

# ***Mejoras en los productos del centro de análisis de la ionosfera de SIRGAS***

***Claudio Brunini, Mauricio Gende, Francisco Azpilicueta,  
Romina Galván, Érika Gularte, Isabel Bibbo,  
Emilio Camilion, Federico Conte***

*GESA, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas,  
Universidad Nacional de La Plata, Argentina.*

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas,  
Argentina.*



*Reunión SIRGAS 2012, Concepción, Chile, 29 al 31 de octubre de 2012*

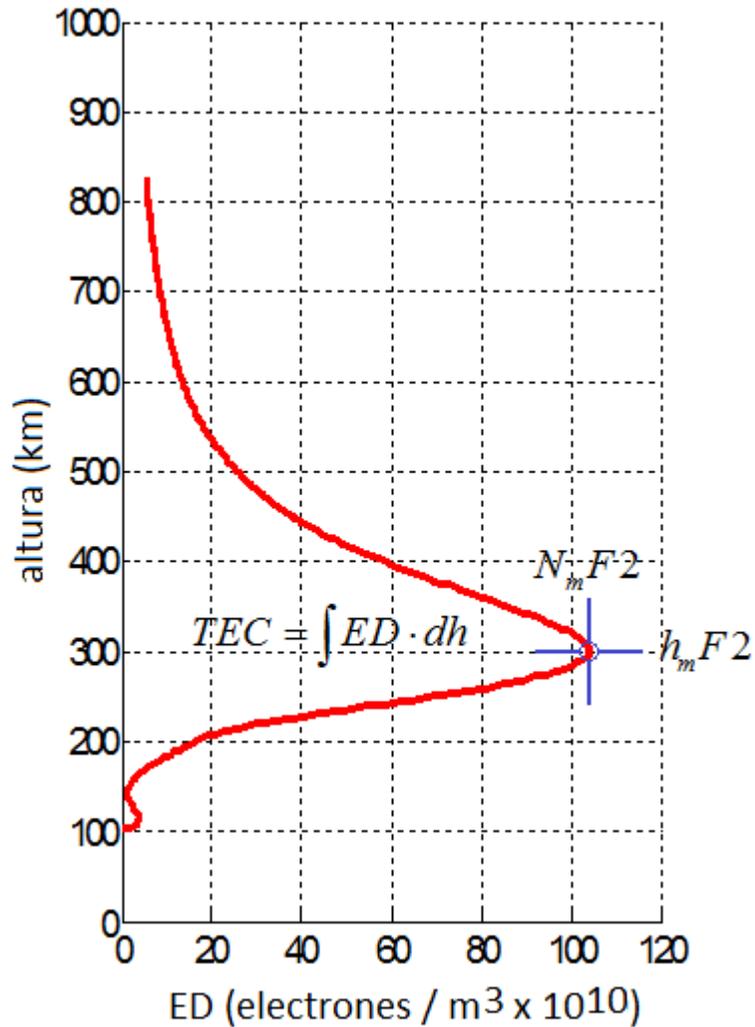
## **Objetivo de la presentación**

*En 2005 SIRGAS instaló un servicio permanente para la distribución de mapas 3-D (latitud – longitud – ~~altura~~ – tiempo) del Contenido Electrónico Total.*

*Desde 2008 desarrolla un modelo para calcular mapas 4-D (latitud – longitud – altura – tiempo) de la Densidad Electrónica en la ionosfera.*

*Se resume el estado actual de la investigación y se presentan resultados que alientan la posibilidad de implementar un servicio permanente para la distribución de mapas 4-D.*

- ✓ *Brunini et al., A different method to determine the height of the F2 peak, under review, Advances in Space Research.*
- ✓ *Brunini et al., Global maps of monthly-mean values of the ionospheric F2-peak parameters derived from COSMIC / FORMOSAT-3, under review, Journal of Geodesy.*
- ✓ *Brunini et al., Improving SIRGAS ionospheric model, IAG Commission 1 Symposium, Reference Frames for Applications in Geosciences, Marne-La-Vallee, France, 4-8 October 2010.*

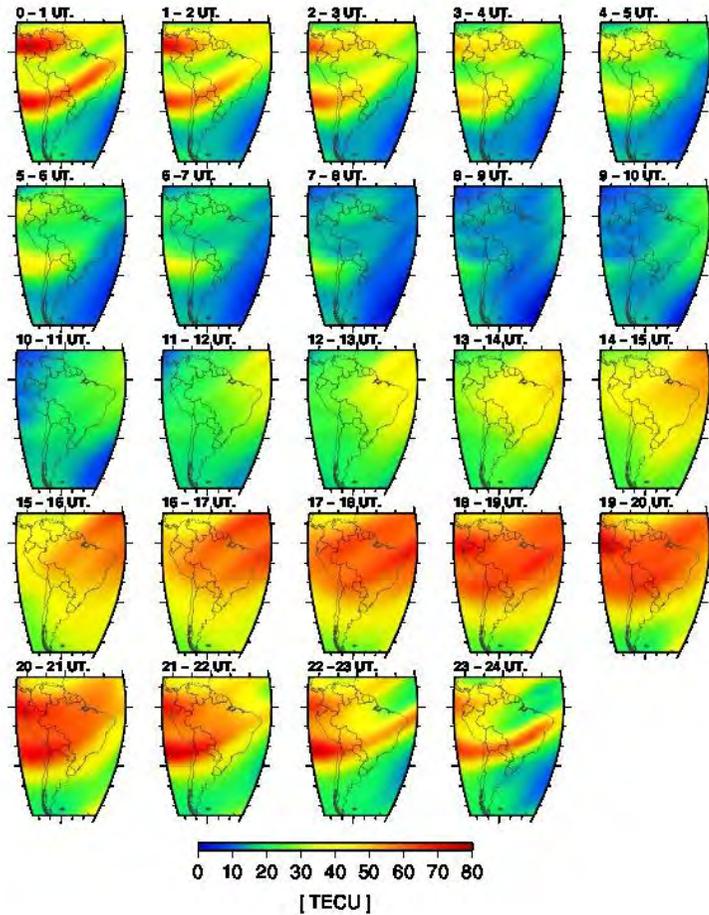


## Diferentes parámetros que caracterizan el estado de la ionósfera

- Densidad Electrónica (ED)
- Contenido Electrónico Total (TEC)
- Altura del pico ( $h_m F2$ )
- Densidad Electrónica del pico ( $N_m F2$ )

Variabilidad geográfica (latitud, longitud y altura) y temporal (horaria, estacional, ciclo solar, irregularidades).

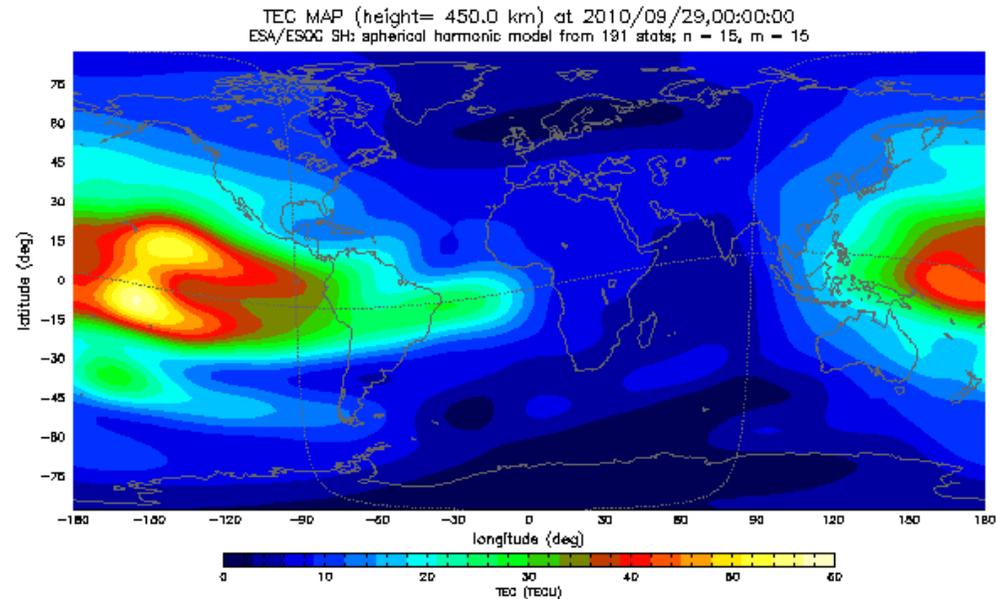
LPIM REGIONAL IONOSPHERE DAY:278, YEAR: 2012



## Ejemplos de mapas de TEC

Globales (p. ej.: IGS (ESOC), desde 1998)

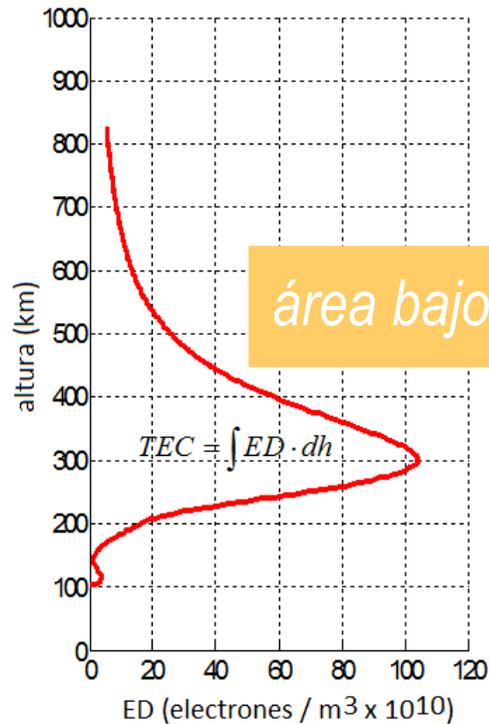
Regionales (p. ej.; SIRGAS, desde 2005)



