

Jornada Técnica sobre Clima Espacial II

29 Mayo, 2012 - Madrid

El impacto de la ionosfera en la navegación por satélite

Sergio Magdaleno– GMV



CONTENIDO

- ❖ Efectos ionosféricos en sistemas GNSS
- ❖ Mitigación ionosférica en GNSS. Sistema EGNOS
- ❖ Impacto de la ionosfera en el sistema EGNOS

Efectos ionosféricos en sistemas GNSS

Efectos ionosféricos en GNSS

- Las señales de los satélites GNSS atraviesan la ionosfera (50 – 1000 Km).
- Los principales efectos ionosféricos en las señales radio en banda L son:
 - **Retardo en la señal** (hasta varias decenas de metros)
 - Centelleo de fase y de amplitud
 - Rotación Faraday
 - Curvatura del rayo
 - Contribución al efecto Doppler
- La mayoría de estos efectos dependen del contenido de electrones libres en la ionosfera.

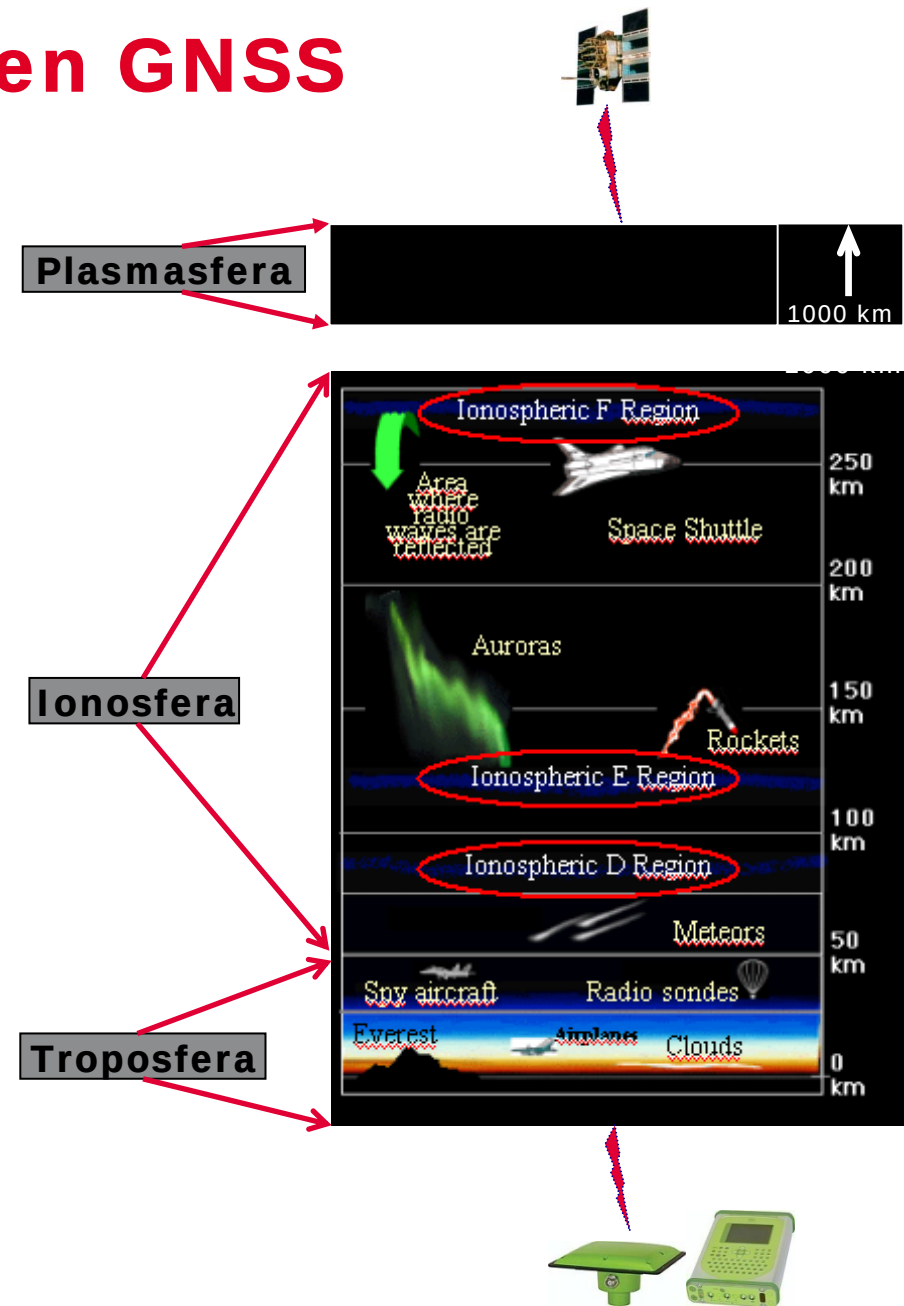
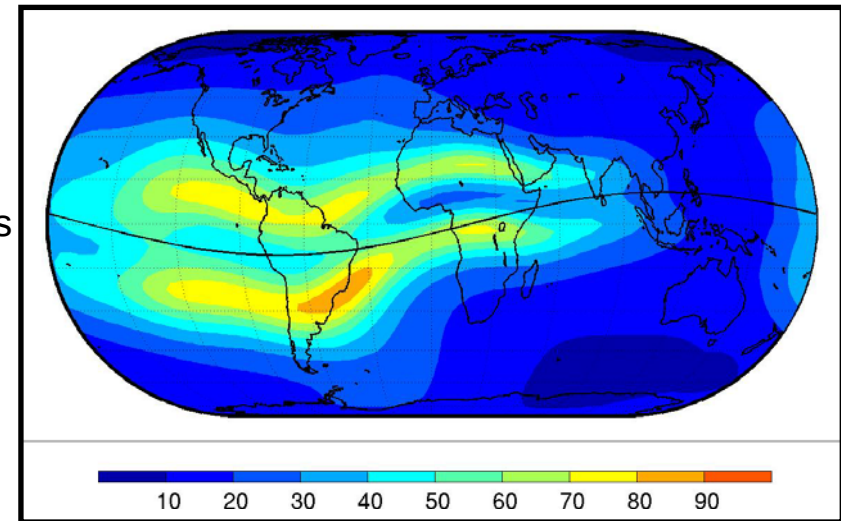


Figure reproduced from http://www.windows.ucar.edu/spaceweather/images/atmos_layers_new_gif_image.html

Contenido total de electrones (TEC)

■ TEC depende de:

- Hora local:
 - Durante el día la radiación solar ioniza la atmosfera
 - Durante la noche el contenido de electrones se reduce por recombinación química.
- Latitud
- Epoca del año
- Actividad solar (ciclo solar)
- Actividad geomagnética



■ Además de estas dependencias que caracterizan una ionosfera nominal, hay otros efectos irregulares que afectan al TEC y son menos predecibles:

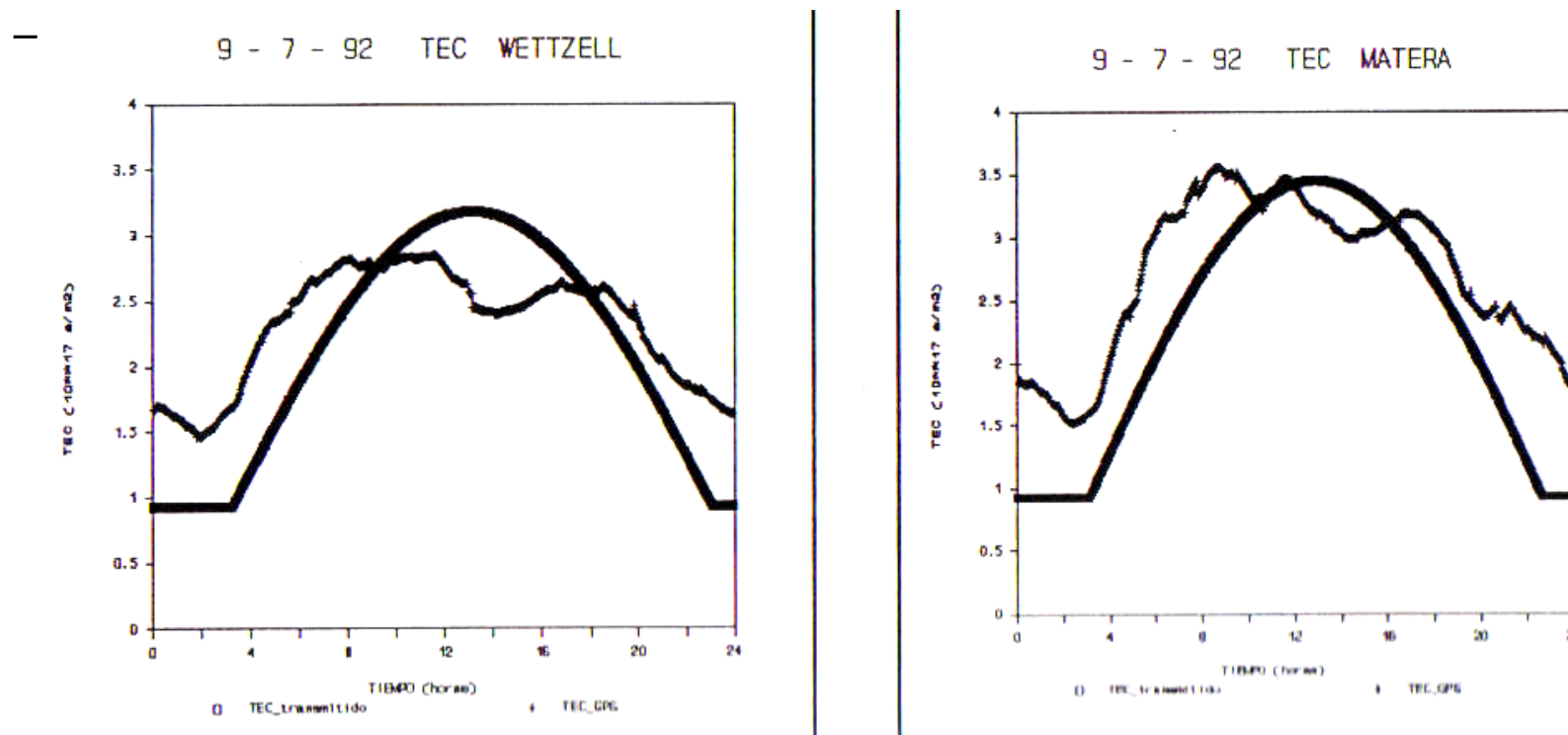
- Anomalía ecuatorial
- Burbujas ionosféricas (causan centelleo y deplecciones)
- Tormentas ionosféricas
- TID, perturbaciones ionosféricas viajeras
- SID, perturbaciones ionosféricas repentinas
- etc

Correcciones ionosféricas en GNSS

- Con datos de una sola frecuencia (en la mayoría de los receptores en el mercado),
 - el retardo ionosférico en las medidas GNSS puede corregirse usando la estimación proporcionada por un modelo ionosférico:
 - IRI (International Reference Ionosphere)
 - Klobuchar (transmitido en el mensaje de navegación de GPS)
 - NeQuick (transmitido en el mensaje de navegación de Galileo)
 - otros
 - El retardo ionosférico en las medias GNSS puede corregirse usando la estimación obtenida con datos de doble frecuencia:
 - Como la proporcionada por sistemas SBAS (EGNOS, WAAS, etc.)
 - Ficheros IONEX
 - Correcciones diferenciales (proporcionadas por estaciones de referencia a usuarios en las cercanías, asumen que la ionosfera es la misma para ambos)
 - otros

Modelo ionosférico transmitido por GPS

- El modelo ionosférico GPS es una combinación simple pero efectiva de un valor constante (noche) y una función coseno (dia) para el retardo ionosférico.
 - La amplitud y el periodo del coseno se modelan con polinomios de tercer grado dependientes de la latitud geomagnetica
 - Los coeficientes de estos polinomios se transmiten en el mensaje de navegación GPS.



Mitigación ionosférica en GNSS. Sistema EGNOS



Bases de EGNOS

Con el fin de poder mitigar los errores ionosféricos, el sistema EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) proporciona información de la ionosfera más precisa que los modelos ionosféricos utilizados por GPS y Galileo.

La información ionosférica proporcionada por EGNOS para un mallado de puntos (IGP) consiste en:

- **GIVD**. Retraso ionosférico vertical en un IGP para frecuencia L1
 - Dado en metros con una resolución de 0.125 m
- **GIVE**. Error ionosférico vertical en un IGP
 - Proporciona la integridad de los valores del GIVD.

Bases de EGNOS (II)

El estado final de los puntos de la malla donde se proporciona la información ionosférica dependerá de la observabilidad del IGP y las condiciones.

Los IGP pueden tener los siguientes estados:

- **Not Monitored**, cuando, cerca del IGP, no hay suficiente número de datos de las estaciones de referencia. Los IGP no monitorizados no proporcionan el retraso ionosférico.
- **Don't use**, cuando no se puede garantizar la integridad del IGP. Los IGP no proporcionan el retraso ionosférico.
- **Use**, en el resto de casos.

Mitigación EGNOS

Debido a la necesidad de integridad de los datos proporcionados por EGNOS, el sistema posee varias barreras para mitigar los efectos de las perturbaciones.

Estas barreras, dependiendo de la intensidad, magnitud, etc. de la perturbación, pueden hacer que el sistema EGNOS no este disponible durante el periodo que dure dicha perturbación.

Los valores de estas barreras son ajustados a partir de los conocimientos de la ionosfera de forma que cumplan los requisitos de continuidad y, sobre todo, de integridad.

