

# Jornada Técnica sobre Clima Espacial

23-24 Marzo, 2011 - Madrid

## **Impacto de las tormentas ionosféricas en los datos de satélites GNSS**

Esther Sardón – GMV



# CONTENIDO

- ❖ Descripción de los sistemas GNSS
- ❖ Efectos ionosféricos en sistemas GNSS
- ❖ Corrección de efectos ionosféricos en GNSS
- ❖ Impacto de tormentas ionosféricas en GNSS
- ❖ Mitigación de efectos de tormentas ionosféricas en GNSS

# Sistemas GNSS

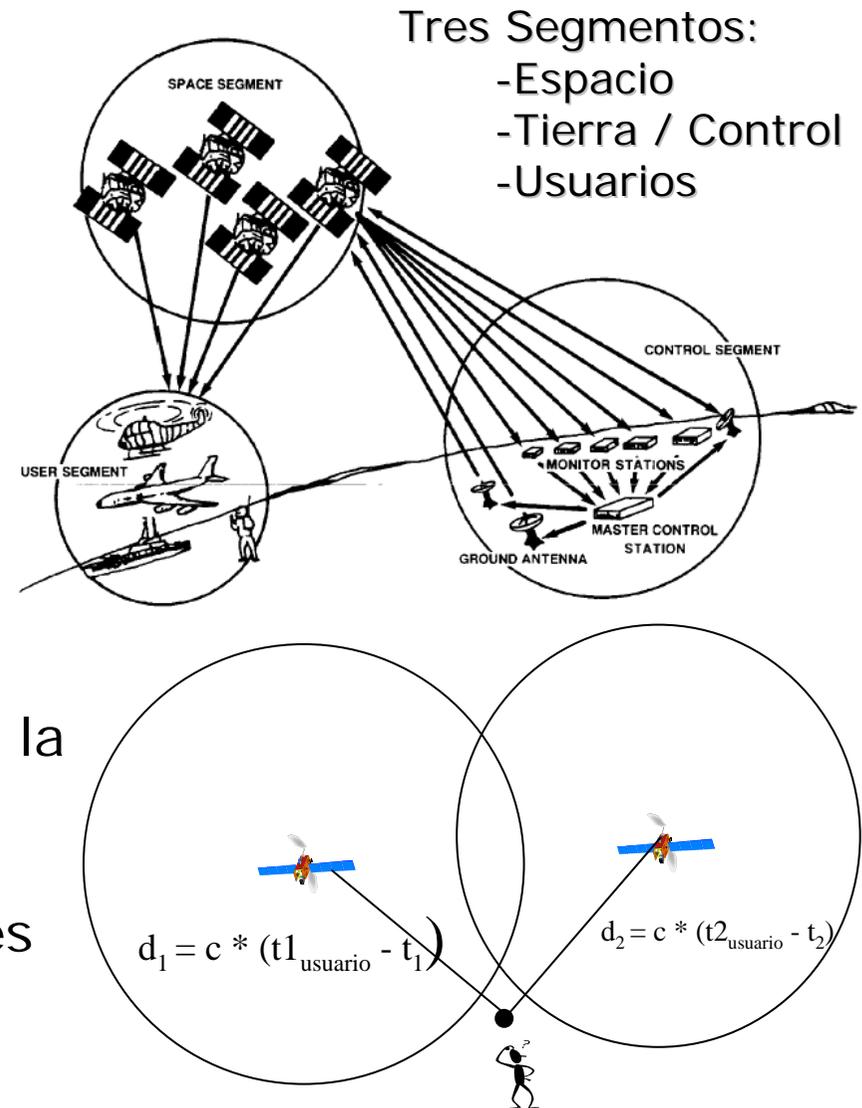


# Sistemas GNSS

- GNSS (Global Navigation Satellite Systems): Sistemas globales de navegación por satélite. GPS y Galileo son dos ejemplos de sistemas GNSS
  - Navegación por satélite: Cuando la posición del usuario se calcula basada en las señales emitidas por satélites
- Los sistemas GNSS fueron concebidos inicialmente como instrumento de navegación (GPS en particular para navegación de misiles) pero hoy en día su aplicación es mucho más genérica.

# Sistemas GNSS: Idea intuitiva

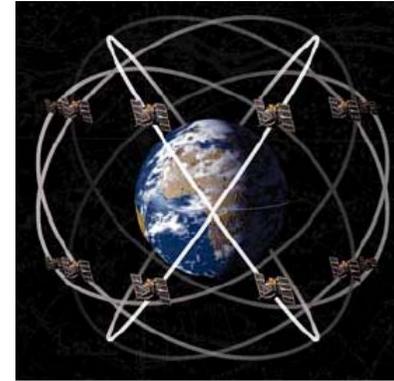
- Satélites =relojes precisos orbitando alrededor de la tierra, capaces de transmitir “marcas de tiempo” a través de señales electromagnéticas
- Receptor = otro reloj, capaz de recibir las “marcas de tiempo” transmitidas y compararlas con su propio tiempo.
- Esto permite medir el tiempo necesario para la señal para cubrir la distancia entre el satélite y el receptor.
- Conocida la posición de los satélites (al menos 3) se puede calcular la posición del receptor.



