



Abril, 2025

# Tendencias a largo plazo en la ionosfera debido a forzantes antropogénicos y naturales

Ana G. Elias

Laboratorio de Ionosfera, Atmósfera Neutra y Magnetosfera (LIANM), Facultad de Ciencias Exactas y  
Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT)

Instituto de Física del NOA - INFINOA (CONICET – UNT)



## **Variabilidad ionosférica y de la atmósfera superior:**

- cambios regulares (diarios, estacionales, actividad solar)
- variaciones irregulares, transitorias
- tendencias a largo plazo



**Posibles forzantes de  
tendencias en la  
atmosfera superior  
(ionosfera)**

- ✓ Aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, CO<sub>2</sub>
- ✓ Cambios a largo plazo en la actividad solar
- ✓ Cambios a largo plazo en la actividad geomagnética
- ✓ Variaciones seculares del campo magnético de la Tierra

## Por qué estudiar tendencias en la atmósfera superior ??

- ✓ La termosfera es el medio en el que operan muchos satélites y donde orbita el escombro espacial, cuya vida orbital depende de la densidad de la termosfera.
- ✓ La propagación de las señales de GPS y comunicaciones en radiofrecuencias son afectadas por la ionosfera, de manera que cambios en estas alturas afectarían también las tecnologías basadas en satélites que son cada vez más importantes para la vida moderna.
- ✓ La ionosfera, es parte fundamental del entorno del clima espacial y del "space weather", cumpliendo un papel crucial al modular el circuito electrodinámico global, acoplarse con la magnetosfera y actuar como un medio clave para la comunicación, sondeo y navegación. Por lo tanto, resulta esencial entender su variabilidad en todas las escalas temporales incluyendo las tendencias a largo plazo.
- ✓ Al igual que en el caso de la troposfera, los científicos que estudian la atmósfera superior buscan cuantificar y entender la causa de las tendencias de largo plazo (sobre todo las asociadas al efecto antropogénico), de manera que la sociedad pueda mitigar los cambios que puedan resultar perjudiciales.

# Estimación de variaciones a largo plazo en la ionosfera y detección de sus forzantes

## Teoría

**física, modelos** (i.e. GCMs que resuelve numéricamente las ecuaciones fundamentales que describen la conservación de la masa, energía, momento, etc.) seguido de **Pruebas experimentales**

## Experimento

**estadística** (análisis de datos experimentales usando herramientas estadísticas como FFT, wavelets, correlaciones, SSA) seguido de una **“explicación” de los resultados**

Una de las complicaciones:

La respuesta puede cambiar con el tiempo

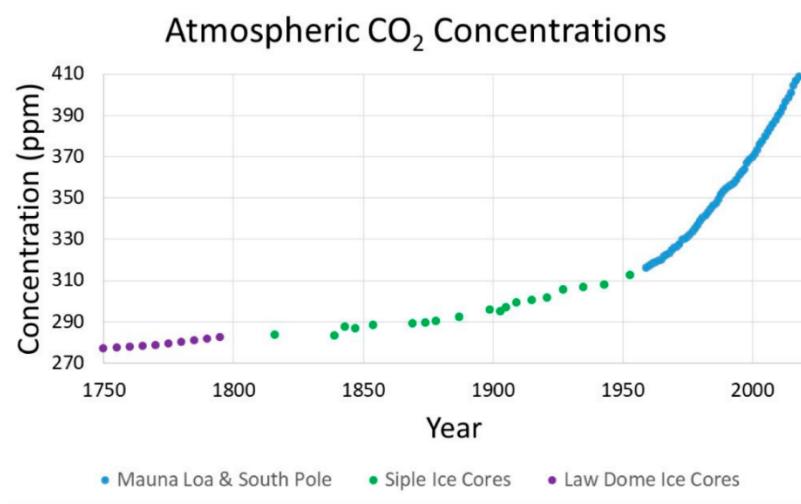
- ✓ Interacción con otras fuentes de variación
- ✓ Cambios en el medio ambiente

## Algo importante para el análisis experimental de tendencias en la atmósfera superior:



- Se requieren series temporales largas (al menos 2 o 3 ciclos solares, entre ~20 y 30 años)
- Es necesario que las series de mediciones sean consistentes y homogéneas
- Los cambios instrumentales y las fallas deben estar bien documentados y corregidos
- Puede haber cambios en el entorno, en las condiciones de medición, ...
- El efecto del "envejecimiento" de los instrumentos, especialmente en mediciones a bordo de satélites, debe ser corregido cuidadosamente

# Forzante antropogénico



O'Connor, J. P. (2020). Modeling of Atmospheric Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Concentrations as a Function of Fossil-Fuel and Land-Use Change CO<sub>2</sub> Emissions Coupled with Oceanic and Terrestrial Sequestration. *Climate*, 8(5), 61. <https://doi.org/10.3390/cli8050061>

- ✓ Las emisiones de gases de efecto invernadero afectan la troposfera y parecen ser el principal responsable del aumento de temperatura en superficie en las últimas décadas, afectando directamente la vida del ser humano.
- ✓ Estas emisiones afectan también la atmósfera media y superior: estratosfera (~10–50 km), mesosfera (~50–90 km), termosfera (~90–1000 km), y ionosfera. Es decir que afectan a la atmósfera en toda su extensión !!

