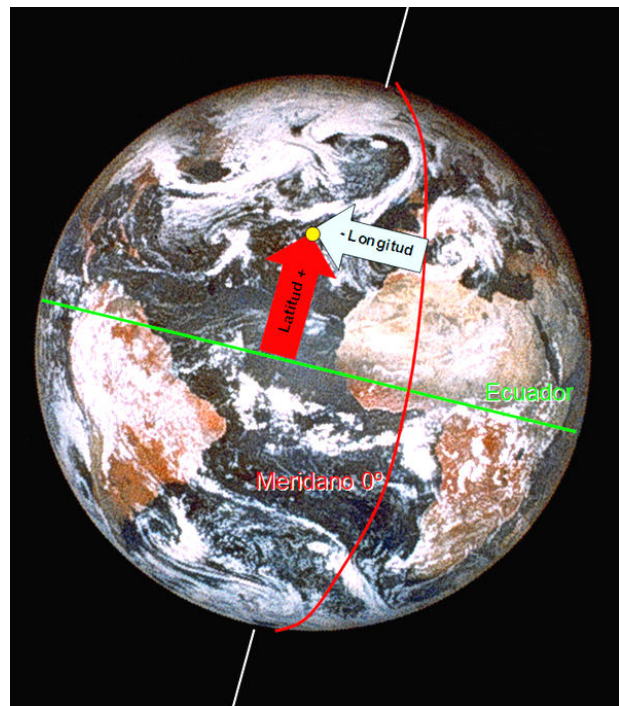
## LA ESFERA CELESTE:

Cuando queremos posicionar un punto o estudiar como se mueve sobre la corteza de la Tierra, usamos dos coordenadas, la **Latitud y la Longitud**.

Nuestro planeta rota sobre un eje, **el eje de rotación**. Los **polos geográficos norte y sur**, son los puntos de la superficie terrestre por donde sale este eje. Si introducimos un plano perpendicular al eje de rotación y que divida al planeta en dos mitades idénticas, obtenemos el denominado **plano ecuatorial**. La intersección del plano ecuatorial con la superficie de la Tierra nos proporciona un círculo máximo, que denominamos Ecuador terrestre. Un **círculo máximo** es el que se obtiene cuando cortamos una esfera con un plano que pase por el centro de la misma. Por encima del ecuador tenemos **el hemisferio norte** y por debajo **el hemisferio sur**.

**La latitud** es el parámetro angular que nos informa de cuan alejados estamos del ecuador, tanto en sentido norte como sur. Su valor se mueve entre  $\pm 90^\circ$  entre los polos, tomando el valor  $0^\circ$  en el ecuador. Todos los lugares de la tierra con la misma latitud conforman un **Paralelo**. Los paralelos son círculos menores “paralelos” al del ecuador.

**La longitud** la podríamos definir como la magnitud angular que nos dice cuan a la derecha o a la izquierda estamos de un **meridiano de referencia**, es decir, si estamos al Este o al Oeste de este elemento. Todos los puntos de la corteza terrestre que tienen la misma



longitud se reúnen en lo que denominamos **Meridiano**. Todos los meridianos son círculos máximos que siendo perpendiculares al plano ecuatorial, pasan por los dos polos geográficos. El meridiano con valor  $0^\circ$  o de referencia es el meridiano que pasa por el observatorio astronómico de la localidad inglesa de **Greenwich**. Sus valores se mueven entre los intervalos  $+ 180^\circ$  a  $-180^\circ$ , hacia el Este o hacia el Oeste del valor  $0^\circ$ . También se utiliza entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , aumentando hacia el Este del meridiano de Greenwich.

En astronomía para dar la posición de un astro y estudiar sus movimientos actuamos de forma parecida a la geografía terrestre.

Pero para hacer ciencia se necesita tomar medidas cuantitativas, que nos proporcionen valores que podamos introducir en las ecuaciones, para ello, en astronomía se utilizan telescopios dotados de círculos graduados. Estos telescopios se colocan de una forma muy, pero que muy precisa, respecto a unos sistemas de referencia, los cuales tienen los orígenes de las magnitudes y valores a cuantificar.

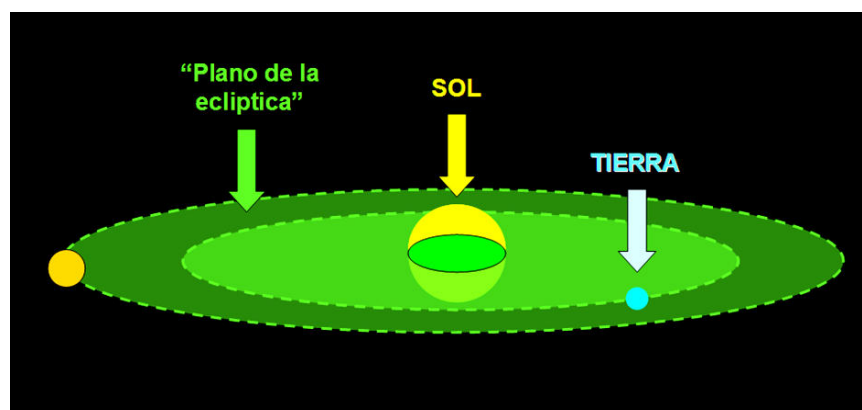
El sistema de referencia nos la brinda una herramienta con connotaciones aristotélicas: **La Esfera Celeste**.

Imaginemos que la Tierra está en el centro de una imaginaria esfera de radio arbitrario, donde parecen estar pegados todos los astros del firmamento. Prolongamos los elementos de referencia de la geografía terrestre hacia el cielo. Donde toquen los ejes del mundo a la esfera celeste, quedaran definidos los **Polos Celestes norte y sur**. Así mismo la proyección hacia la cristalina esfera, del ecuador terrestre, nos dará el **Ecuador celeste**. De esta forma también disponemos de dos hemisferios celestiales.

Colocado el ecuador y los polos celestes, ya podemos hallar la latitud celeste o **Declinación** de un astro, que al igual que su homónima terrestre es una magnitud angular que varía entre los mismos valores.

La longitud celeste es un asunto más complicado. Para encontrar el punto de partida de esta magnitud, que se expresará en unidades horarias (horas, minutos y segundos), es necesario que hablemos de otro círculo máximo de la esfera celeste, **La Eclíptica**.

La eclíptica es **el camino que recorre anualmente el Sol por la esfera celeste**. Este movimiento solar es aparente, no real, es decir, es el que percibimos desde nuestro punto de vista (desde la Tierra), siendo en realidad la trayectoria de nuestro planeta en esta esfera de referencia. Por este camino también encontraremos a los planetas y, con alguna desviación, a la Luna. La eclíptica tiene como trasfondo estrellado a las famosas **Constelaciones del Zodiaco**. Astronómicamente hablando es la proyección del plano orbital terrestre en la esfera del cielo.

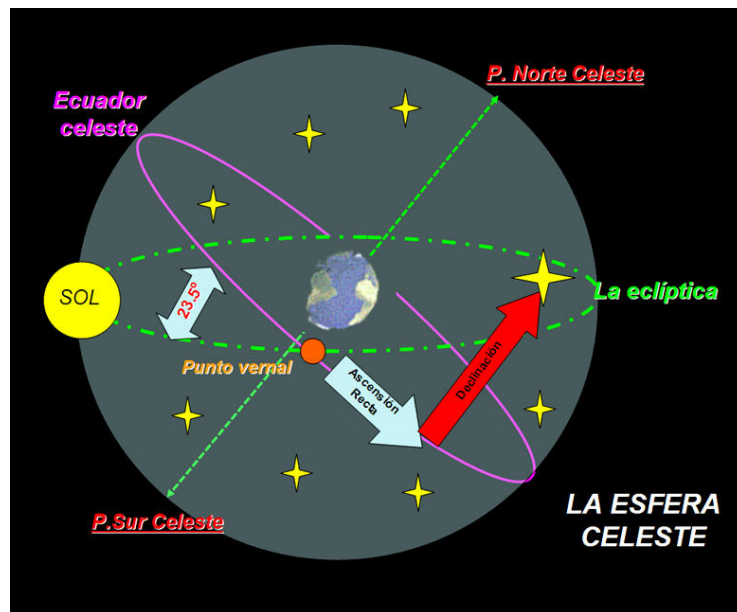


Imaginaros que el Sol es una naranja. Dividamos esta imaginaria naranja de dos mitades idénticas. Ahora cojamos un imaginario cartón muy plano. Colocamos encima y en el centro del cartón una de las mitades de la naranja, por debajo y coincidente con la anterior, colocamos su homónima. Ahora hagamos "el cambio de variable". El Sol es la naranja y el cartón será "el plano de la eclíptica". En este plano es, con pequeñas desviaciones, por donde orbitan todos los planetas del Sistema Solar, entre ellos el nuestro.

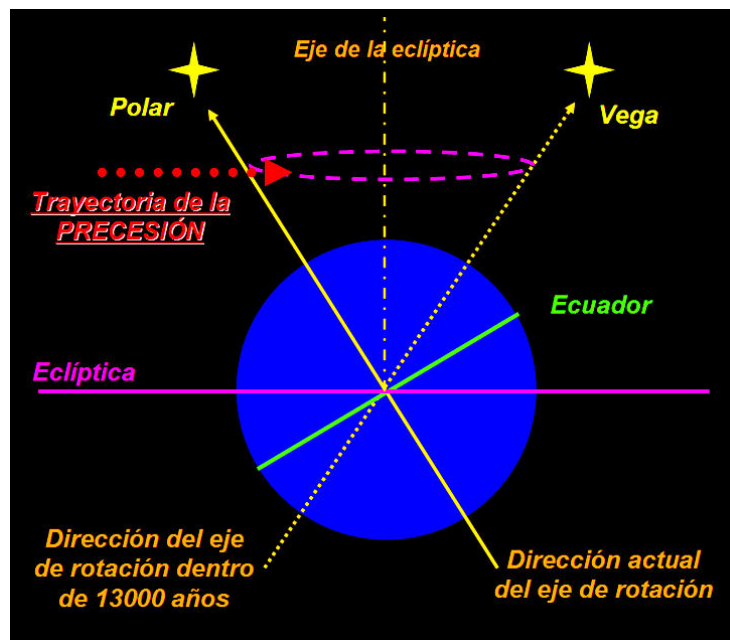
El **plano del ecuador celeste** está inclinado respecto del **plano de la eclíptica** los famosos **23.5°** causantes de las estaciones astronómicas, y por tanto, de **los solsticios y los equinoccios**.

Colocamos el círculo de la eclíptica en la esfera celeste. Debido a la mencionada inclinación entre los dos planos, la eclíptica cortará a la línea del ecuador celeste en dos puntos, uno es el **Punto de Libra** o **equinoccio de otoño** y el otro es el que buscamos, **el Punto de Aries** o **equinoccio Vernal**. El Sol, deambulando en sentido contrario a las agujas del reloj (de oeste a este) por su aparente camino celeste, pasa por el equinoccio de otoño y desciende del hemisferio norte celeste al hemisferio sur, y en el equinoccio vernal o de primavera (Punto de Aries), resurge del hemisferio sur al norte, transcurridos seis meses.

El punto de Aries es el origen de la longitud celeste o **Ascensión Recta**. Esta magnitud aumenta en sentido retrógrado (anti-horario) desde el punto vernal, variando de **0 horas hasta 24 horas**. Se puede transformar en valores angulares a razón de **15°/ hora**.



La declinación y la ascensión recta conforman lo que denominamos **coordenadas ecuatoriales absolutas**. El calificativo de absolutas no es de todo cierto, la causa: El movimiento de **Precesión terrestre**.



