

Historia de la navegación astronómica

Introducción

Durante siglos los europeos y los árabes habían navegado alrededor de sus costas utilizando como referencia los puntos visibles de las costas y su conocimiento de las profundidades (sondas) en distintos lugares. Cuando a finales del siglo XV los portugueses y castellanos comienzan sus viajes más lejanos de exploración y descubrimiento sus instrumentos de navegación eran:

- **Corredera** y **ampolleta** para determinar la velocidad del buque (para navegación de estima).
- **Sonda** para determinar la profundidad y naturaleza del fondo.
- **Brújulas** muy rústicas para determinar el Norte (magnético).
- **Ballestilla** o **astrolabio** para medir la altura de un astro sobre el horizonte.

Conocían las limitaciones y errores de la navegación por estima. También sabían que la declinación magnética no era constante sino que variaba con el lugar y con el tiempo. Sabían que la estrella polar no estaba situada justamente sobre el polo celeste y sabían cómo corregir el error que introducía en la medición de la latitud mediante la observación de las estrellas cercanas (las "guardas").

Observaciones sin cronómetro

El **astrolabio** es invención de los antiguos griegos pero se olvidó en Europa y fueron los árabes quienes lo reintrodujeron en la península Ibérica hacia el siglo XI. Desde ahí se extendió al resto de Europa y a finales de la edad media y durante el renacimiento estaba muy extendido. Para tomar una observación requería de tres hombres y daba una precisión bastante baja, del orden de dos a cuatro grados de arco. Se utilizaba para determinar la **latitud** mediante la observación de la estrella polar o la observación del paso meridiano del sol.

La **ballestilla** de cruceta es de invención medieval y tenía la ventaja de que podía ser usado por un solo hombre pero era muy poco práctico porque necesitaba visualizar y alinear simultáneamente un extremo de la cruceta con el horizonte y el otro extremo con el astro. Esto es muy difícil de hacer.

Otro instrumento árabe medieval es el **kamal** que está basado en el mismo principio que la ballestilla de cruceta. En el **kamal** la cruceta se ve reducida a una tablilla con un cordel con nudos. El observador sujetaba un nudo determinado entre los dientes, lo cual fijaba la distancia de la tablilla a sus ojos y, por lo tanto, el ángulo formado por el ojo y los bordes de la tablilla. Los nudos se hacían de forma que correspondiesen con la latitud de diversos puertos o lugares y la observación permitía saber si la latitud del observador era mayor o menor.



Lámina de un astrolabio andalusí del s. XI
(M.A.N., Madrid).

En 1590 Davis inventó el cuadrante que lleva su nombre. Este permitía a una sola persona tomar la altura del sol con algo más de precisión que un astrolabio. El observador, con su espalda al sol, alinea la sombra del sol sobre el visor con el horizonte lo que se hace con una sola línea recta de visión y evita el problema principal de la ballestilla de cruceta donde el observador necesita visualizar dos líneas simultáneamente. El **cuadrante de Davis** sufrió varios cambios y mejoras a lo largo de su existencia por lo que los últimos modelos eran bastante diferentes del original.

Así que, hasta mediados del siglo XVIII, la latitud se determinaba mediante la observación de la altura de la estrella polar o de la observación meridiana del sol utilizando el astrolabio y más tarde el cuadrante de Davis. Los marinos tenían tablas cuadrianales que daban la declinación del sol para cada día del año y con esta información y la observación de la altura del sol en su paso meridiano es extremadamente sencillo determinar la latitud. Debido a la sencillez de este método, que no requiere cronómetro, ha permanecido como tradición prácticamente hasta nuestros días a pesar de la existencia de métodos mucho más versátiles.

En aquella época, a finales del siglo XV, no había forma práctica de determinar la longitud geográfica de modo que el procedimiento seguido era el de navegar a un punto de la misma latitud que el destino para

luego ir navegando manteniendo la latitud hasta dar con el destino. Podríamos pensar que esto era muy ineficiente pero es lo mejor que podían hacer y no es tan ineficiente como puede parecer a primera vista. De hecho, para las naves castellanas que iban al Caribe esto era muy práctico debido a la configuración de las corrientes y de los vientos alisios en el océano Atlántico. Desde España iban hacia el sur a las islas Canarias y desde ahí cruzaban el Atlántico. En el viaje de retorno subían junto a la Florida y luego cruzaban el Atlántico hacia España. Teniendo en cuenta las corrientes y los vientos esto es lo más eficiente y, por suerte, lo que le conviene al piloto. Desafortunadamente para ellos (y para suerte de los buscadores de tesoros de hoy) la flota española retornaba del mar Caribe en el momento de mayor actividad de huracanes y muchos buques se fueron a pique cercanos a las costas de Florida.

Alrededor de 1750 se inventó el **sextante** que permitía una observación mucho más precisa de la altura de los astros. Con algunas mejoras y perfeccionamientos menores ha permanecido fundamentalmente igual hasta nuestros días. De todas formas, los pilotos tardaron tiempo en desechar sus cuadrantes de Davis y pasarse a los sextantes que eran más complicados y caros.

El sextante permitía más precisión en la observación de la altura lo cual redundaba en una determinación de la latitud más precisa, pero los marinos seguían sin tener un medio de determinar su longitud geográfica mediante observaciones astronómicas.

La invención del telescopio y los avances de la astronomía permitieron que a finales del siglo XVIII se pudiera predecir la posición de los astros con bastante exactitud y a finales del siglo XVIII el Real Observatorio Británico de Greenwich empezó a publicar el almanaque náutico, que sigue siendo una de las herramientas básicas de la navegación astronómica hasta nuestros días.

Desarrollo del cronómetro

Durante el siglo XVIII se había hecho todo el estudio teórico necesario que permitiría la determinación de la longitud geográfica condicionado a que el observador supiera con cierta precisión la hora en el meridiano de referencia en el momento de la observación o, lo que es lo mismo, la diferencia horaria entre el punto de la observación y el meridiano de referencia (comúnmente Greenwich). Hasta ese momento el tiempo a bordo se medía mediante **ampolletas de arena** que los grumetes invertían cada media hora. Este sistema era, evidentemente, poco preciso y totalmente inadecuado para navegación astronómica que requiere mucha más precisión. El problema de la determinación de la longitud geográfica era, por tanto, un problema de poder saber con precisión la hora en el meridiano de referencia.



Cronómetro marino montado sobre anillos cardánicos

Se desarrollaron sistemas de navegación que permitían determinar la hora mediante observaciones astronómicas pero eran muy complejos e inexactos. Entre ellos estaba el método de las **distancias lunares** basado en la observación del movimiento relativamente rápido de la luna y el método de la observación de los satélites de Júpiter. Hoy, sabiendo la hora, el almanaque nos da el ángulo horario de la Luna. El método de las distancias lunares se basaba en el proceso inverso: observando la posición de la Luna respecto a las estrellas, el observador deducía la hora. El método de la observación de los satélites de Júpiter requería del uso de un telescopio.