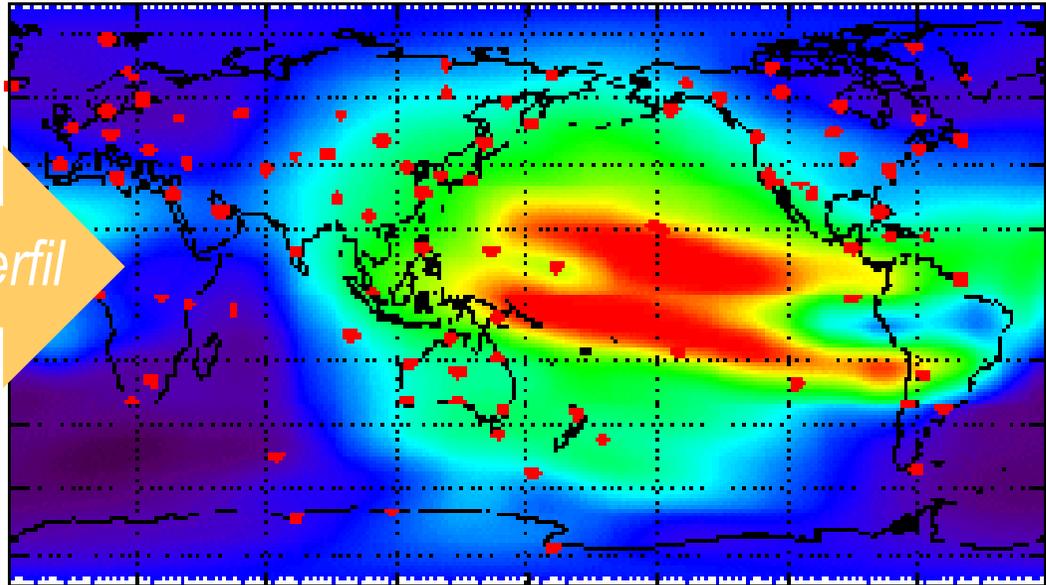
Mapas 3-D (latitud – longitud – altura – tiempo)

## Limitación de las mediciones GNSS obtenidas desde la tierra

Son sensibles al Contenido Electrónico Total (TEC) pero son insensibles a la forma en que se distribuye la Densidad Electrónica (ED) con la altura.



área bajo el perfil

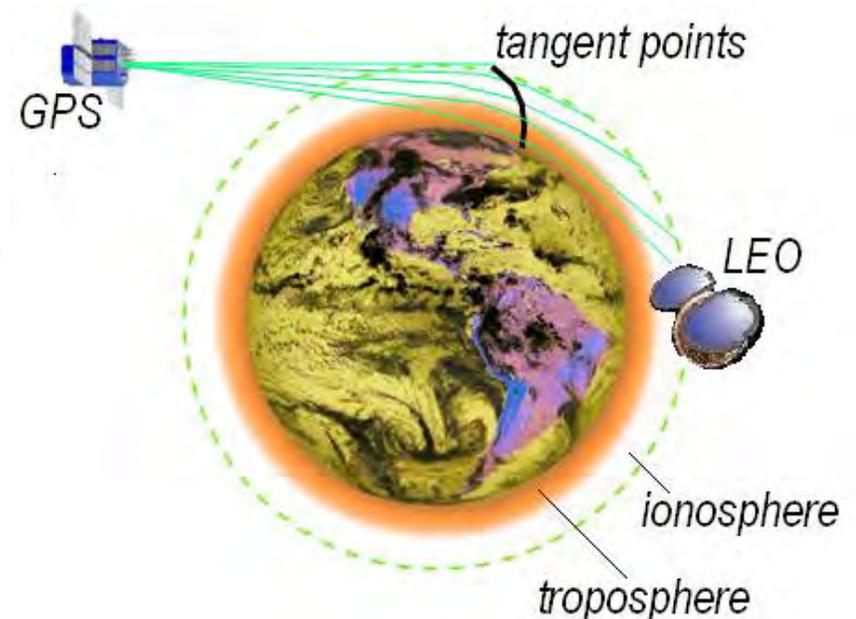
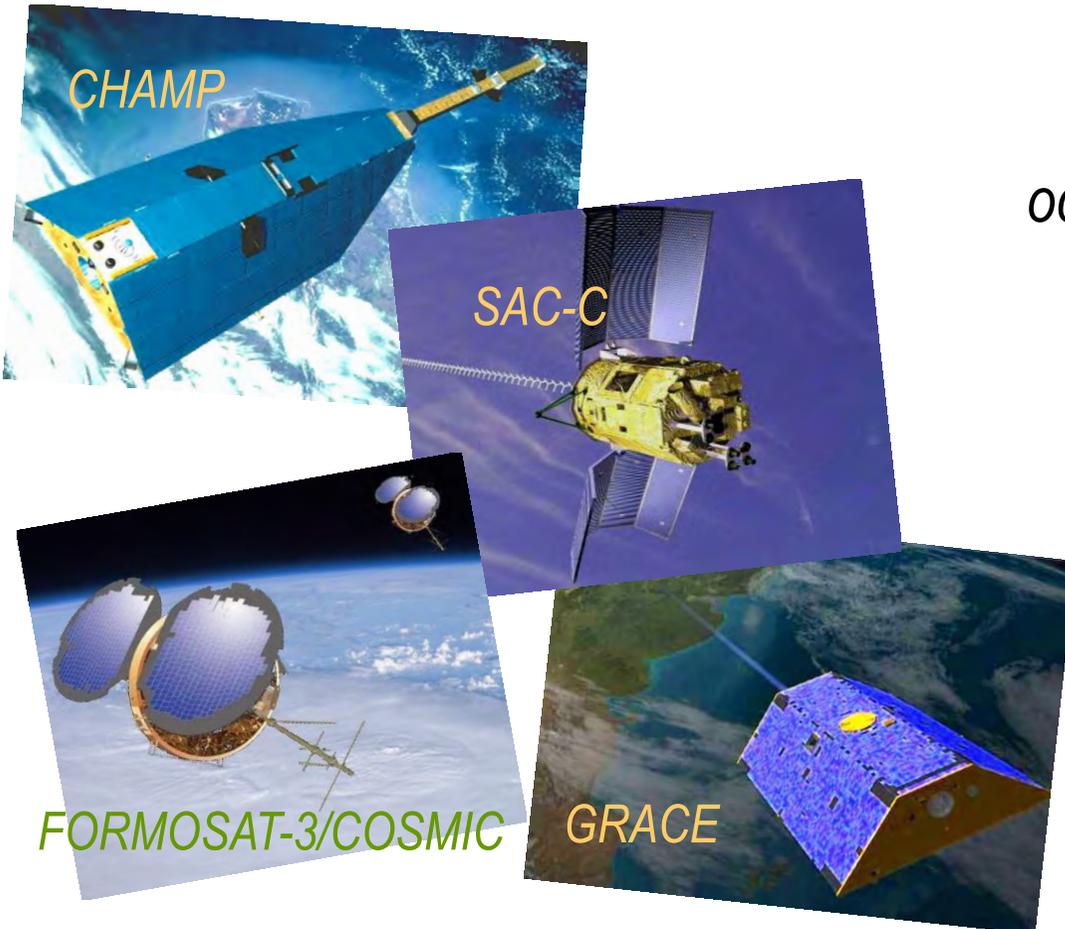


Tomado de JPL-NASA

## Receptores GPS en el espacio

En 1995 comenzó a aplicarse al estudio de la atmósfera neutra y de la ionosfera la técnica de radio-ocultación basada en receptores GPS volando a bordo de satélites de baja altura (LEO ~600 – 800 km).

Actualmente, esos satélites proporcionan más 2500 radio-ocultaciones globalmente distribuidas por día