Estudio pionero

Roble and Dickinson (1989), How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and lower thermosphere?, *Geophys. Res. Lett.* **16**, 1441–1444.

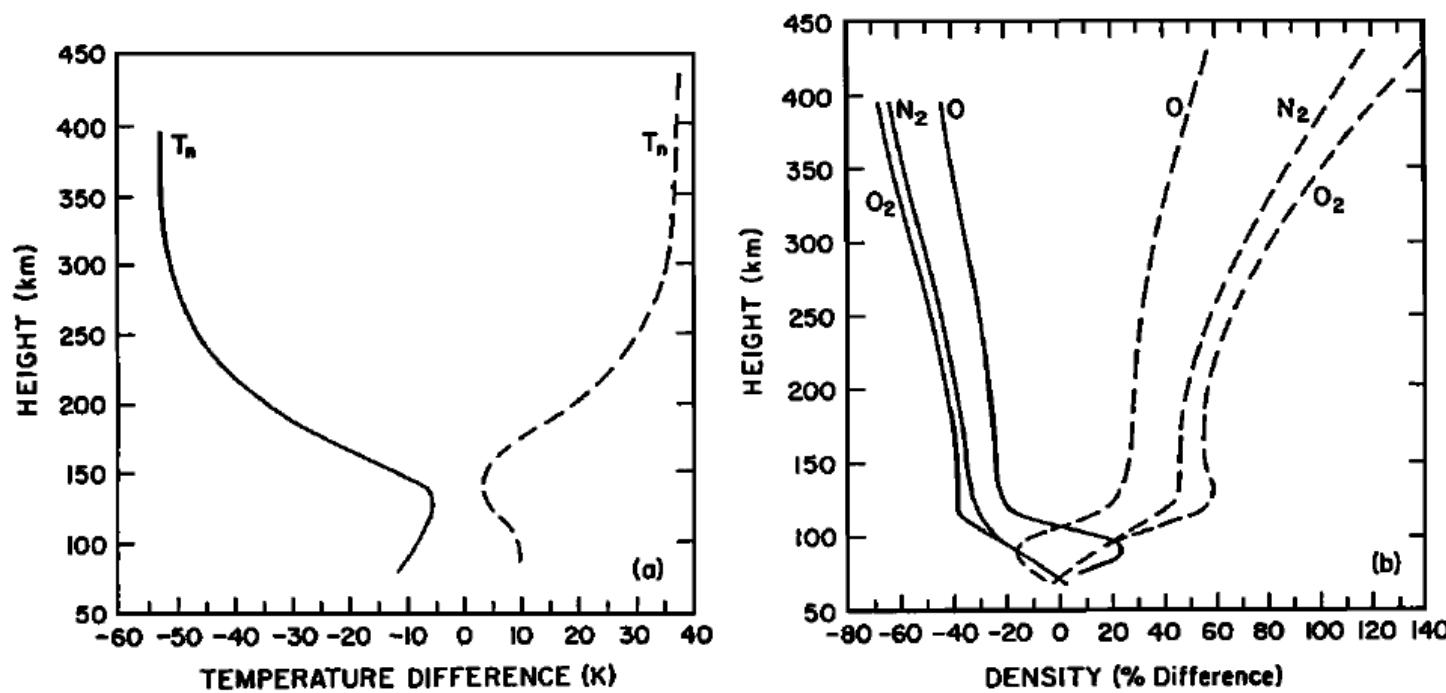


Fig. 2. Calculated (a) neutral gas temperature difference profile from the base case for the case where trace gases are doubled (solid lines) and halved (dashed lines), (b) density difference profiles (%) for O, O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> for the case where trace gases are doubled (solid lines) and halved (dashed lines).

Para un 100% de aumento en CO<sub>2</sub>:  
enfriamiento de 30-40 K en la termosfera  
disminución de 20-40 % en la densidad del aire  
descenso en hmF2 de ~15 km  
disminución en foF2 menor a 0.5 MHz

[combinando los resultados de Roble & Dickinson (1989) con los de Rishbeth (1990) y Rishbeth & Roble (1992)]

Rishbeth, H. (1990). A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet Space Sci.* **38**, 945–948.

Rishbeth, H., Roble, R.G. (1992). Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases - modelling of thermospheric and ionospheric effects. *Planet Space Sci.* **40**, 1011-1026.

