UTN HAEDO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL HAEDO

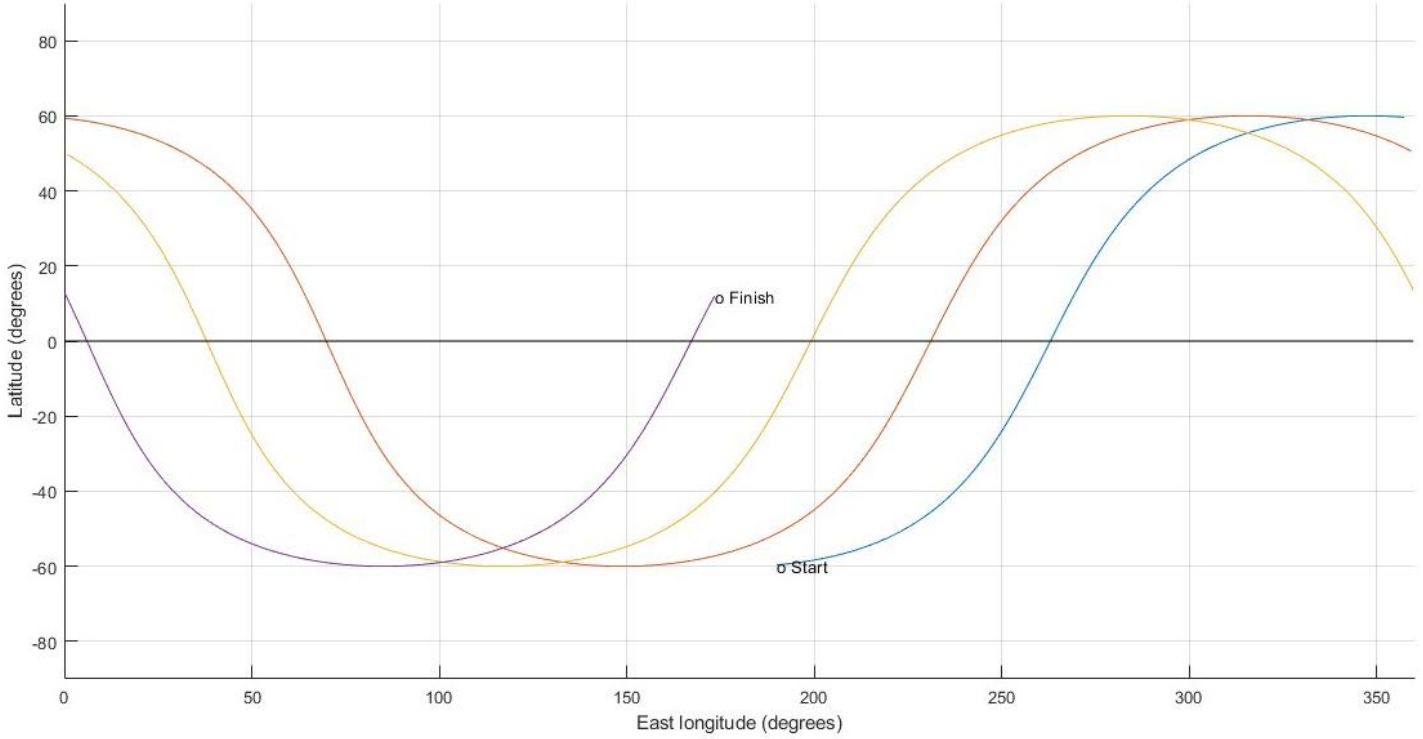
MECÁNICA ORBITAL

GROUND TRACKS: INTERPRETACIÓN GRÁFICA

Introducción

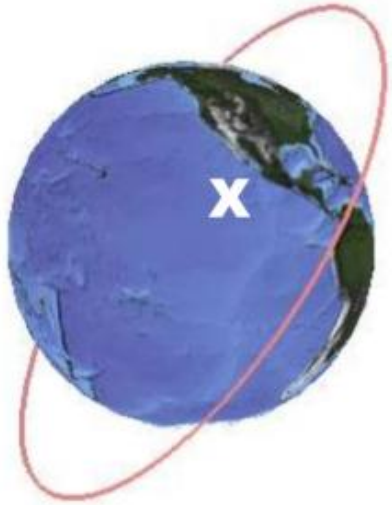
Una trayectoria terrestre (*ground track*) es la representación, sobre un mapa de la Tierra, de la proyección de la posición de un satélite sobre la superficie terrestre a medida que transcurre su movimiento orbital.

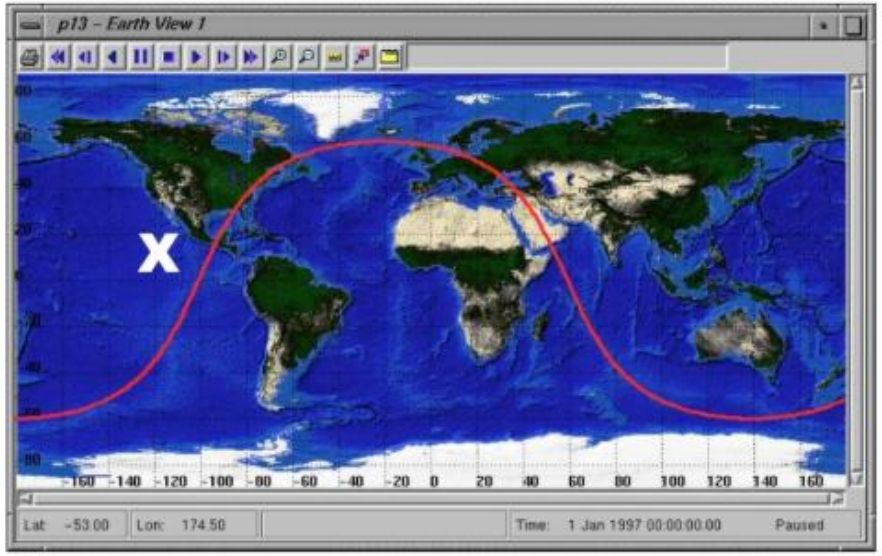
Aunque a primera vista una trayectoria terrestre puede parecer simplemente una sucesión de curvas, su geometría permite obtener información sobre distintos parámetros orbitales



Tierra sin rotación

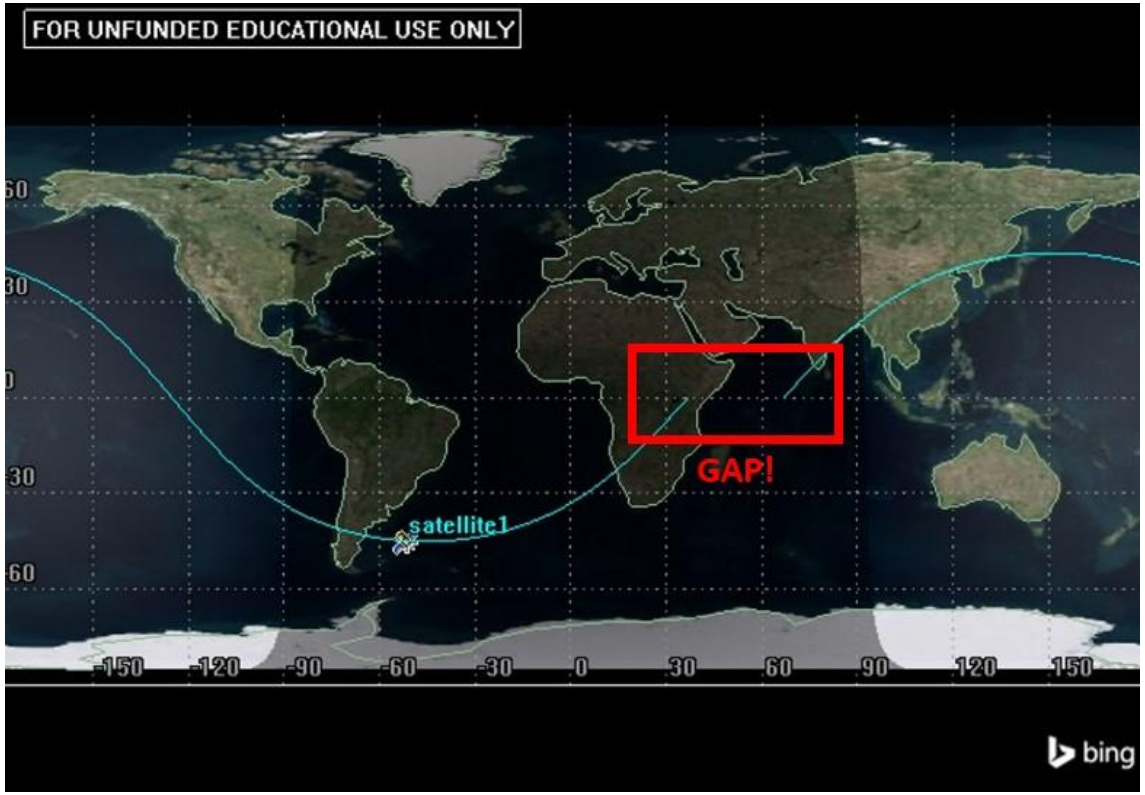
Si se supone, inicialmente, que la Tierra no rota, el plano orbital permanece fijo respecto de la superficie terrestre. En consecuencia, la trayectoria proyectada sobre la Tierra se repetiría exactamente sobre sí misma después de cada revolución. Para una órbita inclinada, la trayectoria tendría una forma aproximadamente sinusoidal y cada revolución pasaría por los mismos puntos de la superficie terrestre.



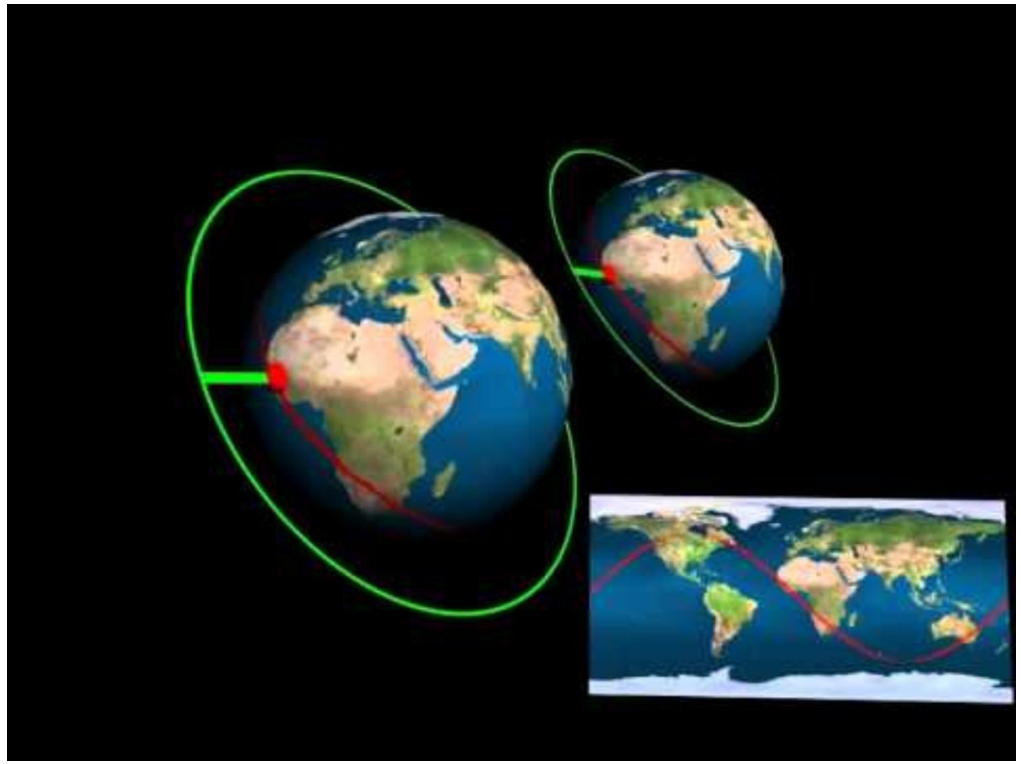


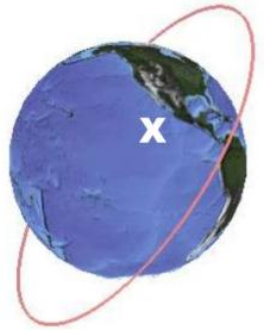
Tierra con rotación

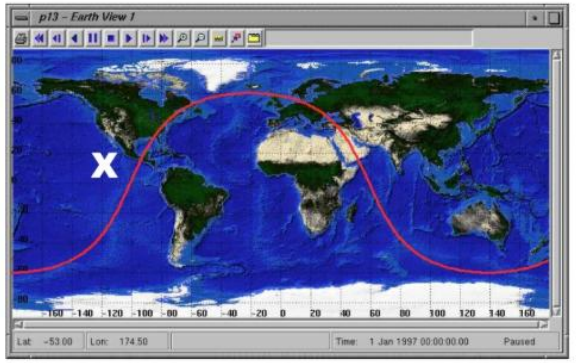
Cuando se considera la rotación terrestre, la situación cambia. Mientras el satélite completa una revolución, la Tierra también gira alrededor de su eje. Por lo tanto, cuando el satélite vuelve a pasar por un determinado punto de su órbita, la superficie terrestre ya no se encuentra en la misma posición: la trayectoria terrestre se desplaza longitudinalmente de una revolución a la siguiente hacia el oeste.

