

Seminario “La ionosfera y su efecto en los sistemas GNSS”

ANÁLISIS IONOSFÉRICO EN LA REGIÓN ECUATORIAL: IMPACTO EN LAS PRESTACIONES GNSS

15 de Abril de 2008 – Santiago de Chile

M. Cueto – GMV
A. Cezón - GMV
S. Pineda - GMV
E. Sardón - GMV

© GMV, 2008 Property of GMV
All rights reserved

Proyecto RLA/00/009: Ensayos de Aumentación GNSS en las Regiones CAR/SAM. 14-16 Abril 2008, Santiago de Chile



CONTENIDO

- Estrategia: Datos y análisis
- Análisis estadístico global de la ionosfera
- Análisis estadístico de la distorsión de la función de mapeo en la región CAR/SAM
- Impacto ionosférico en las prestaciones de SBAS para la región CAR/SAM
- Conclusiones

GENERAL

- Grupo empresarial multinacional fundado en 1984
- De capital privado español
- Filiales en España, Portugal y EEUU
- Más de 800 empleados en todo el mundo
- Origen vinculado al sector Espacio y Defensa
- Actualmente operamos en **Aeronáutica, Espacio, Defensa, Seguridad, Transporte, Telecomunicaciones, y Tecnologías de la Información**



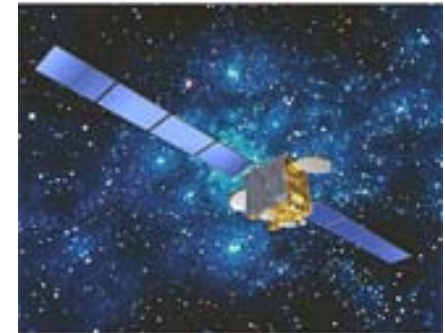
AERONÁUTICA

- Desarrollo de Software bajo norma RTCA DO-178
- Sistemas y equipos experimentales: GMV ha desarrollado para AENA una de las plataformas más avanzadas para la experimentación en vuelo de la navegación GNSS
- Sistemas de navegación: GMV ha sido pionera en el desarrollo de sistemas que permiten la aproximación instrumental de aeronaves sobre plataformas móviles y pistas no preparadas con GPS.
- Simuladores: GMV es responsable de módulos de los simuladores de vuelo de una extensa flota de aeronaves (Typhoon, Hercules, CN-235, etc.)
- ...

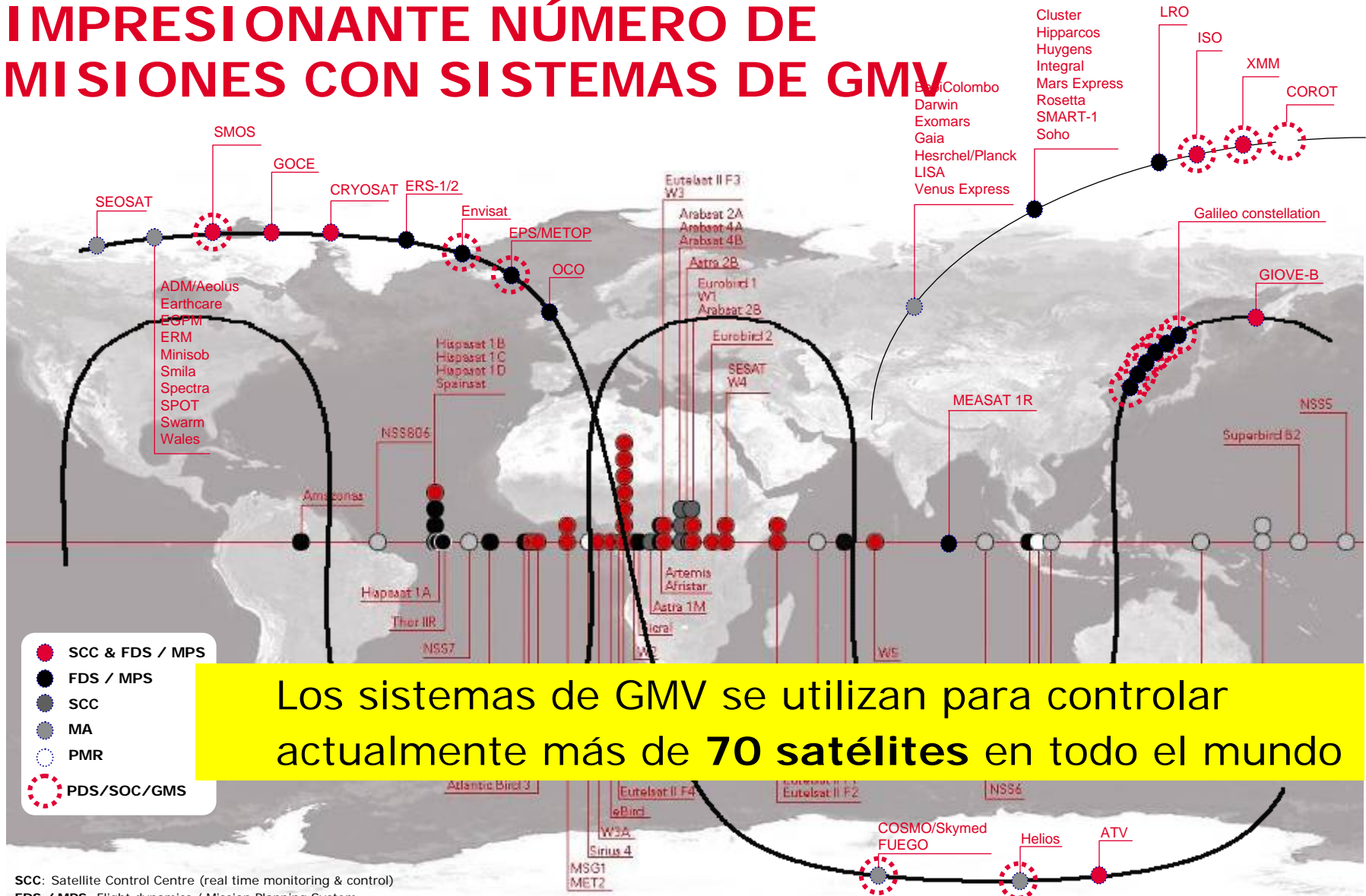


ESPACIO

- Centros de control de satélites y Sistemas de dinámica de vuelo: GMV es el suministrador **Europeo #1 de centros de control y el Segundo proveedor mundial** de operadores comerciales de telecom
- Infraestructura de tierra GNSS (EGNOS, Galileo): **Principal proveedor europeo de elementos críticos** para las prestaciones de la infraestructura de tierra de sistemas GNSS
- **Centros de procesamiento de datos de satélites de observación de la Tierra.**
- Sistemas de planificación de misión
- Servicios y herramientas de análisis de misión
- Software embarcado
- Desarrollo de simuladores
- Desarrollo de aplicaciones espaciales



IMPRESIONANTE NÚMERO DE MISIONES CON SISTEMAS DE GMV

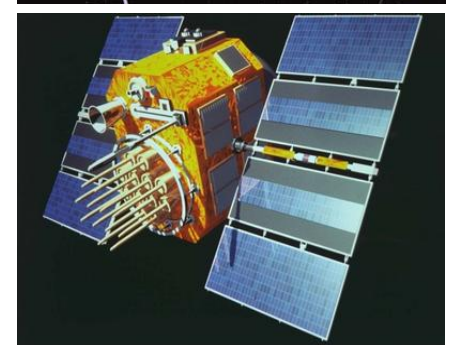
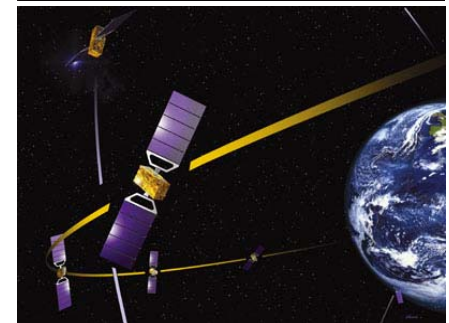
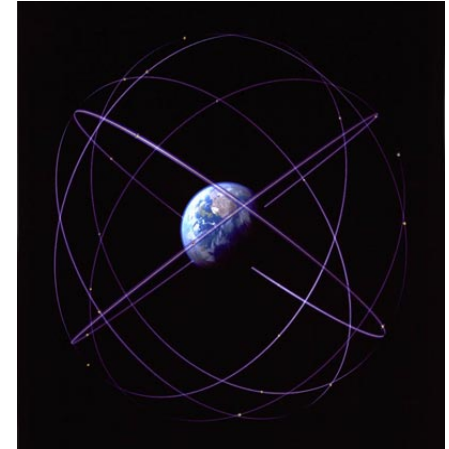