A pesar de que estos métodos eran una mejora sobre los métodos existentes hasta ese momento, eran muy engorrosos de calcular y muy sujetos a inexactitudes y errores por lo que no ganaron mucha difusión. Claramente se sentía la necesidad de una máquina que permitiera saber la hora a bordo del buque.

España y otros países habían ofrecido recompensas a quien inventara y construyera un cronómetro pero ni siquiera esto produjo la deseada invención. A mediados del siglo XVIII Inglaterra ofreció una gran recompensa a quien "descubriera la longitud geográfica en el mar con una precisión de 60 millas tras un viaje de seis semanas en el mar". Esta precisión puede parecer muy poco hoy día pero, en efecto, supone el saber la hora con una precisión de cuatro minutos de tiempo tras el paso de seis semanas. En aquella época era lo más que se podía pedir.

Al contrario que otras invenciones de la edad moderna que hicieron uso de tecnología existente dándole nuevos usos, la invención del **cronómetro** fue producto de la necesidad y la tecnología necesaria tuvo que ser inventada y desarrollada.

Desde que Galileo descubrió el ritmo constante del péndulo de gravedad lo inventores habían tratado de inventar un reloj basado en este principio pero los resultados eran imperfectos en tierra firme y esos cronómetros no podían funcionar en un buque en movimiento. Todo el siglo XVIII fue dedicado a la invención del cronómetro pero los pilotos de este siglo tuvieron que manejarse sin él.

Como respuesta de la oferta inglesa, John Harrison acopló el péndulo con un movimiento de escape de su invención y produjo los primeros cronómetros útiles durante el siglo XVIII. El primero pesaba 30 kilos. Años de trabajo y mejoras produjeron, finalmente, cronómetros prácticos y que podían ser producidos en masa.

Solamente a partir de principios del siglo XIX se empezaron a fabricar cronómetros útiles y eran muy caros por lo que durante la primera mitad del siglo muchos buques todavía navegaban sin cronómetro.

Una vez que el cronómetro estaba disponible a principios del siglo XIX el piloto tenía a su disposición para la navegación astronómica las mismas herramientas que utiliza hoy en día dos siglos después: **sextante, cronómetro y almanaque náutico**. Desde entonces los avances en la navegación astronómica han sido, no en los instrumentos mecánicos, sino en la teoría de métodos y cálculos usados en la reducción de las observaciones.

Observaciones cronometradas

Con la llegada del cronómetro se podía determinar la longitud geográfica. Esto se hacía de la generalmente de la siguiente forma: el piloto determinaba su latitud por el procedimiento que siempre había usado: por la observación meridiana del sol. Esta observación se llamaba "observación meridiana" y no requería del uso del cronómetro. Luego realizaba una observación de un astro que tuviera un acimut muy próximo a 90° o 270°, es decir E o W. Esta observación se llamaba "observación cronometrada" o "temporal" porque se anotaba la hora de la observación. En ese momento estimaba su latitud avanzando su latitud meridiana mediante cálculos de estima. Utilizando la nueva latitud en sus cálculos y los datos de la observación cronometrada obtenía su longitud geográfica. Al proceso matemático de cálculos que se sigue con una observación para llegar a un resultado en forma de posición se llama *reducción* de la observación.

En este caso el navegante tiene como datos la posición del astro en el momento de la observación, es decir su ángulo horario referido a Greenwich **GHA** y su declinación **dec**. además de la altura observada **Ho**. Entonces asume una latitud (dada por su navegación de estima y calcula la longitud geográfica resultante **lon**. Primero determina el ángulo horario local **LHA**, es decir el ángulo horario entre su posición y la posición del astro.

$$\text{Cos(LHA)} = \frac{\text{Sin(Ho)} - \text{Sin(lat)} * \text{Sin(dec)}}{\text{Cos(lat)} * \text{Cos(dec)}} = \frac{\text{Sin(Ho)}}{\text{Cos(lat)} * \text{Cos(dec)}} - \text{Tan(lat)}$$

Una vez determinado **LHA** es fácil determinar la longitud **lon** ya que

$$\text{lon(W)} = \text{GHA} - \text{LHA}$$

Como puede verse la fórmula principal es compleja si ha de resolverse solamente con la ayuda de tablas. Geométricamente el problema se ve que consiste en determinar dónde el círculo de igual altura corta al paralelo de latitud correspondiente. Puede verse que será en dos puntos y así la ecuación matemática también tendrá dos soluciones de las cuales una se desecha por ser obviamente no la solución buscada. La observación cronometrada complementaba a la observación meridiana y era su paso siguiente más lógico. Fue más fácilmente aceptado por los pilotos que hubiera sido un sistema radicalmente nuevo y distinto y se convirtió en el método usual de aquella época.

Correcciones

Según los sextantes, en su fabricación y manejo, se iban haciendo más precisos se fueron teniendo en cuenta y corrigiendo en los cálculos, errores que antes se habían ignorado. Entre ellos se pueden contar:

- **Error instrumental** (propio del instrumento)
- **Refracción atmosférica** (notable especialmente en observaciones de baja altura)
- **Depresión del horizonte** (ya que el horizonte está situado por debajo del observador)
- **Paralaje** (notable en el caso de la Luna y astros próximos a la Tierra)
- **Semidiámetro** (en el caso de cuerpos con diámetro aparente, Sol y Luna, al observar el limbo)
- **Aumento** (el semidiámetro de la Luna se estandariza para la distancia desde el centro de la tierra pero cuando se observa con cierta altura sobre el horizonte la distancia desde el observador es menor y el semidiámetro aparente aumenta)

Comparación con topografía

Ligeramente aparte del tópico central que nos ocupa que es la navegación astronómica en el mar, es interesante notar que los fabricantes de mapas y los topógrafos terrestres de la época se enfrentaban al mismo problema de determinar su posición mediante observaciones astronómicas pero llegaron a soluciones muy distintas. El piloto marino tiene una visión clara del horizonte a su alrededor y puede determinar la altura H del astro sobre el horizonte pero esto no sucede en tierra firme. Por otra parte el piloto no tiene medios de determinar el acimut de un astro con precisión ni el momento preciso de su tránsito meridiano. Por el contrario un observatorio astronómico terrestre tiene medios para determinar estas magnitudes con facilidad y precisión. Por estos motivos los sistemas utilizados por navegantes marinos y por topógrafos terrestres eran fundamentalmente distintos.

Desarrollo de métodos de reducción modernos

Sumner

En 1837 el capitán Sumner se acercaba a la costa inglesa y estaba preocupado por su posición tras varios días de niebla sin observaciones. Una abertura momentánea en las nubes le permitió tomar una observación cronometrada pero no estaba seguro de su latitud por lo que decidió resolver la longitud utilizando varias suposiciones de latitud. Al hacerlo descubrió que las distintas posiciones obtenidas estaban alineadas y que la prolongación de la línea pasaba por un faro determinado. A pesar de que no estaba seguro de su latitud sabía que su posición estaba a lo largo de esta línea recta por lo que puso el rumbo para seguir por la misma línea hasta que, efectivamente, avistó el faro. Al capitán Sumner se atribuye la invención del concepto de "Línea de Posición" (LP). Hoy sabemos, por supuesto, que la LP es un segmento de un círculo menor llamado círculo de igual altura. Cualquier observador situado en cualquier punto de este círculo observará el astro con la misma altura.