Error en el tiempo medido => error en la posición del usuario

# Sistemas GNSS Actuales y en Desarrollo

- Sistemas de navegación globales:
  - GPS: EEUU, 24 satélites a ~ 20.000 Km
  - GLONASS: Rusia, 24 satélites a ~19.100 Km
  - Galileo: Europa, 30 satélites a ~ 23.200 Km
  - COMPASS: China, 35 satélites a ~21.150 Km
- Sistemas de navegación regionales:
  - QZSS: Japón, 3 satélites a ~ 42.100 Km
  - IRNSS: India, 3 satélites a 36.000 km y 4 satélites a 24.000 km
- SBAS, sistemas de aumentación espacial (proporcionan correcciones a la información transmitida por los sistemas de navegación e **integridad**), regionales:
  - WAAS: Estados Unidos
  - EGNOS: Europa
  - MSAS: Japón
  - GAGAN: India
  - Beidou: China
- GBAS, sistemas de aumentación terrena
- ABAS, sistemas de aumentación aérea



# 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
- Las mayoría de estos efectos dependen del contenido de electrones libres en la ionosfera.

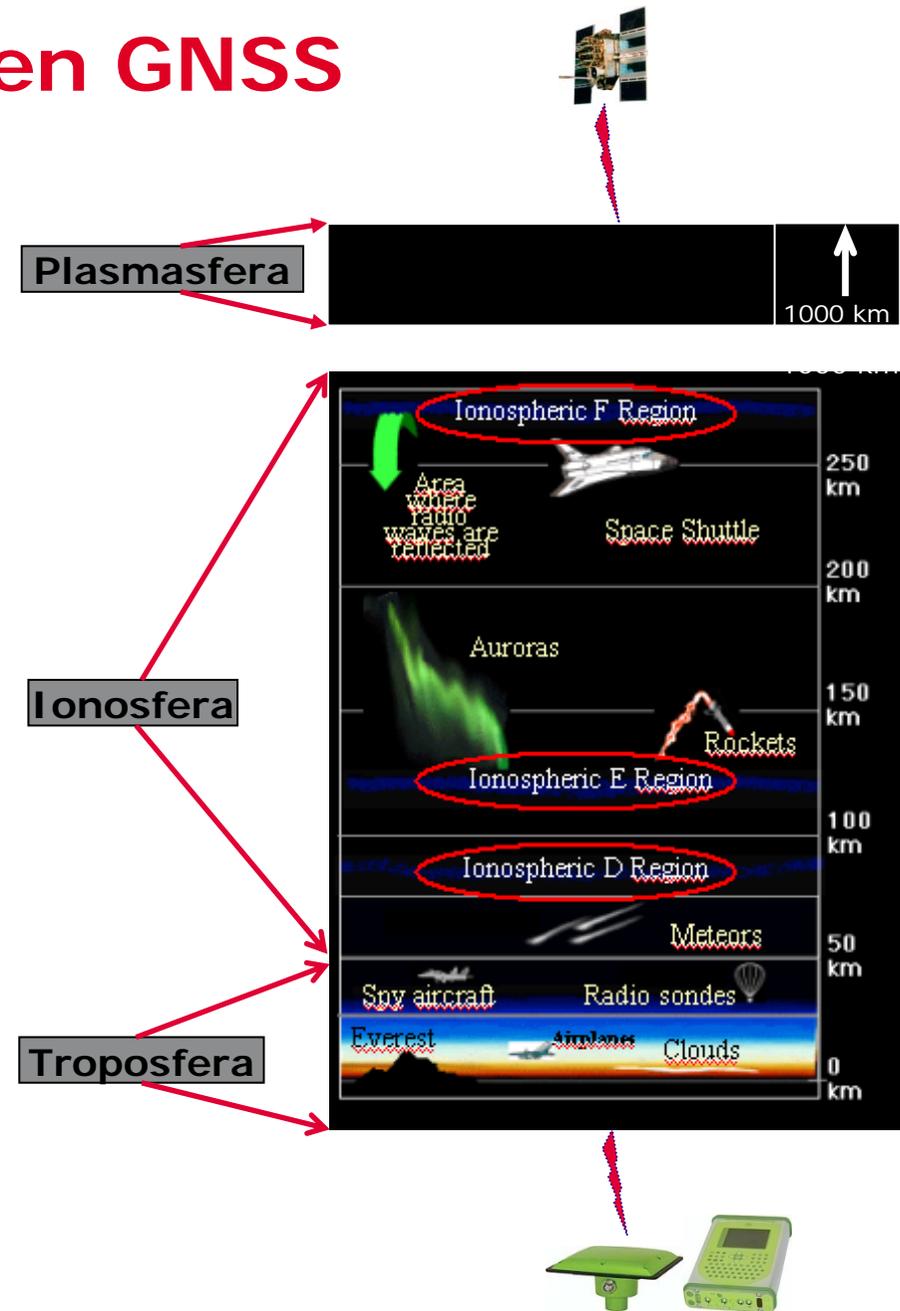


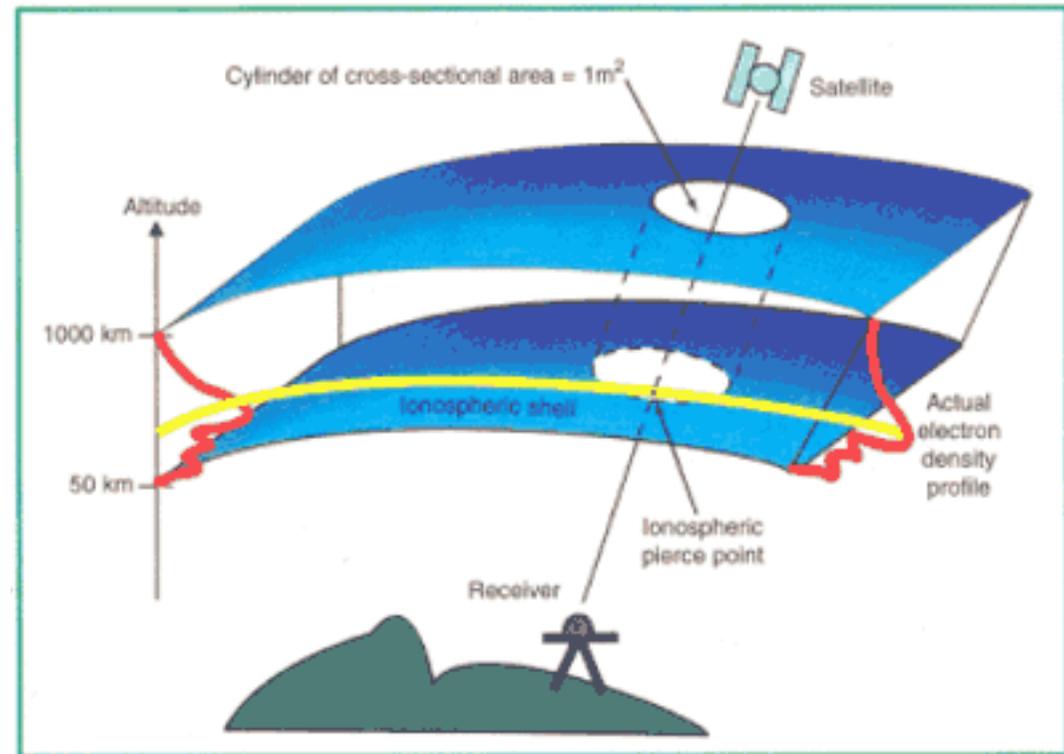
Figure reproduced from [http://www.windows.ucar.edu/spaceweather/images/atmos\\_layers\\_new\\_gif\\_image.html](http://www.windows.ucar.edu/spaceweather/images/atmos_layers_new_gif_image.html)

# 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 m<sup>2</sup> 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 ~ cm, r ~ mm)

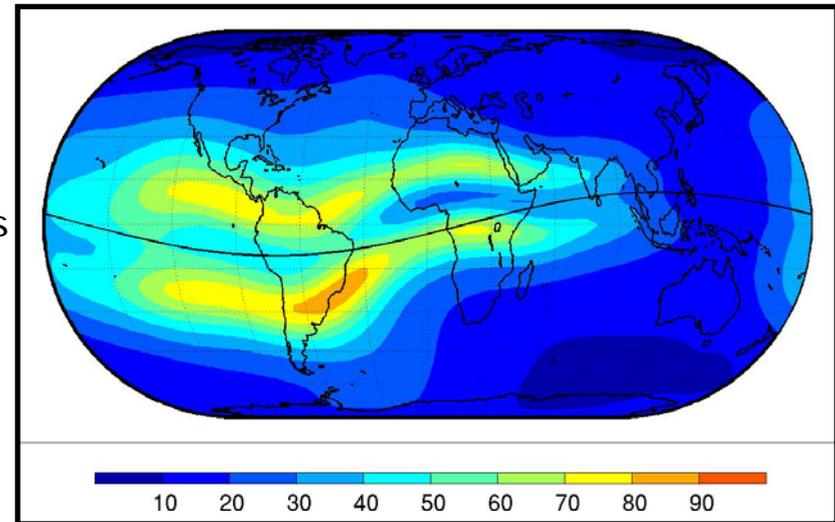


(Fedrizzi et al, GPS world, February 2002)

# 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 depleciones)
- **Tormentas ionosféricas**
- TID, perturbaciones ionosféricas viajeras
- SID, perturbaciones ionosféricas repentinas
- etc