Los sistemas de GMV se utilizan para controlar actualmente más de **70 satélites** en todo el mundo

- SCC: Satellite Control Centre (real time monitoring & control)
- FDS / MPS: Flight dynamics / Mission Planning System
- MA: Mission analysis
- PMR: Payload management & reconfiguration
- PDS/SOC/GMS: Payload Data Segment / Science Operations Centre, Ground Mission Segment

NAVEGACIÓN: HECHOS DESTACADOS

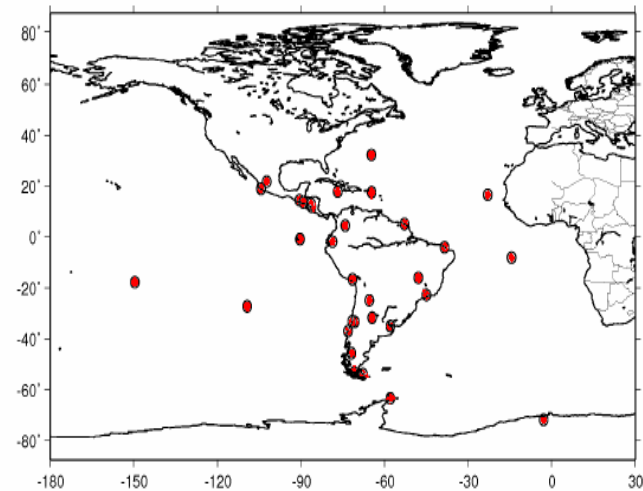
- El mayor equipo de ingeniería en Europa trabajando en GNSS (>130 ingenieros)
- Papel clave en el desarrollo de la estrategia Europea de GNSS (EGNOS y Galileo)
- Responsable del centro de proceso de EGNOS
- Apoyo a **Aena en el diseño de SACCSA**
- Papel clave en Galileo
 - **Primer suministrador** español y tercero europeo en el desarrollo de la infraestructura de Galileo
- GMV ha sido **pionero** desde el principio:
 - Desarrollo y demostración experimental de determinación de actitud con GPS (1989)
 - Monitorizado de integridad de GPS/GLONASS (1991),
 - Sistema de aproximación SAGRAN (1995), ...



ESTRATEGIA: DATOS

- Procesado de 6.5 años de datos (Enero 2000-Julio 2006) de 42 estaciones IGS localizadas en la región CAR/SAM :

- Datos "crudos": RINEX de observación y navegación
- Ficheros IONEX (IONosphere Map Exchange Format) . (2.5°x5°)

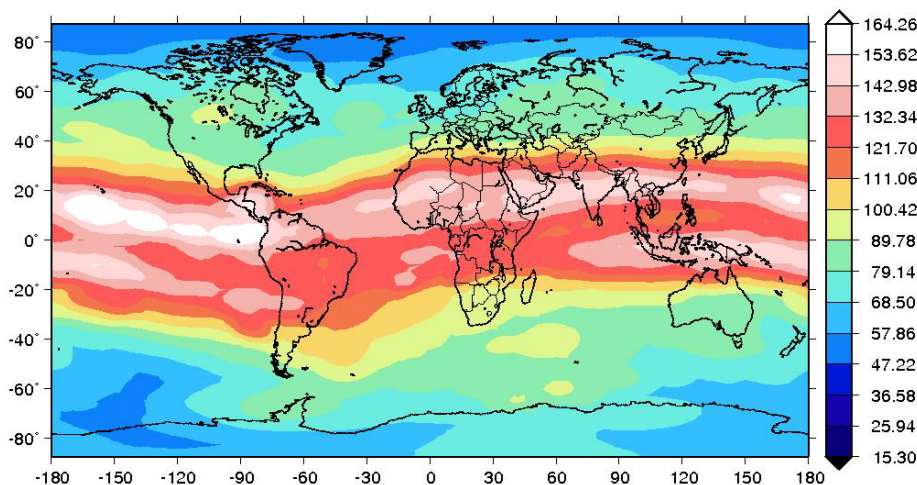


- Dos tipos de análisis:
 - basados en ficheros IONEX: análisis estadístico global del vTEC.
 - basados en el procesado de datos "crudos", usados como entrada de los correspondientes algoritmos ionosféricos: algoritmo GILION (GPS Information of the Local Ionosphere).

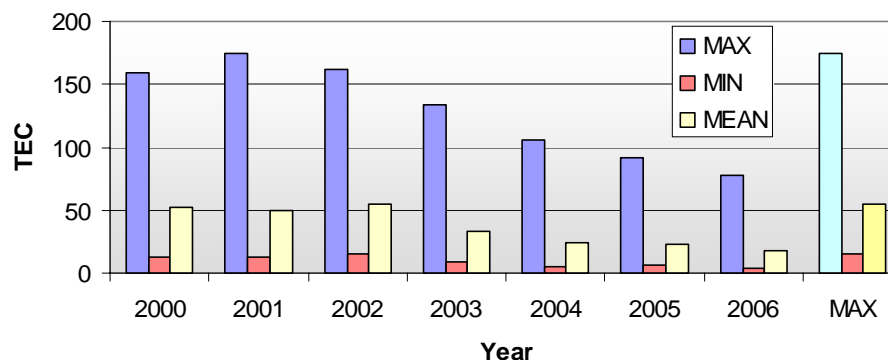
ESTRATEGIA: ANALISIS

- Análisis estadístico de la ionosfera a nivel global y en la región CAR/SAM:
 - Máximo, mínimo y media de vTEC
 - Gradientes espaciales máximos de vTEC
 - Gradientes temporales máximos de vTEC
 - Análisis del Rate of TEC (RoT)
- Análisis de la distorsión de la función de mapeo.
- Análisis preliminar de las prestaciones de SBAS en la región CAR/SAM.

ANÁLISIS DE vTEC MAXIMO, MINIMO Y MEDIO

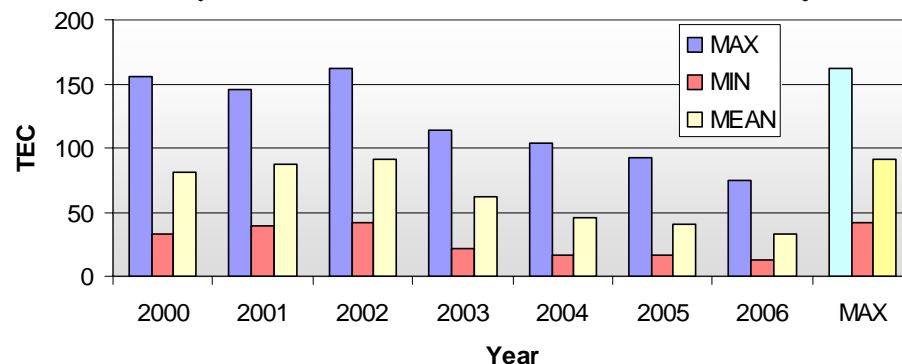


vTEC GLOBAL



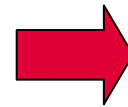
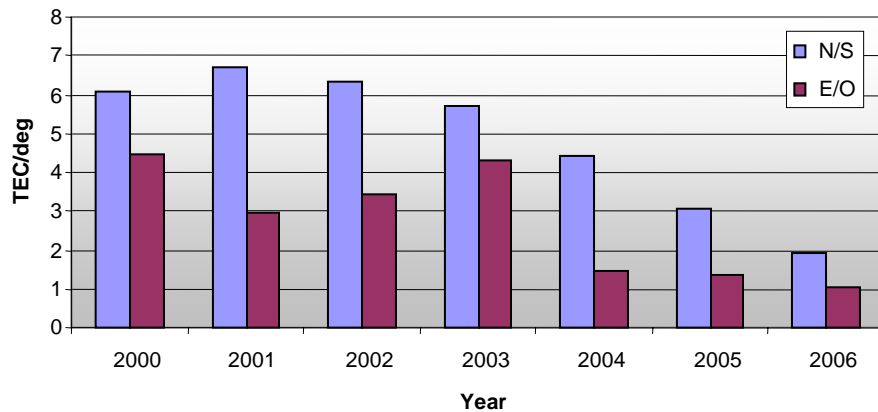
- Máximo vTEC de IONEX: 164 TECu (~ 26 m en L1). Anomalía ecuatorial HN.
- Baja Actividad Solar (vTEC Máx) ~ 50% Alta actividad solar (Max vTEC).