El método del capitán Sumner de resolver la longitud para dos latitudes distintas y, de esta forma, determinar una LP estaba en línea con lo que se había hecho hasta ese momento y fue adoptada por los pilotos sin resistencia pero todavía el proceso de determinación de la posición era el de avanzar por estima la latitud obtenida de la observación meridiana y cruzarla con LPs obtenidas por observaciones cronometradas.

La reducción de la observación cronometrada era compleja y debía ser resuelta por duplicado, para dos latitudes distintas. Además el astro observado en la observación cronometrada debía tener un acimut muy próximo a E o W. Si el acimut del cuerpo observado se separaba mucho de lo deseado crecía el error y, además, los puntos obtenidos caerían fuera de la carta.

St. Hilaire

A finales del siglo XIX se buscaba la forma de simplificar los cálculos y de mejorar la precisión de los resultados. Hacia 1872 el capitán francés Marcq Saint Hilaire publicó un método de aproximaciones sucesivas que llamó de *point rapproche*. En 1877 el astrónomo parisino Antoine-Joseph Yvon Villarceau (1813 – 1883) y el oficial naval Aved de Magnac publicaron¹ un sistema que denominaron de

intercepción del acimut y que se ha difundido con el nombre de St. Hilaire aunque éste no fue su inventor. Este método se difundió rápidamente y fué el más utilizado hasta nuestros días.

En este método el piloto asume una posición cualquiera, que puede ser su posición estimada pero esto no es necesario y basta con que la posición asumida esté razonablemente cerca de la posición real. El resultado de la reducción es una **LP** que siempre será la misma, con independencia de la posición asumida para el cálculo.

El procedimiento es como sigue: El piloto realiza una observación astronómica y anota la hora exacta y la altura **Ho** observada. A continuación hace un cálculo donde asume la altura calculada **Hc** con la que observaría el astro si su posición de observador fuera la posición asumida para el cálculo. La diferencia entre **Ho** y **Hc** es la distancia entre la posición real y la posición asumida para el cálculo (los cálculos anteriores son matemáticos y lo que sigue es proceso gráfico en la carta de navegación) por lo que el piloto traza una recta desde el punto de la posición asumida con la dirección del acimut del astro observado y desde la posición asumida mide la distancia **Ho - Hc** hacia el astro. Si **Ho** es mayor entonces la distancia se mide en sentido inverso. En ese punto traza una perpendicular a la línea de acimut y esa nueva línea es su **LP**. En el momento de la observación el observador estaba situado en algún punto de esa **LP**. Cruzando varias **LPs** obtenidas por este nuevo procedimiento se obtiene la posición real.

Las fórmulas utilizadas para obtener **Hc** y **Z** son:

$$\begin{aligned} \text{Sin}(\text{Hc}) &= \text{Sin}(\text{lat}) * \text{Sin}(\text{dec}) + \text{Cos}(\text{lat}) * \text{Cos}(\text{dec}) * \text{Cos}(\text{LHA}) \\ \text{Tan}(\text{Z}) &= \frac{\text{Sin}(\text{LHA})}{\text{Sin}(\text{lat}) * \text{cos}(\text{LHA}) - \text{Cos}(\text{lat}) * \text{Tan}(\text{dec})} \end{aligned}$$

Como hemos visto, tanto el método de Sumner como el de St. Hilaire nos obligan a asumir una magnitud desconocida para obtener un resultado que depende de la certeza de la magnitud asumida. Esto es debido a que una sola observación nos da una **LP** y no un punto. La gran ventaja del método de St. Hilaire es que quita la restricción de que la observación debe ser de un cuerpo con acimut E-W y funciona igualmente bien con cualquier observación independientemente del acimut del cuerpo observado. Un piloto puede tomar varias observaciones simultáneas de varios astros o del mismo astro en observaciones separadas por varias horas, y reducir todas estas observaciones por el mismo método de forma que cada observación produce una **LP** y las varias **LPs** se cortan en el punto de posición.

Este método, a pesar de sus innegables ventajas, tardó en ser aceptado debido a que era tan diferente de del método de Sumner al que reemplazaba. La naturaleza humana tiende a mantener lo conocido y a desconfiar de lo nuevo. El método de St. Hilaire ha permanecido como el método estándar hasta nuestros días a pesar de que algunos pilotos gustan de utilizar la observación meridiana por pura tradición.

Con el método de St. Hilaire, como con el método de Sumner, los cálculos son complejos y sujetos a errores debido a la necesidad de resolver un triángulo esférico. A pesar del uso de herramientas como logaritmos y tablas trigonométricas se tardaba tiempo en hacer los cálculos de reducción de cada observación y, a menudo, había que repetirlos si aparentemente se había colado un error.

Ageton

Hacia 1930 Ageton, por entonces estudiante en la Academia Naval de Annapolis, (Estados Unidos), inventó el método de reducción que lleva su nombre. Este método utiliza una pequeña tabla de logaritmos de las funciones trigonométricas y un proceso que simplifica los cálculos grandemente. Las tablas de Ageton fueron publicadas por la Oficina Hidrográfica de Estados Unidos en 1931 con la denominación *H.O. 211*.

El sistema es útil todavía hoy por ejemplo porque permite llevar el librito con las tablas dentro de la caja del sextante. A pesar de ello los cálculos de reducción llevan un rato y son propensos a errores, sobre todo para el piloto falto de práctica. Luego se han desarrollado otros métodos similares como el método de Davies que se incluye con el almanaque náutico publicado por Estados Unidos pero ninguno de esos métodos se aproxima a la belleza y simplicidad del método de Ageton.

Desde finales del siglo XIX hasta pasada la segunda guerra mundial hubo un constante trabajo en todo el mundo para buscar sistemas simplificados de reducción de observaciones pero pocos métodos ganaron difusión mundial sino que cada nación favorecía los propios. Aparte del método de Ageton podemos nombrar el ya citado de Davies y los de Comrie, Dreisonstok, Ogura, etc. Algunos de estos sistemas utilizaban la fórmula del semi-senoverso (*Haversine formula*).

Tablas pre-calculadas

El método de Ageton y otros similares eran válidos para pilotos marinos, pero demasiado lento para pilotos aéreos que necesitaban resolver su posición con mucha más rapidez. En la década de 1940 empezaron a publicarse tablas de triángulos esféricos pre-calculados de forma que el piloto entraba en las tablas con los tres argumentos de latitud asumida, declinación del astro y diferencia horaria entre el astro y longitud geográfica asumida y obtenía como resultado la altura computada **ac** y el acimut computado **Z**.