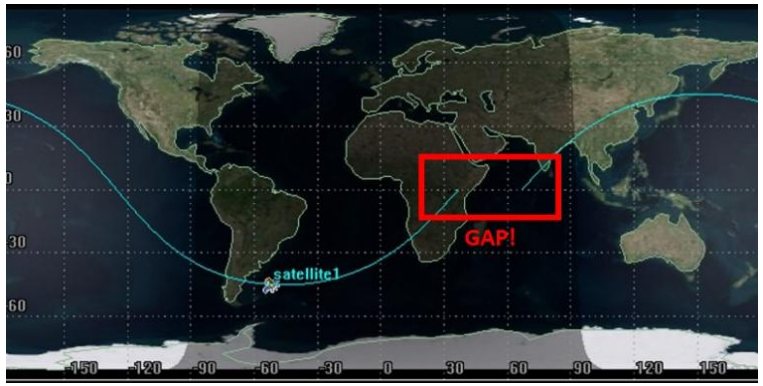


Rotación de la Tierra







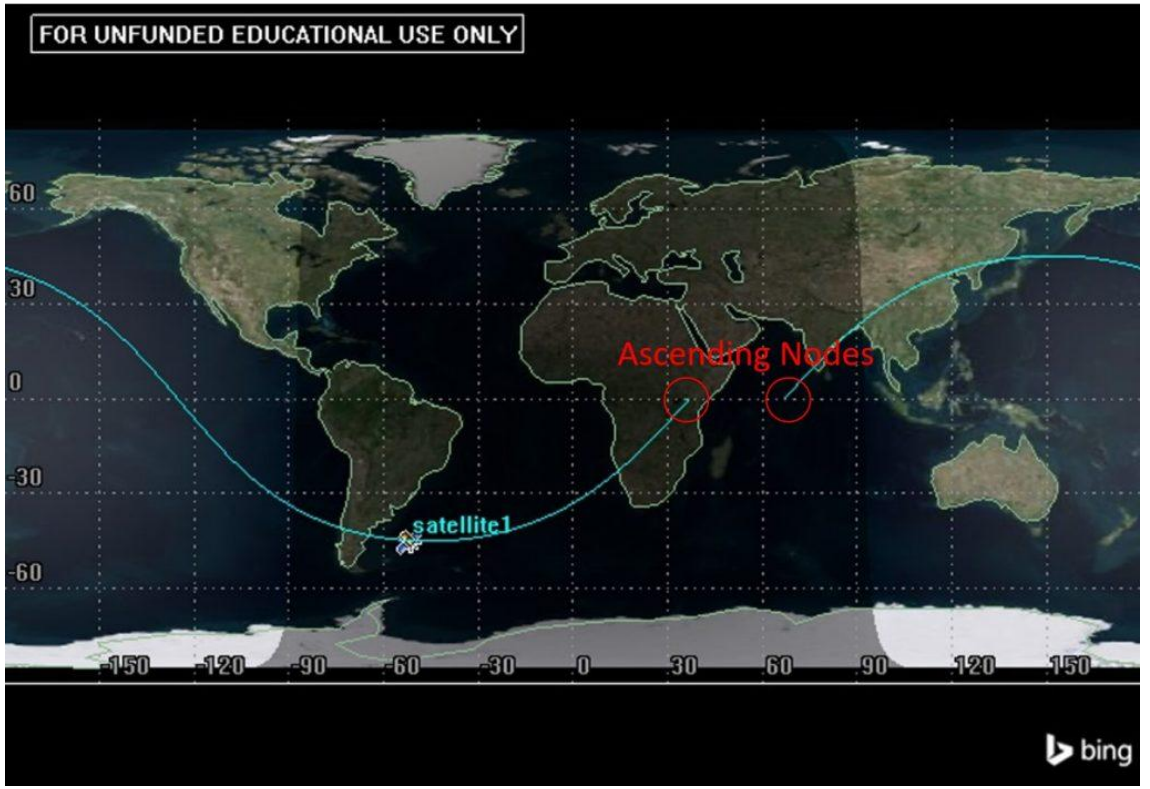


La Tierra al rotar, desplaza la traza hacia el oeste

Nodo ascendente

En una trayectoria terrestre es posible identificar puntos equivalentes pertenecientes a revoluciones sucesivas. En particular, pueden utilizarse los nodos ascendentes, definidos como los puntos donde el satélite cruza el ecuador desde el hemisferio sur hacia el hemisferio norte.

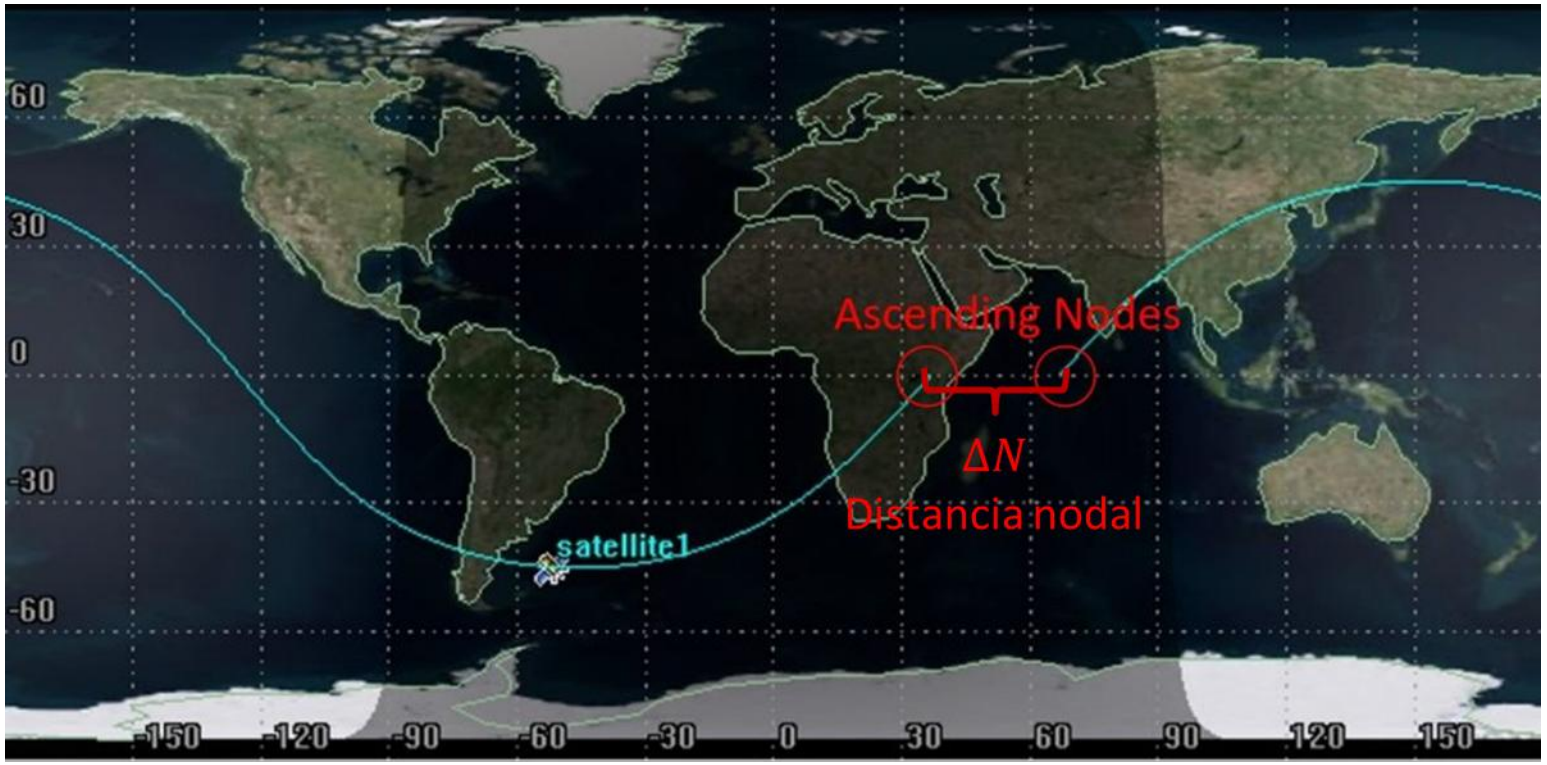
Si la Tierra no rotara, todos los nodos ascendentes de las distintas revoluciones aparecerían en el mismo punto del ecuador



Distancia nodal

Debido a la rotación terrestre, cada revolución presenta un nodo ascendente desplazado longitudinalmente respecto del anterior.

La separación longitudinal entre estos puntos permite determinar el desplazamiento de la trayectoria terrestre entre revoluciones.



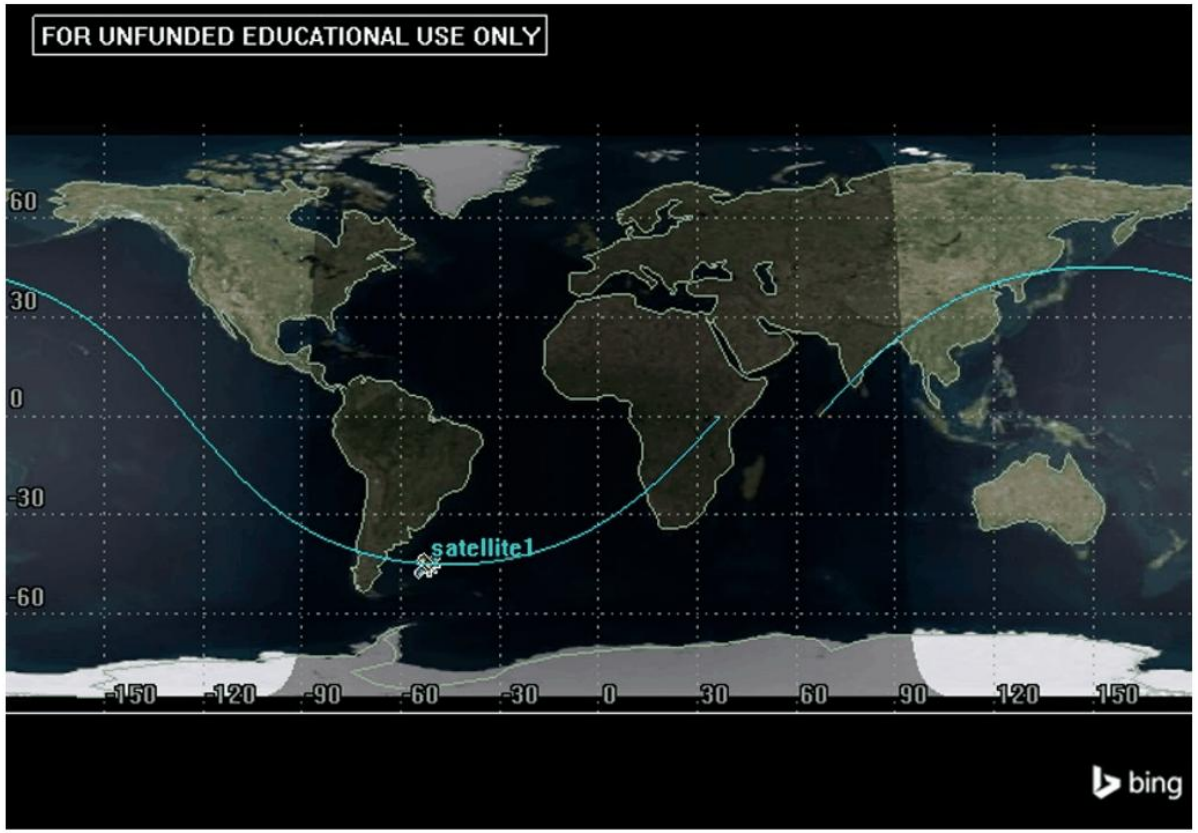
Distancia nodal

Esta separación puede medirse de dos formas. El primero es determinar la distancia longitudinal entre los nodos ascendentes y restarla de 360°.