# Correcciones de efectos ionosféricos en GNSS

# 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”:

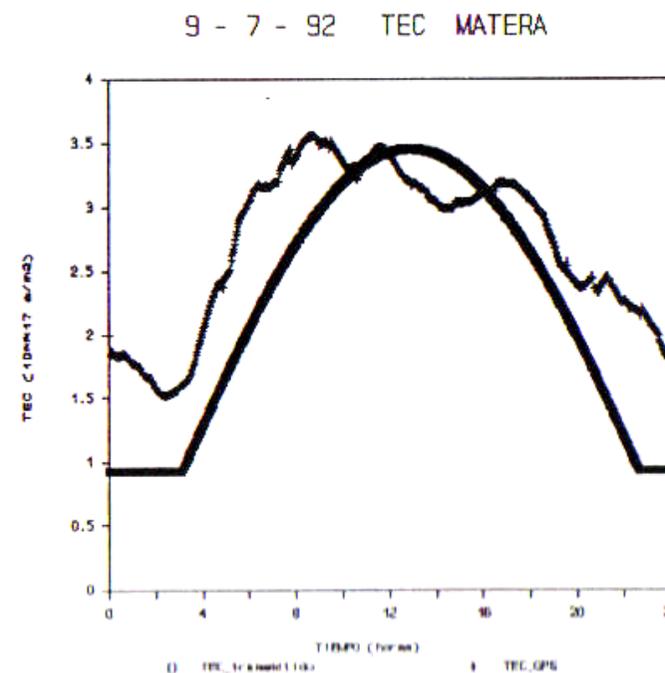
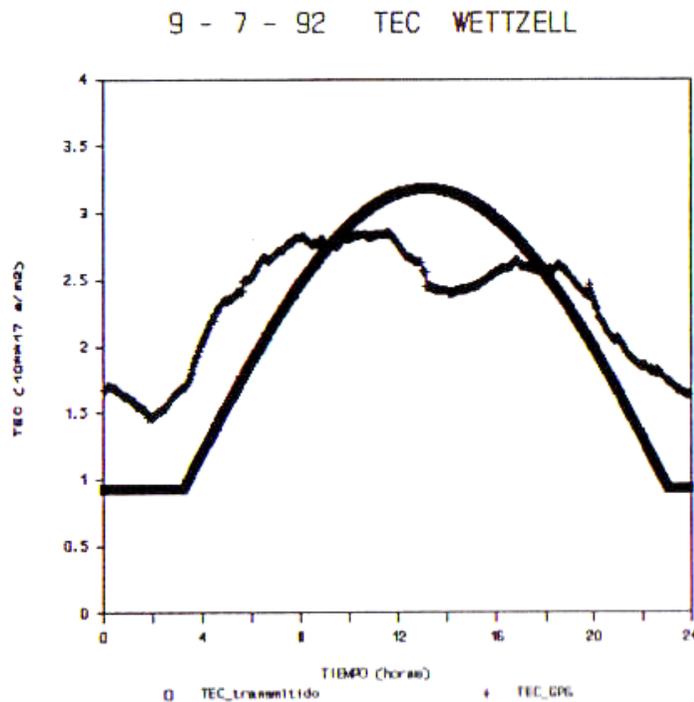
$$(P_2 - P_1) \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = TEC$$