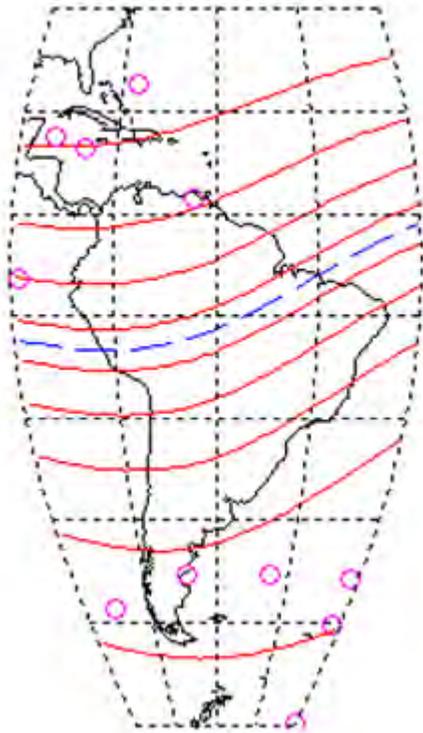


***Distribución diaria de las mediciones de 71 estaciones SIRGAS-CON  
15 de diciembre de 2011 UT 18 - 20***

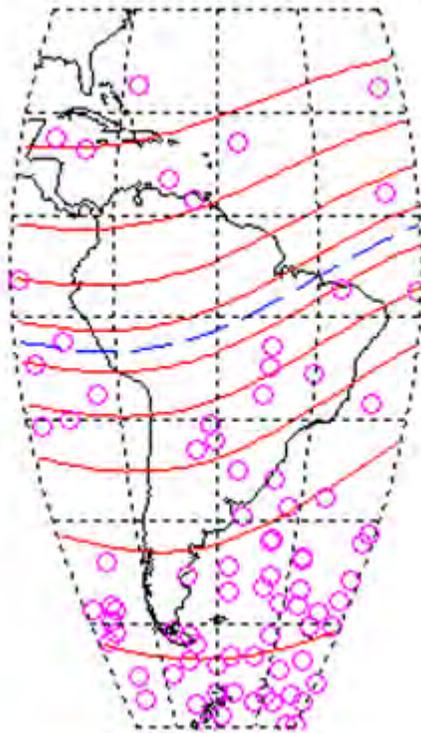


**Distribución diaria de las mediciones LEO**  
**Diciembre de 2011  $h = 350$  km UT 18 - 20**

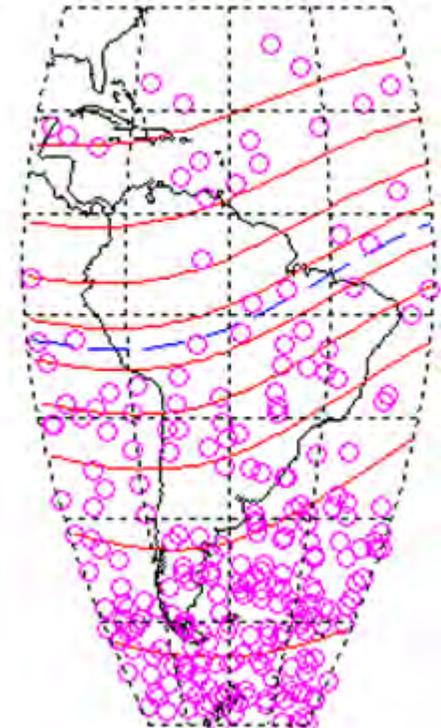
DoY 335 UT 18-20



DoY 345 - 355 UT 18-20



DoY 335 - 365 UT 18-20



## ¿Qué aprendimos?

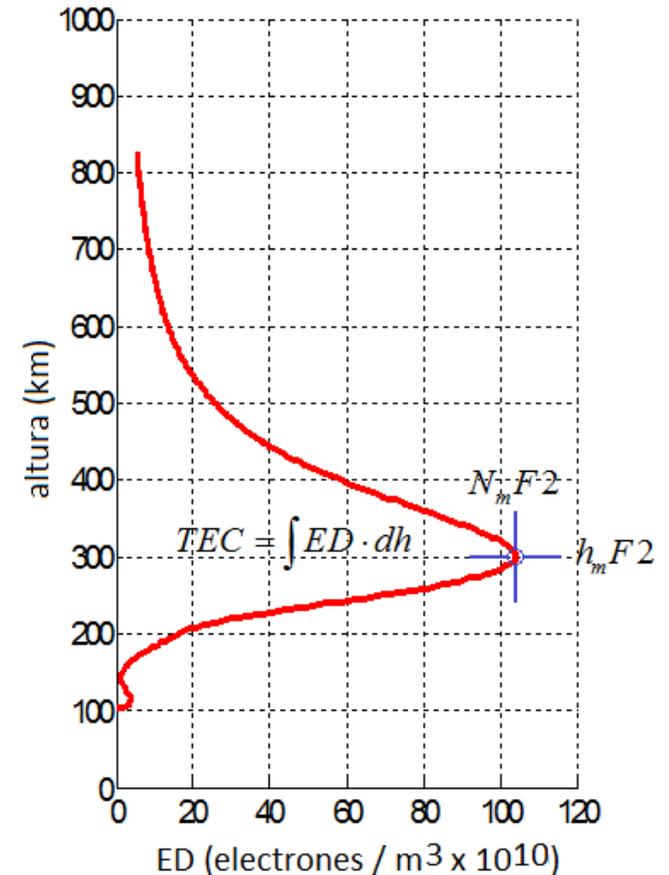
Las mediciones SIRGAS-CON:

- ❑ caracterizan la variabilidad de la ED con la longitud y con la latitud, pero no con la altura;
- ❑ con poco tiempo de medición se logra una buena cobertura regional.

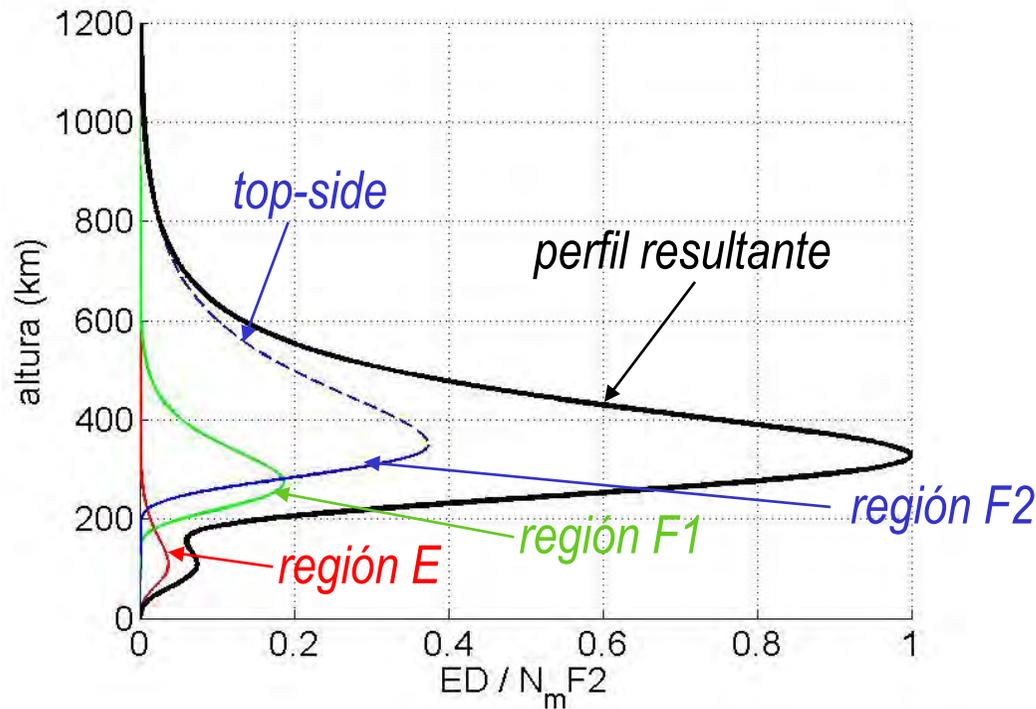
Las mediciones LEO:

- ❑ caracterizan la variabilidad de la ED con la altura, pero no con la latitud o la longitud;
- ❑ se requieren muchos días para lograr una buena cobertura regional.

El modelo SIRGAS combina ambos tipos de mediciones para determinar la altura del pico ( $h_m F2$ ) con resolución temporal media mensual y la densidad electrónica del pico ( $N_m F2$ ) con resolución temporal horaria.



## Modelo de la variación de la Densidad Electrónica con la altura (perfil vertical)



Los parámetros de las capas E y F1 y del top-side se calculan usando modelos.

Los de la capa F2 se determinan con las mediciones

LEO ( $hmF2$ ) y SIRGAS-CON ( $NmF2$ ) y usando modelos ( $HF2$ )

SIRGAS modela el perfil vertical mediante la superposición de 4 capas 'Chapman' que representan a las regiones E, F1, F2 y al perfil de tope (top-side).

Cada capa está caracterizada por 3 parámetros:

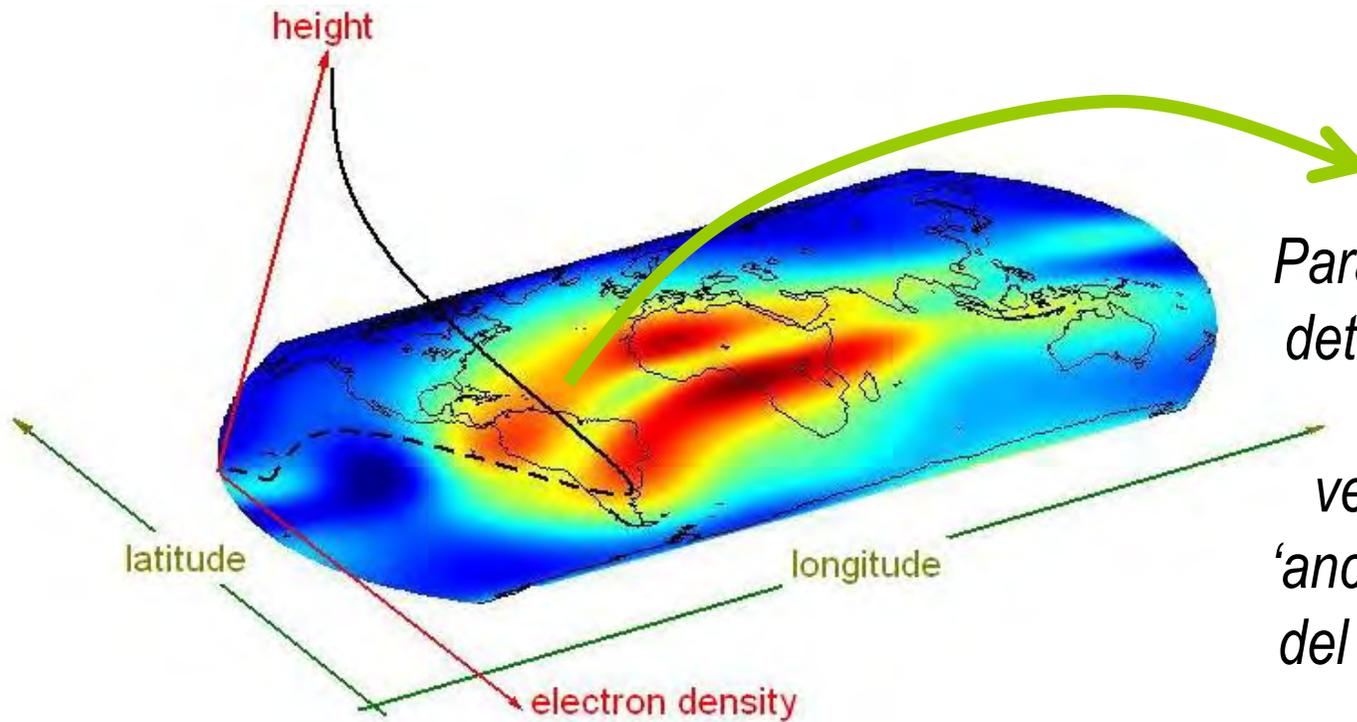
$$ED(h) = ED_{max} \cdot e^{k \cdot (1 - z - e^{-z})}$$

altura del pico de la región

$$z = \frac{h - h_{max}}{H}$$

ED del pico de la región

altura de escala de la región



## Resumiendo...

Para una longitud y latitud determinada, a un tiempo determinado, el perfil vertical de SIRGAS está 'anclado' a los parámetros del pico F2 en ese lugar y en ese momento.

La variación de los parámetros del pico F2 con la longitud y la latitud se modela mediante colocación por mínimos cuadrados:

- ❑ para  $hmF2$  se construyen mapas medios mensuales en intervalos de 2 horas (12 mapas por mes) usando las mediciones LEO;
- ❑ para  $NmF2$  se construyen mapas diarios en intervalos de 2 horas (12 mapas por día) usando las mediciones SIRGAS-CON.

WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN  
DER LEHRSTÜHLE FÜR GEODASIE, PHOTOGRAMMETRIE UND  
KARTOGRAPHIE AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HANNOVER

Nr. 63

Berechnung regionaler Geoidundulationen  
durch gravimetrisches Nivellement  
mit Prädiktion der Schwereanomalien

Von der Fakultät für Bauwesen  
der Technischen Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Hermann Drewes

HANNOVER 1976

*A mi amigo Claudio  
para que aprende  
rápidamente mi idioma*

*Munau*

*A mi amigo Claudio  
para que aprende  
rápidamente mi idioma.*

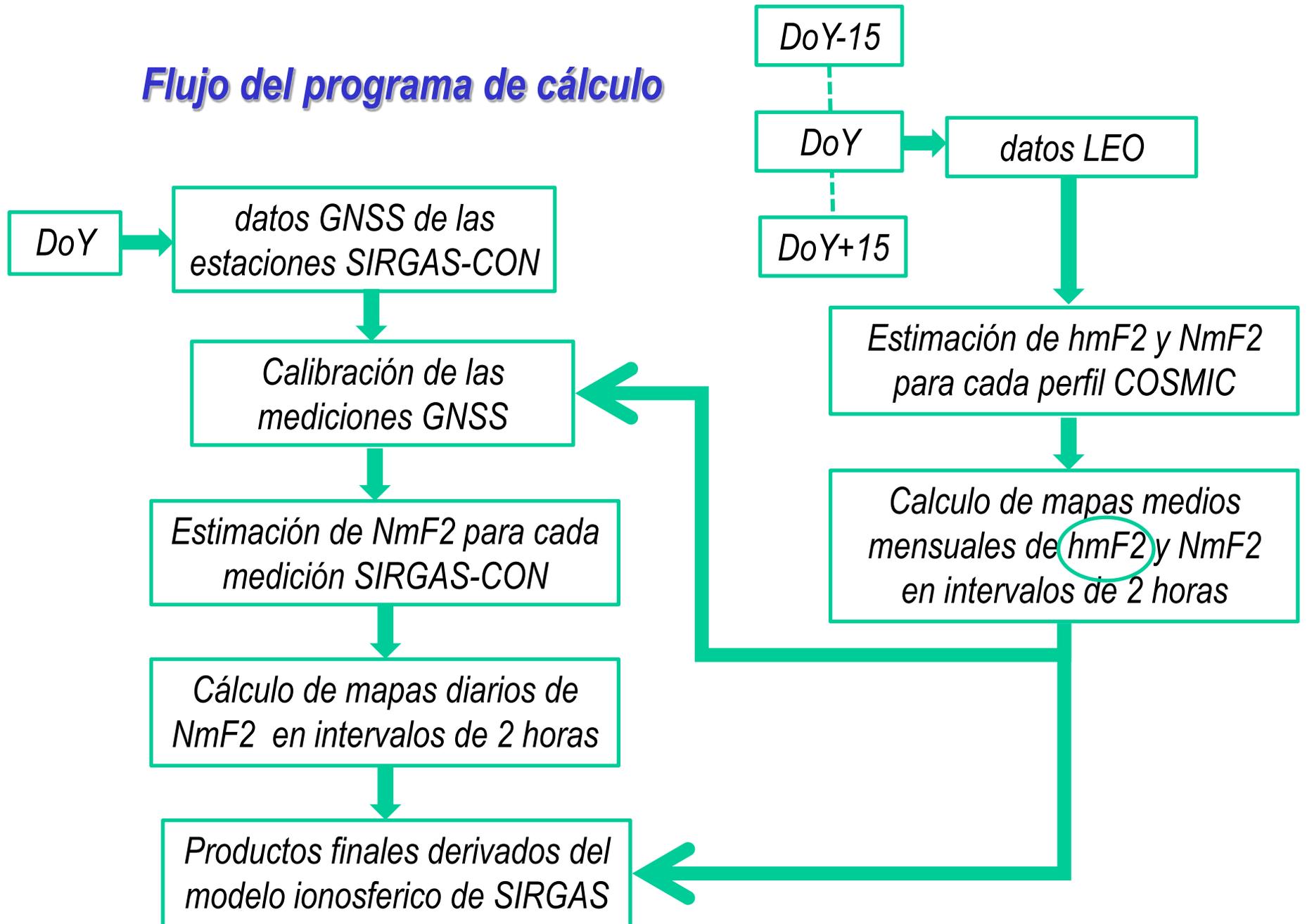
BEITEN

TOGRAMMETRIE UND

*Munau*

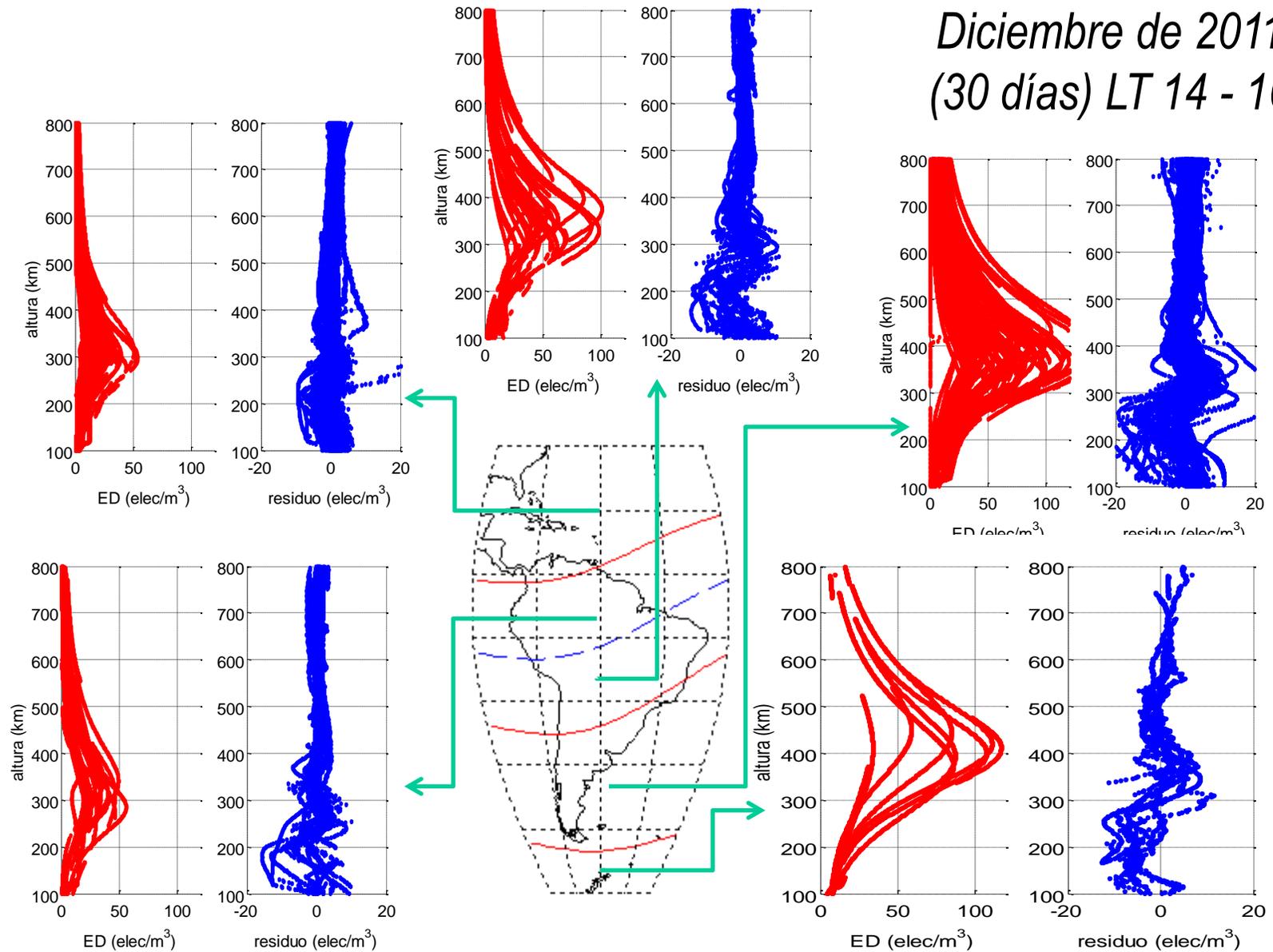
**Sobre la Colocación por  
Mínimos Cuadrados**

## Flujo del programa de cálculo



# Perfiles calculados y residuos de las mediciones LEO

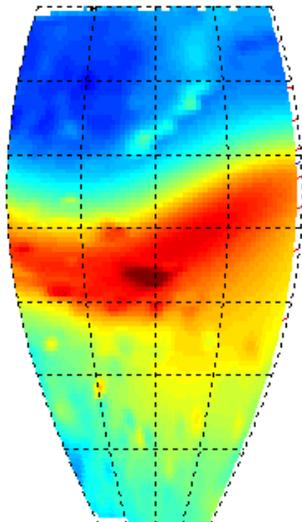
Diciembre de 2011  
(30 días) LT 14 - 16