*El movimiento de precesión terrestre supone que los polos terrestres no “apunten” siempre a la misma dirección del firmamento. Ahora lo hace en un punto próximo a la estrella Polar, pero en tiempos de los egipcios lo hacía apuntando a la estrella Thuban (alfa draconis) y dentro de 13000 años lo hará en un punto cercano a la estrella Vega de la constelación de la Lira. Es un movimiento cónico del eje del mundo, provocado por el tirón gravitacional del Sol y de la Luna sobre el ecuador terrestre (la Tierra no es una esfera perfecta, si no que es más “gordita” en el ecuador). Al describir un cono, en la esfera celeste el eje del mundo dibuja un círculo, al cual tarda en dar una vuelta 26.000 años o **ciclo de precesión**.*

*Hace 2000 años los signos astrológicos zodiacales eran concordantes con el paso del Sol por la constelación zodiacal astronómica homónima. La precesión se hace palpable al observarse que el Sol transcurre, actualmente, por una determinada constelación zodiacal 30 días antes que comience su homólogo signo zodiacal: Es la **precesión de los Equinoccios**.*

*Al desplazarse poco el eje del mundo, solidariamente también lo hace el plano del ecuador, y con él, los puntos de corte con el plano eclíptico. Resultado, el Punto Vernal, origen de las anteriores coordenadas, se mueve. Por tanto, las coordenadas ecuatoriales se deben revisar cada cierto tiempo teniendo en cuenta el fenómeno de la precesión.*

*La esfera celeste da una vuelta sobre si misma cada día debido a la **Rotación terrestre**, lo que hace que las estrellas ocupen “casi” la misma posición en el cielo a la misma hora del “día sidéreo” siguiente. Ese “casi” se debe al movimiento de **Translación terrestre** entorno al Sol. Ambos movimientos tienen trayectorias cerradas por lo cual también tienen **periodo** (tiempo transcurrido para que un cuerpo que se mueve por esa trayectoria, vuelva a encontrarse en la misma posición transcurrida una vuelta).*

## ***Estos periodos o ciclos celestiales serán las bases para la medida del tiempo.***

### **FUNDAMENTOS ASTRONÓMICOS DEL TIEMPO**

Desde el punto de vista astronómico, **el día** se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del **punto vernal** o de un **astro** por el **meridiano del lugar**, es decir, cuando acontece su **culminación superior** justo sobre el cardinal Sur.

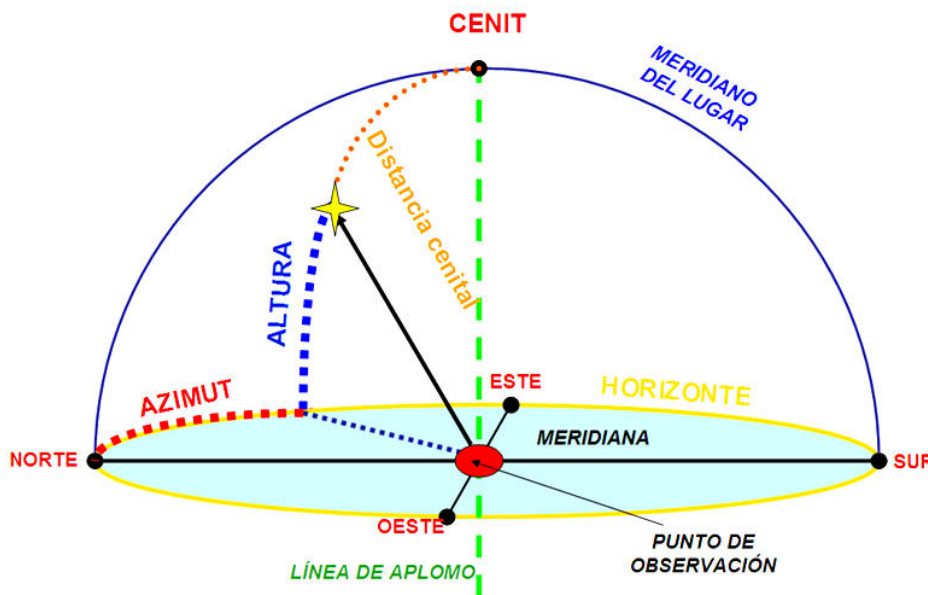
*El meridiano de referencia es un elemento de otro sistema de coordenadas celestes, pero esta vez referidas al lugar desde el cual observamos: **La bóveda celeste**.*

*Cuando salimos al campo en una noche sin nubes y alejados de la contaminación lumínica, el cielo se nos antoja como una semi-esfera cuyo borde inferior limita con los accidentes geográficos, con **el horizonte**. Justo en el medio del círculo del horizonte nos hallamos nosotros observando la bóveda celeste, en cuyo interior “parecen” estar pegados todos los astros.*

*Miremos hacia el punto del firmamento justo encima de nuestras cabezas, es el **Cenit**. Si desde el cenit dejásemos caer una piedra, ésta pasaría por nuestra posición y si no*

hubiese suelo, llegaría al centro de nuestro planeta, su trayectoria se conoce como la **línea de aplomo**.

### **NUESTRO PUNTO DE OBSERVACIÓN**



Tenemos una línea referenciada a dos puntos, el cenit y nuestro punto exacto de observación, y un plano, el plano del horizonte. Ya tenemos otro sistema de referencia para posicionar un astro y su comportamiento, eso sí, con referencia al punto de observación, es decir con una visión del universo desde dentro de nuestro planeta.

Un astro tiene las coordenadas horizontales cuando medimos su **altura** o separación respecto de la línea del horizonte (como en ocasiones este límite no se aprecia, también se utiliza el parámetro de **distancia cenital** que es el ángulo complementario a la altura del astro). Ya tenemos una de las coordenadas, la otra es el **azimut del astro**. Esta magnitud mide la separación angular respecto del punto cardinal Norte, medido en sentido de las agujas de un reloj. El punto cardinal norte está referenciado por el **plano meridiano**. Este plano contiene, al polo norte (o sur) celeste, al cenit y toca en el horizonte definiendo el cardinal Norte y el Sur, entre ambos cardinales estamos nosotros en el punto de observación. La intersección de este plano con la bóveda celeste en primer lugar, nos da lo que denominamos el **meridiano del lugar**, y en segundo lugar, la intersección con el plano del horizonte dibuja en el suelo la **línea meridiana** o meridiana, importantísima para el diseño de los relojes de Sol. (Ver figura superior).

Con el transcurrir del tiempo, un astro que esté en el cenit en un momento dado, ya no lo estará en uno posterior (y no lo estuvo en uno anterior). Por lo tanto, las coordenadas horizontales de un astro varían constantemente con el tiempo, no es un sistema absoluto como lo es el ecuatorial (en el cual un astro tiene siempre unas coordenadas fijas, con permiso de la precesión), todo ello porque está referenciado a nuestro lugar de observación, para el cual resulta útil.

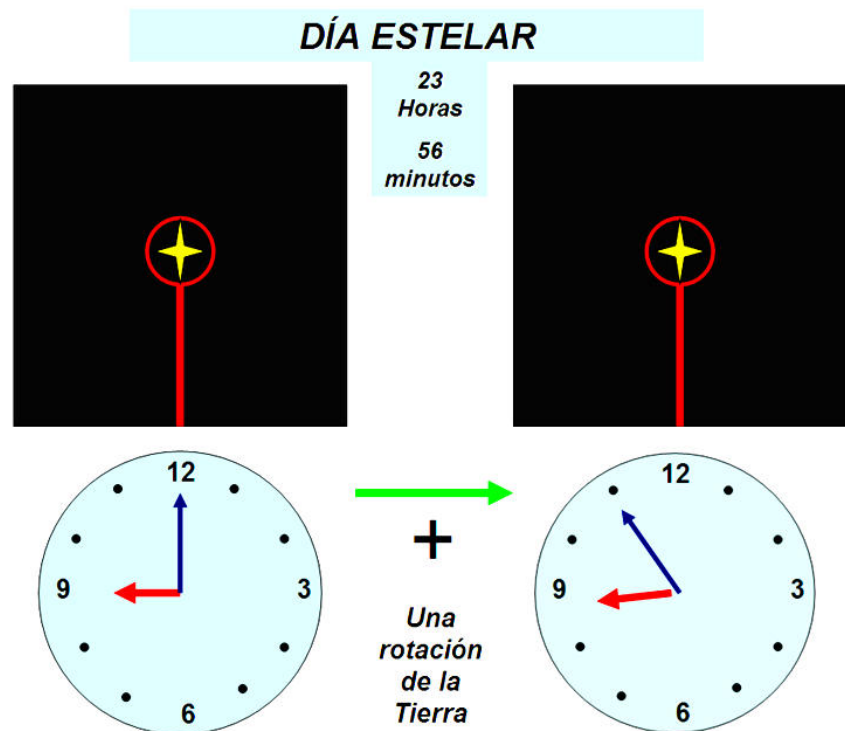
**La culminación superior** de un astro o del punto vernal significa que alcanza su **máxima altura** o separación angular respecto al horizonte sur.

## DIFERENTES DÍAS

El **día** se basa en la **rotación** de la Tierra, pero definimos diferentes días según la referencia que tomemos en el cielo:

**.-DIA SIDÉREO:** Es el periodo de tiempo entre dos pasos consecutivos del punto Vernal por el meridiano del lugar. El **punto vernal** no es “algo material” en el cielo, pero si conocemos la ascensión recta de una estrella podemos hallar analíticamente donde se encuentra el equinoccio.

**.-EL DIA ESTELAR:** Se define como el tiempo invertido por dos culminaciones superiores sucesivas de una **estrella**. La duración de este día se puede calcular empíricamente (ver imagen adjunta). Este día tiene una duración de 23 horas y 56 minutos.



### LA VISIÓN DESDE DENTRO:

*Método empírico para calcular la duración de una revolución de la Tierra entorno a su eje, es decir, la duración de un DÍA ESTELAR:*

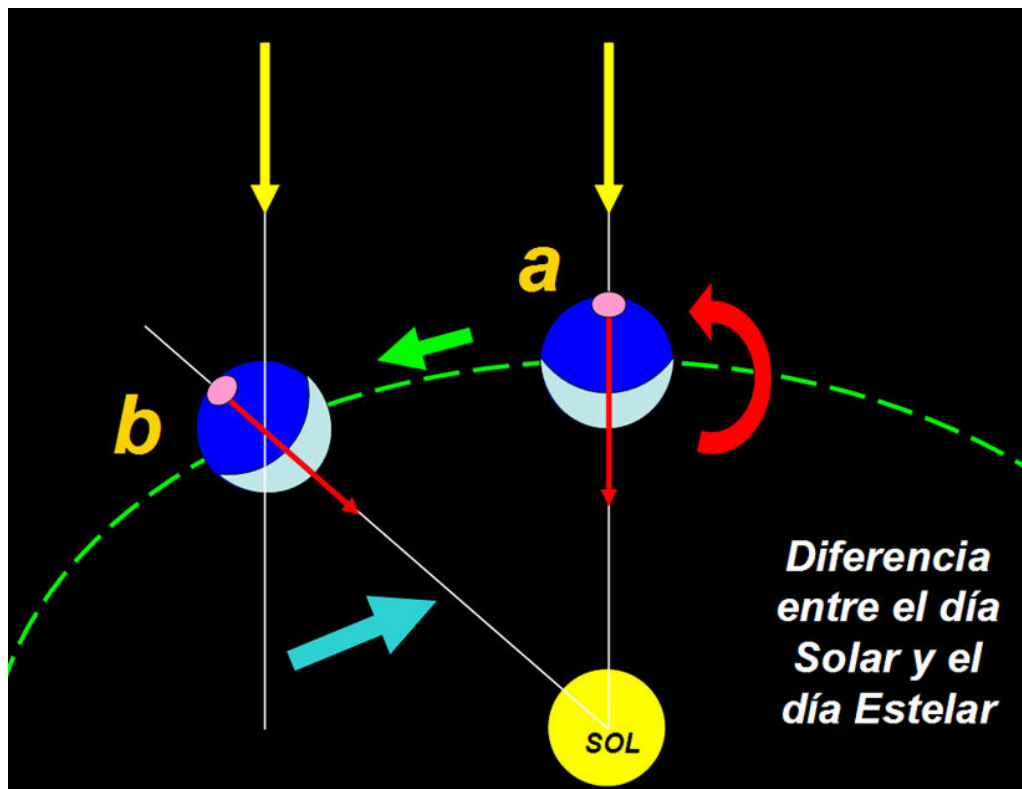
*EL cuadrado negro simboliza una ventana, desde la cual visualizamos una determinada estrella. Tomamos referencia del astro de alguna forma, en el ejemplo se hace encajar con un “aro señal”. En esta situación tomamos nota de la hora que marca un reloj. Esperamos a que, en la noche siguiente, la estrella vuelva a estar inscrita en la referencia, observamos nuestro “cronómetro”. Descubrimos que la estrella ha llegado a la “marca” en 23 horas 56 minutos: La duración del DÍA ESTELAR.*

**.-DIA SOLAR o SOLAR VERDADERO:** Transcurso temporal de dos culminaciones sucesivas del “**Sol verdadero**” en el meridiano del lugar.

El día solar da base al llamado **Tiempo verdadero**, que está referido a un punto de la superficie terrestre, y con ello a su meridiano local, define el **Tiempo verdadero local**.

## ¡Este es el tiempo que marcan los relojes solares!

Como el punto vernal no es “tangible” en el cielo y el control de una estrella, sólo es posible por la noche, no es de extrañar que nos hayamos decidido a medir el tiempo en base al astro más brillante y significativo: **El Sol**, y por tanto, con **el tiempo solar verdadero**.



