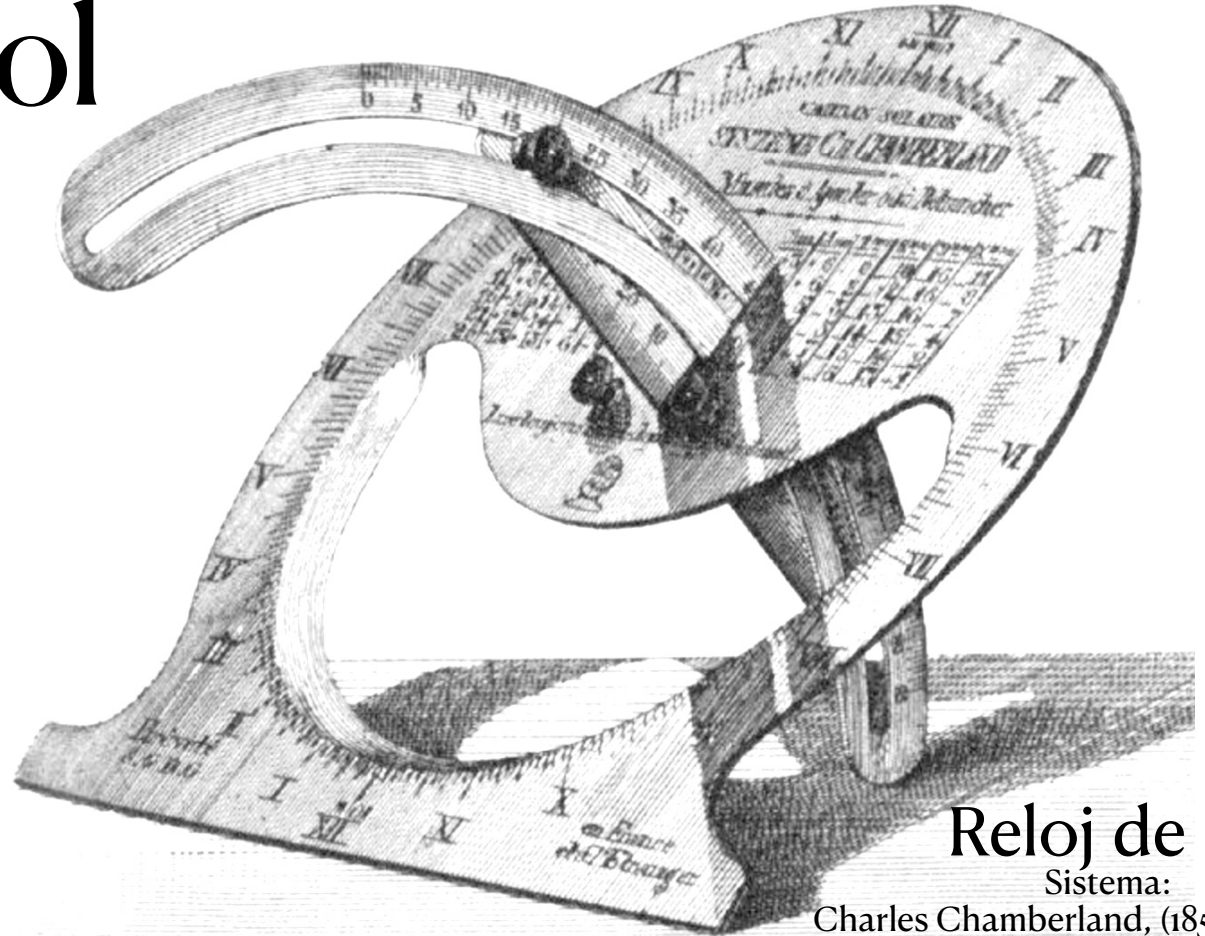


Relojes de Sol



Reloj de Sol

Sistema:

Charles Chamberland, (1851-1908)
en la colección del Autor)

Fundamento y Construcción v12

Alfonso Pastor Moreno Enero 2023

Relojes de Sol Fundamento y Construcción

1

Relojes de Sol

Fundamento y Construcción

por Alfonso Pastor-Moreno

Enero del 2023

Preámbulo

Un Reloj de Sol es un instrumento que permite medir el transcurso del Tiempo por medio del movimiento "aparente" del Sol en el Cielo

¿Para que sirven hoy los Relojes de Sol?

La verdad es que son como los números romanos, que tampoco sirven para nada, pero el conocer su teoría tiene hoy muchas aplicaciones.

A lo largo de la Historia hay cosas que se vuelven obsoletas y pierden totalmente su utilidad, sin embargo, no todo por quedarse obsoleto deja de ser útil.

Este es el caso de la Gnomónica, la antigua Ciencia que enseña el modo de construir los Relojes de Sol, que aunque obsoleta, sigue manteniendo hoy su interés, ya que gracias a su conocimiento se pueden diseñar mejores algoritmos de calculo para posicionar los captadores para producir Energía Solar.

Este trabajo sobre los Relojes de Sol, bien podría ser el fundamento de como posicionar correctamente los elementos Captadores de Energía Solar, puesto que la teoría que aquí se explica es la misma para ambos.

Relojes de Sol

Introducción

El fundamento de los Relojes de Sol es el Movimiento "Aparente" del Sol en el Cielo

Desde la mas remota antigüedad, el hombre ha medido el paso del Tiempo por medio del movimiento "aparente" del Sol en el Cielo.

Hoy sabemos, que ese supuesto movimiento del Sol en el Cielo, es solo "aparente", pues en realidad el Sol está inmóvil y lo que realmente se mueve es la Tierra y también sabemos que ese movimiento "aparente" del Sol, que percibimos desde la Tierra, es por efecto de dos de los movimientos de la Tierra, de modo similar a lo que le ocurre a un pasajero que viaja en un tren, a quien le parece que lo que "aparentemente" se mueve es el paisaje por donde pasa el tren y no el tren en si. A ese pasajero, le parece además, que los objetos que pasan cerca del tren tienen un movimiento "aparente" mas veloz que los mas alejados. La velocidad de los objetos es "aparentemente" mayor en los objetos mas cercanos y es menor cuanto mas alejados estén.

Exactamente eso mismo es lo que le ocurre a un observador situado en un punto de la superficie de la Tierra. Para este observador, son los Objetos Celestes los que se mueven, y los que están mas cercanos a la Tierra, como lo está el Sol, le parecen que "aparentemente" se mueven más deprisa que los objetos más lejanos, como son las Estrellas Fijas, que debido a su enorme lejanía las percibirá como inmóviles y como si todas estuvieran situadas a la misma distancia del observador, como si todas estuvieran colgadas de una inmensa bóveda.

Este modelo aunque no fuera real, es sin duda el que le pareció más obvio a un observador situado en la Tierra y es el que prevaleció durante más de 10.000 años. Prácticamente durante toda la Historia de la Astronomía el hombre ha creído que era la Tierra la que estaba inmóvil y que eran los Cuerpos Celestes los que giraban en torno a ella. No fue hasta 1543, cuando se publicó el "Revolutionibus Orbium Coelestium" de Nicolas Copernico, que se empezó a aceptar el planteamiento de que era la Tierra la que se movía y no los Objetos Celestes.

Por lo tanto, el "**Movimiento Aparente del Sol**". no es tal movimiento, si no el resultado de dos de los principales movimientos de la Tierra :
El movimiento de **Rotación** de la Tierra sobre su propio eje.
El movimiento de **Traslación** de la Tierra alrededor del Sol describiendo una orbita elíptica.

Los movimientos de la Tierra son la causa del Movimiento "Aparente" del Sol

Puesto que hoy sabemos que Sol no se mueve alrededor de la Tierra, si no que es la Tierra la que se mueve alrededor del Sol, podemos afirmar sin lugar a dudas, que con lo que realmente midió el hombre el Tiempo no fue con el movimiento "aparente" del Sol en el Cielo, si no con el movimiento de la Tierra,

El principal movimiento de la Tierra que utilizó el hombre para medir el Tiempo fue su Rotación y su unidad de Tiempo es el Día, que es el intervalo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Meridiano Local del observador, o bien por debajo del Sol, o bien por el debajo de una Estrella Fija, resultando respectivamente de uno o de otra el Día Solar y el Día Sidéreo.

El **Movimiento de Rotación de la Tierra** se puede hacer patente de varios modos, como por ejemplo, por medio del experimento de Foucault y su péndulo, pero el modo mas sencillo de hacerlo patente es por medio de la sombra que proyecta el Sol sobre un plano al incidir sus rayos sobre un poste, una varilla, o incluso un obelisco, o cualquier otro objeto erecto sobre un plano, que sea capaz de proyectar su sombra sobre dicho plano, cuando los rayos del Sol incidan sobre el objeto.

El **Movimiento de Traslación de la Tierra** alrededor del Sol, se pone de manifiesto con la variación de la Declinación del Sol a lo largo del año, o lo que es lo mismo, con la variación de la distancia angular entre el Sol y el Ecuador Celeste, que a su vez, al ir variando a lo largo del año es la causa de las distintas estaciones del año.

Al objeto erecto que se utiliza con el fin de proyectar su sombra cuando lo ilumina el Sol, se le llama **Gnomon**, que es lo que da nombre a la **Gnomónica**, o Ciencia que enseña el modo de calcular y trazar los Relojes de Sol.

En realidad, ni la velocidad de **Rotación** de la Tierra ni la de su **Traslación** son constantes. Es por ello, que cuando aparecieron los **Relojes Atómicos** los astrónomos abandonaron el movimiento de la Tierra como patrón de tiempo y lo substituyeron por el Tiempo indicado por los Relojes Atómicos, que funcionan sin ninguna relación con el movimiento de la Tierra, pues miden el Tiempo por medio de la frecuencia de transición de un estado energético a otro en átomos que tienen diferentes estados de energía, monitorizando el paso de un estado de energía a otro. Unos de los primeros átomos que se utilizaron con este fin fueron los del elemento químico Cesio.

De las Horas Desiguales a las Horas Iguales

Hemos visto, que un Día Solar Verdadero es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por encima del Meridiano de un lugar. Al paso de un Cuerpo Celeste sobre un Meridiano se le llama técnicamente "Transito Meridiano". En el caso del Sol, el "Transito Meridiano" del Sol se corresponde con el Mediodía Solar Verdadero.

Un Día Solar Verdadero, se divide en 24 partes, correspondiéndole a cada una de esas partes una Hora Solar. Las Horas Solares a su vez se dividen en 60 partes, correspondiéndole a cada una de esas partes un minuto. Los segundos en Gomonica no se cuentan, puesto que con un Reloj de Sol es prácticamente imposible medirlos.

La cosa así parece fácil, sin embargo, los antiguos astrónomos dividían el Día Solar Verdadero en 24 partes de una hora y asignaban 12 horas al tiempo en el que el Sol estaba sobre el Horizonte y otras 12 horas al tiempo en el que el Sol estaba oculto debajo del Horizonte, un tiempo al que llamaron de "no-Sol", o no-che.

Esta forma de dividir el Día adolece de un gran inconveniente y es que la duración del periodo de tiempo en el que el Sol está visible sobre el Horizonte no es constante durante todo el año, si no que varía en cada estación del año, y tampoco es la misma en todos los lugares de la Tierra, ya que depende de la Latitud del lugar de observación. Por lo tanto, si se divide el periodo de Sol y el de "no-Sol" en 12 horas cada uno, la consecuencia es que la duración de cada hora es distinta cada día y además es distinta en cada lugar de la Tierra.

La división del Día Solar Verdadero de ese modo, trajo como consecuencia lo que hoy llamamos las "**Horas Desiguales**", o también "Horas Romanas", porque eran las horas con las que se medía el Tiempo en la Antigua Roma y durante varios siglos fueron las que indicaban los Relojes de Sol.

Estas horas son más largas en Verano, y son más cortas en Invierno, cuando el periodo de "no Sol" es más largo que el de Sol. Solo en dos fechas del año el periodo de Sol tiene la misma duración que el de "no Sol", esas fechas son las de los días de los Equinoccios de Aries y de Libra, (Equinoccio significa "noche igual" (*al día*))

Las Horas Desiguales se mantuvieron en vigor prácticamente hasta la Edad Media, cuando la vida monástica derivó en la necesidad de medir el Tiempo de una manera con la que se pudieran computar por igual las horas de los rezos durante todo el año y para que en un mismo día las horas tuvieran igual duración en todos los monasterios de la misma orden. En los monasterios, se dividió el día en 8 partes iguales, con 3 horas de la misma duración en cada parte, que se correspondían con las horas de los rezos. A estas horas se les llamó Horas Canónicas y representaron un primer intento, aunque no total, de utilizar Horas Iguales, para medir el Tiempo.

A parte de las Horas Romanas y las Canónicas, también hubieron algunos otros modos de medir el día con otros tipos de horas, como fueron las Horas Órtuas, que eran las transcurridas desde la salida del Sol, o las horas Horas Itálicas que contaban las horas que faltaban hasta la puesta de Sol.

Pero realmente, no fue hasta el Renacimiento cuando se comenzó a medir el día con horas que tenían la misma duración a lo largo de todo el año y en todos los lugares de la Tierra y fue entonces cuando comenzaron a construirse Relojes de Sol diseñados para medir Horas Iguales, que son las que utilizamos ahora,

El Auge de los Relojos de Sol

Con las Horas Iguales, los Relojos de Sol se convirtieron en instrumentos mucho más útiles de lo que lo fueron cuando solo se utilizaban para determinar las horas de los rezos.

Al dividir el día en Horas Iguales, estas sirvieron para algo más que para rezar y los quehaceres diarios comenzaron entonces a regirse por el Tiempo Solar Verdadero, que es el que indican los Relojos de Sol, teniendo como unidad la hora Solar Verdadera, que es el resultado de dividir en 24 partes iguales el Día Solar Verdadero, en el cual, el instante del Mediodía servía como patrón de referencia para determinar los instantes del comienzo del resto de las otras horas.

Sin embargo, la utilización del Día Solar Verdadero como patrón de Tiempo, tenía un gran inconveniente, ya que su duración no es la misma durante todo el año. Algo que se puede comprobar midiendo el intervalo de tiempo que transcurre entre dos Tránsitos del Sol consecutivos por encima del mismo Meridiano Local, un intervalo que varía a lo largo del año.

Por si faltaba algo, el Tránsito del Sol por un Meridiano Local, no ocurre en el mismo instante en lugar que en otro lugar de la Tierra, a no ser que ambos estén situados en el mismo Meridiano.

Para subsanar el problema de la inconstante duración de los intervalos de tiempo transcurridos entre un Mediodía Solar y el siguiente, cada localidad se rigió por su propio instante de Mediodía Solar local, que se basaba en el instante del paso del Meridiano Local por debajo del Sol Verdadero y que fue el patrón de Tiempo con el que se construyeron los Relojos de Sol de cada localidad.

Con lo anteriormente expuesto vemos que era muy importante el poder determinar con precisión el instante del Mediodía Solar Verdadero en cada localidad, puesto que a partir de ese instante, se podían determinar el resto de los instantes del comienzo de las demás horas del día.

Tanta importancia tuvo la determinación Mediodía Solar Verdadero, que en muchas ocasiones se construyeron Relojos de Sol únicamente para determinar ese instante.

Un ejemplo de Reloj de Sol de Mediodía es el situado en la fachada Sur de la Iglesia de Santa María Novella de Florencia (Italia), diseñado por Ignazio Danti en 1572.



Armillilla Equinoccial de la fachada Sur de la basílica Santa María Novella de Florencia (Italia), para determinar el instante preciso del Mediodía Solar. Ignazio Danti 1572. Crédito de la fotografía: Francesco Bini. licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

La Hora de Tiempo Solar Verdadero y la Hora derivada de los Husos Horarios

La Hora de Tiempo Solar Verdadero, se mantuvo como Hora Oficial en cada localidad, hasta el advenimiento del Ferrocarril, que trajo como consecuencia la necesidad de establecer un mismo patrón horario para todas las localidades unidas por la misma línea férrea. Como consecuencia de ello, en 1912 se celebró en París la Conferencia Internacional de la Hora en la que se decidió establecer como Meridiano Origen para medir la Longitud Geográfica y como origen de la Hora al Meridiano de Greenwich y se dividió la Tierra en 24 Husos Horarios de 15° de amplitud cada uno. Cada Huso Horario con un Meridiano Central situado entre dos sectores de $7^\circ 30'$ a cada lado de él. Un sector al Este y al otro Oeste del Meridiano Central. Las localidades que quedaran al Este del Meridiano Central, aunque su Meridiano Local pasara antes por debajo del Sol, que las que estuvieran en el propio Meridiano Central, adoptarían la misma hora que las que estuvieran en dicho Meridiano Central y lo mismo ocurriría con las localidades situadas al Oeste del Meridiano Central, aunque su Meridiano Local pasara por debajo del Sol mas tarde que lo hacía el Meridiano Central. Con esta norma, todas las localidades que quedaban dentro de un mismo Huso Horario, adoptarían la Hora Oficial del Meridiano Central de ese Huso Horario.

A partir de la Conferencia de 1912, cada localidad se fue adhiriendo paulatinamente al sistema de Husos Horarios, abandonando como Hora Oficial, la Hora Solar Verdadera que le correspondería al Meridiano de esa localidad, pasando a tener como Hora Oficial la hora del Huso Horario que se estableciera para dicha localidad. De este modo, se unificaron todos los horarios de una misma zona geográfica.

La hora indicada por los Relojes de Sol, puesto que indicaban Tiempo Solar Verdadero, se quedó desfasada de la Hora Oficial, que estaba basada en Tiempo Solar Medio, por lo que la mayoría de los Relojes de Sol, puesto que marcaban Tiempo Solar Verdadero, lo hacían con una diferencia con la Hora Oficial, diferencia que además de a la debida a la Ecuación de Tiempo, se le sumaba la debida a la diferencia en Longitud Geográfica entre el Meridiano Local el Meridiano Central del Huso Horario adoptado en la zona.

Todo esto hizo que los Relojes de Sol se volvieran prácticamente inservibles y más cuando España adoptó a partir del 16 de Marzo de 1940, la Hora Oficial la de un Huso Horario muy distante al que le correspondería por su situación geográfica, en lugar de adoptar el Huso Horario 0° (Zulú), que es el del Meridiano de Greenwich, que pasa muy cerca de Castellón y por la zona del Este de Cataluña. Al haber adoptado España el Huso Horario $+1$, del Meridiano de $+15^\circ$, que pasa muy cerca de Stargard en Polonia ($15^\circ 2' 41.1''$ E, 15.04475° E), los Relojes de Sol de España que marcan Tiempo Solar Verdadero, lo marcan con varias horas y minutos de diferencia con respecto a la Hora Oficial de España, por lo cual quedaron prácticamente inutilizables para España, a no ser que a la hora que indican, se le apliquen las correspondientes correcciones en Longitud, con respecto al Meridiano de Latitud $+15^\circ$ que pasa por Polonia, cosa que no es fácil de hacer para la mayoría de la gente.

El Declive de los Relojes de Sol

Conforme los países se fueron adhiriendo al sistema de Husos Horarios, adoptando a veces Husos Horarios muy distantes del que les correspondería por su situación geográfica, la Hora Oficial dejó de ser la Hora Local de Tiempo Solar Verdadero y cada vez más Relojes de Sol se fueron quedando inservibles para indicar la Hora Oficial. Esos Relojes de Sol, que antaño regularon la vida de los habitantes de una ciudad, pasaron a ser meros objetos decorativos.

Aparecieron entonces una serie de instrumentos para determinar con precisión el instante del Mediodía Solar a nivel particular, para convertir después el dato en Hora Civil, aplicándole las correcciones correspondientes. Uno de los instrumentos, que merece ser citado es el Dipleidoscopio, que permitía determinar con exactitud el instante preciso del Mediodía Solar Verdadero Local y que utilizado por un observador experto, y haciendo los cálculos adecuados, permitía convertir con precisión el instante del Mediodía Solar Verdadero en Hora Civil.

Paralelamente a la aparición de los citados instrumentos, comenzaron a popularizarse los Relojes Mecánicos de bolsillo, que pronto se convirtieron más en una necesidad, que en un simple adelanto técnico, ya que liberaban al usuario de tener que depender del movimiento aparente del Sol en el Cielo, para poder conocer la Hora, algo que devino de suma importancia en una época de extraordinario desarrollo de las grandes vías de comunicaciones terrestres como era el ferrocarril. De tal modo que algunas compañías ferroviarias, para prevenir accidentes, obligaban a su personal a utilizar los Relojes Mecánicos de precisión que les suministraba la compañía, que eran mantenidos en servicio y revisados periódicamente por los relojeros de las propias compañías. Esos Relojes Mecánicos, llamados Relojes de Ferrocarril son hoy preciados objetos de colección.

Conforme la Hora Oficial, pasaba de ser la del Tiempo Solar Verdadero a ser la Hora del Meridiano Central del Huso Horario adoptado por cada localidad, los Relojes de Sol, pasaban de ser instrumentos imprescindibles en la vida de una comunidad a ser objetos inútiles que ya no servían para indicar la Hora Oficial de manera fácil y practica y comenzaron a ser relegados al abandono. Pasaron entonces de instrumentos de uso necesario a ser meros objetos decorativos e incluso muchos, cuando no se vandalizaban, se desmontaban para aprovechar los materiales con los que se habían construido.

El control del Tiempo quedó encomendado entonces a los observatorios astronómicos, que determinaban con precisión el instante exacto del Mediodía, o de la Medianoche por el Transito del Meridiano local por debajo de una Estrella Fija o del Punto Vernal, o Puno del Equinoccio de Aries, que es uno de los dos puntos en los que se cruzan los Planos de la Eclíptica y el del Ecuador y es el punto del Cielo que marca el comienzo del Año Trópico.

Determinación de la Hora por el Transito de una Estrella Fija sobre el Meridiano de Referencia

Vemos que aunque durante siglos, la base para medir del Tiempo fue la rotación de la Tierra, medita por medio del Movimiento Aparente del Sol, a partir de un cierto día, se abandonó al Sol como punto de referencia y se tomaron como puntos de referencia a algunas Estrellas Fijas, o al Punto Vernal y se estableció como patrón de Tiempo, en lugar del día Solar, el Día Sidéreo, que es el intervalo de Tiempo transcurrido entre dos Tránsitos consecutivos o bien de una Estrella Fija, o bien del Punto Vernal. por encima del Meridiano de Greenwich..

La diferencia en la hora en la que tiene lugar el Tránsito del Meridiano de una localidad por debajo de una Estrella Fija, con respecto al de otra localidad, depende de la diferencia en Longitud Geográfica entre sus dos Meridianos Locales, a razón de: 15.041782729805 por cada hora. Por lo que es $60 \text{ minutos} / 15.041782729805 = 3.988888888889$ minutos de tiempo por cada 1° de diferencia de Longitud.

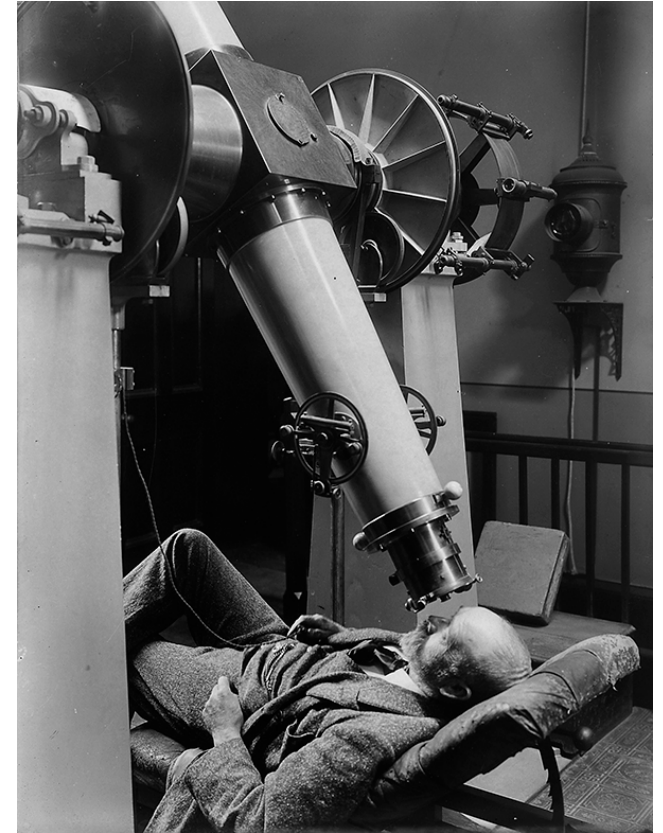
Comúnmente, a efectos prácticos se redondea a 4 minutos de diferencia en Tiempo por cada 1° de diferencia en Longitud, lo cual permite aplicar facilmente la corrección de la Hora Local, con respecto a la Hora de Greenwich o GMT.

Años atrás, algunos observatorios astronómicos escenificaban el instante del Mediodía, por medio del descenso brusco de una esfera que caía desde lo alto de un poste. De ese modo, se podía visualizar el instante del Mediodía desde muy lejos, de modo, que los profesionales especializados, pudieran así sincronizar sus cronómetros con el instante del Mediodía indicado por el observatorio.

A dichas esferas que se dejaban caer de golpe, se les llamó las Bolas de Tiempo y las de algunos observatorios se hicieron muy famosas, porque le permitían al público sincronizar sus Relojes Mecánicos, con el instante justo del Mediodía, algo muy útil tanto en la Navegación Astronómica como en la vida civil, por lo que marinos y relojeros, para poner en hora sus Relojes solían congregarse en los lugares en donde estas Bolas de Tiempo eran más visibles.

Con el advenimiento de la transmisión por radio de las señales horarias, las Bolas de Tiempo perdieron su relevancia en el computo del Tiempo y poco a poco fueron cayendo en desuso.

El computo del Tiempo por medio del Transito de una Estrella Fija por encima del Meridiano, continuó estando en vigor, hasta que se pasó a medir el Tiempo con los Relojes Atómicos que ya nada tienen que ver con la rotación de la Tierra. Véase: https://en.wikipedia.org/wiki/Meridian_circle.



Observando el tránsito del una Estrella Fija por encima del Meridiano Local, para determinar el instante exacto de la Medianoche..

Fotografía de H. A. Lenehan en el Telescopio de Transito Meridiano del Observatorio Astronómico de Sydney.
Fotógrafo desconocido. Fecha entre 1907-1908.

Collection Museum of Applied Arts and Sciences. Sydney Observatory, Sydney, New South Wales, Australia,

La Bola de Tiempo del Reloj de la Puerta del Sol de Madrid (Hoy en desuso)

40° 25' 0.04" N, 3° 42' 15.28" W ; 40.416679, -3.704244



Crédito de las imágenes Wikimedia Commons. Carlos Delgado. licensed under the Creative Commons [Attribution-Share Alike 3.0 Unported](#)

Alfonso Pastor Moreno Enero 2023

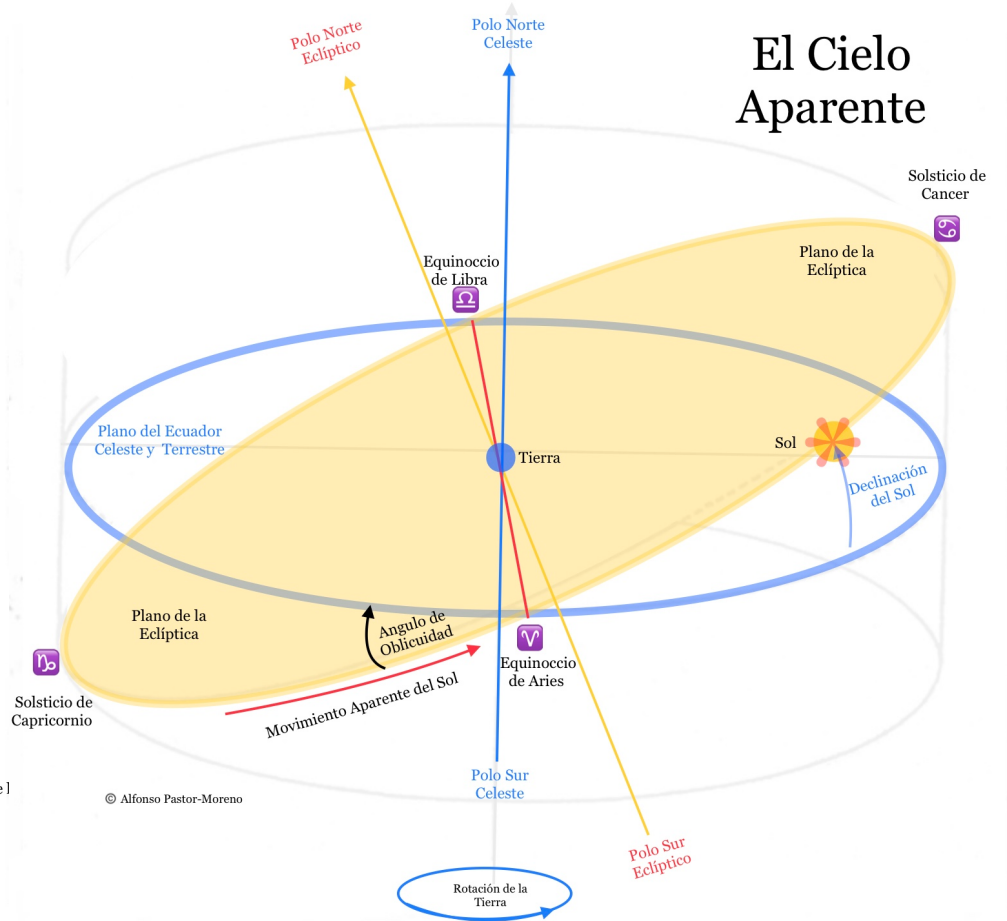
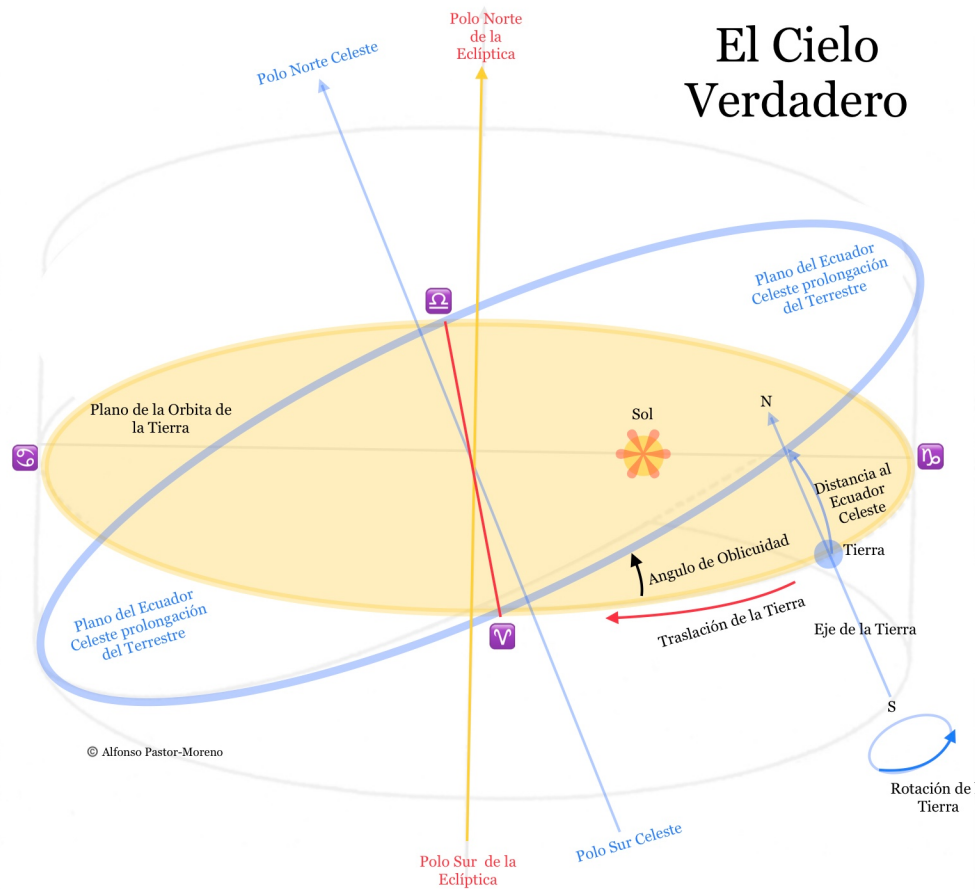
Relojes de Sol Fundamento y Construcción

13

Relojes de Sol

Teoría

El Cielo Verdadero y el Cielo "Aparente"



El Movimiento "Aparente" del Sol en el Cielo

La Tierra gira sobre si misma alrededor de un eje perpendicular al plano de su Ecuador a la vez que se traslada alrededor del Sol en una Orbita Elíptica, cuyo plano no coincide con el plano del Ecuador, si no que forma con este un ángulo de $23,44^\circ$.

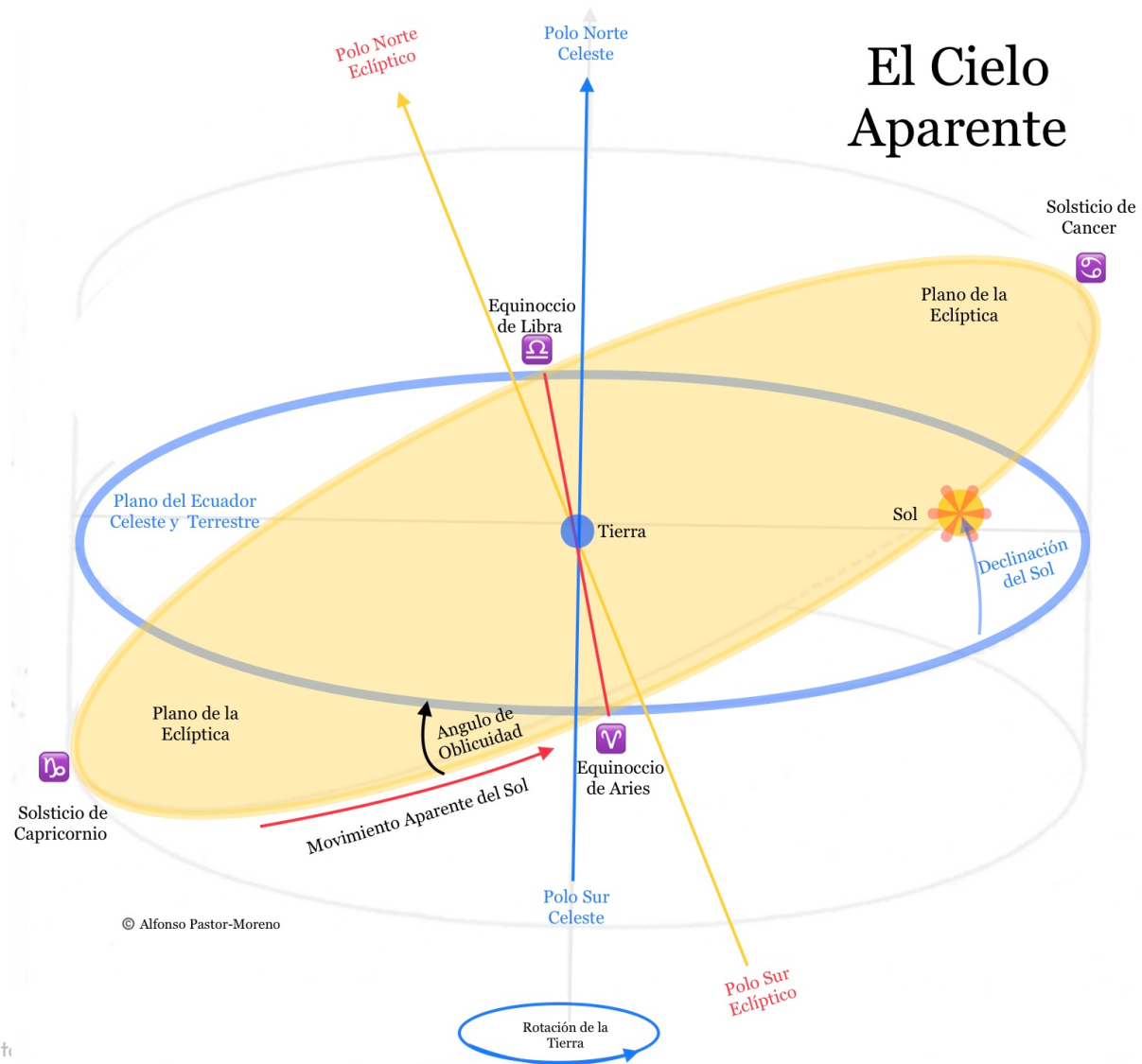
El Plano del Ecuador Celeste es la prolongación del Plano del Ecuador Terrestre, por lo que al girar la Tierra, todos los Cuerpos Celestes, aparentemente giran en círculos paralelos al Ecuador Celeste.

Como la elipse por la que se Traslada la Tierra y el circulo del Ecuador Celeste no están el mismo plano, si no, que están formando un angulo, de $23,44^\circ$, cuando la Tierra se desplaza en su Orbita, se acerca y se aleja del Ecuador Celeste hasta un máximo de $\pm 23,44^\circ$

El Sol visto desde la Tierra "aparentemente" se mueve alrededor de la Tierra en la misma elipse en la que en realidad se mueve la Tierra, por lo que "aparentemente" parece que es el Sol el que se mueve. A la elipse que "aparentemente" recorre el Sol, se le llama la "Eclíptica", porque muy próximos a la linea de la "Eclíptica" tienen lugar los "Eclipses". La Eclíptica está dividida en 12 partes y cada una de esas partes está ocupada por una constelación. Dichas constelaciones son las Constelaciones Zodiacales y cada una representa un Signo del Zodiaco.