CAR/SAM REGION vTEC (30-80°S; 120-20°W)



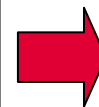
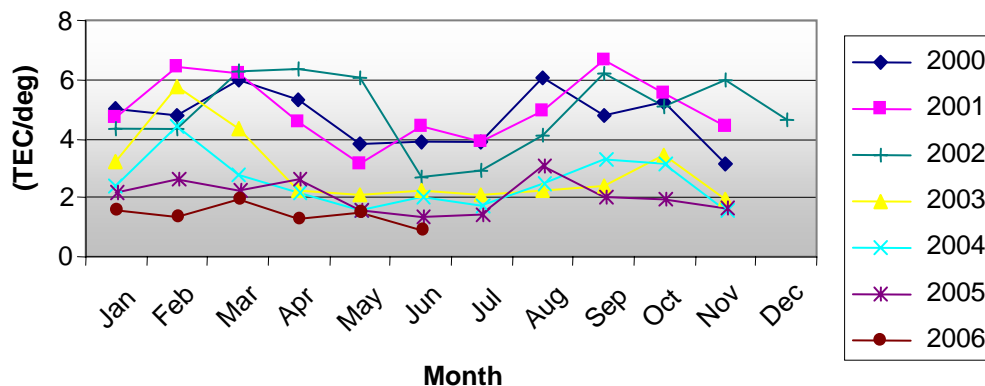
ANÁLISIS DE GRADIENTES ESPACIALES MÁXIMOS DE vTEC

CAR/SAM: GRAD. ESPACIALES MÁXIMOS DE vTEC vs. AÑO



- Gradientes espaciales de vTEC máximos: Gradiente N/S.
- 2001 (Alta actividad solar): Valores máximos.
- 2006 (Baja actividad solar): Valores mínimos.

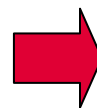
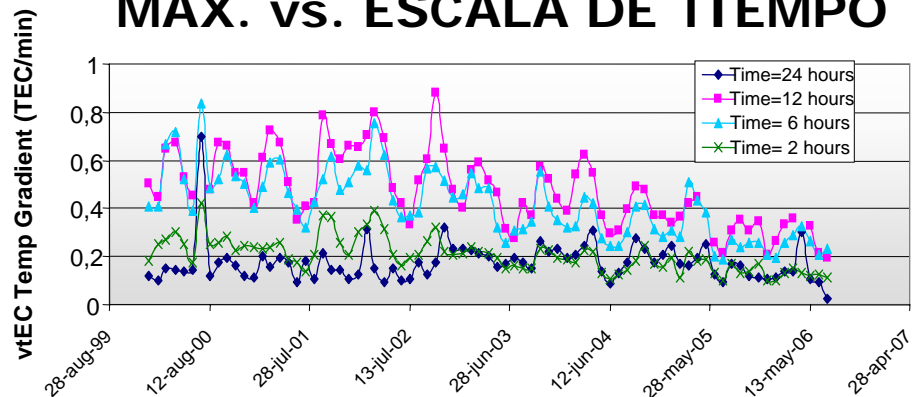
CAR/SAM: GRAD. ESPACIALES MAX. N/S DE vTEC vs. MES



Tendencia a gradientes máximos N/S decrecientes en invierno del HS.

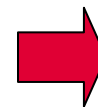
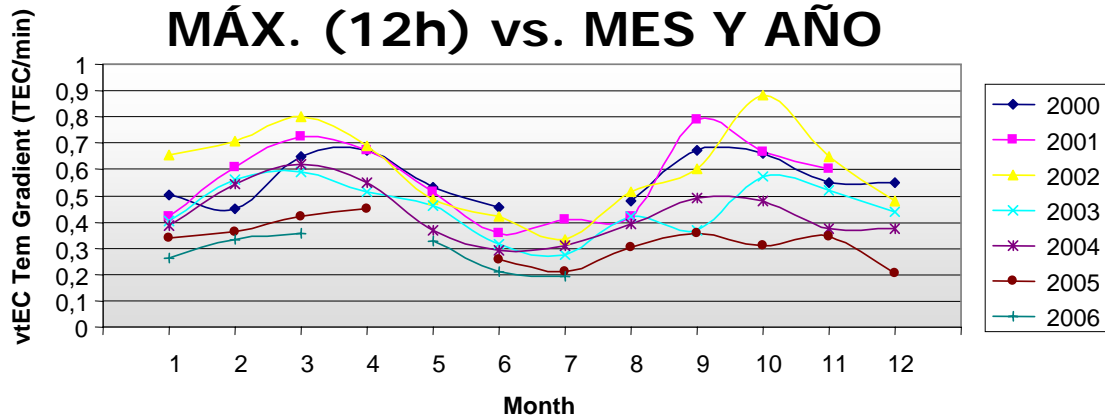
ANÁLISIS DE GRADIENTES TEMPORALES MÁXIMOS DE vTEC

GRAD. TEMPORALES DE vTEC MÁX. vs. ESCALA DE TIEMPO



Los gradientes temporales de vTEC máximos corresponden a las escalas de tiempo de 6 y 12 horas.

GRAD. TEMPORALES DE vTEC MÁX. (12h) vs. MES Y AÑO



Los gradientes temporales máximos de vTEC corresponden a alta actividad solar y a los equinoccios.

ANÁLISIS DEL RoT (RATE OF TOTAL ELECTRON CONTENT)

- Definición del RoT:

$$RoT(t_j, \Delta t_{ij}) = S \left[\left(L_1(t_j) - L_2(t_j) \right) - \left(L_1(t_i) - L_2(t_i) \right) \right] [TECu / \text{min}]$$

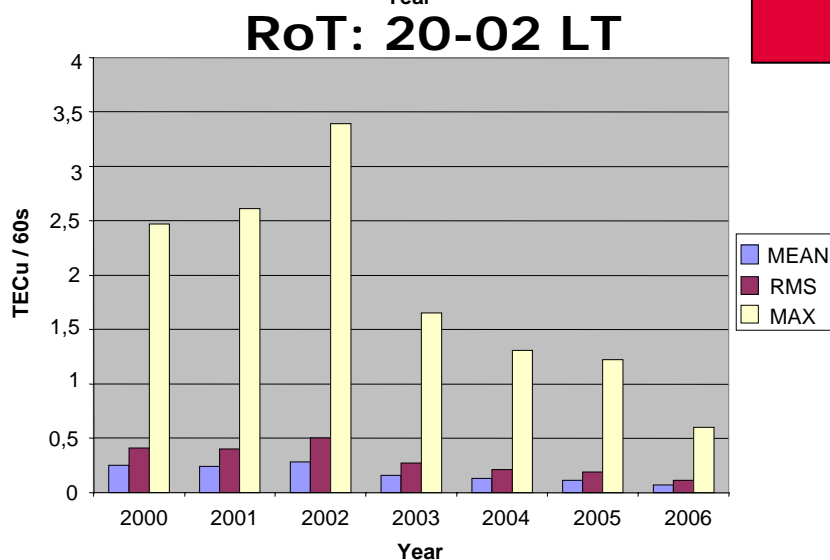
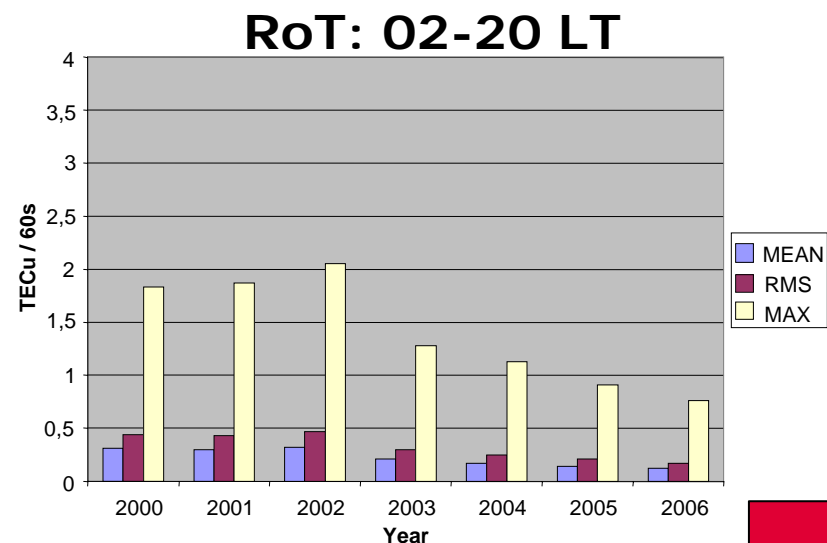
donde $\Delta t_{ij} = t_j - t_i = 1$ [min]

$$S = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = 9.52 \cdot 10^{16} [e / m^3]$$

- Análisis del RoT:

- Datos “crudos” + Preprocesado + Cálculo del RoT
- Grupos de datos: 20-02 LT y 02-20 LT.
- Cálculo de máximos, medias, percentil 67% y RMS para cada grupo en función de LT, año, mes, latitud geomagnética y elevación.
- Comportamiento de medias y máximos

ANÁLISIS DEL RoT



Alta actividad solar y equinoccios: Máximos valores de la media y percentil 67% del RoT.