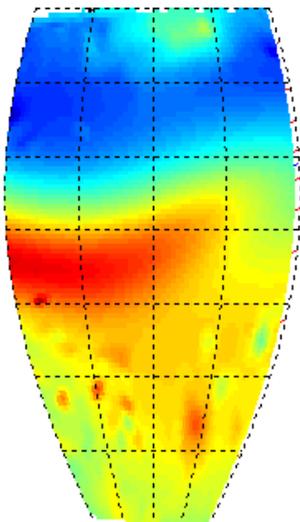
# Mapas medios mensuales de hmF2

Diciembre de 2011 (30 días) UT 18 - 20

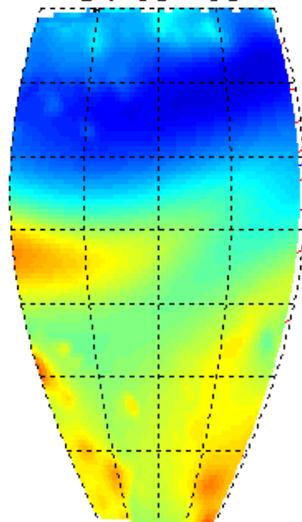
UT -01 - 01



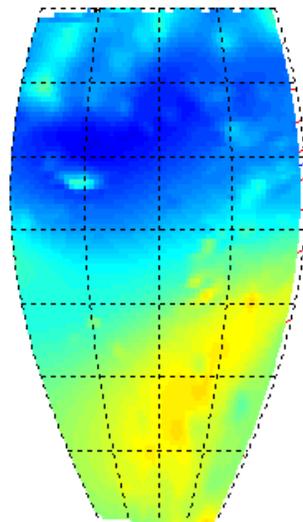
UT 01 - 03



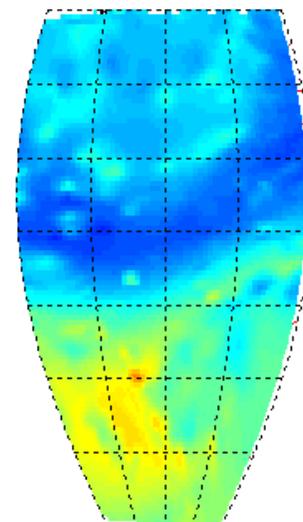
UT 03 - 05



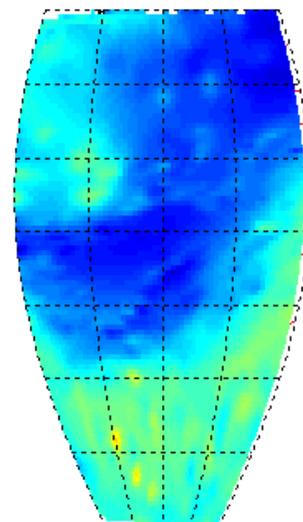
UT 05 - 07



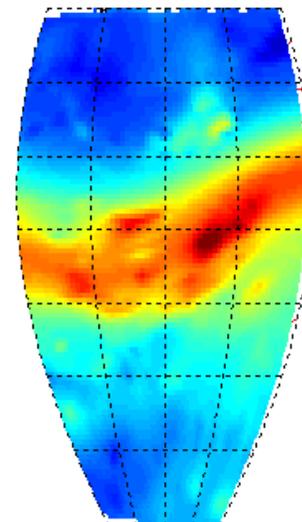
UT 07 - 09



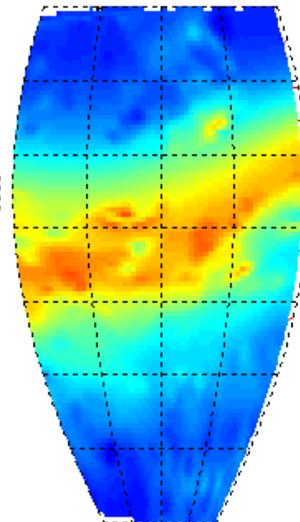
UT 09 - 11



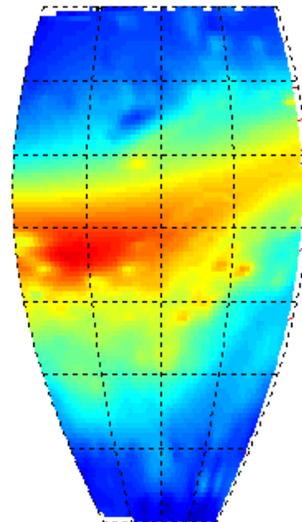
UT 21 - 23



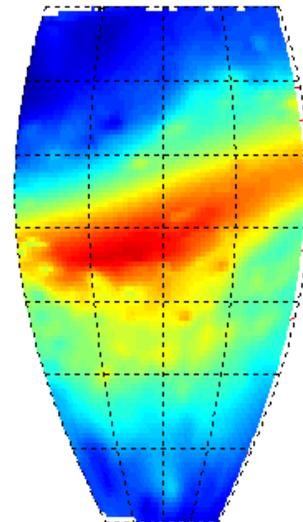
UT 19 - 21



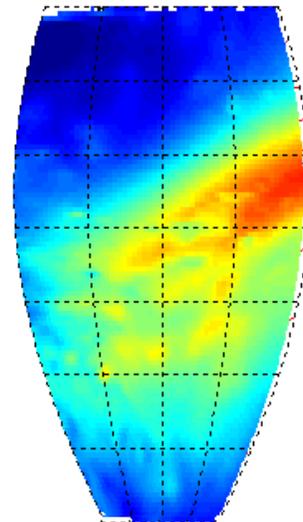
UT 17 - 19



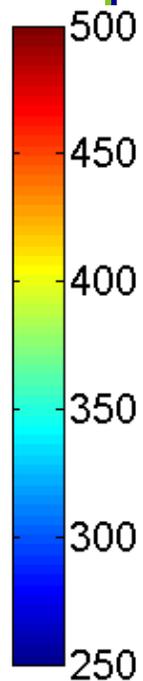
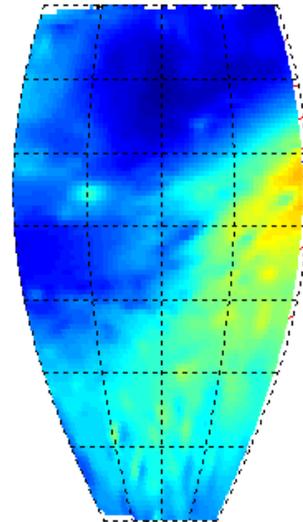
UT 15 - 17