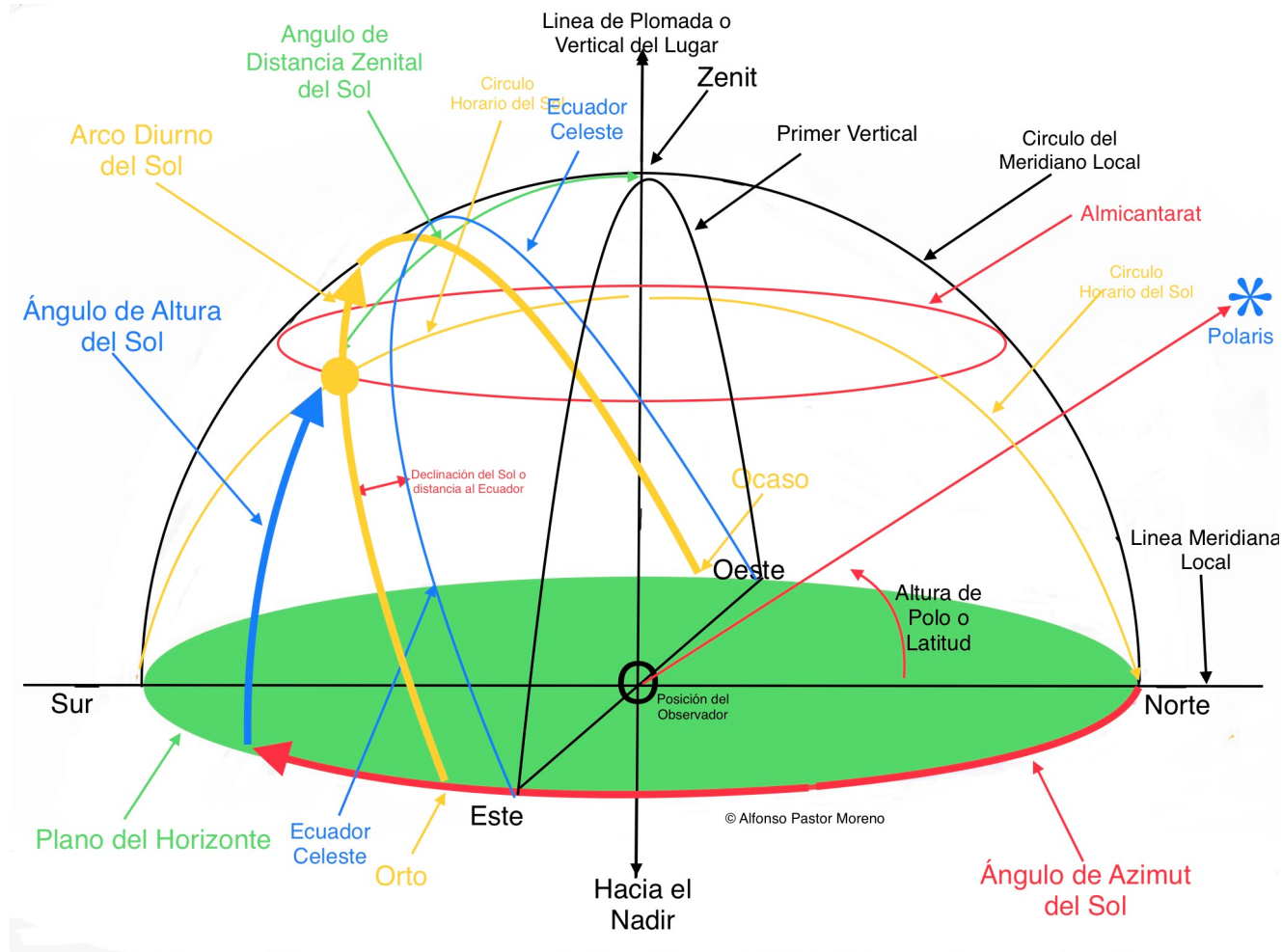
Debido que el Plano de la Eclíptica no coincide con el Plano del Ecuador Celeste, si no, que ambos forman un ángulo de $23,44^\circ$, el Sol, al desplazarse "aparentemente" por la Eclíptica, al igual que ocurre realmente con la Tierra, al recorrer su órbita, parece acercarse y alejarse del Ecuador Celeste. A la distancia angular "aparente" entre el Sol y el Ecuador Celeste se le llama Declinación del Sol y tiene valores entre $\pm 23,44^\circ$, que varían cada día y que dependen del lugar de la Eclíptica en donde "aparentemente" esté situado el Sol, o lo que es lo mismo, en el Signo del Zodiaco en el que "aparentemente" esté situado el Sol, a lo que astronómicamente se le llama la "Longitud Eclíptica del Sol".

El Cielo Aparente



Alfonso Pastor

La Posición del Sol sobre el Horizonte y los principales ángulos de la Geometría Solar



Los dos principales movimientos de la Tierra dan como resultado el "Movimiento Aparente" del Sol

Hemos visto que a lo que se le llama el "Movimiento del Sol" es solo una "apariencia", pues el Sol está inmóvil y es la Tierra la que en realidad se mueve, por lo que el movimiento "aparente" del Sol no es más que el resultado de dos de los principales movimientos de la Tierra:

a).- El movimiento de traslación de la Tierra al orbitar alrededor del Sol en una órbita Elíptica.

b).- El movimiento de rotación de la Tierra al girar sobre si misma.

Ambos movimientos de la Tierra, combinados entre si, producen la "apariencia" de que es el Sol el que se mueve.

En este trabajo, no vamos a intentar rebatir el planteamiento de considerar que es el Sol el que se mueve, pues como hemos visto, al igual que el pasajero de un tren, todo depende del sistema de referencia que tomemos para medir lo que observemos.

Nosotros, puesto que hoy sabemos que no es el Sol si no la Tierra la que se mueve y que el llamado "Movimiento del Sol" es solo ficticio, vamos a aplicarle siempre el adjetivo de "aparente" a ese "Movimiento del Sol", y así podemos seguir con los mismos planteamientos que se han venido utilizando en los antiguos tratados de Gnomónica escritos antes de 1543, cuando se publicó el "Revolutionibus" de Copérnico.

En las paginas siguientes podemos ver esquematizado lo que aquí se ha dicho.

La Trayectoria "Aparente" del Sol al recorrer "aparentemente" la Eclíptica forma una Espiral "aparente" en el Espacio Estelar alrededor de la Tierra

La combinación del movimiento de rotación de la Tierra sobre sí misma junto con el de traslación al desplazarse en su órbita elíptica alrededor del Sol, genera un movimiento "aparente" del Sol en el espacio similar al que describiría el Sol si se moviera en una enorme espiral alrededor de la Tierra,

La Tierra, a lo largo del año, en su desplazamiento en su órbita elíptica va variando su distancia angular al Ecuador Celeste alejándose o acercándose progresivamente del Ecuador Celeste día a día.

Ese movimiento de la Tierra a lo largo del año, hace que "aparentemente" cada día veamos al Sol a mayor o menor distancia angular del Ecuador Celeste, por lo que la Declinación del Sol es distinta cada día y a lo largo del año adquiere valores entre $\pm 23,44^\circ$.

Hay periodos del año en los que la variación diaria de la Declinación del Sol es muy acusada y otros periodos en los que de un día a otro es apenas perceptible. La magnitud de la variación depende de la Estación del año.

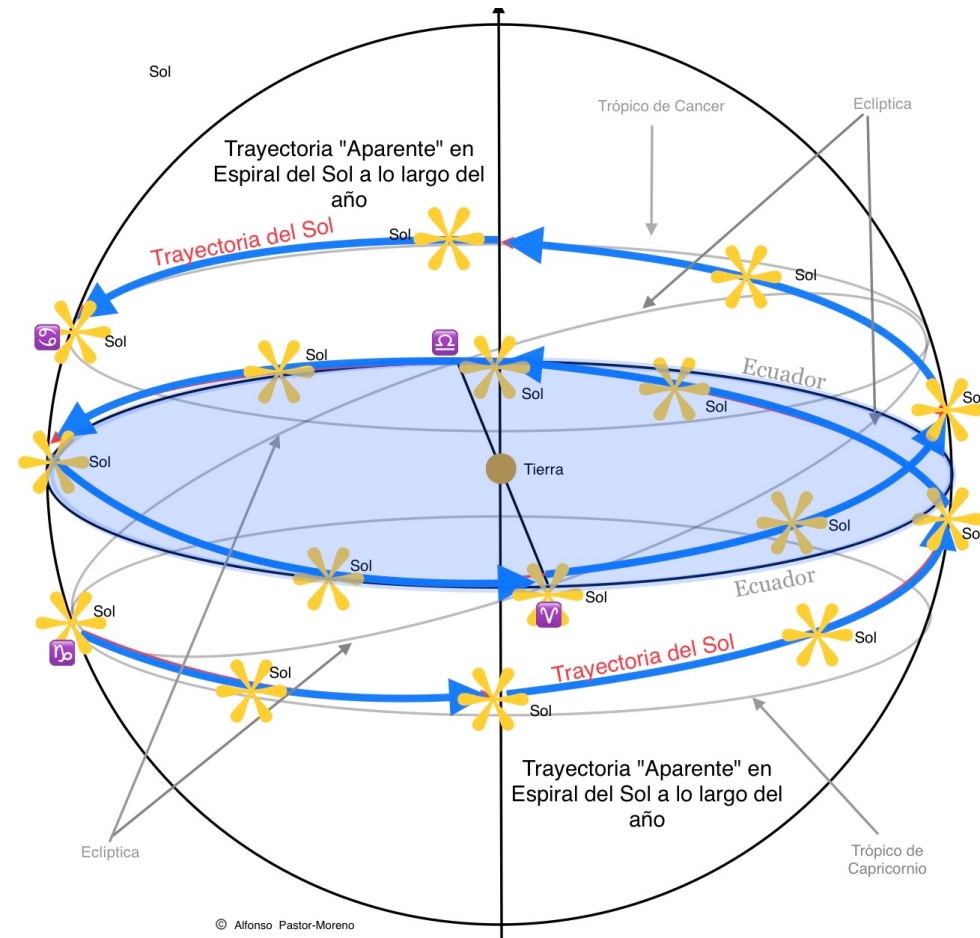
Dentro de un mismo día, la variación de la Declinación del Sol se suele considerar como prácticamente nula a lo largo de ese día, sin embargo, hay días en los que esa variación es considerable a lo largo del día y no debe despreciarse.

En el Solsticio de Cancer la distancia angular "aparente" entre el Sol y el Ecuador Celeste, es decir la Declinación del Sol es de $+23,44^\circ$,

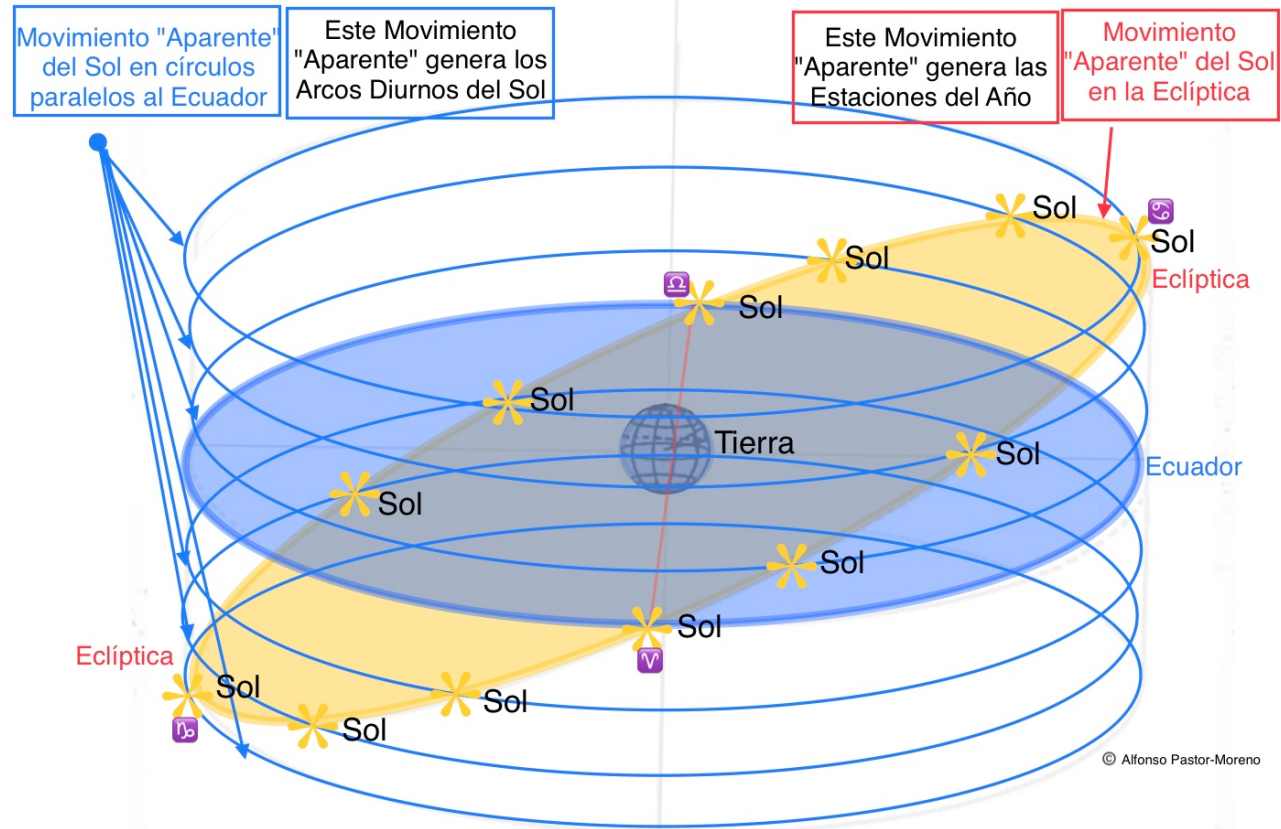
En los Equinoccios la distancia angular "aparente" entre el Sol y el Ecuador Celeste, es decir la Declinación del Sol es de 0° ,

En el Solsticio de Capricornio la distancia angular "aparente" entre el Sol y el Ecuador Celeste, es decir la Declinación del Sol es de $-23,44^\circ$,

La Declinación del Sol, que es mínima en el Solsticio de Capricornio va incrementándose cada día a lo largo del año hasta llegar a su valor máximo en el Solsticio de Cancer.



Trayectoria "Aparente" en Espiral del Sol alrededor de la Tierra



La trayectoria "Aparente" del Sol en la Eclíptica, vista desde la Tierra genera una Espiral "Aparente" del Sol alrededor de la Tierra.

Por cada posición que ocupa el Sol en la Eclíptica, la rotación de la Tierra hace que parezca que el Sol está girando en enormes círculos alrededor de la Tierra, círculos que acaban en donde comienza el siguiente, conformando con ellos una enorme espiral "aparente" del Sol alrededor de la Tierra.

Esos enormes círculos, vistos desde la Tierra son la causa de los llamadas Arcos Diurnos del Sol, que se ven en el Cielo cada día.

La posición en el Cielo de los Arcos Diurnos del Sol, depende de la Latitud del lugar de observación.

El Sol cada día está en un punto diferente de la Eclíptica sobre la que aparentemente se mueve.

La Tierra, al girar con su movimiento de rotación sobre si misma hace parecer que cada punto de la Eclíptica en el que se encuentra el Sol sea el origen de un enorme círculo en el que el Sol "aparentemente" se mueva alrededor de la Tierra.

Vistos desde la Tierra esos inmensos círculos que describe el Sol alrededor de la Tierra, parecen como si el Sol describiera unos arcos en el Cielo sobre el Plano del Horizonte local llamados Arcos Diurnos del Sol, que son paralelos al Ecuador Celeste y que están a una distancia del Ecuador Celeste que depende de la posición "aparente" que ocupa el Sol cada día en la Eclíptica.

Los Arcos Diurnos del Sol son todos paralelos al Ecuador y forman con el Plano del Horizonte local un ángulo complementario del de la Latitud del lugar de observación, al que los antiguos astrónomos llamaban la "Altura de la Equinoccial" del lugar.

En los días de los Equinoccios el Arco Diurno del Sol coincide exactamente con el Ecuador y son los dos únicos días del año en los que el Sol sale exactamente por el Este y se pone por el Oeste.

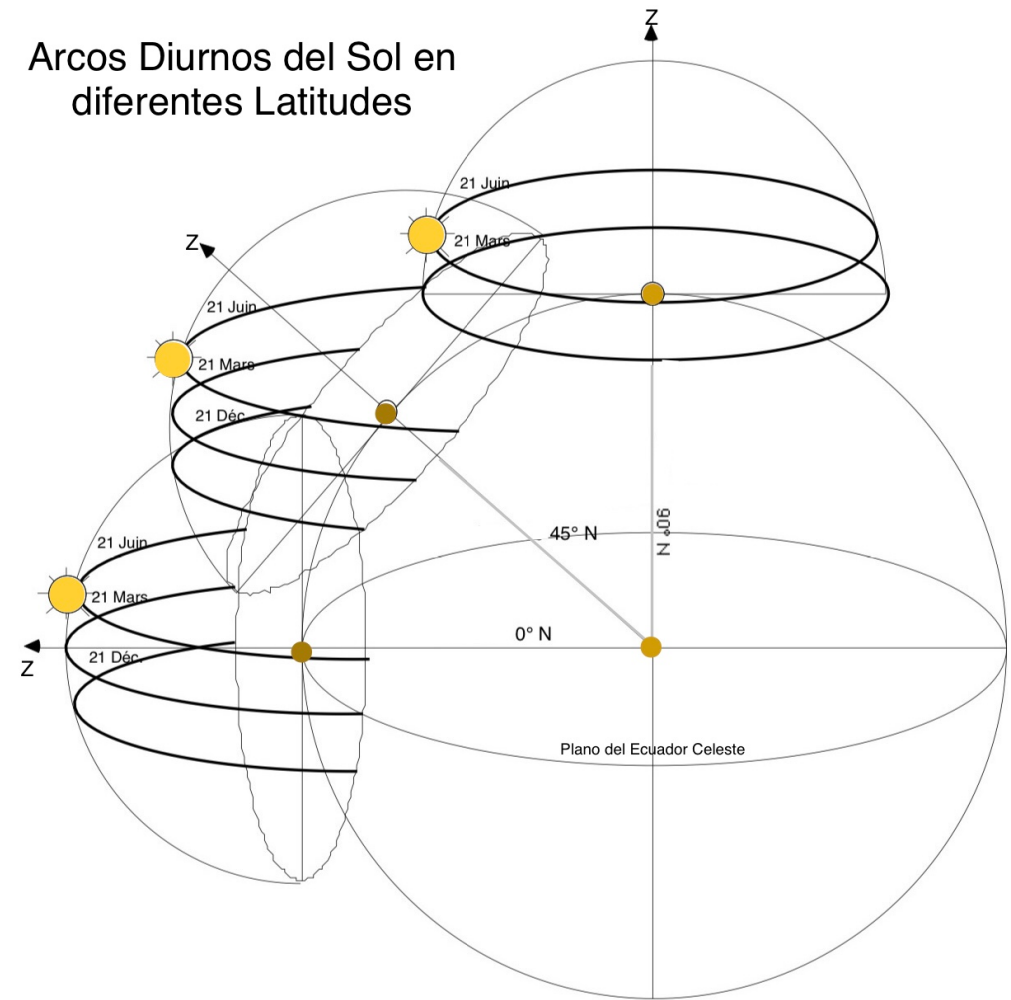
Los demás días del año el Sol sale y se pone en lugares simétricamente opuestos, pero que no están exactamente situados en la línea Este_Oeste.

En los Solsticios los Arcos Diurnos del Sol están a una distancia angular del Ecuador de $\pm 23,44^\circ$. Esa distancia angular varía cada día y es igual a 0° en los Equinoccios, por lo que para una "Altura de la Equinoccial" conocida, conociendo la Declinación del Sol en cada día, será muy fácil determinar por qué lugar del Horizonte saldrá y se pondrá el Sol en cada día.

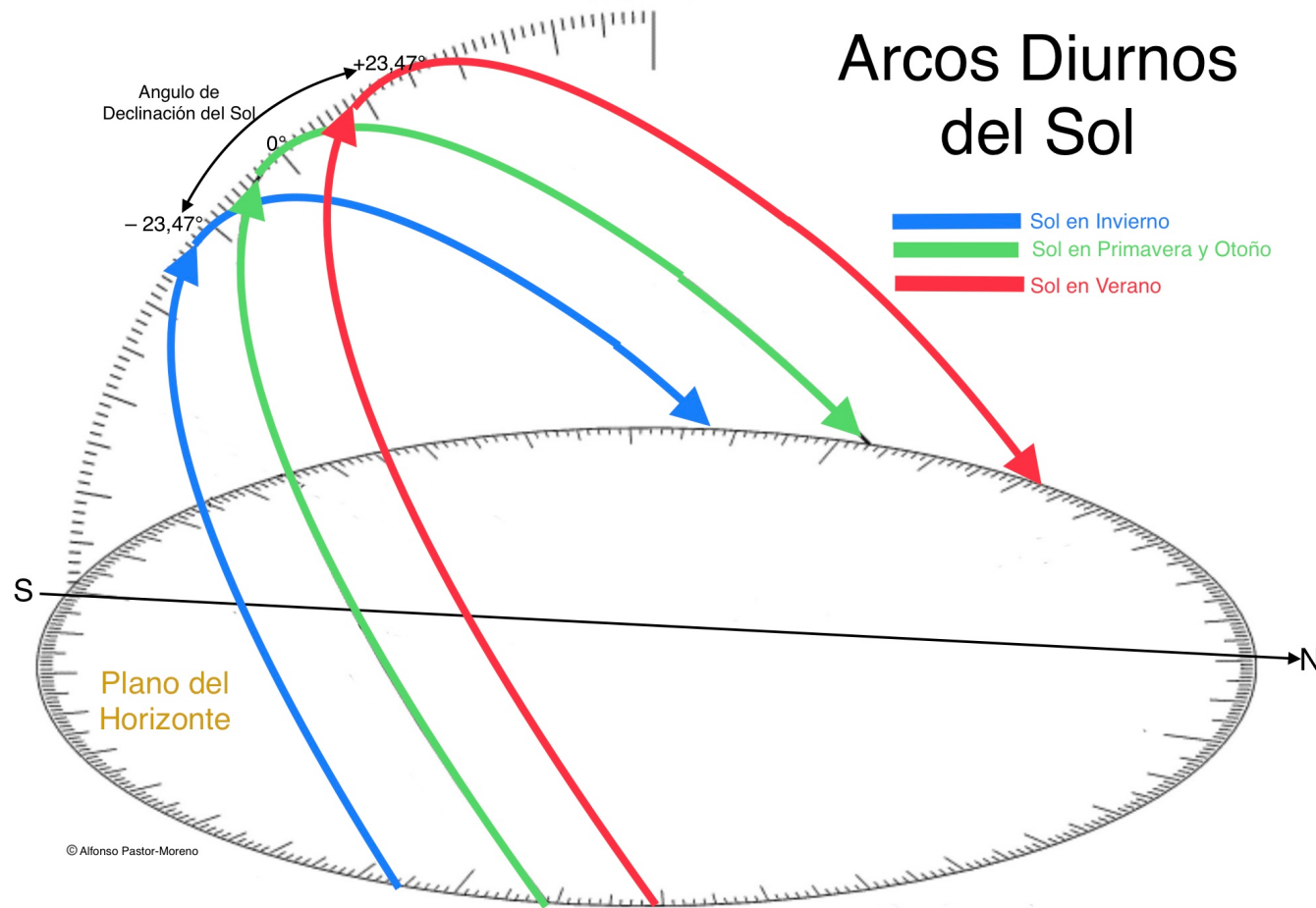
Arcos Diurnos del Sol en diferentes Latitudes

El movimiento de Rotación de la Tierra, hace que el movimiento "Aparente" del Sol en la Eclíptica, visto desde la Tierra, da la "Apariencia" de que el Sol recorre cada día en el Cielo un arco por encima del Plano del Horizonte del observador.

A los arcos que recorre diariamente el Sol sobre el Horizonte local, se les llama los "Arcos Diurnos del Sol" y su inclinación con respecto al Plano del Horizonte depende de la Latitud del lugar de observación, como puede verse en los ejemplos de la figura adjunta.



Ejemplo de Arcos Diurnos del Sol en una Latitud de observación aproximada de 45°N .



La Trayectoria "Aparente" del Sol en Espiral alrededor de la Tierra genera las Estaciones del Año

A lo largo del año, al ir trasladándose la Tierra en su órbita elíptica alrededor del Sol, se va alejando o acercando al Ecuador Celeste, según sea la estación del año.

Ese incremento diario de la distancia entre la Tierra y el Ecuador Celeste produce la impresión de que el Sol, a lo largo del año vaya "aparentemente" recorriendo una enorme espiral en el Cielo, alrededor de la Tierra. Esa Espiral abarca una distancia angular desde el Ecuador Celeste que tiene un valor de entre $\pm 23,44^\circ$ a cada lado del Ecuador.

Eso implica, que los rayos de Sol que inciden sobre la superficie de la Tierra, lo hagan con distintos ángulos a lo largo del año.

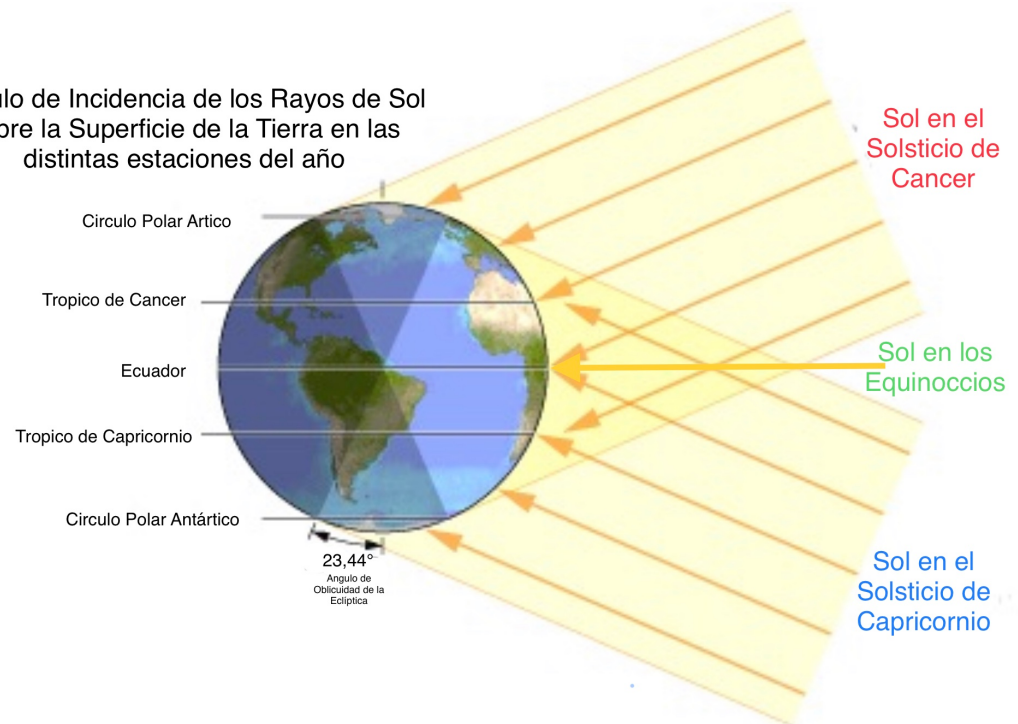
En los días de los Equinoccios el punto de su órbita, en el que está la Tierra, coincide exactamente con el Ecuador Celeste, por lo que ese día los rayos de Sol incidirán perpendicularmente sobre el Ecuador Terrestre. Por lo tanto, en esos dos días el Sol irradiará por igual toda su energía en ambos Hemisferios Norte y Sur y es en esos días cuando comienzan la Primavera y el Otoño.

A lo largo de los demás días del año, los rayos del Sol irán variando su ángulo de incidencia de tal modo que cuando el Sol esté sobre el Trópico de Cancer, iluminará con mayor intensidad el Hemisferio Norte que el Sur, por lo que en esa época del año, será Verano en el Hemisferio Norte e Invierno en el Hemisferio Sur.

Cuando el Sol esté sobre el Trópico de Capricornio, ocurrirá lo contrario, por lo que será Invierno en el Hemisferio Norte y Verano en el Hemisferio Sur.

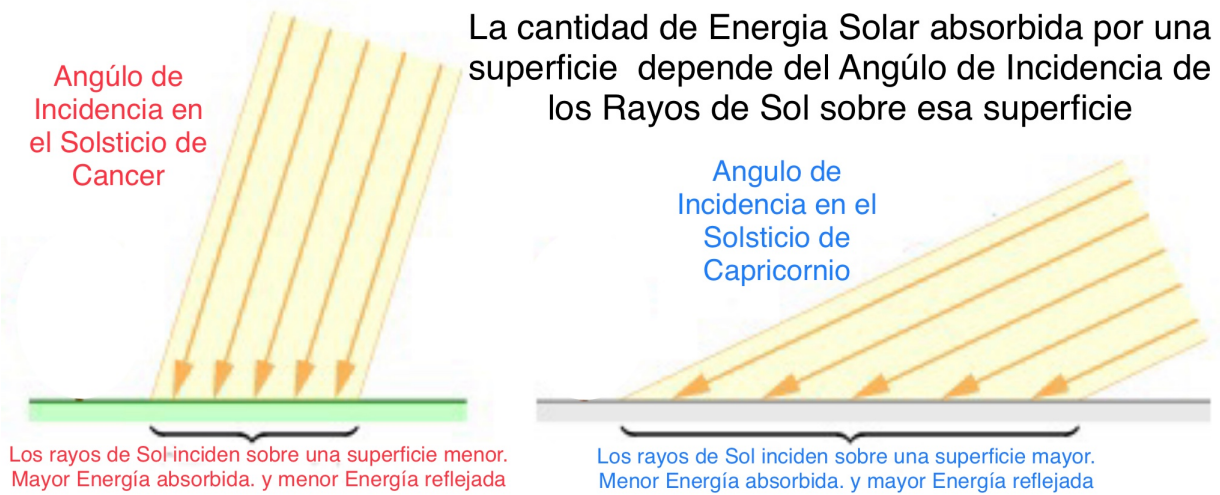
La variación del ángulo con el que inciden los rayos de Sol sobre la superficie de la Tierra genera las diferentes estaciones del año

Ángulo de Incidencia de los Rayos de Sol sobre la Superficie de la Tierra en las distintas estaciones del año



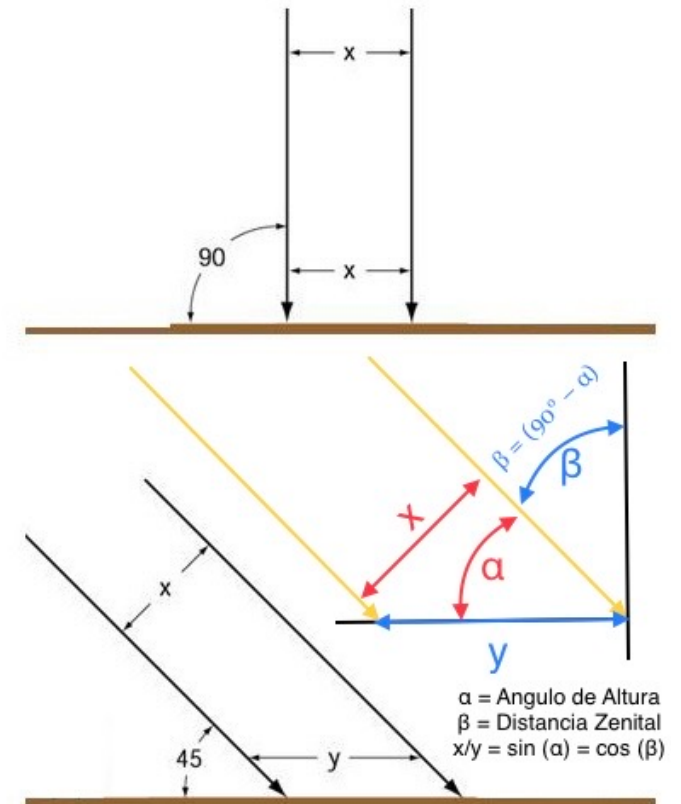
Variación del Ángulo de Incidencia de los rayos del Sol sobre la superficie de la Tierra en las diferentes Estaciones del Año

La variación del ángulo con el que inciden los rayos de Sol sobre la superficie de la Tierra modifica la cantidad de Energía absorbida



Para un misma cantidad de energía emitida por el Sol, dependiendo del área sobre la que incidan sus rayos, la cantidad de Energía absorbida por una superficie, dependerá de la cantidad de Energía recibida por unidad de superficie.

Cuanto mas perpendicularmente incidan los rayos sobre la superficie, el area sobre la que incidan será menor, por lo tanto, habrá mayor cantidad de Energía por unidad de superficie.



La Rotación de la Tierra como Patrón de Tiempo

Tanto si utilizamos al Sol como punto de referencia para medir el Tiempo, como si utilizamos como punto de referencia a una Estrella Fija o un objeto Celeste Fijo, en realidad con lo que estamos midiendo el transcurso del Tiempo es con la Rotación de la Tierra sobre su eje.

El patrón de Tiempo, hasta el advenimiento de los relojes atómicos, fue el Día Sidéreo, que es el intervalo transcurrido entre dos tránsitos consecutivos del Meridiano Local por debajo de una Estrella Fija, aunque lo mas frecuente es utilizar como punto de referencia al Punto Vernal o Punto Aries, en lugar de una Estrella Fija.

Todos los Días Sidéreos del año tienen la misma duración. sin embargo, no ocurre lo mismo con los Días Solares, que tienen una duración distinta en cada día año, Es por ello, que como Patrón para medir el Tiempo se utilizaron los Días Sidéreos en lugar de los Dias Solares.

La diferencia entre el Día Solar y el Día Sidéreo y el porque de esa diferencia la explicaremos en las paginas siguientes.

La diferencia entre los Días Solares y los Días Sidéreos

De la traslación de la Tierra en su orbita Elíptica alrededor del Sol, a lo largo del Año derivan las distintas estaciones del año.

De la rotación de la Tierra sobre su propio eje derivan el Día Sidéreo y el Día Solar.

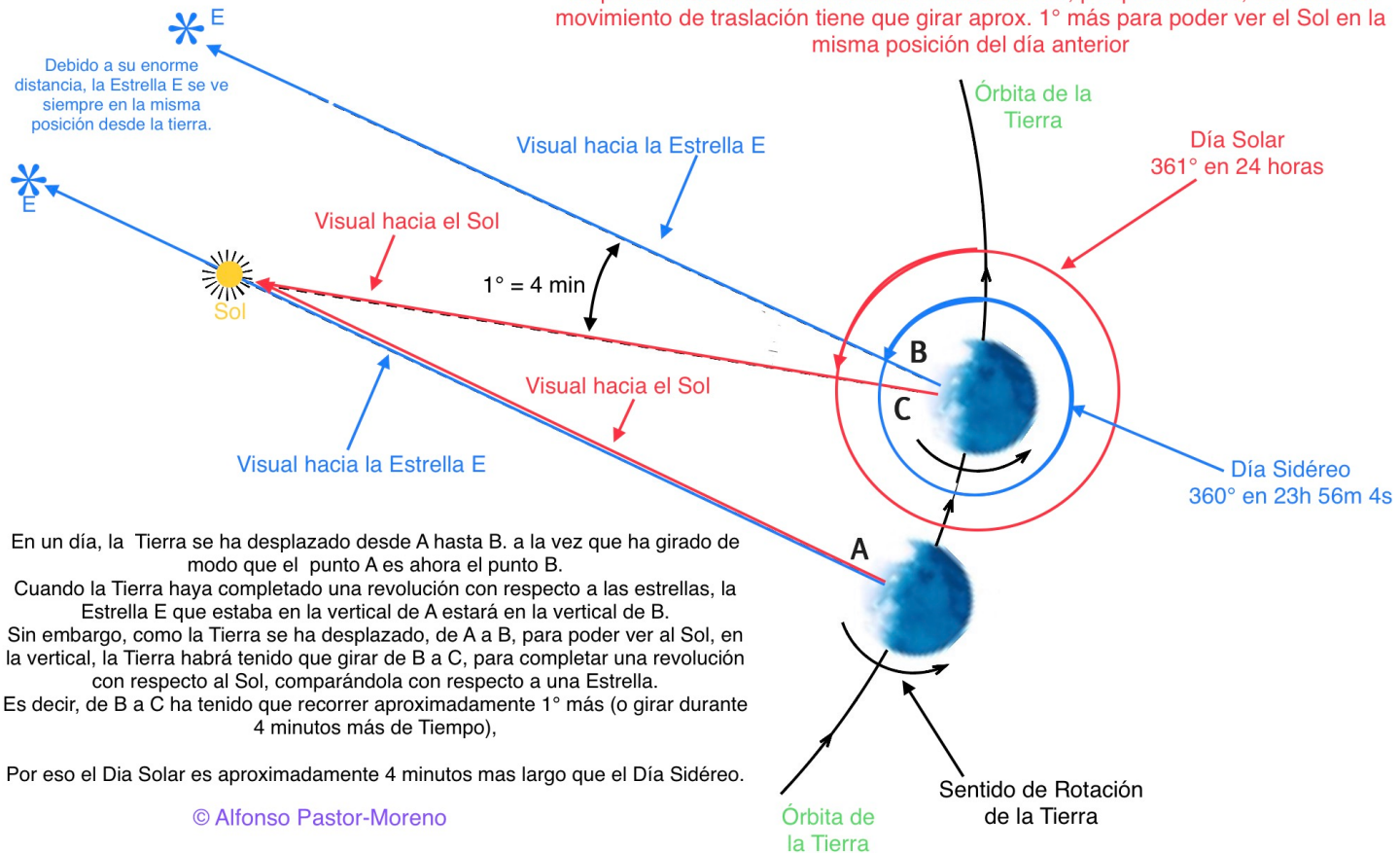
Un observador situado en la superficie de la Tierra, que vea pasar por encima de su Meridiano Local, una Estrella Fija, deberá esperar a que la Tierra haya realizado un giro completo de 360° sobre si misma, para poder verla otra vez esa misma Estrella Fija sobre su Meridiano Local. El periodo de Tiempo transcurrido para que la Tierra haya girado esos 360° entre un Transito y el siguiente Transito de una misma Estrella Fija sobre el Meridiano Local del observador, es un Día Sidéreo, que tiene una duración constante a lo largo de todo el año de: 23 horas 56 minutos y 4 segundos.