-> COMPORTAMIENTO DE LA IONOSFERA MEDIA

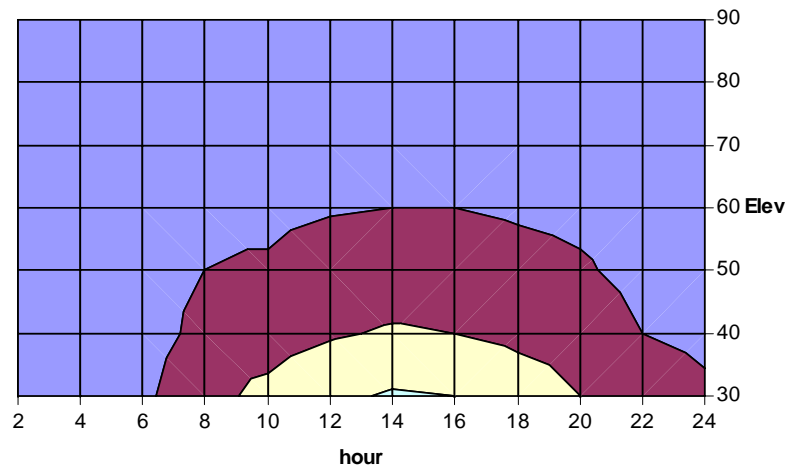
Alta actividad solar, equinoccios y 20-02 LT: Máximos valores de los máximos del RoT.

-> IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS NOCTURNAS

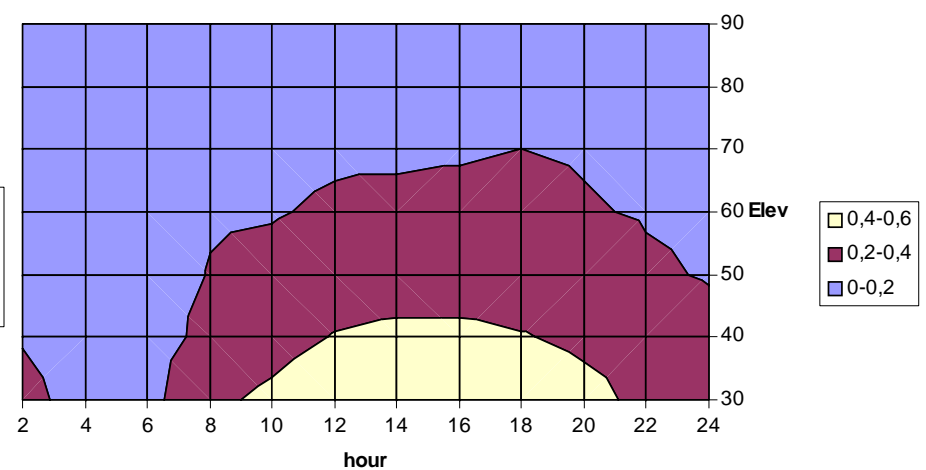
ANÁLISIS DEL RoT

Análisis del percentil 67% del RoT: Dependencia con la localización geomagnética

Latitud geom. $> |20^\circ|$



Latitud geom. $< |20^\circ|$



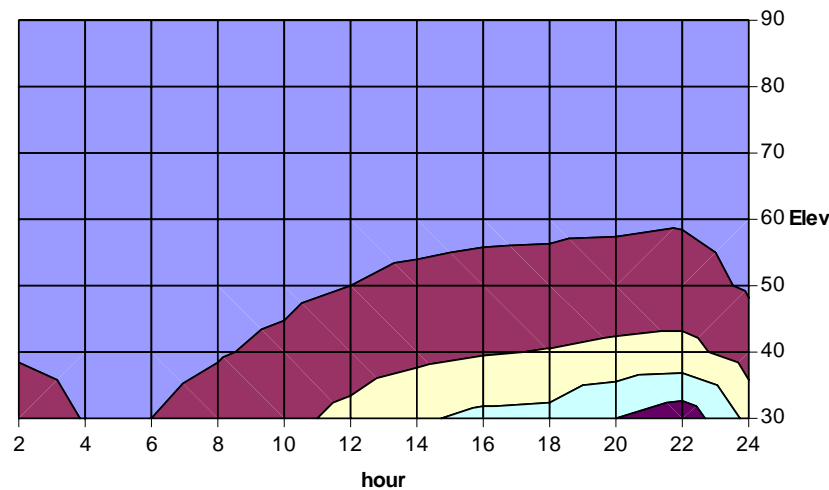
Estaciones ecuatoriales y no ecuatoriales: 14h y Elev=30°

ANÁLISIS DEL RoT

Valores máximos del RoT ~ Análisis de irregularidades ionosféricas

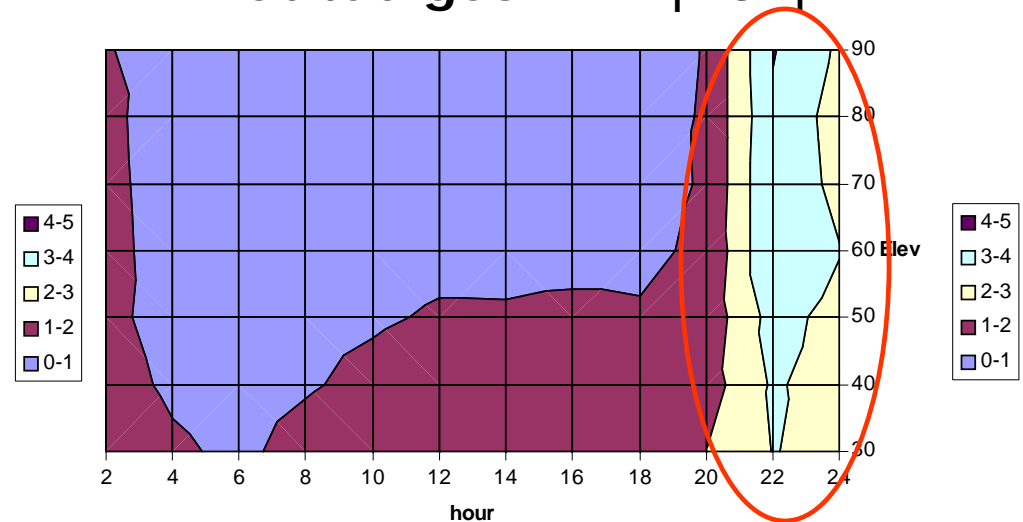
Dependencia con la elevación

Latitud geom. $> |20^\circ|$



- Max RoT: Elev=30° y 22 LT.
- El valor máximo aumenta a medida que la elevación decrece para toda LT.