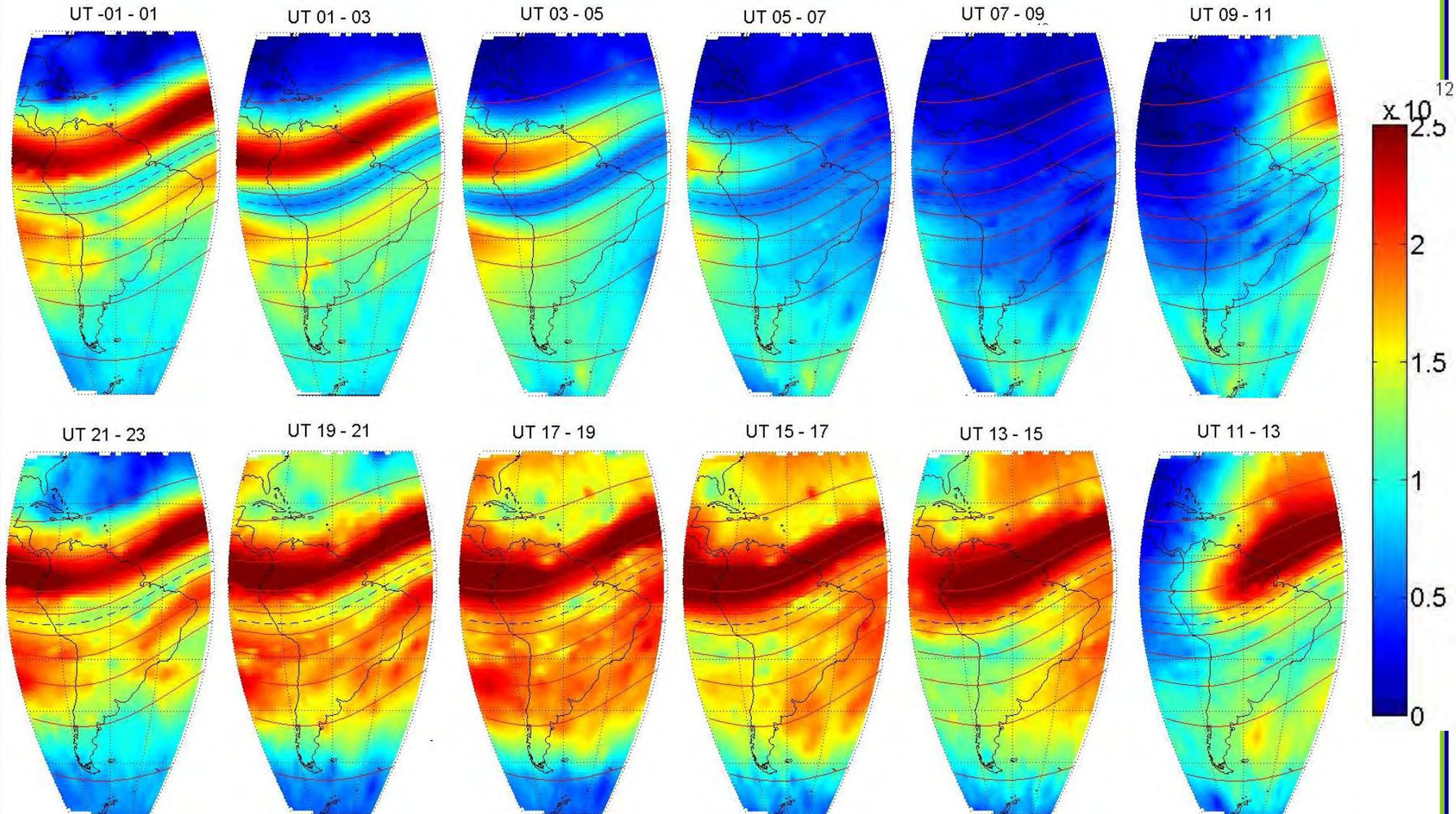
UT 13 - 15



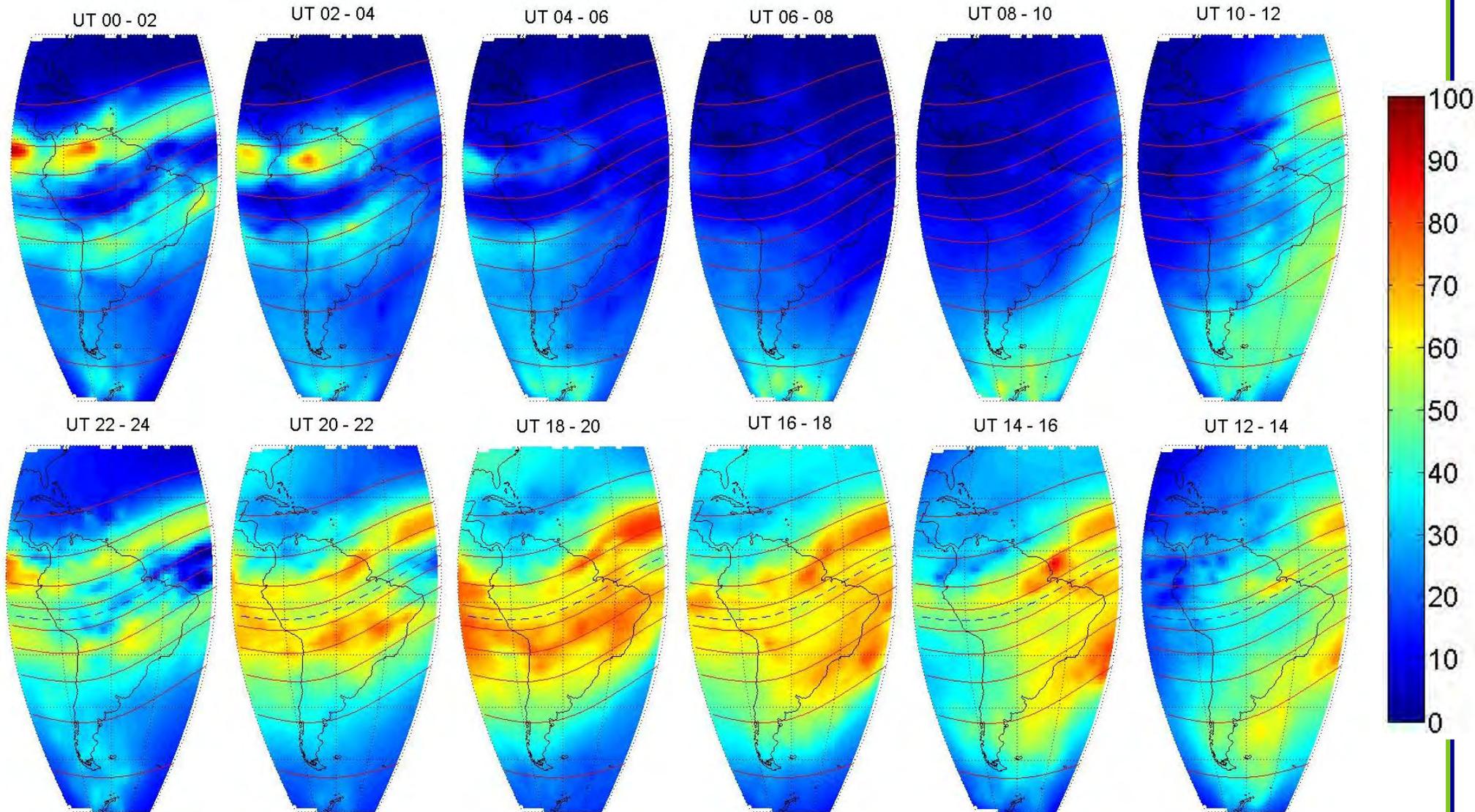
UT 11 - 13



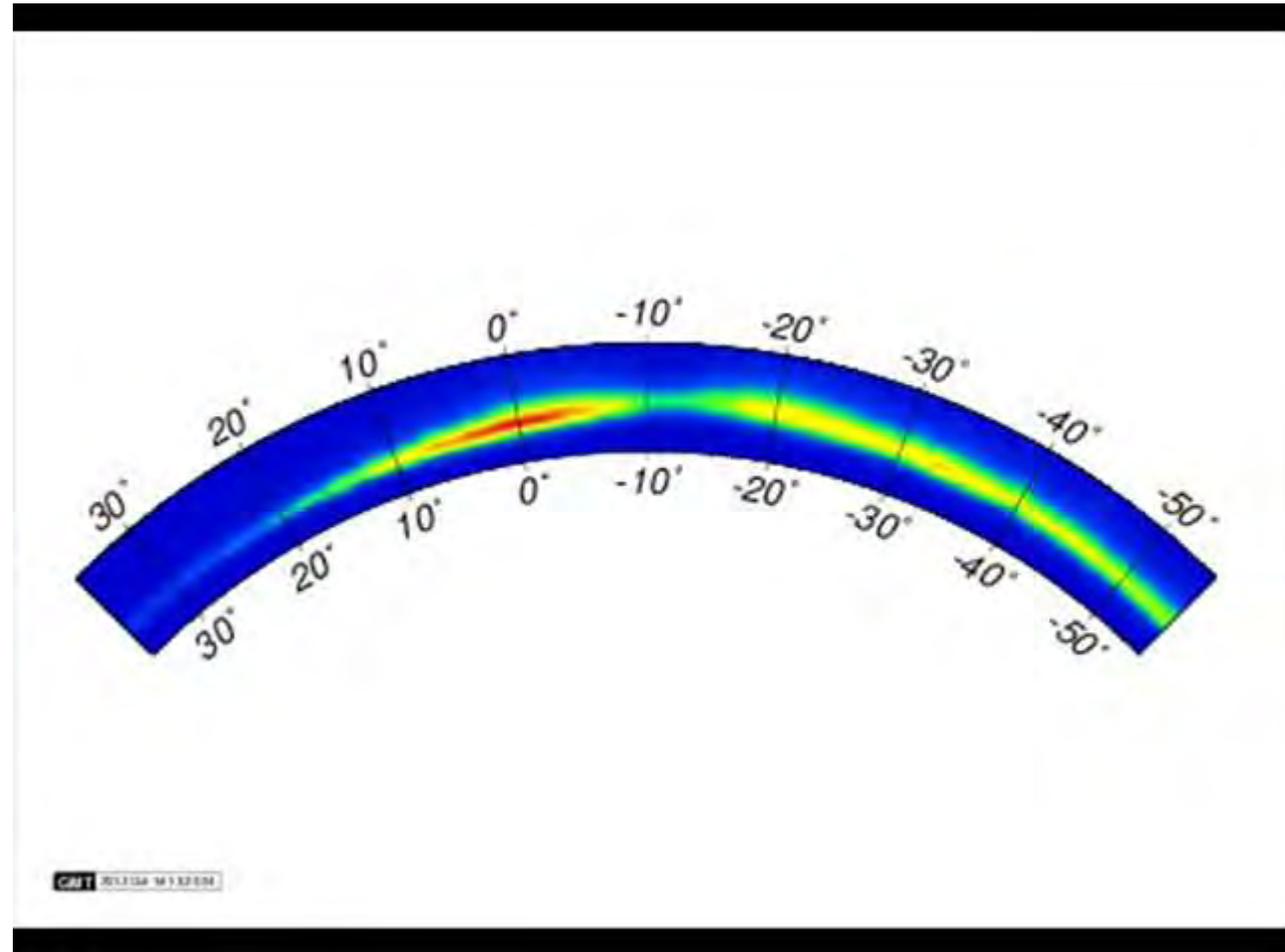
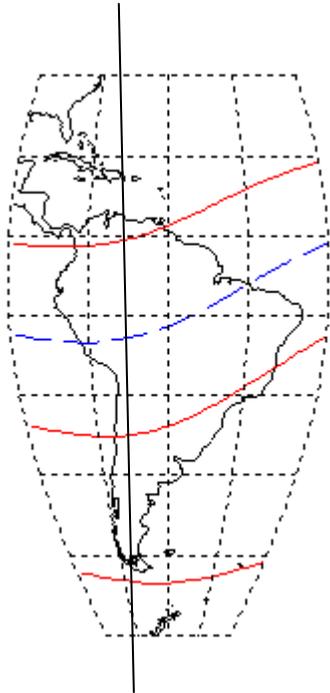
# Mapas diarios de NmF2 15 de diciembre de 2011



# Mapas diarios de TEC vertical 15 de diciembre de 2011



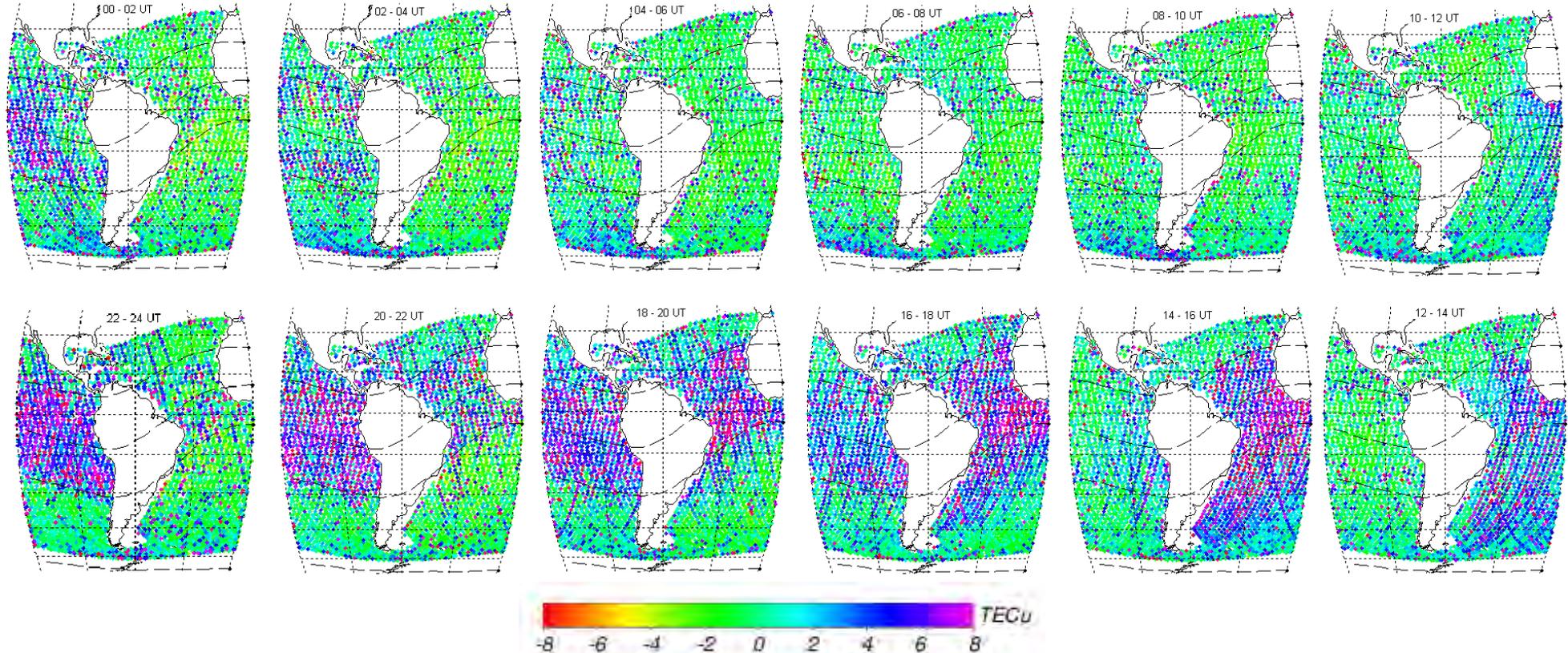
# **Anomalía Ecuatorial** $\lambda = 70^\circ W$ 15 de diciembre de 2011