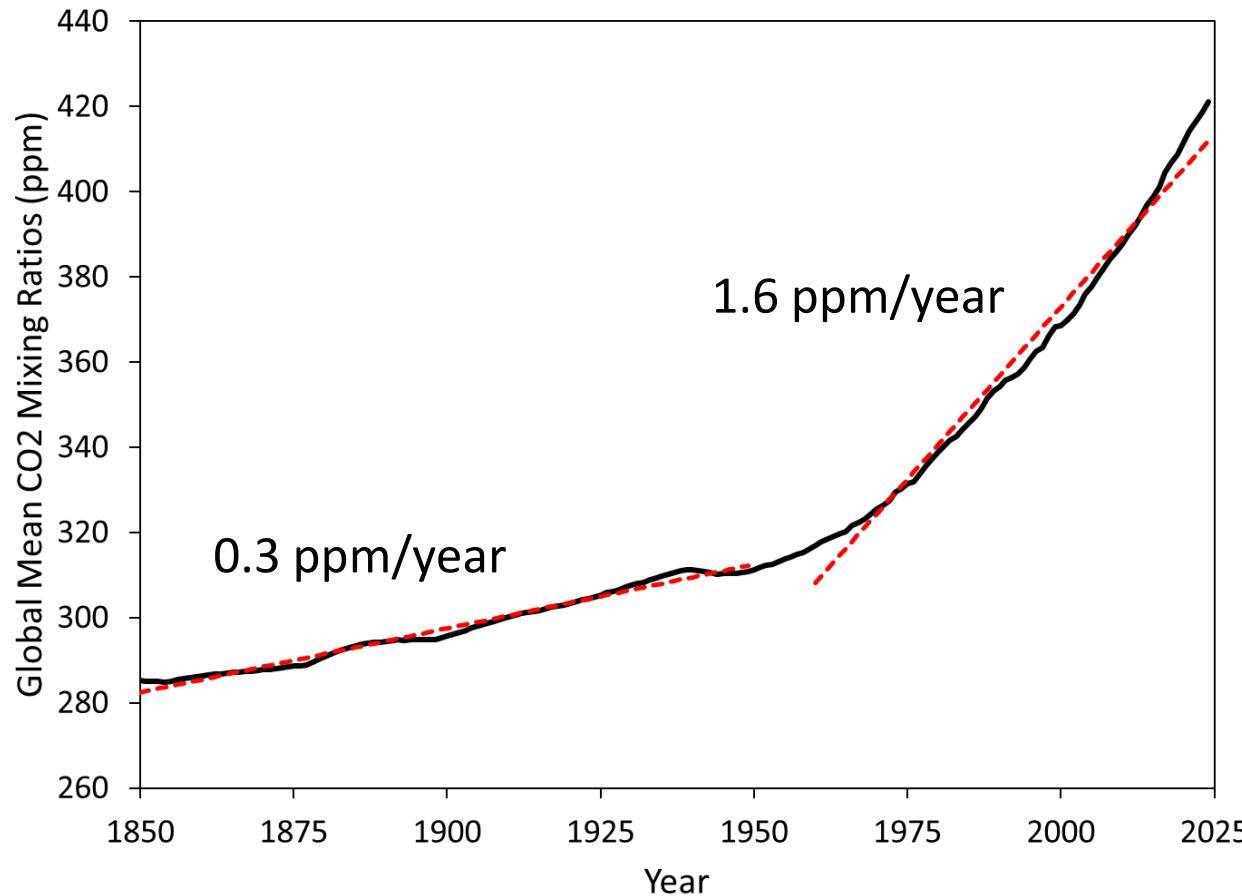
# Por qué el efecto antropogénico en la atmósfera superior resulta en un enfriamiento ?

- El CO<sub>2</sub> absorbe y reemite radiación infrarroja a 15 μm.
- Cerca de la superficie, esto produce un calentamiento neto que se transmite al resto de la troposfera mediante convección.
- Por encima de la tropopausa, la mayor parte de la radiación infrarroja se pierde hacia el espacio, lo que genera un enfriamiento neto.
- Mlynczak et al. (2024) demostraron que, aunque se irradia la misma cantidad de energía con el tiempo, al aumentar los niveles de CO<sub>2</sub>, esto ocurre a una temperatura de equilibrio más baja.
- La conducción térmica también transporta energía desde la termosfera media y alta hacia la termosfera inferior, donde puede ser irradiada por el CO<sub>2</sub>.
- Cuando la termosfera inferior se enfría, el gradiente vertical de temperatura en la termosfera aumenta, lo que hace que la conducción de calor sea más eficiente; así, niveles elevados de CO<sub>2</sub> conducen indirectamente a una termosfera más fría en su conjunto.

Cnossen , I., Emmert, J.T., Garcia, R. , Elias, A.G., Mlynczak, M.G., Zhang, S.R. (2024). A review of global long-term changes in the mesosphere, thermosphere and ionosphere: A starting point for inclusion in (semi-) empirical models, *Adv. Space Res.*, 74, 5991-6011. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.10.005>

Mlynczak, M.G., Hunt, L.A., Garcia, R. et al. (2024). Energy conservation in the cooling and contracting upper mesosphere and lower thermosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL109757. <https://doi.org/10.1029/2024gl109757>

# Efecto antropogénico en la atmósfera superior debido al aumento en la concentración de gases de efecto invernaderos (principalmente CO<sub>2</sub>) - primera aproximación



Entre 1850 y 1950 el CO<sub>2</sub> aumentó 9% en 101 años (~0.1%/año)  
Entre 1960 y 2024 aumentó ~33% en 65 años (0.5%/año)

**Para un 100% de aumento en CO<sub>2</sub>:**  
enfriamiento de 30-40 K en la termosfera  
disminución de 20-40 % en la densidad del aire  
descenso en hmF2 de ~15 km  
disminución en foF2 menor a 0.5 MHz

**Para el cambio "real" de CO<sub>2</sub> desde 1960:**

**Para un 30% de aumento en CO<sub>2</sub>:**  
enfriamiento de 9 - 12 K en la termosfera  
disminución de 6 - 12 % en la densidad del aire  
descenso en hmF2 de ~4.5 km  
disminución en foF2 menor a 0.15 MHz

**Para un 0.5%/año de aumento en CO<sub>2</sub> :**  
enfriamiento de 0.15 - 0.2 K/año en la termosfera  
disminución de 0.1 - 0.2 %/año en la densidad del aire  
descenso en hmF2 de ~0.08 km/año  
disminución en foF2 menor a 0.003 MHz/año

# WACCM-X

Solomon, S. C., Liu, H.-L., Marsh, D. R., McInerney, J. M., Qian, L., & Vitt, F. M. (2018). Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change. *Geophysical Research Letters*, 45, 1567–1576.