$$\Delta N = 360º - longuitud\ entre\ nodos\ ascendtes$$

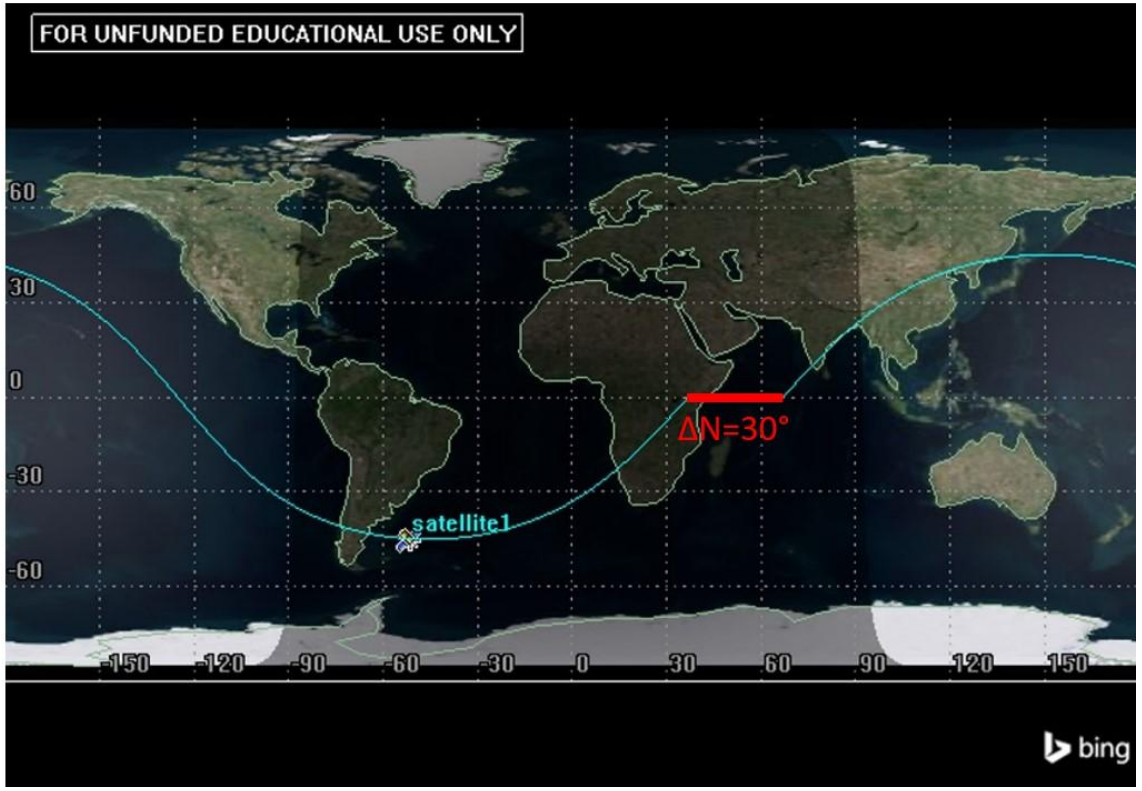
$$\Delta N = 360º - 330º$$

$$\Delta N = 30º$$

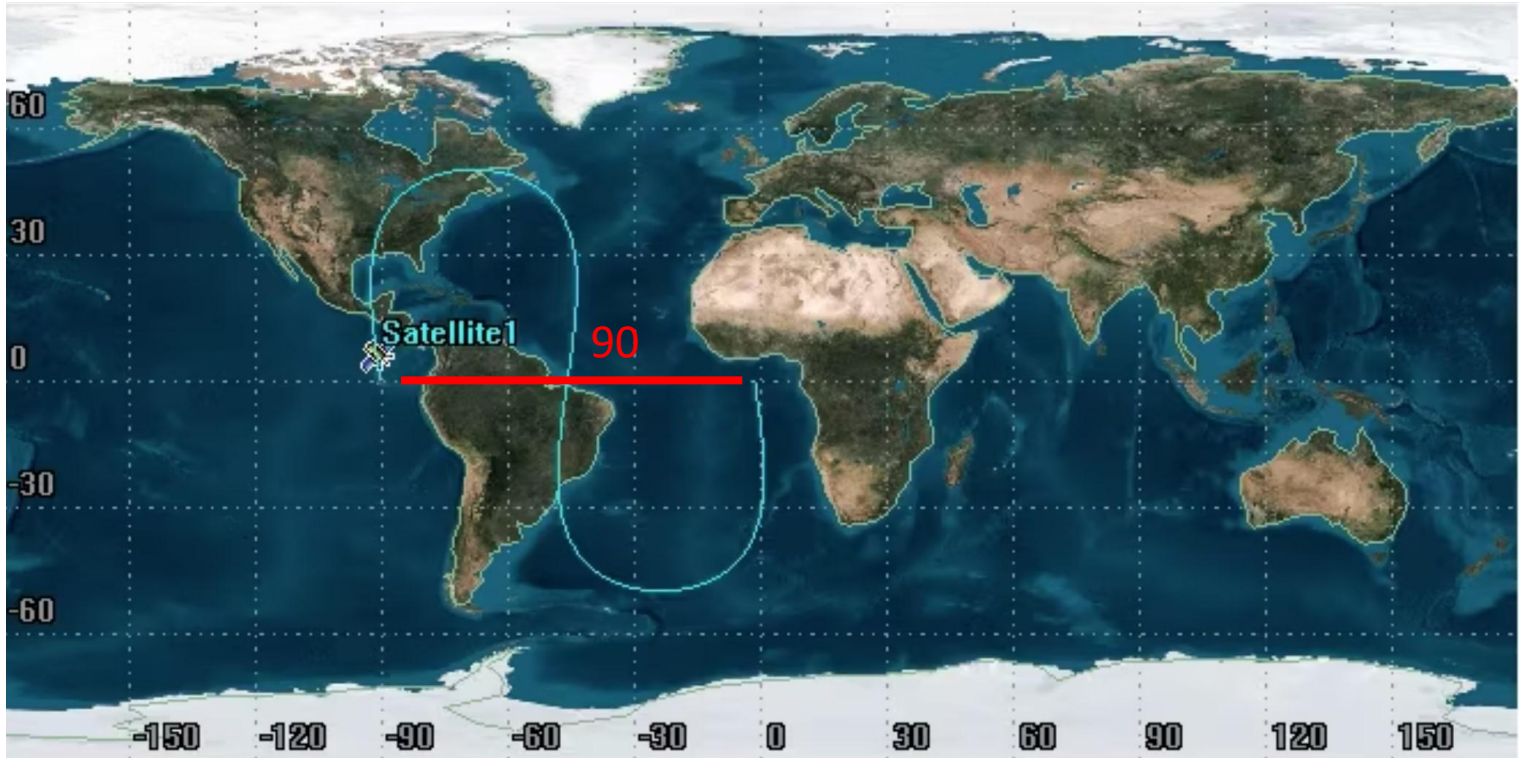


Distancia nodal

El otro método consiste en medir directamente la distancia longuitudinal entre los dos nodos ascendentes



Distancia nodal



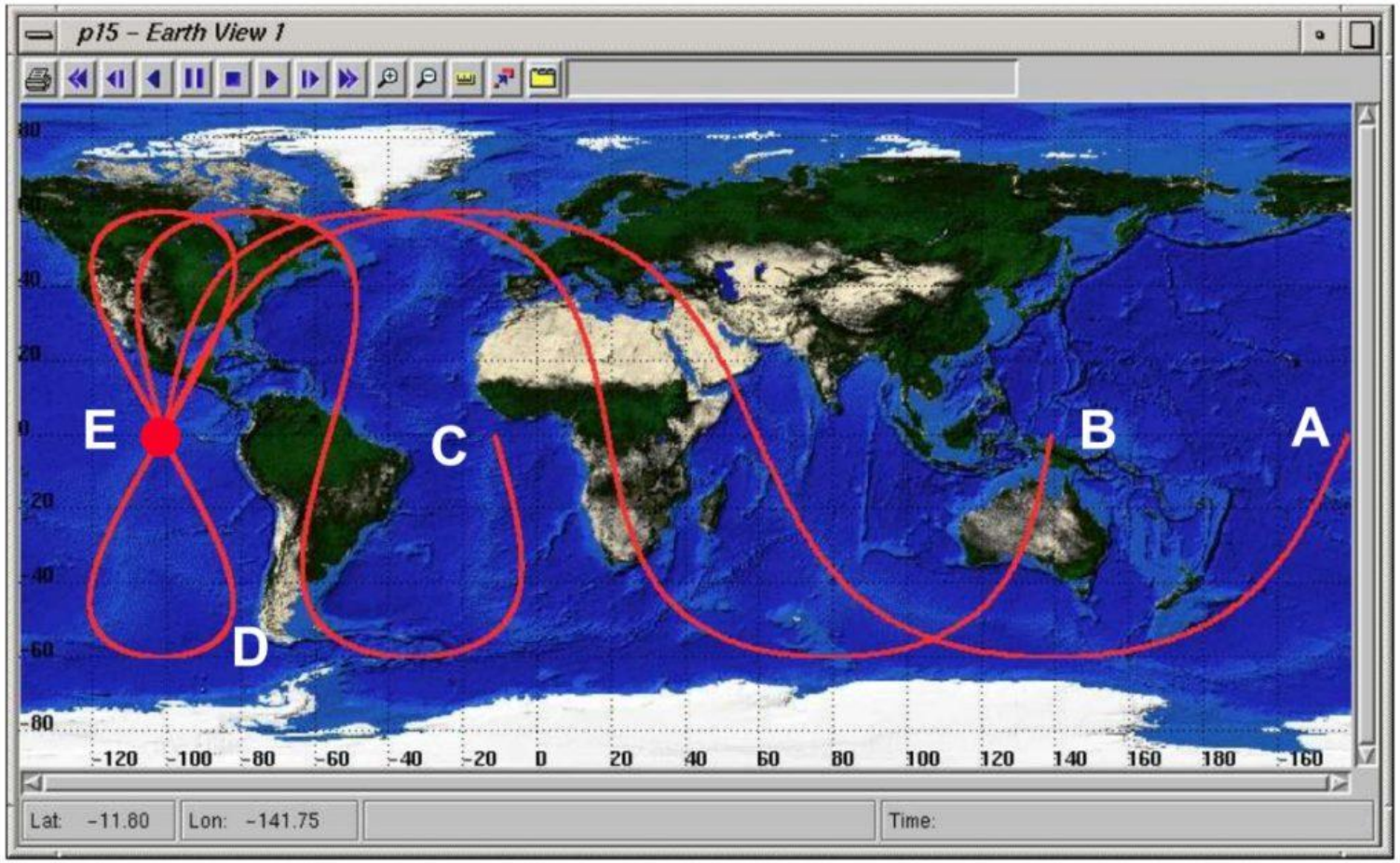
En esta vista de la trayectoria terrestre, para determinar ΔN utilizamos el método de calcular la longitud recorrida entre nodos ascendentes y restarla de 360°. Esto se debe a que la trayectoria completa es visible en un movimiento continuo y el "hueco" se divide. Podemos observar que la distancia recorrida entre nodos ascendentes es de 90°. Por lo tanto:

$$\Delta N = 360 - longitud\ recorrida$$

En el ejemplo

$$\Delta N = 360 - 90 = 270$$

Período



Esta brecha, se debe a la rotación de la Tierra, y cuanto mas se acerca al periodo de 24horas, mayor es la brecha. Gráficamente, cuanto más largos son los períodos, más se comprimen las trayectorias terrestres. Esto se debe principalmente a que nos acercamos cada vez más a la rotación de la Tierra y, por lo tanto, con respecto a la superficie terrestre, la traza parece estar estacionaria (un punto). La orbita:

- A tiene una duración de 2,67 horas
- B de 8 horas
- C 18 horas
- D y E 24horas (geosincrónica y geoestacionaria)

Período

El día sideral tiene una duración aproximada de:

$$T_T = 23h56\,\text{min} = 23.9333\ h$$

Podemos decir que la Tierra gira

$$\omega_T = \frac{360º}{23.9333\ h} = 15.04\ º/h$$

Por lo tanto, la Tierra rota aproximadamente 15,04° por hora hacia el este. Esta relación permite vincular el desplazamiento longitudinal observado en el *ground track* con el período orbital de la siguiente forma

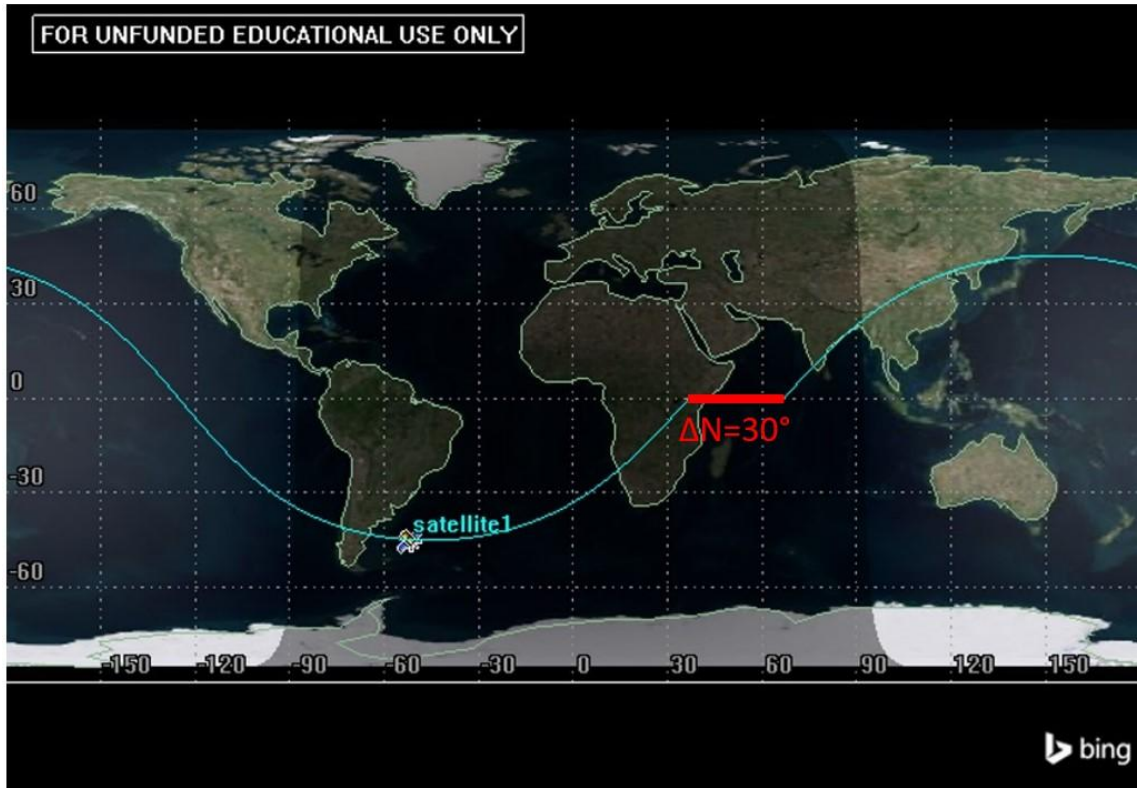
$$\mathrm{T_{orbita}} = \frac{\Delta \mathrm{N}}{15{,}04°/h}$$

Período

Supongamos que entre dos pasajes equivalentes de la trayectoria se observa una separación longitudinal de aproximadamente $30º$. Como la tierra gira a $15.04\ º/h$, el tiempo necesario para que la Tierra rote esos $30º$ es:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{orbita}} = \frac{30º}{15{,}04°/h} \cong 1.995\ h$$

Este valor permite estimar el período orbital en función de la geometría observada, teniendo en cuenta el sentido de la órbita.



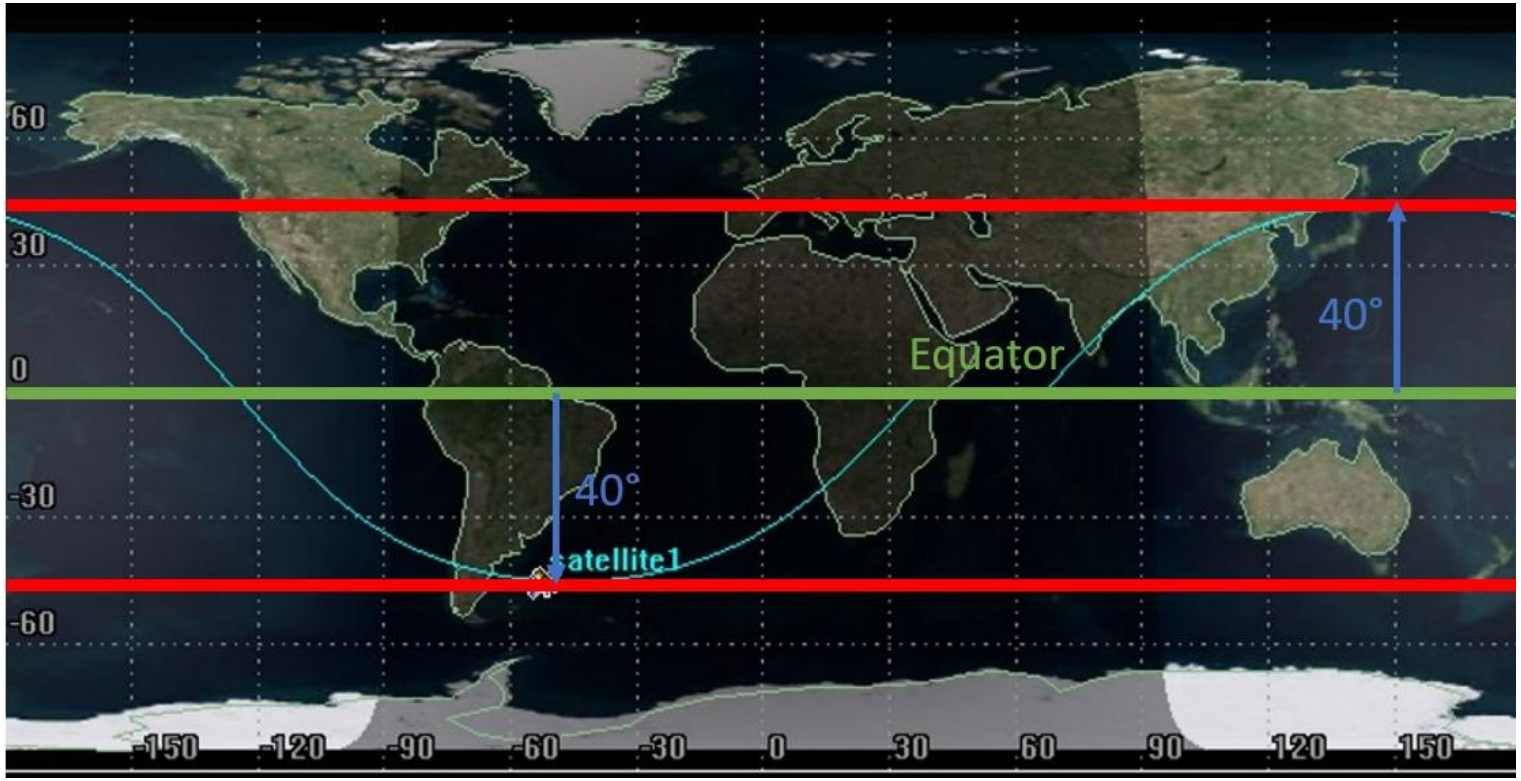
Semieje mayor

Una vez determinado el periodo orbital, puede determinarse el semieje mayor mediante la tercera ley de Kepler

$$a = \sqrt[3]{\mu \left(\frac{T}{2\,\pi}\right)^2}$$

Por lo tanto, la interpretación del desplazamiento longitudinal del *ground track* permite realizar una estimación indirecta del tamaño de la órbita.

Inclinación



Para órbitas directas, la inclinación es la distancia latitudinal desde el ecuador hasta el máximo o mínimo de la trayectoria terrestre.

Nótese que un satélite en LEO con una inclinación de 0° sería una línea recta en el ecuador.

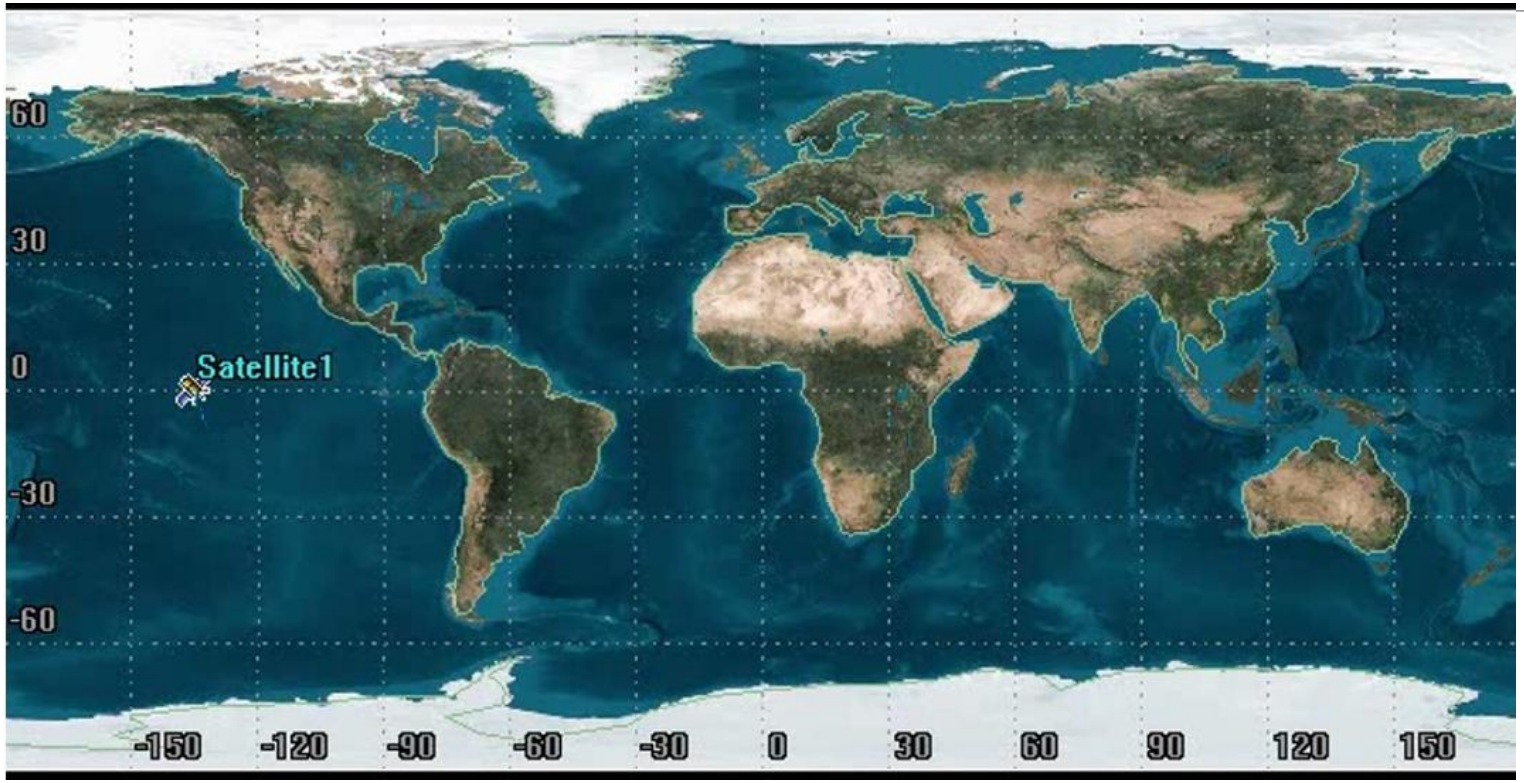
Orbitas GSO y GEO

Un caso particular se presenta cuando el período orbital coincide con el período de rotación sideral de la Tierra:

$$T_T = 23.9333\ h$$

La orbita es entonces geosíncrona. Sin embargo, no toda orbita geosíncrona es geoestacionaria. el satélite completa una revolución aproximadamente durante el mismo tiempo que tarda la Tierra en completar una rotación. Por lo tanto, los nodos ascendentes sucesivos aparecen aproximadamente igual sobre la misma longitud. Otra forma de expresarlo es considerar que, a lo largo de una revolución completa, el satélite recorre $360º$ respecto de su movimiento orbital