## Validación

*Un año completo (2011) de comparaciones entre el TEC vertical calculado por SIIRGAS y estimado por la misión Jason:*

- ❑ *Diferencia sistemática SIRGAS – Jason = -1.3 TECu*
- ❑ *95% de las diferencias dentro de -1.3/ +6.8 TECu*



# Aplicación al posicionamiento puntual preciso en tiempo casi real

Utilizando las combinaciones libre de ionosfera de fases y de códigos:

$$P_c = \frac{f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad L_c = \frac{f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$L_c^i + c \cdot dt^i - \rho_0^i = -\mathbf{e}_0^i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) + c \cdot dt + M^i \cdot \delta T + B_c^i + \frac{c}{f_1 + f_2} \cdot w + \varepsilon_{L_c}^i$$

satélite:  $L_c^i$   
 observable:  $L_c^i$   
 vel. luz:  $c$   
 reloj SV:  $dt^i$   
 distancia calculada:  $\rho_0^i$   
 cos:  $\mathbf{e}_0^i$   
 directores:  $\mathbf{e}_0^i$   
 posición RX:  $\mathbf{r}$   
 posición RX aprox:  $\mathbf{r}_0$   
 func map:  $M^i$   
 reloj RX:  $dt$   
 tropo:  $\delta T$   
 ambigüedad:  $B_c^i$   
 wind-up:  $w$   
 ruido:  $\varepsilon_{L_c}^i$

$$P_c^i + c \cdot dt^i - \rho_0^i = -\mathbf{e}_0^i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) + c \cdot dt + M^i \cdot \delta T + \varepsilon_{P_c}^i$$

En cada época de medición:  $2 \times N_s$  observaciones ( $N_s = SV$  observados) y  $6 + N_s$  incógnitas:

- $\mathbf{r} \ dt$  posición y reloj del RX (4 incógnitas) → ruido blanco
  - $\delta T \ w$  tropósfera y wind-up (2 incógnitas) → random walk
  - $B_c^i$  ambigüedades ( $N_s$  incógnitas) → constantes si no ocurren saltos de ciclos o ruido blanco si ocurre un salto de ciclo
- filtro Kalman

## Mejorar la redundancia del sistema de ecuaciones de observaciones

De acuerdo con (Juan et al., Enhanced precise point positioning for GNSS users, Trans Geosc & Rem Sens, en prensa), *si somos capaces de calcular con un modelo sTEC precisos*, las combinaciones Melbourne-Wöbbena y libre de geometría agregan  $2 \times N_s$  nuevas ecuaciones  $N_s + 1$  nuevas incógnitas:

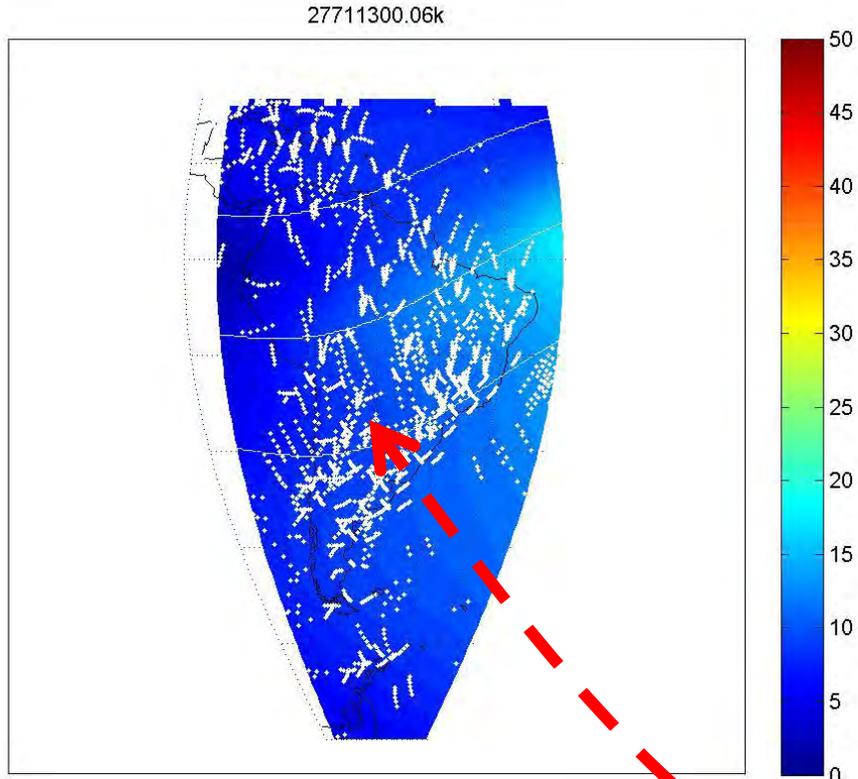
$$L_w - P_n = \frac{f_1 \cdot L_1 - f_2 \cdot L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \cdot P_1 + f_2 \cdot P_2}{f_1 + f_2} \quad L_I = L_1 - L_2$$

$$L_w^i - P_n^i + \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \beta^i = \overset{\text{retardo SV}}{B_w^i} - \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \overset{\text{ambigüedad}}{\beta} + \overset{\text{retardo RX}}{\varepsilon_{L_w P_n}^i}$$

$$L_I^i - \text{sTEC}^i = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1 \cdot f_2} \cdot (B_w^i - B_c^i) + c \cdot \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1 \cdot f_2} \cdot w + \varepsilon_{L_I}$$

# Caso de estudio

La operatividad en tiempo casi-real fue simulada en el laboratorio



transmisión al  
usuario de  
información  
ionosférica, de  
órbitas y relojes

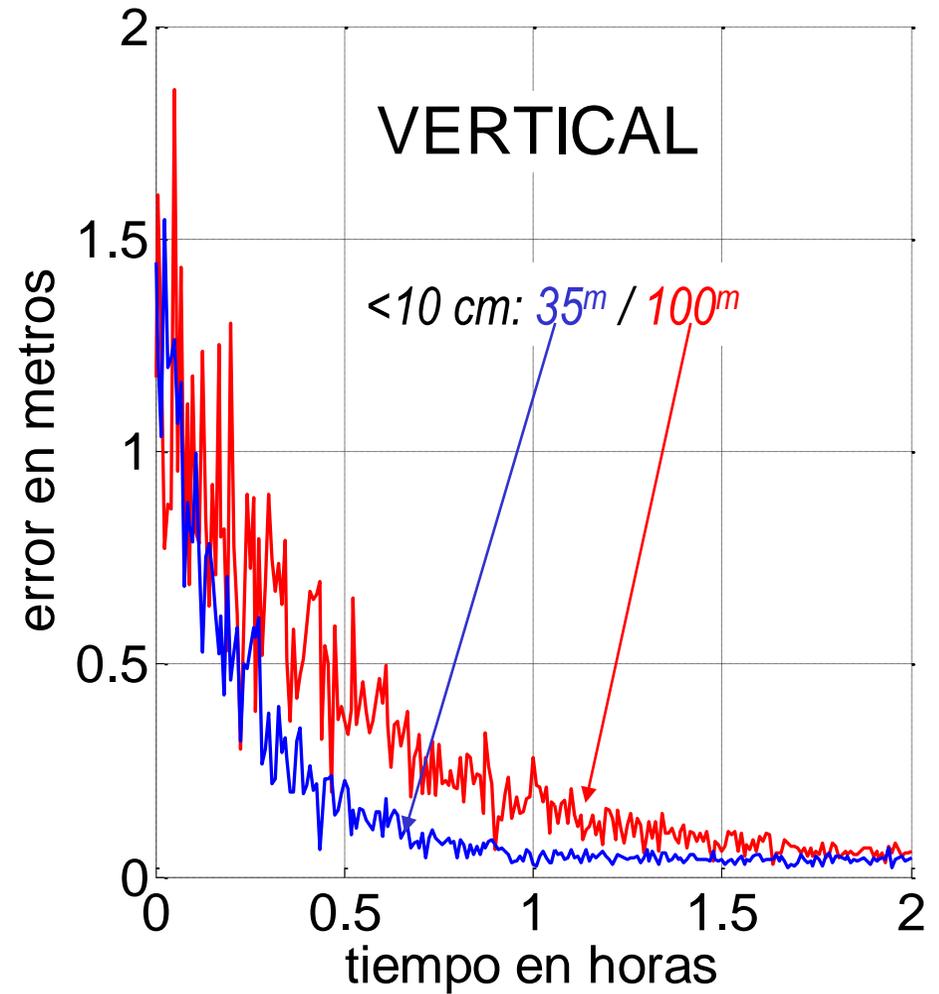
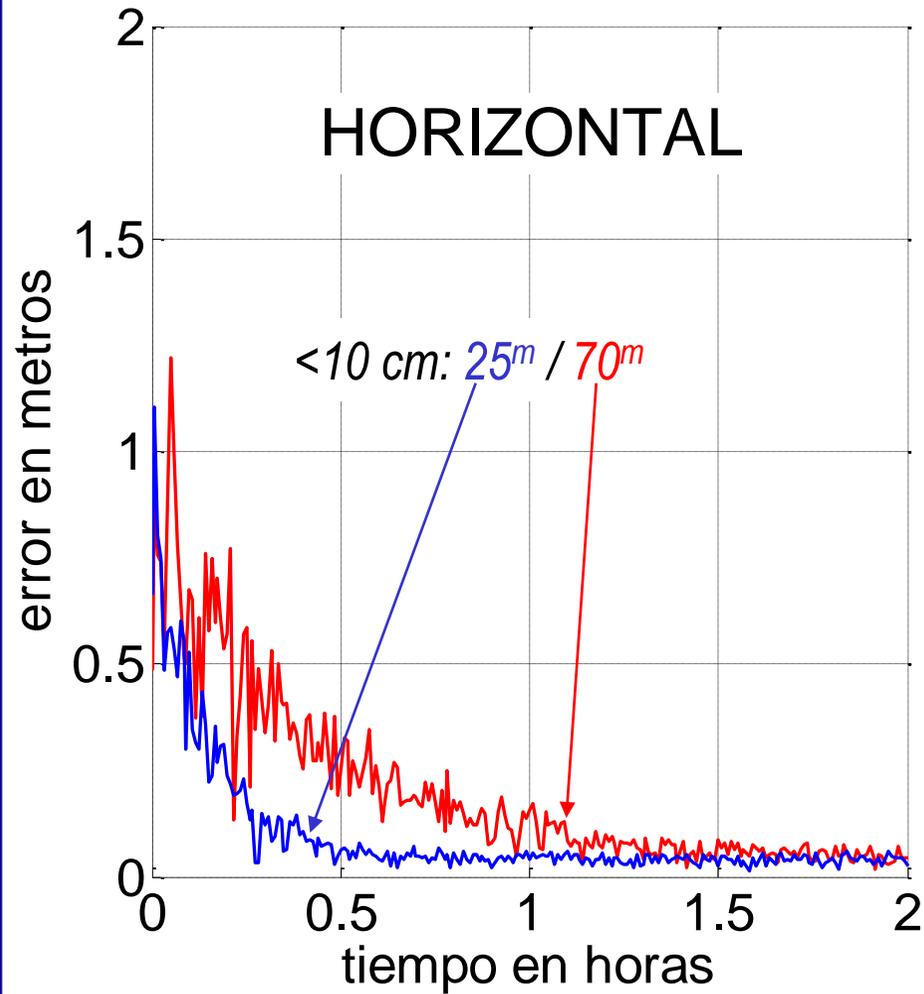
A red arrow pointing from the text towards the user illustration.