Impacto de la ionosfera en EGNOS

Impacto del clima espacial

- El aumento de la actividad solar conlleva:
 - Aumento de los gradientes temporales y espaciales del TEC:
 - Mayor error en los modelos
 - Rechazo de datos en algunos sistemas (p.e SBAS)
 - Mayor error en interpolaciones (temporales y espaciales, como en SBAS).
 - Aumento del centelleo ionosférico (en fase y amplitud):
 - Mayor ruido en las medidas
 - Pérdida de señal
 - Invalidez de las principales hipótesis (altura y anchura de la ionosfera, inhomogeneidad, etc):
 - Mayor error de modelado y estimación
 - Riesgo de pérdida de integridad

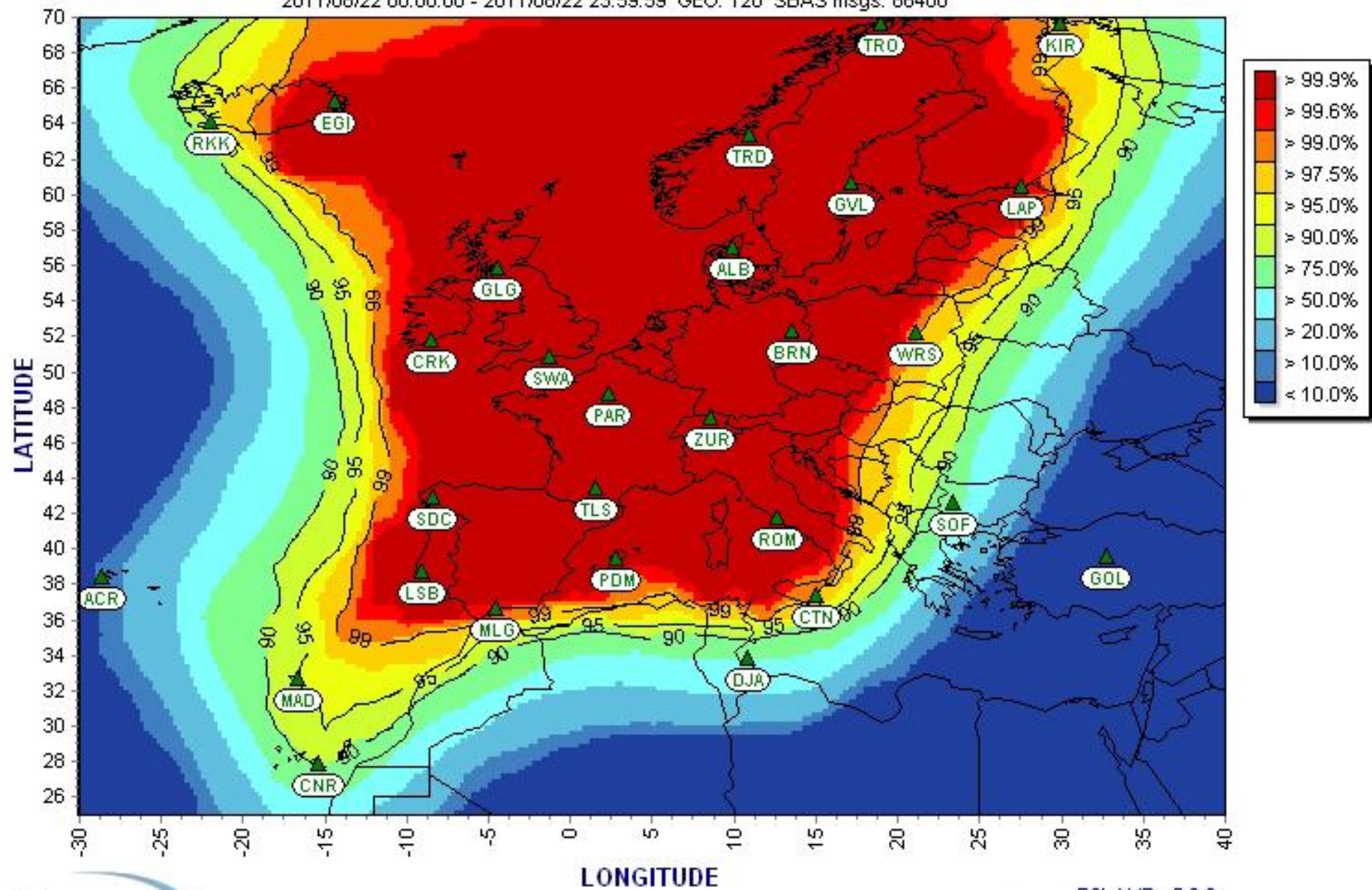
Ejemplo:

■ Sistemas SBAS:

- El día 22 de Octubre de 2011, el sistema EGNOS sufrió un descenso de la disponibilidad debido al comportamiento de la ionosfera.
- Dicho comportamiento produjo la no disponibilidad del sistema debido a que los valores de las barreras fueron sobrepasados.
- Posibles usuarios afectados:
 - Aviación civil
 - Transporte (por carretera, tren, marítimo, etc.)
- GMV ha trabajado en refinar las barreras actuales del módulo de ionosfera para conseguir mejorar la disponibilidad en situaciones anómalas.

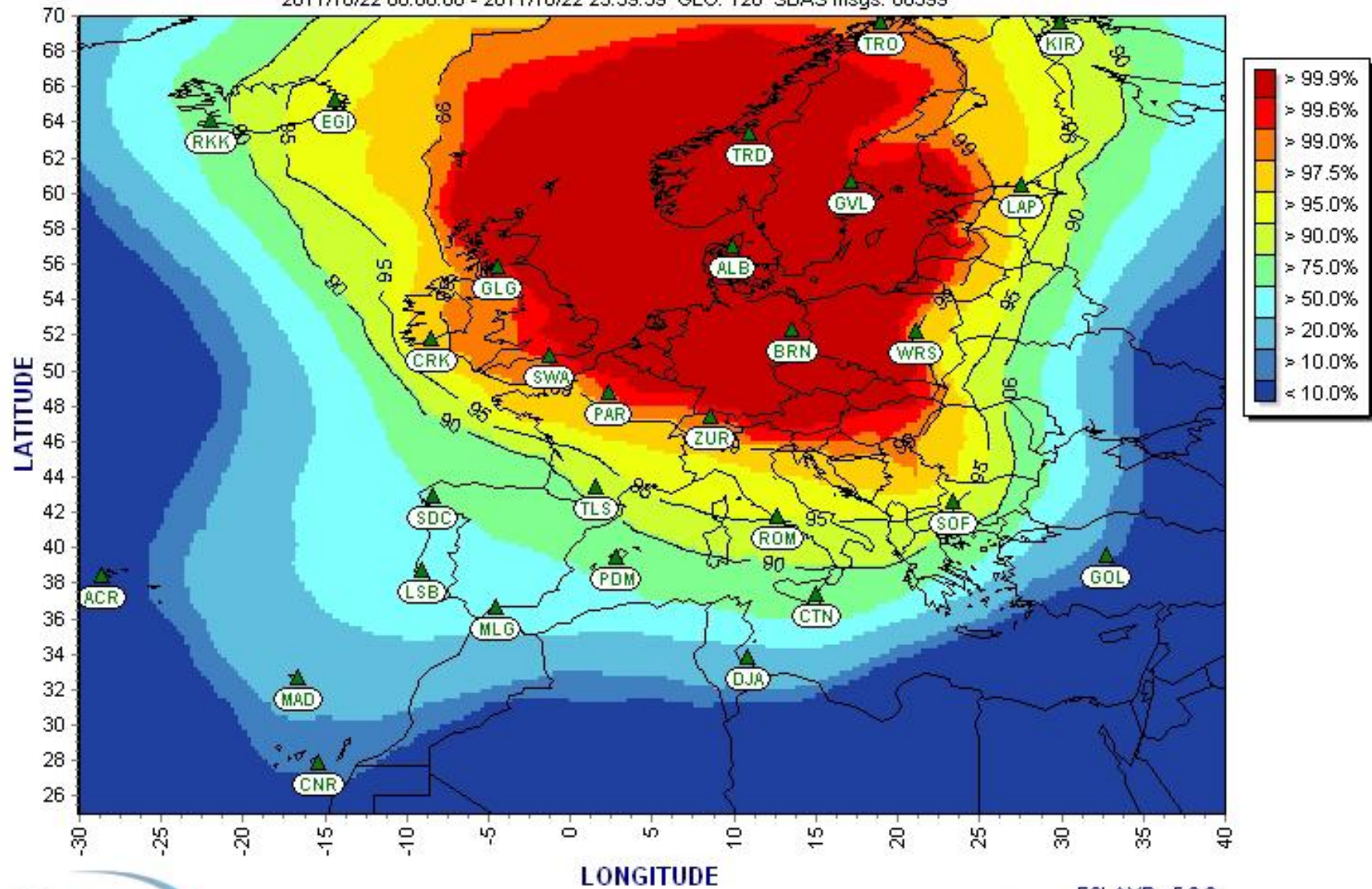
HPL vs HAL and VPL vs VAL for Signal in Space