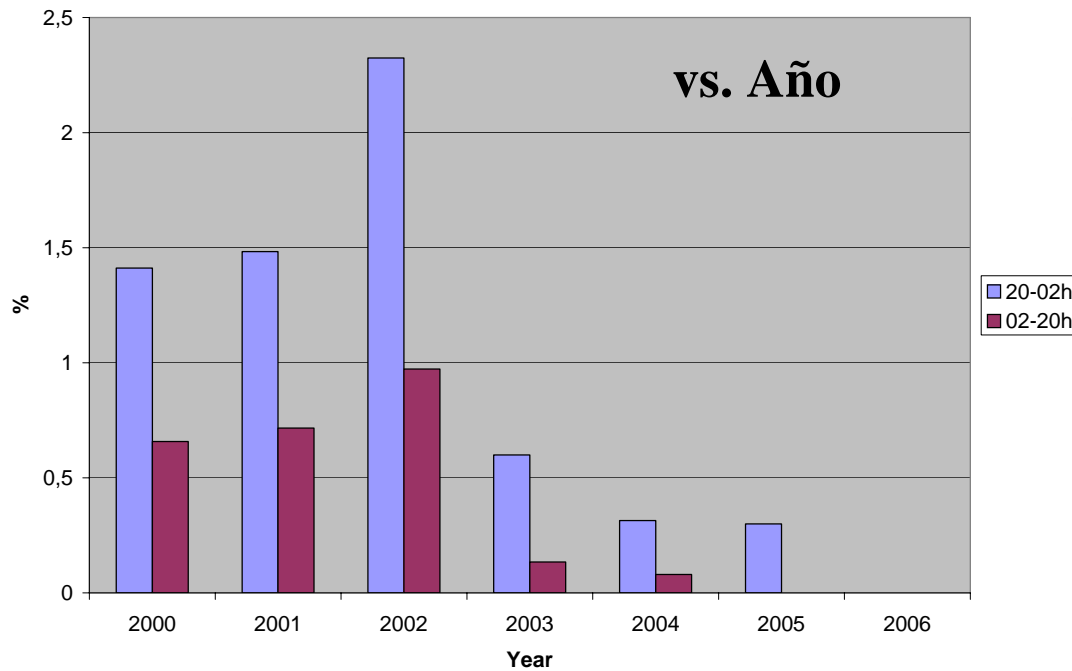
Latitud geom. $< |20^\circ|$



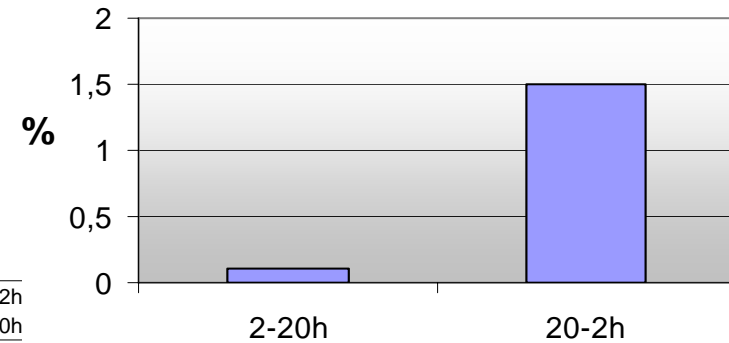
- 22-24 LT y toda elevación.
- 22-02 LT: El valor máximo del RoT aumenta con la elevación -> variaciones rápidas del TEC ionosférico.

ANÁLISIS DEL RoT

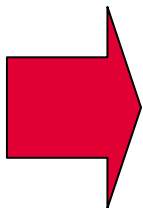
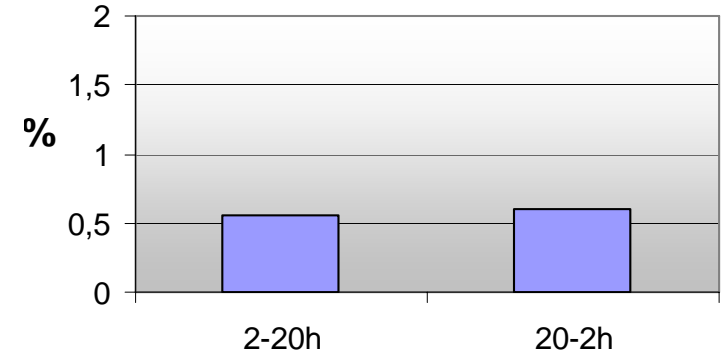
Porcentaje de RoT superior a 2 TECu/min



Geom In

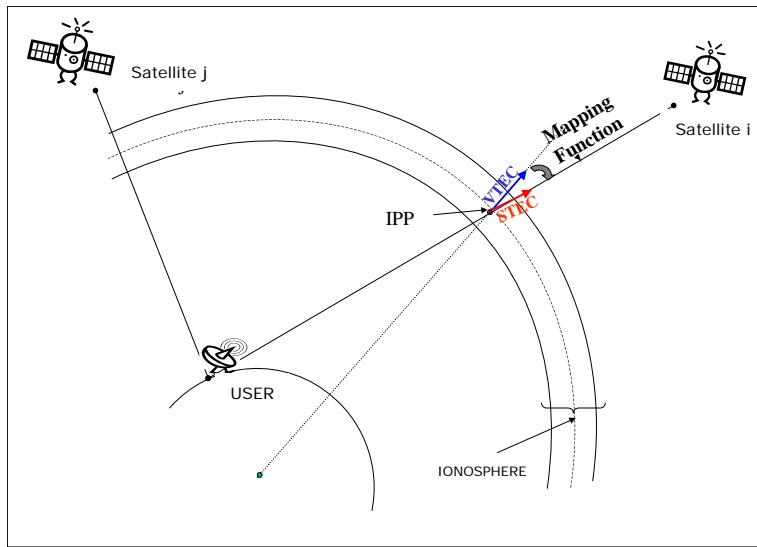


Geom Out

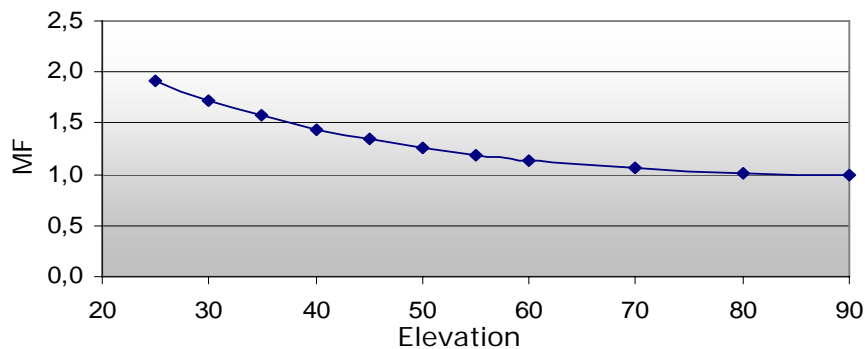


Porcentaje total < 1.6 %
 Porcentaje en Alta Actividad Solar < 3%

ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE LA FUNCIÓN DE MAPEO (MF)



Mapping Function



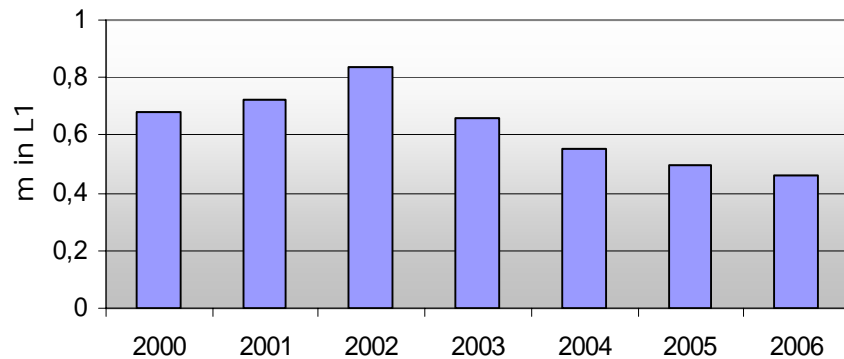
- Factor de oblicuidad de MOPS
- TEC Vertical ↔ TEC Oblicuo
- Modelo de una capa

$$mf(Elev) = \frac{1}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H} \cdot \cos(Elev)\right)\right)}$$

- Índice de distorsión de la MF: sTECobs-sTECmf
- Dependencias:
 - Actividad solar, mes y LT
 - Elevación
 - Latitud geomagnética

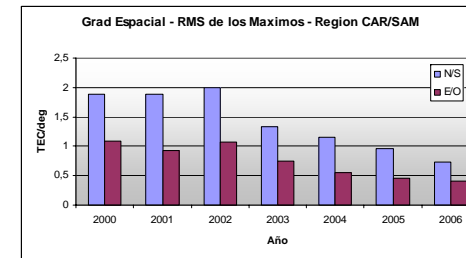
ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE LA FUNCIÓN DE MAPEO (MF)