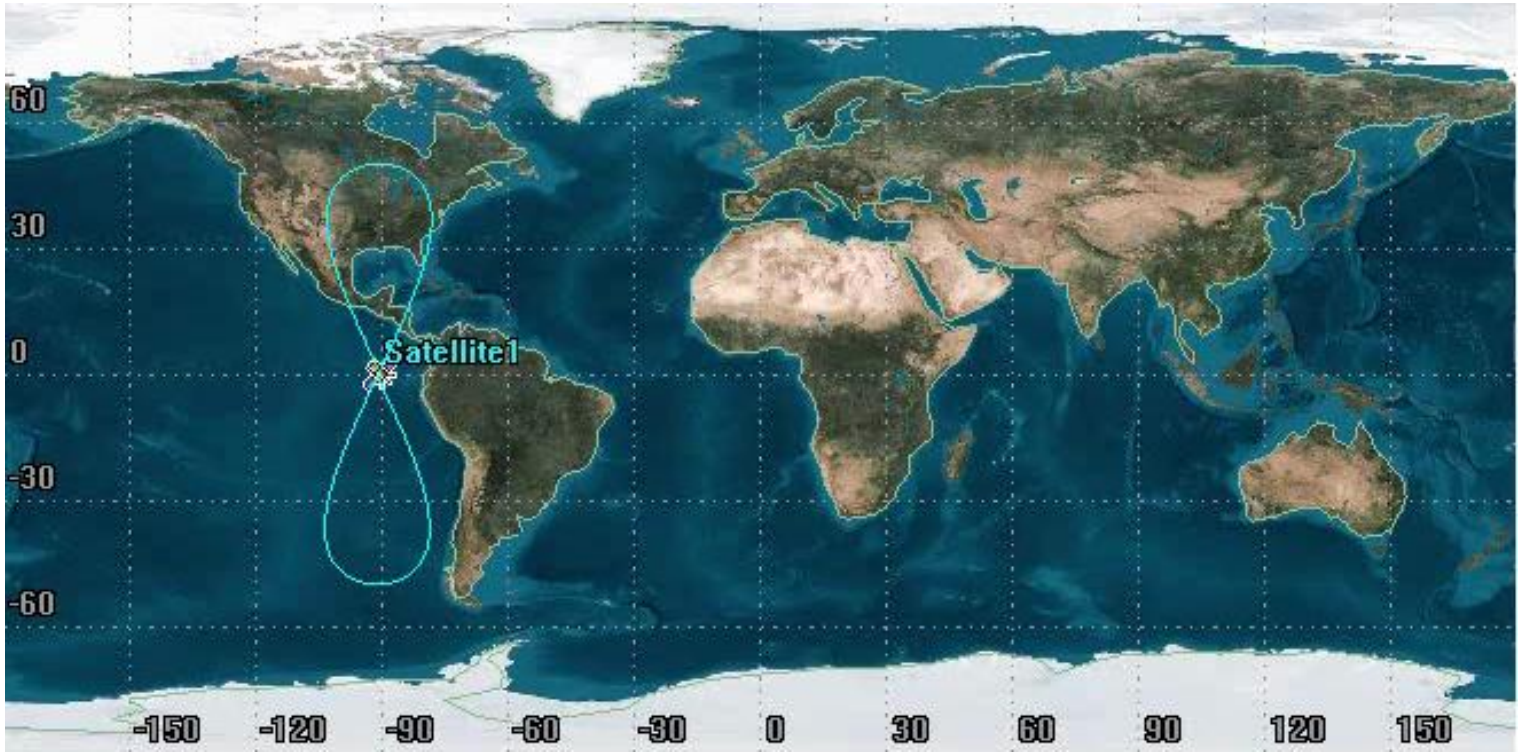
Ejemplo orbita geostacionaria (GEO)



Como indica la palabra “estacionaria”, la órbita se ve completamente inmóvil desde la Tierra porque el satélite se mueve exactamente a la misma velocidad que la rotación de la Tierra. La distancia nodal ΔN = 360º

Orbita geostacionaria: circular, inclinación cero y periodo igual al terrestre.

Ejemplo orbita geosincronica (GSO)



Lo importante de una órbita geoestacionaria es que tenga una inclinación de 0°. Si no la tiene, será una órbita geosíncrona. Esto se manifestará en una trayectoria terrestre en forma de ocho. Mantendrá su distancia nodal de 360° ya que tiene un nodo ascendente donde se cruza el ocho.

Orbita geosincronica: circular, inclinación distinta de cero y perido igual al terrestre.

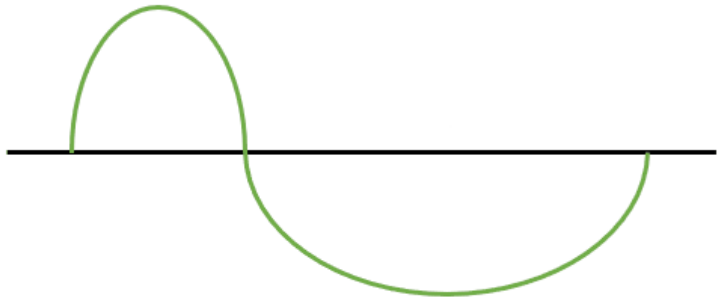
Excentricidad

Hasta ahora, todos estos han sido ejemplos de órbitas circulares con una excentricidad de 0. Un aspecto importante a comprender sobre las trayectorias sobre el terreno, en relación con la excentricidad, es que el valor exacto de la excentricidad no se puede determinar si la órbita no es circular. Podemos distinguir si la órbita es circular o elíptica. La trayectoria sobre el terreno de una órbita circular será más uniforme. Una órbita elíptica será asimétrica; es decir, más alargada en algunas partes y más comprimida o "achatada" en otras.

Tenemos una forma de describir esto que no se limita a “estirado” o “comprimido”. Para determinarlo, consideraremos la simetría axial y la simetría de bisagra

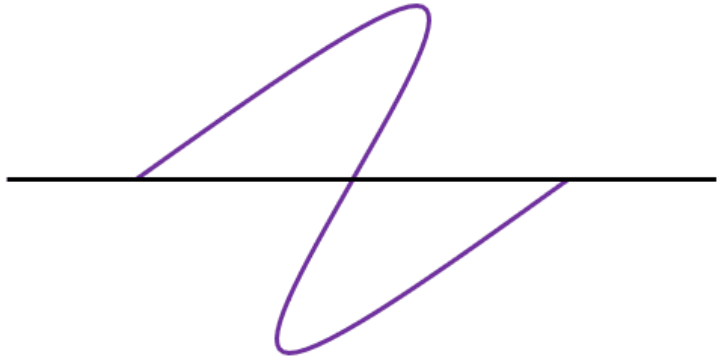
Excentricidad

Line Symmetric



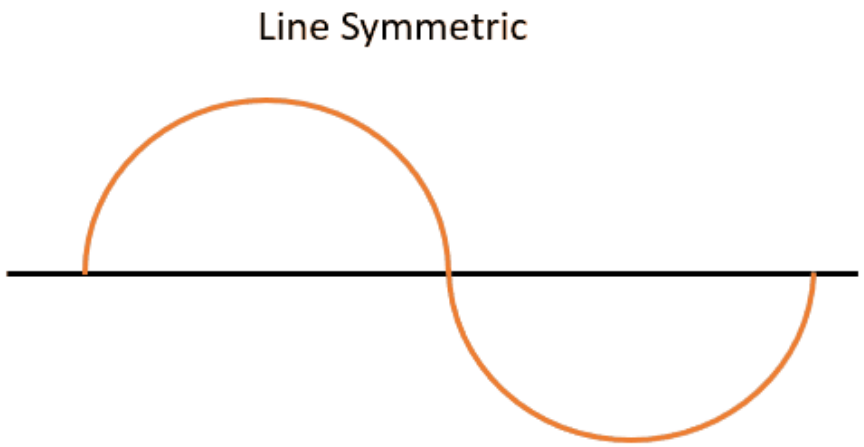
Para la simetría axial el primer paso es tomar la trayectoria terrestre en su totalidad y dividirla por la mitad en el ecuador, donde tenemos una porción del hemisferio norte y otra del hemisferio sur. Luego, dividiremos cada una de estas por la mitad verticalmente en sus puntos más altos (máximo y mínimo). Si cada porción norte y sur es simétrica, entonces tiene simetría axial.

Hinge Symmetric



Para la simetría de bisagra, volvemos a considerar el origen. En este caso, tomaremos como punto de pivote el punto donde el satélite cruza el ecuador. Si al rotar una mitad de la órbita alrededor de ese punto, tras una rotación de 180°, la órbita permanece invariable (quedando perfectamente superpuesta a la otra mitad), entonces presenta simetría de bisagra

Excentricidad



Una órbita terrestre circular tendrá ambas características y será simétrica tanto axial como respecto a un eje. Si solo es simétrica en un tipo de simetría y no en el otro, entonces no es circular y, por lo tanto, su excentricidad no es cero

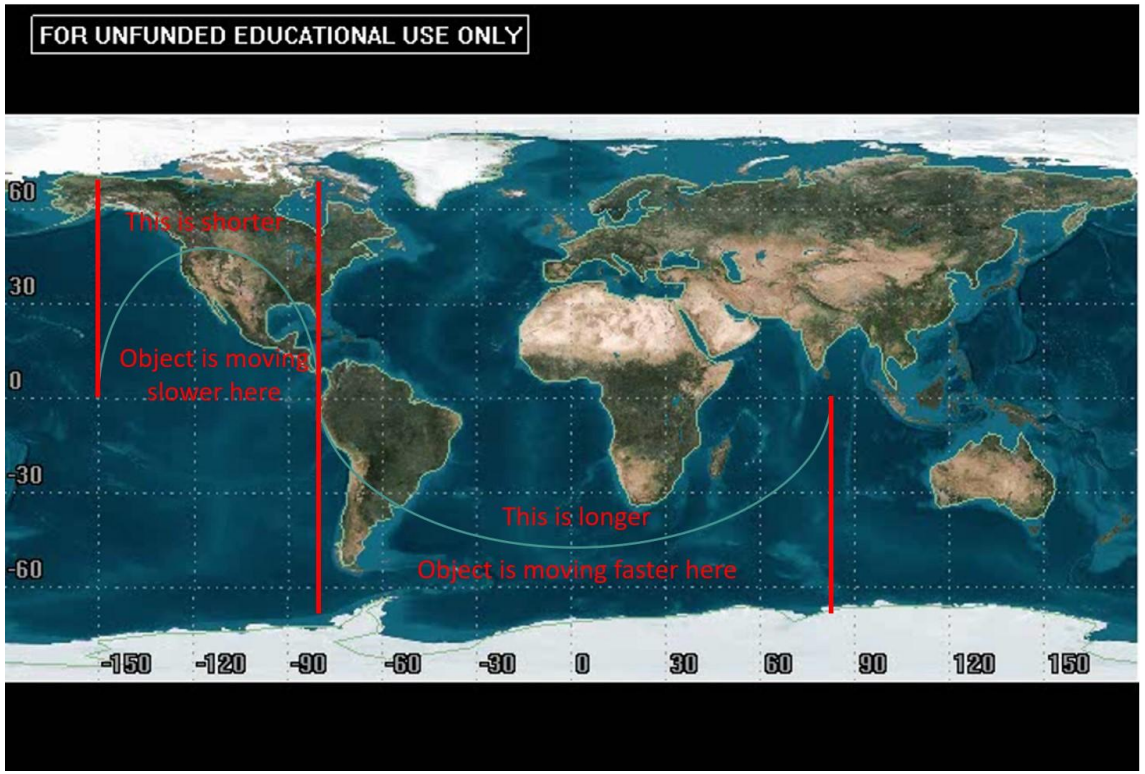
RAAN

La ascensión recta del nodo ascendente (RAAN), se mide desde el equinoccio vernal hasta el nodo ascendente. Para determinarla es necesario disponer de una referencia que indique la dirección del equinoccio vernal. En un *ground track* convencional esta referencia normalmente no está representada.