# 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

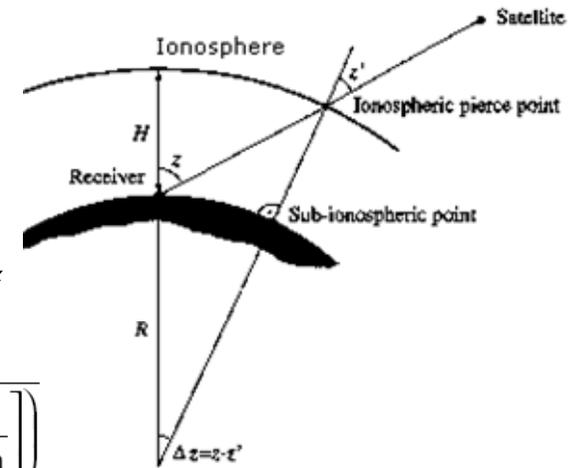
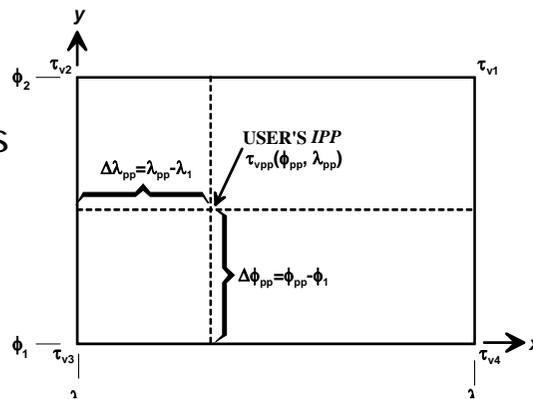
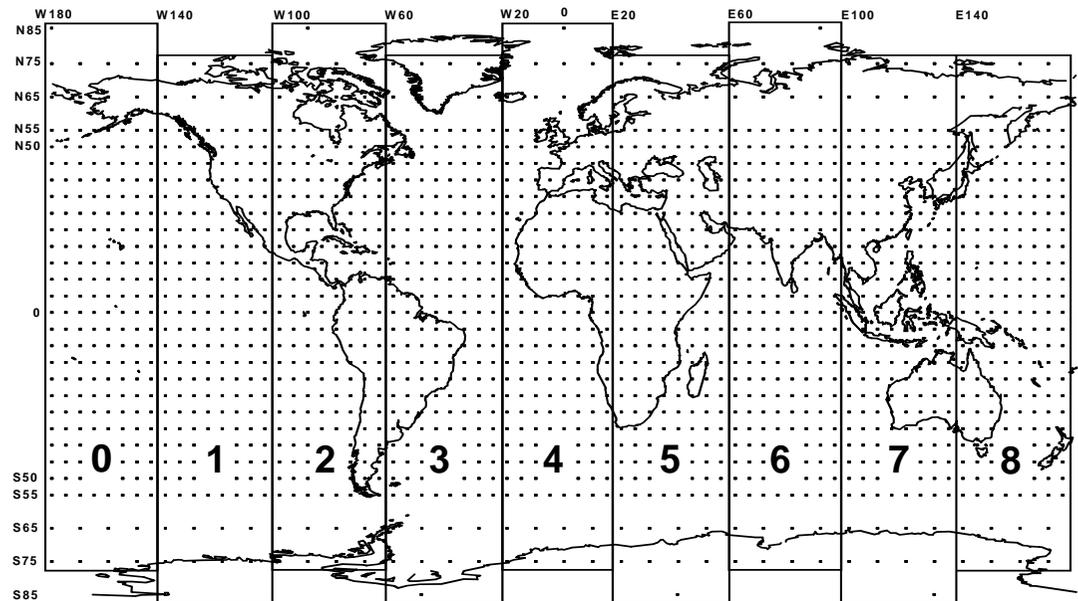
# Modelo ionosférico transmitido por GPS

- 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.
  - Corrige aproximadamente el 50% del retardo ionosférico.



# Estimación ionosférica con sistemas SBAS

- SBAS proporciona:
  - Retardos ionosféricos verticales en un grid de puntos (5°x5°) 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.



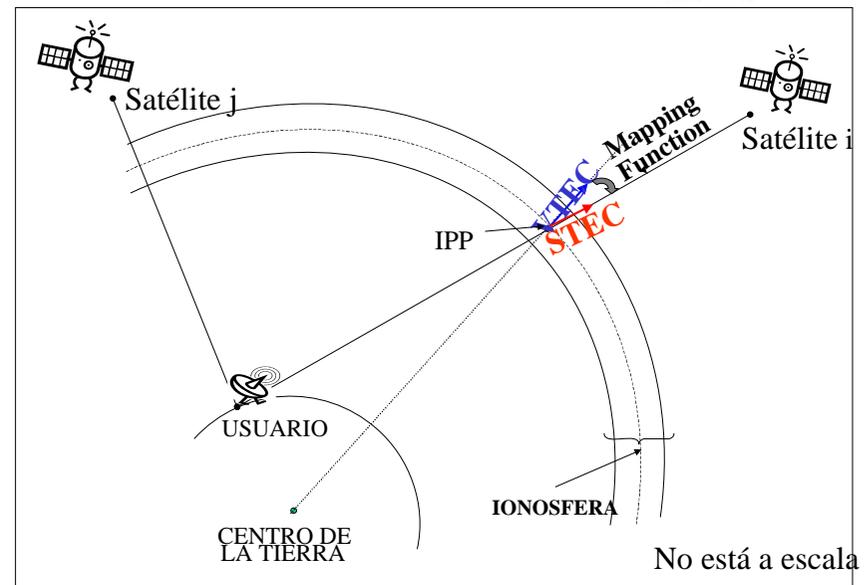
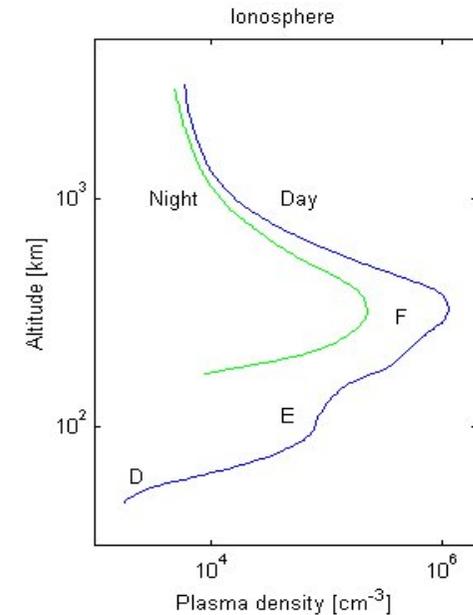
$$M(E) = \frac{1}{\cos \left( \arcsin \left[ \cos(E) \frac{R_E}{R_E + h} \right] \right)}$$