Distorsión de MF vs. Año: Perc 67%

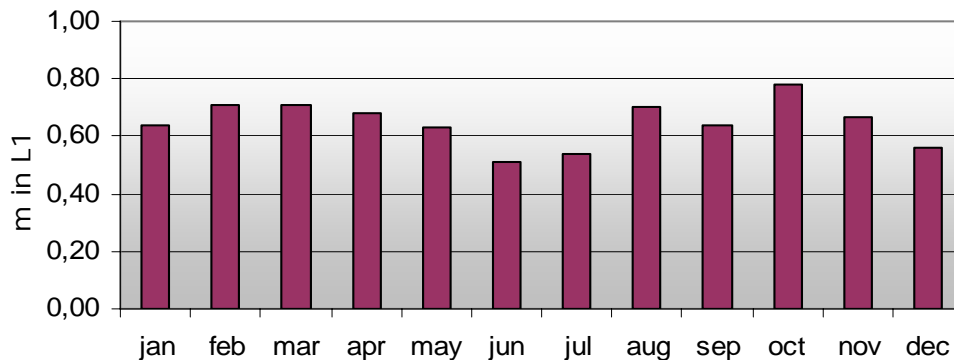


- Dependencia con la actividad solar:

- 2006: Mínimo
- 2002: Máximo. Gradientes Espaciales Max. en 2002:



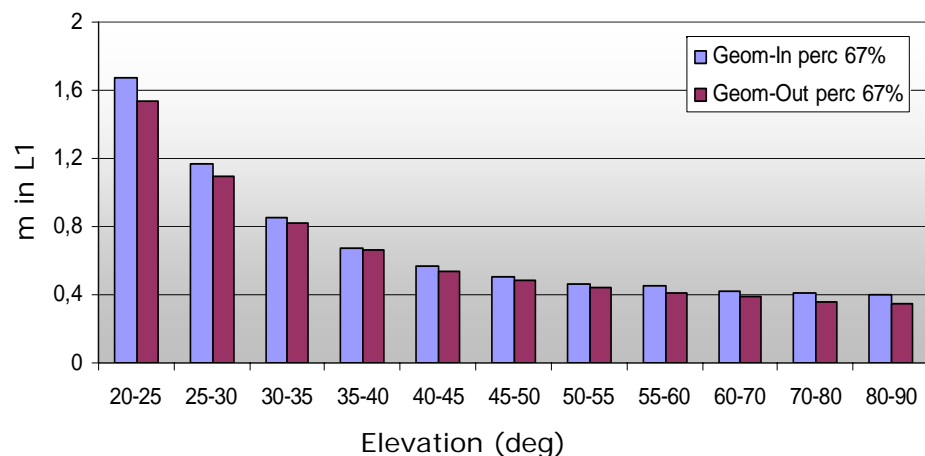
Distorsión de MF vs. Mes : Perc 67%



- Máximo: Equinoccios
- Mínimo: Invierno del HS

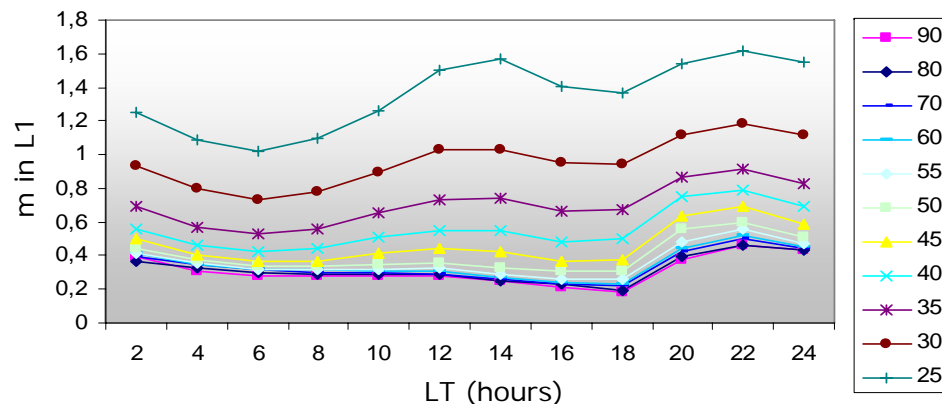
ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE LA FUNCIÓN DE MAPEO (MF)

Dependencia con Elevación y Localización



- Máxima distorsión en bajas elevaciones
- Dos regiones: $\sim 40^\circ$

Dependencia de RMS con Elevación y LT



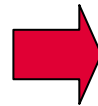
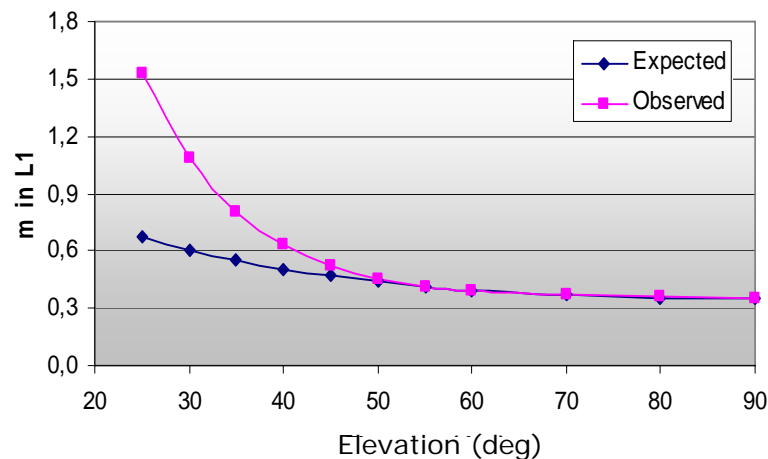
- Horas diurnas: Mayor Distorsión
- Máximo: 14 y 22 LT.

ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN DE LA FUNCIÓN DE MAPEO (MF)

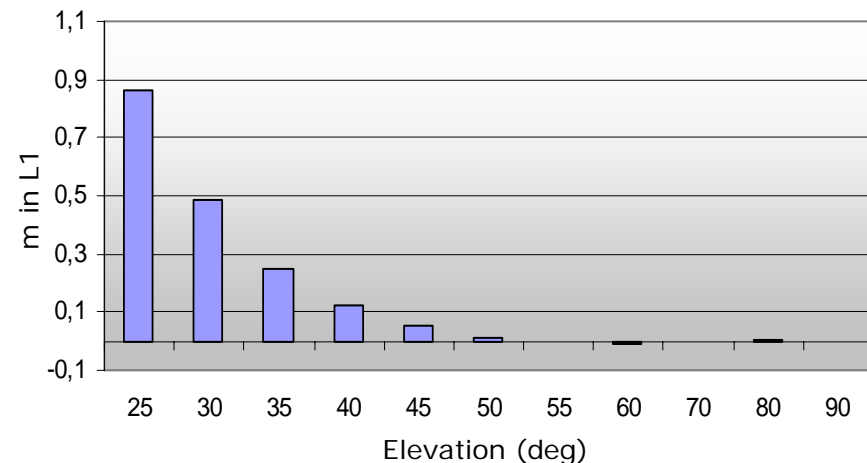
Estimación del error debido a la MF a nivel del usuario (en L1)

- “Esperado”: (percentil 67% del error a 90° de elevación) * MF
- “Observado”: percentil 67% del error en función de la elevación.
- Error = |”Observado” – “Esperado”|

Error Esperado y Observado



Error a Nivel Usuario



IMPACTO IONOSFÉRICO EN LAS PRESTACIONES SBAS

- **Centelleos ionosféricos:**

- ✓ Problemas a nivel usuario por pérdida de señal:
 - GEO => Pérdida del mensaje SBAS
 - GPS => Efecto menor, pérdida de varios PRNs al mismo tiempo
- ✓ Baja probabilidad y muy localizados (<20° Lat. geom., Alta actividad solar, equinoccios y 20-2LT)

- **Función de Mapeo de MOPS:**

- ✓ Dependencia con actividad solar. Localizado por debajo de los 20° de latitud geomagnética
- ✓ Despreciable para elevaciones superiores a los 40°

- **Gradientes espaciales y temporales de vTEC:**

- ✓ El comportamiento temporal y espacial de los gradientes indica que en promedio es posible ajustarse a las características de un sistema SBAS (mallado y frecuencia de envío del mensaje SBAS). Las condiciones degradadas deben analizarse en detalle.
- ✓ Observable a nivel CPF con adecuada cobertura de estaciones

CONCLUSIONES

- Se ha realizado un extenso análisis estadístico basado en datos reales en la región CAR/SAM. La estrategia ha consistido en analizar un conjunto de datos representativo (6.5 años) para obtener indicadores representativos que permitan determinar el impacto de la ionosfera ecuatorial en las prestaciones de un sistema GNSS.
- Los máximos de $vTEC$ en baja actividad solar son aproximadamente un 50% inferiores a los obtenidos en condiciones de alta actividad solar.
- Los máximos de los gradientes espaciales de $vTEC$ corresponden la gradiente espaciales latitudinal y alta actividad solar.
- El comportamiento de los máximos del gradiente espacial de $vTEC$ deben ser tenidos en cuenta a fin de asegurar la integridad para todo usuario de la región CAR/SAM.
- Los máximos gradientes temporales de $vTEC$ aparecen en alta actividad solar y en los equinoccios.