En la figura superior podemos apreciar dos posiciones de la Tierra en su órbita (en verde). Las flechas superiores, en amarillo, representan la luz de una estrella lejana, con lo cual, estos rayos llegarán paralelos en ambas posiciones. Las flechas gruesas representan el sentido de rotación (roja) y de translación (verde). Podemos apreciar una línea roja en la recreación de la Tierra, que supone el meridiano del lugar de un punto de la superficie de la misma.

En la posición **a** es mediodía en el lugar con la flecha roja, a la vez en sus antípodas es medianoche (punto rosa), en ese mismo punto y al mismo tiempo, una estrella está en el meridiano, es decir la estrella y el Sol están alineados por el meridiano del lugar de ambos puntos.

Esperamos a que acontezca un nuevo mediodía, en la posición **b**, podemos apreciar como el meridiano se alinea con el Sol, habiendo transcurrido un día solar verdadero, pero en las antípodas, el día estelar ya hace un tiempo que aconteció, ya que la estrella pasó el meridiano hace 4 minutos.

La diferencia entre ambos días se produce a causa de que la Tierra se ha trasladado un poco en su órbita, y el punto de vista del Sol ha cambiado, pero el de la estrella al estar muy lejana, no.

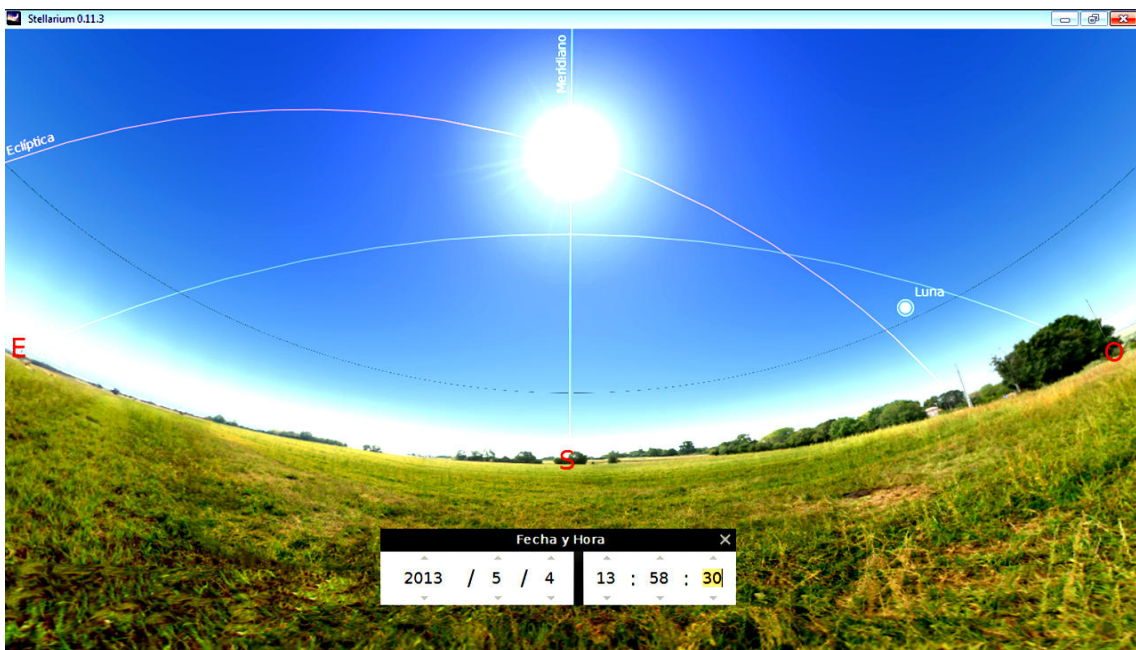
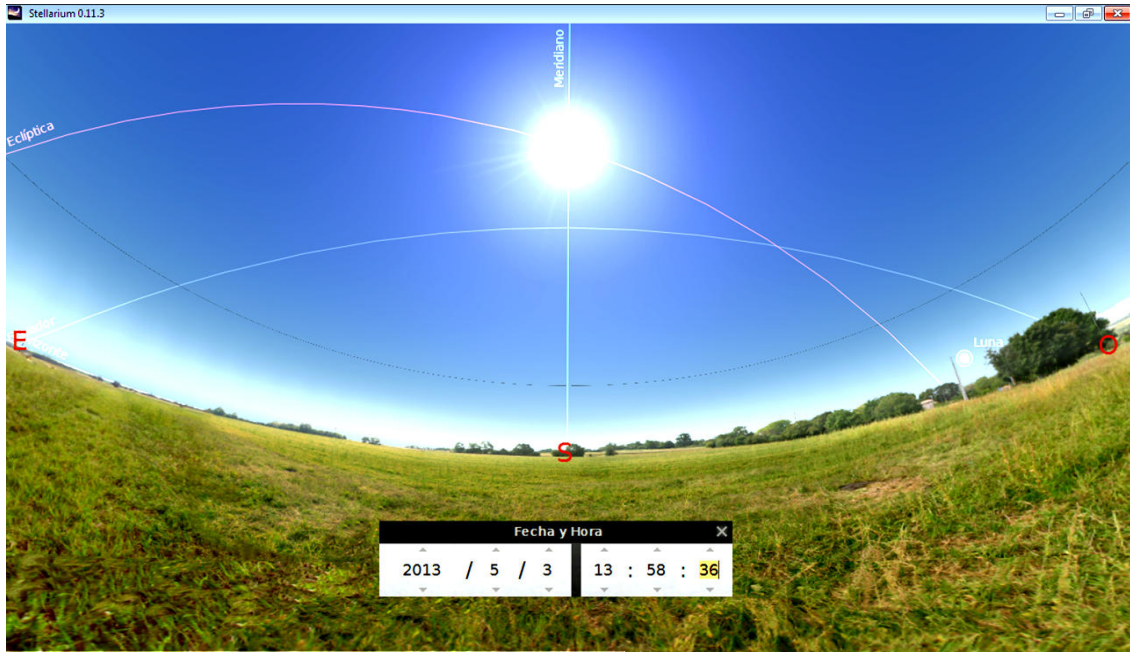
La flecha azul representa el giro de más que tiene que hacer nuestro planeta para conseguir el nuevo mediodía.

Si nos referimos a la estrella, la translación hace que ella haya amanecido 4 minutos antes, y el cielo es un poco diferente cada noche.



La aparición de los primeros relojes mecánicos (que miden el tiempo de forma uniforme), en primer lugar, y los cuidadosos controles temporales realizados por los astrónomos demostraron, más tarde, que los pasos sucesivos del Sol por un meridiano no se producen a intervalos regulares, es decir:

**“Los días solares tienen diferente duración.”**

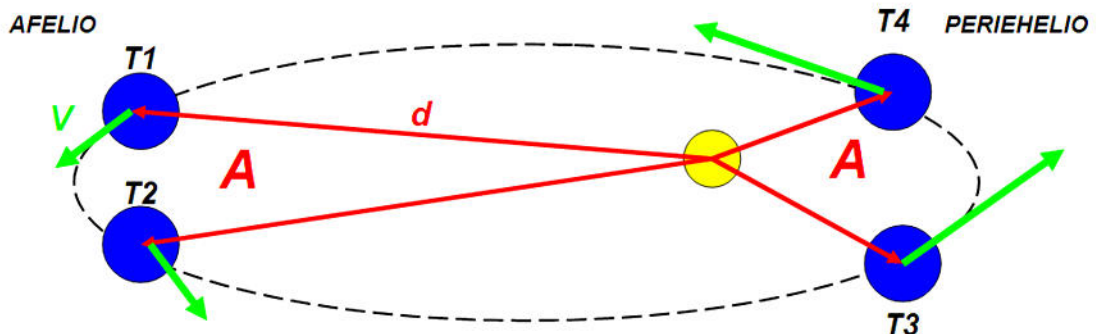


*En estas dos recreaciones de la aplicación STELLARIUM, observamos como entre dos pasos consecutivos del centro del Sol por el meridiano del lugar hay menos de 24 horas, concretamente entre estas dos jornadas hay una diferencia de 6 segundos. VISIÓN DESDE DENTRO.*

## ¿Por qué sucede esto?

Sabemos que los movimientos aparentes del Sol Verdadero se deben al comportamiento de nuestro planeta en su órbita.

Es el momento de saber como viaja nuestra Tierra por el espacio:



### Segunda ley de Kepler o de las "Áreas"

$$A = A$$

$$dA/dt = 0, \text{ Constante};$$

$$dL/dt = 0, \mathbf{L} = m\mathbf{d} \times \mathbf{V}, \text{ Constante};$$

Nuestro planeta recorre una **trayectoria elíptica** con el **Sol** en uno de sus **focos**. Esta trayectoria es cerrada debido a que la Tierra se ve afectada de una **fuerza centrípeta** que tira de ella hacia el **centro de masas**, éste último es el Sol con su gran masa, y la fuerza es la **fuerza de gravedad** que ejerce la estrella sobre el planeta. (Ver figura superior)

En este contexto las **leyes de la mecánica** se deben cumplir. Concretamente la ley de **conservación del momento angular** o cinético (L), por el cual, el producto entre la masa y velocidad del planeta, y la distancia al Sol debe tener siempre, el mismo valor en cualquier punto de la trayectoria, es decir, permanecer constante.

Comparemos estas magnitudes en la figura anterior. La distancia de la Tierra al Sol, representada por el **radio vector** en rojo, es mucho mayor en T1 y T2 (próximas al **afelio** o mayor alejamiento del Sol) que en T3 y T4 (próximas al punto de menor distancia a la estrella). Por tanto y para cumplir esta ley, en T1, T2, la Tierra debe viajar a menor **velocidad (vector verde)** que en la posición T3 y T4, en la cual el planeta, para cumplir la ley, debe aumentar la velocidad. El factor de la masa es invariable, de esta forma:

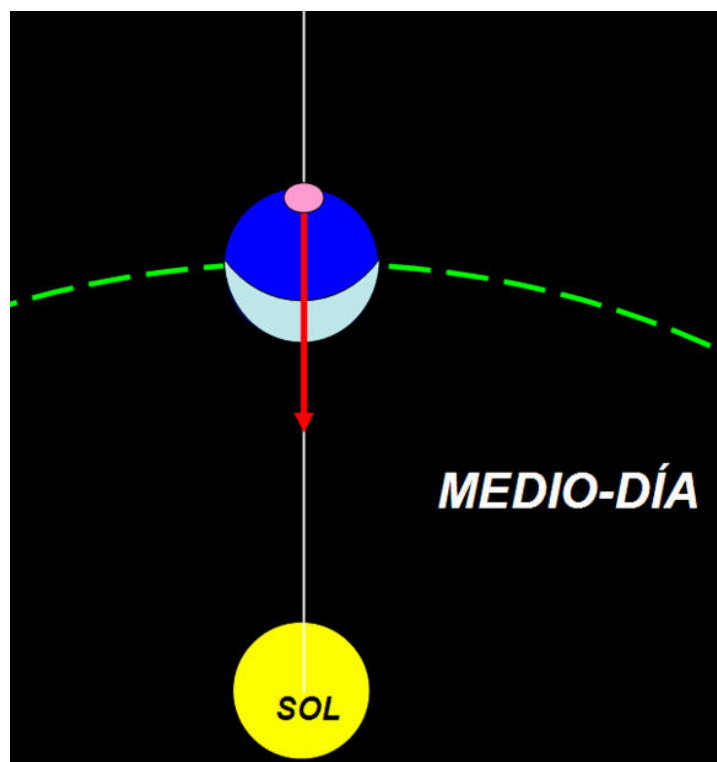
$$\mathbf{d}_{T1,T2} \times \mathbf{v}_{T1,T2} = \mathbf{d}_{T3,T4} \times \mathbf{V}_{T3,T4}$$

Esta resolución la dio **Isaac Newton**, pero anteriormente otro genio, **Johannes Kepler**, en su **segunda ley del movimiento planetario**, describió esta diferencia de velocidad respecto a la distancia. Esta ley es la de las Áreas:

**“El radio vector que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales”**

Entre T1 y T2 ha transcurrido el mismo tiempo que entre las posiciones T3 y T2.