Por lo tanto, el RAAN no puede determinarse directamente a partir de un ground track convencional a menos que el mapa incluya la referencia correspondiente al equinoccio vernal.

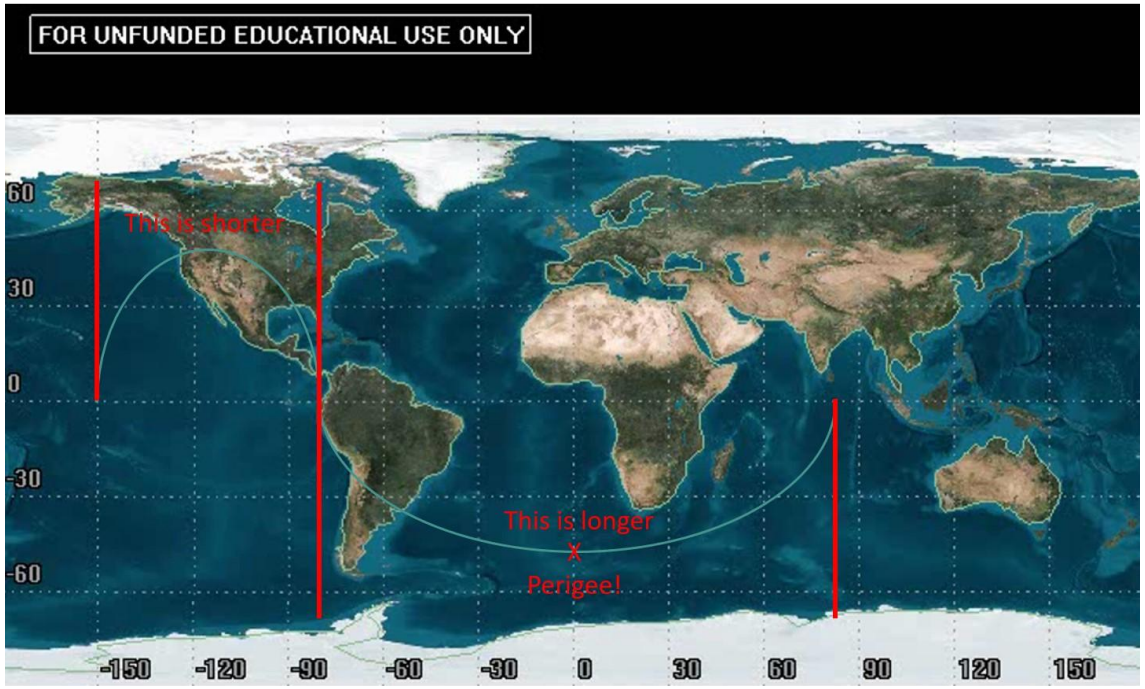
Perigeo

El perigeo es el punto de la órbita donde la distancia entre el satélite y el centro de la Tierra es mínima. En una órbita elíptica, la velocidad orbital es máxima en el perigeo y mínima en el apogeo. Esta propiedad puede utilizarse para interpretar la trayectoria terrestre.



Perigeo

Debido a la rotación terrestre, los distintos tramos de la trayectoria pueden presentar diferentes longitudes aparentes. En una órbita directa, un tramo en el que el satélite se desplaza rápidamente respecto de la superficie terrestre puede aparecer más extendido longitudinalmente, mientras que un tramo correspondiente a una menor velocidad relativa puede aparecer más comprimido. Por lo tanto, para localizar aproximadamente el perigeo se busca la región asociada con la mayor velocidad relativa del satélite respecto de la superficie terrestre.

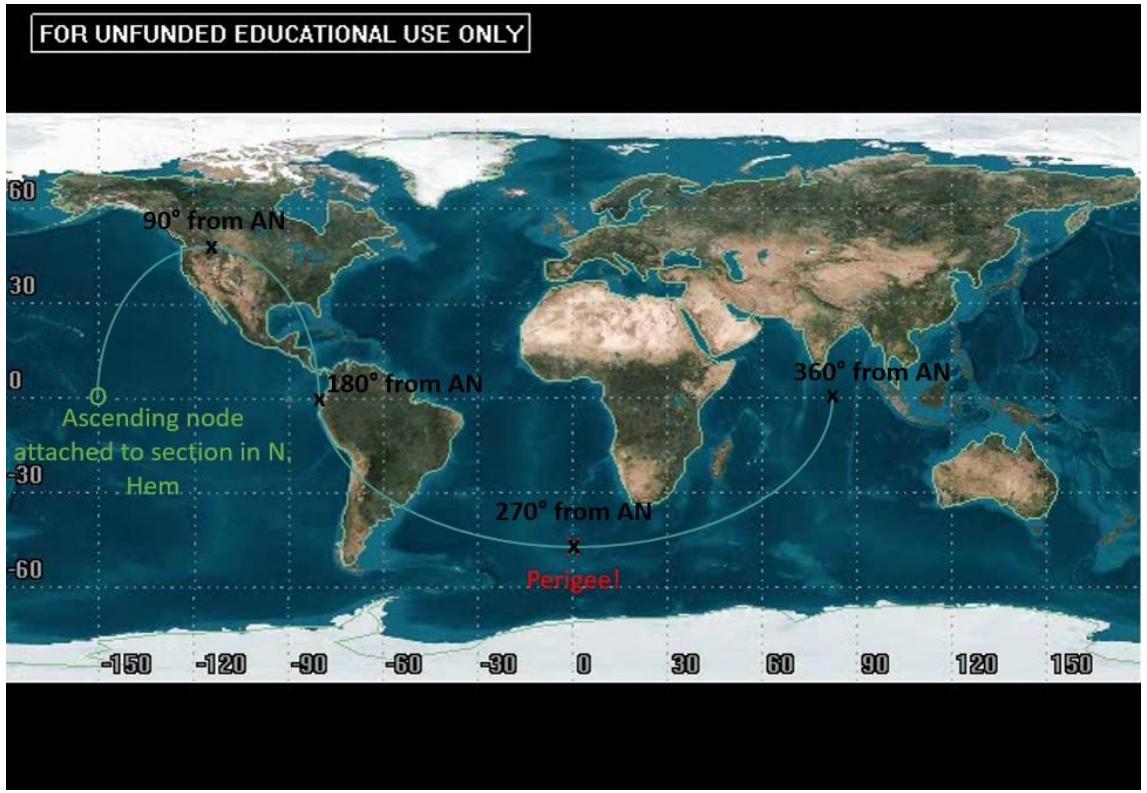


Argumento de perigeo

Una vez localizado el nodo ascendente y estimada la posición del perigeo, puede determinarse el argumento del perigeo. El ángulo se mide dentro del plano orbital y en el sentido del movimiento del satélite

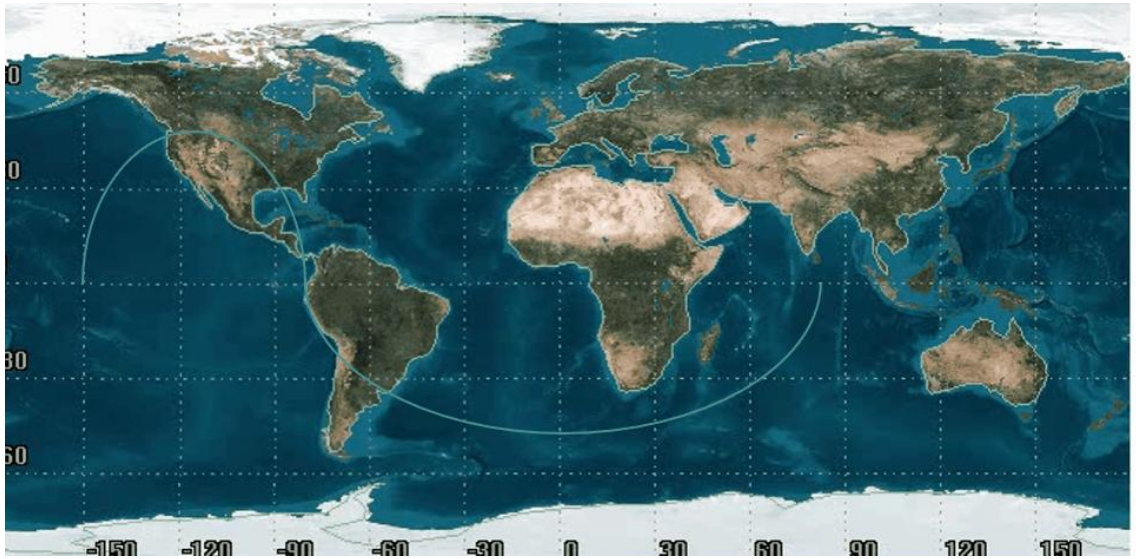
Por lo tanto, no debe confundirse el argumento del perigeo con:

- la longitud geográfica del perigeo;
- la latitud del perigeo;
- la distancia longitudinal entre el nodo ascendente y el perigeo



Argumento de perigeo

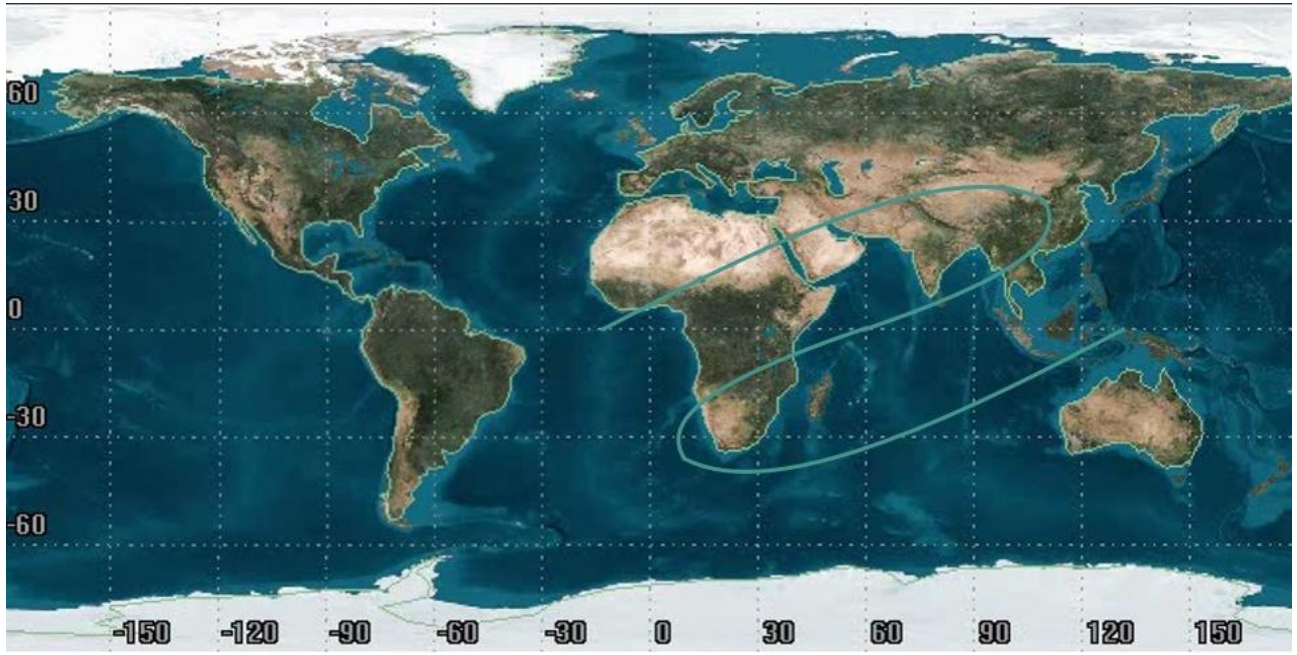
Los pasos para determinar el argumento de perigeo (ω) son:



1. **Identificar el nodo ascendente**: Es el punto donde el satélite cruza el ecuador de sur a norte.
2. **Localizar el perigeo**: El satélite se mueve más rápido en el perigeo y más lento en el apogeo. En la trayectoria terrestre, las secciones más largas representan mayor velocidad, por lo que el perigeo se ubica aproximadamente en la mitad de la parte más larga de la onda trazada sobre el mapa.
3. **Medir el argumento del perigeo**: Se mide el ángulo desde el nodo ascendente inicial hasta el perigeo, a lo largo del recorrido orbital (no sobre el mapa).