CONCLUSIONES

- Los máximos del RoT tienen lugar en alta actividad solar, equinoccios y en el intervalo 20-02 LT, reflejando el efecto de irregularidades ionosféricas nocturnas.
- Estaciones no ecuatoriales:
 - Clara dependencia con la variación solar, con valores medios máximos del RoT a las 14:00 LT y bajas elevaciones.
 - Valores máximos del RoT a las 22 LT y 30° de elevación. Los valores máximos del RoT aumentan a medida que disminuye la elevación para todo LT.
- Estaciones ecuatoriales:
 - Se observa un aumento de los valores medios máximos del RoT en las primeras horas de la noche. La existencia de irregularidades ionosféricas podría explicar dicho comportamiento.
 - Valores máximos del RoT a las 22-24 hours y para toda elevación. Este comportamiento se debe a las variaciones rápidas del TEC ionosférico.

CONCLUSIONES

- Las variaciones rápidas ionosféricas en la región CAR/SAM están altamente localizadas espacial (bajas latitudes) y temporalmente (equinoccios, 22-02 LT). Sería posible entonces llegar a un compromiso para asegurar las prestaciones de la misión (por ejemplo, para aviación civil).
- El porcentaje de RoT por encima de 2 TECu/min es inferior al 2.5% para alta actividad solar, y menor que un 0.3% para baja actividad solar en el intervalo horario 20-02 LT.
- El impacto de la distorsión de la función de mapeo en el posicionamiento aumenta en los equinoccios y con la actividad solar.
- Los errores debidos a la distorsión de la función de mapeo son despreciables para elevaciones superiores a los 40° en la región CAR/SAM.
- Los resultados obtenidos en el presente análisis son alentadores en lo que concierne a un sistema SBAS. Sería necesario analizar en detalle los efectos de los centelleos y de las variaciones ionosféricas rápidas en bajas latitudes como posible efecto local (teniendo en cuenta comportamientos extremos) para realizar una reingeniería adecuada del sistema SBAS.



Muchas Gracias

Marta Cueto

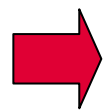
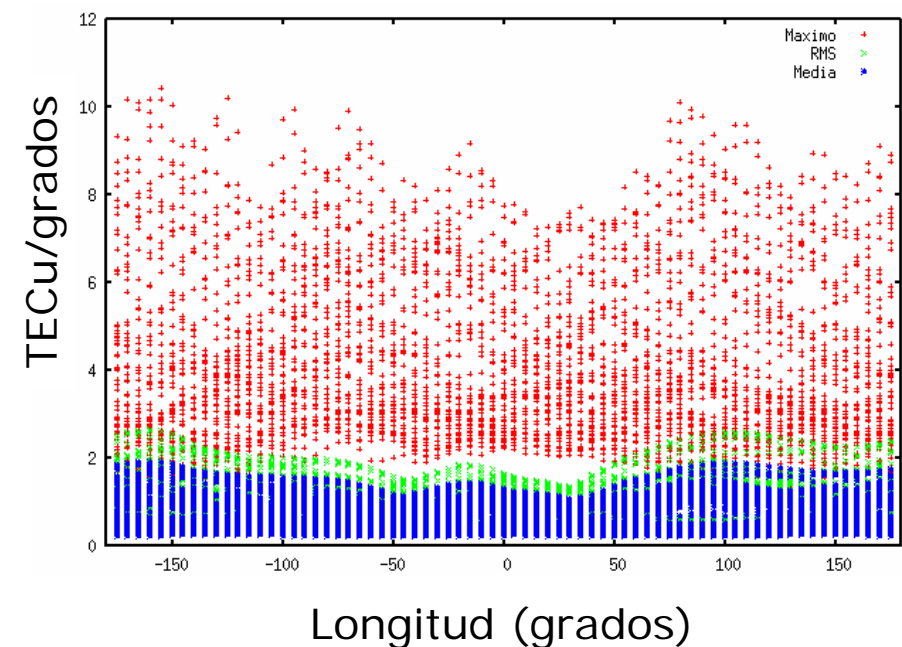
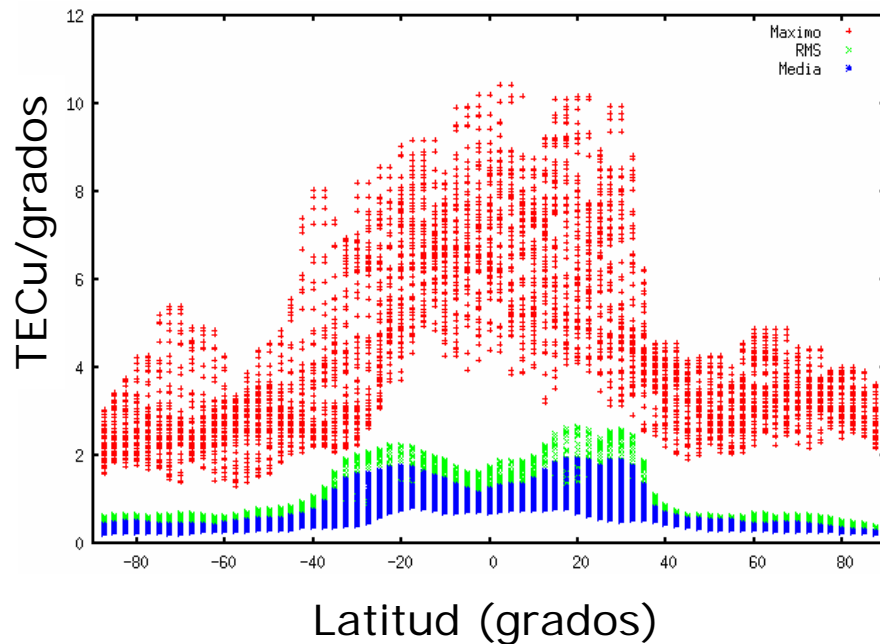
Email: mcus@gmv.es

www.gmv.com

gmV[®]
INNOVATING SOLUTIONS

ANEXO 1

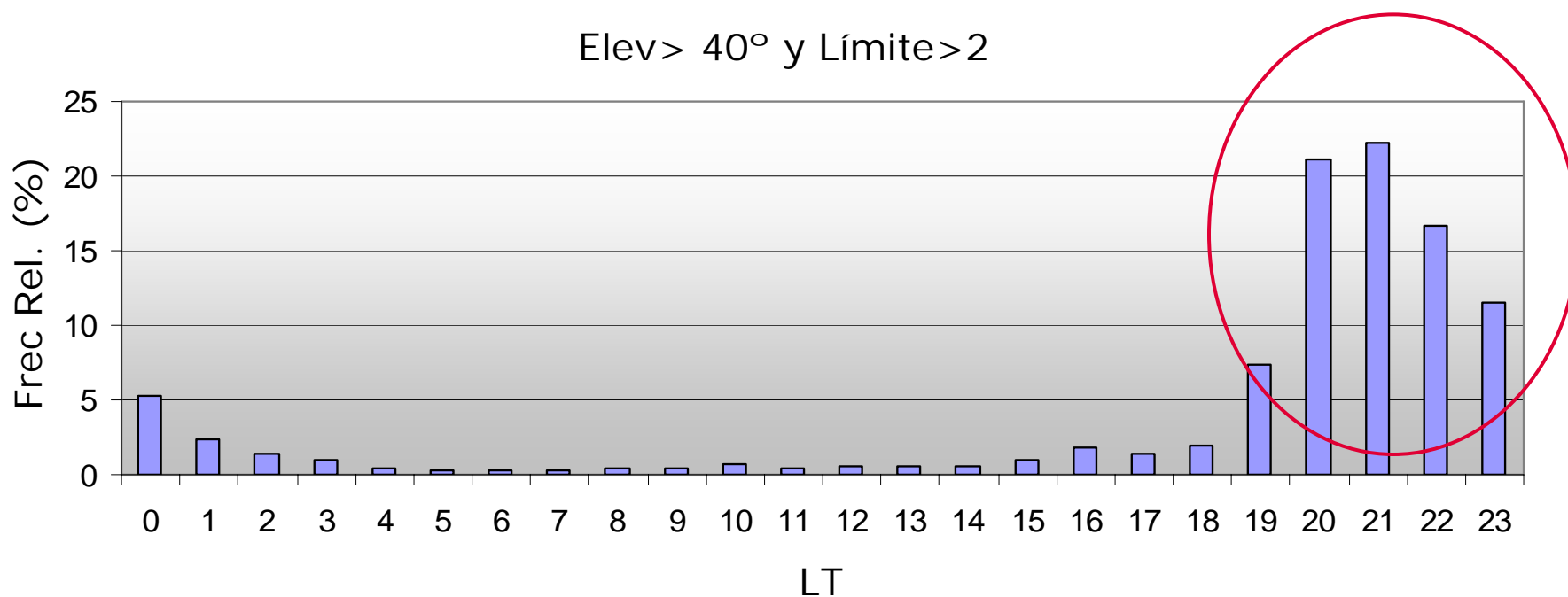
Gradiente espacial de vTEC vs. Latitud y Longitud