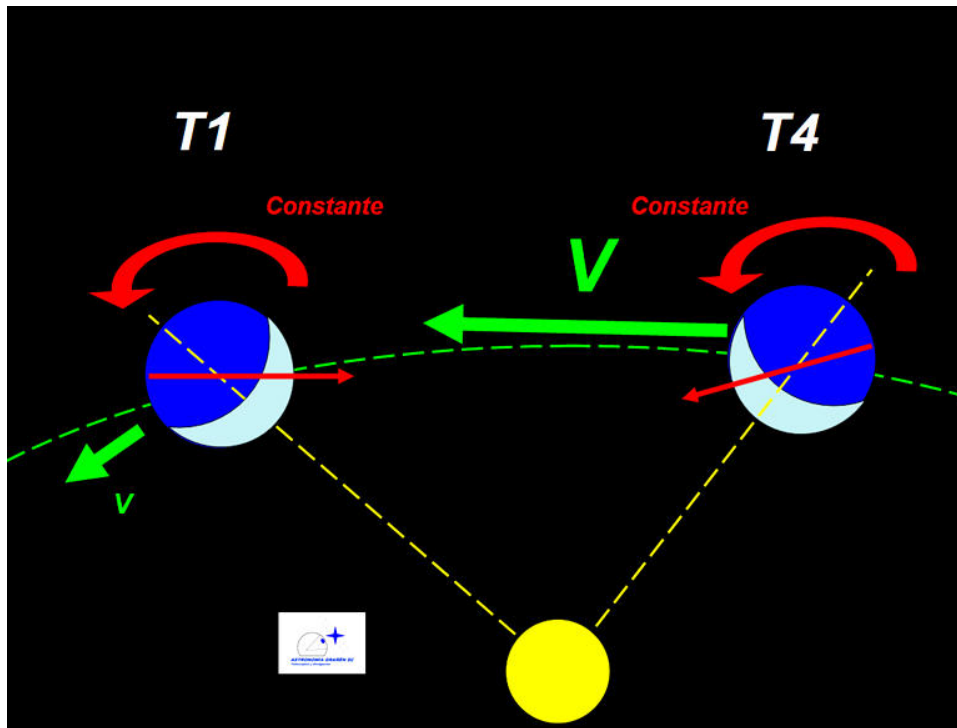
De esta forma nos encontramos que **la Tierra tiene una velocidad de rotación uniforme y constante, y una velocidad orbital variable**. Observemos las siguientes figuras:



En un punto de la órbita se alcanza el medio-día y un reloj solar marca las 12, según se puede apreciar en la figura anterior (el reloj la flecha roja sobre el meridiano del lugar o línea roja).

Pero, cuando la velocidad orbital es alta, a la rotación terrestre no le da tiempo de alcanzar al día siguiente la alineación del meridiano, y de esta forma el Sol parece ir más lento y un reloj de Sol parece retrasado, los días solares son más largos (**posición T4**).

Todo lo contrario ocurre cuando la Tierra va más lenta en su órbita, es entonces cuando la rotación le gana la partida y el Sol se adelanta por el paso del meridiano, haciendo más cortos los días solares (**posición T1**).



Ahora que parecía que todo estaba controlado, llegan los relojes mecánicos, que miden el tiempo de forma uniforme, y nos descubren que los días solares, en los cuales basábamos la medida del tiempo, no son iguales. Mala manera de medir las porciones del día, se tendría que hacer con horas de diferente duración.

Por tanto, se hacía necesario concebir un día que tuviese siempre la misma duración. Este día es **El día solar medio**, que da lugar al **Tiempo solar medio**.

Para ello, hemos ideado un Sol imaginario o **Sol medio** cuyos pasos por un meridiano se producen en intervalos regulares de 24 horas. Estas 24 horas resultan de hallar la media de la duración de todos los días solares verdaderos incluidos en un año, ya que son de diferente duración cada uno.

La velocidad, uniforme, del Sol medio se calcula de forma que coincida con el Sol verdadero en el punto de Aries, al mismo tiempo un año tras otro.

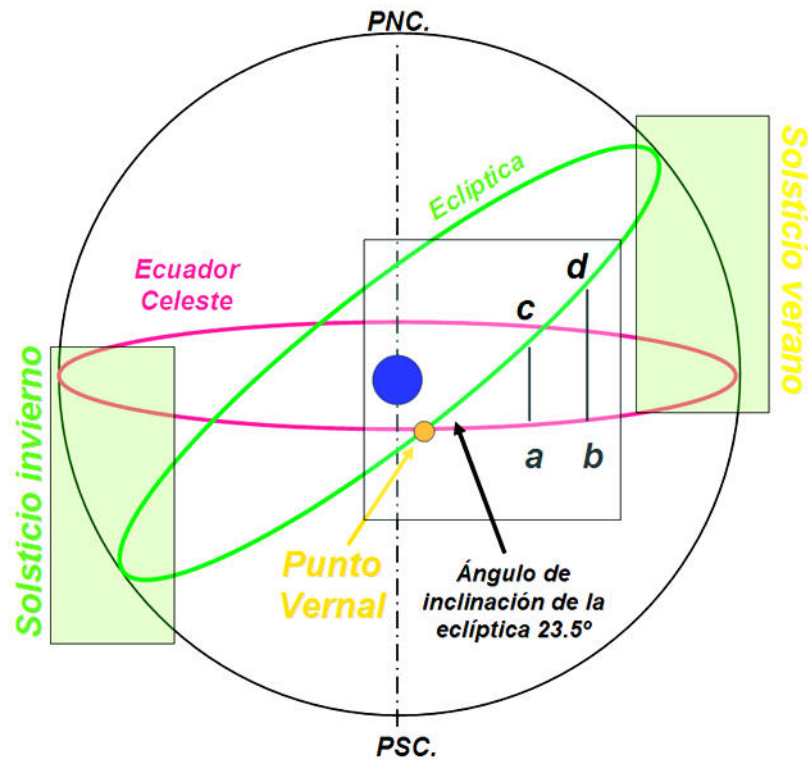
**“El tiempo solar medio es el que marcan nuestros relojes de pulsera”**

Las pequeñas diferencias entre día y día solar, al acumularse, arrojan una diferencia sustancial, entre lo que marca el reloj solar y nuestro reloj de pulsera, observándose un retraso y un adelanto del solar de hasta 15 minutos respecto al de pulsera según la época del año.

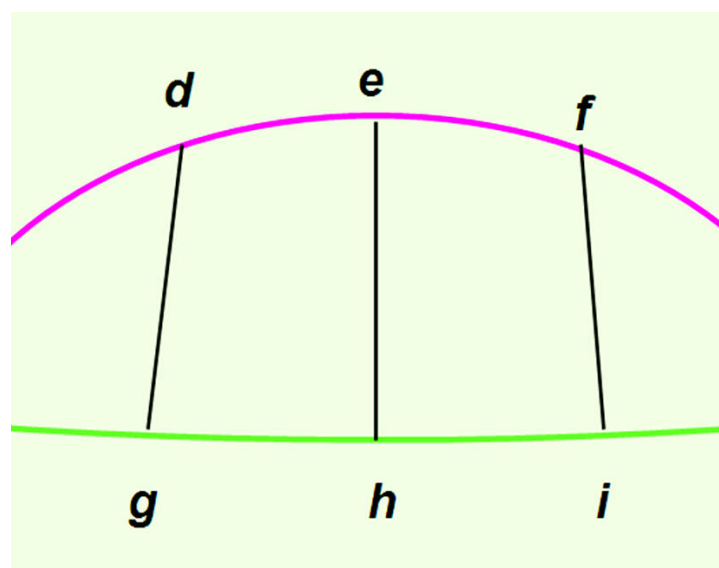
La diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio se denomina **ECUACIÓN DEL TIEMPO**.

Una de las causas de esta diferencia la hemos visto con anterioridad, la diferente velocidad orbital terrestre. Pero hay otra más:

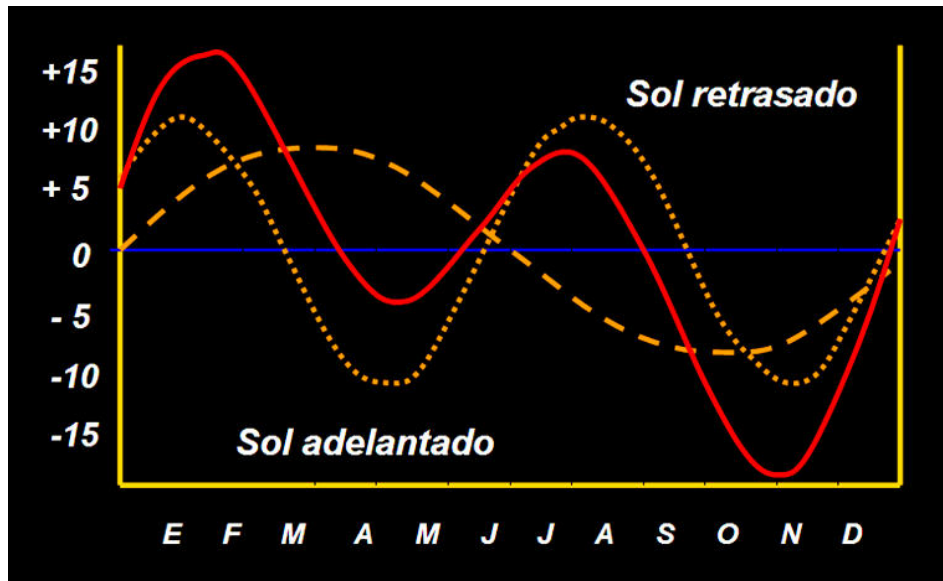
El **Sol verdadero** viaja por una **elipse** y el **Sol medio** por una **circunferencia**, las proyecciones de los desplazamientos de uno y otro no coinciden.



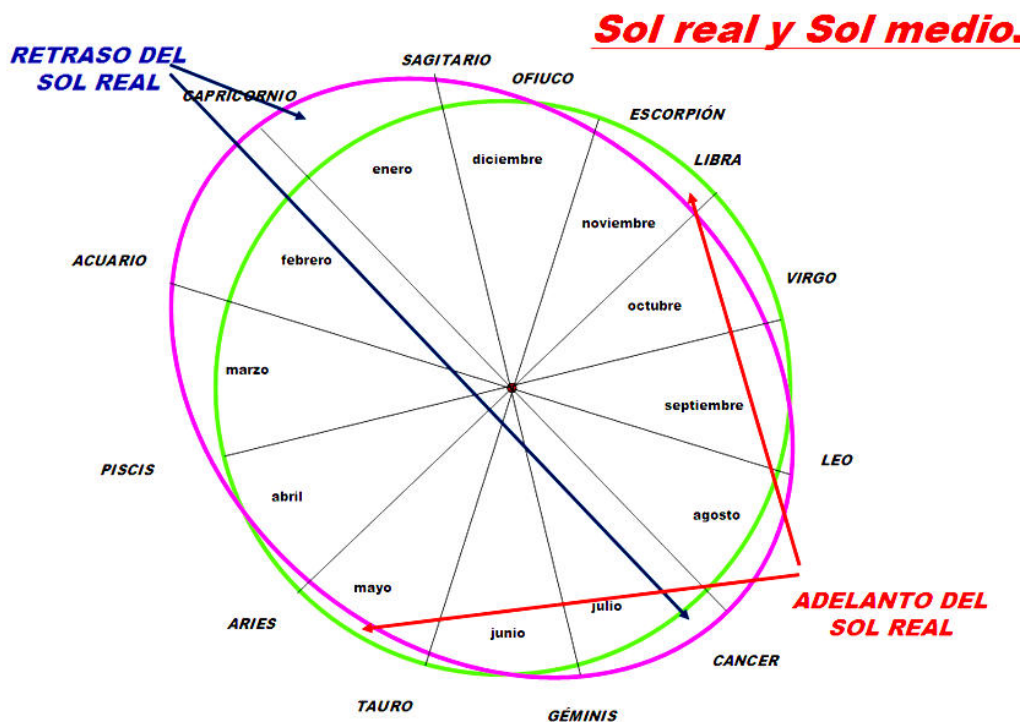
Prestemos atención al recuadro central de la figura anterior: Cerca del equinoccio vernal, la longitud del arco **c-d** recorrido por el Sol verdadero sobre la eclíptica (en verde) en un determinado tiempo, no se corresponde con el recorrido por el Sol medio en el ecuador celeste, el arco **a-b** es más pequeño. Ahora pasemos a observar lo que ocurre en los arcos cerca de los solsticios, representados por el recuadro verde.



En esta ampliación podemos darnos cuenta que en los solsticios, los arcos de la eclíptica son más pequeños que sus proyecciones en el ecuador celeste.



La diferencia entre el Sol verdadero y el Sol medio, debido a la diferente velocidad orbital queda reflejada en la sinusoide de trazo discontinuo. La sinusoide de puntos refleja la diferencia debido a que los arcos de ambos soles no se corresponden en longitud. La suma de las dos, nos da la gráfica en rojo que es la **ECUACIÓN DEL TIEMPO**, que tendremos que tener muy en cuenta para sincronizar los relojes normales con un reloj solar.



En el croquis superior tenemos resumido la diferencia entre las trayectorias del Sol real por la eclíptica (elipse en morado), y el Sol medio, idealizado en la circunferencia verde.