⇒ para foF2, como  $NmF2 \propto foF2^2$

$$\frac{\delta NmF2}{NmF2} = 2 \frac{\delta foF2}{foF2}$$

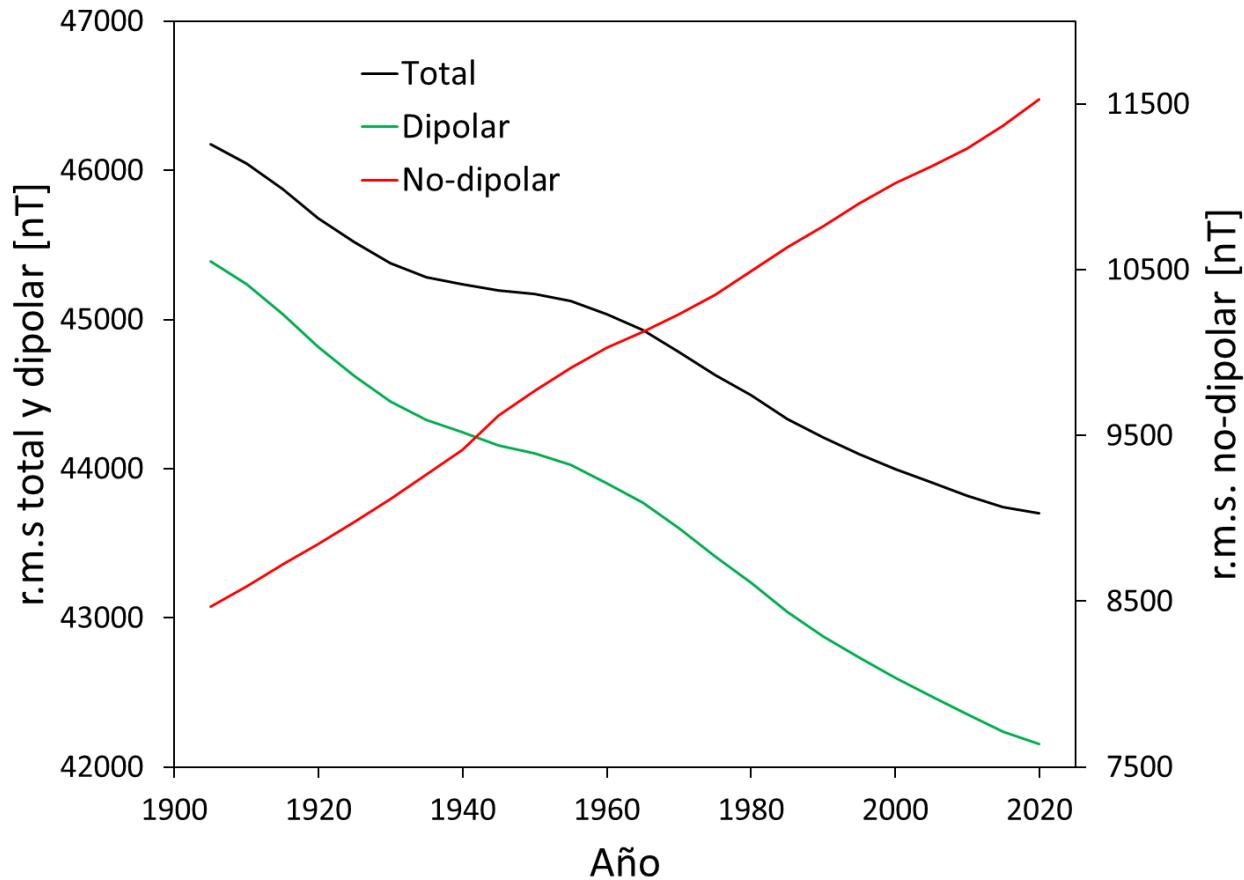
⇒ -1.2 %/década en NmF2 implica  
-0.06%/año en foF2