El piloto se veía obligado a asumir una posición de latitud igual a un grado entero, sin parte fraccionaria, y a asumir una longitud que hiciera la diferencia horaria igual a un grado entero también. Esta restricción no es especialmente incómoda y se ganaba mucho en velocidad por lo que estos métodos se desarrollaron mucho a partir de la segunda guerra mundial y culminaron con la publicación por el gobierno americano de las tablas *H.O. 249* para aviadores y, más tarde, las tablas *H.O. 229* para pilotos marinos. Ambas son esencialmente lo mismo pero las *H.O. 229* dan algo más de precisión y son de uso algo más lento. En ambos casos el piloto necesita una voluminosa biblioteca de tablas por lo que otros métodos como el de Ageton pueden ser más adecuadas para situaciones como botes salvavidas o donde no se puede cargar con las voluminosas tablas de los métodos como *H.O. 249*.

Cálculo electrónico

Con la llegada en las últimas dos décadas del siglo XX de las calculadoras programables y computadores la reducción de observaciones se puede hacer de forma instantánea y sin necesidad de tablas de modo que los métodos manuales pasaron a ser métodos de emergencia para el caso de fallos en los aparatos electrónicos. También se desarrollaron programas de ordenador que calculaban las coordenadas astronómicas que hasta ese momento se habían sacado del almanaque. Esto hizo innecesario el único otro libro utilizado por el piloto para la reducción: el almanaque náutico.

Presente

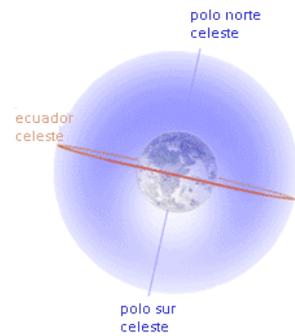
Teniendo en cuenta el desarrollo del sistema **GPS** y otros similares de navegación por satélite, disponibles en todo el mundo, y con receptores que pueden costar la décima parte o menos del precio de un sextante, podemos decir con seguridad que el arte y ciencia de la navegación astronómica han llegado al fin de su camino útil y que no es previsible que haya ulteriores desarrollos.

El arte de la navegación astronómica se está perdiendo rápidamente y solo sobrevivirá como interés de aficionados.

La Academia Naval de Annapolis, (Estados Unidos), ya no requiere la enseñanza de navegación astronómica a sus cadetes porque saben que ya no tiene objeto. Sin embargo en España se sigue requiriendo este conocimiento para obtener el título deportivo de Capitán de Yate, toda vez que la tecnología GPS (y similares) dependen de aparatos electrónicos que pueden verse afectados por fallos y errores, mientras que el conocimiento de la navegación astronómica ofrece un sistema menos preciso, más complejo, pero efectivo en caso de que el sistema electrónico deje de funcionar.

Esfera celeste

La **esfera celeste** es una esfera ideal, sin radio definido, concéntrica en el globo terrestre, en la cual aparentemente se mueven los astros. Permite representar las direcciones en que se hallan los objetos celestes; así es como el ángulo formado por dos direcciones será representado por un arco de círculo mayor sobre esa esfera. Teóricamente se confunde con el de la Tierra: el Eje del mundo es el de rotación de la esfera celeste y es paralelo al eje de rotación de la Tierra, por lo que se halla prácticamente centrada en el ojo del observador. Los astrónomos fundan sus mediciones en la existencia, en esa esfera, de puntos, círculos y planos convencionales: el plano del horizonte y el del ecuador celeste; el polo y el cenit; el meridiano, que sirve de origen para la medición del acimut. Resulta fácil hallar un astro o situarlo respecto a esos planos fundamentales.



Francisco Javier González Martín

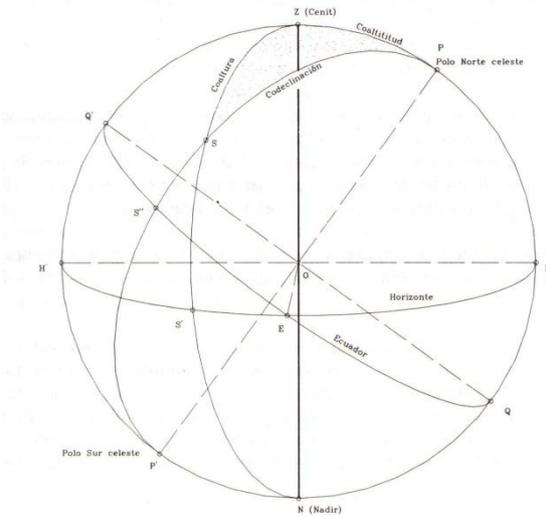


Figura N° 8. Esfera celeste.

Cuando el horizonte del espectador es oblicuo con respecto al ecuador, la esfera celeste es calificada de *oblicua*. Para un observador situado en uno de los dos polos, la esfera es *paralela*, ya que su horizonte conserva paralelismo con el ecuador. Por último, la esfera es *recta* para el observador situado en la línea equinoccial, porque allí el horizonte corta perpendicularmente el ecuador.

La esfera celeste es un concepto no un objeto, es la superficie virtual sobre la que vemos proyectados a los astros como si todos estuvieran a igual distancia de la tierra.

Tres puntos conspicuos de esta esfera (cenit, polo elevado y astro (Z,P y S) en el gráfico de la izquierda) definen un triángulo esférico y mediante su resolución los marinos logran ubicarse sobre la superficie terrestre.

Coordenadas horizontales

Las **coordenadas horizontales** son un sistema de coordenadas celestes referidas al horizonte del observador y a su vertical.

Para determinar la posición de una estrella en *coordenadas horizontales*, un observador deberá medir su **altura** que es la distancia angular desde el horizonte hasta la estrella. En segundo lugar, tendrá que determinar el ángulo que forma la estrella con una dirección que se toma como origen, generalmente el norte en navegación, medida sobre el horizonte y en sentido horario. Dicho ángulo se llama **acimut**.

Las **coordenadas horizontales** dependen del observador. Es decir que en un mismo momento, un astro se observa bajo **coordenadas horizontales** diferentes por observadores diferentes situados en puntos diferentes de la Tierra. Esto significa que dichas coordenadas son **locales**.

Sea **C** el centro común de las esferas terrestre y celeste (figura 1). Se señala un punto **O** sobre la superficie terrestre, tal que **OC** es la *vertical de plomada* en O. En O se encuentra *el observador*.

La prolongación de OC corta a la esfera celeste en los puntos **Z** y **Z'**, **cenit** y **nadir** de O, respectivamente. La línea **ZZ'** es la **vertical del observador**, o simplemente **la vertical**.

Por C imaginamos un plano perpendicular a ZZ' que corta a la esfera celeste en el círculo máximo **SWNE**, el **horizonte astronómico** de O.

La prolongación del eje terrestre nos da los puntos **P** y **P'**, los **polos de la esfera celeste**. **PP'** es el **eje del movimiento diurno**. La rotación de la Tierra hace que la esfera celeste se mueva aparentemente en torno a dicho eje.