El tiempo solar medio, medido con respecto al meridiano del observatorio de GREENWICH (meridiano de Berbegal) y referido a las 12 horas, se decidió por convención para construir una escala de **Tiempo Universal** surgen los **Husos horarios** que vienen determinados por la división de la esfera terrestre en 24 zonas de 15 ° cada una y con una hora de diferencia, entre una y la siguiente.

Esta forma de medir el tiempo satisfizo, por su uniformidad, a los científicos durante bastante tiempo, periodo el cual la definición de segundo (como la 1/86400 parte del día solar medio) reinó hasta 1956.

Con el avance de la tecnología, esta definición de segundo se torna de todo imprecisa. Actualmente nos basamos en el segundo dado por un conjunto de relojes atómicos de Cesio, que da origen al **Tiempo Atómico internacional** (TAI).

Pero, aún estos relojes atómicos, que rozan la perfección, deben sincronizarse con los ciclos astronómicos, concretamente con la rotación de nuestra Tierra. Posiblemente:

## **“LOS RELOJES SOLARES SIGUEN MANDADO”**

### **EL AÑO:**

Hasta ahora hemos disertado sobre como medir los intervalos temporales por debajo de la unidad temporal del día, tarea de la que se encargan los relojes y su ciencia, la **horología**.

Por encima del día, el tiempo se mide por la ciencia de la **cronología** y su elemento principal, los **calendarios**. Muchos relojes solares tienen calendarios incorporados. Los calendarios con sus fechas “intentan sincronizarse” con el movimiento **de translación terrestre**, es decir, con una unidad temporal que denominamos, **Año**.

El día se basa fundamentalmente en el movimiento de rotación terrestre, el año lo va a hacer en el de **translación**, o dicho de otra forma, del comportamiento del Sol mientras da una vuelta completa a la esfera celeste.

El año es el intervalo de tiempo comprendido entre dos pasos consecutivos de la Tierra por un mismo punto de su órbita. Por lo tanto, y tomando nuevamente al Sol como referencia también podemos definirlo como el paso del Sol por el mismo punto de la eclíptica, por ejemplo con el punto vernal o de Aries. Éste es el denominado **Año Trópico**.

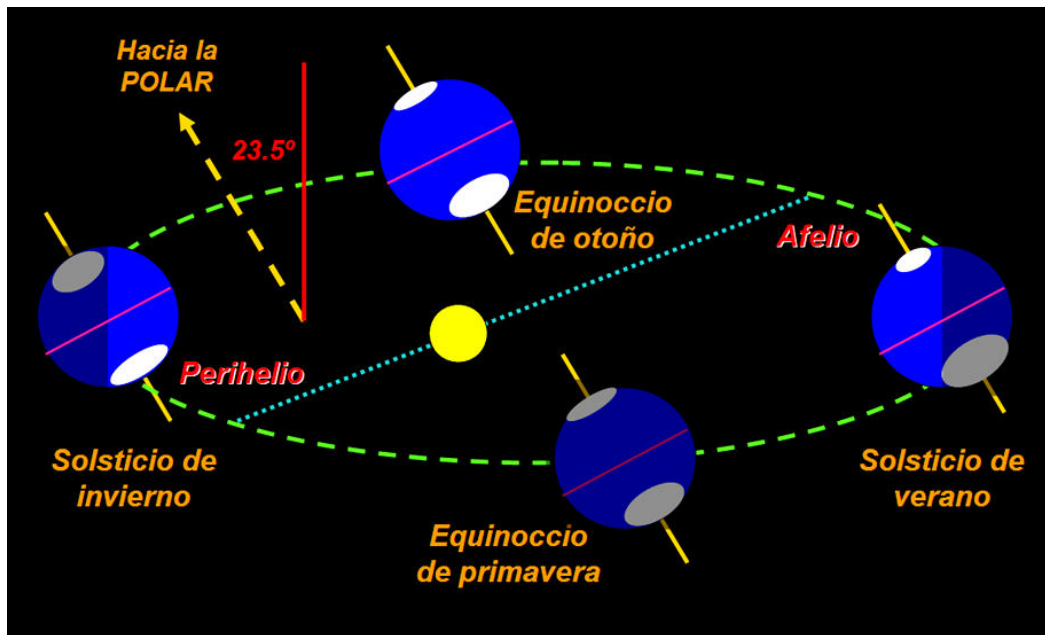
Pero si tomamos como referencia una estrella, tendremos **el año sidéreo**, quedando definido como el periodo invertido por el Sol en alinearse consecutivamente con la misma estrella. Obviamente la estrella está en la eclíptica. El año sidéreo es un poco más largo que el trópico debido a la **precesión**.

El año trópico o solar tiene una duración de 365,2422 **días solares medios** y el sidéreo es 20 minutos y 24 segundos más largo. El Sol en su camina en la eclíptica en sentido contra-horario y el punto de Aries lo hace en sentido horario unos 50” de arco /año, y por

tanto, cada año las dos referencias se encuentran antes, justo el tiempo que el año trópico es mas corto que el sidéreo.

La órbita de la Tierra junto a su eje inclinado (respecto de la eclíptica  $23.5^\circ$ ) definen un nuevo ciclo celeste en un año: **La estaciones**.

En el colegio nos han transmitido una idea falsa sobre la causa de las estaciones. La órbita terrestre es elíptica, pero esta elipse es muy poco excéntrica, es decir se asemeja mucho a una circunferencia. De tal modo, entre la máxima distancia al Sol (**Afelio**) y el **perihelio** (o punto más cercano a la estrella), hay una diferencia de 5 millones de Km., la cual no es causa suficiente. Además, ¿Cómo explicar que en el hemisferio sur es invierno, cuando en el norte es verano?



*Para comprender el fenómeno de las estaciones, veamos que hace la Tierra mientras viaja alrededor del Sol. UNA VISIÓN DESDE FUERA.*

El eje de rotación de la Tierra, siempre está dirigido hacia la estrella Polar sea cual sea su posición en su órbita (flecha y líneas doradas). Con respecto al eje de la elíptica (en rojo, es perpendicular al plano eclíptico), el de rotación terrestre está inclinado  $23.5^\circ$  y esto va a traer consecuencias:

La Tierra siempre tiene una mitad iluminada, la dirigida hacia el Sol y otra en la cual reina la oscuridad, la noche. La frontera entre las dos mitades es difuso, debido a la penumbra causada por la atmósfera, pero idealicémoslo como una circunferencia bien definida.

En el equinoccio de primavera, esta circunferencia pasa por los dos polos, en ese momento todas las zonas de la Tierra tienen un 12 horas de luz y 12 de noche. En el hemisferio norte terrestre comienza la primavera y en el sur el otoño.

La Tierra sigue desplazándose por su órbita en sentido anti-horario. Comienza la noche de seis meses en el polo sur y el día en el polo norte. Hay un momento que nuestra circunferencia toca los dos paralelos de los círculos polares de forma que el Sol es visible durante todo el día en el norte y no lo es en el sur, el polo norte cabecea hacia el Sol y el sur dista de él. Es verano en el hemisferio norte e invierno en el sur. Máximas horas de luz al norte y todo lo contrario en el sur. En todo el hemisferio norte las horas de



luz son más que las que invierte la noche. En el norte comienza la estación estival y en el sur el invierno. Acontece el **Solsticio de verano**.

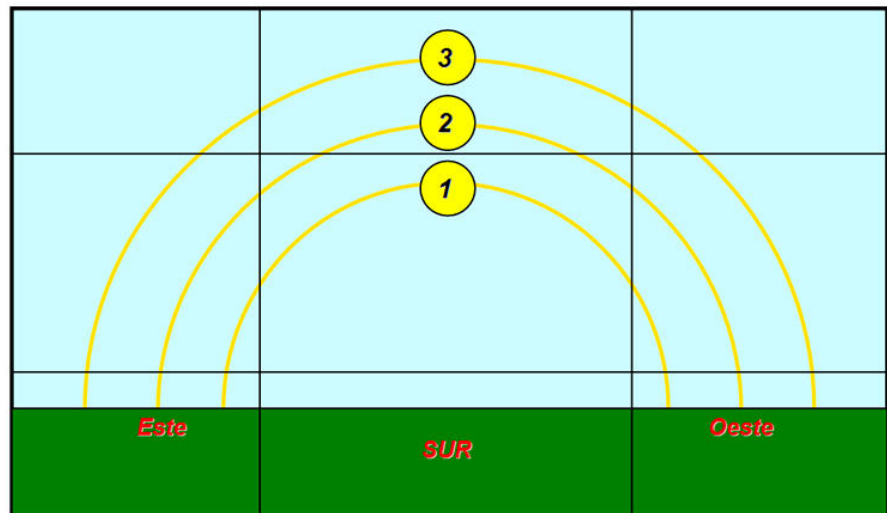
A partir de esa jornada, las horas de luz en el hemisferio norte comienzan a menguar y llegan a igualarse con las de la noche. Los dos polos terrestres se encuentran a la misma distancia del Sol. Nuestra circunferencia frontera vuelve a pasar por ambos puntos polares. Estamos en el **Equinoccio de Otoño**.

En el hemisferio sur las horas de luz “pueden” a las de la noche, y todo lo contrario en el norte. En el momento que la distancia del polo sur es mínima respecto del Sol, acontece el Solsticio de invierno, invierno en el norte, verano en el Sur. En ese preciso momento nuestra circunferencia vuelve a tocar los paralelos antártico y ártico, pero con la configuración contraria a la observada en el solsticio de verano. Comienza el verano en el Sur y el invierno en el norte. Es el **Solsticio de invierno**.

La Tierra sigue viajando incansablemente comenzando un nuevo ciclo de estaciones astronómicas. Estas estaciones se pueden resumir como posiciones concretas de la Tierra en su órbita, y como podemos deducir, las estaciones climáticas están relacionadas con estas posiciones.

Vamos a observar el comportamiento del Sol durante un año trópico (*VISIÓN DESDE DENTRO*), a través de esta imaginaria ventana (figura superior), la cual está dirigida hacia el cardinal Sur y es posible ver hacia el Norte más allá del Este y del Oeste.

El Sol sale cada día por algún punto del Este, va ganando altura hasta alcanzar la máxima elevación al medio-día, entonces está justo encima del Sur. Seguidamente



comienza a perder elevación hasta que se esconde por algún lugar del horizonte Oeste. Es decir, cada día describe un arco en el cielo, cuyos extremos interceptan al horizonte y tiene su máxima separación respecto de él, en el Sur.

Comencemos en el equinoccio de primavera. En ese día, el Sol sale justo por el Este y se esconde justo por el Oeste, alcanzando una altura media en su medio-día (Sol nº 2). El arco es de 180° y hay las mismas horas por el día que por la noche.

Al día siguiente, nuestra estrella sale un poco más al Norte del Este, y también se esconde un poco más hacia el Norte respecto al Oeste. La altura alcanzada al medio-día es un poco mayor, el arco recorrido también lo es, el día es más largo y la noche más corta. Tal como avanzan las jornadas este arco diurno se va ampliando, hasta que un determinado día su amplitud deja de crecer y el Sol parece detenerse. Entre los puntos de salida (orto) y puesta (ocaso) hay la máxima separación angular, así mismo, la altura al medio-día es la máxima de todo el año y las horas de luz también. Hemos alcanzado el Solsticio de verano. (Sol nº 1)

Seguidamente de acontecer este solsticio, el Sol irá perdiendo altura al medio-día y sus extremos de orto y ocaso se irán reduciendo, las horas de luz y oscuridad se igualarán y se alcanzará un nuevo equinoccio, esta vez el de otoño. (Volvemos a nº 2).

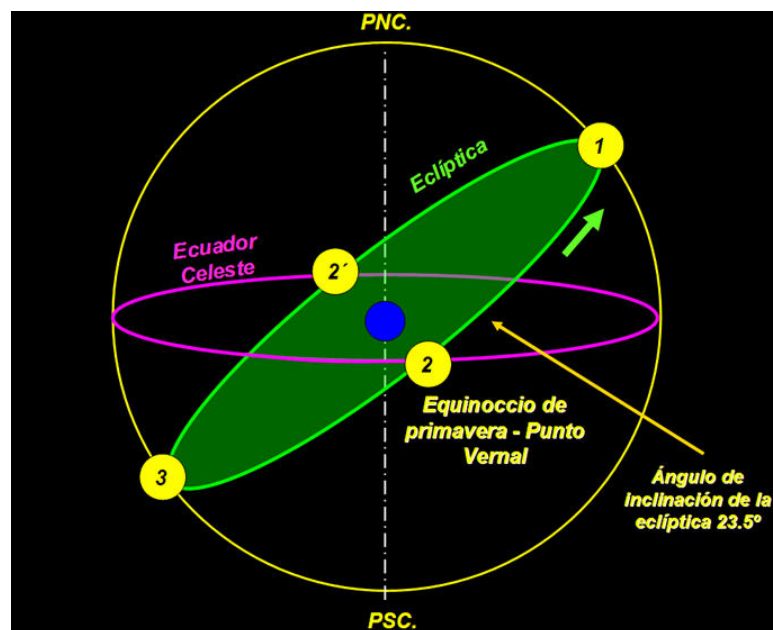
Sobrepasado el equinoccio de otoño, la altura de nuestra estrella en el cardinal Sur se va reduciendo cada día más. La distancia entre los puntos de salida y puesta se va reduciendo, dirigiéndose paulatinamente ambos hacia el Sur, hasta un momento que el acercamiento al cardinal se detiene, al igual que la “caída” al medio-día. El Sol se detiene, otro nuevo solsticio, el de invierno. En este día, la duración de la noche es máxima.