# 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.

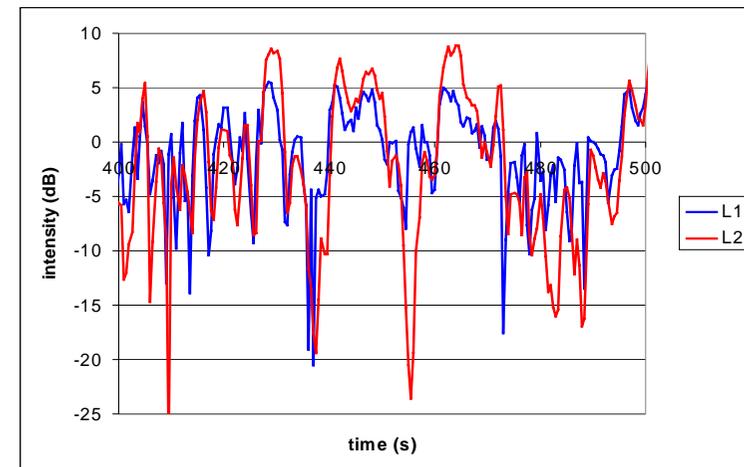
$$d_{ion} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}$$



# Impacto de tormentas ionosféricas en GNSS

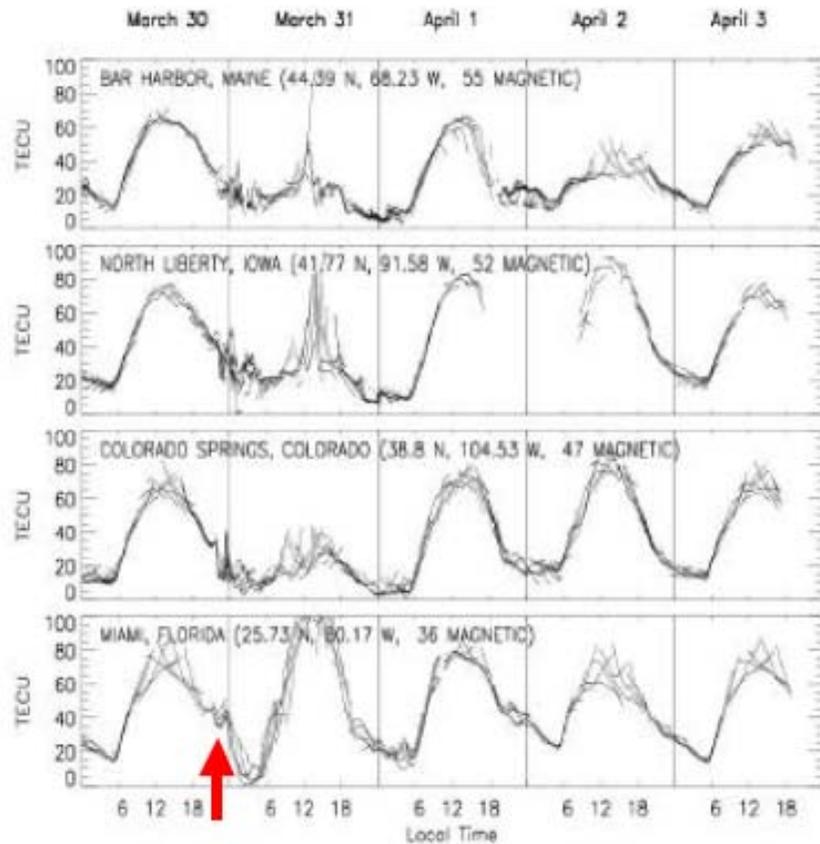
# Impacto de tormentas en GNSS

- Principales efectos de tormentas ionosféricas en GNSS:
  - Aumento de los gradientes temporales y espaciales del TEC:
    - Mayor error en los modelos
    - Dificultad o imposibilidad de usar GNSS diferencial (e.g. para navegación costera y aérea)
    - Rechazo de datos en algunos sistemas (p.e SBAS)
    - Mayor error en interpolaciones (temporales y espaciales, como en SBAS).
  - 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