Debido a que las estrellas están a una distancia enorme, para poder ver esa Estrella pasar dos veces por encima del mismo Meridiano, la Tierra ha hecho un giro de 360° , sin embargo, debido a que la Tierra además de girar se traslada con respecto al Sol y el Sol está mucho mas próximo a la Tierra que las estrellas, para poder ver dos tránsitos consecutivos del Sol por encima de un mismo Meridiano, la Tierra deberá de realizar un giro de 361° sobre su propio eje. El periodo de Tiempo transcurrido entre dos tránsitos del Sol sobre el Meridiano Local del observador es un Día Solar Verdadero, que tiene una duración media aproximada de 24 horas, pero esa duración no es constante a lo largo de todo el año, si no que depende de cada estación.

Considerando que la duración del Día Sidéreo es de 23 horas 56 minutos, la Tierra, por lo tanto, gira a razón de:
 $360^\circ / 23.933333333333 \text{ h} = 15.041782729805^\circ$ por cada hora.

La razón por la cual el Día Sidéreo, tiene menor duración que el Día Solar podemos verla en el diagrama de la pagina siguiente.

Comparación entre: Día Sidéreo y Día Solar



La duración desigual de los Días Solares a lo largo del año.

La razón de la diferente duración del Día Solar a lo largo del año, es debida a que a la velocidad de la Tierra al recorrer su Órbita no es constante, sino que va variando con arreglo a su distancia al Sol.

Esto es debido a que la Órbita de la Tierra alrededor del Sol, no es circular, sino elíptica, por lo que según la 2ª Ley de Kepler: "La Tierra, al recorrer una órbita elíptica, barre áreas iguales en tiempos iguales".

Para recorrer áreas iguales en tiempos iguales, la Tierra deberá moverse a distintas velocidades a lo largo del año, según sea su proximidad al Sol. Al ir aproximándose al Perihelio, que está en la Zona del Solsticio de Capricornio, la Tierra se va acelerando. Cuando llega al Solsticio se queda quieta y luego vuelve a acelerarse otra vez (Solsticio significa Sol quieto). Al ir alejándose la Tierra del Sol, ocurre lo contrario, cuanto más se aleja, es decir, cuando más se aproxima al Afelio, que está en la Zona del Solsticio de Cáncer, se va moviendo mucho más despacio. Cuando llega al Solsticio se queda quieta y luego vuelve a acelerarse otra vez, pero nunca llega a tener la velocidad que adquirió cerca del Perihelio.

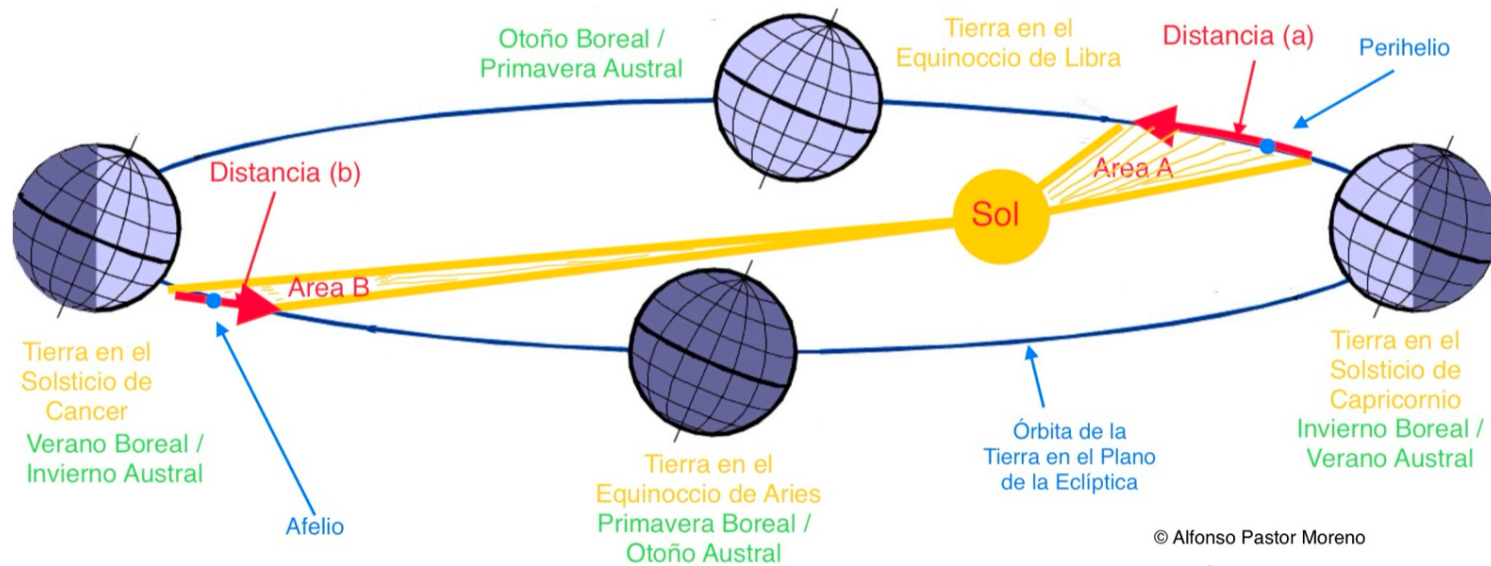
Es por ello, que los días se acortan muy deprisa cerca de Capricornio (entre Diciembre y Enero) y se van alargando muy despacio cerca de Cáncer (entre Junio y Julio).

Veamos la explicación de la causa de ello en el esquema de la página siguiente.

El Movimiento de la Tierra en su Órbita Elíptica alrededor del Sol

Según la segunda ley de Kepler: El vector que une a la Tierra con el Sol, cuando la Tierra recorre su Órbita Elíptica alrededor del Sol, barre Áreas iguales en Tiempos iguales.

En un mismo tiempo (T), cuando la Tierra está próxima al Perihelio, barre el área (A) y recorre la distancia (a).
Cuando está próxima al Afelio, barre el área (B) y recorre la distancia (b).
Aunque las áreas (A) y (B) son iguales, la distancia (a) es mucho mayor que la (b), por lo que la Tierra, para recorrer la distancia (a) en el mismo tiempo (T) que la distancia (b), deberá moverse a mucha más velocidad.



Como consecuencia de la Segunda ley de Kepler, cuando la Tierra está próxima al Perihelio, se mueve a mucha más velocidad que cuando está próxima al Afelio. Lo cual producirá la "aparencia" de que el Sol se mueve "aparentemente" más deprisa. Por lo tanto, cuando la Tierra esté en la época del Solsticio de Capricornio, los días se acortarán mucho más deprisa, que cuando esté próxima al Solsticio de Cancer o cuando esté próxima a los Equinoccios.

El Sol Verdadero y el Sol Medio

La constatación de la diferencia que hay en el intervalo de tiempo que transcurre entre un Mediodía Solar y el siguiente, puso en evidencia que la duración del Día Solar Verdadero no es constante a lo largo del año, lo cual representó un grave inconveniente para poder establecer el Día Solar Verdadero como patrón para medir el Tiempo.

Para subsanar ese inconveniente, los astrónomos de la Antigüedad inventaron una entelequia a la que llamaron el "Sol Medio", que es un Sol imaginario que "aparentemente" se mueve a una velocidad constante durante todo el año.

De esto nos resulta:

- a).- El **Sol Verdadero**, que es el que vemos desde la Tierra, y que "aparentemente" se mueve de forma **irregular** a lo largo del año.
- b).- El **Sol Medio**, que no vemos, porque es una entelequia, y que "aparentemente" se mueve de forma **regular** a lo largo del año.

La diferencia entre el Tiempo en el que el Sol Verdadero pasa por encima del Meridiano local y tiempo en el que debería de pasar, según el Sol Medio, viene dada por la Ecuación de Tiempo, (EoT), que explicaremos más extensamente en la siguiente pagina.

La Ecuación de Tiempo relaciona el Sol Verdadero y el Sol Medio

A lo largo del año el Sol Verdadero, se adelanta o se atrasa respecto del Sol Medio, con arreglo a la llamada Ecuación de Tiempo (EoT)

Las diferencias entre Sol Verdadero y Sol Medio, oscilan entre un adelanto de más de 16 minutos en Noviembre, a un atraso de casi 15 minutos en Febrero.

Cuando el Meridiano Local del Observador pasa por debajo del Sol Verdadero son las 12 horas del Mediodía de Tiempo Solar Verdadero.

Sin embargo, el Meridiano Local del Observador no siempre pasa por debajo del Sol Verdadero, exactamente a las 12:00 h de Tiempo Solar Medio, por lo que el Mediodía de Tiempo Solar Verdadero y el Mediodía de Tiempo Solar Medio, en la mayoría de los días del año no ocurren al mismo tiempo.

Unos días del año el Sol Verdadero está Adelantado con respecto al Sol Medio, por lo que el Mediodía Solar Verdadero (es decir, el tránsito del Meridiano Local por debajo del Sol Verdadero), ocurre antes de la hora del Mediodía Solar Medio.

Otros días del año, el Sol Verdadero está Retrasado con respecto al Sol Medio, por lo que el Mediodía Solar Verdadero, ocurre después de la hora del Mediodía Solar Medio.

Si a lo largo del año se registra la posición del Sol Verdadero en el Cielo todos los días a la misma hora de Tiempo Solar Medio, vemos que las posiciones consecutivas del Sol Verdadero, van conformando en el Cielo una curva en forma de ocho (llamada Lemniscata Solar)), en la que las distancias en tiempo entre la posición del Sol en el Cielo y el Meridiano Local, se corresponden con la Ecuación de Tiempo.

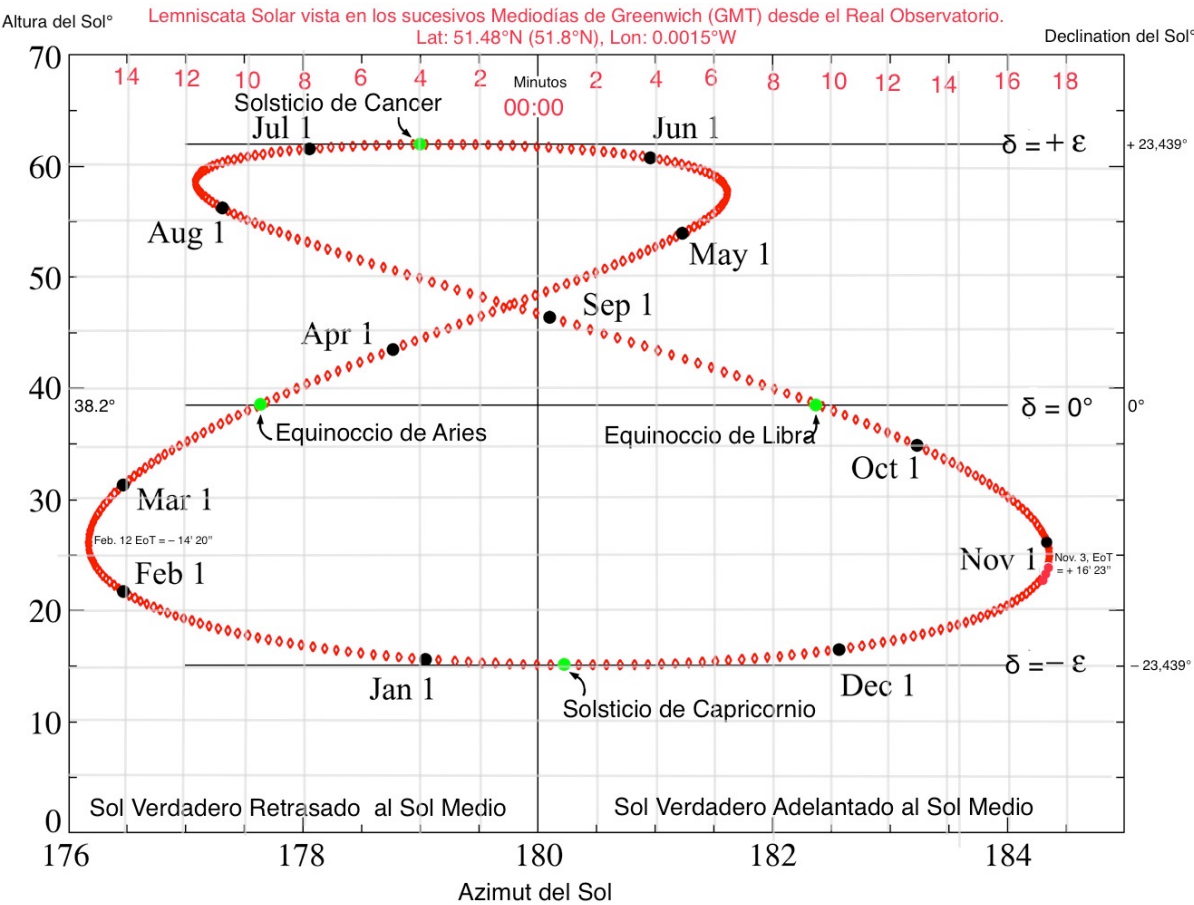
Podemos ver una idealización de una Lemniscata Solar de Ecuación de Tiempo en el diagrama de la página siguiente.

La Lemniscata Solar de la Ecuación de Tiempo, con las diferencias entre el Sol Verdadero y el Sol Medio

Aquí vemos una Lemniscata Solar mostrando las diferencias entre la hora de tránsito del Sol Verdadero por el Meridiano Local, y la del Sol Medio, que responden a la Ecuación de Tiempo,

La figura representa una Lemniscata Solar trazada a partir de las Coordenadas Horizontales del Sol, calculadas por computador, para todos los días del año 2006, a las 12:00 del mediodía UTC en el Cielo local del Real Observatorio de Greenwich.
(Latitud 51,4791° N, Longitud 0°),

El eje horizontal muestra el ángulo de Azimut del Sol en grados (los 180° apuntan al Sur) .
El eje vertical muestra a la Izquierda la Altura del Sol sobre el Horizonte en grados y a la Derecha la Declinación del Sol δ en grados.
El primer día de cada mes se indica con un punto negro y los puntos verdes muestran los días de los Solsticios y de los Equinoccios.
Se puede ver que:
Los Equinoccios ocurren a una Altura del Sol sobre el Horizonte de: 38,5209.
Puesto que esos días la Declinación del Sol $\delta = 0^\circ$,
la Latitud del lugar = $90^\circ - 38,5209 = 51,4791^\circ$
Los Solsticios ocurren en las Declinaciones del Sol $\delta = \pm \epsilon = \pm 23,439^\circ$
donde ϵ = Oblicuidad de la Eclíptica = $23,439^\circ$.



The copyright holder of this image, releases it into the [public domain](#). This applies worldwide..

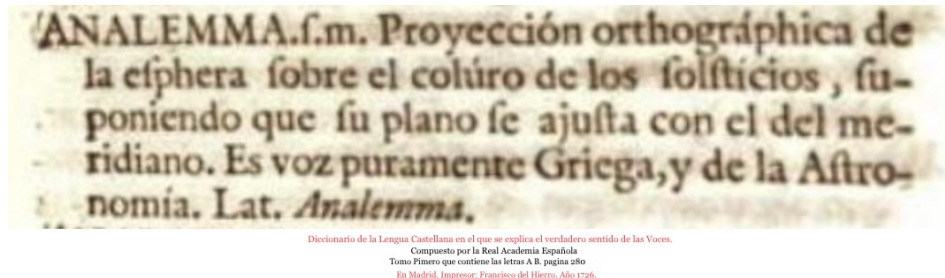
¿ Analemma ?

A la Lemniscata Solar mostrada en la pagina anterior muchos autores le llaman Analemma, error que se ha ido difundiendo en todos los ámbitos y que ahora, por lo extendido, es ya muy difícil de erradicar.

Sin embargo, autores de incuestionable erudición como Neugebauer, en su Historia de las Matemáticas, dejan bien claro que la palabra Analemma era utilizada por los antiguos griegos no para designar una curva, si no para designar un procedimiento Geométrico, que ilustraba algún teorema o proposición. La palabra Analemma viene del griego y está compuesta de: *ana*, sobre, o relativo a, y *lemma*, postulado, o proposición)

Nosotros, para salir de dudas, hemos consultado el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española y en su edición actual no consta ese vocablo, sin embargo, si que consta una entrada como **Analemma** en la edición del año 1726 conocida como "**Diccionario de Autoridades**", en donde figura la entrada que adjuntamos aquí.

Entrada correspondiente al vocablo **Analemma** en el llamado "**Diccionario de Autoridades**" de la Real Academia Española de la Lengua del año 1726



Diccionario de la Lengua Castellana en el que se explica el verdadero sentido de las Voces. Compuesto por la Real Academia Española. Tomo Primero, que contiene las letras A y B. pagina 200
En Madrid. Impresor: Francisco del Fierro. año 1726.

Por lo que queda bien claro, que *Analemma* no es el nombre de una curva, si no el nombre de un *procedimiento geométrico* por el que se obtiene una figura geométrica. En el caso que indica el Diccionario, con la proyección ortográfica de la Esfera Celeste se obtiene la figura llamada el Analemma de Vitruvio y Ptolomeo, que nada tiene que ver con una curva Lemniscata (Curva en forma de ocho).

El Gnomon, el elemento fundamental de los Relojes de Sol.

Al elemento erecto que se utiliza con el fin de medir la sombra proyectada por el Sol, se le llama **Gnomon**, que es lo que da nombre a la **Gnomónica**, o Ciencia que enseña el modo de calcular y trazar los Relojes de Sol.

Por medio de la sombra que proyecta un **Gnomon**, se pueden determinar:

- a).- La Altura del Sol, con la que se puede determinar tanto la Hora Solar como la fecha del día de la observación,
- b).- El ángulo de dirección de la sombra con respecto a la Línea Norte_Sur o Línea Meridiana, lo cual permite calcular el Azimut del Sol, con el que también se puede determinar la hora del instante de la observación.

La Altura del Sol sobre el Horizonte es función de la Declinación del Sol, y por lo tanto de la fecha del día de la observación.

El ángulo de dirección de la sombra con respecto a la Línea Norte_Sur o Línea Meridiana, es función del Ángulo de Azimut del Sol, por lo tanto, conociendo dicho ángulo también podremos determinar la hora en el instante de la observación.

Un **Gnomon** puede estar situado verticalmente y proyectar su sombra sobre un Plano Horizontal, o puede estar situado horizontalmente y proyectar su sombra sobre un Plano Vertical.

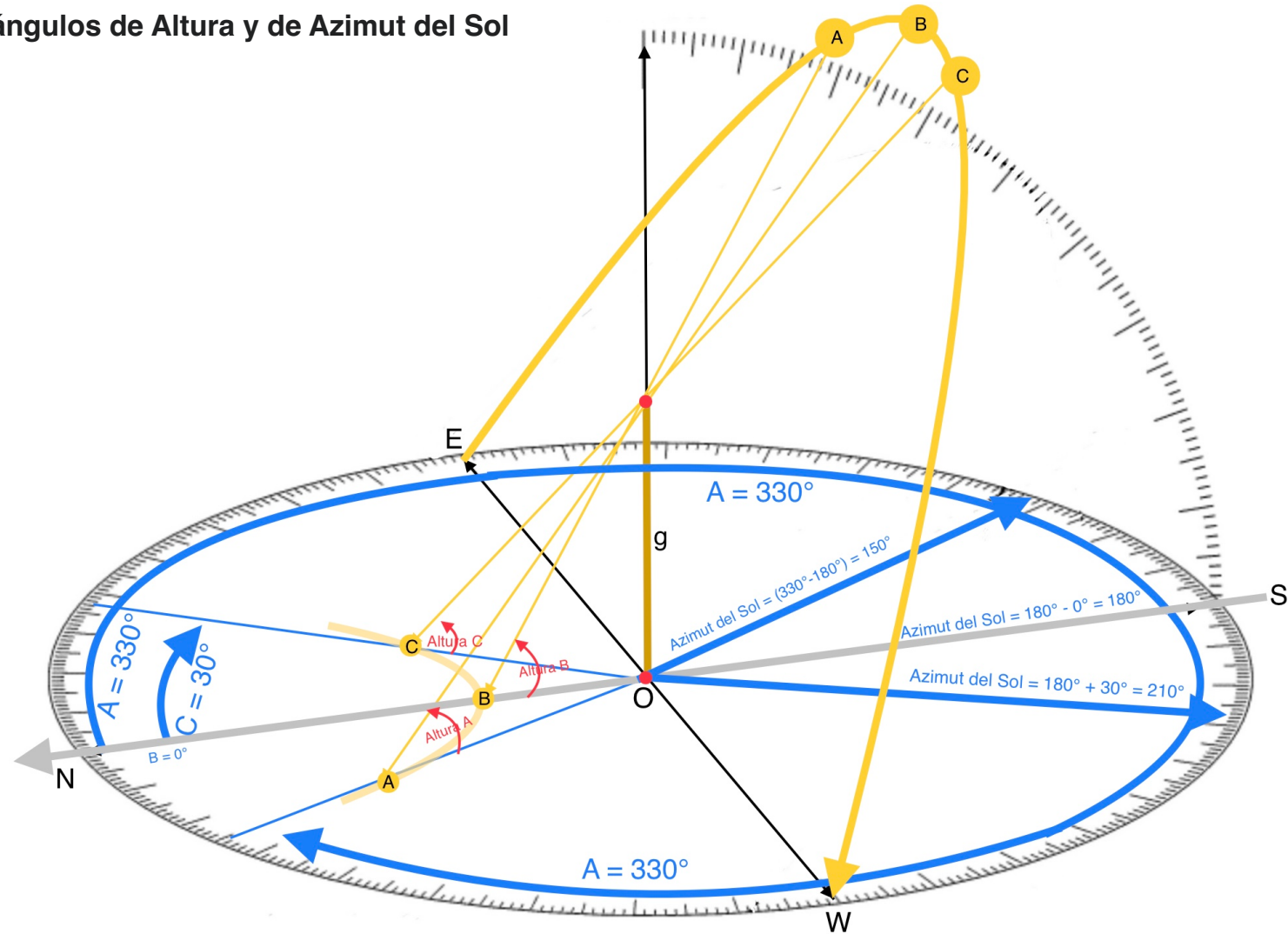
Un Gnomon puede proyectar los ángulos de Altura y de Azimut del Sol

En esta figura de ejemplo para tres posiciones "aparentes" del Sol en el Cielo, podemos ver como un Gnomon (g), además de proyectar el ángulo de la **Altura del Sol**, (en rojo), puede asimismo proyectar el **Azimut del Sol** (en azul).

El Azimut del Sol depende del Circulo Horario en el que está el Sol en un instante dado. Como un Circulo Horario completo tiene 24 horas y abarca 360° , a cada hora le corresponden 15° .

De ese modo, proyectando sobre un plano en el círculo del Ecuador Celeste, dividido en 24 sectores de 15° cada uno, tendremos que para un Azimut del Sol de 180° la sombra del Gnomon apuntará al Norte, indicando así las 12 horas. Como a cada hora le corresponden 15° en el Círculo del Ecuador, con la proyección sobre un plano del Círculo del Ecuador Celeste podremos determinar fácilmente cuantas horas hace que ha pasado el Sol por el Meridiano Local, o cuantas horas le faltarán para pasar.

Construyendo de ese modo un **Reloj de Sol de Azimut**.



Un Gnomon proyectando el ángulo de la Altura del Sol

Un Gnomon de longitud (g), que proyecta una sombra de longitud (L), que nos indica la **Altura del Sol** en un instante dado.

El Gnomon (g):

- 1).- puede estar situado verticalmente y proyectar su sombra (L) sobre un Plano Horizontal,
- 2).- puede estar situado horizontalmente (g) y proyectar su sombra (L) sobre un Plano Vertical.

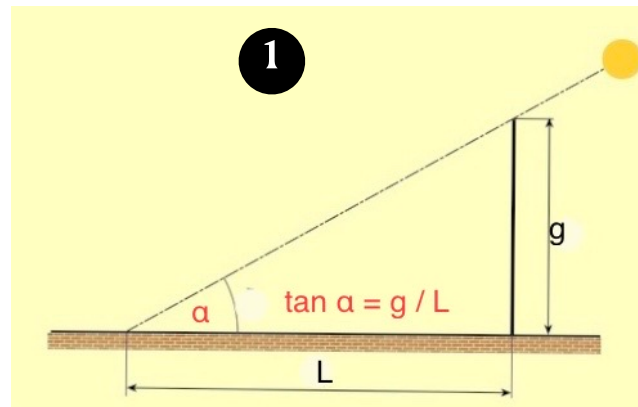
Por lo tanto, conociendo cual debe ser la Altura del Sol en un instante determinado del día, podremos saber cual es la hora en ese instante.

Sabiendo que la máxima Altura sobre el Horizonte la alcanza el Sol en el Mediodía Solar, es decir a las 12 de Hora Solar, partir de esa hora podremos determinar las siguientes.

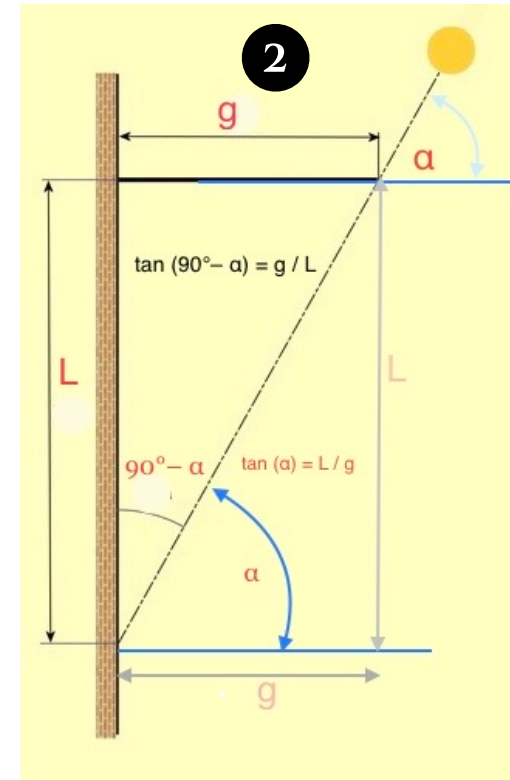
Los Relojes de Sol que indican la hora basándose en la Altura del Sol sobre el Horizonte, son los llamados **Relojes de Sol de Altura**.

Un Gnomon no tiene que estar necesariamente situado perpendicularmente a un plano, si no que puede estar inclinado con respecto al plano. En ese caso, la longitud (g) del Gnomon se mide desde un determinado punto del Gnomon perpendicularmente al Plano.

Gnomon Vertical (1) y Gnomon Horizontal (2) proyectando su sombra sobre un Plano



Gnomon Vertical proyectando su sombra sobre un Plano Horizontal.



Gnomon Horizontal proyectando su sombra sobre un Plano Vertical.

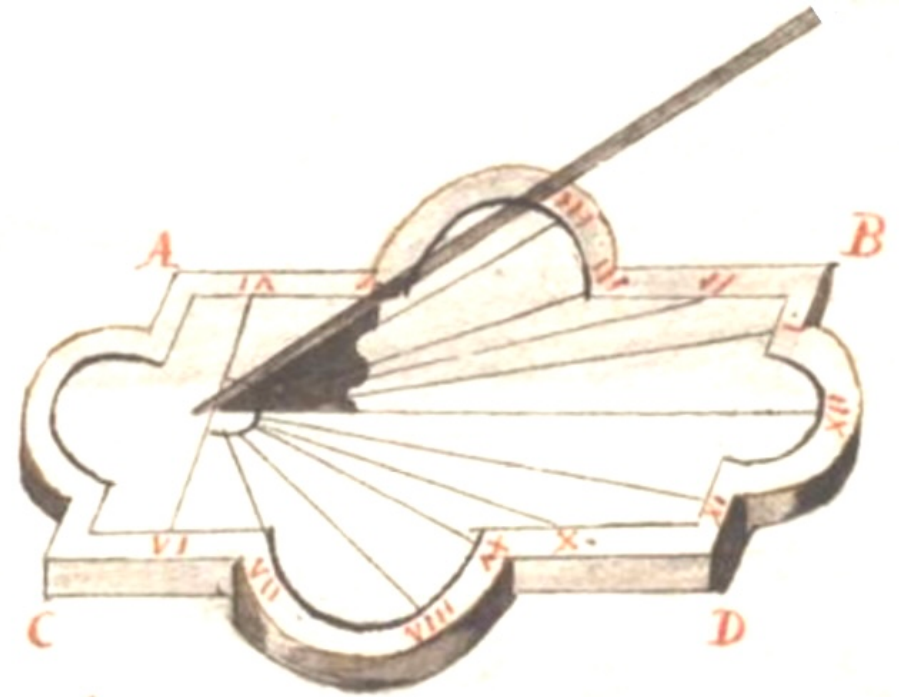
El complemento de un Gnomon es un Dial o Esfera con las divisiones adecuadas para medir los ángulos de la sombra del Sol

El complemento de un Gnomon, para indicar el paso del Tiempo de forma cuantitativa, es un dial graduado, con una graduación adecuada para poder medir de manera precisa el desplazamiento de la sombra que proyecte el Gnomon, para indicar con ese desplazamiento el paso del Tiempo.

El conjunto formado por un Gnomon y un dial graduado, es lo que conforma un Reloj de Sol.

Vemos por tanto, que los Reloj de Sol pueden indicar la Hora Solar, basándose en la Altura del Sol sobre el Horizonte, o bien basándose en la distancia angular entre la dirección del Sol y la línea Norte_Sur Local, o "Línea Meridiana", esa distancia angular es el Azimut del Sol.

El utilizar la Altura del Sol o su Azimut, genera dos grandes grupos de tipos de Reloj de Sol. Los ***Reloj de Sol de Altura*** y los ***Reloj de Sol de Azimut***.



Reloj de Sol Horizontal de Azimut calculado para la Latitud de Sevilla.
Imagen del manuscrito de Nicolas Ortiz, MSS/17506 (bdh0000242819)
Pagina 150, figura 87.
Biblioteca Nacional de España.

Los distintos grupos de Relojes de Sol

Según que el transcurso del Tiempo se mida por medio del Azimut del Sol, o por medio de la Altura del Sol sobre el Horizonte, existen dos grandes grupos de Relojes de Sol, los Relojes de Sol de Altura y los Relojes de Sol de Azimut.

Los **Relojes de Sol de Altura**, indican la hora por medio de la longitud de la sombra que proyecta un Gnomon sobre un Plano, ya que la longitud de esta sombra, es función del ángulo de la Altura del Sol sobre el Horizonte, y esta depende de la Latitud del lugar de observación y de la Declinación del Sol en ese día.

Los **Relojes de Sol de Azimut**, indican la hora por el ángulo de Azimut que tiene el Sol en un instante dado.

Ambos tipos de Relojes necesitan una **Línea de Referencia Local**, que sirve para situar de manera correcta el Reloj en donde se vaya a utilizar.

La **Línea de Referencia Local de los Relojes de Sol de Altura** es la **Vertical del Lugar**, que es muy fácil de obtener ya que es la línea que indica una plomada. El ángulo de inclinación que forma la Vertical del Lugar con el Eje de la Tierra es función de la Latitud del lugar.

La **Línea de Referencia Local de los Relojes de Sol de Azimut**, es es la **Línea Norte_Sur**, también llamada **Línea Meridiana Local**,

Esta línea de referencia es mucho más complicada de obtener que la los Relojes de Altura, ya que que apunta al Norte Verdadero llamado también Norte Geográfico, que no es el que indican las brújulas, que indican el Norte Magnético, que rara vez coincide exactamente con el Norte Geográfico. Si se conoce la corrección por la declinación magnética del lugar, y se le aplica a la lectura de una brújula, se puede determinar correctamente el Norte Verdadero con la brújula, si embargo, existen métodos para determinarlo sin necesidad de brújula.

La determinación exacta de la dirección del Norte Verdadero es muy importante en los Relojes de Sol de Azimut, puesto que para poder indicar la hora con precisión deben de estar perfectamente orientados con la Línea Norte_Sur, o Línea Meridiana Local. Por lo tanto, para construir un Reloj de Sol de Azimut, lo primero que se necesita hacer es trazar con exactitud la Línea Meridiana Local.

Relojes de Sol

Construcción

Determinación de los datos previos necesarios para
construir un Reloj de Sol

Determinación de la Latitud (φ) del lugar de observación. 1ª Parte

Desde la época de la Grecia Clásica, los astrónomos han medido la Latitud de un lugar fundamentalmente de dos modos:

Durante la Noche, midiendo la Altura sobre el Horizonte de la Estrella Polar, obteniendo con ello la "Altura del Polo", que tiene un valor muy aproximado al de la Latitud del lugar de observación, que aunque no sea exactamente la Latitud, aplicando las correcciones correspondientes, se puede obtener con esa medida la Latitud.

Durante el Día midiendo la Altura del Sol sobre el Horizonte, de la cual por medio de un sencillo calculo se puede obtener la Latitud del lugar de observación.

El fundamento de este ultimo método es el siguiente: A largo del día conforme el Sol va recorriendo su Arco Diurno, su Altura (α) sobre el Horizonte va variando. En cada día del año el Sol alcanza su Altura máxima sobre el Horizonte en el instante de su Mediodía Solar. La Altura (α) que alcanza el Sol en un día determinado del año en el instante de su Mediodía Solar es función de dos parámetros: la Latitud del lugar de observación y la Declinación del Sol en ese día. Con una ecuación que relacione esos tres parámetros, conociendo dos de sus términos, podremos deducir el tercero.

Por lo tanto, si en el Mediodía Solar de un día determinado medimos la Altura del Sol sobre el Horizonte local, conociendo la Declinación del Sol en ese día, podremos deducir la Latitud Geográfica del lugar de observación.

La ecuación que relaciona la Altura (α) del Sol Sobre el Horizonte con la Latitud (φ) y con la Declinación (δ) del Sol, es la siguiente:

$$\alpha = (90^\circ - \varphi) \pm \delta$$

Siendo:

φ La Latitud

α La Altura del Sol.

δ La Declinación del Sol.

La ecuación anterior, podemos también referirla a la distancia del Sol al Zenit (z), que es el complemento de la Declinación del Sol en ese día;

$$z = (90^\circ \pm \delta).$$

Siendo z la distancia del Sol al Zenit, o distancia angular entre una visual al Sol y la Vertical del lugar, o línea de plomada.

La Altura (α) del Sol sobre el Horizonte se podía antiguamente medir fácilmente con diversos instrumentos, como por ejemplo, con un Cuadrado de Sombras, con un Astrolabio Náutico, con un Cuadrante de Alturas. Hoy en día, el instrumento más adecuado para medir la Altura (α) del Sol sobre el Horizonte es un Sextante, del cual, su descripción y utilización se apartan mucho del objeto de nuestro trabajo, pero podrá aprenderse fácilmente en cualquier tratado de Náutica.

La Relación entre la Altura del Sol a Mediodía y la Declinación, para una Latitud (φ) del Hemisferio Norte se puede ver esquematizada en el gráfico de la página siguiente.