mapas ionosfericos de SIRGAS  
un mapa cada 5<sup>m</sup> durante los  
días 277 y 278 de 2010

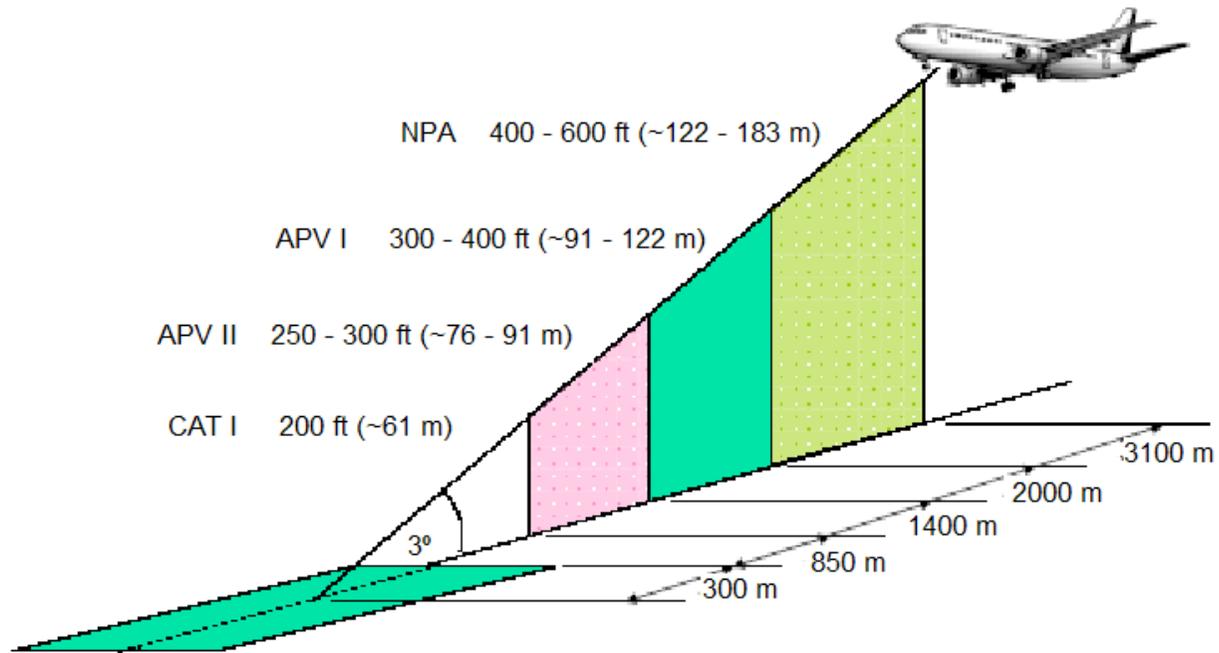
Usuario fijo o en movimiento  
(a 200 km de la estación  
SIRGAS más cercana)

# Resultados

48 intervalos de dos horas cada uno, se muestra solo un ejemplo: *clásico* vs. *innovativo*



## Requerimientos de la aviación civil



Fase	$E_H$	$E_V$	Alerta
ENR	3.7 km		5 <sup>m</sup>
TMA	0.74 km		15 <sup>s</sup>
NPA	0.22 km		10 <sup>s</sup>
APV I	220 m	20 m	10 <sup>s</sup>
APV II	16 m	8 m	6 <sup>s</sup>
CAT I	16 m	6-4 m	6 <sup>s</sup>

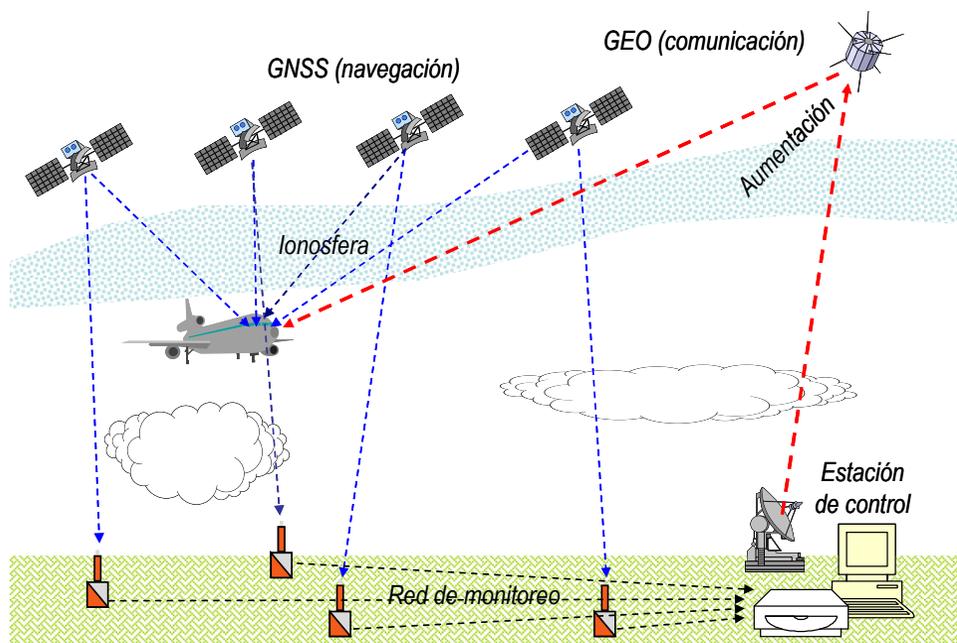
$$P(\varepsilon_V \leq E_V, \varepsilon_H \leq E_H) > 0.99999999$$

para una maniobra de aproximación de precisión, cuya duración típica es de 150 segundos.

## Sistemas de aumentación para aviación civil

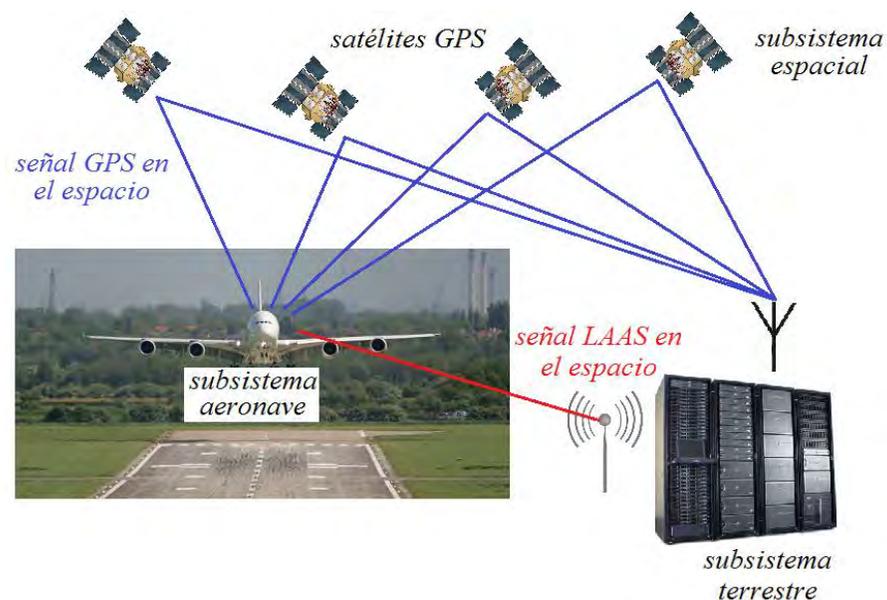
### SBAS (Satellite Based Augmentation System)

Garantiza precisión e integridad para la navegación en una región extensa (un continente)



### GBAS (Ground Based Augmentation System)

Permite la aproximación al aeropuerto y el aterrizaje de una aeronave





2006 – 2007: Estudio de factibilidad para un SBAS en la Argentina; Secretaría de Comunicaciones del Gobierno Argentino.

2007 – 2008: Estudio ionosfericos para un SBAS en América Latina y el Caribe; Organización de Aviación Civil Internacional.



2009 – 2010: Generación de escenarios ionosfericos para la extensión de EGNOS en América Latina y el Caribe; consorcio europeo liderado por GMV (España).

Desde 2011: desarrollo de un Prototipo de Ensayos de Vuelos Aumentados Localmente; Agencia Nacional de Aviación Civil (Argentina)



## **Comentarios finales**

*El Centro de Análisis de la Ionosfera de SIRGAS ha desarrollado un modelo para calcular mapas 4-D (latitud – longitud – altura – tiempo) de la Densidad Electrónica en la ionosfera.*

*Las comparaciones entre el TEC vertical calculado por SIRGAS y el estimado por la misión Jason (a lo largo de un año completo con actividad solar moderadamente alta) muestran resultados compatibles con el estado del arte.*

*SIRGAS se halla en condiciones de instalar un servicio permanente de productos ionosféricos diferenciados de los que entregan otros servicios regionales e internacionales:*

- Grillas 4-D de la densidad electrónica;*
- Mapas medios mensuales de la altura del pico F2;*
- Mapas diarios del contenido electrónico del pico F2;*
- Mapas diarios de Contenido Electrónico Total.*

**Muchas Gracias**