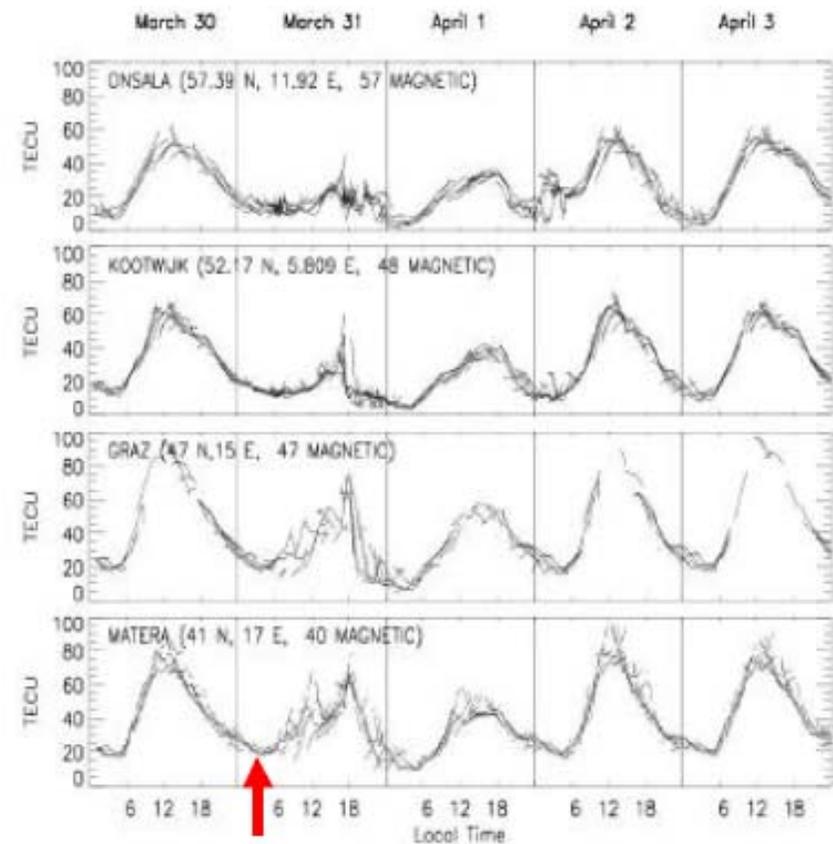


# Ejemplo: tormenta 31 Marzo 2001

- TEC vertical para varios satélites GPS y varias estaciones en América y Europa para días tranquilos y con tormenta.



American Region



European Region

(Doherty et al, International SBAS Meeting, 2003)

# Ejemplo: tormenta Halloween (Octubre 2003)

- La tormenta del 29-31 Octubre 2003, es una de las mayores tormentas del último ciclo solar.
- Esta tormenta afectó sobre todo a la zona de Norteamérica
- Posicionamiento de precisión:
  - En días tranquilos la precisión es del orden de centímetros
  - En Europa los errores llegaron a 10cm en horizontal y 26 cm en vertical de 21:00 a 23:00 el 30 de Octubre de 2003.
  - Posibles usuarios afectados:
    - Ingeniería civil
    - Cartografía
    - Investigación (sísmica, movimientos tectónicos, etc.)
    - Determinación precisa del tiempo (sincronización de relojes)

# Ejemplo: tormenta Halloween (Octubre 2003)

## ■ GPS diferencial marítimo:

- En días tranquilos la precisión horizontal es del orden de metros ( $< 10\text{m}$ )
- Durante la tormenta la precisión se degradó un factor 10-30
- Posibles usuarios afectados:
  - Navegación (aproximación a puerto, fluvial, etc.)
  - Explotación de recurso marinos
  - Investigación marina

## ■ Sistemas SBAS:

- En días tranquilos la precisión horizontal es del orden de metros
- En Estados Unidos el límite del error vertical establecido en 50 m se rebasó durante unas 11 horas el 30 de Octubre de 2003 (no disponibilidad de servicio para aproximaciones de precisión en aviación).
- En Europa, la disponibilidad se habría visto reducida en un 5% para la zona central y un 20-60% para los bordes.
- Posibles usuarios afectados:
  - Aviación civil
  - Transporte (por carretera, tren, marítimo, etc.)

# Mitigación de los efectos de tormentas ionosféricas en GNSS



# Mitigación de los efectos de tormentas

Efectos	Mitigación
Pérdida de señal	Diseño de receptores más robustos
Degradación de las medidas	Chequeos en los algoritmos de los sistemas GNSS y aplicaciones: <ul style="list-style-type: none"><li>•en el pre-procesado de datos</li><li>•FDIR (detección de fallos, aislamiento y recuperación)</li></ul>
Errores en los productos	Proporcionar información de integridad a los usuarios: <ul style="list-style-type: none"><li>•estimación del límite superior de los errores en los productos</li></ul>

## ■ Mitigaciones generales:

– Mejorar el diseño de los sistemas y de las aplicaciones:

- Análisis de efectos basados en datos simulados
- Aplicación de técnicas RAMS (fiabilidad y safety), para analizar riesgos e identificar barreras (como redundancia de elementos críticos).
- Aumentar investigación científica

– Desarrollo de sistemas de monitorización, predicción y alerta.

■ El nivel de mitigación dependerá del impacto en el usuario final y del presupuesto económico.