Después del Solsticio de invierno, el Sol vuelve a resurgir (“Sol invictus”), ganando altura día tras día, retornando su salida y ocaso hacia el Este y hacia el Oeste, respectivamente. Vuelve al equinoccio vernal y a un nuevo ciclo Trópico.

La cantidad de horas en las cuales el Sol está por encima del horizonte, unidas a la perpendicularidad de su incidencia sobre la superficie de la Tierra, hace que la radiación que nos llega del Sol varíe en el tiempo y en la zona de la Tierra, por ello hay diferentes “estaciones y zonas climáticas”. Podemos afirmar que las estaciones climáticas se relacionan con la astronómicas al depender las primeras del “cabeceo” de los polos y por tanto, del lugar de la órbita donde nos encontremos.

En el solsticio de verano el sol está en el cenit sobre el paralelo  $+23.5^\circ$ , el trópico de Cancer. En el de invierno es cenital en el trópico de Capricornio (paralelo  $-23.5^\circ$ ). En los equinoccios nuestra estrella está justo encima del ecuador terrestre.

El año en la esfera celeste queda descrito de la siguiente forma (ver figura inferior): El Sol se encuentra en la posición 2, en el punto vernal con declinación  $0^\circ$  y ascensión recta  $0^\circ$ , es el equinoccio de primavera, este astro pasa del hemisferio sur al hemisferio norte celeste. Cada día se desplaza por la eclíptica aumentando el valor de sus coordenadas ecuatoriales. Alcanza el Solsticio de verano y alcanza su mayor declinación ( $+23.5^\circ$ ), la ascensión recta es igual a 6 horas. Desde ese punto la ascensión recta sigue aumentando, pero la declinación disminuye hasta llegar al valor  $0^\circ$  en el nuevo equinoccio de otoño (la ascensión recta es igual a 12 horas). Pasamos al hemisferio sur celeste y la declinación se hace negativa hasta alcanzar el menor valor ( $-23.5^\circ$ ) en el Solsticio de invierno, la ascensión recta es de 18 horas. En sentido anti-horario, el Sol va a la busca del comienzo de una nueva vuelta por la esfera celeste, lo consigue al alcanzar otra vez el punto vernal.



Todo este comportamiento puede quedar reflejado en los relojes de sol que lleven incorporado **las líneas o marcas de calendario**.

Para diseñar un reloj solar hay que tener en cuenta que su geometría tiene que coordinar el punto donde está colocado, es decir el punto de observación con todos sus elementos, con la esfera celeste con su ecuador y sus polos. Y que sus marcas horarias, que nos dará la hora solar local, estén bien situadas para medir el ángulo horario del Sol (o ángulo de separación con el meridiano del lugar, a razón de 15º/hora en el ecuador celeste).

Si todo está bien ubicado la rotación de la Tierra y la luz del Sol harán el resto.

## EL MES

Desde muy antiguo, muchas civilizaciones han utilizado el ciclo de las fases para la medición del tiempo por encima de la unidad natural que es el día. Actualmente hay culturas como la sionista y la árabe que siguen basando su calendario en este ciclo astronómico de las fases lunares.

El tiempo invertido entre dos mismas **fases lunares** tiene una duración de **29,53 días medios**, es el "**periodo sinódico lunar**", el cual define nuestro mes. Cualquier ciclo sinódico supone que tres cuerpos tienen la misma configuración en el espacio.

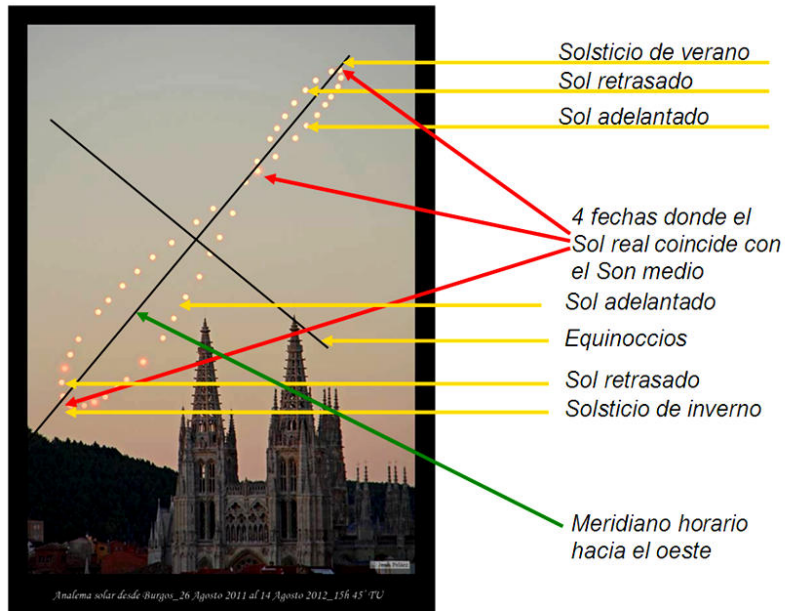
Este ciclo lo podemos dividir en "cuartos" y cada "cuarto" corresponde a una **semana**, y a una determinada posición (o fase) del satélite en su órbita. Cuatro semanas, cuatro fases, igual al mes.

Otro periodo lunar es llamado "**Sidéreo**" que es el tiempo invertido por nuestro satélite en completar una vuelta a "La esfera Celeste", es decir, tomando como referencia una estrella. El *periodo sidéreo lunar* es de 27,32 días. Este ciclo es más corto que el sinódico ya que hay que tener en cuenta que la Tierra se traslada entorno al Sol.

Algunos relojes se diseñan para marcar la fase lunar en la cual se encuentra nuestro satélite.

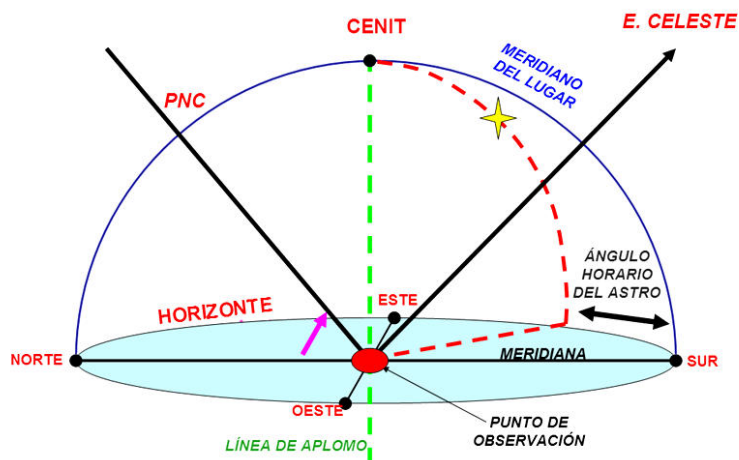
*"Podemos observar que dentro de un año, no cogen un número entero de días, ni de meses, pero tampoco de días en los meses. Es algo que nuestra manera de ser ha llevado siempre muy mal."*

En la fotografía inferior podemos apreciar el comportamiento del Sol real durante todo un año. Se ha realizado tomando una instantánea cada semana (si era posible) a la misma hora de un reloj de pulsera, es decir, en tiempo de Sol medio. La forma que se aprecia es el famoso "ocho" del **analema**



Los relojes de Sol miden las horas como la separación angular respecto del meridiano local o del lugar, el llamado ángulo horario del Sol, a razón de 15°/hora. En la imagen superior podemos apreciar este ángulo y la combinación de los elementos de la esfera celeste con el punto de observación (la bóveda celeste).

**NUESTRO PUNTO DE OBSERVACIÓN.-**



La figura superior, conyuga la VISIÓN DESDE FUERA que supone la esfera celeste y sus referencias (polos y ecuador celestes), con la VISIÓN DESDE DENTRO intrínseca en la bóveda celeste de nuestro punto de observación.

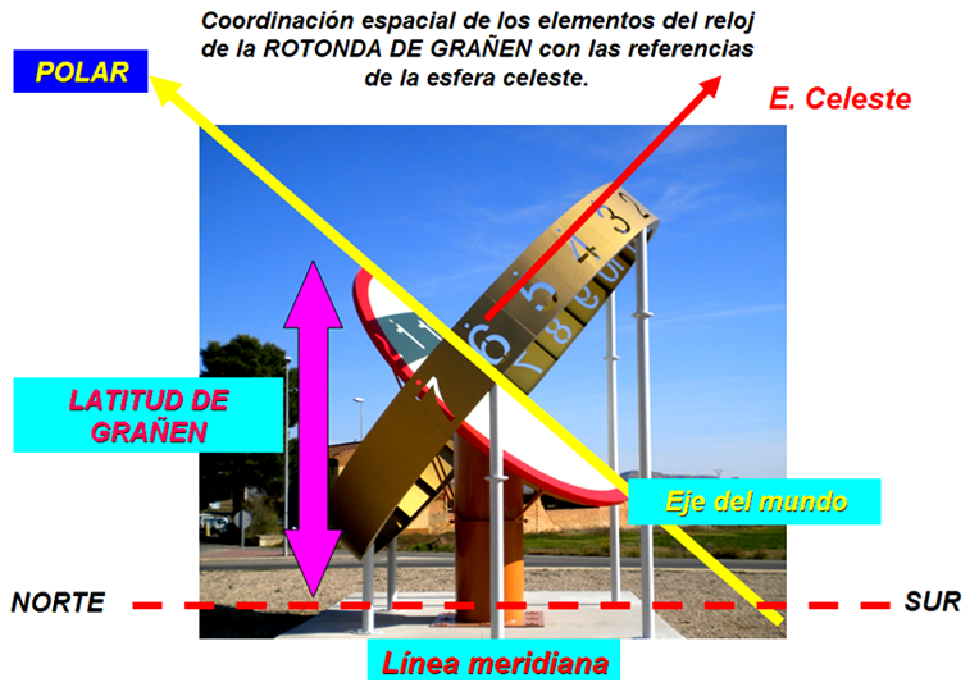
LA VISIÓN DESDE FUERA es la que tendría un astronauta colocado a varios miles de kilómetros de nuestro planeta. Es cosa que ya hemos conseguido. Pero antes, ya se tenía tal visión, gracias a la intuición y a las observaciones tomadas DESDE DENTRO, desde la corteza terrestre.

**ESTAS DOS PERSPECTIVAS SE UNEN EN EL DISEÑO DE UN RELOJ SOLAR.**

## NUESTRO RELOJ SOLAR

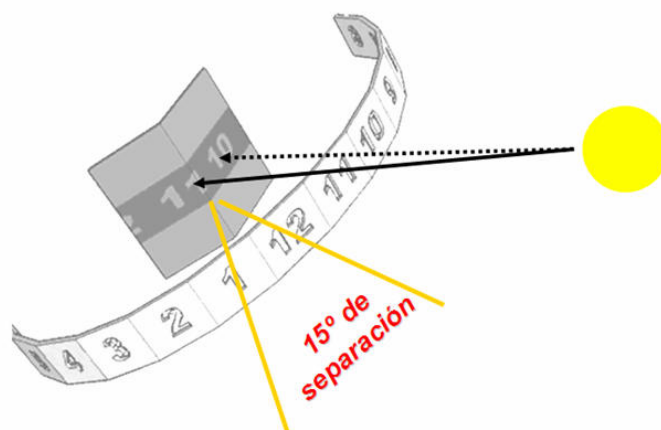
### “Mi forma y funcionamiento”

“Mi geometría, es decir, mi forma no es arbitraria. Soy un modelo escala uno a uno del cosmos que nos rodea y en el juego de luces y sombras que ves en mí, están reflejados los complicados movimientos de nuestro planeta con respecto a su contexto astronómico más próximo”.



“La maquinaria que me hace funcionar, nunca puede fallar y es la combinación de los movimientos de rotación, de translación y de precesión, junto con la luz del Sol”.