- Clara dependencia con la latitud
- No dependencia con la longitud

ANEXO 2

Frecuencia Relativa vs. LT

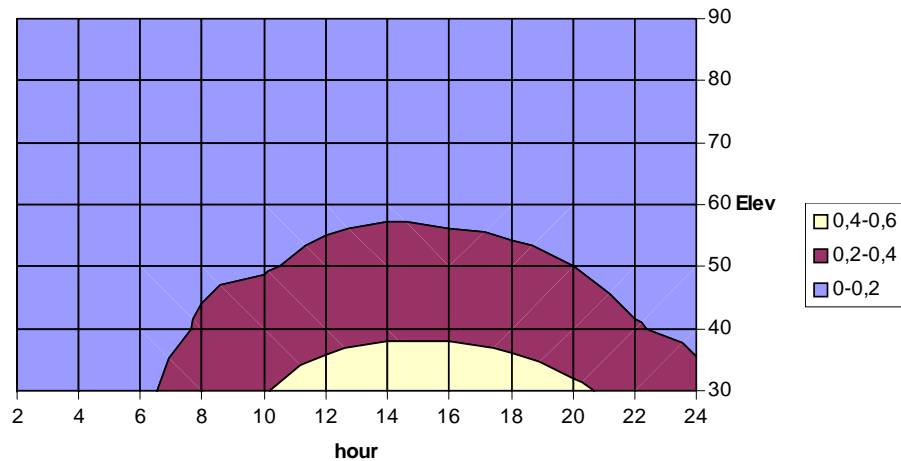


➔ Altas frecuencias Relativas: 20-23 LT

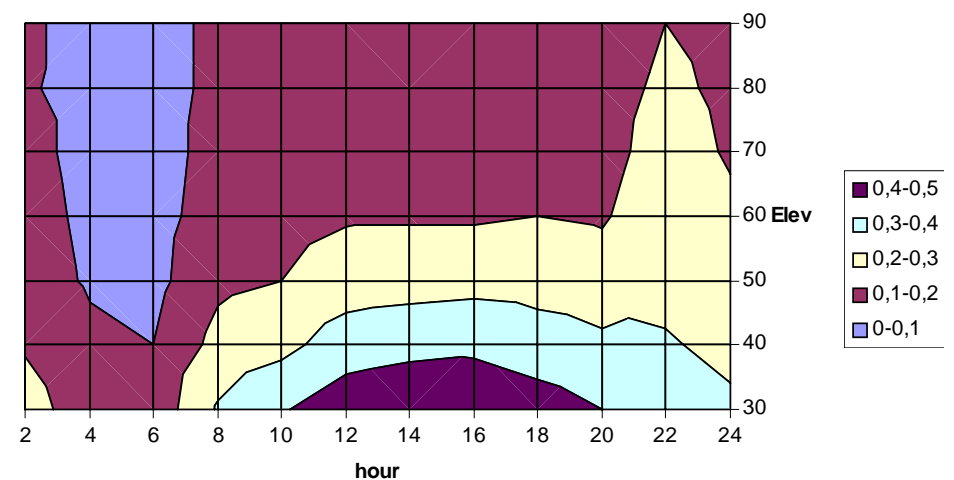
ANEXO 3

Análisis de la Media del RoT : Dependencia con la localización geomagnética

Latitud Geom. $> |20^\circ|$



Latitud Geom. $< |20^\circ|$



- Estaciones no ecuatoriales: 14h y Elev=30°
- Estaciones ecuatoriales: 22h y toda elevación

ANEXO 4

Estaciones SACCSA:

- 15 estaciones no ecuatoriales
- 34 estaciones ecuatoriales

| Longitude | Latitude | STATION_NAME | LonGM(2005) | LatGM(2005) |
|-----------|----------|--------------|-------------|-------------|
| -64,70 | 32,37 | brmu | 8,13 | 42,54 |
| 244,52 | 32,63 | mexi | 310,86 | 39,72 |
| 279,46 | 28,46 | ccv3 | 350,14 | 38,58 |
| 259,69 | 25,72 | mty2 | 328,48 | 34,60 |
| 252,62 | 24,80 | culi | 320,96 | 32,97 |
| 279,84 | 25,73 | mia3 | 350,68 | 35,87 |
| 249,68 | 24,14 | lpaz | 317,92 | 31,97 |
| 270,38 | 20,98 | meri | 340,57 | 30,70 |
| -102,28 | 21,86 | ineg | 326,83 | 30,58 |
| -75,76 | 20,01 | scub | 355,67 | 30,24 |
| 269,46 | 19,84 | cam2 | 339,66 | 29,51 |
| 260,36 | 19,29 | tol2 | 329,95 | 28,27 |
| -76,78 | 17,94 | jama | 354,61 | 28,15 |
| -64,58 | 17,76 | cro1 | 7,76 | 27,93 |
| 256,30 | 19,24 | col2 | 325,63 | 27,84 |
| -104,30 | 19,06 | manz | 325,02 | 27,60 |
| 270,13 | 16,92 | elen | 340,60 | 26,63 |
| 263,28 | 17,08 | oax2 | 333,28 | 26,32 |
| -90,52 | 14,59 | guat | 340,06 | 24,27 |
| -89,12 | 13,70 | ssia | 341,61 | 23,46 |
| -22,98 | 16,75 | tgcv | 51,68 | 23,33 |
| -87,44 | 13,42 | slor | 343,40 | 23,28 |
| 300,39 | 13,09 | bdos | 12,90 | 23,10 |
| -86,36 | 13,10 | esti | 344,55 | 23,01 |
| -86,25 | 12,15 | mana | 344,72 | 22,06 |
| 275,88 | 9,95 | crcc | 347,06 | 19,96 |
| -52,81 | 5,25 | kour | 19,58 | 14,94 |
| -74,08 | 4,64 | bogt | 357,63 | 14,89 |
| -90,30 | -0,74 | glps | 341,24 | 8,98 |
| -78,65 | -1,65 | riop | 353,06 | 8,53 |
| -38,43 | -3,88 | brft | 33,40 | 4,69 |
| 321,57 | -3,88 | fort | 33,40 | 4,69 |
| -14,41 | -7,95 | asc1 | 56,59 | -2,35 |
| -71,49 | -16,47 | areq | 0,28 | -6,21 |
| -47,88 | -15,95 | braz | 23,09 | -6,54 |
| -44,99 | -22,69 | chpi | 25,32 | -13,47 |
| -65,41 | -24,73 | unsa | 5,98 | -14,53 |
| -149,61 | -17,58 | thti | 285,11 | -15,15 |
| -109,34 | -27,12 | ispa | 325,02 | -18,85 |
| -64,47 | -31,53 | cord | 6,69 | -21,35 |
| -71,63 | -33,03 | valp | 0,14 | -22,77 |
| -70,67 | -33,15 | sant | 1,01 | -22,90 |
| -57,93 | -34,91 | lpgs | 12,50 | -24,92 |
| -73,03 | -36,84 | conz | 358,89 | -26,59 |
| -71,89 | -45,51 | coyq | 359,91 | -35,26 |
| -70,88 | -53,14 | parc | 0,74 | -42,88 |
| -67,75 | -53,79 | riog | 3,29 | -43,55 |
| -57,89 | -63,35 | ohi2 | 10,39 | -53,32 |
| -2,84 | -71,67 | vesl | 46,32 | -66,06 |