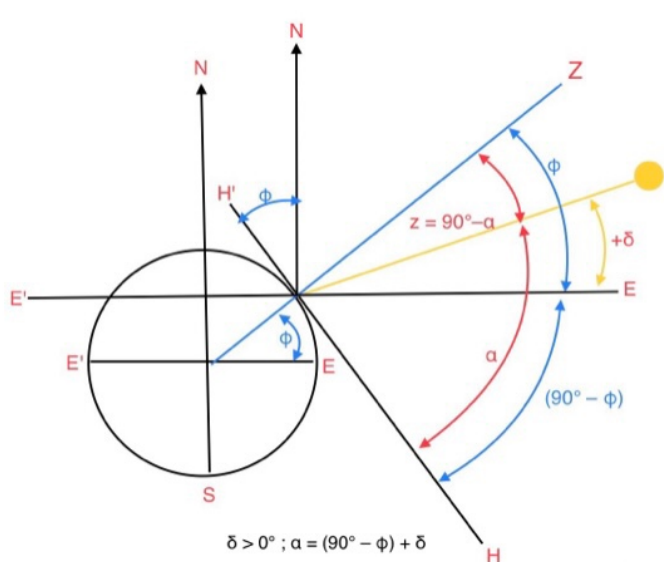
Determinación de la Latitud (ϕ) del lugar de observación. 2ª Parte

Como el ángulo de la Altura (α) del Sol sobre el Horizonte depende de la Declinación (δ) del Sol en cada día del año, tendremos 3 casos posibles:

- 1.-) Declinación del Sol $\delta > 0^\circ$: $\alpha = (90^\circ - \phi) + \delta$
- 2.-) Declinación del Sol $\delta = 0^\circ$; $\alpha = (90^\circ - \phi)$
- 3.-) Declinación del Sol $\delta < 0^\circ$; $\alpha = (90^\circ - \phi) - \delta$

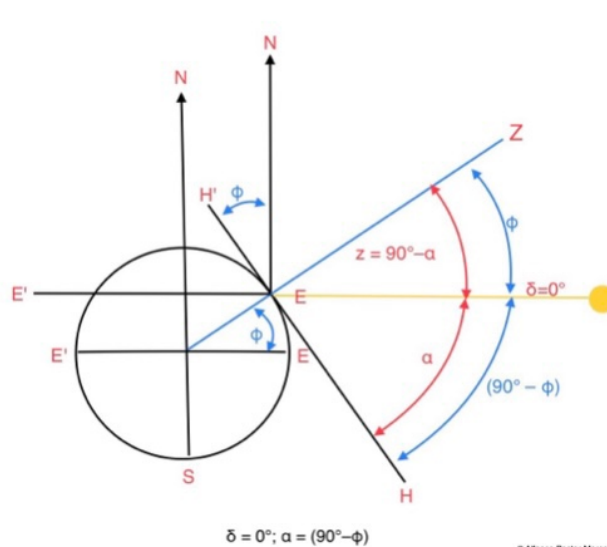
Dependiendo de la Declinación (δ) del Sol en el día de la observación, en cada uno de los casos tendremos que la Latitud (ϕ) será:

Caso 1. $\delta > 0^\circ$; $\phi = 90^\circ - (\alpha - \delta)$. Caso 2. $\delta = 0^\circ$; $\phi = (90^\circ - \alpha)$. Caso 3. $\delta < 0^\circ$; $\phi = 90^\circ - (\alpha + (-\delta))$. (Véase la figura)



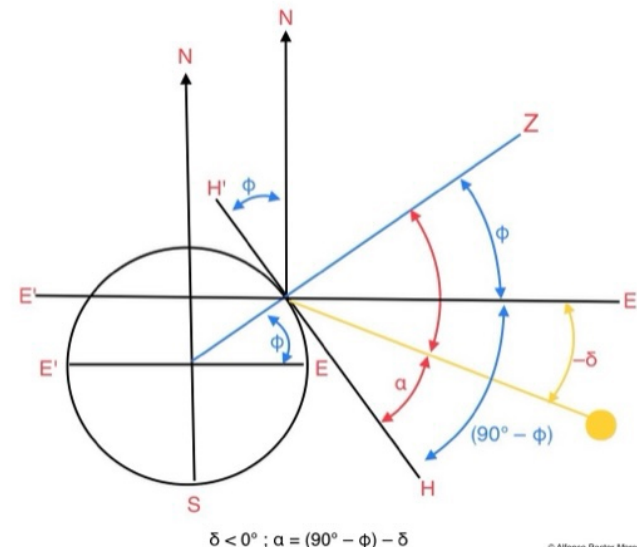
1

Alfonso Pastor Moreno Enero 2023



2

Relojes de Sol Fundamento y Construcción



3

43

Determinación de la Línea Meridiana Local

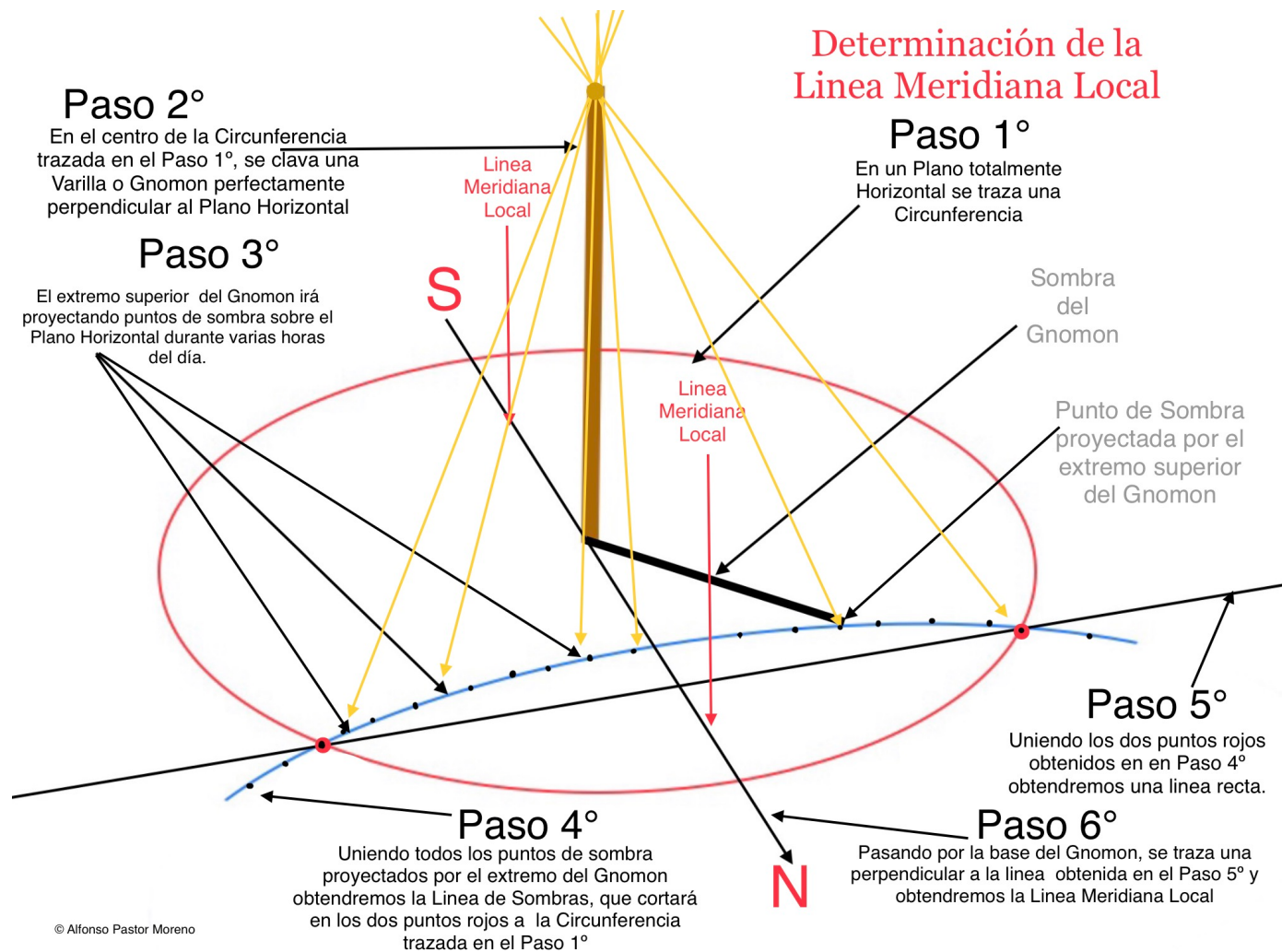
Existen diversos métodos, unos mas elaborados que otros, para trazar de modo mas o menos exacto la "Línea Meridiana Local"

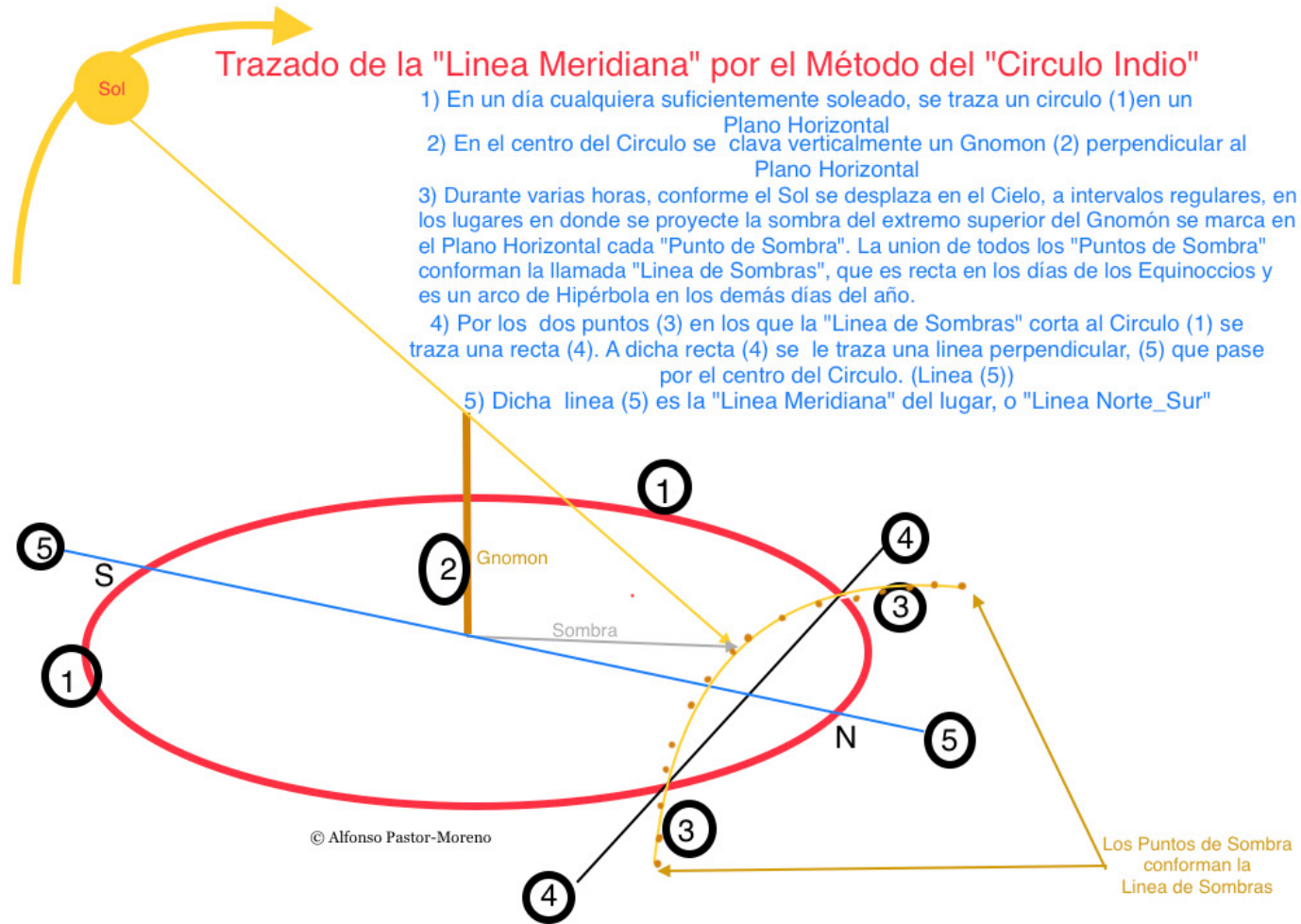
Todos están basados en el mismo principio: El ángulo de Azimut del Sol es el ángulo suplementario del de su sombra, de tal modo que:

$$\text{Azimut del Sol} = (\text{Angulo de Sombra} + 180^\circ)$$

Por lo tanto, cuando el Sol proyecte su sombra con un Azimut de 0° , estará situado justo en el Sur con un Azimut de 180°

En la figura siguiente se, explica un método simple, llamado el Método del "Circulo Indio", que era ya conocido por los constructores de las pirámides del Antiguo Egipto.



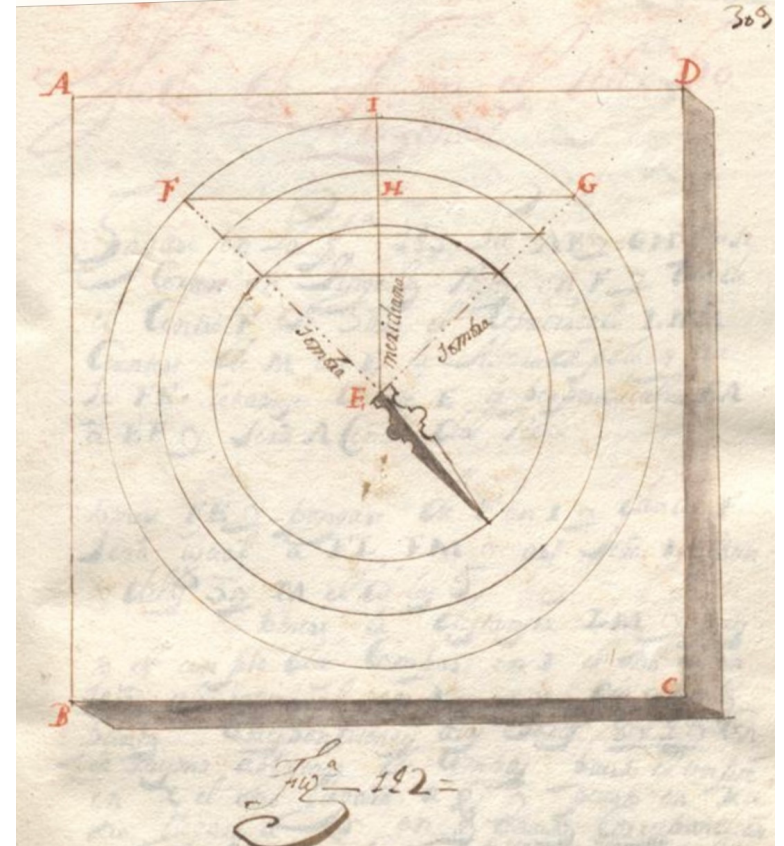


Otros Métodos de Determinación de la Línea Meridiana Local

Los antiguos romanos, para trazar la Línea Meridiana Local, utilizaban un método más complicado, basado en tres puntos de sombra. Está descrito en el *Corpus Agrimensorum* de Hyginus Gromaticus, pero a pesar de su complicación no es más exacto ni más preciso que el método del "Círculo Indio".

El jesuita Nicolás Ortiz, en un manuscrito que se conserva en la Biblioteca Nacional de España, nos explica otro método para determinar la Línea Meridiana, a cuya descripción le corresponde la figura adjunta.

Este mismo método es descrito por varios autores, como por ejemplo el Padre Thomas Tosca en su "*Compendio Mathematico*", pero en realidad está basado en el método del "Círculo Indio", solo que aplicado durante varios días, con lo cual se obtiene una mayor precisión en el trazado de la Línea Meridiana, además, estos autores recomiendan que la determinación se haga en los días de los Equinoccios.



Método para trazar la Línea Meridiana.
Imagen del manuscrito de Nicolás Ortiz, MSS/17506
(bdh0000242819) Página 309, figura 142.
Biblioteca Nacional de España.

Relojes de Sol

Las "Meridianas", Relojes de Sol en el interior de las Iglesias.

Los Relojes de Sol llamados "Meridianas"

Una vez trazada la Línea Meridiana Local, o Línea del Norte_Sur Verdadero, valiéndose del Analemma de Vitruvio y Ptolomeo, se puede trazar sobre esa línea un tipo de Relojes de Sol basados en la Declinación del Sol en ciertas fechas determinadas y que se conoce como "Meridiana", el cual es solo un Reloj de Sol, sensu lato, ya que sensu stricto es un calendario más que un Reloj de Sol, puesto que sirve más bien para determinar las fechas de los Equinoccios y de los Solsticios, que para determinar la hora del día.

Los instrumentos llamados "Meridianas", que no hay que confundirlas con la Línea Meridiana Local, aunque estén trazados sobre dicha Línea Meridiana Local, no son lo mismo, ya que las "Meridianas" tienen marcas para determinar las fechas y las Líneas Meridiana Locales no llevan ninguna marca. Si a una Línea Meridiana Local le añadimos marcas según sea la Declinación del Sol en determinados días del año, la convertimos en una "Meridiana".

Podemos encontrar "Meridianas" en el interior de muchas iglesias, en las que en la mayoría de las veces, una vez fallecido quien proyectó la "Meridiana", esta cae en desuso durante siglos, hasta que algún erudito la rescata del olvido, o hasta que en alguna restauración desafortunada, algún incompetente la deja inservible para siempre, como ha ocurrido en demasiadas ocasiones.

La mayoría, de las "Meridianas" suelen ser del tipo de "Camara Oscura", en las que un pequeño orificio, o estenopo, que hace las veces de Gnomon, proyecta los rayos de Sol sobre un plano, en un recinto cerrado, ya sea el plano el vertical de una pared, o el horizontal del suelo del recinto. El orificio estenoico hace las veces del extremo superior de un Gnomon de longitud equivalente a la altura a la que está situado el Estenopo.

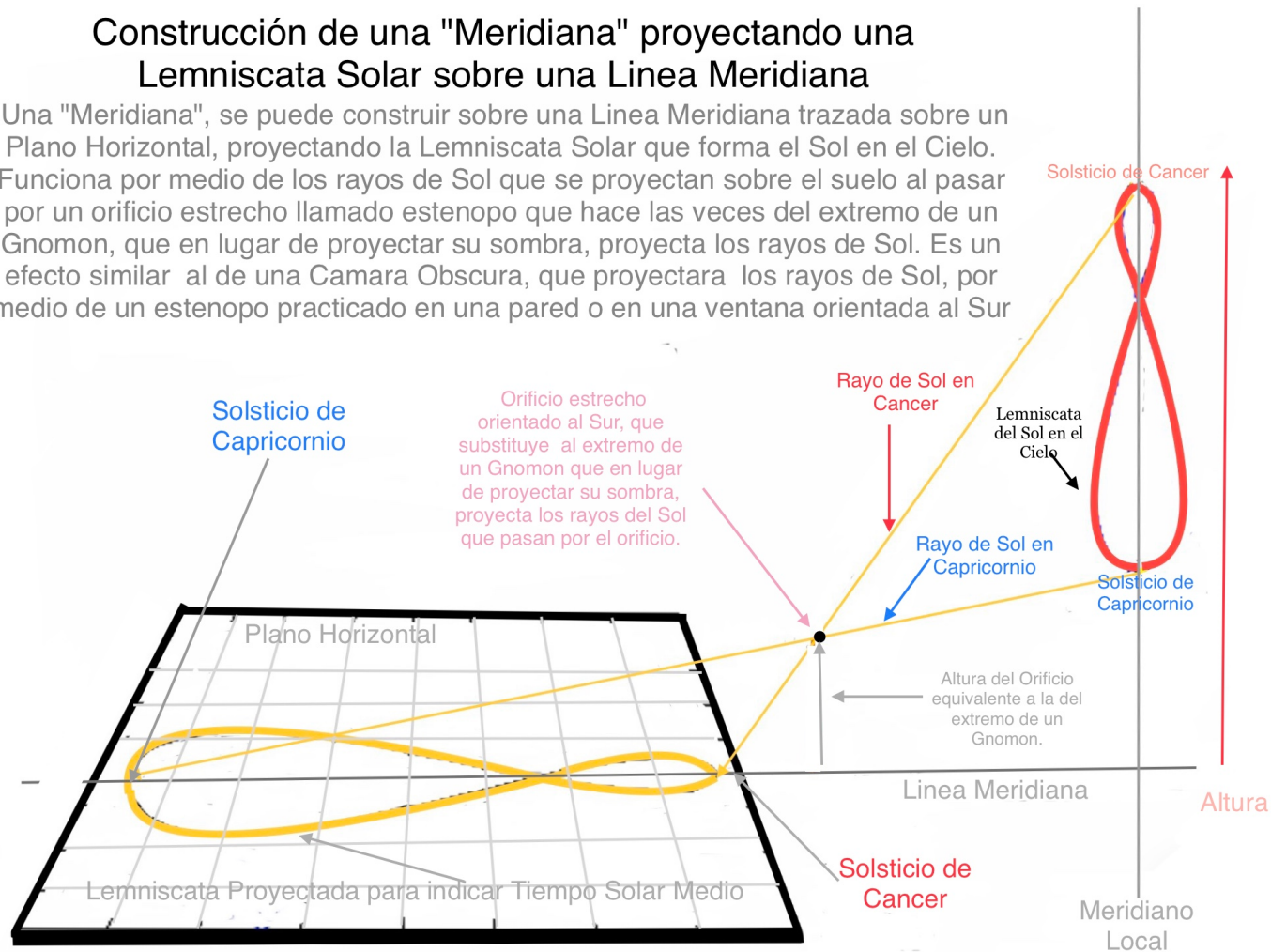
Las "Meridianas", fueron muy útiles antiguamente para determinar con exactitud las fechas de los Equinoccios y las de los Solsticios y evidentemente, cuanto más grandes eran, más exactitud se podía esperar de ellas, es por lo que debido las dimensiones colosales de algunas iglesias, fueron los lugares idóneos en donde construirlas.

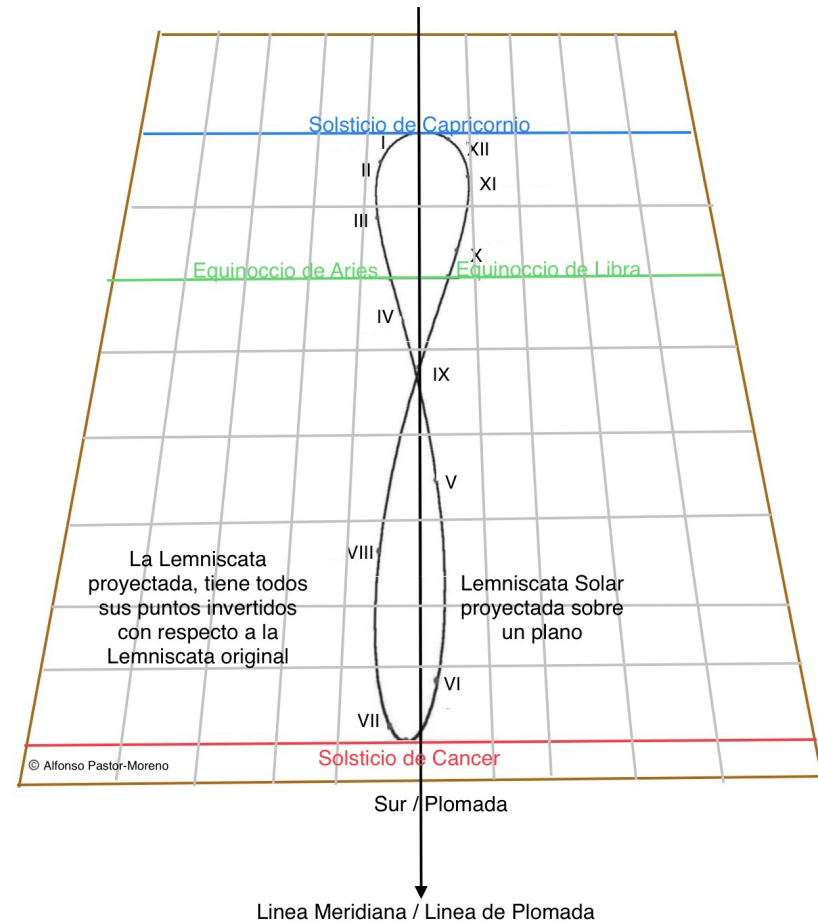
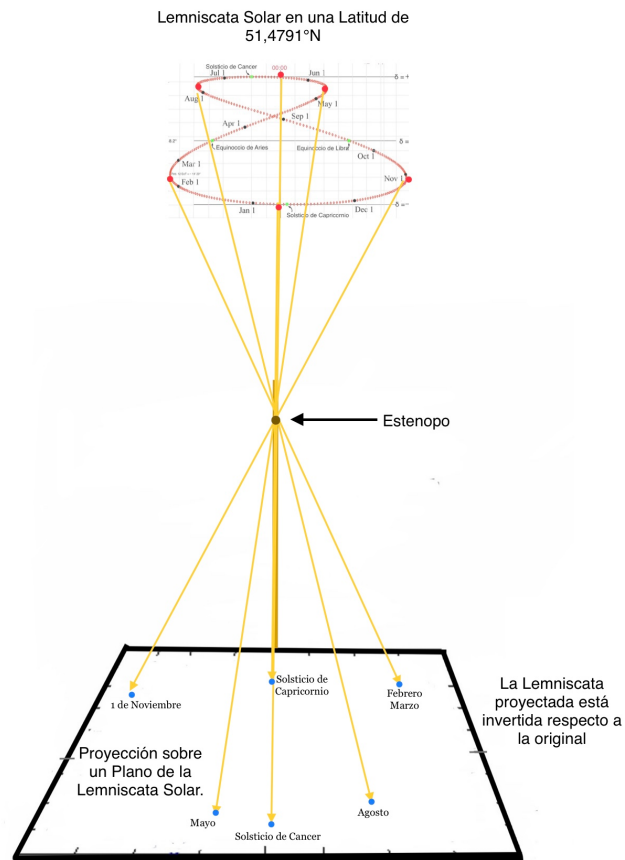
A este respecto, consúltese el libro de J. L. Heilbron "The Sun in the Church", que trata extensamente de como se construyeron algunas de esas "Meridianas".

El fundamento de una "Meridiana" podemos verlo en la figura de la pagina siguiente.

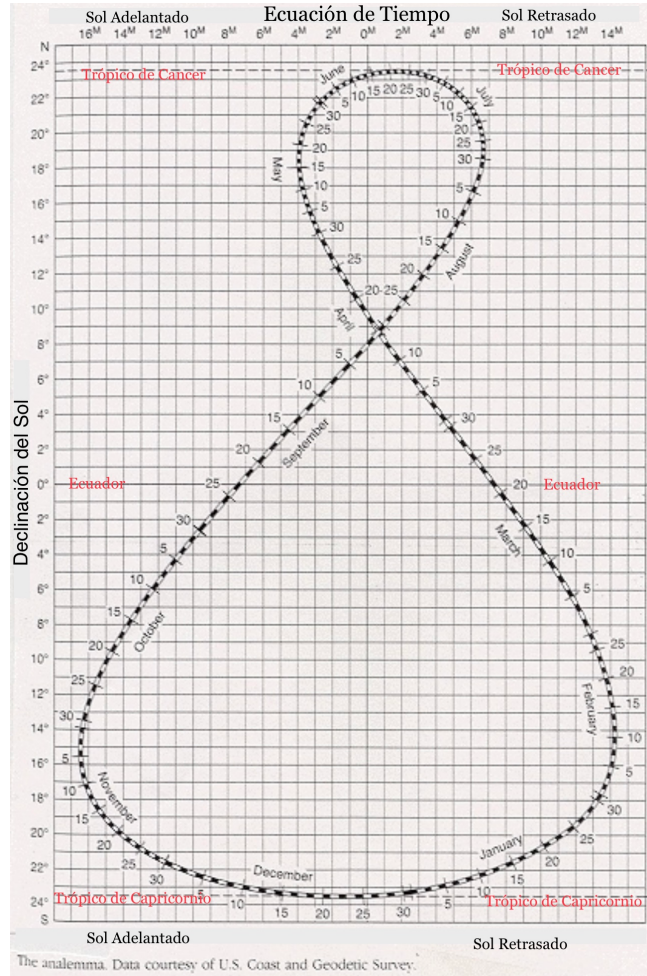
Construcción de una "Meridiana" proyectando una Lemniscata Solar sobre una Línea Meridiana

Una "Meridiana", se puede construir sobre una Línea Meridiana trazada sobre un Plano Horizontal, proyectando la Lemniscata Solar que forma el Sol en el Cielo. Funciona por medio de los rayos de Sol que se proyectan sobre el suelo al pasar por un orificio estrecho llamado estenopo que hace las veces del extremo de un Gnomon, que en lugar de proyectar su sombra, proyecta los rayos de Sol. Es un efecto similar al de una Cámara Oscura, que proyectara los rayos de Sol, por medio de un estenopo practicado en una pared o en una ventana orientada al Sur



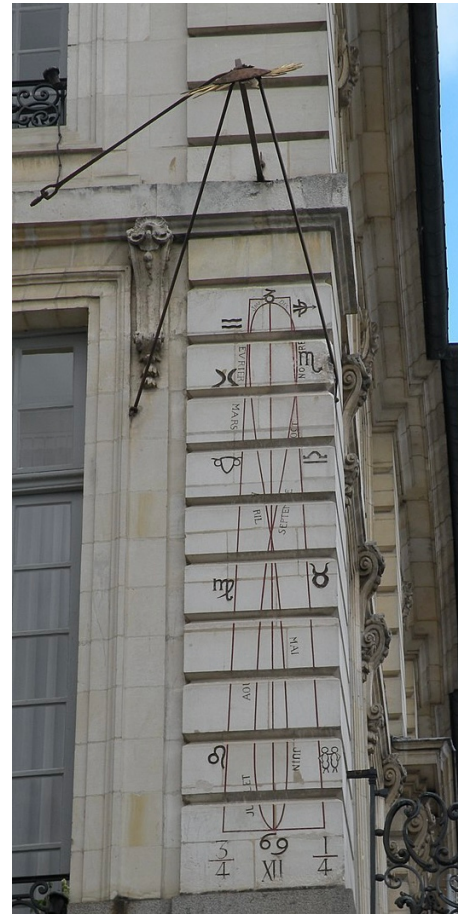


La forma y dimensión de las "Meridianas" proyectadas sobre un plano dependen de la Latitud del lugar de observación. En la figura de la izquierda, podemos ver la proyección de una Lemniscata Solar vista desde Greenwich (Latitud 51,4791°N) y en la figura de la derecha la proyección de una Lemniscata Solar vista desde Rennes (Francia) (Latitud 48.1147°N).



La Ecuación de Tiempo presentada en forma de curva Lemniscata (Curva en forma de ocho)
¡Ojo, porque está dibujada en sentido contrario a como aparece el Sol verdadero en el Cielo!

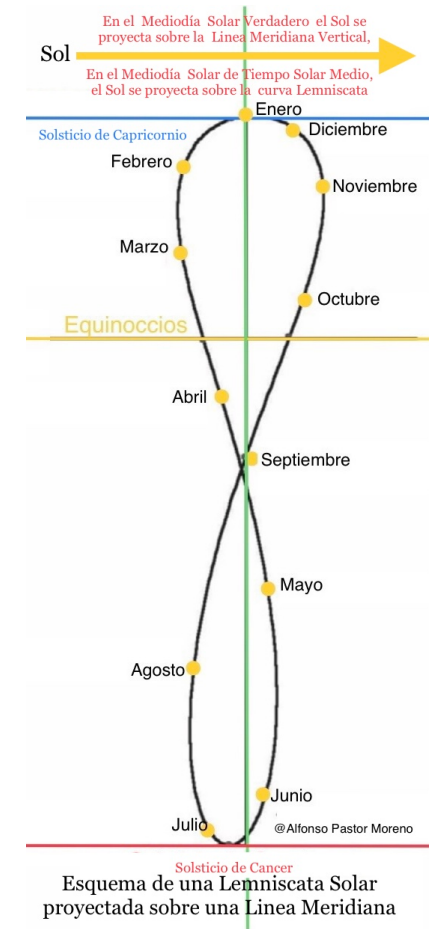
Alfonso Pastor Moreno Enero 2023



Meridiana de la Alcaldía de Rennes
La Lemniscata trazada sobre la Línea Meridiana Vertical indica Tiempo Solar Medio

Credito: Wikimedia Commons
Licence Creative Commons Attribution: I

Relojes de Sol Fundamento y Construcción



La Lemniscata Solar de la Alcaldía de Rennes explicada.

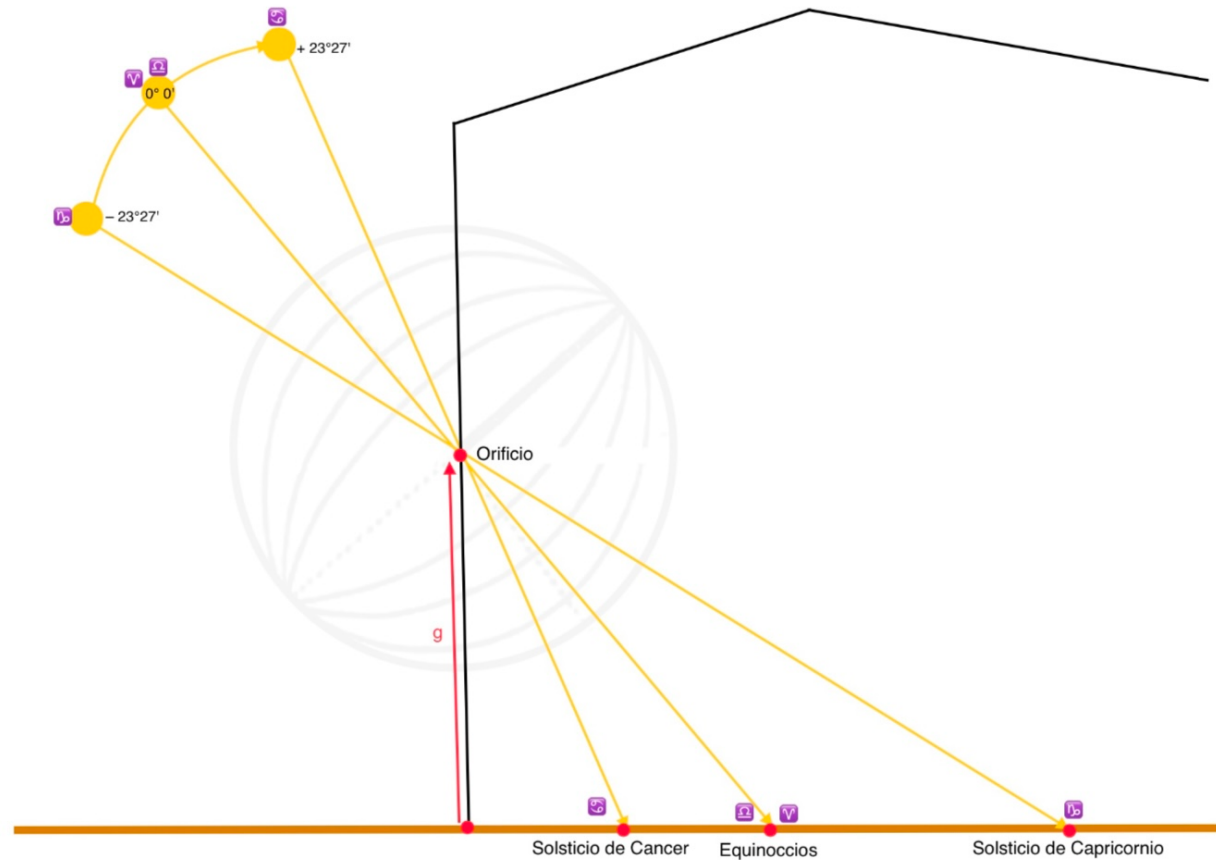
Al proyectar sobre un plano las posiciones en el Cielo del Sol Verdadero, estas posiciones aparecen invertidas con respecto a las del Sol Medio que aparecen en la Ecuación de Tiempo.

52

Esquema de una "Meridiana"

Los rayos de Sol, entran en un recinto a través de un orificio estrecho, llamado Estenopo, y se proyectan sobre un Plano Horizontal, como el del suelo de la nave de una iglesia, en el que está trazada una Línea Meridiana. En determinadas fechas del año, como la del Solsticio de Cáncer ♋, las de los Equinoccios ♊, ♎, y la del Solsticio de Capricornio ♏, los rayos de Sol que atraviesan el orificio, inciden sobre ciertas marcas hechas sobre la Línea Meridiana, que indican la entrada del Sol en determinadas fechas del año.

Los antiguos Gnomonistas construyeron las Meridianas por medio de un procedimiento que ha llegado hasta nosotros con el nombre de "**Analemma de Vitruvio y de Ptolomeo**", que explico extensamente en otro de mis trabajos.



Trazado de la "Meridiana" de San Petronio según Jean Dominique Cassini .

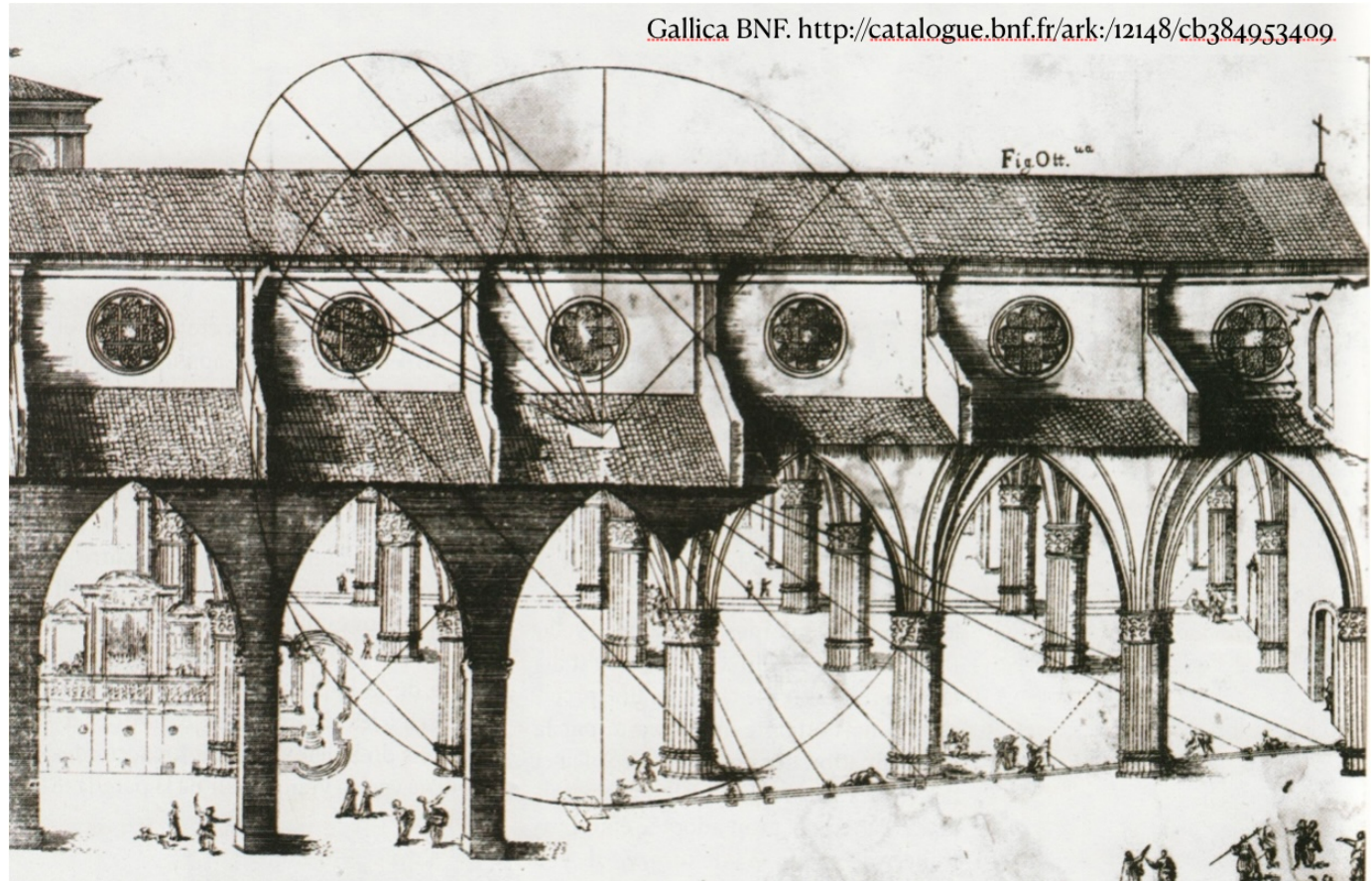
En 1575, Ignazio Danti realizó la primera de las "Meridianas" de la Basilica de San Petronio, de Bolonia, que posteriormente quedó dañada en una reforma realizada en la Basilica.