### ¿Cómo marco las horas?



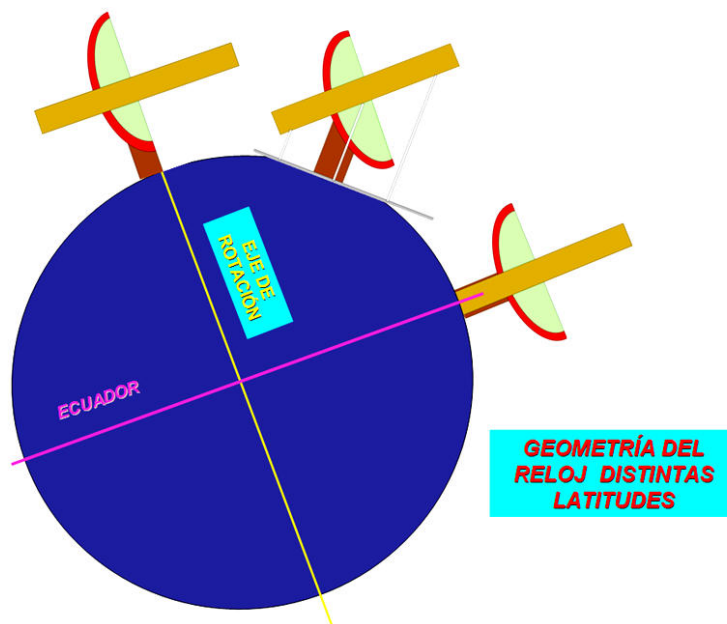
*“Debido al primer movimiento podrás saber que hora solar es. Un punto de la corteza terrestre se desplaza angularmente 15°/ hora, es por ello que mis dígitos horarios distan entre sí esa magnitud”.*

*“Mi hora difiere de la que marca tu reloj de pulsera pero más adelante te ayudaré a que lo comprendas”.*

*“La translación de nuestro planeta alrededor del Sol y un eje de rotación inclinado hace que los números de las horas recorran “La estrella” hacia arriba o hacia abajo según la estación en la que nos encontremos”.*

*“Además mi forma debe hacer encajar, con extrema precisión, el punto de la corteza terrestre en el que estoy colocado, en este caso BARBASTRO (LATITUD 42° 2´ Norte, longitud ESTE 0° 7´ 42”), con todos los puntos de referencia de la esfera celeste y los referentes a la geografía terrestre. Así, observándome podrás saber la latitud del lugar, donde se encuentra el polo norte celeste, el ecuador celeste, los puntos cardinales, el cenit, la línea de aplomo, etc*

***“Soy único, sólo soy útil en el lugar para el que fui diseñado”.***



*Si estuviese colocado más hacia al norte o hacia el sur, mi forma cambiaría. Sólo comparto ésta con todos los relojes que estén colocados en el mismo paralelo. Pero, mis compañeros hacia el Este y al Oeste, marcarán una hora diferente a la mía”*

## **PARTES DEL RELOJ**

1) Cilindro horario, en él están troquelados DÍGITOS de las horas (por ello soy “digital”), representa el ECUADOR CELESTE (por eso soy “ecuatorial”). Cuando la luz solar los atraviesa su proyección se hace visible en...

2) ...El diedro de proyección: Éste consta de dos alas que se unen en una línea denominada CODO, si las prolongases hasta que tocasen el horizonte, hallarías los puntos por donde sale y se esconde el Sol en el SOLSTICIO DE VERANO (el día más largo). En el diedro de proyección, los dígitos horarios viajan siempre de izquierda a derecha, por la mañana aparecen en el codo y se dirigen hacia el Oeste, al mediodía se aprecian la mayoría siguiendo el camino normal y al atardecer se desplazan desde la izquierda (el Este) para desaparecer en la parte central.



3) La cruz no es sólo un elemento decorativo, la sombra del cilindro horario la recorrerá cíclicamente cada año, de arriba a bajo y de abajo hacia arriba, indicado la entrada o salida de las estaciones astronómicas, es un calendario.

## **¿CÓMO MARCO LA HORA?**

Para identificar la hora en nuestro reloj hay que observar la proyección del dígito correspondiente con respecto al codo del diedro de proyección. Cuando el círculo superior del dígito se centra con él os indico exactamente la hora solar local.

Las 12 hora solar local de  
un día de primavera //  
verano



Para sincronizar con el reloj solar los relojes de pulsera, es necesario sumar a la hora solar dos horas en verano y una en invierno, además de sumar o restar la ecuación del tiempo y tener en cuenta la longitud geográfica del lugar.

**“OS PONGO UN EJEMPLO” para Barbastro, ya que éste es un trabajo realizado para la UNED de esa localidad.**

El día 8 de septiembre, “Natividad de la Virgen” marcaré las 12 cuando en tu reloj sean las 13 horas 57 minutos 30 segundos.

¿Por qué?

Primero:

“Corrección por horario de Verano o de invierno”: Estamos en horario de primavera//verano y debes sumar a mi hora 2 más (en horario otoño// invierno sólo una).

**12 hora solar (medio-día) + 2 horas (verano) = 14 horas**

Segundo:

La llamada CORRECCIÓN POR LONGITUD GEOGRÁFICA. Esta corrección es debida a la diferencia entre el MERIDIANO DE REFERENCIA DE GREENWICH y el MERIDIANO LOCAL (el de nuestra localización).

Hay que tener en cuenta que los relojes de pulsera no dan la hora solar local (la que da un reloj solar), sino que dan la hora del MERIDIANO DE HUSO HORARIO, en nuestro caso el del Greenwich. Para corregir debemos sumar la hora leída en el reloj solar si estamos al Oeste de Greenwich, y restarla si estamos al Este.

BARBASTRO está situado al ESTE del MERIDIANO DE REFERENCIA DE HUSO HORARIO (meridiano de Greenwich) que pasa por Berbegal.

El Sol “llega” al meridiano de Barbastro un poco antes que al de Berbegal.

Este tipo de corrección se basa en el desplazamiento angular de la Tierra en una hora, minuto o segundo. Este desplazamiento es de  $360^\circ/24 \text{ horas} = 15^\circ/\text{hora}$ . Como nuestra referencia horaria oficial es el meridiano de huso de Greenwich y Barbastro está al Este del mismo:

**Longitud de Barbastro ...  $0^\circ 7' W$**

**$15^\circ$  de arco x 60 minutos / hora**

**$90'$  de grado de arco.....60 minutos**

**$7'$  de grado de arco (longitud).....0.46minutos.....28 segundos**

**14 horas +(por estar al Este, al oeste sería restar)28  
seg =  
14h 28 sg.**

Tercero:

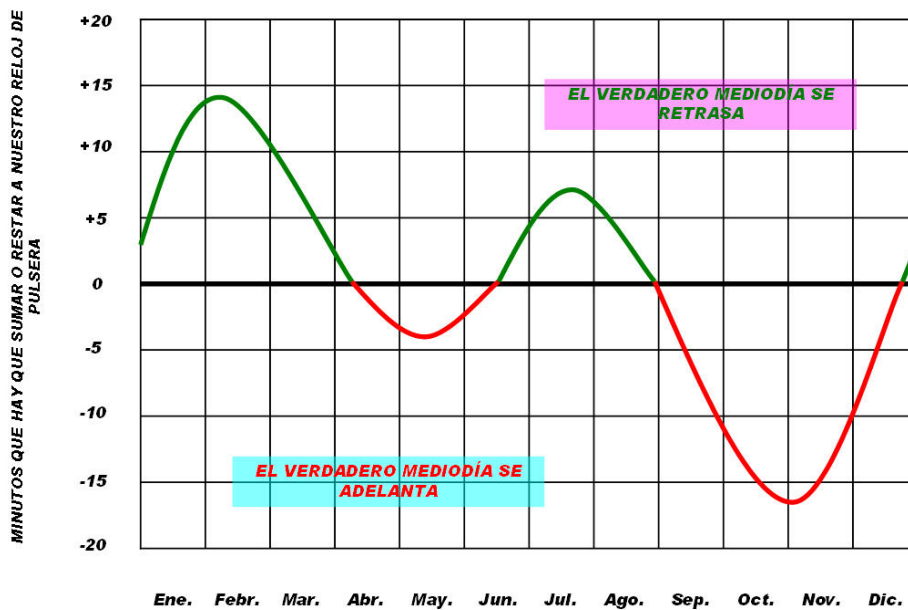
Corrección por ECUACIÓN DEL TIEMPO: Que esta basada en el distinto comportamiento del Sol verdadero (el del reloj Solar) y el Sol medio (el del reloj de



pulsera): El Sol verdadero viaja por la ECLIPTICA, que es una elipse, a una velocidad no uniforme. El Sol medio, viaja por una circunferencia, el ECUADOR CELESTE, a velocidad uniforme.

Para saber cuanto es el adelanto o el retraso del Sol verdadero en una determinada fecha, hay que consultar la ECUACIÓN DEL TIEMPO. En este caso resumida en la siguiente gráfica:

### GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DEL TIEMPO



**El día de “La Natividad de la Virgen” el Sol va adelantado, aproximadamente, 2 minutos.**

**14 horas 28 segundo - 2 minutos (Ecuación Tiempo) = 13 horas 58 minutos 28 segundos.**

#### ECUACIÓN GENERAL DE CORRECCIÓN:

**Hora en tu reloj de pulsera = hora reloj solar + 2 o 1 (verano/invierno) +/- (Este/Oeste) corrección por longitud + ecuación del tiempo de la fecha (respetando los signos de la gráfica).**

## ¿CÓMO MARCO LAS ESTACIONES?

Las estaciones son consecuencia de la inclinación del eje de rotación de nuestro planeta con respecto a su plano orbital.

Según la época del año el Sol está ALTO o BAJO, las horas de luz y oscuridad varían, estamos en una u otra estación.

Para determinar en que estación astronómica nos encontramos observaremos la posición de la sombra del anillo horario en "La Cruz de la Estrella".

Sigamos la evolución de esta sombra durante el año trópico con ayuda de los siguientes gráficos.



### LAS SOMBRAS EN EL MEDIO

Comienzo de la primavera o el otoño astronómico.

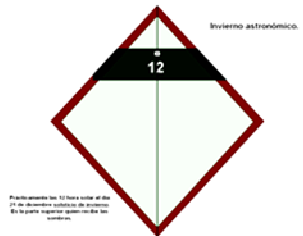
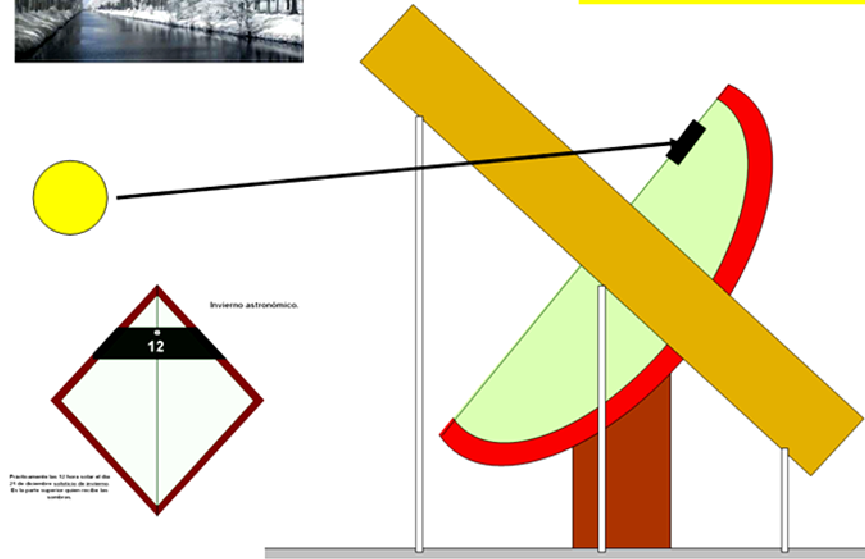


El 23 de septiembre la sombra estará centrada en el brazo horizontal de la cruz y seguirá ascendiendo.



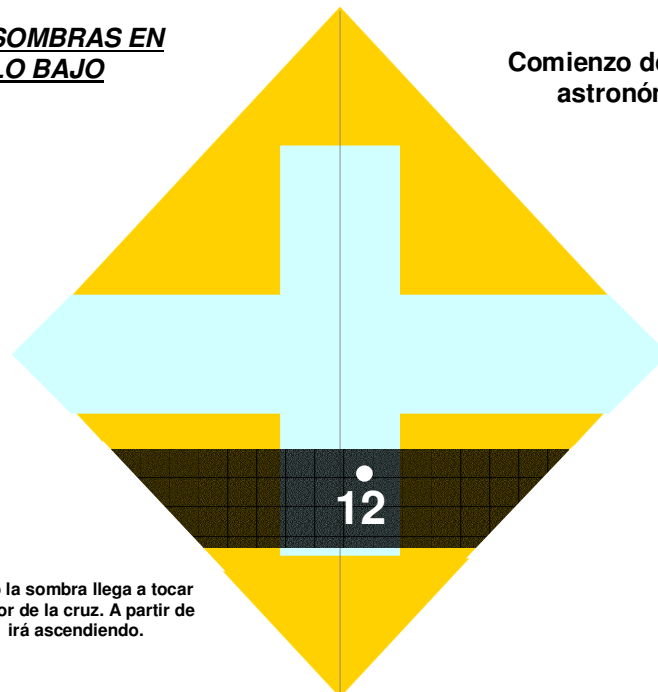
**El calendario en el reloj.**

**SOLSTICIO DE INVIERNO**



**LAS SOMBRAS EN LO BAJO**

Comienzo del verano astronómico.