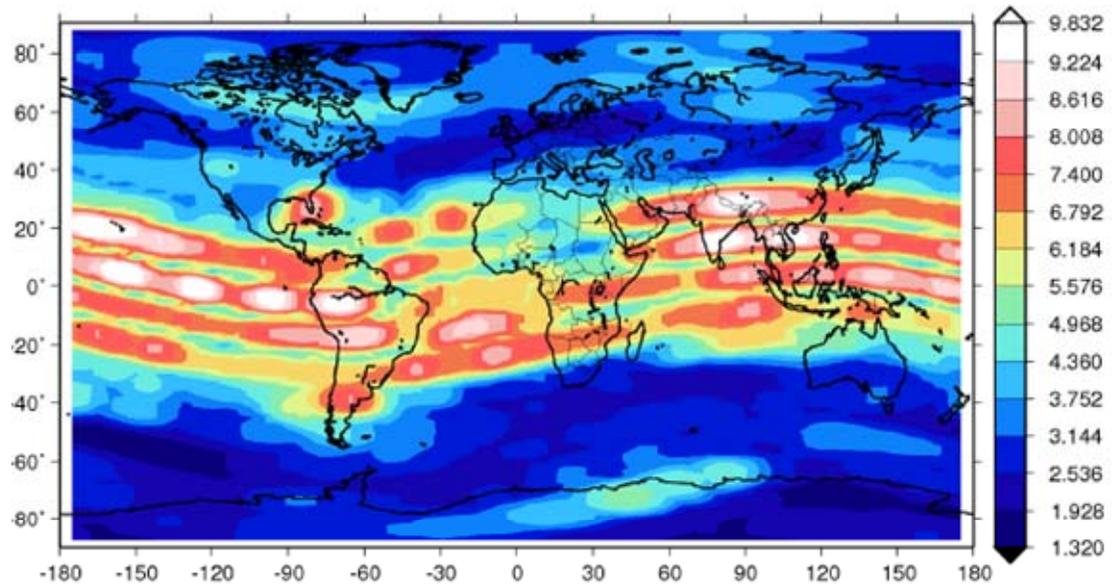


# Para el próximo máximo solar ...

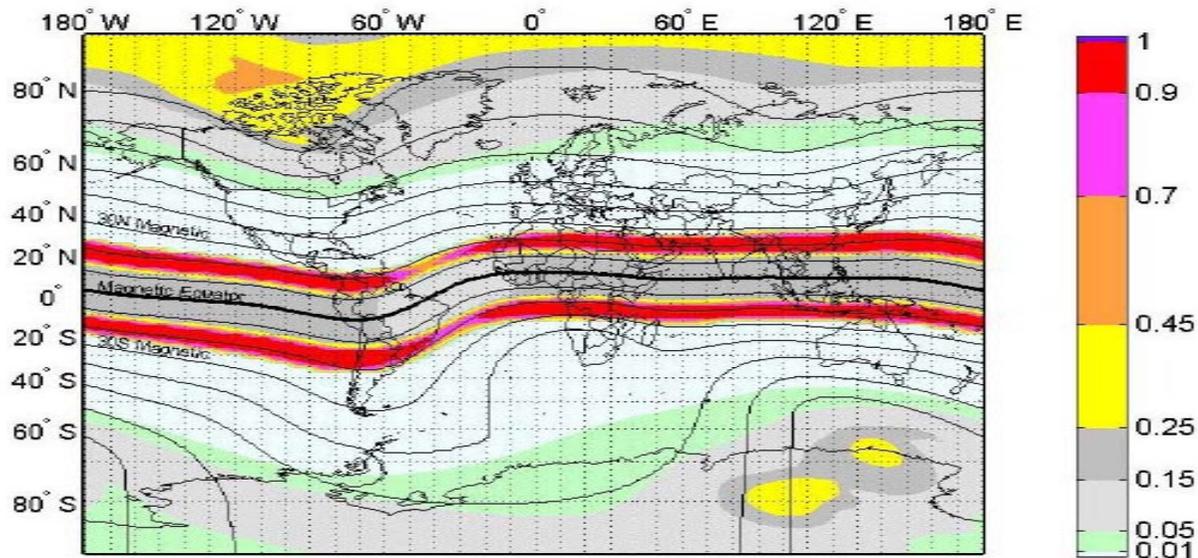
- Las predicciones parecen indicar que este ciclo será menos activo que el anterior:
  - Las consecuencias en los sistemas GNSS serán menos intensas que en el último máximo solar.
  - La mayor parte del tiempo los sistemas GNSS funcionarán bien.
- Se espera que el número de aplicaciones y usuarios de sistemas GNSS aumente considerablemente:
  - La dependencia de estos sistemas podría provocar situaciones críticas
- Pero nuestro conocimiento ha aumentado en los últimos años y aumentarán en los siguientes:
  - A nivel científico (física ionosférica, interacción sol-ionosfera, etc.)
  - A nivel industrial (algoritmos de GNSS, tecnología de receptores, etc.)
- Las redes de receptores precisos serán más densas:
  - Se mejorará la monitorización de la ionosfera y sus efectos
- Los sistemas de monitorización y alerta también mejorarán:
  - Se podrá avisar a los usuarios para evitar situaciones de riesgo

# 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.



Gracias por su  
atención

Esther Sardón  
Unidad de Negocio GNSS  
esardon@gmv.com

[www.gmv.com](http://www.gmv.com)

**gmV**<sup>®</sup>  
INNOVATING SOLUTIONS