**Table 1. Model Inputs and Key Results**

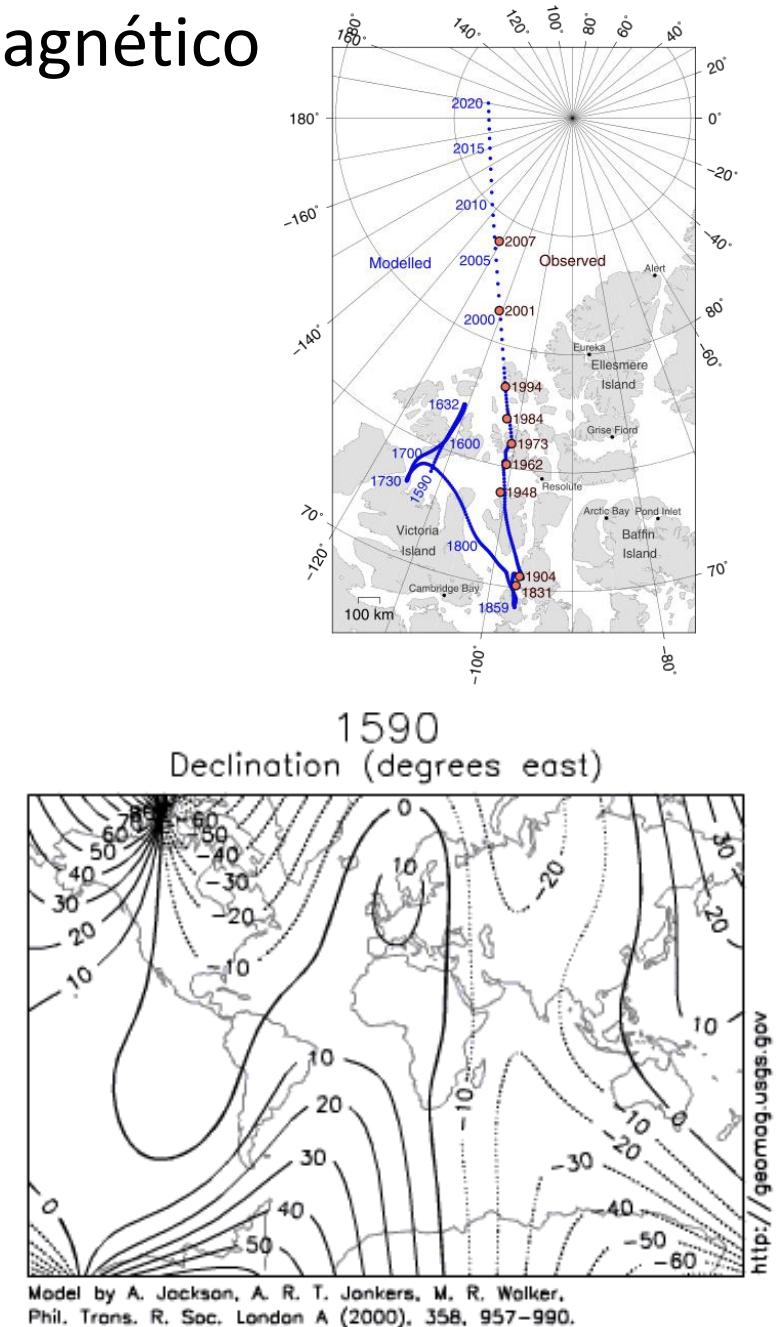
Inputs	1972–1976	2001–2005	Change per decade
$\langle CO_2 \rangle$ at surface	330 ppmv	375 ppmv	+16 ppmv
$\langle CH_4 \rangle$ at surface	1.44 ppmv	1.74 ppmv	+0.1 ppmv
$\langle CFC11 + CFC12 \rangle$ at surface	0.29 ppbv	0.79 ppbv	+0.2 ppbv
$F_{10.7}$ index	70	70	0
$K_p$ index	0.3	0.3	0

Results	1972–1976	2001–2005	Change per decade
$\langle T \rangle$ at surface	287.8 K	288.4 K	+0.2 K
$\langle T \rangle$ at 10 km (266 hPa)	225.8 K	226.9 K	+0.4 K
$\langle T \rangle$ at tropopause	204.2 K	204.5 K	+0.1 K
$\langle T \rangle$ at stratopause	262.9 K	259.6 K	-1.1 K
$\langle T \rangle$ at mesopause	193.1 K	191.0 K	-0.7 K
$\langle T \rangle$ at 400 km	697.9 K	689.9 K	-2.8 K
$\langle \rho \rangle$ at 400 km (mass density)	$0.584 \text{ ng m}^{-3}$	$0.518 \text{ ng m}^{-3}$	-3.9%
$\langle NmF2 \rangle$ (peak ion density)	$1.78 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$1.71 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	-1.2%
$\langle hmF2 \rangle$ (height of peak)	261.5 km	257.8 km	-1.3 km
$\langle Ti \rangle$ at $hmF2$ (ion temperature)	712.8 K	704.9 K	-2.7 K