2011/08/22 00:00:00 - 2011/08/22 23:59:59 GEO: 120 SBAS msgs: 86400

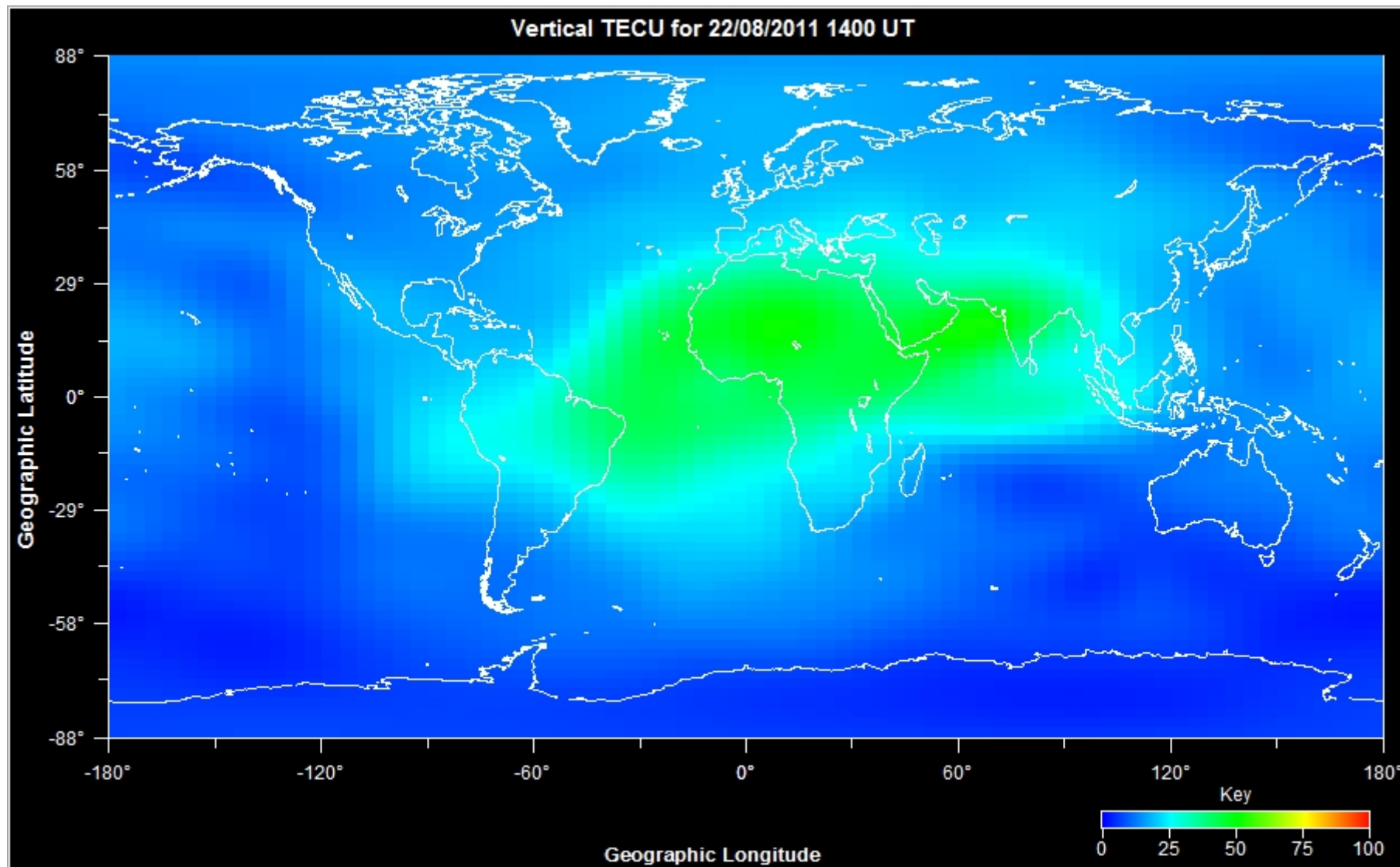


HPL vs HAL and VPL vs VAL for Signal in Space

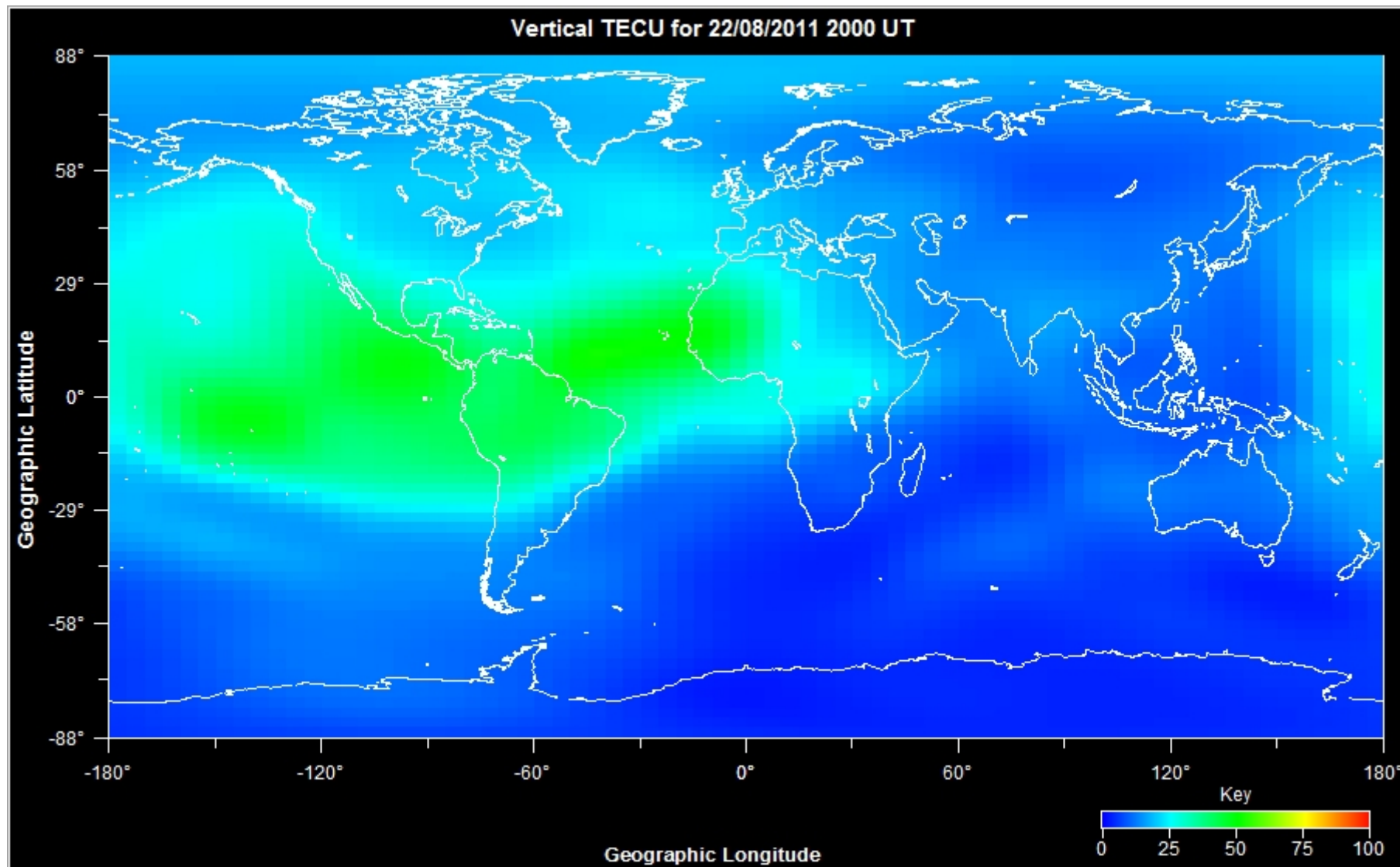