En el año En 1653, Jean-Dominique Cassini, constató que la "Meridiana" de Danti había quedado inutilizable despues de la reforma que sufrió y diseñó una nueva "Meridiana", que se construyó bajo su supervisión en 1655.

En el año 1695 el propio Cassini la revisó y la ajustó y es la que todavía se puede ver hoy.

Sobre la construcción de esa "Meridiana", nos quedan las notas del propio Cassini.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k51247f>



Trazado de los puntos de los Equinoccios y de los Solsticios de la "Meridiana" de San Petronio, para el trazado de los cuales Jean Dominique Cassini, se basó en el Analemma de Vitruvio y Ptolomeo.

Algunas de las "Meridianas", colocadas en los suelos de ciertas iglesias, se han hecho famosísimas y en determinadas fechas del año congregan a su alrededor a una miríada de mirones, muchos de ellos sin tener ni idea de lo que están viendo ni del fundamento del porque eso ocurre, que acuden allí solo para ver como los rayos de Sol inciden sobre unas marcas del suelo, para poder presumir de que lo han visto

Publico observando el Solsticio del 21/06/2012 en la Meridiana de Santa Maria dei Fiore (Florencia)

Autor: Francesco Bini

[Licence Creative Commons Attribution: I](#)



Relojes de Sol

Construcción

Construcción practica de un Reloj de Sol por medio de la Proyección sobre un plano de un Reloj de Sol Equinoccial.

La Tierra como Reloj de Sol

Un **Reloj de Sol Equinoccial** es el realizado proyectando sobre un plano paralelo al Ecuador Terrestre el Circulo del Ecuador Celeste dividido en 24 sectores de 15° .

Hemos visto anteriormente, que la Tierra gira sobre si misma y lo hace de Oeste a Este . Aunque el Sol esté fijo y sea la Tierra la que se mueve, ese movimiento de la Tierra hace que desde cualquier lugar de la Tierra, el Sol salga cada día por el Este, haga un recorrido por el Cielo por encima del observador, describiendo su Arco Diurno y se ponga por el Oeste.

Si observamos el recorrido "aparente" del Sol en el Cielo, es decir el Arco Diurno del Sol es el arco de un círculo paralelo al Ecuador Celeste, que está a una distancia angular del Ecuador, a la que se le llama la Declinación del Sol. Esta Declinación , a lo largo del año varía de día a día, oscilando entre los $+23,4969^\circ$ cuando el Sol entra en Cancer (Junio) y $-23,4969^\circ$ cuando el Sol entra en Capricornio (Diciembre).

Como el movimiento aparente del Sol tiene lugar en círculos paralelos al Ecuador Celeste, su posición aparente podemos proyectarla sobre el Plano del Ecuador, trazando Meridianos que pasen por el Sol y hagan intersección con el Ecuador.

Como sabemos que la Tierra gira sobre si misma aproximadamente a razón de 15° por hora, si dividimos el Circulo del Ecuador en 24 sectores, a cada sector le corresponderá una hora. ($24 \times 15^\circ = 360^\circ$), y si en los puntos de inicio de cada sector marcamos cada una de las 24 horas del día, todos los lugares que estén en el Meridiano sobre el que esté el Sol en un instante determinado, estarán en ese instante en el Mediodía Solar. A los lugares al Oeste de ese Meridiano les faltará para llegar al Mediodía Solar 1 hora por cada 15° que estén al Oeste y los lugares que estén al Este ya habrán pasado por el Mediodía Solar, varias horas antes a razón de 1 hora por cada 15° de diferencia en Longitud.

Es decir, que Sol en cada hora pasará por encima de alguno de los 24-Meridianos que hemos trazado, con lo cual, el Circulo del Ecuador, se comportará como un enorme Reloj de Sol.

Proyectando sobre un plano paralelo al Ecuador Terrestre, el Ecuador Celeste dividido en 24 sectores de 15° cada uno, obtendremos un Reloj de Sol Equinoccial que puede a su vez proyectarse sobre otro plano ya sea este Vertical encarado al Sur, o Vertical Declinante, Horizontal , o Inclinado y obtener de ese modo un Reloj de Sol sobre un plano.

Según el plano sobre el que se proyecte el Reloj de Sol Equinoccial, el Reloj de Sol resultante será Horizontal, Inclinado, Vertical , o si el Plano Vertical sobre el que se proyecta no está perfectamente encarado al Sur, será Vertical Declinante,

La Tierra como Reloj de Sol (Continuación)

Al ángulo que forma el Plano del Ecuador con el Plano del Horizonte, los antiguos lo llamaban "Altura de la Equinoccial", y es el ángulo complementario de la "Altura del Polo sobre el Horizonte" en ese Lugar, o Latitud del Lugar.

Es fácil de entender, que según sea la inclinación del Plano del Ecuador con respecto al Plano del Horizonte, cada lugar de la Tierra tendrá un ángulo distinto de "Altura del Polo" y de su complementario, la "Altura de la Equinoccial". En los lugares cuyo Plano del Horizonte sea paralelo al Plano del Ecuador, el ángulo de la "Altura de la Equinoccial" será igual a Cero y en los lugares cuyo Plano del Horizonte sea perpendicular al Plano del Ecuador, (en los Polos), la "Altura de la Equinoccial" será igual a 90° .

Por lo tanto, la proyección de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal, no tendrá el mismo ángulo en cada lugar de la Tierra. La forma y dimensiones de la proyección de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal o Vertical, será función de la Latitud del lugar. Es por ello, que para cada Latitud hay que trazar un Reloj de Sol distinto, que solo será válido para la Latitud para la que se ha trazado y fuera de esa Latitud, las indicaciones del reloj serán erróneas..

Por lo tanto, los Relojes de Sol, tanto de si son de Altura como si son de Azimut, deben de estar diseñados para el lugar en donde se vayan a utilizar.

Cuando la inclinación del plano de un Reloj de Sol Equinoccial se ajusta para que su plano quede paralelo al Plano del Ecuador, ese Reloj indicará una hora válida para la Latitud para la que se haya ajustado.

Por lo tanto, proyectando sobre un plano cualquiera un Reloj de Sol Equinoccial, con la inclinación adecuada sobre el Plano respecto a la Latitud, podremos trazar un Reloj de Sol para a la Latitud del lugar.

En realidad, la Línea Meridiana Local, de la cual ya hemos visto anteriormente como se traza, es la proyección del Eje de la Tierra sobre el Plano del Horizonte Local. Si sobre esa línea, con la inclinación adecuada situamos un Reloj de Sol Equinoccial y lo proyectamos sobre cualquier plano, tendremos un Reloj de Sol sobre dicho plano.

Algunos autores antiguos en sus escritos sobre Gnomónica tomaron esa idea y proyectaron sobre un plano cualquiera una Esfera Armilar hecha con 24 Armillas, correspondiendo cada Armilla a una hora. Esta fue una idea recurrente en varios autores, como el Padre Thomas Vicente Tosca en su libro sobre Gnomónica y también en el manuscrito de Nicolas Ortiz. Estos autores, entre otros muchos, utilizan una Esfera Armilar para proyectar un Reloj de Sol sobre un plano, como veremos a continuación.

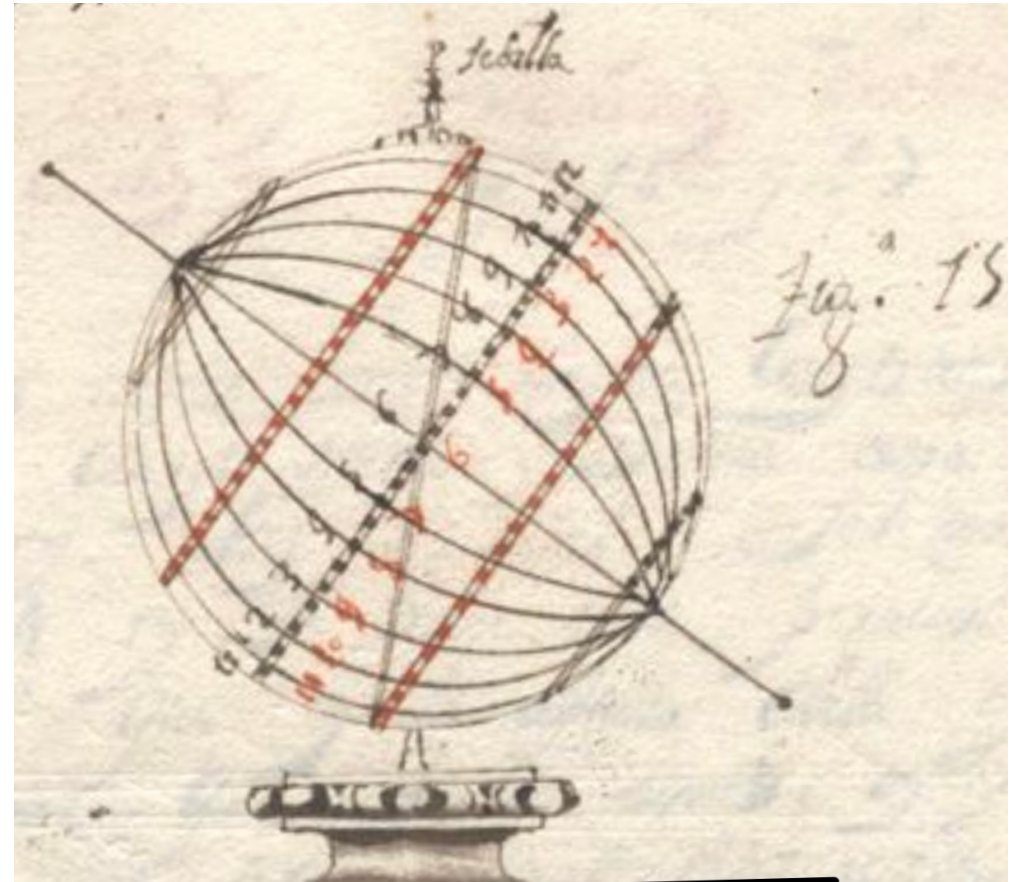
La Esfera Armilar como Reloj de Sol

Consideremos una representación de la Esfera Terrestre en forma de Esfera Armilar, en la que situamos 24 Meridianos, delimitando cada uno de ellos un sector de 15° de amplitud.

Al girar la Esfera Armilar, tal como giraría la Tierra a la que representa, veríamos como cada Meridiano iría pasando por debajo del Sol, a razón de 15° por hora, con lo que tendríamos un Reloj de Sol de 24 horas, para proyectarlo sobre un plano.

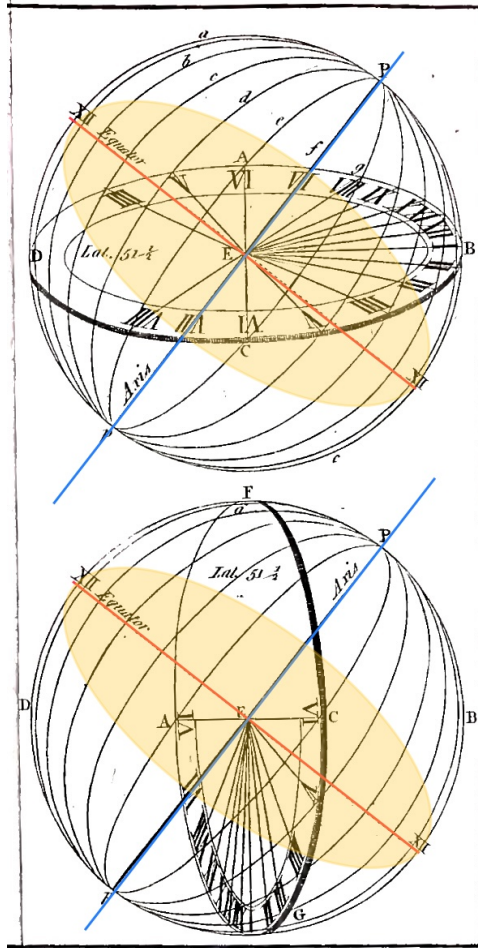
Según el ángulo que forme el Plano del Horizonte con el plano sobre el que se proyecte la Esfera Armilar, el Reloj de Sol de Azimut, será Horizontal, Vertical o Inclinado.

Al ángulo que forma la Altura de la Polar con el Horizonte, los antiguos lo llamaban la Altura del Polo, que es muy similar a la Latitud del lugar y aunque no sea exactamente idéntico, para los efectos de construir un Reloj de Sol, podemos considerarlo idéntico.



Esfera Armilar utilizada por Nicolas Ortiz en su manuscrito, como modelo para proyectar la Esfera Terrestre

Proyección del Circulo del Ecuador de una Esfera Armilar sobre un Plano Horizontal, Vertical, o Inclinado

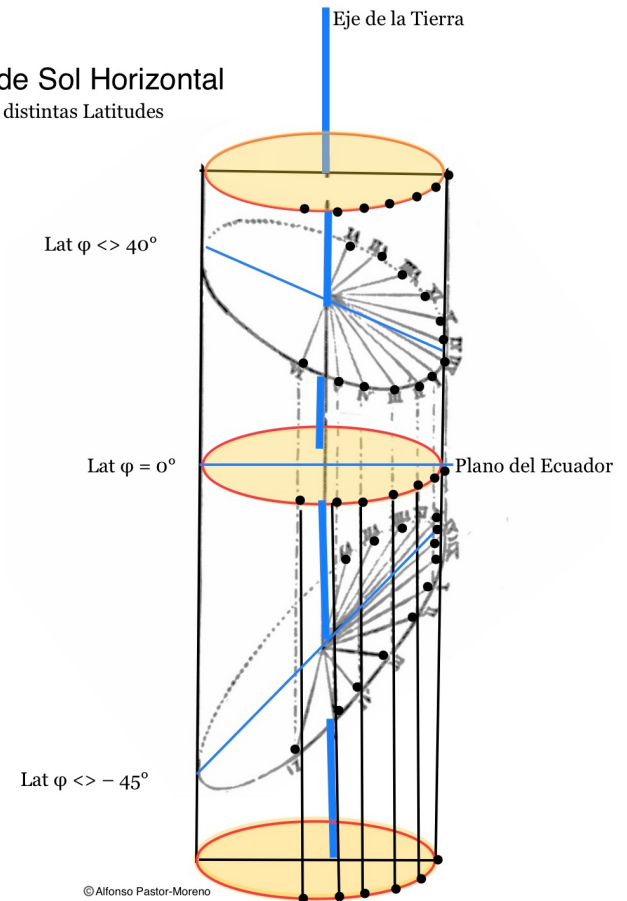


Un Reloj de Sol Equinoccial es un Reloj de Sol trazado sobre un plano paralelo al plano del Ecuador Terrestre y que tiene su Circulo Horario dividido en 24 sectores de 15° cada sector, que se corresponden cada uno con una hora del día.

Proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un plano, ya sea este plano Horizontal, Inclinado, Vertical encarado al Mediodía o Vertical Declinante, se obtiene un Reloj de Sol sobre dicho plano.

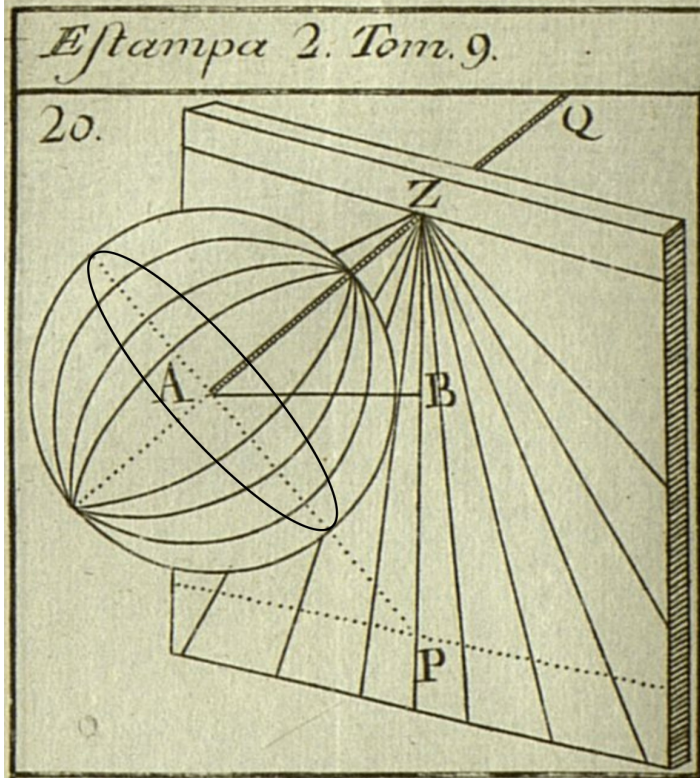
Según el modo en el que se proyecte sobre el plano el Circulo Horario del Reloj de Sol Equinoccial, resultará un tipo de Reloj de Sol.

Reloj de Sol Horizontal
En distintas Latitudes



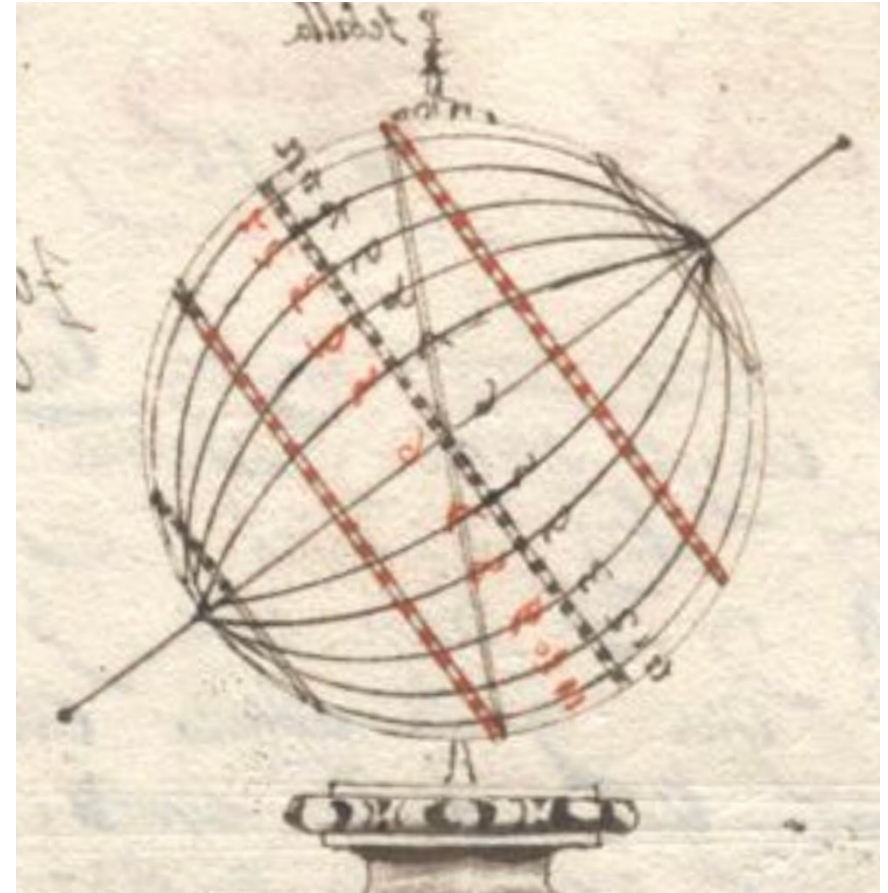
Representación de Esferas Armilares en las obras de Thomas Viente Tosca y Nicolas Ortiz

Thomas Vicente Tosca. Compendio Mathematico.
Tomo IX. Figura 20. Valencia 1794



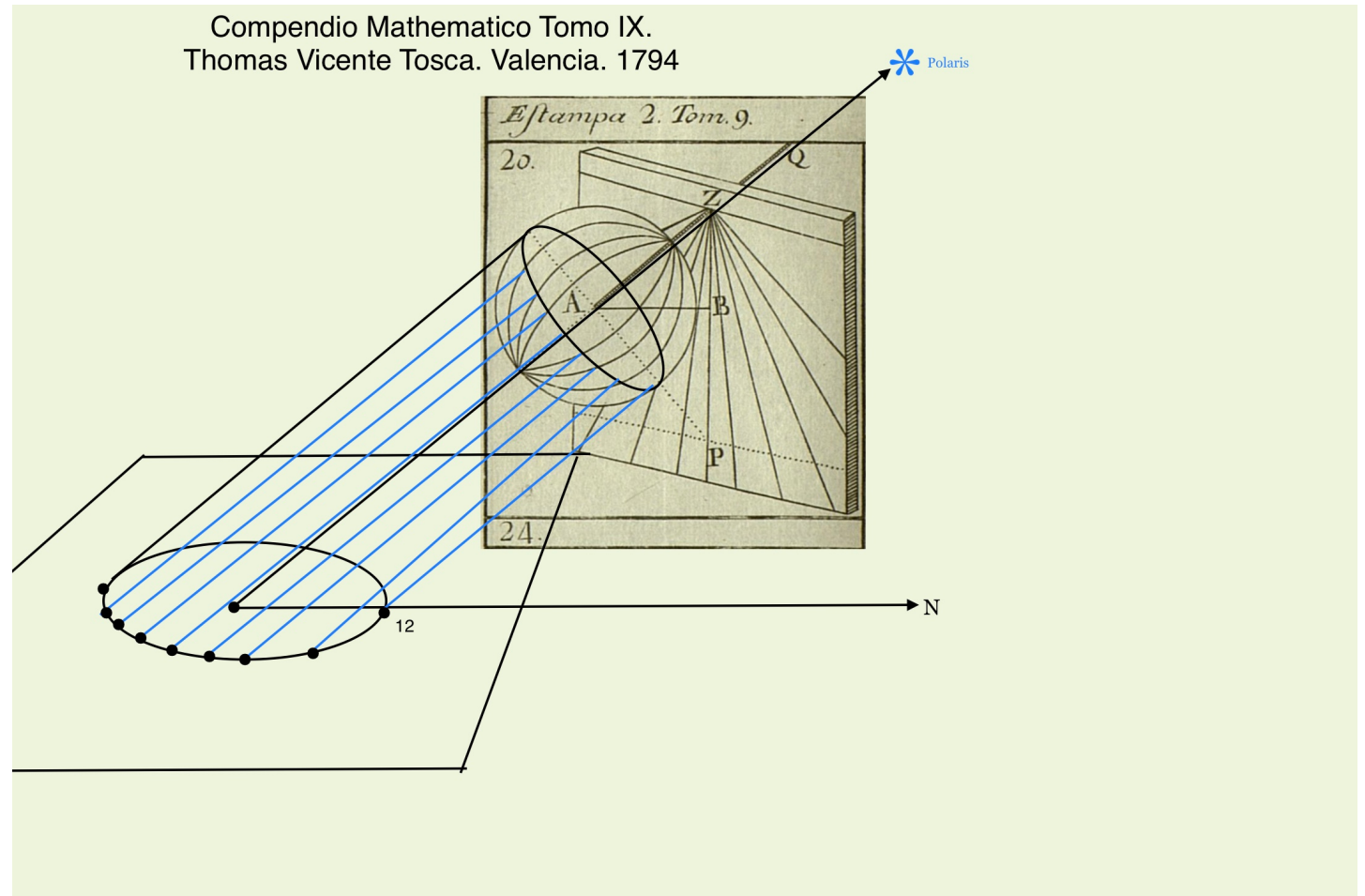
Esfera Armilar del padre Thomas Vicente Tosca en una imagen de su Compendio Mathematico. Tomo IX. Estampa 2, figura 20.

En este caso el Padre Tosca se ha proyectado la Esfera Armilar sobre una pared vertical encarada hacia el Sur.



La misma Esfera Armilar de la página anterior, sometida a un giro especular, para que tenga la misma orientación que la de Thomas Tosca y poder así adaptarla a las explicaciones que daremos a continuación.

El modelo de la
Esfera Armilar del
Padre Tosca,
proyectada sobre un
Plano Horizontal.

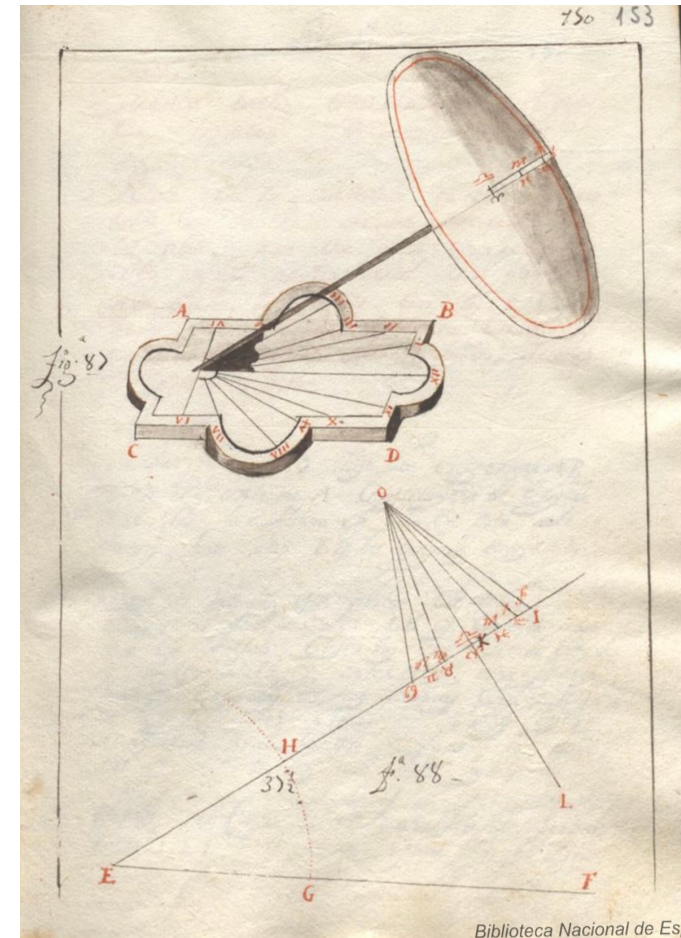


Reloj de Sol para Sevilla a partir de la Proyección de un Plano paralelo al Ecuatorial sobre un Plano Horizontal

Reloj de Sol para la Latitud de Sevilla,
proyectando sobre un Plano Horizontal el
Plano del Ecuador de una Esfera Armilar

Imagen del manuscrito de Nicolas Ortiz.

Reloj de Sol Horizontal para la Latitud de Sevilla.
Imagen del manuscrito de Nicolas Ortiz, MSS/17506
(bdh0000242819) Pagina 150, figura 87.
Biblioteca Nacional de España.

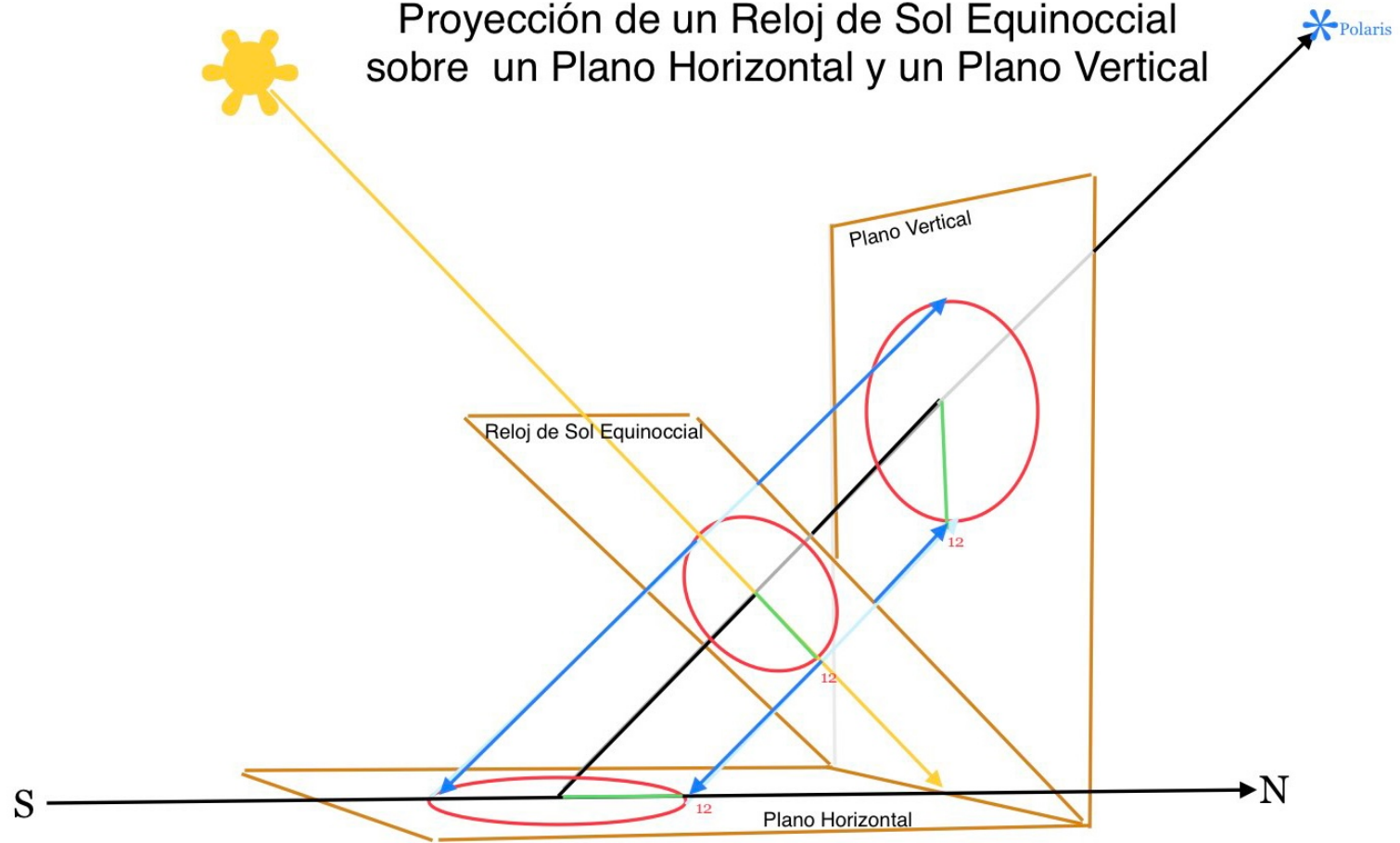


Relojes de Sol

Construcción

Construcción de Relojes de Sol proyectando un
Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano, para obtener Relojes
de Sol, tanto Verticales como Horizontales

Proyección de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal y un Plano Vertical



© Alfonso Pastor-Moreno

Relojes de Sol

Construcción

Proyección de un
Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal

Al proyectar un
Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal se pueden
obtener dos tipos de Relojes de Sol Horizontales:

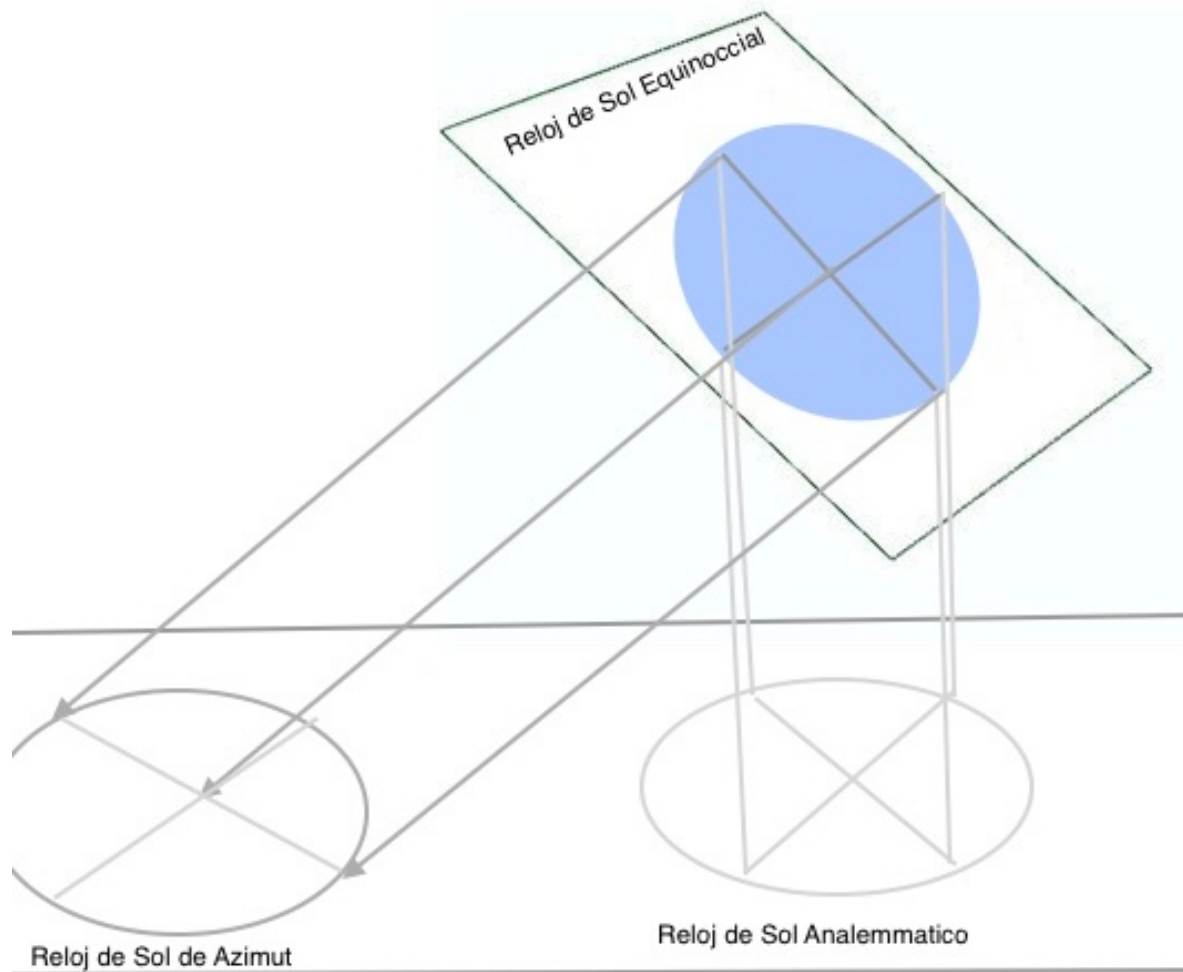
Los Relojes de Sol Horizontales Azimutales

Los Relojes de Sol Horizontales Analemmaticos

Proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal, dependiendo de como se realice la proyección, podemos obtener dos tipos de Relojes de Sol Horizontales:

a).- Reloj de Sol Horizontal Azimutal.
Indican la hora según el Azimut del Sol.
Se obtienen proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal, paralelamente al Eje de la Tierra.

b).- Reloj de Sol Horizontal Analemmatico,
Indican la hora según sea la Declinación del Sol en el día en el que se realice su lectura.
Se obtiene proyectando un Reloj de Sol Equinoccial, Ortogonalmente al Plano del Horizonte.



Relojes de Sol Horizontales Azimutales

Proyectando un Reloj de Sol Equinoccial paralelamente al Eje de la Tierra sobre un Plano Horizontal, se puede cosnstruir un Reloj de Sol Horizontal Azimutal.

Realización práctica de un Reloj de Sol Horizontal Azimutal proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal

Parte 1

Antes de realizar cualquier operación de las que se indican a continuación, es necesario cerciorarse de que el Plano Horizontal sobre el que vamos a trabajar está perfectamente nivelado y paralelo al Plano del Horizonte.

El principal problema para proyectar un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal es hacerlo con el ángulo de inclinación correcto. Para sujetar el Gnomon con el ángulo correcto sobre el Plano Horizontal, es conveniente realizar una plantilla o escuadra de sujeción para el Gnomon, que puede incluso dejarse sobre el Reloj de Sol una vez terminado, como refuerzo del Gnomon, para que se mantenga siempre en su posición y para evitar que se doble.

Esa plantilla estará basada en la relación (g/L) entre la longitud (g) del Gnomon y la longitud (L) de su sombra en el día de los Equinoccios, o Longitud de su Sombra Equinoccial.

Como ejemplo vamos a construir una plantilla valida para la Latitud Geográfica de Gandía, que según el datos del Instituto Geográfico tiene una Latitud de 38.966667° .

Realización práctica de un Reloj de Sol Horizontal Azimutal proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal

Parte 2

Una vez determinados los ángulos correctos para proyectar un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal para la Latitud Geográfica de un lugar, dos modos de proyección son posibles:

- a).- Proyección de todos los elementos del Reloj de Sol Azimutal, paralelamente al Eje de la Tierra.
- b).- Proyección de todos los elementos del Reloj de Sol Azimutal, ortogonalmente al Plano del Horizonte.

La proyección de cada elemento del Reloj de Sol Equinoccial se puede realizar por medio de un cordón tenso, con un extremo en el elemento del Reloj y que se vaya a proyectar y el otro extremo en el punto del Plano Horizontal, que señalará el cordón al tensarlo.

Esa proyección también puede hacerse de modo mas preciso que con un cordón, por medio de un puntero láser colocado en cada punto del Reloj de Sol Equinoccial que se quiera proyectar sobre el Plano Horizontal.

De uno u otro modo, cada punto importante de la rueda quedará proyectado sobre el Plano Horizontal donde se pretenda construir el Reloj de Sol.