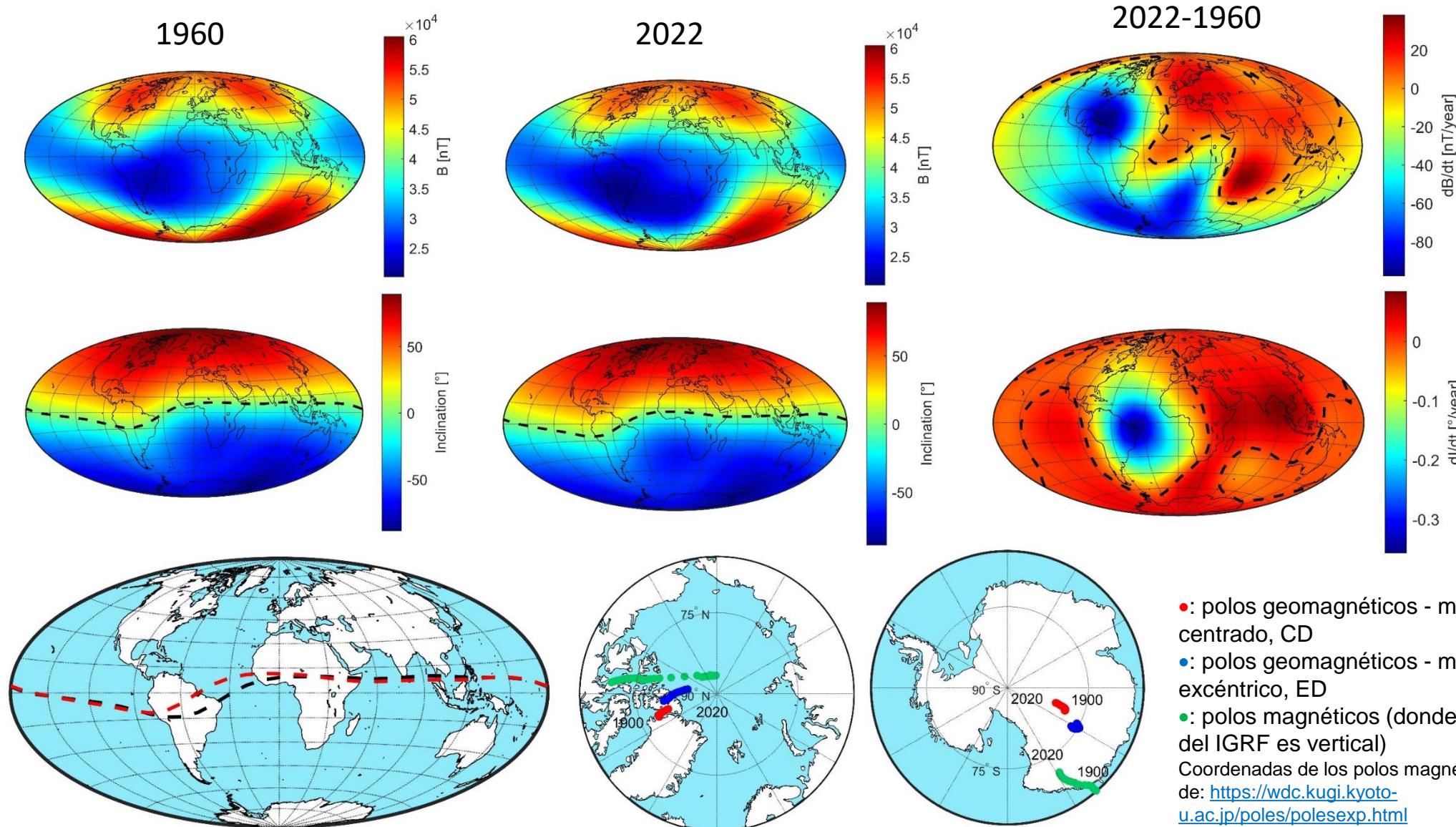
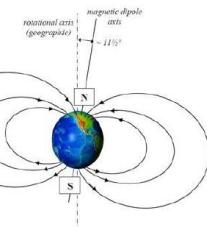
# Forzante natural: Variación secular del campo geomagnético



Variación secular del valor raíz cuadrático medio (r.m.s.) de la intensidad del campo geomagnético total (curva negra), de la componente dipolar (curva verde), y de las componentes no-dipolares (curva roja), estimada a partir de los coeficientes de Gauss del IGRF-13.



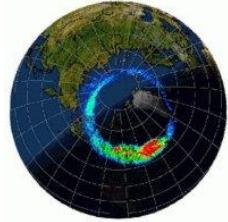
# Forzante natural: Variación secular del campo geomagnético



# Las variaciones del campo magnético de la Tierra tienen muchos efectos ...

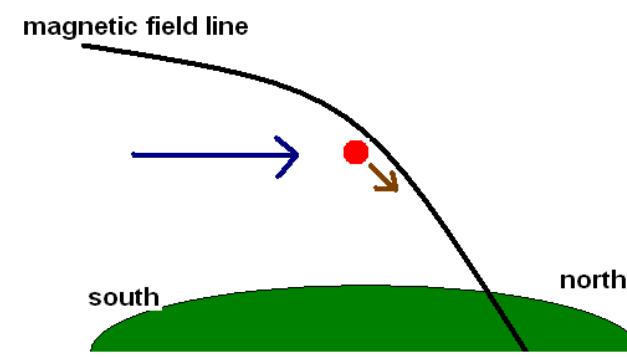
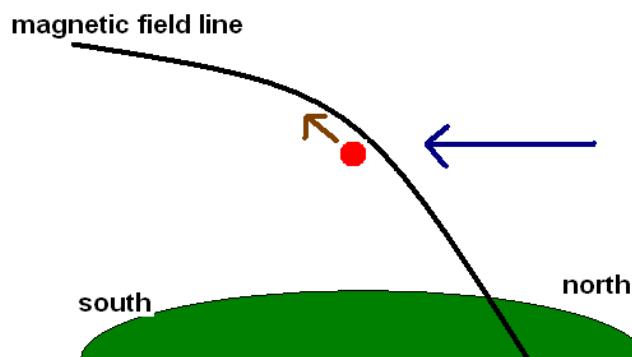


- Densidad de electrones en la ionosfera (principalmente capa F2)
- Perfil de la densidad electrones (modifica la altura de pico de la capa F2 !!!)
- Conductividad de la ionosfera
- Corrientes en la ionosfera (EEJ y sistema Sq)
- Índice de refracción de la ionosfera
- Trayectoria de ondas de radio (Ray tracing) (⇒ radares, GPS, etc.)
- Forma y tamaño de la magnetosfera
- Ingreso de partículas cargadas provenientes del viento solar y rayos cósmicos
- Anillos de radiación de Van Allen
- Forma y tamaño de las zonas aurorales
- Frecuencia de las auroras
- Corrientes alineadas con el campo (acoplamiento ionosfera magnetosfera)
- Aves
- Clima en la troposfera (a través de la regulación del ingreso de rayos cósmicos ???)
- Velocidad de escape del Oxígeno
- ...