Las proyecciones de P y P' en el horizonte son los puntos **N** (Norte) y **S** (Sur), y la perpendicular a la línea NS por C, en el plano del horizonte, nos da el Este **E** y Oeste **W**.

En realidad el *observador* está en el plano del horizonte. Las coordenadas horizontales son topocéntricas. Esto supone que las medidas que obtenga serán *aparentes*, por la paralaje diurna y la refracción atmosférica. Según los casos se requerirán las correcciones oportunas, para transformar estas medidas en coordenadas geocéntricas.

La *vertical del observador* **ZZ'**, su *horizonte* **SWNE** y el *punto Sur* **S**, son el sistema de referencia de las *coordenadas horizontales*.

Imaginemos ahora a la Tierra reducida al punto C en el centro de la esfera celeste (figura 2). La vertical **ZZ'** es una línea y determina infinitos planos perpendiculares al del horizonte. Cada uno de esos planos corta a la esfera celeste en los **círculos verticales**, o simplemente **los verticales** que pasan siempre por el cenit y el nadir. Es pertinente la matización lingüística: *la vertical* es siempre la línea **ZZ'**, mientras que *el vertical* es uno de los círculos verticales.

De los infinitos verticales se destacan dos:

- **Meridiano**: el vertical **PZSZ'** que contiene a los polos. Corta al horizonte en los puntos cardinales Norte **-N-** y Sur **-S-**. La parte del meridiano que contiene al cenit, **Z**, es el **meridiano superior** **PZP'**, y la que contiene al nadir, **Z'**, es el **meridiano inferior** **P'Z'P'**.
- La intersección del **Meridiano** con el plano del horizonte es la **línea meridiana** que corta a la esfera celeste en los puntos cardinales, puntos cardinales **N** y **S**.
- **Primer vertical**: el vertical **ZEZ'W**, perpendicular al meridiano, cuya intersección con el horizonte determina los puntos Este **-E-** y Oeste **-W-**.
- La **intersección** del **Primer vertical** con el plano del horizonte es la **línea perpendicular** que corta a la esfera celeste en los puntos cardinales **E** y **W**.

Las líneas meridiana y perpendicular forman un sistema de referencia perpendicular que apunta a los cuatro puntos cardinales.

La rotación aparente de la esfera celeste de eje **PP'** hace que los astros surjan por el Este, (en realidad sólo salen por el este si su declinación es cero) se eleven y alcancen su máxima elevación en el meridiano superior (**culminación**), para después descender y ponerse por el Oeste (**ocaso**). Siguen su camino por debajo del horizonte y no se ven hasta que al día siguiente en que amanecen de nuevo (**orto**).

El intervalo de tiempo entre dos culminaciones sucesivas, o **pasos por el meridiano** es el día sidéreo, 3 minutos y 55,9 segundos más corto que el día solar medio.

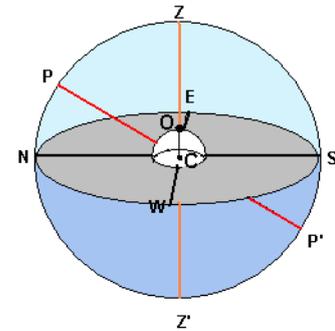


Figura 1. El horizonte astronómico de un observador sobre la superficie de la Tierra, en el punto O, es el círculo máximo **SWNE**. En ésta imagen hay que hacer una ligera corrección el observador se encuentra en el plano de dicho horizonte. No obstante el tamaño de la Tierra es tan pequeño comparado con el universo que excepto para objetos muy cercanos como la Luna y los planetas, la corrección es pequeña.

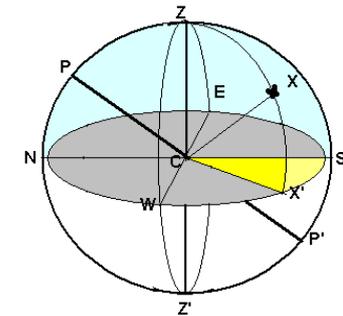


Figura 2. La altura y el acimut de un astro son sus coordenadas horizontales: la altura **h** de X es el ángulo **XCX'**, y su acimut **A** el ángulo **SCX'**.

El acimut y la altura

Sea **X** un astro de la esfera celeste, **CX** su **dirección**, y **CX'** la proyección de de ésta en el plano del horizonte (figura 2). Definimos:

- **altura** de X (**a**) es el ángulo **XCX'**, es decir el ángulo formado por su dirección y el horizonte. También podemos considerar a la altura como el arco **XX'**.
La altura es positiva sobre el horizonte, y negativa por debajo de él, en cuyo caso se llama también **depresión**. Así la altura del cenit vale 90° , y la depresión del nadir es de -90° .
- **Acimut** de X (**Z**) es el ángulo **SCX'**. Existen convenios que refieren el acimut al punto Norte, (para la navegación) N, con el sentido positivo NESW.

La *altura* y el *acimut* son las *coordenadas horizontales* de X.

Téngase bien presente que *altura* es un ángulo o un arco, y no una distancia lineal. Para evitar la ambigüedad en ocasiones se la llama **elevación**.

Distancia cenital

El ángulo **ZCX** es la **distancia cenital** de X, su distancia angular al polo, denotada por **c**. Evidentemente:

$$c + a = 90^\circ$$

La distancia angular del polo al horizonte es la **altura del polo**, ángulo PCN para el Hemisferio Norte, y P'CS para el Hemisferio Sur, es la **latitud** del lugar dónde se encuentra el observador O. Se denota con φ -letra griega *phi*, léase *fí*-.

Todas aquellas estrellas cuya distancia al polo sea menor o igual que dicha latitud no están nunca debajo del horizonte, de modo que no se *ponen*: son las **estrellas circumpolares** para O. Sus trayectorias son círculos concéntricos a los polos. Como casos extremos comparemos lo que sucede en el Ecuador terrestre y en los polos:

- En el Ecuador, dónde $\varphi = 0^\circ$, ninguna estrella sobre el horizonte es circumpolar, y nacen y se ponen perpendicularmente al horizonte. El polo está en el horizonte.
- En los polos, donde $\varphi = 90^\circ$ ó -90° , todas las estrellas sobre el horizonte son circumpolares, no nacen ni se ponen. El polo está en el cenit.

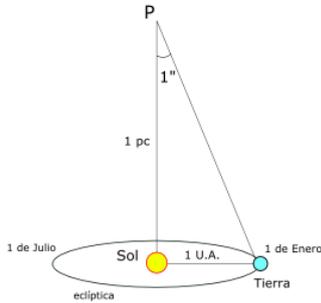
El complementario de la latitud es la **colatitud** o **distancia cenital** del polo. Se dará la siguiente relación:

$$\varphi + \text{colatitud} = 90^\circ$$

Medición de alturas

Paralaje en astronomía

En astronomía se definen diversos tipos de **paralaje**:



El parsec es un caso particular de paralaje trigonométrico. **P** dista un parsec (pc) de la Tierra porque desde allí el ángulo abarcado por el radio de la órbita terrestre (1 Unidad Astronómica o U.A.) es de un segundo de arco (1'')

Paralaje.- Ángulo formado por la dirección de dos visuales relativas a la observación de un mismo objeto desde dos puntos distintos, suficientemente alejados entre sí y no alineados con él. También suele emplearse este término para referirse a la distancia a las estrellas. En español el término es femenino.