El punto correspondiente a las 12 horas en el Reloj de Sol proyectado, deberá de quedar perfectamente opuesto al Sol de Mediodía, es decir, el punto correspondiente a las 12 horas deberá de estar situado exactamente en el punto del Norte Geográfico del dial del Reloj de Sol.

Una vez proyectados sobre el Plano del Horizonte todos los puntos importantes de la rueda, se retirará esta.

Con esta proyección habremos construido un Reloj de Sol Horizontal, para una localidad. Todo lo dicho, queda expresado de modo grafico en las paginas siguientes.

Realización práctica de un Reloj de Sol Horizontal Azimutal proyectando un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal

Parte 3

Una vez determinados los ángulos correctos para proyectar un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal para la Latitud Geográfica de un lugar, dos modos de proyección son posibles:

- a).- Proyección de todos los elementos del Reloj de Sol Azimutal, paralelamente al Eje de la Tierra.
- b).- Proyección de todos los elementos del Reloj de Sol Azimutal, ortogonalmente al Plano del Horizonte.

La proyección de cada elemento del Reloj de Sol Equinoccial se puede realizar por medio de un cordón tenso, con un extremo en el elemento del Reloj y que se vaya a proyectar y el otro extremo en el punto del Plano Horizontal, que señalará el cordón al tensarlo.

Esa proyección también puede hacerse de modo mas preciso que con un cordón, por medio de un puntero láser colocado en cada punto del Reloj de Sol Equinoccial que se quiera proyectar sobre el Plano Horizontal.

De uno u otro modo, cada punto importante de la rueda quedará proyectado sobre el Plano Horizontal donde se pretenda construir el Reloj de Sol.

El punto correspondiente a las 12 horas en el Reloj de Sol proyectado, deberá de quedar perfectamente opuesto al Sol de Mediodía, es decir, el punto correspondiente a las 12 horas deberá de estar situado exactamente en el punto del Norte Geográfico del dial del Reloj de Sol.

Una vez proyectados sobre el Plano del Horizonte todos los puntos importantes de la rueda, se retirará esta.

Con esta proyección habremos construido un Reloj de Sol Horizontal, para una localidad. Todo lo dicho, queda expresado de modo grafico en las paginas siguientes.

Ángulos a tener en cuenta al proyectar un Reloj de Sol Equinoccial sobre el Plano del Horizonte

Imaginemos la Esfera Armilar de Nicolas Ortiz o la del Padre Tosca esquematizada en la figura adjunta.

Imaginemos un Gnomon de altura (g), que desde el centro de la Esfera Armilar, incida perpendicularmente sobre el Plano del Horizonte Local.

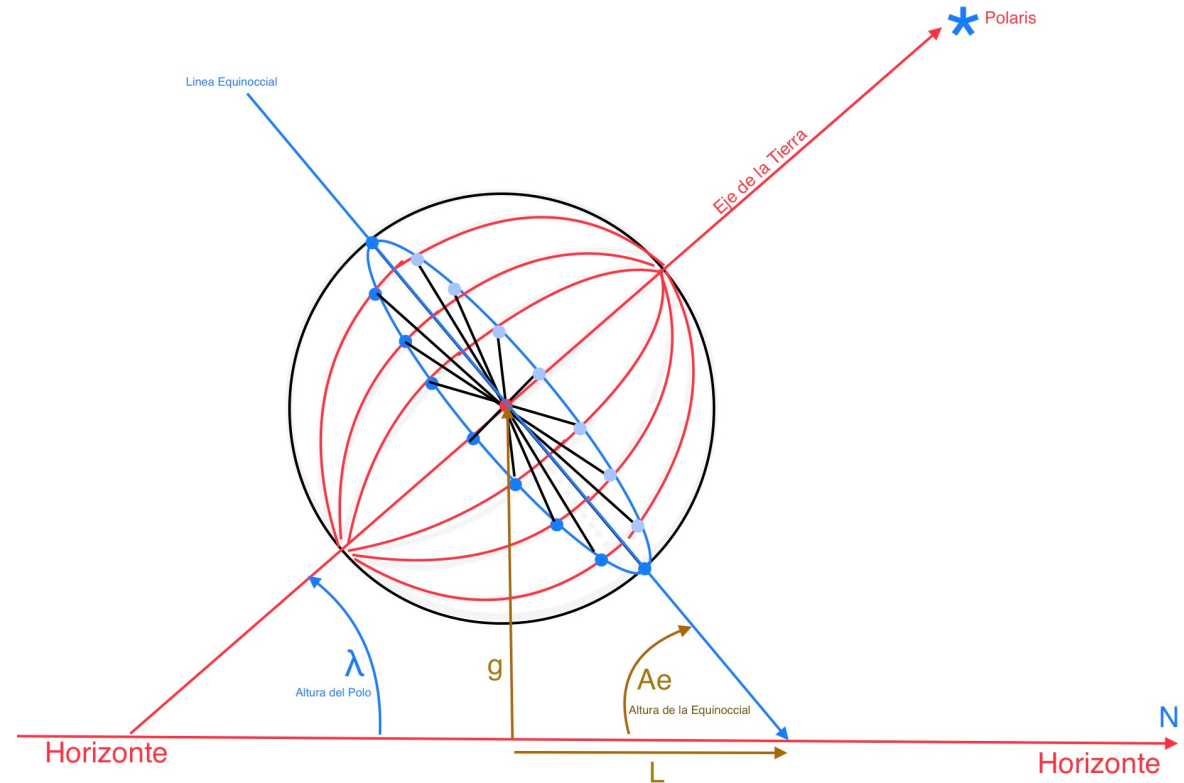
El ángulo de inclinación del Eje, de la Esfera Armilar, para que esta esté inclinada correctamente, dependerá de la distancia a la base del Gnomon medida sobre el Plano del Horizonte desde donde incida la prolongación de la Línea Equinoccial de la Esfera Armilar, hasta el Plano del Horizonte.

Si llamamos (g) a la longitud del Gnomon y (L) a la distancia entre la base del Gnomon y el lugar en donde incida sobre el Plano del Horizonte, la prolongación de la línea Equinoccial, tendremos que la tangente del ángulo que forma la Equinoccial con el Horizonte es:

$$\tan(Ae) = g / L.$$

Al ángulo (Ae), los antiguos le llamaban la Altura de la Equinoccial

Si se traza el ángulo (Ae) por la medida de la longitud de sus lados, no se necesita un transportador de ángulos, para trazarlo, si no que basta una simple regla. Es por ello, que los antiguos Gnomonistas le dieron mucha importancia a la longitud del Gnomon en relación con la sombra que proyecta.



Los ángulos a tener en cuenta para proyectar sobre un Plano Horizontal un Reloj de Sol Equinoccial, para Gandía (Valencia)

Lo primero que deberemos hacer es calcular los principales ángulos para proyectar un Reloj de Sol Equinoccial, que son: +
 Ángulo de Altura de la Ecuatorial.
 Ángulo de Altura del Polo.
 (Estos dos ángulos son complementarios).

Los dos ángulos podemos obtenerlos con una relación adecuada entre la longitud del Gnomon y la longitud de la Sombra Equinoccial.
 Esta relación para Gandía es: $g = 10$; $L = 8$

Altura de la Equinoccial para Gandía (Valencia)
 y Latitudes próximas a Gandía :

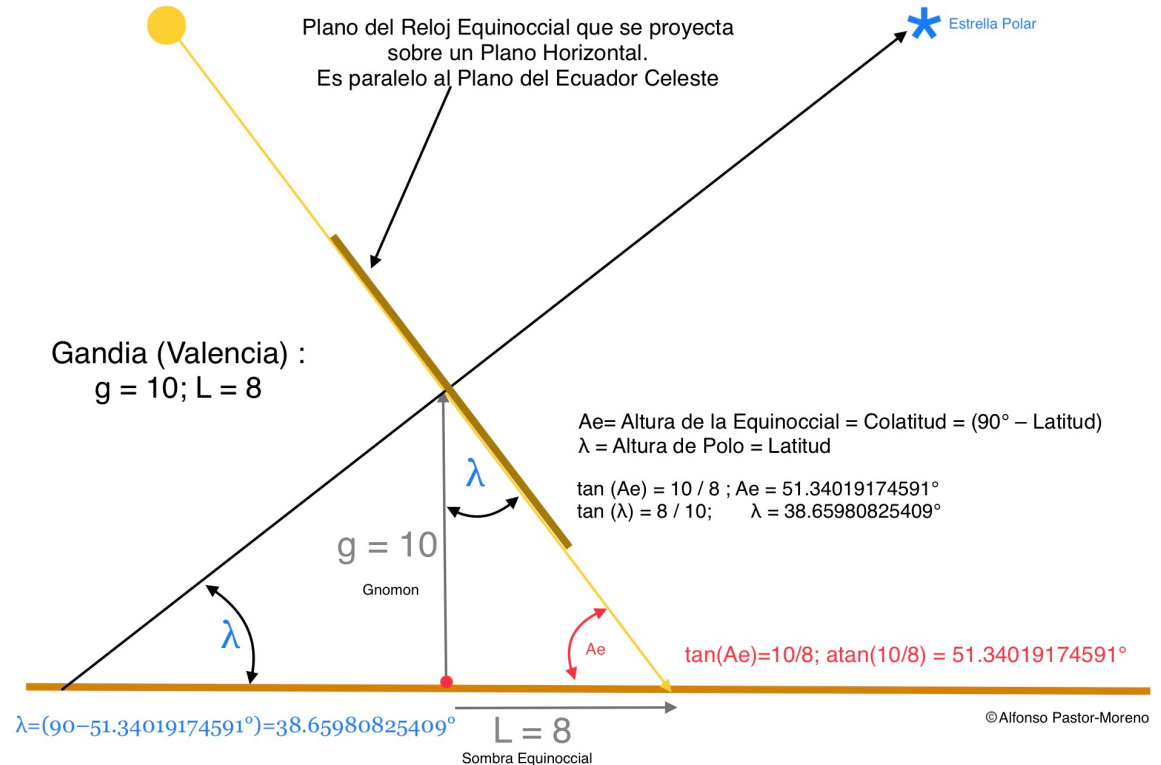
$$g = 10, L = 8$$

$$\tan(Ae) = 10/8 = 1.25; \tan^{-1}(1.25)$$

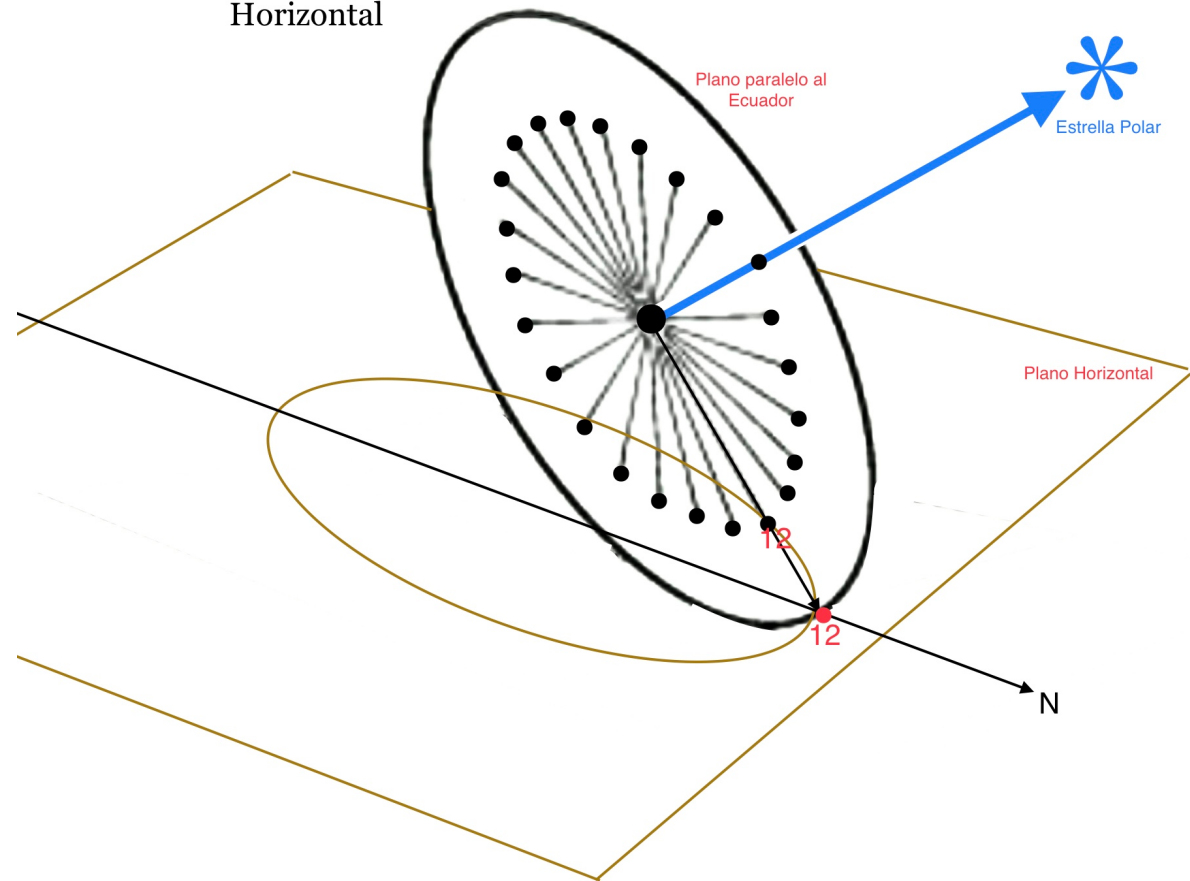
$$= 51.34019174591^\circ$$

$$\tan(\lambda) = 8/10; \lambda = \tan^{-1}(8/10) = (90^\circ - 51.34019174591^\circ) = 38.65980825409^\circ$$

(Según Wikipedia, Gandía $\lambda = 38.966667^\circ$),
 lo cual, nos da suficiente aproximación para construir un Reloj de Sol con esa relación.



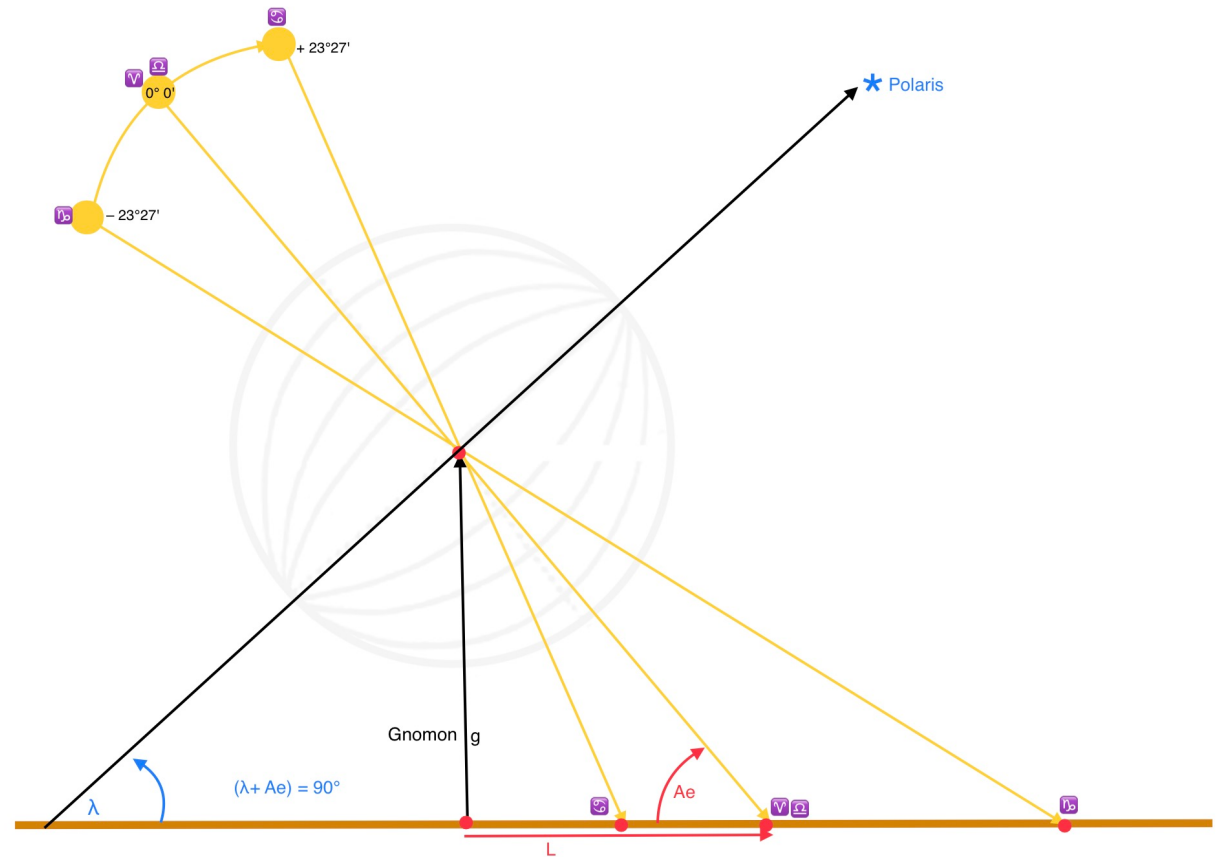
Proyección de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal



Determinación del ángulo correcto de inclinación del Eje de la Tierra con respecto al Plano del Horizonte.

La altura del Gnomon = g .
 La longitud del Gnomon = L .
 El ángulo Ae , es la "Altura de la Equinoccial", o ángulo que forma el Plano del Ecuador Celeste con el Plano del Horizonte Local.
 La tangente del ángulo Ae :
 $\tan(Ae) = g / L$.
 $Ae = \tan^{-1}(g / L)$
 El ángulo Ae es el complemento de la Latitud λ del lugar de observación, de modo que: $\lambda + Ae = 90^\circ$

La relación (g/L) en los días de los Equinoccios, determina la inclinación del Plano del Ecuador Celeste sobre el Plano del Horizonte Local, al que los antiguos llamaban la "Altura de la Equinoccial".
 Como dicha altura es función, de la Latitud λ del lugar de observación, o ángulo de inclinación λ del Eje de la Tierra sobre el Horizonte Local, que los antiguos llamaban "Altura del Polo", Estableciendo una relación adecuada entre $(g$ y $L)$, tendremos la tangente del complemento del ángulo de la Latitud λ del lugar de observación.



Construcción de una plantilla triangular para soportar el Gnomon con el ángulo de inclinación correcto para Gandia

Para Gandia y poblaciones cercanas,
construyamos un Triángulo Rectángulo:

lado $g = 10$

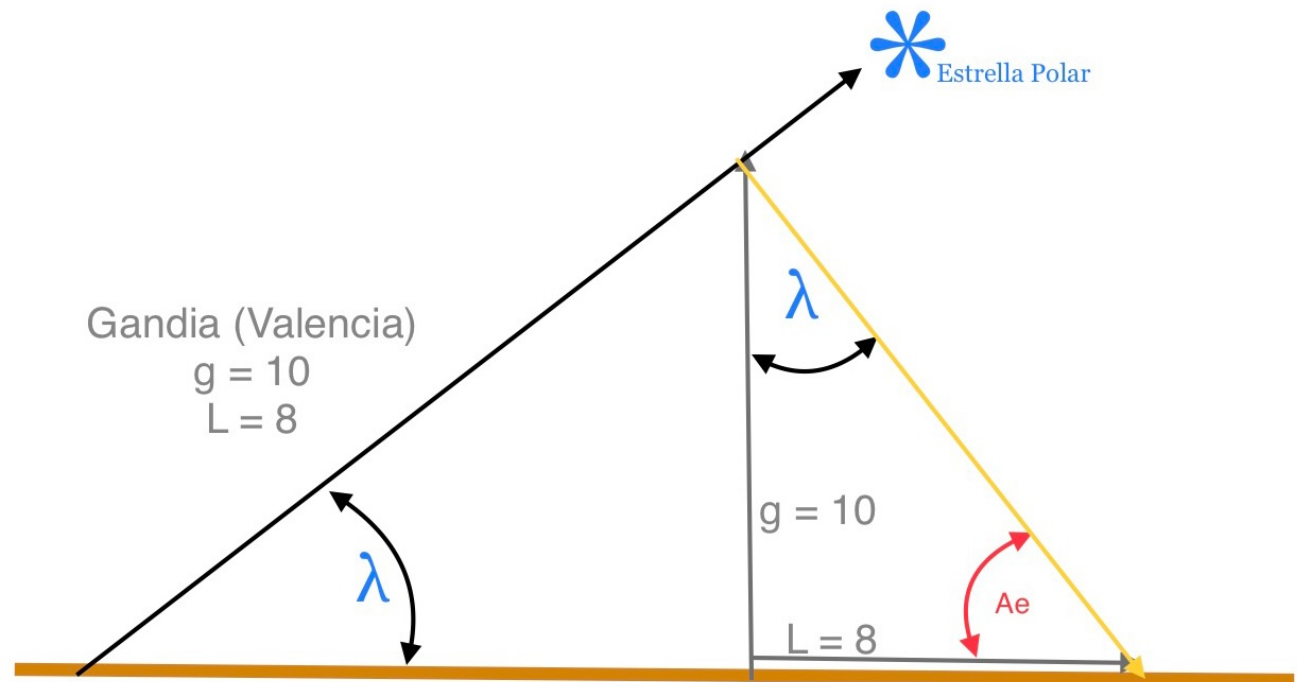
lado $L = 8$

Sus dos ángulos serán: Ae y λ .

Ae = Angulo de Altura de la Equinoccial

λ = Angulo de Altura del Polo o Latitud
del lugar

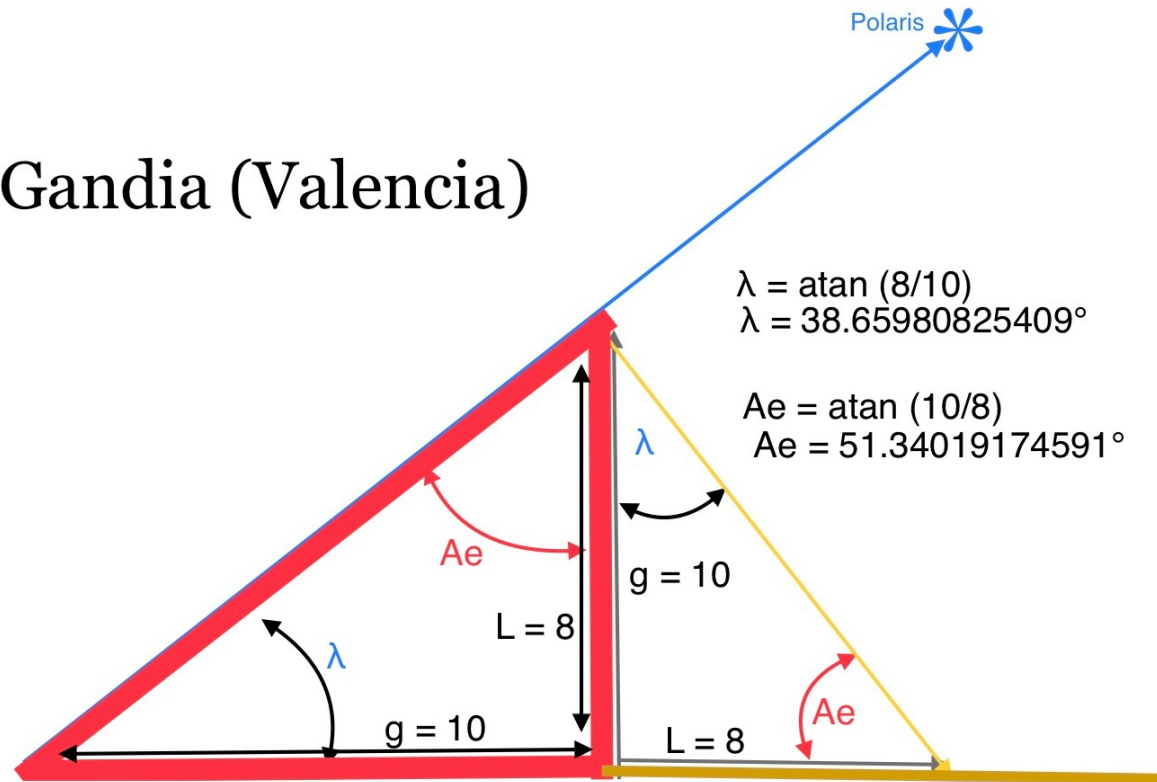
Con los datos de ese Triángulo
construiremos una plantilla que nos
servirá de soporte para mantener el
Gnomon con una inclinación que será
igual a la del Eje de la Tierra sobre el
Plano del Horizonte.



© Alfonso Pastor-Moreno

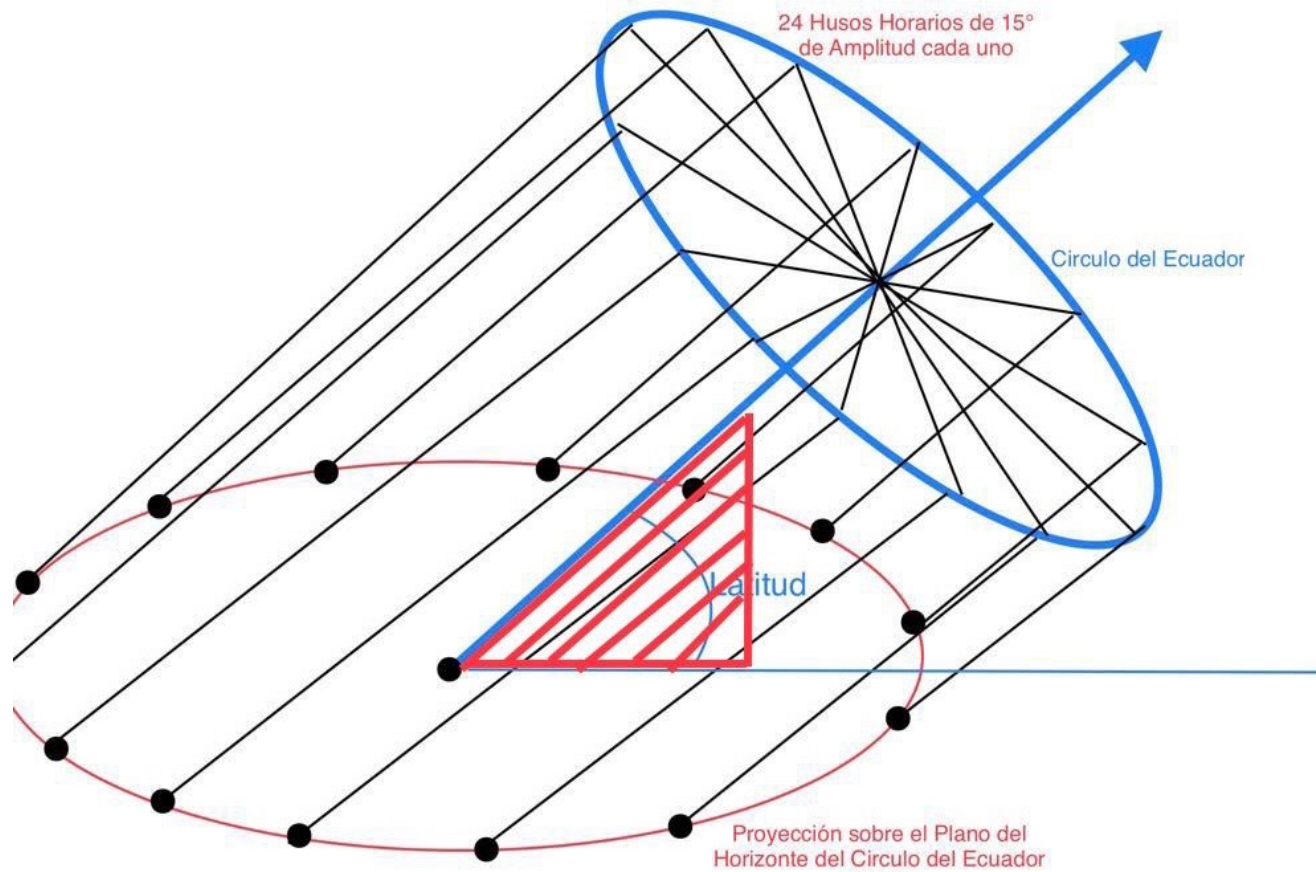
Plantilla para soportar el Gnomon con el ángulo de inclinación correcto para Gandia

Gandia (Valencia)



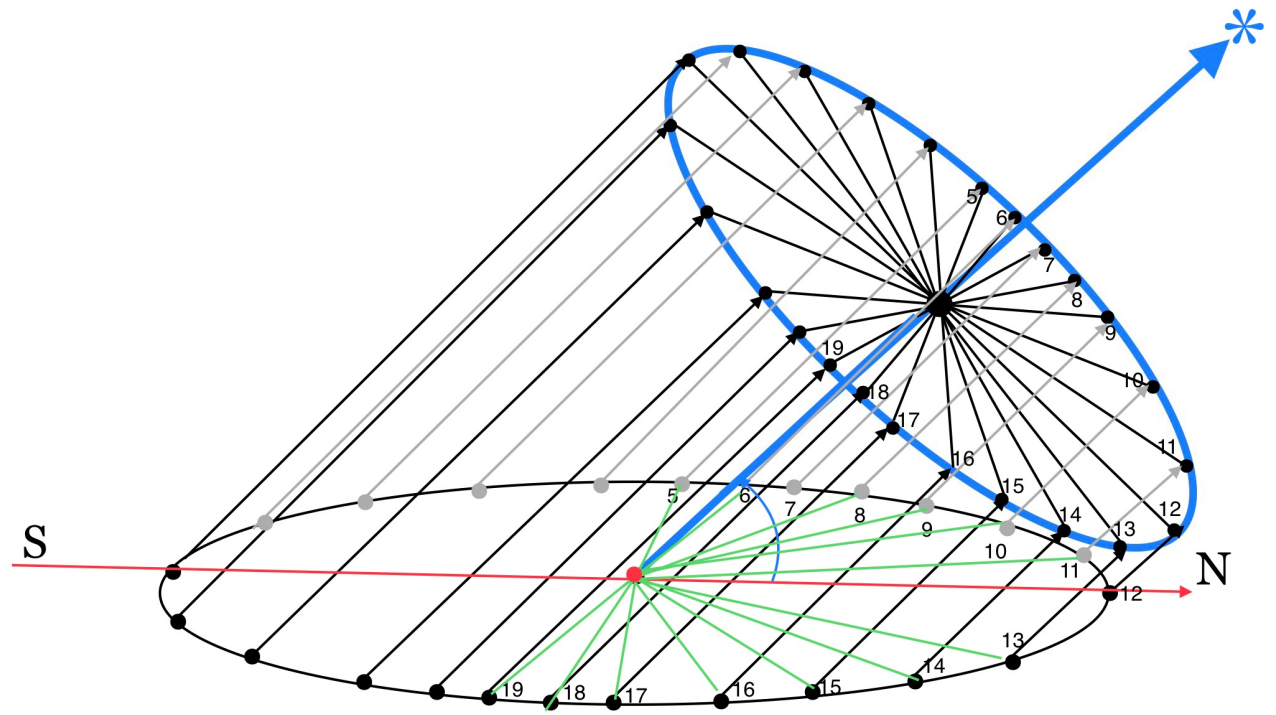
© Alfonso Pastor-Moreno

Modo de utilizar la Plantilla para soportar el Gnomon con el ángulo de inclinación correcto.



Reloj de Sol Horizontal trazado proyectando un Reloj de Sol Equinoccial

Nota: En esta figura, tanto el ángulo de inclinación del Eje Terrestre como las separaciones de las horas en el Plano del Reloj de Sol Equinoccial y sus proyecciones sobre el Plano del Horizonte, no están hechos a escala, si no que son arbitrarias. Solo se muestran para servir como ejemplo.



Téngase en cuenta que la proyección de un círculo inclinado, sobre plano es una elipse.

Relojes de Sol Horizontales Analemmaticos

Proyectando un Reloj de Sol Equinoccial Ortogonalmente sobre
un Plano Horizontal se puede construir un Reloj de Sol
Horizontal Analemmatico,

Los Relojes de Sol Horizontales Analemmaticos

Sobre el uso del vocablo *Analemma*, véase la pagina 35 del presente trabajo.

Un *Instrumento Analemmatico*, es un Instrumento adecuado para medir la Altura del Sol sobre el Horizonte. (Dictionnaire Larousse en 7 vols. 1905).

Cuando proyectamos ortogonalmente sobre un Plano Horizontal un Reloj de Sol Equinoccial obtenemos un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico, que a diferencia de los otros tipos de Relojes de Sol Horizontales con Gnomon fijo inclinado, los Analemmaticos tienen un Gnomon movil, perpendicular al Plano Horizontal, que se sitúa a lo largo de la Linea Meridiana del Reloj Analemmatico y que debe de colocarse en una posición de acuerdo con la Declinación del Sol en el día en el que se hace la lectura de la hora.

Los Relojes de Sol Horizontales Analemmaticos fueron descritos por primera vez por le Sieur de Vaulezard, primero en un corto tratado: *Traicté ou usage du quadrant analématique , par lequel avec l'ayde de la lumière du soleil, on trouve en un instant sans ayguille aymantee la Ligne Meridienne*, publicado por él mismo en Paris en 1640.

Que posteriormente fue ampliado en otro tratado:

Traité de l'origine, démonstration, construction et usage du cadran analemmatique, Le Brun, Paris 1644

Sobre lo Relojes de Sol Analemmaticos además de estos dos tratados véase también:

The Analemmatic Sundial SourceBook editado por Frederick W Sawyer. en Edición Limitada en 2004, (y editado en disquete por la NASS)

Los **Relojes de Sol Analemmáticos**. tienen un **Gnomon Vertical** y no inclinado como lo tienen los Relojes Horizontales y no tienen lineas de horas, si no que tienen los puntos indicadores de las horas marcados sobre una elipse. El Gnomon Vertical de estos relojes no es fijo, ya que para indicar con precisión la hora, se debe desplazar su posición de acuerdo con la Declinación del Sol en el día de la observación. Las características principales de este tipo de Relojes de Sol son:

1. Su Elipse es el resultado de la proyección de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal.
2. El tamaño de la Elipse dependerá del tamaño del Circulo Ecuatorial del Reloj de Sol Equinoccial desde el que se proyecte.
3. La forma y características de la Elipse y la posición de los puntos de las horas situados sobre ella dependen de la Latitud del lugar para el que se proyecte el Reloj.
4. El lugar en donde se deberá situar cada día el Gnomon, vendrá determinado por la Declinación del Sol en el día de la observación.

Trazado de un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico

La Elipse y los puntos de las horas sobre la Elipse, se trazan proyectando con la inclinación adecuada el Circulo Horario de un Reloj de Sol Equinoccial sobre un Plano Horizontal. El ángulo entre plano del Reloj Equinoccial y el Plano Horizontal, llamado Altura de la Equinoccial (A_e) es el complemento de la Latitud φ del lugar:

Inclinación, con respecto al Horizonte del Plano del Reloj Equinoccial $A_e = (90^\circ - \varphi)$.

Como la proyección de un círculo inclinado sobre un plano, es una Elipse, de ello resultará que la Elipse del Reloj de Sol Analemmatico, es específica para cada ángulo de inclinación entre el Plano Horizontal y el Plano del Reloj Equinoccial y por lo tanto, la forma y dimensión de la Elipse dependen de la Latitud del lugar.

Los puntos de las horas sobre la Elipse resultan de la proyección sobre ella de los puntos de las horas del Circulo Horario del Reloj de Sol Equinoccial.

Los puntos de la Elipse correspondientes a las 6 y a las 18 horas, están en el eje mayor de la Elipse, que está alineado Este_Oeste. El punto de las 6 horas está al Oeste y el de las 18 horas al Este

El punto de la Elipse correspondiente a las 12 horas, apunta al Norte y está situado en la intersección de la Elipse con el eje menor, que está orientado sobre la Línea Norte_Sur, o Línea Meridiana, o de Mediodía.

La razón entre el eje menor y eje mayor de la Elipse viene dada por el seno de φ . (la Latitud del lugar)

Los puntos de las horas están trazados por la intersección de la Elipse con líneas que irradian todas de un mismo centro.

El ángulo θ entre las líneas que definen los puntos horarios y la línea de las 12 o Eje Menor, viene dado por la fórmula:

$$\tan \theta = \tan(15^\circ \times t) / \sin \varphi$$

donde t es el Tiempo en horas desde antes o desde después del Mediodía Solar Verdadero (las 12 horas de Hora Solar Verdadera)

El Gnomon Vertical, no está situado en el centro de la Elipse, si no que para indicar la hora correctamente debe desplazarse a lo largo del eje menor a una distancia (Y) del centro:

$$Y = W \cos \varphi \tan \delta$$

Donde:

Y es la distancia al centro medida a lo largo del Semieje Menor de la Elipse.

W es el Semieje Menor de la Elipse

φ es la Latitud del lugar.

δ es la Declinación del Sol en el día de la observación.

La Declinación del Sol tiene un valor de $\delta = 0$ en los Equinoccios y de $\pm 23,44^\circ$ en los Solsticios de Cancer (Junio) y de Capricornio (Diciembre).
(Véase la Tabla adjunta y la tabla del Apéndice)

Declinación del Sol

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Declinacion	-23.13	-17.3	-8	4.25	15	22	23.00	18	8.50	-2.9	-14	-21.7
Declinación del Sol en el primer día de cada mes												

Al igual que ocurre con la mayoría de los relojes solares, los Relojes de Sol Analemmáticos indican Tiempo Solar Verdadero, y para obtener de ellos la Hora Civil es preciso hacer las correspondientes correcciones sobre la hora indicada por el reloj. (Para las correcciones véase el Apéndice)

El uso del adjetivo "Analemmático" para describir este tipo de Relojes de Sol puede inducir a error, porque en su trazado no se hace uso para nada de la Ecuación de Tiempo ni del Analemma de Vitruvio. Su nombre se refiere a su similitud con un instrumento Analemmático.