Mecanismos simples que vinculan la variación del campo geomagnético con los cambios ionosféricos:

Región F2  $\Rightarrow$  efectos sobre foF2 y hmF2 a través de efectos sobre el transporte



$$V = - [V_n \cos(D) + U_n \sin(D)] \sin(I) \cos(L)$$

& E $\times$ B drift  $\Rightarrow$  Equatorial Ionization Anomaly (EIA)

Región E  $\Rightarrow$  efectos sobre la conductividad

$$\sigma_H = \frac{ne}{B} \left( -\frac{\omega_i^2}{v_i^2 + \omega_i^2} + \frac{\omega_e^2}{v_e^2 + \omega_e^2} \right)$$

$$\sigma_P = \frac{ne}{B} \left( \frac{\omega_i v_i}{v_i^2 + \omega_i^2} + \frac{\omega_e v_e}{v_e^2 + \omega_e^2} \right)$$

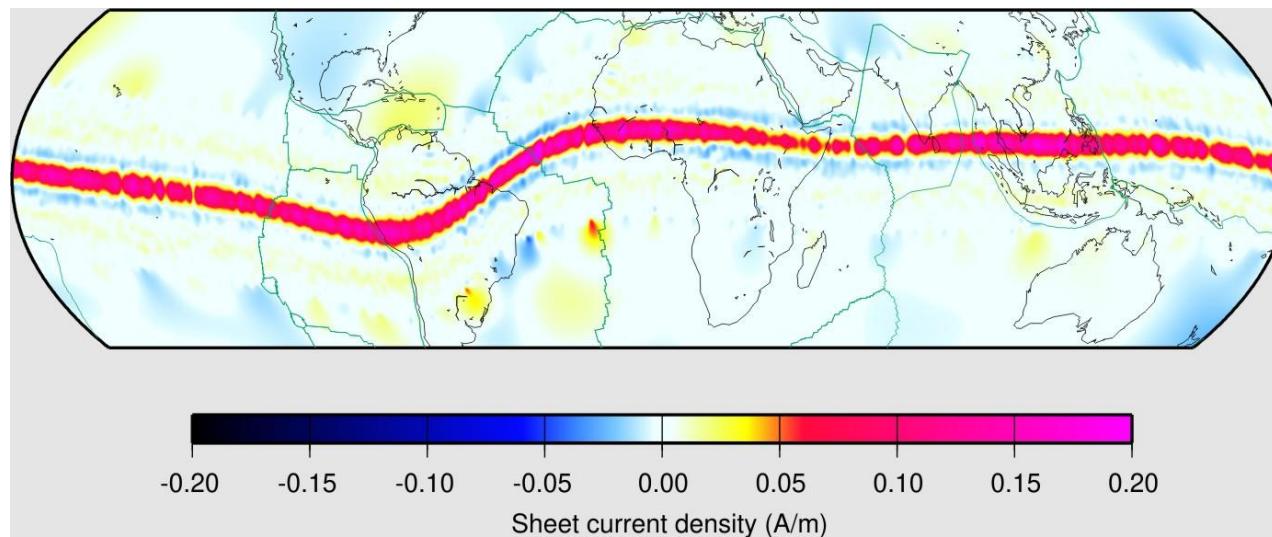
with

$$\left. \begin{array}{l} \omega_i = \frac{eB}{m_i} \\ \omega_e = \frac{eB}{m_e} \end{array} \right\}$$

$$\& \text{ donde } I=0 \Rightarrow \sigma_c = \sigma_P + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P}$$