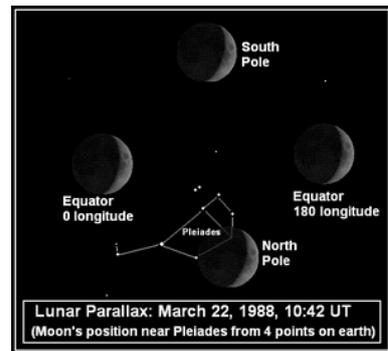
Paralaje anual.- Máximo valor aparente que puede adquirir la posición de una estrella dada en el transcurso de un año debido a la posición variable de la Tierra en su órbita alrededor del Sol y que corresponderá al momento en la longitud eclíptica de la estrella, que es siempre constante, difiera 90° de la longitud eclíptica de la Tierra, que varía constantemente.

Bessel fue el primero en determinar la paralaje de una estrella, **61 Cygni**, en la constelación de El Cisne, en el año 1838. Dos años después, en 1840, Struve logra medir la paralaje de **Vega** en la constelación de Lira.

Las paralajes estelares están por debajo del segundo de arco. La estrella más próxima a nosotros es Alfa Centauri, en realidad un sistema triple. La más cercana de ellas, *Próxima Centauri*, tiene una paralaje de 0''765, correspondiente a 1,31 pc, ó 4,3 años luz.

A mayor distancia, menor paralaje, y los errores cometidos se van haciendo más y más significativos, de modo que a partir de 100 años luz ya no es fiable la paralaje anual trigonométrica para determinar distancias estelares.

Paralaje geocéntrica.- Diferencia entre la dirección de un astro, visto desde un punto de la superficie de la Tierra (topocéntrica) y la misma dirección de ese astro visto desde el centro de la Tierra (geocéntrica). También es conocida como **paralaje diurna**.



PARALAJE LUNAR. Tomando como referencia a las Pléyades en la constelación de Tauro, se muestra la posición aparente de la Luna el día 22 de Marzo de 1988 a las 10:42 TU, según el punto de observación: Polo Norte, Polo Sur, Ecuador 0° longitud, y Ecuador 180° longitud.

Paralaje horizontal.- Es el ángulo bajo el cual se vería el radio de la Tierra desde un astro cuando éste se encuentra en el horizonte. Si el observador se sitúa en el ecuador, entonces esta paralaje recibe el nombre especial de *paralaje horizontal ecuatorial*. El valor es máximo en el ecuador de la Tierra y varía con la latitud, al no ser la Tierra completamente esférica.

Paralaje trigonométrica.- Es el ángulo bajo el cual se ve el radio de la órbita de la Tierra, desde una estrella a una distancia normalizada de **una** unidad astronómica y se expresa en segundos de arco. La distancia a la estrella es el inverso de la paralaje trigonométrica expresado en parsec; es decir que cuando se dice que la paralaje de Antares es de 0''019, ésta se encuentra a 52,632 parsec o 171,66 años luz.

Paralaje solar.- Ángulo bajo el que se ve el radio ecuatorial de la Tierra desde el centro del Sol. Vale 8,794148''.

Paralaje lunar.- Ángulo bajo el que se ve el radio ecuatorial de la Tierra desde el centro de la Luna. Vale 57' 02,608''.

(Paralaje diurna, π)

La altura **a** de un astro se ha de medir respecto al horizonte astronómico del observador, pero éste la toma desde su horizonte aparente, en el punto O, y lo que realmente obtiene es la **altura aparente** del astro. Surge el fenómeno de la paralaje (Figura 3).

Desde O el astro B se ve en N, mientras que desde C se vería en T, más alto que N. La estrella cambia de posición según la dirección del observador. Esto es la **paralaje diurna o de altura**.

Paralaje diurna es el ángulo formado por las **direcciones topocéntrica y geocéntrica** de un astro. En la figura 3, y para B:

- **Dirección topocéntrica ON**: dirección desde el lugar que se ocupa.
- **Dirección geocéntrica CT**: dirección desde el centro de la Tierra.

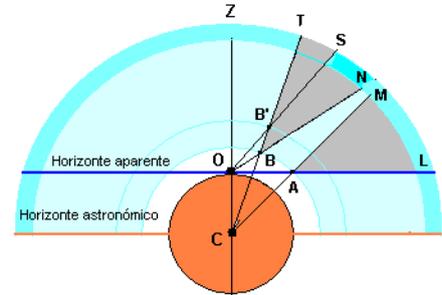


Figura 3. Las paralajes horizontal y diurna o de altura vienen determinadas porque el observador se encuentra en el horizonte aparente y no en el horizonte astronómico. Así, a él le parece que B' está más alto que B, cuando realmente están a la misma altura, pues comparten la dirección geocéntrica CT.

Cuando el astro se encuentra en el horizonte aparente del observador, resulta la **paralaje horizontal**. Tal es el caso del objeto A cuya *paralaje horizontal* es el ángulo LAM = CAO.

La paralaje diurna disminuye con la elevación sobre el horizonte, y con la distancia del objeto observado:

- Con la elevación: compárese B con A. La paralaje NBT de B es menor que la paralaje LAM de A. A mayor elevación menor paralaje. En el cenit la paralaje es nula.
- Con la distancia del objeto observado: compárese B y B'. Ambos tienen la misma elevación (igual dirección geocéntrica), pero están a distintas distancias de la Tierra. La paralaje SB'T de B' (más lejano) es claramente menor que la paralaje NBT de B (el más cercano). A mayor distancia menor paralaje.

Las distancias en el espacio son inmensamente grandes, y por eso las paralajes diurnas son despreciables en la mayoría de los casos. En distancias muy pequeñas como las del Sistema Solar, son de consideración, pero nada más. La Luna tiene una paralaje que supera el grado -61' 50"-, cantidad muy importante que no se puede obviar. Para el Sol es de unos 9" escasos. Pero para Próxima Centauri a sólo 4,2 años luz la paralaje es del orden de la cienmilésima de segundo, y eso siendo la estrella más próxima a nosotros. La paralaje diurna de una estrella es prácticamente nula.

Para una paralaje significativa se tendrá: $a_{real} = a_{aparente} + \pi$

La refracción

En lo que respecta a la refracción atmosférica la cosa es distinta porque si bien disminuye con la altura al igual que la paralaje, en cambio no se reduce su efecto por la distancia del objeto observado, por grande que sea. La refracción sí habrá que tenerla casi siempre en cuenta al hacer mediciones que requieran precisión.