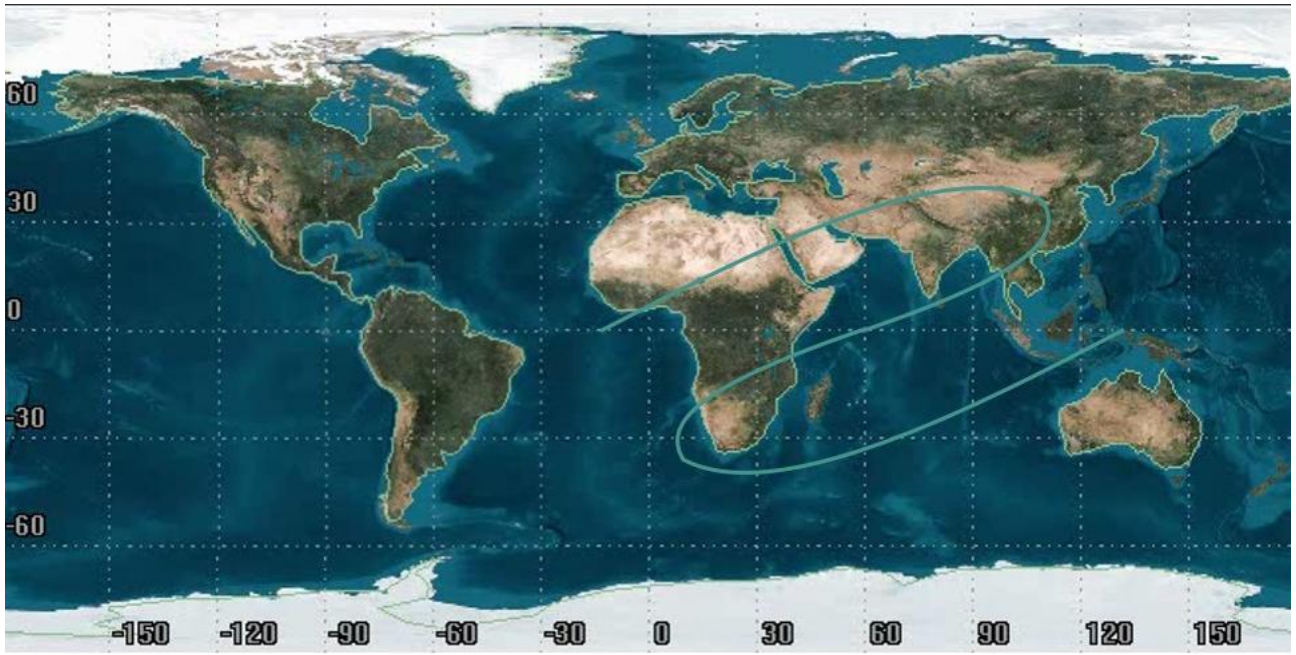
Argumento de perigeo

Cuando hablamos de tramos “largos” y “cortos” de una trayectoria terrestre, ¿qué hacemos cuando nos encontramos con una trayectoria que parece moverse hacia atrás? En la siguiente imagen, el objeto en órbita parece estar haciendo precisamente eso:



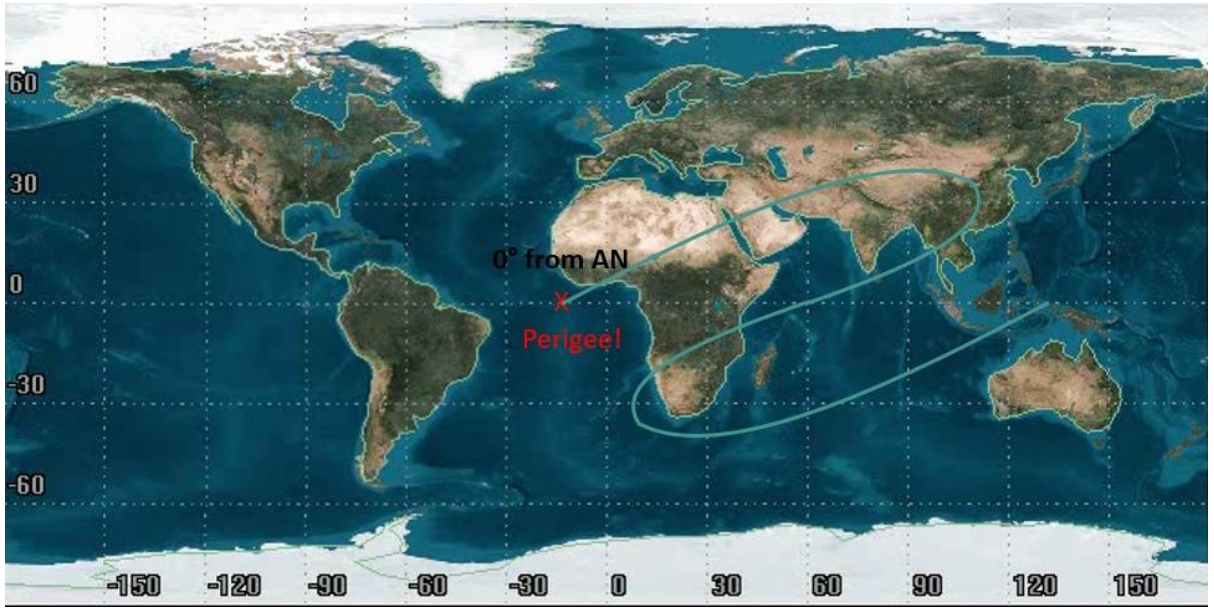
Argumento de perigeo

Existen casos en que una trayectoria puede parecer desplazarse “hacia atrás” es decir, de derecha a izquierda sobre el mapa. El satélite no está retrocediendo en su órbita. Lo que ocurre es que, observado desde la superficie terrestre, el movimiento orbital del satélite se combina con la rotación de la Tierra. En determinadas regiones, la superficie terrestre puede desplazarse longitudinalmente más rápido que la proyección del satélite, generando un movimiento aparente hacia el oeste o "hacia atrás" (retrogrado).



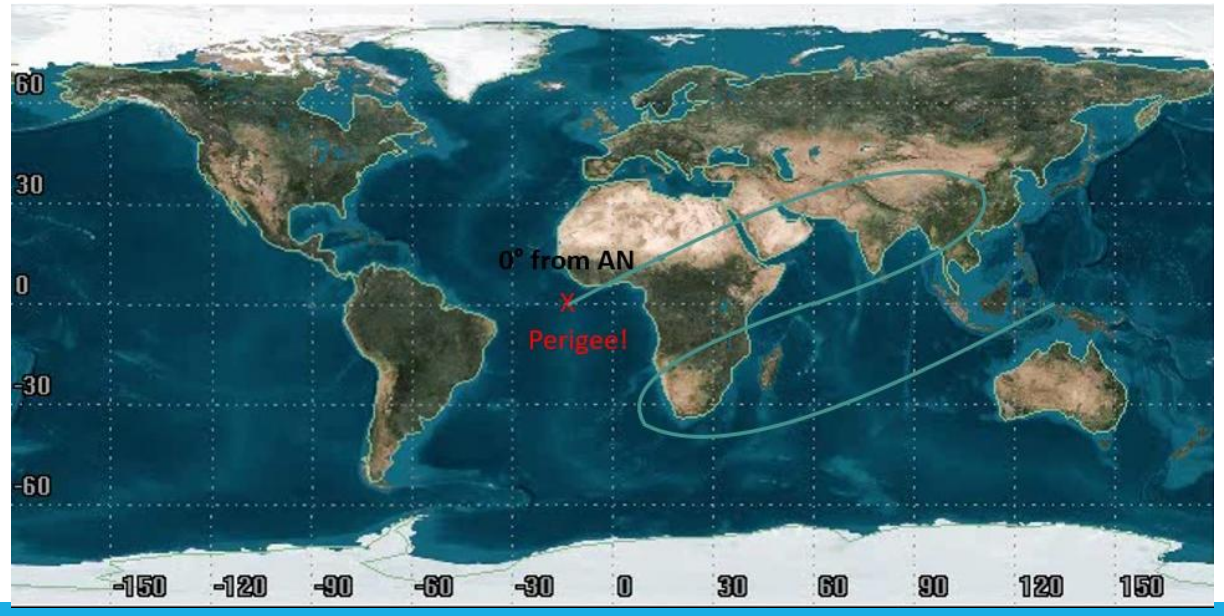
Argumento de perigeo

Para identificar el perigeo se debe determinar primero qué región corresponde a la mayor velocidad relativa. Una vez localizada esa región, el perigeo se encuentra aproximadamente en su punto medio. Por lo tanto, el perigeo definitivamente no estará en el tramo en el que el satélite parece moverse hacia atrás.



Argumento de perigeo

En el ejemplo mostrado anteriormente, eso elimina la mitad de la órbita. La otra mitad será "la sección rápida", por lo que el medio de esa será su parte más rápida y ese es el perigeo. Esa porción de la trayectoria terrestre termina dividiéndose uniformemente en dos secciones, lo que hace que la parte donde se corta sea el perigeo. Esto también resulta ser el nodo ascendente, por lo que la distancia entre el nodo ascendente y el perigeo conduce a un argumento de perigeo de $\omega = 0$