2011/10/22 00:00:00 - 2011/10/22 23:59:59 GEO: 120 SBAS msgs: 86399



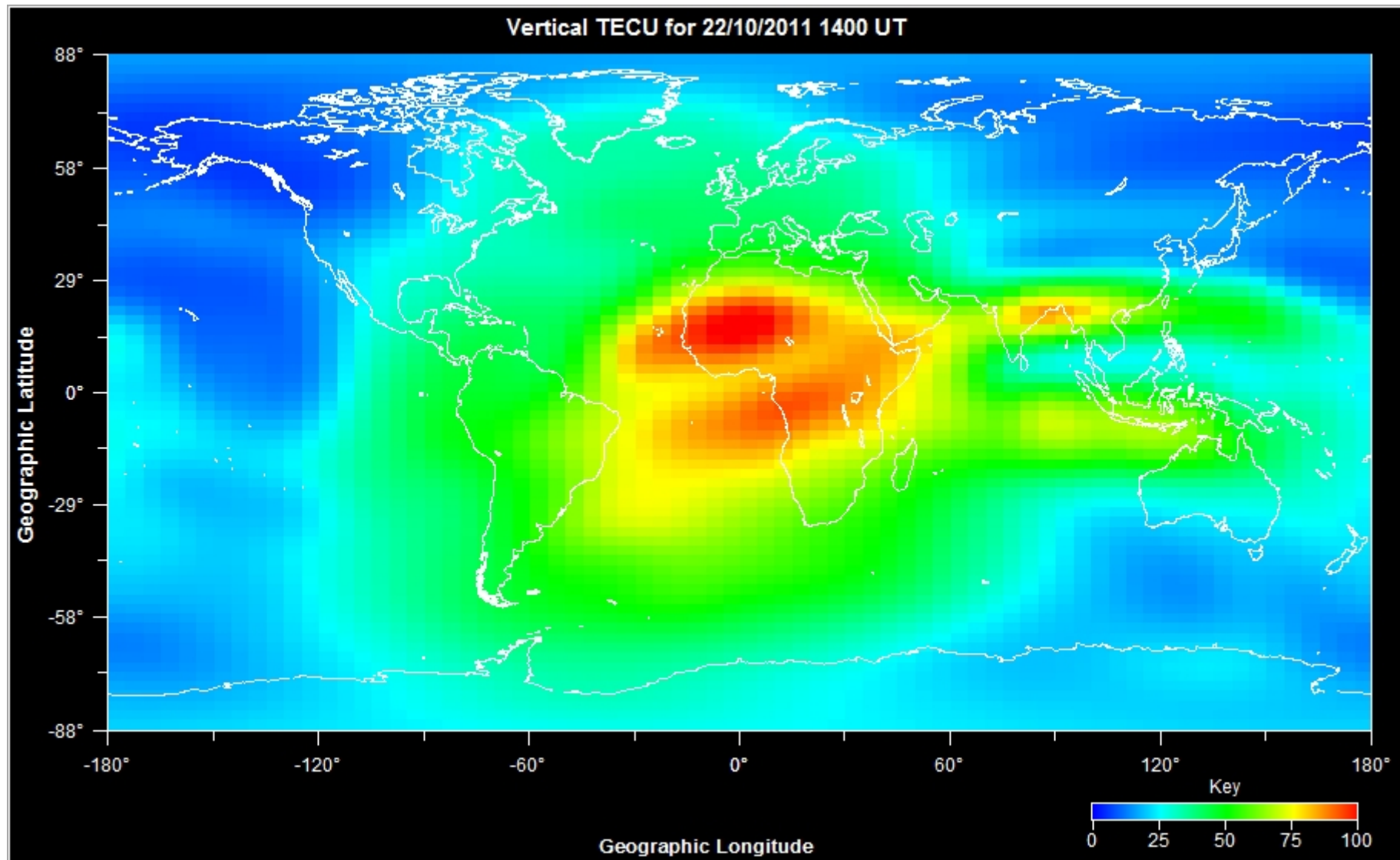
Ejemplo: 22 Agosto 2011 ($R=71$, $F_{10.7}=108.2$)