La figura 4 muestra un típico caso de refracción. Cuando el limbo inferior del Sol (O) toca el horizonte del mar realmente ya no está allí. Lo que estamos viendo es su imagen refractada en S', y la estrella ya está completamente bajo nuestro horizonte, en S.

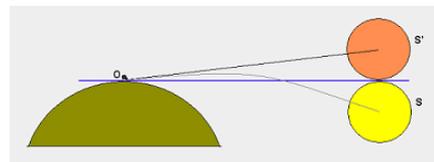


Figura 4. La refracción hace que la altura aparente de un astro sea superior a la altura real. Así el Sol bajo el horizonte, en S, se ve en S', sobre el horizonte

El efecto de la refracción **R** sobre la altura de un astro es opuesto al efecto que producía la paralaje: ésta hace que la altura aparente sea *menor* que la real, la refracción hace que la altura aparente sea *mayor* que la real, *eleva* al astro, de modo que se dará la relación:

$$a_{real} = a_{aparente} - R$$

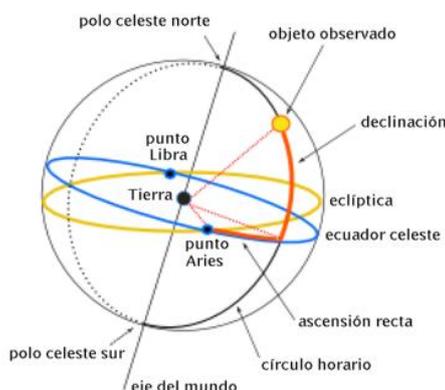
La refracción es máxima en el horizonte, y nula en el cenit, al igual que la paralaje. A una altura de 0° vale 33' 48". A 10° de altura ya se reduce a 5' 13". Entre los 40° y 50° vale 1', y a partir de los 80° está por debajo de los 10".

Ascensión recta

En astronomía, la **ascensión recta** es una de las coordenadas astronómicas que se utilizan para localizar los astros sobre la esfera celeste, equivalente a la longitud terrestre (coordenada geográfica).

La ascensión recta se mide a partir del Punto Vernal en horas (una hora igual a 15 grados), minutos y segundos hacia el Este a lo largo del ecuador celeste. El punto Vernal está en la posición del Sol en el equinoccio de Primavera o Equinoccio vernal. Su símbolo es α .

La **longitud celeste** o **longitud eclíptica** es el ángulo medido sobre la eclíptica, a partir del Punto Aries y en sentido directo, o antihorario. Se mide en grados sexagesimales y su valor va desde 0° a 360° . Es una de las coordenadas eclípticas de un objeto celeste. Se acostumbra a representarlo por la letra **L**. La otra coordenada del sistema eclíptico es la latitud celeste.



Declinación (astronomía)

En astronomía, la **declinación** es el ángulo que forma el astro con el ecuador celeste. Es una de las dos coordenadas del sistema de coordenadas ecuatoriales, la otra coordenada es la Ascensión recta. La Declinación es comparable a la latitud geográfica, la diferencia es que ésta se mide sobre el ecuador terrestre. Se mide en grados y es positiva si está al norte del ecuador celeste y negativa si está al sur.

- Un objeto en el ecuador celeste tiene una dec de 0° .
- Un objeto sobre el Polo norte celeste tiene una dec de $+90^\circ$.
- Un objeto sobre el Polo sur celeste tiene una dec de -90° .
- Un astro que está en el cenit, tiene una declinación igual a la latitud del observador.
- La estrella polar tiene una declinación $+90^\circ$
- Una estrella circumpolar es aquella cuya declinación mayor a $(90^\circ - \varphi)$, donde φ , es la latitud del observador. Estas estrellas son visibles siempre.
- En latitudes altas ($>67^\circ$) es posible que durante una parte del año el Sol tenga una declinación mayor que $90-67=23^\circ$ produciendo que el Sol este siempre sobre el horizonte, fenómeno conocido como sol de medianoche.

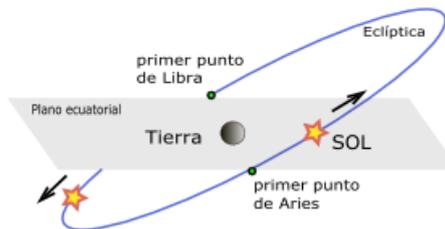
Son estrellas circumpolares, para un determinado punto sobre la Tierra, aquéllas cuya declinación nunca es inferior al ángulo complementario a la latitud del lugar.

La **latitud celeste** o **latitud eclíptica** es el ángulo que forma el objeto celeste con el plano de la eclíptica. Positivo si se mide hacia el Norte eclíptico y negativo en caso contrario. Se mide en grados sexagesimales y su valor está entre $+90^\circ$ y -90 . Es una de las coordenadas eclípticas y se acostumbra a representarlo por las letras B o β .

La otra coordenada del sistema eclíptico es la longitud celeste.

Equinoccio

Se denomina **equinoccio** a cada uno de los dos puntos de la esfera celeste en los que la eclíptica corta al ecuador celeste. *Equinoccio* son asimismo cada una de las fechas en que esto ocurre. Durante los equinoccios el Sol está situado en el plano del ecuador terrestre, donde alcanza el cenit. El paralelo de declinación del Sol y el ecuador celeste coinciden, por lo que la noche y el día tienen la misma duración en todo el mundo. La palabra *equinoccio* viene del latín y significa "noche igual".



En esta vista se muestran los dos equinoccios como la intersección del ecuador celeste y la eclíptica. El Sol, en su aparente movimiento por ésta, está al Norte o al Sur del plano ecuatorial, causa de la sucesión de estaciones. Astronómicamente, el primer punto de Aries es una referencia fundamental.

Los equinoccios se llaman **primer punto de Aries** o *equinoccio vernal*, y **primer punto de Libra** o *equinoccio otoñal*, o *autumnal*. El primero es el punto del ecuador celeste donde el Sol en su movimiento anual aparente por la eclíptica pasa de Sur a Norte respecto al plano ecuatorial, y su declinación pasa de negativa a positiva. En el *primer punto de Libra* sucede lo contrario: el Sol aparenta pasar de Norte a Sur del ecuador celeste, y su declinación pasa de positiva a negativa. El instante en que el Sol atraviesa cada punto de los equinoccios puede calcularse con exactitud.

Actualmente ninguno de los equinoccios se encuentra en la constelación que los nombra, debido a la precesión: el *primer punto de Aries* está en Piscis, y el *primer punto de Libra* se halla en Virgo. Las coordenadas ecuatoriales de cada equinoccio son: para el *equinoccio vernal*, ascensión recta y declinación, nulas. Para el *primer punto de Libra*, ascensión recta, 12 horas, y declinación nula.

El equinoccio como referencia astronómica

El equinoccio vernal o primer punto de Aries

Como referencia astronómica, *equinoccio* es sinónimo del primer punto de Aries (también: punto Aries, punto vernal, o equinoccio vernal): punto de la esfera celeste de ascensión recta, y declinación nulas. Nos referimos por tanto al punto donde el Sol en su movimiento anual aparente por la eclíptica pasa de Sur a Norte del ecuador celeste, y su declinación cambia de negativa a positiva.