Argumento de perigeo

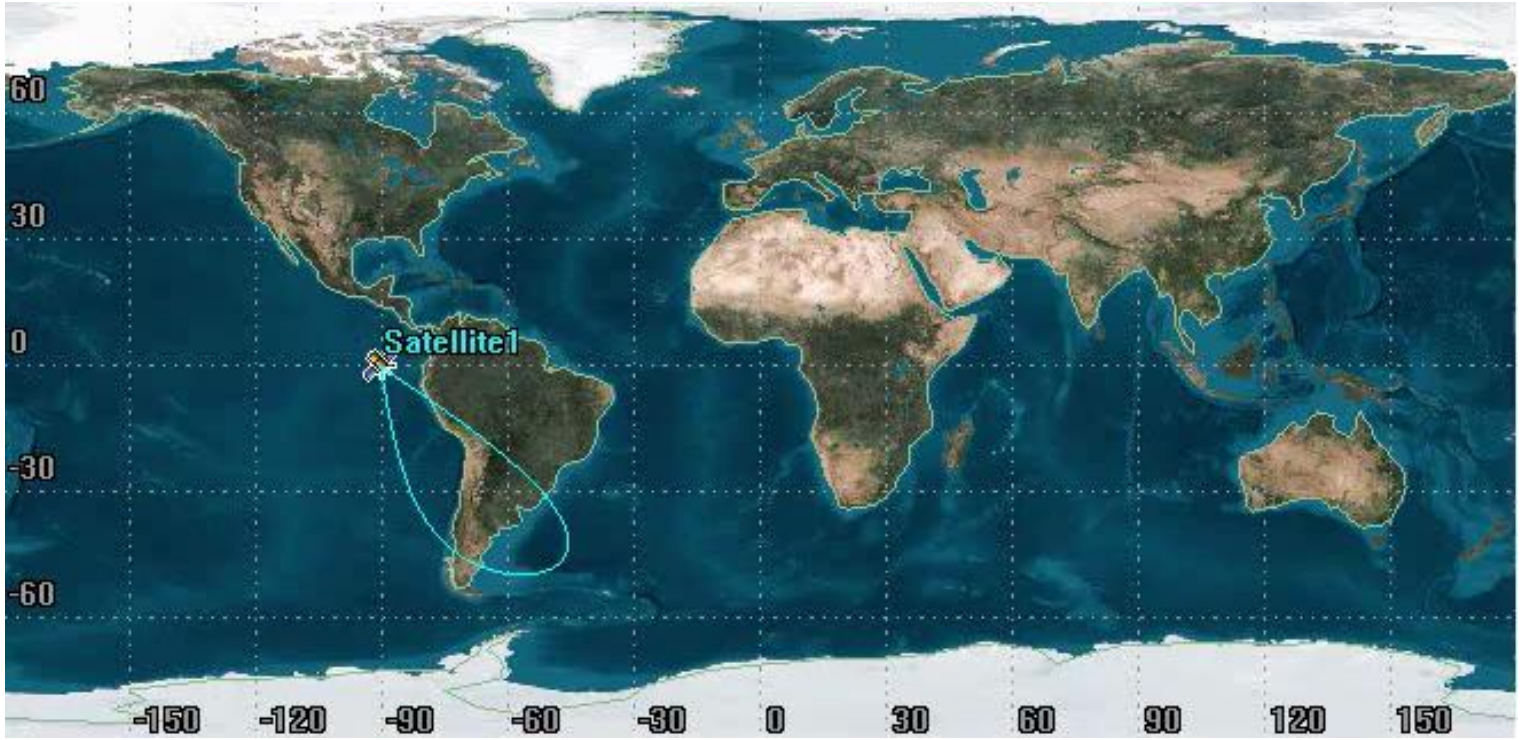
Cuando una órbita no es simétrica, puede resultar más difícil interpretar el argumento del perigeo. En concreto, las trayectorias terrestres de los satélites en órbita geosincrónicas (GSO) son muy peculiares. Pueden tener la forma de punto o de ocho que vimos en las órbitas GSO circulares, pero también pueden parecer ochos incompletos, formas de lágrima, o incluso círculos.

Es importante destacar que una trayectoria terrestre circular no implica una órbita circular, sino una órbita GSO muy excéntrica. Determinar el argumento del perigeo para órbitas GSO no circulares puede resultar complejo, pero aún podemos utilizar el mismo proceso para determinarlo.

Argumento de perigeo

Para el vídeo, debemos considerar la trayectoria completa del satélite sobre la superficie terrestre. La primera parte se encuentra en el hemisferio sur y la segunda en el hemisferio norte. A lo largo de toda la órbita, el satélite retrocede durante la mitad de la misma, por lo que podemos descartar esa parte para determinar el perigeo. Esto significa que el perigeo se encontrará a la mitad de la otra mitad.

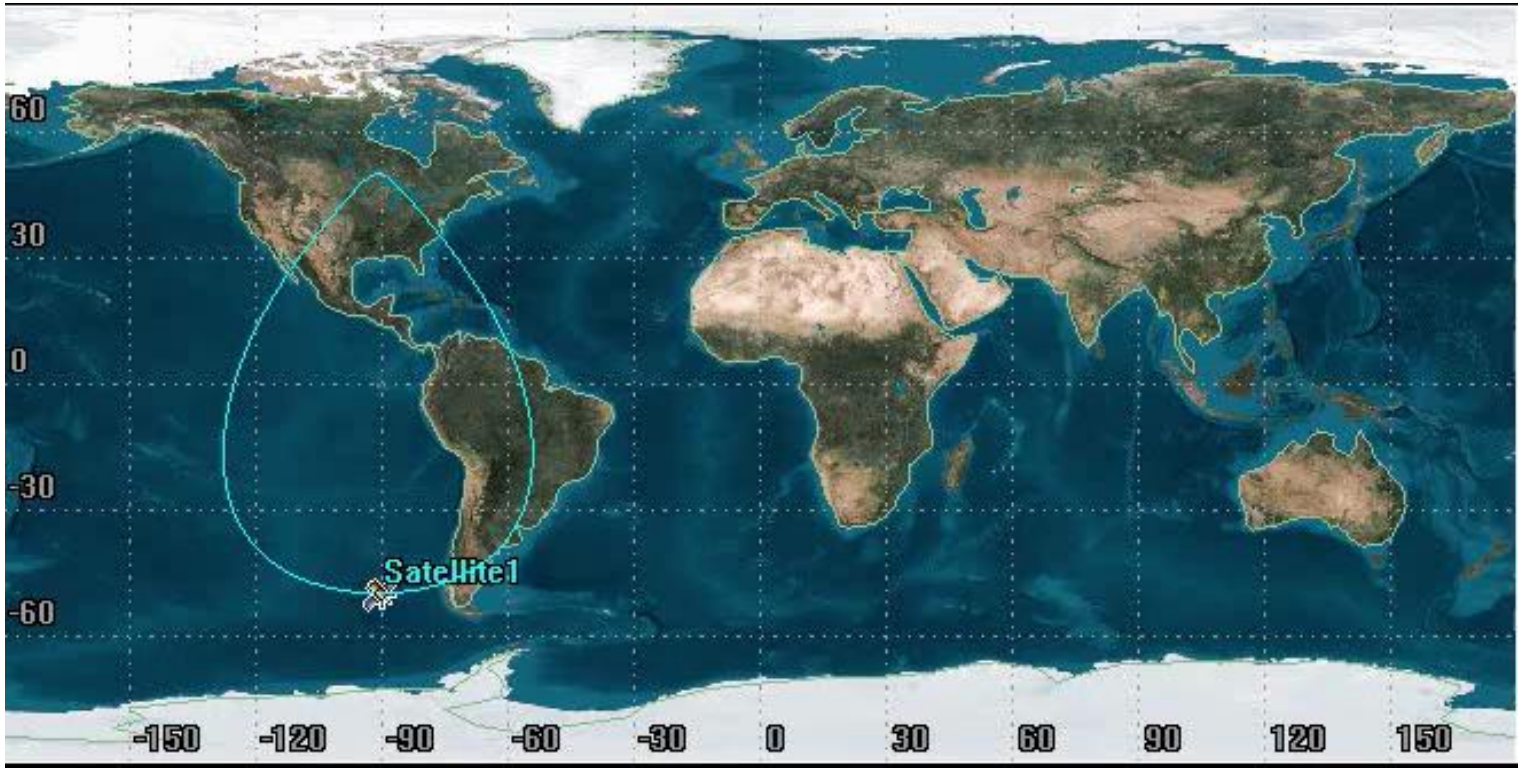
Esto coincide con el ecuador, lo que significa que está en el nodo ascendente o descendente. Al observar el vídeo, vemos que alcanza este punto en el nodo descendente. El nodo descendente siempre está a 180° del nodo ascendente. Esto nos lleva a una estimación del perigeo de $\omega = 180$



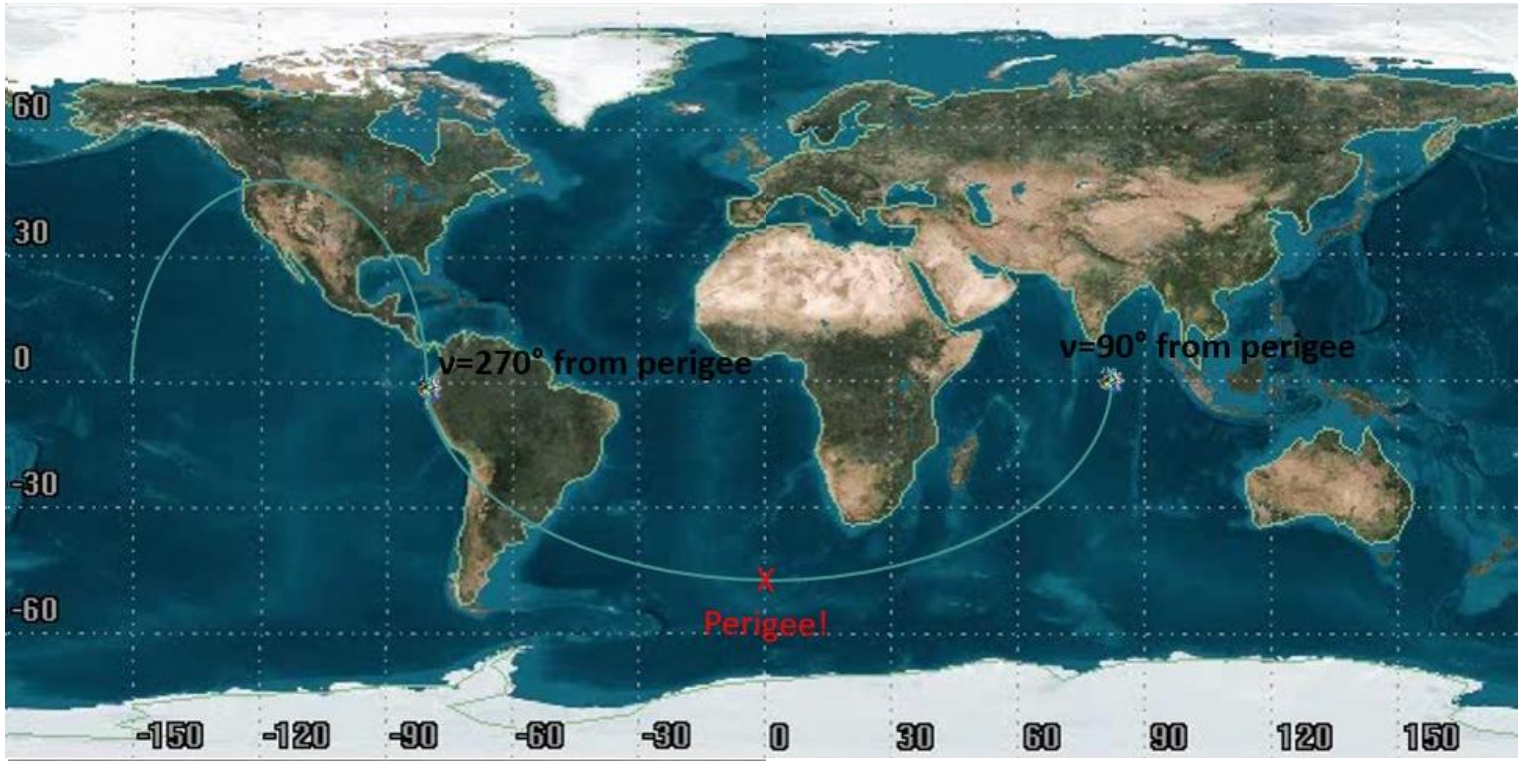
Argumento de perigeo

Al igual que en la órbita anterior, esta órbita terrestre se desplaza hacia atrás durante la mitad de su recorrido. El satélite solo se desplaza hacia adelante durante la mitad inferior de la órbita en forma de lágrima. Por lo tanto, el perigeo se encuentra en el punto más bajo de dicha órbita.

Si dividimos la órbita en cuatro partes, el nodo ascendente, la parte superior, el nodo descendente y la parte inferior, ubicadas a 0°, 90°, 180° y 270° del nodo ascendente, respectivamente, podemos definir el argumento del perigeo como $\omega = 270$. Nuevamente, tenga en cuenta que esta medida se toma desde el nodo ascendente hasta la parte inferior de la gota en la dirección en la que viaja el satélite.



Anomalía verdadera



Ahora se puede encontrar la anomalía verdadera una vez localizado el perigeo. Recordemos que la anomalía verdadera en el perigeo es, por definición, de 0°. Con esta información, podemos seguir un proceso similar al del argumento del perigeo para determinar a qué distancia se encuentra el pequeño icono del satélite del perigeo.