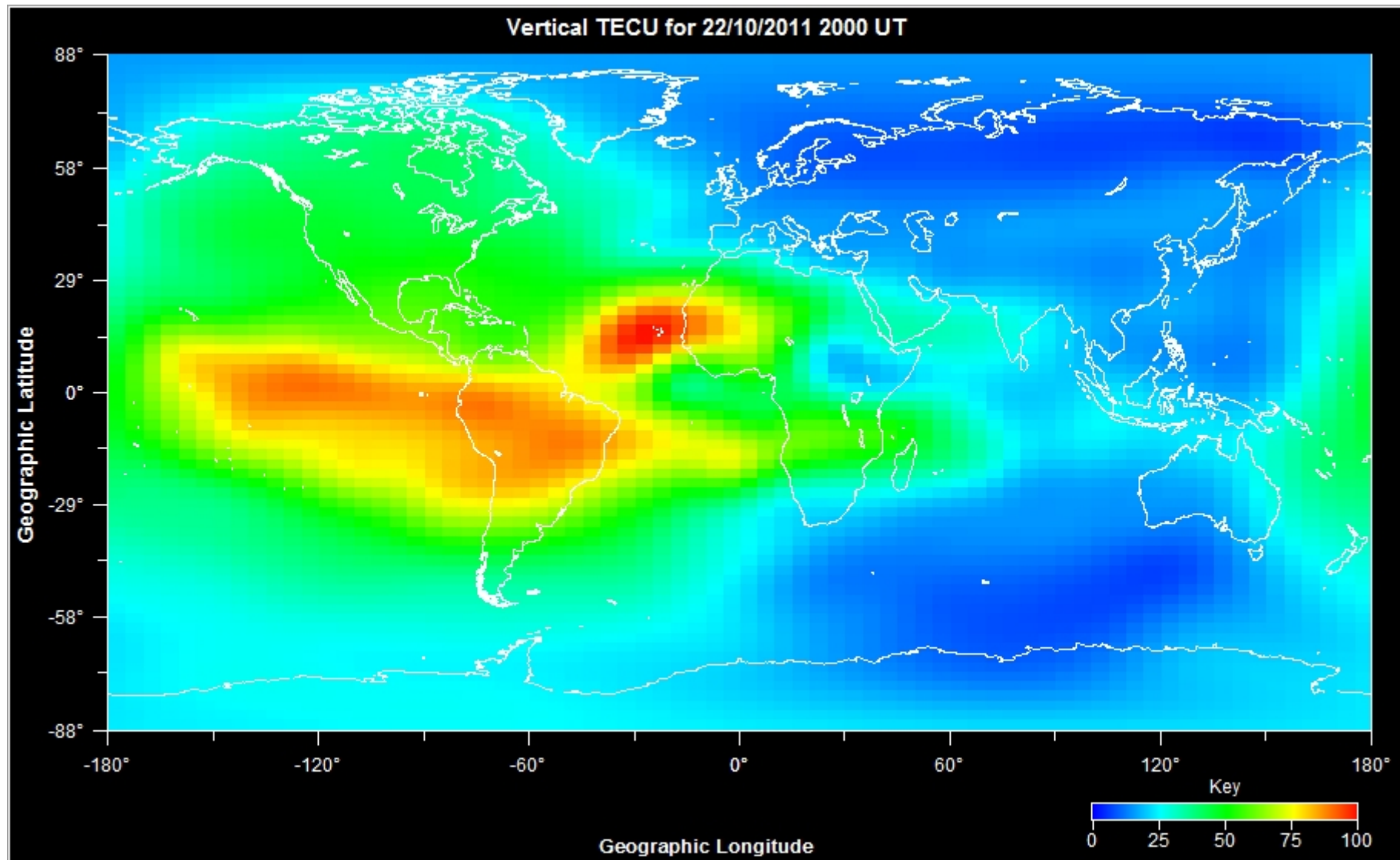
Ejemplo: 22 Agosto 2011 ($R=71$, $F_{10.7}=108.2$)



Ejemplo: 22 Octubre 2011 (R=122, F_{10.7} = 164.1)



Ejemplo: 22 Octubre 2011 ($R=122$, $F_{10.7} = 164.1$)



EGNOS y el clima espacial

- El aumento de la actividad solar está afectando a la disponibilidad del sistema EGNOS
 - Se superan las barreras establecidas para la monitorización.
- El número de aplicaciones y usuarios de sistemas GNSS está aumentando considerablemente:
 - La dependencia de estos sistemas podría provocar situaciones críticas.
- Si bien nuestro conocimiento ha aumentado en los últimos años:
 - A nivel científico (física ionosférica, interacción sol-ionosfera, etc.)
 - A nivel industrial (algoritmos de GNSS, tecnología de receptores, etc.)
- Las redes de receptores precisos son más densas:
 - Se está mejorando la monitorización de la ionosfera y sus efectos.
- Los sistemas de monitorización y alerta mejoran:
 - Se avisa a los usuarios para evitar situaciones de riesgo.



Gracias por su
atención

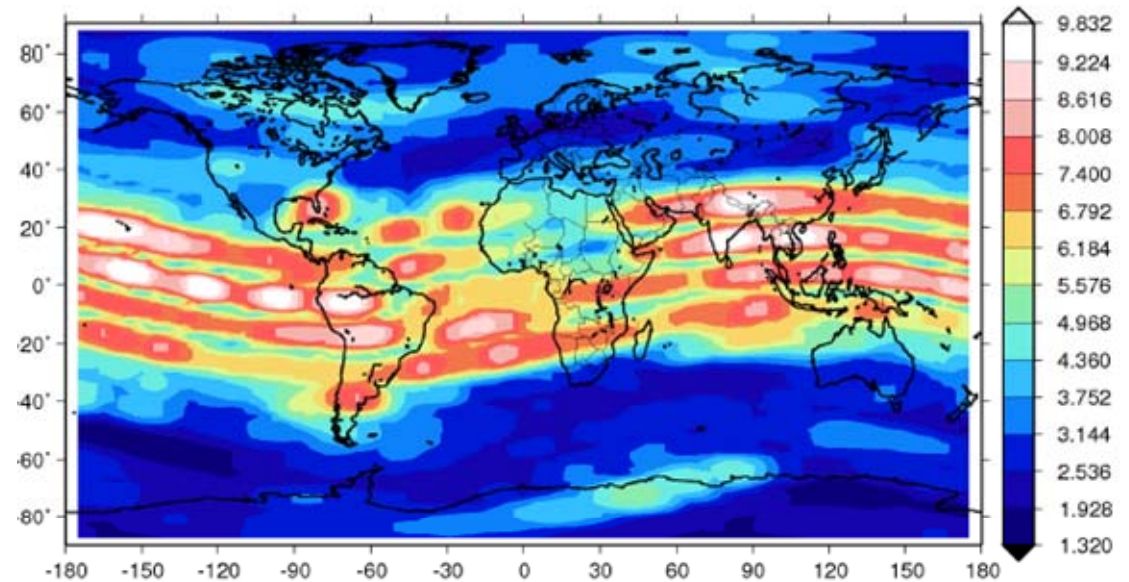
Sergio Magdaleno
Unidad de Negocio GNSS
smagdaleno@gmv.com