Así, por ejemplo, el tiempo sidéreo se mide desde el meridiano local al equinoccio vernal en sentido retrógrado, y la ascensión recta de un cuerpo en la esfera celeste se toma desde el punto vernal al círculo horario del objeto, en sentido directo.

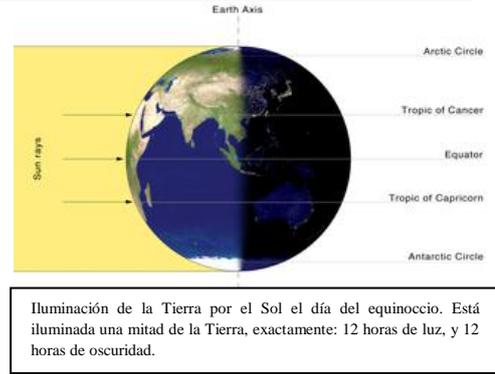
Ahora bien, el equinoccio no es un punto fijo (ninguno de los dos equinoccios, por supuesto), sino que se mueve lentamente debido a la precesión y nutación. La primera supone un desplazamiento angular de unos 50,3" por año -1° cada 72 años, aproximadamente-, y el equinoccio describe una vuelta completa alrededor del centro de la esfera celeste, en sentido retrógrado, en unos 25.800 años (año platónico). La nutación es una oscilación periódica del eje de la Tierra con una amplitud de 9" y un periodo de 18,6 : ***Equinoccio verdadero** Es la intersección de la eclíptica con el ecuador verdadero que se mueve por la precesión y nutación.

Equinoccio medio o **equinoccio medio de fecha** Se prescinde de la nutación. El equinoccio se mueve uniformemente debido sólo a la precesión.m

El equinoccio como cambio de estación

Desde este punto de vista los equinoccios son el instante (o la fecha, en un sentido más general) en que suceden determinados cambios estacionales, distintos para el hemisferio norte y el hemisferio sur:

- **Equinoccio de marzo**, en torno al día 21 de marzo:
 En el polo Norte, paso de una noche de 6 meses de duración a un día de 6 meses.
 En el hemisferio norte, paso del invierno a la primavera; se llame el equinoccio **vernal**.
 En el hemisferio sur, paso del verano al otoño; se llame el equinoccio **autumnal**.
 En el polo Sur, paso de un día de 6 meses de duración a una noche de 6 meses.
- **Equinoccio de septiembre**, en torno al día 23 de septiembre:
 En el polo Norte, paso de un día de 6 meses de duración a una noche de 6 meses.
 En el hemisferio norte, paso del verano al otoño; se llame el equinoccio **autumnal**.
 En el hemisferio sur, paso del invierno a la primavera; se llame el equinoccio **vernal**.
 En el polo Sur, paso de una noche de 6 meses de duración a un día de 6 meses.



Francisco Javier González Martín

Los equinoccios realmente son un momento particular, un instante de tiempo que ocurre a una hora determinada; en vez de todo un día entero (aunque acostumbramos llamar equinoccio al día en que ocurre este instante).

Las fechas extremas de los equinoccios para el siglo XXI son las siguientes:

Año	Equinoccio de marzo	Equinoccio de septiembre
2003	21 ^d 01 ^h 00 ^m	23 ^d 10 ^h 47 ^m
2096	19 ^d 14 ^h 03 ^m	21 ^d 22 ^h 55 ^m

Movimiento Este hasta que se pone por el Oeste, alcanzando al mediodía el cenit del observador (amarillo).

Por el contrario, desde los Polos, bien sea el Norte o el Sur (azul), el Sol no se levanta sobre el horizonte, sino que describe un círculo rasante. Prescindiendo de la refracción, se verá sólo medio disco solar durante todo el día: ni amanece, ni culmina ni se pone. En cuanto a las latitudes medias (naranja) el observador verá nacer al Sol por el Este y ponerse por el Oeste, pero su culminación será distinta según estemos en el hemisferio Norte o en el hemisferio Sur:

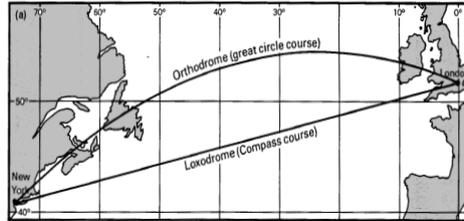
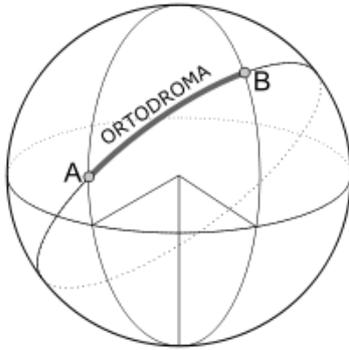
- Desde el hemisferio Norte (0° < lat < 90°), el Sol culmina en el punto Sur.
- Desde el hemisferio Sur (-90° < lat < 0°), el Sol culmina en el punto Norte.

Se da además otra diferencia: los observadores del hemisferio Norte ven al Sol "moverse" de Este a Oeste en sentido retrógrado u *horario*, mientras que desde el hemisferio Sur el Sol parece moverse igualmente del Este a Oeste, pero en sentido directo o *antihorario*.

lugar	altitud de culminación	notas
polo Norte	0°	El Sol sigue el círculo del horizonte.
círculo polar ártico	23° (S)	
trópico de Cáncer	67° (S)	
ecuador	90°	El Sol describe un semicírculo pasando por el cenit.
trópico de Capricornio	67° (N)	
círculo polar antártico	23° (N)	
polo Sur	0°	El Sol sigue el círculo del horizonte.

Ortodrómica

Entre dos puntos cualesquiera de la superficie terrestre pueden trazarse tres líneas diferentes. La **ortodrómica**, la loxodrómica y la isoazimutal.



La ortodrómica es el arco menor de 180 grados del círculo máximo que los une. En el caso de que los puntos estuvieran separados justamente 180 grados, no serían puntos 'cualquiera' ya que estarían en el caso particular de ser puntos opuestos, también conocidos como antípodas, y entre ellos podríamos trazar infinitos arcos de 180 grados de igual longitud. Volviendo al caso general, la ortodrómica es el camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre, pero tiene el grave inconveniente de presentar un ángulo diferente con cada meridiano, excepto cuando dicha ortodrómica coincide con un meridiano o con el ecuador. Por ello, es difícil de trazar una ruta de navegación que siga la ortodrómica ya que obligaría a continuos cambios de rumbo. Cuando las distancias son grandes y la economía que supone seguir el camino más corto es significativa, se realiza una aproximación marcando una serie de puntos intermedios en los cuales se cambia de rumbo y entre los que se siguen las correspondientes loxodrómicas.

Francisco Javier González Martín