No hay que confundir este tipo de Relojes de Sol con los llamados Relojes de Sol Equinocciales que tienen un Gnomon con la forma de la Lemniscata de la Ecuación de Tiempo, (mal llamada Analemma).

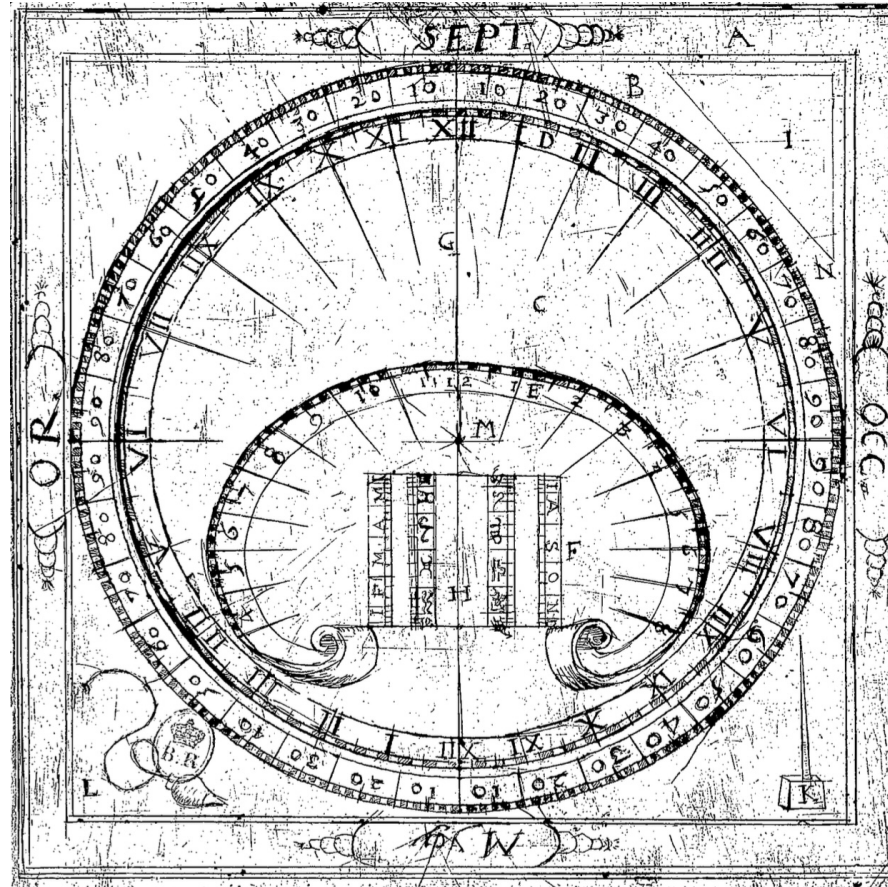
En los Relojes de Sol Analemmáticos, el Gnomon se debe desplazar en línea recta sobre el Eje Menor de la Elipse y no sobre una curva lemniscata con la Ecuación de Tiempo (mal llamada Analemma), como se puede ver en algunos relojes de este tipo trazados por personas desconocedoras de su principio fundamental, que es la Declinación del Sol y no la Ecuación de Tiempo.

El Reloj de Sol situado frente a la iglesia de Brou en Bourg-en-Bresse, (Francia), es un ejemplo del uso erróneo de la lemniscata de la Ecuación de Tiempo en la construcción de un Reloj de Sol Analemmático.

Daniel. Rohr afirma que "El gnomon se debe de desplazar en el eje meridiano de la elipse sin variación Este_Oeste. La presencia aquí de la curva en forma de ocho es un error"

Véase: René R. J. Rohr. Sundials History Theory and Practice University of Toronto Press. 1970, p. 101

Figura del Reloj de Sol Horizontal Analemmatico del libro de Vaulezard.



Vaulezard. *Traicté ou usage du quadrant analématique, par lequel avec l'ayde de la lumière du soleil, on trouve en un instant sans ayguille aymentee la Ligne Meridienne*, publicado por él mismo en Paris en 1640. Figura entre las paginas 1 y 2 del libro.

Trazado de un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico

Construcción de un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico, proyectando un Reloj de Sol Equinoccial Ortogonalmente sobre un Plano Horizontal según la presentación hecha en la Universidad de Lyon, sobre la cual desconozco el autor.

Presentación: Modo de trazar un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico

Traducción y adaptación por Alfonso Pastor-Moreno de la presentación

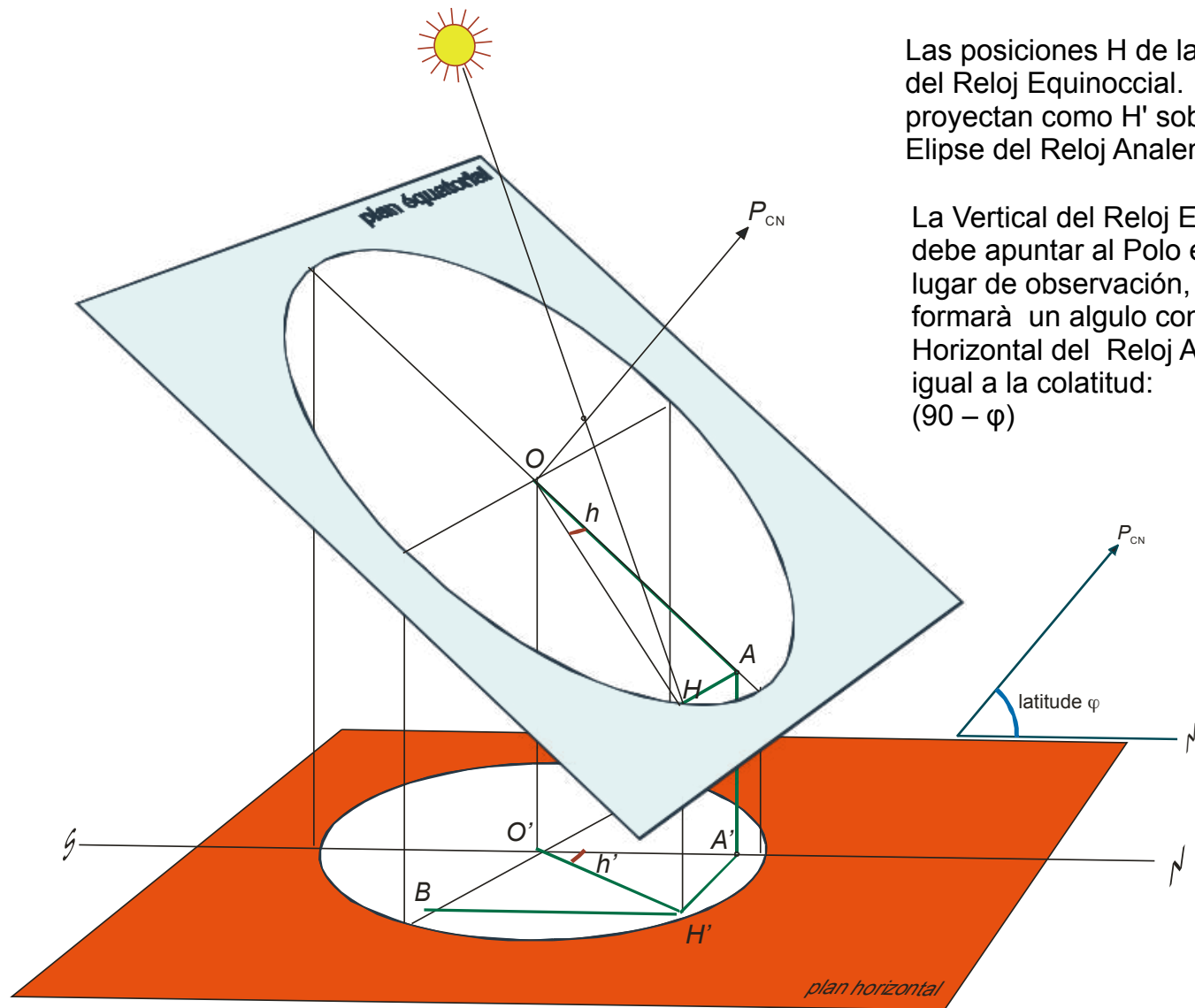
Le cadran analemmatic-tac

https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/fc/Ateliers_archives/ateliers_2007-08/cadanalem.ppt

Para hacer un Reloj de Sol Analemmatico se proyecta un Reloj de Sol Equinoccial, ortogonalmente sobre un Plano Horizontal

Siendo φ la Latitud del lugar, el Reloj Equinoccial se proyecta sobre el Plano Horizontal con una inclinación igual al complemento de la Latitud ($90^\circ - \varphi$).

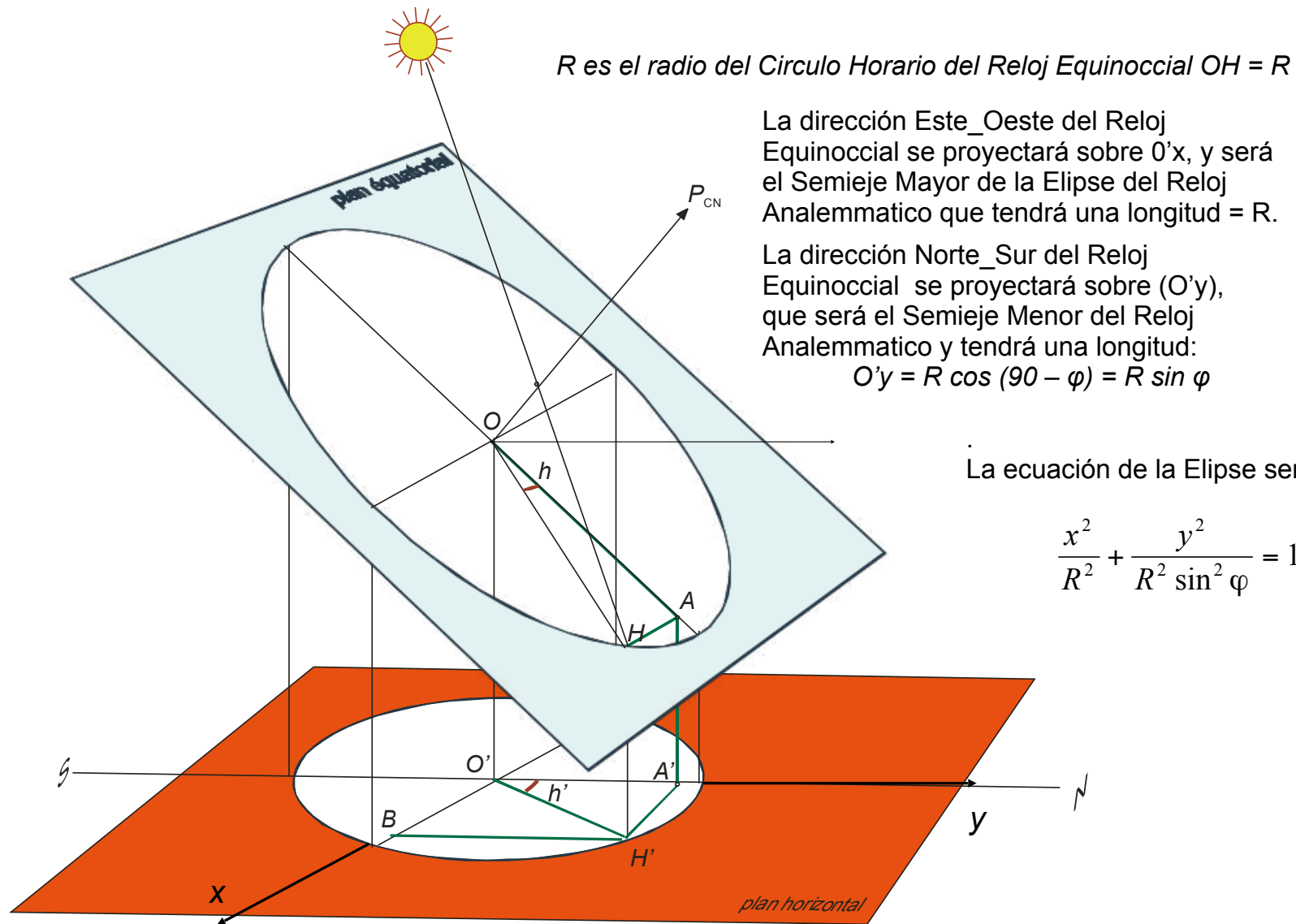
La proyección del Circulo Horario del Reloj Equinoccial sobre un Plano Horizontal será una Elipse.

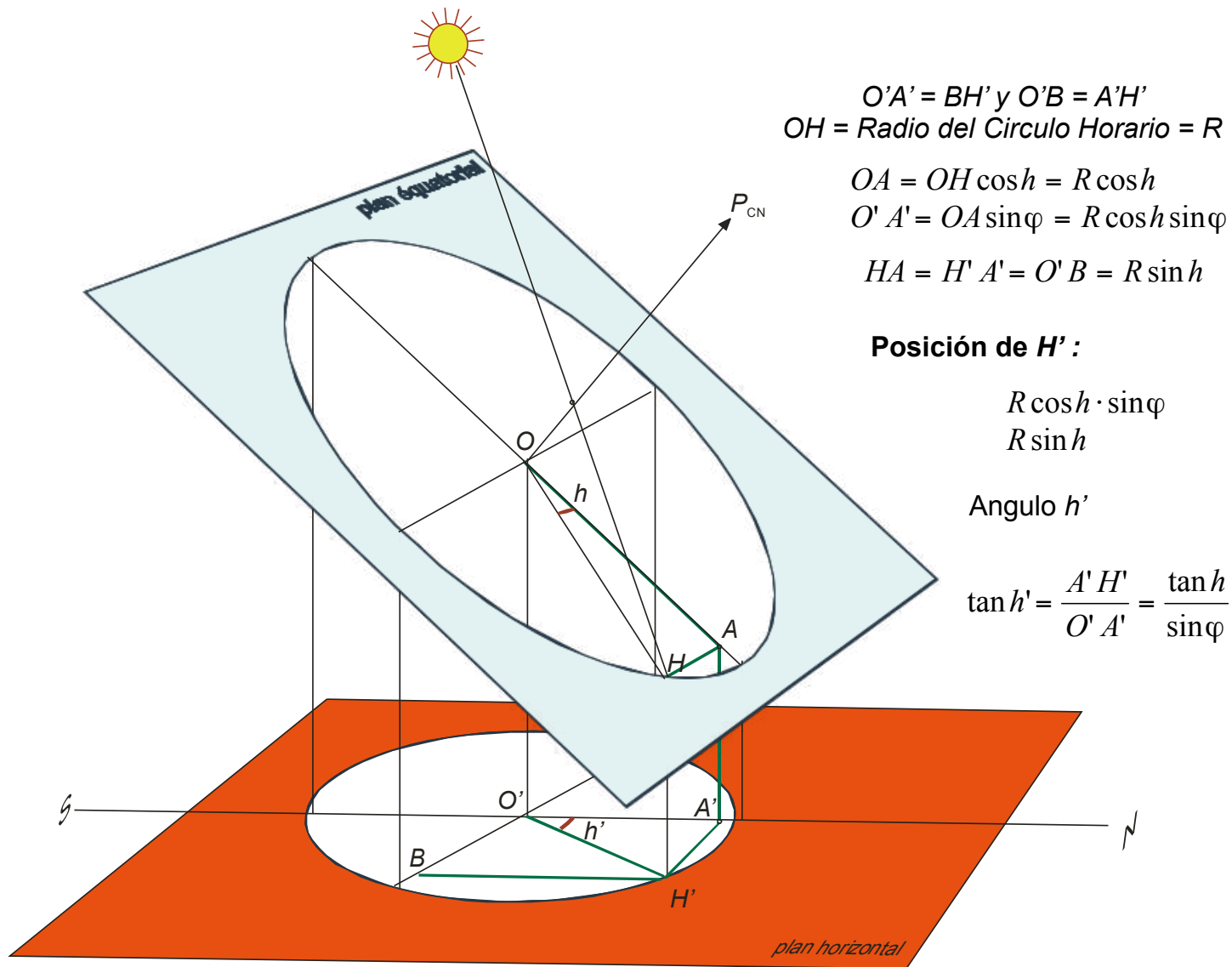


Las posiciones H de las horas del Reloj Equinoccial. se proyectan como H' sobre la Elipse del Reloj Analemático.

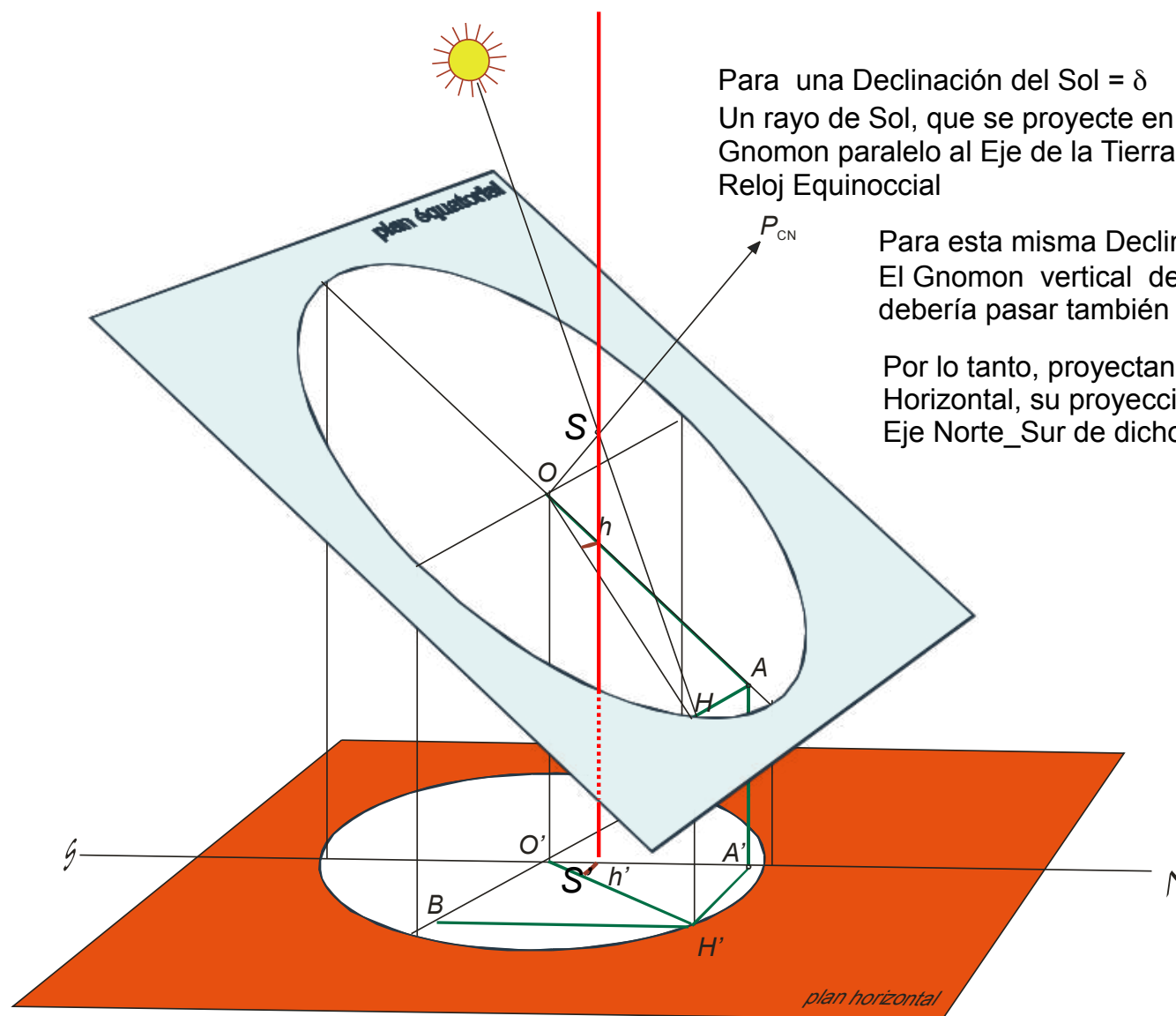
La Vertical del Reloj Equinoccial. debe apuntar al Polo elevado del lugar de observación, por lo formará un ángulo con el Plano Horizontal del Reloj Analemático igual a la colatitud: $(90 - \varphi)$

La Elipse Proyectada y la Proyección de las Horas (H) sobre (H')





**Una vez proyectadas las Horas (H) sobre (H') sobre la Elipse,
se calcula la posición del Gnomon (S) y se proyecta sobre (S')**



Para una Declinación del Sol = δ

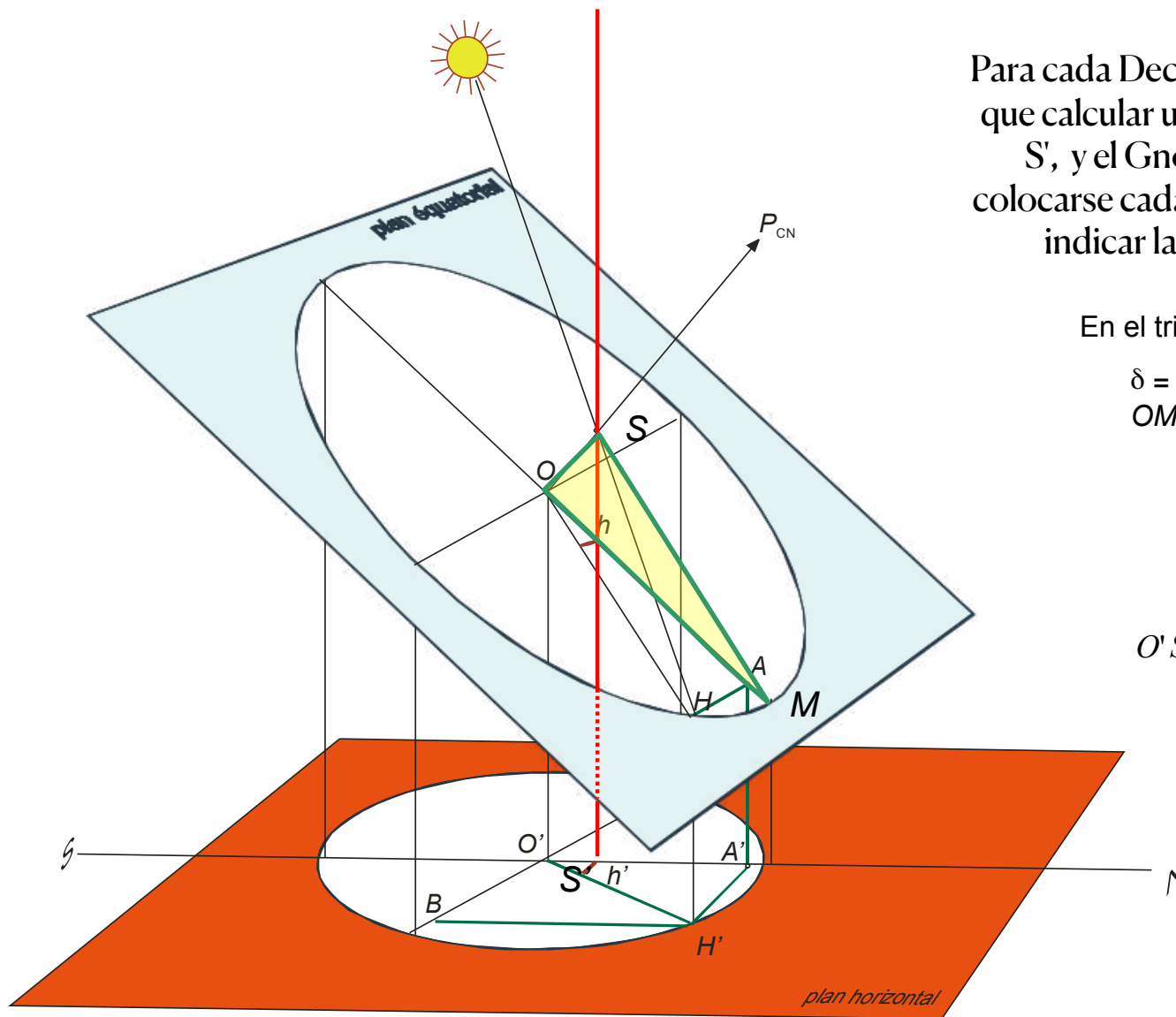
Un rayo de Sol, que se proyecte en H pasará por un punto S de un Gnomon paralelo al Eje de la Tierra y perpendicular al plano del Reloj Equinoccial

Para esta misma Declinación = δ

El Gnomon vertical del Reloj Analemático debería pasar también por S .

Por lo tanto, proyectando S , sobre el Plano Horizontal, su proyección estará sobre el Eje Norte_Sur de dicho plano y será S' .

Como la posición del Gnomon proyectado sobre (S') depende de la Declinación del Sol, esta posición se deberá ir desplazando cada día según sea la Declinación del Sol en el día de la observación. Con ese fin, el Eje Menor del Reloj Analemmático está graduado en fechas, para poder colocar el Gnomon en la fecha correspondiente.



Para cada Declinación del Sol = δ , habrá que calcular una posición distinta para S', y el Gnomon Vertical, deberá colocarse cada vez en esa posición para indicar la hora correctamente

En el triangulo OSM :

δ = ángulo OMS
 $OM=R$;

$$OS = R \tan \delta$$

Proyección de S sobre S' en el Eje Norte_Sur:

$$O'S' = OS \cos \varphi = R \tan \delta \cdot \cos \varphi$$

Siendo R el radio del Circulo Horario del Reloj de Sol Equinoccial.

Fin de la Presentación: Trazado de un Reloj de Sol Horizontal Analemmatico

Traducción y adaptación por Alfonso Pastor-Moreno de la presentación

Le cadran analemmatic-tac

https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/fc/Ateliers_archives/ateliers_2007-08/cadanalem.ppt

Apéndices

Conversión de la Hora Solar en Hora Civil

Tablas de la Ecuación de Tiempo y de la Declinación del Sol.

Algunos ángulos de inclinación del Eje de la Tierra, (Altura de Polo) calculados por Vitruvio con la relación g / L .

Conversión de la Hora Solar en Hora Civil

La hora indicada por un Reloj de Sol no es la Hora Civil.

Los Relojes de Sol, tanto los de Azimut, como los de Altura, indican Tiempo Solar Verdadero Local, llamado también Tiempo Solar Aparente, por lo que la hora indicada por un Reloj de Sol, no coincide con la Hora Civil Oficial de la localidad en donde está situado el Reloj de Sol.

Antiguamente, la hora que indicaban los relojes de Sol, es decir, el Tiempo Solar Verdadero, era la Hora Oficial de la localidad en donde estaba situado el Reloj de Sol. La vida de los habitantes de la localidad se regulaba con el Sol y cada localidad tenía su propio estándar de Tiempo. Posteriormente, las Horas Oficiales de cada país se estandarizaron con el establecimiento de los Husos Horarios cuyo patrón de medida era el Tiempo Solar Medio. Actualmente, el patrón de medida de Tiempo está basado en el indicado por los Relojes Atómicos, que además se modifica por decisiones políticas, como es la elección del Huso Horario de Referencia, o el adelanto de la hora en Verano o su atraso en Invierno, o los segundos que se añaden o se quitan cada año.

Para que la hora indicada por un Reloj de Sol coincida con la Hora Oficial, es necesario aplicarle ciertas correcciones a la hora que indica el Reloj, salvo que el Reloj de Sol se haya diseñado específicamente para que indique la Hora Civil Oficial.

Un reloj de Sol diseñado de modo que indique directamente la Hora Civil Oficial, es un engendro totalmente desvirtuado en su finalidad, puesto que no indica Tiempo Solar Verdadero, si no la Hora Oficial sujeta a las arbitrariedades de los políticos. La realidad es que para saber la Hora Civil Oficial, es mucho mas practico utilizar un reloj barato del tipo de los de cuarzo, en vez de construir un complicado reloj de Sol que indique la Hora Civil, ya que por alguna decisión política ese Reloj de Sol, puede dejar de ser útil y quedar inservible para siempre, como ya ocurrió con todos los relojes de este tipo que se hicieron antes del establecimiento de los Husos Horarios.

Sin embargo, un Reloj de Sol que indique Tiempo Solar Verdadero, será valido ayer hoy y mañana, como ocurre con los Relojes de Sol de la Epoca de los Romanos. Tales Relojes, no estarán sujeto a las decisiones arbitrarias de los políticos de turno. Por eso hoy podemos todavía leer con precisión la hora en Tiempo Solar Verdadero, en relojes que se construyeron hace miles de años, siempre que estén orientados correctamente.

Conversión de la hora indicada por un Reloj de Sol en Hora Civil.

Como hemos dicho, la hora indicada por un Reloj de Sol, no es la Hora Civil Oficial, pero podemos convertirla aplicando dos correcciones:

a).- **Corrección por Longitud Geográfica.** Esta corrección se aplica por la diferencia en Longitud Geográfica entre el Meridiano de Referencia para el Huso Horario Oficial y el Meridiano Local en donde está situado el Reloj y una vez calculada, es válida para todos los Relojes de Sol que estén situados en el mismo Meridiano de Longitud Geográfica.

La Longitud, para las localidades situadas al Este del Meridiano de Referencia se considera Positiva (+) y para las localidades situadas al Oeste, se considera Negativa (–) y la diferencia en Tiempo se calcula a razón de 4 minutos de Tiempo por cada grado de diferencia en Longitud.

b).- **Conversión del Tiempo Solar Verdadero en Tiempo Solar Medio. La Ecuación de Tiempo.** Permite convertir el Tiempo Solar Verdadero en Tiempo Solar Medio. Los valores de la Ecuación de Tiempo, se pueden obtener de tablas y es aunque ese valor es distinto para cada día del año, se repite en un largo periodo de años, por lo que la misma tabla será válida durante muchos años, es por que muchos Relojes de Sol tienen esa tabla grabada en su dial.

Los Relojes de Sol de Gnomon Analemático, tal como los patentados por L. Miiflin en Pensilvania en 1867 y por el General John Rider Oliver en Londres en 1892, corrigen la Hora Solar según la Ecuación de Tiempo y dan la hora directamente en Tiempo Solar Medio, gracias a un Gnomon cortado con la forma de la Lemniscata de la Ecuación de Tiempo.

Este tipo de relojes que fueron patentados en el siglo XIX y que por lo tanto en el siglo XX vencidas las patentes, eran ya de dominio público, fueron "reinventados" en 2001 por Juan Vicente Perez Ortiz, a quien para más inri se le concedió la patente española ES 1 047 272U, para ese mismo tipo de relojes.

Quizás debería alguien probar a patentar de nuevo la pólvora, a lo mejor le concedían también una nueva patente y quizás además le nombraban académico por "inventarla".

Ejemplos de Conversión por diferencia de Longitud Geográfica de la Hora indicada por un Reloj de Sol en Hora de Greenwich.

Madrid. Las Coordenadas Geográficas de Madrid son: $40^{\circ}25'0''$ N, $3^{\circ}42'9''$ W, (en Decimal= 40.416667° , -3.7025°), por lo que a la posición Geográfica de Madrid, le correspondería el Huso Horario Zulu (UTC 00:00), cuyo Meridiano Central de Referencia es el de Greenwich, de Longitud = $\pm 0^{\circ}$. (Por lo tanto CET = UTC + ($15^{\circ} \times 4$ minutos) = UTC + 60 minutos)

Sin embargo, los políticos han decidido, asignarle a Madrid la Hora Oficial del Huso Horario Charly,: CET 00:00 = UTC+1h, durante el horario estándar y UTC+2h durante el horario de verano, cuyo Meridiano Central de Referencia no está en Madrid, si no que es el que pasa por Stargard, casi en la frontera entre Polonia y Alemania, que tiene de Longitud = -15° .

Aquí vamos a pasar de los políticos, y vamos a calcular la diferencia entre la Hora Solar Verdadera y su ajuste por diferencia en Longitud Geográfica entre el Meridiano de Madrid y el Meridiano de Referencia de la Zona Zulu (UTC = 0),

Como Madrid está al Oeste de Greenwich, esa diferencia es igual a -3.7025° , que a razón de 4 minutos por grado con respecto a UTC, los Relojes de Sol de Madrid tendrán siempre un atraso de : $-3.7025^{\circ} \times 4 \text{ min} = -14.81 \text{ minutos} = -14 \text{ minutos } 48.36 \text{ segundos}$ con respecto a la Hora UTC.

Esa diferencia de Tiempo con Greenwich, será siempre constante para todos los Relojes de Sol situados en el Meridiano de Madrid.

Valencia. Es el mismo caso de Madrid en cuanto al Huso Horario.

Las Coordenadas Geográficas de Valencia son: $39^{\circ}28'12''$ N, $0^{\circ}22'35''$ W, (en decimal 39.47° , -0.376389°)

Por lo tanto, como Valencia está al Oeste de Greenwich, la diferencia en Longitud Geográfica entre el Meridiano de Valencia y el Meridiano de Referencia de la Zona Zulu (UTC= 0), es igual a -0.376389° ; que a razón de 4 minutos por grado con respecto a UTC, los Relojes de Sol en Valencia tendrán siempre un atraso de $-0.376389^{\circ} \times 4 \text{ min} = -1.505556 \text{ minutos} = -1 \text{ minuto } 30.20 \text{ segundos}$.

Esa diferencia de Tiempo con Greenwich, será siempre constante para todos los Relojes de Sol situados en el Meridiano de Valencia

Conversión de la Hora de Tiempo Solar Verdadero, en Tiempo Solar Medio.

Los Relojes de Sol indican la hora en Tiempo Solar Verdadero y la Hora Civil Oficial está basada en Tiempo Solar Medio, por lo tanto, para establecer una correspondencia entre la Hora indicada por el Reloj de Sol, debemos convertir el Tiempo Solar Verdadero, en Tiempo Solar Medio.

Esta conversión se realiza por medio de la Ecuación de Tiempo, cuyos valores son distintos para cada día del año, sin embargo, para un mismo día, su valor es el mismo en cualquier lugar del Mundo. Por lo tanto, en ese día, todos los Relojes de Sol del Mundo, necesitarán la misma corrección entre el Tiempo Solar Verdadero y el Tiempo Solar Medio, que vendrá dada por la Ecuación de Tiempo.

El valor, de la Ecuación de Tiempo, se puede obtener por calculo, o por tablas. En este trabajo, no procede exponer el modo de obtenerla por calculo, por lo que lo obtendremos a partir de alguna tabla con los valores medios de la Ecuación de Tiempo, como la mostrada en la pagina 9 de este trabajo.

Los valores de la Ecuación de Tiempo tienen una variación muy pequeña de un año a otro, por lo que las tablas son validas para un largo periodo de años.

Veamos un Ejemplo de Conversión de la Hora indicada por un Reloj de Sol, en Tiempo Solar Medio.

El día 3 de Noviembre, la lectura de un Reloj de Sol, una vez efectuada la correspondiente corrección por diferencia de Longitud, es de 13h 35m.

Consultada la Tabla de la Ecuación de Tiempo, vemos que ese día la diferencia entre el Sol Verdadero y el Sol Medio es de $-16' 23''$.

Por lo tanto, el Sol Verdadero, está adelantado $16' 23'$ sobre el Sol Medio, por lo que a la hora indicada por Reloj de Sol habrá que restarle el valor indicado en la tabla de $-16' 23'$.

Para saber la Hora Solar Media, a la indicación del Reloj de 13h 35m, habrá que restarle $16' 23'$, con lo cual el día 3 de Noviembre,, cuando el Reloj de Sol está indicando:

13h 35m, de Tiempo Solar Verdadero, son en realidad las 13h 19m de Tiempo Solar Medio UTC.

Una vez efectuadas las correcciones correspondientes, la lectura del Reloj de Sol, es decir, la Hora en Tiempo Solar Verdadero, la hemos convertido en Tiempo GMT. (Tiempo Medio de Greenwich), que es el del Huso Horario Zulu, o (UTC = 0). A esa hora, se le añade la diferencia ente la Hora Zulu y la Hora Charly y la del horario de verano, si procede, y tendremos la Hora Civil Oficial, con lo que un Reloj de Sol de Tiempo Solar Verdadero, volverá a ser útil para indicar la Hora Oficial.