www.gmv.com

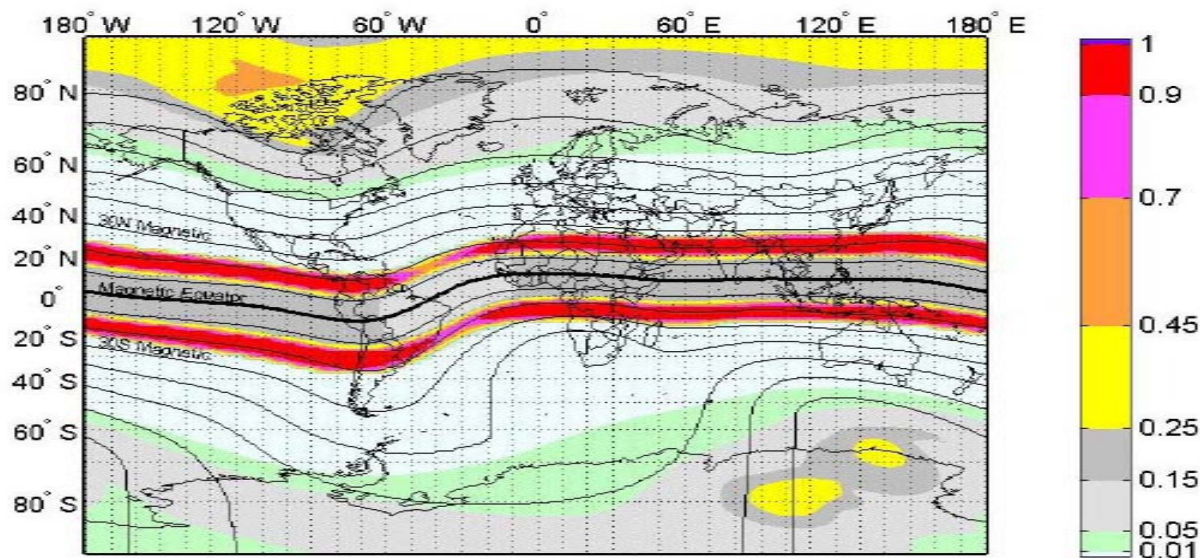


Para España...

- Desde el punto de vista ionosférico, España está situada en una de las mejores zonas (latitud media):
 - La zona que se podría ver más afectada es la de las Islas Canarias.



Valores máximos de gradientes Norte-Sur de TEC vertical (TECu/grado) de 1996 a 2008.



Bandas de ocurrencia de centelleo en la amplitud

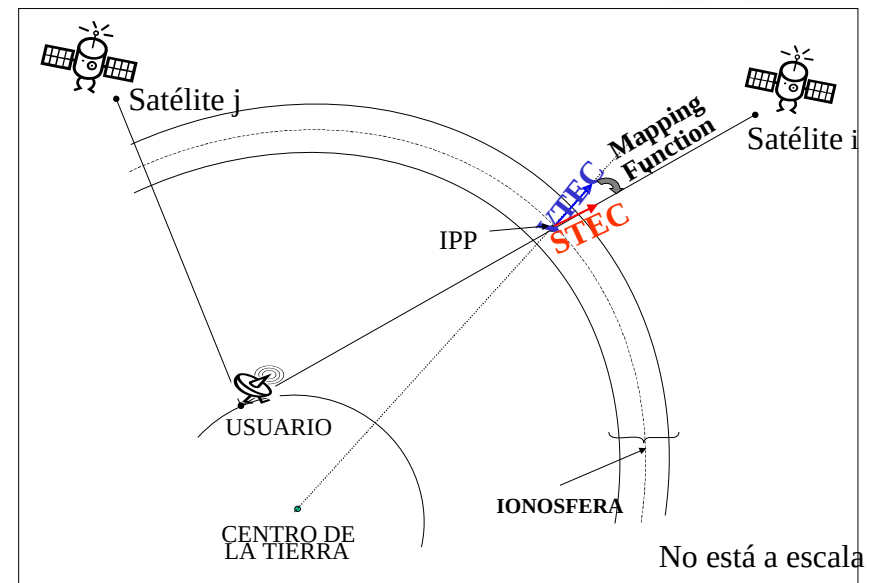
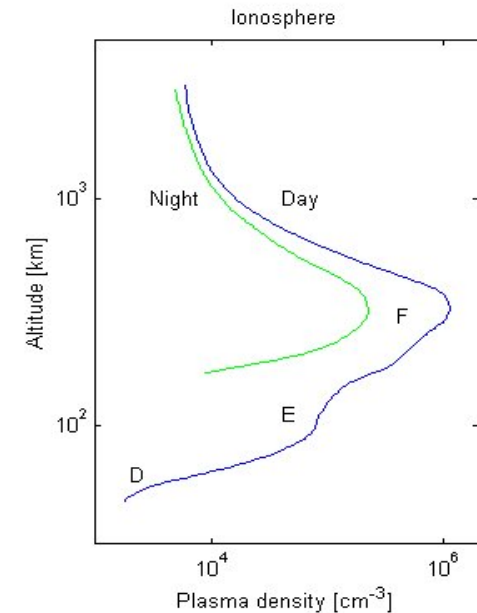
Ejemplo para las 19:00 con máxima actividad solar basado en el modelo WBMOD, Lejeune, congreso The Atmosphere and its Effects on GNSS systems, 2008.

Hipótesis en correcciones ionosféricas

- La mayoría de modelos y métodos de estimación de retardo ionosférico se basan en hipótesis:

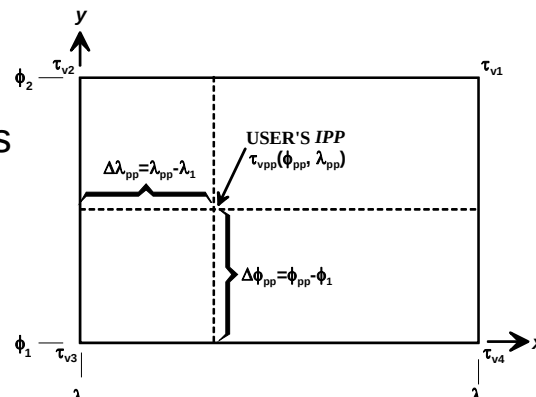
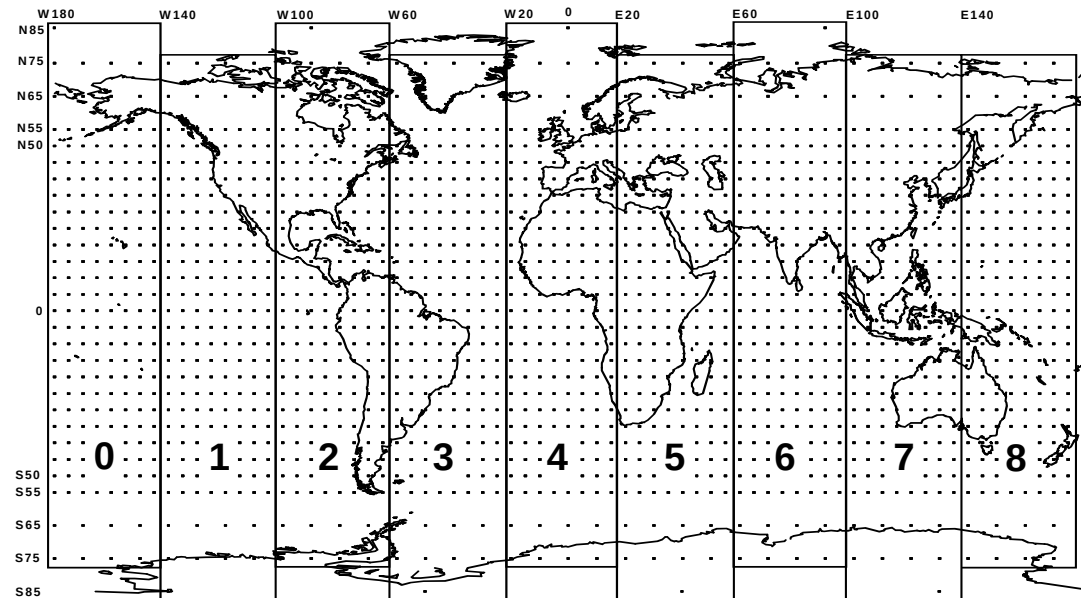
- TEC puede modelarse de forma precisa asumiendo que toda la ionosfera está concentrada en una capa de anchura infinitesimal a una altura de unos 350 Km (este valor varía de unos modelos a otros).
- La proyección de retardo vertical a retardo en la línea de vista puede modelarse de forma precisa con una fórmula simple dependiente de la elevación del satélite.
- La ionosfera es homogénea en función del azimut del satélite.