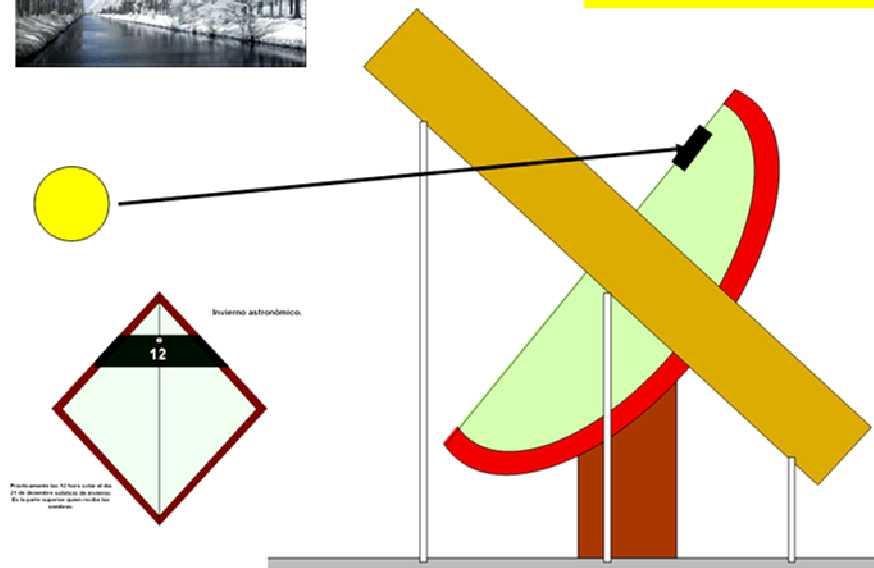


El 21 de junio la sombra llega a tocar la parte inferior de la cruz. A partir de ese día irá ascendiendo.

**El calendario en el reloj.**



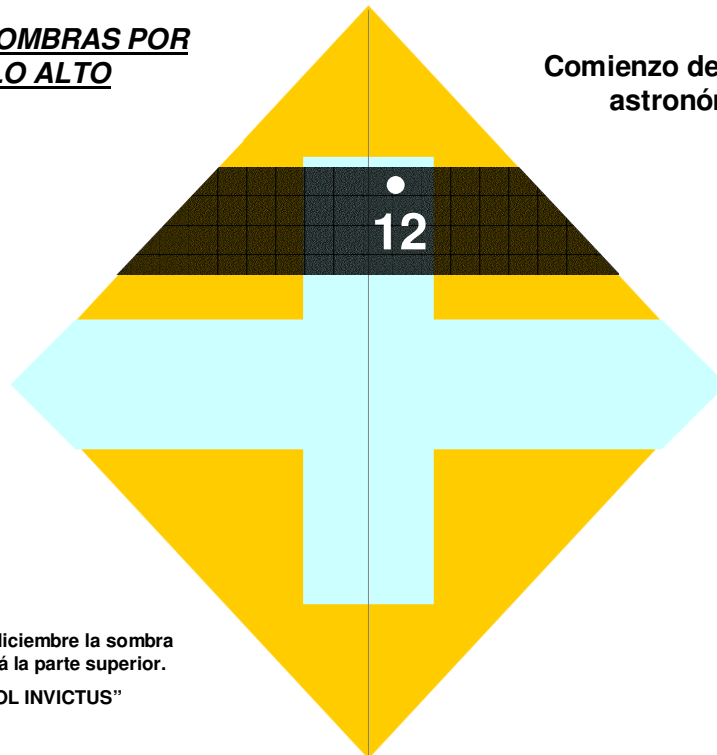
**SOLSTICIO DE INVIERNO**



11

**LAS SOMBRAS POR LO ALTO**

**Comienzo del invierno astronómico**



**El 21 de diciembre la sombra alcanzará la parte superior.  
" SOL INVICTUS"**

“Actualmente, los relojes de sol no son utilizados para el fin que nacieron, pero podemos afirmar que son un aula de altísimo nivel de astronomía, donde encontrar el esfuerzo de generaciones pasadas, y el esfuerzo de las presentes por comprender su contexto natural”,

Pero, se pueden plantear varias experiencias a realizar con los datos que nos aporta un reloj de Sol, en la cuales uniremos la astronomía, la geometría descriptiva y analítica y, sobre todo, la curiosidad humana.

1.- Observando su geometría, resolver el lugar de la superficie de la Tierra donde está colocado, es decir la LATITUD y LA LONGITUD. La primera estará inscrita en la inclinación del CODO o del estilo (palo) del reloj. La segunda se debe calcular respecto de la diferencia horaria con el meridiano de huso.

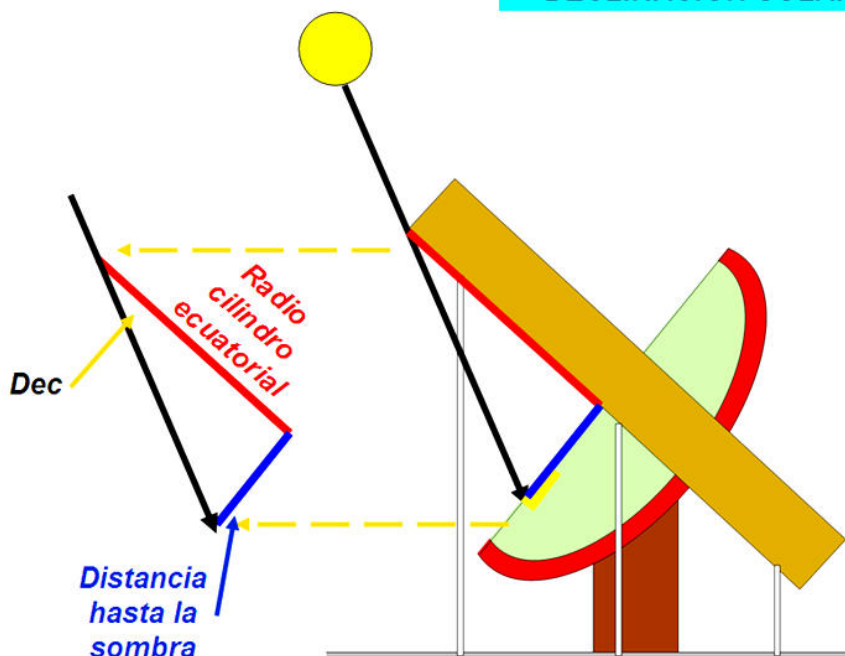
3.- Observado, igualmente, su forma, determinar la línea meridiana y los puntos cardinales.

4.-¿Dónde está el ecuador celeste? Sólo es necesario saber que sobre la horizontal del suelo, el ecuador celeste está elevado el ángulo complementario de la latitud del lugar ( $90^\circ - \text{latitud}$ ) y que es perpendicular al eje del mundo.

5.- Podemos calcular la declinación Solar diariamente. Con una simple relación trigonométrica se puede calcular es ángulo **DEC**.

$$DEC = \text{Arctag } \text{Radio} / \text{Distancia}$$

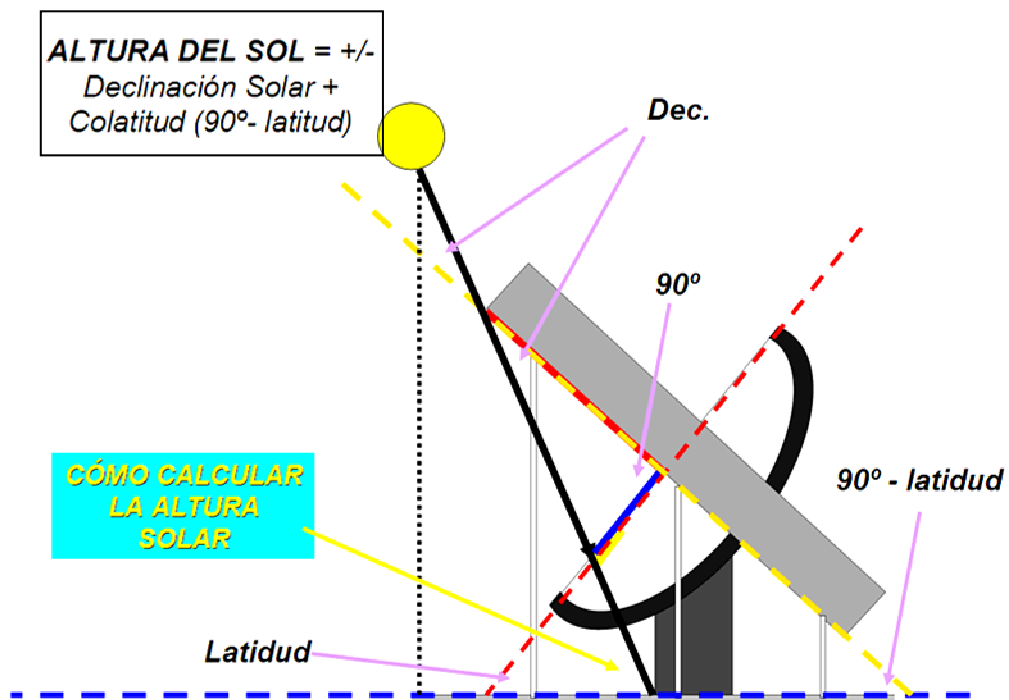
**CÓMO CALCULAR LA DECLINACIÓN SOLAR**



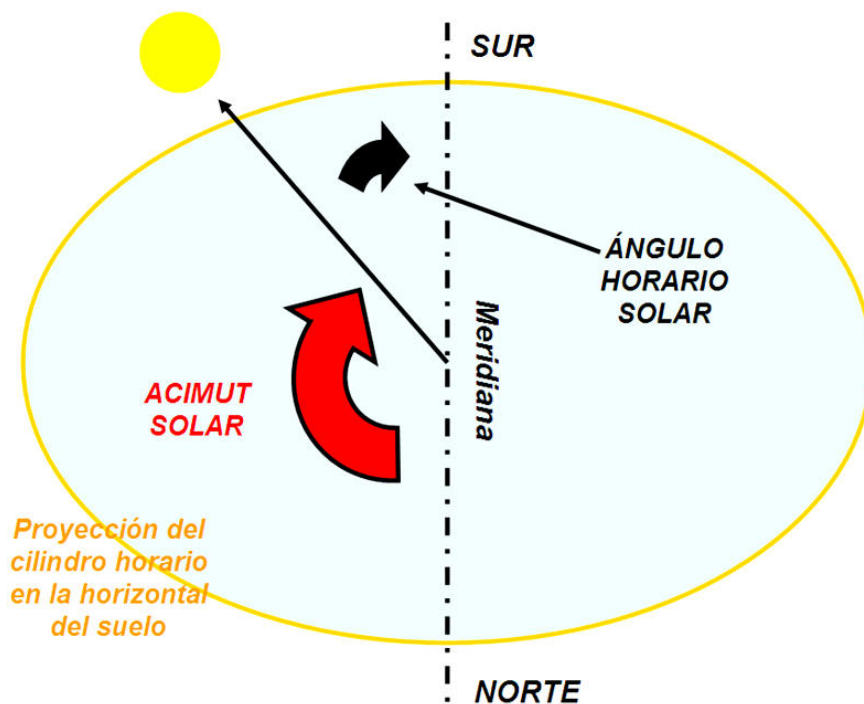
6.- Sabiendo que la declinación Solar varía de  $0^\circ$  a  $23.5^\circ$  en 6 meses (de Solsticio a Solsticio), podemos calcular los días que faltaran para llegar al comienzo de las

estaciones astronómica, tomando el dato de la distancia entre el centro del reloj y el borde de la sombra proyectada por el cilindro horario.

7.- Calculo de la altura del Sol sobre el horizonte:



8.- Determinación del acimut del Sol



***“La medida del tiempo y la observación astronómica en su aspecto histórico, científico y ornamental han tenido, tienen y tendrán en los relojes solares un gran patrimonio científico-artístico, que no debe caer en el descuido, ni en el olvido”.***

***M<sup>a</sup> Paz y Ángel ASTRONOMÍA GRAÑÉN***