Tabla de la Ecuación de Tiempo y de la Declinación del Sol

Tabla de la Ecuación de Tiempo (EoT) y la Declinación del Sol

Tabla de la Ecuación de Tiempo (Valores medios para un ciclo de 4 años entre bisiestos).
Columna. 1 : Fecha Día/Mes
Columna. 2 : Ecuación de Tiempo en Minutos y segundos.
Columna. 3 : Sol Verdadero Adelantado (A) o Retrasado (R) sobre el Sol Medio.
Columna. 4 : Declinación del Sol en grados y minutos.
(Negativa cuando el Sol está al Sur del Ecuador y Positiva cuando está al Norte),
Alfonso Pastor-Moreno

Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'	Fecha D/M	m.s.	A/R	d°.m'
01/01	03.12	R	-23.04	01/02	13.33	R	-17.20	01/03	12.34	R	-07.49	01/04	04.08	R	04.18	01/05	02.51	A	14.54	01/06	02.25	A	21.58	01/07	03.33	R	23.09
02/01	03.40	R	-22.59	02/02	13.41	R	-17.03	02/03	12.23	R	-07.26	02/04	03.50	R	04.18	02/05	02.59	A	15.12	02/06	02.16	A	22.06	02/07	03.45	R	23.05
03/01	04.08	R	-22.54	03/02	13.48	R	-16.46	03/03	12.11	R	-07.03	03/04	03.32	R	05.05	03/05	03.06	A	15.30	03/06	02.06	A	22.14	03/07	03.57	R	23.01
04/01	04.36	R	-22.48	04/02	13.55	R	-16.28	04/03	11.58	R	-06.40	04/04	03.14	R	05.28	04/05	03.12	A	15.47	04/06	01.56	A	22.22	04/07	04.19	R	22.33
05/01	05.03	R	-22.42	05/02	14.01	R	-16.10	05/03	11.45	R	-06.17	05/04	02.57	R	05.51	05/05	03.18	A	16.05	05/06	01.46	A	22.25	05/07	04.29	R	22.45
06/01	05.30	R	-22.36	06/02	14.06	R	-15.52	06/03	11.31	R	-05.54	06/04	02.40	R	06.13	06/05	03.23	A	16.22	06/06	01.36	A	22.35	06/07	04.39	R	22.46
07/01	05.57	R	-22.28	07/02	14.10	R	-15.34	07/03	11.17	R	-05.30	07/04	02.23	R	06.36	07/05	03.27	A	16.39	07/06	01.25	A	22.42	07/07	04.49	R	22.47
08/01	06.23	R	-22.21	08/02	14.14	R	-15.15	08/03	11.03	R	-05.07	08/04	02.06	R	06.59	08/05	03.31	A	16.55	08/06	01.14	A	22.47	08/07	04.59	R	22.53
09/01	06.49	R	-22.13	09/02	14.16	R	-14.56	09/03	10.48	R	-04.44	09/04	01.49	R	07.21	09/05	03.35	A	17.12	09/06	01.03	A	22.53	09/07	05.09	R	22.58
10/01	07.14	R	-22.05	10/02	14.18	R	-14.37	10/03	10.33	R	-04.20	10/04	01.32	R	07.43	10/05	03.38	A	17.27	10/06	00.51	A	22.58	10/07	05.19	R	23.02
11/01	07.38	R	-21.56	11/02	14.19	R	-14.18	11/03	10.18	R	-03.57	11/04	01.16	R	08.07	11/05	03.40	A	17.43	11/06	00.39	A	23.02	11/07	05.29	R	23.07
12/01	08.02	R	-21.47	12/02	14.20	R	-13.58	12/03	10.02	R	-03.33	12/04	01.00	R	08.28	12/05	03.42	A	17.59	12/06	00.27	A	23.07	12/07	05.39	R	23.11
13/01	08.25	R	-21.37	13/02	14.19	R	-13.38	13/03	09.46	R	-03.10	13/04	00.44	R	08.50	13/05	03.44	A	18.14	13/06	00.15	A	23.11	13/07	05.49	R	23.14
14/01	08.48	R	-21.27	14/02	14.18	R	-13.18	14/03	09.30	R	-02.46	14/04	00.29	R	09.11	14/05	03.44	A	18.29	14/06	00.03	A	23.14	14/07	05.59	R	23.17
15/01	09.10	R	-21.16	15/02	14.16	R	-12.58	15/03	09.13	R	-02.22	15/04	00.14	R	09.33	15/05	03.44	A	18.43	15/06	00.10	R	23.17	15/07	06.09	R	23.20
16/01	09.32	R	-21.06	16/02	14.13	R	-12.37	16/03	08.56	R	-01.59	16/04	00.01	A	09.54	16/05	03.44	A	18.58	16/06	00.23	R	23.20	16/07	06.19	R	23.22
17/01	09.52	R	-20.54	17/02	14.10	R	-12.16	17/03	08.39	R	-01.35	17/04	00.15	A	10.16	17/05	03.43	A	19.11	17/06	00.36	R	23.22	17/07	06.29	R	23.24
18/01	10.12	R	-20.42	18/02	14.06	R	-11.55	18/03	08.22	R	-01.11	18/04	00.29	A	10.37	18/05	03.41	A	19.25	18/06	00.49	R	23.24	18/07	06.39	R	23.25
19/01	10.32	R	-20.30	19/02	14.01	R	-11.34	19/03	08.04	R	-00.48	19/04	00.43	A	10.58	19/05	03.39	A	19.38	19/06	01.02	R	23.25	19/07	06.49	R	23.26
20/01	10.50	R	-20.18	20/02	13.55	R	-11.13	20/03	07.46	R	-00.24	20/04	00.56	A	11.19	20/05	03.37	A	19.51	20/06	01.15	R	23.26	20/07	06.59	R	23.27
21/01	11.08	R	-20.05	21/02	13.49	R	-10.52	21/03	07.28	R	00	21/04	01.00	A	11.39	21/05	03.34	A	20.04	21/06	01.28	R	23.26	21/07	07.09	R	23.27
22/01	11.25	R	-19.52	22/02	13.42	R	-10.30	22/03	07.10	R	00.24	22/04	01.21	A	11.59	22/05	03.30	A	20.16	22/06	01.41	R	23.26	22/07	07.19	R	23.28
23/01	11.41	R	-19.38	23/02	13.35	R	-10.08	23/03	06.52	R	00.47	23/04	01.45	A	12.2	23/05	03.24	A	20.28	23/06	01.54	R	23.26	23/07	07.29	R	23.29
24/01	11.57	R	-19.24	24/02	13.27	R	-9.46	24/03	06.34	R	01.11	24/04	01.45	A	12.4	24/05	03.21	A	20.39	24/06	02.07	R	23.26	24/07	07.39	R	23.30
25/01	12.12	R	-19.10	25/02	13.18	R	-9.24	25/03	06.16	R	01.35	25/04	01.56	A	13	25/05	03.16	A	20.50	25/06	02.20	R	23.24	25/07	07.49	R	23.31
26/01	12.26	R	-18.55	26/02	13.09	R	-9.02	26/03	05.58	R	01.58	26/04	02.06	A	13.19	26/05	03.10	A	21.01	26/06	02.33	R	23.23	26/07	07.59	R	23.32
27/01	12.39	R	-18.40	27/02	12.59	R	-8.39	27/03	05.40	R	02.22	27/04	02.16	A	13.38	27/05	03.03	A	21.12	27/06	02.45	R	23.21	27/07	08.09	R	23.33
28/01	12.51	R	-18.25	28/02	12.48	R	-8.17	28/03	05.21	R	02.45	28/04	02.26	A	13.58	28/05	02.56	A	21.22	28/06	02.57	R	23.19	28/07	08.19	R	23.34
29/01	13.03	R	-18.09	29/02	12.42	R	-8.03	29/03	05.02	R	03.09	29/04	02.35	A	14.16	29/05	02.49	A	21.31	29/06	03.09	R	23.16	29/07	08.29	R	23.35
30/01	13.14	R	-17.53	30/02	12.42	R	-8.03	30/03	04.44	R	03.32	30/04	02.43	A	14.35	30/05	02.41	A	21.41	30/06	03.21	R	23.13	30/07	08.39	R	23.36
31/01	13.24	R	-17.37	31/02	12.42	R	-8.03	31/03	04.26	R	03.55	31/04	02.43	A	14.35	31/05	02.33	A	21.50	31/06	03.21	R	23.13	31/07	08.49	R	23.37

**Algunos ángulos de inclinación del Eje de la Tierra, (Altura de Polo)
calculados por Vitruvio con la relación entre la longitud (g) de un Gnomon y
la longitud (L) de su sombra Equinoccial, en varias localidades de la
Antigüedad Clásica**

Algunos ángulos de inclinación del Eje de la Tierra, (Altura de Polo) calculados por la relación entre la longitud (g) de un Gnomon y la longitud (L) de su sombra Equinoccial, en varias localidades de la Antigüedad Clásica, según Vitruvio.

Vitruvio, en su "Opera Magna" de "Los Diez Libros de Arquitectura", en el Tomo IX, Capítulo VII, nos indica la siguiente relación (g/L), para algunas ciudades del orbe conocido en su época, que como curiosidad, reproducimos aquí.

Roma $g = 9$, $L = 8$

$$\tan (Ae) = g/L; Ae = \tan^{-1} (9/8) = 48.36646066343^\circ$$

$$\tan (\lambda) = 8/9; \lambda = \tan^{-1} (8/9) = (90^\circ - Ae) = (90^\circ - 48.36646066343^\circ) = 41.63353933657^\circ$$

(Según Wikipedia = 41.893333°)

Tarentum $g = 11$, $L = 9$. (Tarentum era un suburbio al Sur de Roma).

$$\tan (Ae) = 11/9; Ae = \tan^{-1} (11/9) = 50.710593137495^\circ$$

$$\tan (\lambda) = 9/11; \lambda = \tan^{-1} (9/11) = (90^\circ - Ae) = (90^\circ - 50.710593137495^\circ) = 39.289406862505^\circ$$

Atenas $g = 4$, $L = 3$;

$$\tan (Ae) = 4/3 = 1.333333333333; \tan^{-1} (1.333333333333) = 53.130102354149^\circ$$

$$\lambda \text{ Atenas} = (90^\circ - 53.130102354149^\circ) = 36.869897645851^\circ$$

(Según Wikipedia = 37.984167°)

Rodas $g = 7$, $L = 5$.

$$\tan (Ae) = 7/5 = 1.4; \tan^{-1} (1.4) = 54.462322208026^\circ$$

$$\lambda \text{ Rodas} = (90^\circ - 54.462322208026^\circ) = 35.537677791974^\circ$$

(Según Wikipedia = 36.17°)

Alejandro $g = 5$, $L = 3$.

$$\tan (Ae) = 5/3 = 1.666666666667; \tan^{-1} (1.666666666667) = 59.036243467932^\circ$$

$$\lambda \text{ Alejandro} = (90^\circ - 59.036243467932^\circ) = 30.963756532068^\circ$$

(Según Wikipedia = 31.1975°)

Nota: Las discrepancias entre las Latitudes reales y las calculadas con las relaciones indicadas por Vitruvio son debidas a que Vitruvio buscó que g y L fueran números enteros cuya razón diera el resultado mas próximo posible al real, pero no necesariamente exacto al real.

E s c o l i o 1

Cálculo de los ángulos solares

Marzo de 2024. Extraído de diversas fuentes. (Para las fuentes, consúltese el Apéndice 3)

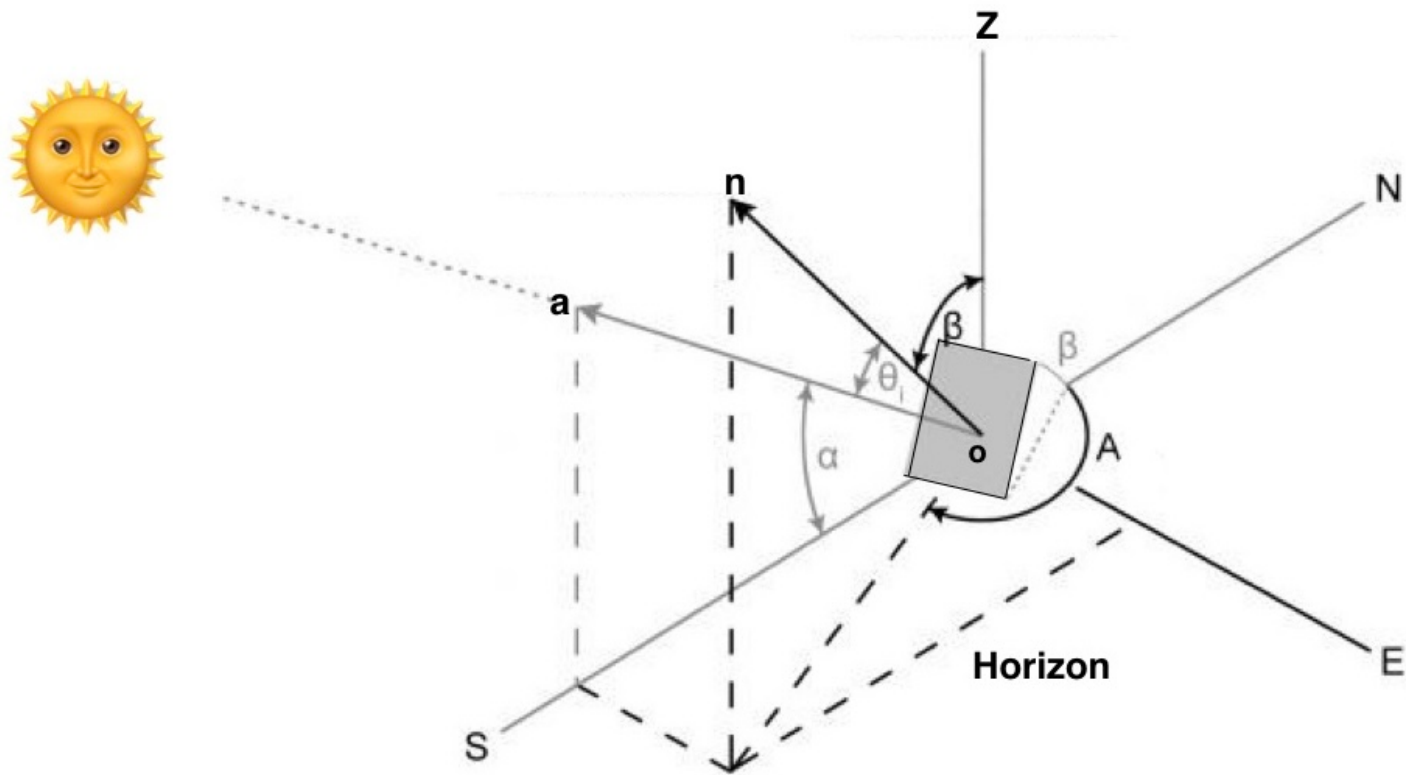


Figura de los ángulos solares en una superficie inclinada, encaráda a n y **NO** al Ecuador

Image credit ITACA. ©Dominio Publico.

Cálculo de los Angulos Solares.

El conocimiento de los Angulos Solares tiene una especial relevancia tanto para el calculo de los Relojes de Sol, como para el posicionamiento de los dispositivos de captura de los rayos solares para la generación de Energía Solar.

Los Angulos del Sol más importantes a considerar son:

[Ángulo de Declinación](#)

[Ángulo Horario](#)

[Ángulo de Altura](#)

[Ángulo de Acimut](#)

[Ángulo de Incidencia](#)

•

Angulo de Declinación del Sol.

Una ecuación sencilla para calcular el ángulo de Declinación del Sol (en radianes) en un día determinado es:

$$\delta = \{23.45 * (\pi / 180)\} \sin [2\pi \{(284+n) / 36.25\}] \quad (E.1)$$

Donde:

δ = Declinación del Sol (en radianes)

n = Número ordinal del día de la fecha de observación (n = 1 es el 1 de enero y siguiendo así)

(n. Se puede obtener de la Tabla del Apéndice 1, o por los algoritmos del Apéndice 2).

Para la declinación del Sol (δ) también puede usarse la Ecuación de Spencer (precisión 0.25°).

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(g) + 0.070257 \sin(g) - 0.006758 \cos(2g) + 0.000907 \sin(2g) - 0.002697 \cos(3g) + 0.001480 \sin(3g)$$

Siendo:

$$g = 2\pi (n-1) / 365$$

n = Número ordinal del día de la fecha de observación (n = 1 es el 1 de enero, el 15 de Enero n = 15, el 31 de Diciembre n = 365, y así se calculan todos)

El valor de n, depende del numero correspondiente al mes (m = 1÷12) y día (d = 1÷31), y se puede determinar o bien por un algoritmo o por una tabla. (Véanse los Apéndices 1 y 2)

En la mayoría de las ecuaciones indicadas en este texto, los ángulos deben expresarse en radianes, aunque en algunas de esas ecuaciones sea indiferente el utilizar grados o radiales.

Los símbolos utilizados en este trabajo son:

δ = Ángulo de Declinación del Sol (en radianes);

$\omega S.$ = Ángulo Horario del Sol

α = Ángulo de Altura del Sol.

A = Ángulo de Acimut del Sol

θ_i = Ángulo de incidencia del Sol en una superficie inclinada en un ángulo (β) con respecto a la horizontal.

β = Ángulo de inclinación de una superficie con respecto a la horizontal.

φ = Latitud del observador

ζ = Longitud del observador

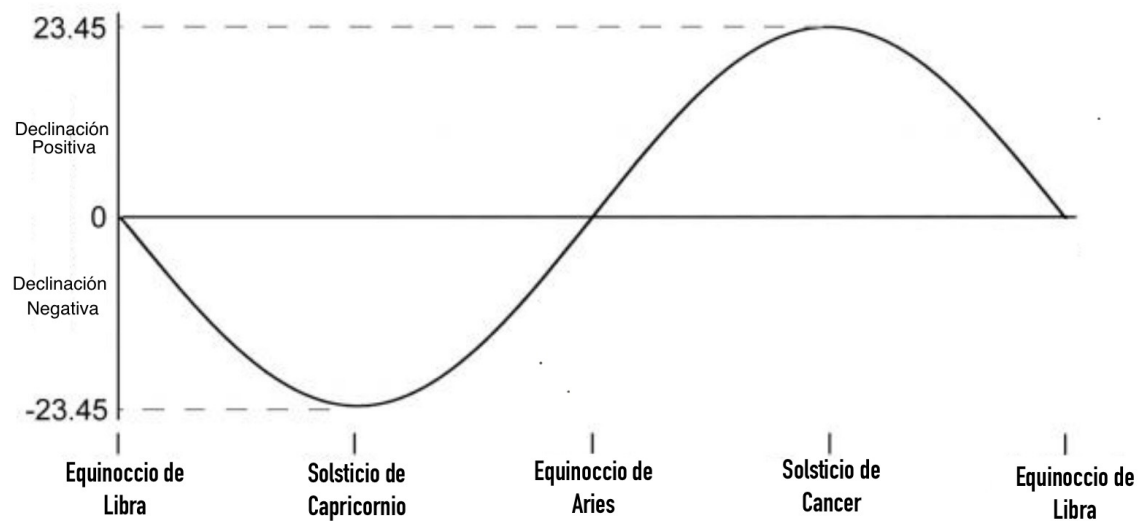
n = Número ordinal del día de la fecha de observación ($n = 1$ es el 1 de enero y siguiendo así)

Y = Fracción de Año

θ = Distancia del Sol al Zenith ($\theta = 90^\circ - \alpha$)

θ_i = Ángulo de desviación del vector desde el Sol a la Normal del Plano de Incidencia donde se proyecta el Sol

Variación del ángulo de Declinación del Sol a lo largo del año.



La figura muestra la variación del ángulo de Declinación (δ) del Sol, a lo largo de un año.

La declinación del Sol (δ) varía ligeramente de un año a otro, para la misma fecha del calendario.

Esto se debe a que el período en el que la Tierra completa toda una revolución alrededor del Sol, no coincide exactamente con el comienzo del año civil.

Por lo tanto, la declinación del Sol (δ) de una fecha de un año determinado, no coincide exactamente con la declinación del Sol (δ) de la misma fecha del calendario del año siguiente.

El ángulo de declinación del Sol (δ) en cualquier día es el mismo para todos los lugares de la Tierra.

Procedimiento para calcular la posición del Sol.

Método: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

Global Monitoring Division

U S A

Nota: En este método de NOAA, los cálculos de la **Salida/Puesta** y **Posición del Sol**, están basados en las ecuaciones de "Astronomical Algorithms" , de Jean Meeus.

Los resultados para la Salida y la Puesta del Sol, son teóricamente precisos con 1 minuto de aproximación para localidades entre +/- 72° de Latitud, y con 10 minutos de aproximación para localidades de Latitudes mas allá de ese rango. Sin embargo, debido a las variaciones en la composición atmosférica, la temperatura, la presión y otras condiciones, los valores calculados, pueden diferir de los observados.

Pasos para calcular la Posición del Sol:

Paso 1.-) Calculo de la fracción del año (Y) en radianes.

$$Y = (2\pi / 365) * (n - 1 + Hora - 12 / 24)$$

(Para los años bisiestos, úsease 366 en lugar de 365 en el denominador de la ecuación)

n es el número ordinal del día del año. (Véanse las tablas o utilícese un algoritmo para calcular n)
(Véanse los Apéndices)

Una vez que se ha calculado Y , se pueden hallar los siguientes parámetros:

1.1.-) Calculo de la Ecuación de Tiempo (EoT) (en minutos).

$$EoT = 229.18 * (0.000075 + 0.001868 \cos(Y) - 0.032077 \sin(Y) - 0.014615 \cos(2Y) - 0.040849 \sin(2Y))$$

1.2.-) Calculo del ángulo de Declinación del Sol (δ) (en radianes).

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(Y) + 0.070257 \sin(Y) - 0.006758 \cos(2Y) + 0.000907 \sin(2Y) - 0.002697 \cos(3Y) + 0.00148 \sin(3Y)$$

Paso 2.-) Calculo del Tiempo Solar Verdadero (TST).

2.1.-) Calcular la Diferencia Horaria (*Time Offset (TO)*) en minutos:

$$TO = EoT + 4 * Longitud - 60 * Zona Horaria$$

Nota: Si los signos se cambian a:

$$TO = EoT - 4 * Longitud + 60 * Zona Horaria,$$

se pueden expresar la *Longitud* y la *Zona Horaria* de la manera convencional.

EoT en minutos, *Longitud* en *grados* (Positiva al Este del Meridiano de Greenwich Negativa al Oeste),

Zona Horaria en Horas desde *UTC*. (Positiva al Este del Meridiano de Greenwich Negativa al Oeste),

(Por ejemplo: New York : 40.712778N, 74.006111W.

– 74.006111/15 = – 4.9337; U.S. Atlantic Standard Time = *UTC* – 5Horas).

2.2.-) Calcular el Tiempo Solar Verdadero (True Solar Time TST) , en minutos:

$$TST = hr * 60 + min + sc / 60 + TO$$

hr son Horas (0 - 23), *min* son minutos (0 - 59), *sc* son segundos (0 - 59).

2.3.-) Calcular el *Angulo Horario del Sol* (ωS) en grados:

$$\omega S = (TST / 4) - 180$$

.

Paso 4.-) Calculo del Angulo de Azimut del Sol.

4.1.-) **Angulo de Azimut del Sol A**, (en grados en sentido de las agujas del reloj desde el Norte) es:

$$\cos(180 - A) = (\sin(\varphi) \cos(\theta) - \sin(\delta)) / (\cos(\varphi) \sin(\theta))$$

(Nota: Como θ , es en grados en sentido de las agujas del reloj desde el Norte, en esta ecuación debería ser:

$\cos(A)$ y no $\cos(180 - A)$)

Cálculo del Amanecer y la Puesta del Sol.

Para el caso especial del Amanecer y la Puesta del Sol, el *Zenith* se considera a 90.833° , en vez de 90° , al aplicarle la corrección aproximada de la Refracción Atmosférica debida a la Posición del Sol en el Orto y en el Ocaso y la corrección por Paralaje, debida al tamaño del Disco Solar, cuando está en ambas posiciones.

El Angulo *Horario* (ωS) sería:

$$\pm \omega S = \pm \cos^{-1} \{ (\cos(90.833) / \cos(\varphi) \cos(\delta)) - (\tan(\varphi) \tan(\delta)) \}$$

El resultado *positivo* corresponde al *Amanecer*, y el *negativo* a la *Puesta del Sol*.

La hora UTC de *Salida* (*HS*) (o de la *Puesta del Sol* (*PS*)) en minutos es:

$$HS = 720 - 4 * (Longitud + \omega S) - EoT$$

Donde la *Longitud* y el *Angulo Horario* (ωS) son en grados y la *Ecuación de Tiempo* (*EoT*) es en minutos..

La hora de Salida (*HS*) y de Puesta del Sol (*PS*), para una localidad determinada se deducen de la Hora del Mediodía Solar (*MS*) y vienen dadas por:

La *Longitud* en grados, (positiva hacia el Este del Meridiano de Greenwich) y la *Ecuación de Tiempo* (*EoT*) (en minutos):

$$MS = 720 - 4 * Longitud - EoT$$

Nota: Otra vez es conveniente cambiar el signo de la *Longitud* a:

$$MS = 720 + 4 * Longitud - EoT$$

Para la Hora Local, añadir $60 * Zona Horaria$.

Cálculo de los ángulos solares.

Método: ITACA :

<http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-3-calculating-solar-angles>

Nota: Las figuras y fórmulas de este artículo han sido extraídas de Itaca: <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-3-calculating-solar-angles> , y están exentas de derechos de autor.

Angulo Horario del Sol.

El ángulo Horario del Sol (ω_S) es positivo durante la mañana, es igual a cero al Mediodía Solar y se hace cada vez más negativo a medida que avanza la tarde.

Para calcular el *Angulo Horario del Sol* se pueden usar las siguientes ecuaciones cuando se conocen, la *Declinación del Sol* (δ), la *Altura del Sol* (α) y el *Azimet del Sol* (A).
 δ cambia de un día a otro del año y α y A cambian a lo largo del día.

$$\text{sen } \omega_S = \cos \alpha \text{ sen } A / \cos \delta \quad (\text{E.2})$$

$$\text{sen } \omega_S = (\text{sen } \alpha - \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi) / (\cos \delta \cos \varphi) \quad (\text{E.3})$$

$$a = [(\cos \varphi) / (\text{sen } A \tan \beta)] + [(\text{sen } \varphi) / (\text{sen } A)] * b = \tan \delta [[(\cos \varphi) / (\tan A)] - [(\text{sen } \varphi) / (\text{sen } A \tan \beta)]]$$

Donde:

ω_s = Angulo Horario del Sol

α = Angulo de Altura del Sol

A = Angulo de Azimet del Sol

δ = Angulo de Declinación del Sol

φ = Latitud del observador.

Hay que tener en cuenta que en el Mediodía Solar, el Angulo Horario del sol es igual a cero y, dado que el Angulo Horario cambia a razón de 15° por hora, es sencillo calcular el Angulo Horario en cualquier momento del día.

Los Angulos Horarios del Sol en el Orto y en el Ocaso del Sol (ω_{SS} y ω_{SP}) tienen el mismo valor numérico, sin embargo, el ángulo del Orto es negativo, porque está antes del Mediodía Solar y el ángulo del Ocaso es positivo, porque está después del Mediodía Solar.

Ambos ángulos se pueden calcular haciendo $\alpha = 0$ en la ecuación (E.8):

$$\sin \alpha = (\sin \delta \sin \varphi) / (\cos \delta \cos \omega \cos \varphi). \quad (E.8)$$

En ese caso tendremos:

$$\cos \omega_S = -\tan \varphi \tan \delta \quad (E.4)$$

ω_S Se puede usar para calcular el número de horas de luz diurna (D_h) para un día en particular usando la siguiente ecuación,

$$D_h = (2\omega_S / 15) * (180 / \pi); \quad (\omega_S \text{ debe expresarse en radianes}). \quad (E.5)$$

En cualquier punto de la superficie de la Tierra, siempre hay 4380 horas de luz diurna por año (no bisiesto), que se distribuyen en días de mayor o menor duración a lo largo del año.

De la ecuación (E.4), se deduce, que más allá de $\varphi = \pm 66.55^\circ$ (Círculos Polares),
 $(\tan \delta - \tan \varphi) \geq 1$ no hay Ocaso, i.e. hay 24 horas de luz diurna durante 182.5 días.
 $(\tan \delta - \tan \varphi) \leq -1$ no hay Orto, i.e. hay 24 horas de oscuridad durante 182.5 días.

Ángulos de Aparición y de Desaparición del Sol ($\omega'S$ y $\omega'P$) sobre una superficie.

Si una superficie está inclinada con respecto a la horizontal, el Sol puede elevarse sobre su borde después de haberse elevado sobre el horizonte, por lo que la superficie puede darse sombra a si misma durante algún momento del día.

Los ángulos de Aparición y de Desaparición del Sol ($\omega'S$ y $\omega'P$) sobre una superficie inclinada (β) con respecto al Horizonte y encarada al Ecuador, (Es decir, en el Hemisferio Norte apuntando al Sur), vienen dados por:

$$\cos \omega'S = -\tan(\varphi - \beta) \tan \delta \quad (E.6)$$

(β = es el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al Horizonte)

La ecuación (E.6) indica el ángulo en el que el Sol se eleva sobre la superficie inclinada.

Si el resultado de (E.6) indica que el Sol se ha elevado sobre el borde de la superficie antes de que haber aparecido sobre el horizonte, es obviamente incorrecto y se debe hacer una comprobación para encontrar el valor real del ángulo al amanecer sobre el plano inclinado ($\omega\theta$):

$$\omega\theta = \min(\omega'S, \omega'P)$$

Téngase en cuenta que para una superficie de cara hacia el Ecuador, los ángulos de Aparición y Desaparición del Sol sobre la superficie siguen siendo numéricamente iguales, siendo el ángulo de Aparición positivo y el ángulo de Desaparición negativo. Cuando una superficie está inclinada con respecto al Horizonte, pero no está encarada hacia el Sur, el cálculo de los ángulos de Aparición y de Desaparición del Sol sobre los bordes de la superficie es complejo. El esquema de dicha superficie se muestra en la figura de la primera pagina.

Para tal superficie, los ángulos de Aparición y de Desaparición del Sol ($\omega'S$) NO serán numéricamente iguales y se pueden calcular por el siguiente procedimiento:

$$\omega'S = \cos^{-1} [\{ab \pm \} / (a^2 + 1)] \pm \sqrt{(a^2 - b^2 + 1)}. \quad (E.7)$$

La ecuación (E.7) tiene dos soluciones debido a la duplicidad del signo $\pm$, una indica el ángulo de salida del Sol y la otra el ángulo de puesta del Sol.

Para lo cual, $\omega\theta$ se calcula como anteriormente: $\omega\theta = \min \{\omega_s, \omega'S\}$

Angulo de Altura del Sol.

El ángulo de Altura del Sol (a) se puede calcular de:

$$\text{sen } a = (\text{sen } \delta \text{ sen } \varphi) + (\cos \delta \cos \omega \cos \varphi) \quad (\text{E.8})$$

Angulo de Azimut del Sol.

El ángulo de Azimut del Sol se puede calcular de:

$$\text{sen } \alpha = (\text{sen } \omega \cos \delta) / (\text{sen } \theta_z) = (\text{sen } \omega \cos \delta) / (\cos \alpha) \quad (\text{E.9})$$

El ángulo de Azimut del Sol en el Orto (en su Salida) (ASO) se puede calcular de:

$$\text{sen ASO} = - \text{sen } \omega \cos \delta. \quad (\text{E.10})$$

Angulo de Incidencia

El ángulo de incidencia (θ_i) del Sol sobre una superficie inclinada en un ángulo (β) con respecto a la horizontal) y con un ángulo de Acimut (A), medido desde el Norte en el sentido de las agujas del reloj, se puede calcular así:

$$\cos \theta_i = (\sin \delta \sin \varphi \cos \beta) + (\sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos A) + (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega) - (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \cos A) - \cos \delta \sin \beta \sin A \sin \omega \quad (E.11)$$

Esta ecuación se puede simplificar para varios casos:

a.-) Cuando la superficie es completamente horizontal. $\beta=0$, $\cos \beta = 1$, $\sin \beta = 0$. la Ecuación (E.11) se convierte en: $\cos \theta_i = \cos \theta_z = (\cos \delta \cos \varphi \cos \omega) + (\sin \delta \sin \varphi)$ (E.12)

b.-) Cuando la superficie está de cara al Ecuador (es decir, en el Hemisferio Norte , encarada hacia el Sur: $\cos \theta_i = [\cos \delta \cos (\varphi - \beta) \cos \omega] + [\sin \delta \sin (\varphi - \beta)]$ (E.13)

Téngase en cuenta que si en algún instante $\theta_i > 90^\circ$, el Sol estará detrás de la superficie y la superficie se dará sombra a sí misma.

Appendice 1

Tabla de los números ordinales de cada fecha del año.

D	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29	*60	88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

* Feb 29 existe solo en años bisiestos. En esos años, se añade 1 a cada fecha de después del 29 de Febrero.

Appendice 2

Calculo del Ordinal n de una fecha por Algoritmos:

Algoritmo A:

$$n = [275m / 9] - i [(m+9) / 12] + d - 30.$$

m = mes, d = día

Para años bisiestos $i = 1$, para años comunes $i = 2$

Aquí, los corchetes de la Ecuación significan la parte entera del resultado, sin los decimales.

Ejemplo del Algoritmo A:

Calcular el ordinal de la fecha: 15 de Abril. ($m = 4$, $d = 15$)

$$n = [275m / 9] - 2 [(m+9) / 12] + d - 30; n = [(275 \times 4) / 9] - 2 [(4+9) / 12] + 15 - 30$$

$$n = [122.2222] - 2 [13 / 12] + 15 - 30; n = [122.2222] - 2 [1.0833] - 15; n = 122.2222 - 2.1666 - 15 =$$

$$= 122.2222 - 17.1666 = 105.0556; \text{tomando solo la parte entera:}$$

El ordinal n de la fecha del 15 de Abril es: $(122.2222 - 17.1666) = 105$ en un año común.

En un año bisiesto $i = 1$. Por lo tanto, el ordinal n de la fecha del 15 de Abril sería: $(122.2222 - 16.1666) = 106$.

Algoritmo B.

$$n = 30 (m - 1) + [0.6 (m + 1)] - i.$$

Para aplicar el Algoritmo m es para: Enero=13, Febrero=14, Marzo=3, Abril=4, Mayo=5, Junio=6, Julio=7, Agosto=8, Septiembre=9, Octubre=10, Noviembre=11, Diciembre=12.

$i = 2$ en Años Bisiestos.

$i = 3$ en Años Comunes.

Ejemplo del Algoritmo B:

Calcular el ordinal de la fecha: 15 de Abril. ($m = 4$, $d = 15$)

$$\text{Aplicando el Algoritmo: } n = 30 (4-1) + [0.6 (4+1)] - i = 30 \times 3 + (0.6 \times 5) - 3 = 90 + (3) - 3 = 90$$

El día del mes es 15, que añadido al día del principio del mes = 90, daría $(90 + 15) = 105$

El ordinal del día 15 de Abril es: $(90 + 15) = 105$ en años comunes

En un año bisiesto, $i = 2$ y resultado del Algoritmo es 91; Por lo que $(91 + 15) = 106$ en años bisiestos.

Appendice 3

Bibliografía y Referencias sobre el Cálculo de los Angulos Solares

The Sun's Position in the Sky

Alejandro Jenkins • High Energy Physics, 505 Keen Building, Florida State University.
Tallahassee, FL 32306-4350, USA

Solar Tracking

Sun Position, Sun Tracking, Sun Following
Gerro Prinsloo, Robert Dobson
2015 Book Edition. ISBN: 978-0-620-61576-1

General Solar Position Calculations

NOAA Global Monitoring Division
Earth System Research Laboratories.

Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications

Ibrahim Reda and Afshin Andreas
Revised January 2008 • NREL/TP-560-34302

National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393
NREL is a U.S. Department of Energy Laboratory Operated by Midwest Research Institute • Battelle • Bechtel

Astronomical Formulæ for Calculators

Jean Meeus 1988. 4th Edition.
Willmann-Bell, Inc.. P. O. Box 35025. Richmond, Virginia 23235

Astronomical Algorithms

Jean Meeus 1998 2nd. English Ed.
Willmann-Bell, Inc. P. O. Box 35025. Richmond, Virginia 23235

Practical astronomy with your calculator

Peter Duffet-Smith. 3rd Edition.
University Lecturer. Mullard Radio Astronomy Observatory, Cavendish Laboratory, and
Fellow of Downing College, Cambridge

Problemas Elementales de Cosmografía Aplicados al Estudio de las Insolaciones y de las Sombras, de los Cuadrantes Solares y de la Medida del Tiempo.

Enrique Alcaraz Mira.
Editorial: Imprenta de la ciudad lineal, 1929

El Sol en la Mano, Estudios de Iluminación, Orientaciones Y Relojes Solares. Exposición Elemental.

Miguel Bertran de Quintana
Ediciones de la Universidad Nacional, Mexico. 1937

Escolio 2

Transformación de Coordenadas

Marzo de 2024.

Transformación de Coordenadas Ecuatoriales α y δ a Horizontales Az y h

Azmut: Az

$$A.H. = (H.S. - \alpha) * 15$$

$$Az = \text{Atn} \left(\frac{\sin(A.H.)}{\cos(A.H.) \cdot \sin(\phi) - \tan(\delta) \cdot \cos(\phi)} \right)$$

Altura: h

$$h = \text{Asn} \left(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(A.H.) \right)$$

Coordenadas Ecuatoriales

α = Ascensión Recta [hms]
 δ = Declinación [°]

A.H. = Angulo Horario [°]
 H.S. = Hora Sidérea [hms]
 ϕ = Latitud del observador [°]

Transformación de Coordenadas Horizontales Az y h a Ecuatoriales Topocéntricas α y δ

Ascensión Recta: α

$$A.H. = \text{Atn} \left(\frac{\sin(Az)}{\cos(Az) \cdot \sin(\phi) + \tan(h) \cdot \cos(\phi)} \right)$$

$$\alpha = H.S. - A.H. / 15$$

Declinación: δ

$$\delta = \text{Asn} \left(\sin(\phi) \cdot \sin(h) - \cos(\phi) \cdot \cos(h) \cdot \cos(Az) \right)$$

Coordenadas Horizontales

Az = Azimut [°]
 h = Altura del astro [°]

A.H. = Angulo Horario [°]
 H.S. = Hora Sidérea [hms]
 ϕ = Latitud del observador [°]

Crédito de estas dos imágenes Fernando de Gorocica

El titular del copyright de estas dos imágenes las ha publicado bajo la siguiente licencia:

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

Fin

Del Artículo Enero de 2023

Escolios añadidos en Marzo del 2024

Alfonso Pastor-Moreno

Nota: El original de este trabajo está realizado en modo de presentación con el Keynote de Apple y posteriormente exportado a pdf. Del mismo autor, pueden consultarse varios trabajos sobre Relojes de Sol, tanto de Azimut como de Altura, además de sobre Astrolabios, sobre el Analemma de Vitruvio y Ptolomeo, sobre los Compases o Brujulas Solares, etc., en el siguiente enlace:
<https://independent.academia.edu/PastorAlfonso>

Nota: No habiendo sometido este texto a corrección por terceros, se agradecerían los comentarios y la indicación de las erratas si las hubiere.

Contacto y comentarios a :
pastor_alfonso@yahoo.es