$$d_{ion} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}$$

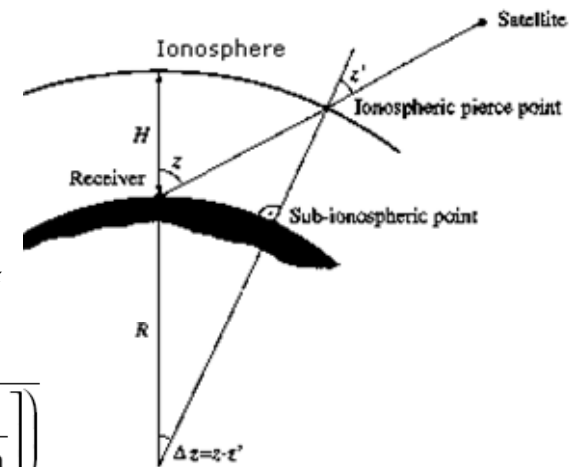


Estimación ionosférica con sistemas SBAS

- SBAS proporciona:
 - Retardos ionosféricos verticales en un grid de puntos ($5^\circ \times 5^\circ$) y una estimación del error máximo de esos retardos (integridad).
 - Los valores de los retardos ionosféricos se actualizan cada 5 minutos, como máximo.
- Los usuarios SBAS calculan la corrección ionosférica para una medida satélite-receptor:
 - 1) Interpolando los valores de los puntos del grid que rodean al punto de corte con la ionosfera
 - 2) El retardo vertical se convierte en oblicuo con una función de mapeo, dependiente de la elevación del satélite y de la altura de la ionosfera.



$$M(E) = \frac{1}{\cos \left(\arcsin \left[\cos(E) \frac{R_E}{R_E + h} \right] \right)}$$



Correcciones ionosféricas en GNSS

- Con datos de doble frecuencia (solo en receptores de alta precisión),

$$P_1 = d + \frac{40.3 \cdot TEC}{f_1^2}; P_2 = d + \frac{40.3 \cdot TEC}{f_2^2}$$

- el retardo ionosférico en las medidas GNSS puede cancelarse usando la combinación “libre de ionosfera”:

$$\frac{f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2}{f_1^2 - f_2^2} = d$$

- El retardo ionosférico en las medidas GNSS puede estimarse usando la combinación “ionosférica”:

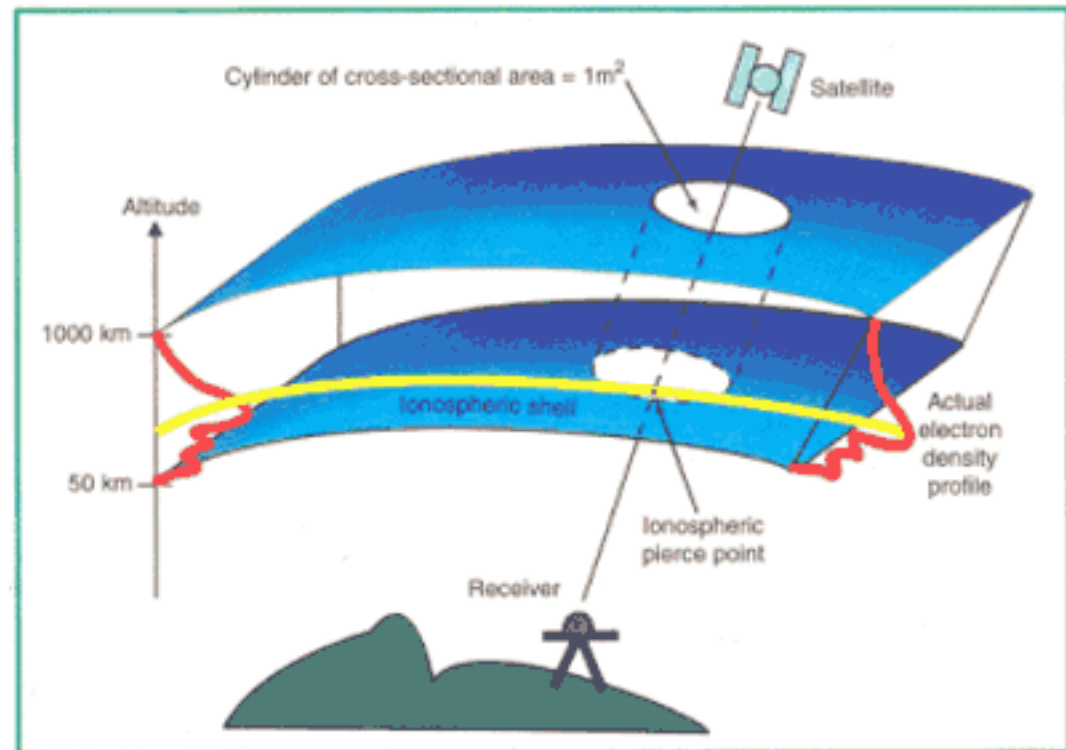
$$(P_2 - P_1) \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = TEC$$

Retardo ionosféricos en GNSS

- El retardo ionosférico puede expresarse como:

$$d_{\text{ion}} = \frac{40.3 \cdot \text{TEC}}{f^2} + \frac{s}{f^3} + \frac{r}{f^4} + \dots$$

- f es la frecuencia de la señal (para GNSS ~ 1.5 GHz)
- TEC es el contenido total de electrones: número de electrones libres en una columna de 1 m² de base centrada en la dirección de observación.
- s y r dependen de TEC y de otros factores como el campo magnético. Suelen ser despreciados (valores máximos $s \sim \text{cm}$, $r \sim \text{mm}$)



(Fedrizzi et al, GPS world, February 2002)

El clima espacial en España

- Desde el punto de vista ionosférico, España está situada en una de las mejores zonas (latitud media):
 - La zona más afectada es la de las Islas Canarias.
- Pero el aumento de la actividad solar está haciendo que los efectos de las irregularidades localizadas en latitudes ecuatoriales se extiendan a latitudes más altas afectando al sur de España.