## Efectos en la corriente del electrochorro ecuatorial, EEJ

$$\mathbf{J} = \sigma_c \mathbf{E} = \sigma_c \mathbf{u} \mathbf{B}$$



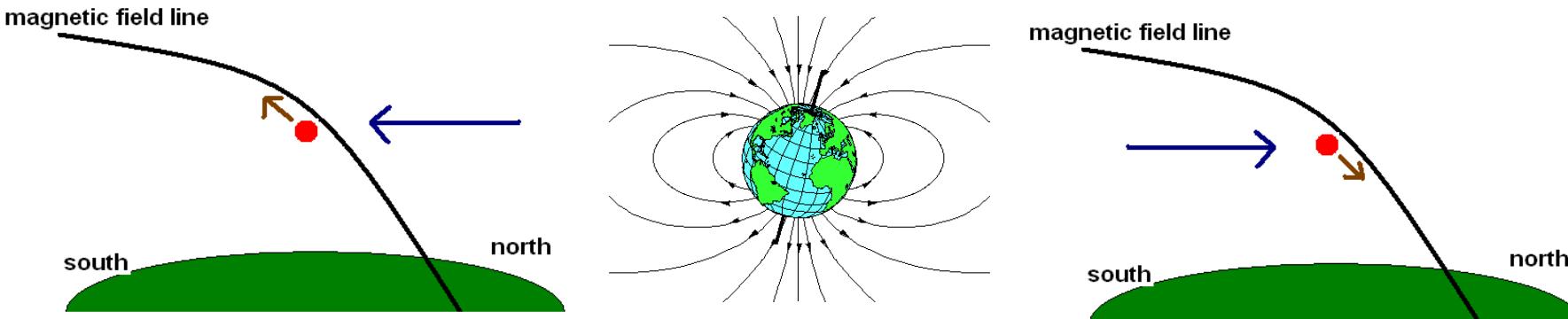
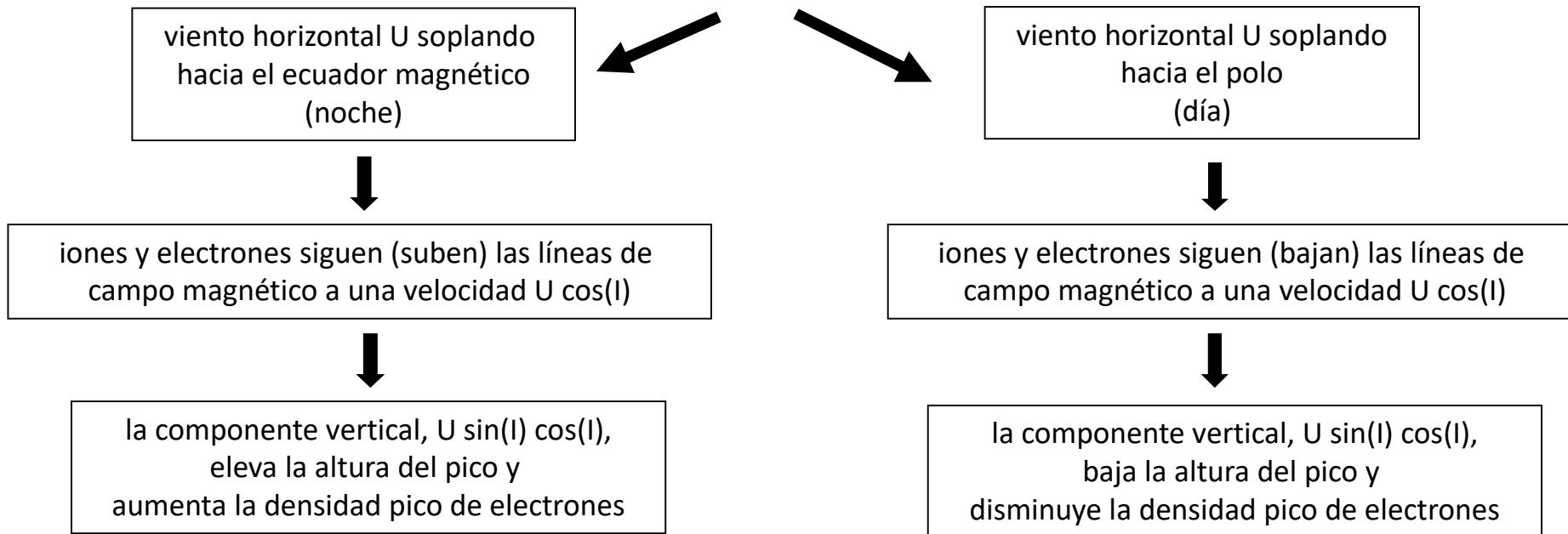
## Efecto en la variación magnética diaria debido al EEJ

$$\Delta H = \frac{\mu_0 I_{EEJ}}{4\pi c} \tan^{-1} \frac{2ch}{h^2 + x^2 - c^2}$$

$$I_{EEJ} = \int J \, dz \, dx = 2cuB \int \sigma_c \, dz$$

# Región F2 ⇒ efectos sobre foF2 y hmF2

## Variaciones a largo plazo de la inclinación ( $I$ ) y la declinación ( $\delta$ )



Para pequeños incrementos:  
(Rishbeth, 1998)

$$\Delta hmF2 \sim \frac{W H^2}{D} \sim \frac{W}{\beta} \sim \frac{U \cos(I) \sin(I) H^2}{D}$$

$W$  = vertical drift due to wind =  $U \sin(I) \cos(I)$   
 $U = U_\theta \cos \delta \pm U_\phi \sin \delta$   
 $D$  = diffusion coefficient

Rishbeth (1967); Sethia et al. (1983, 1984); Rishbeth and Mendillo (2001)

$$NmF2 \approx \frac{q_m}{\beta_m} \propto \frac{n(O)}{n(N_2)} \propto \frac{e^{-z_m}}{e^{-1.75 z_m}} \propto e^{0.75 z_m}$$

Suponiendo que solo cambia W:

$$\frac{d NmF2}{d z_m} \propto 0.75 e^{0.75 z_m} \rightarrow \frac{d NmF2}{NmF2} \approx 0.75 dz_m \rightarrow \frac{\Delta NmF2}{NmF2} \approx 0.75 \frac{H}{D_m} \Delta W$$

Como  $NmF2 \propto foF2^2$

$$\frac{\Delta foF2}{foF2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta NmF2}{NmF2} \approx 0.375 \frac{H}{D_m} \Delta W$$

De acuerdo a una teoría cinética simple

$$D_m = \frac{4.4 \times 10^{18} \sqrt{T}}{n(O)}$$

Como  $W = U_x \sin(I) \cos(I)$  y suponiendo que solo cambian I y  $\delta$ :

$$\Delta W = \Delta [U_x \sin(I) \cos(I)]$$

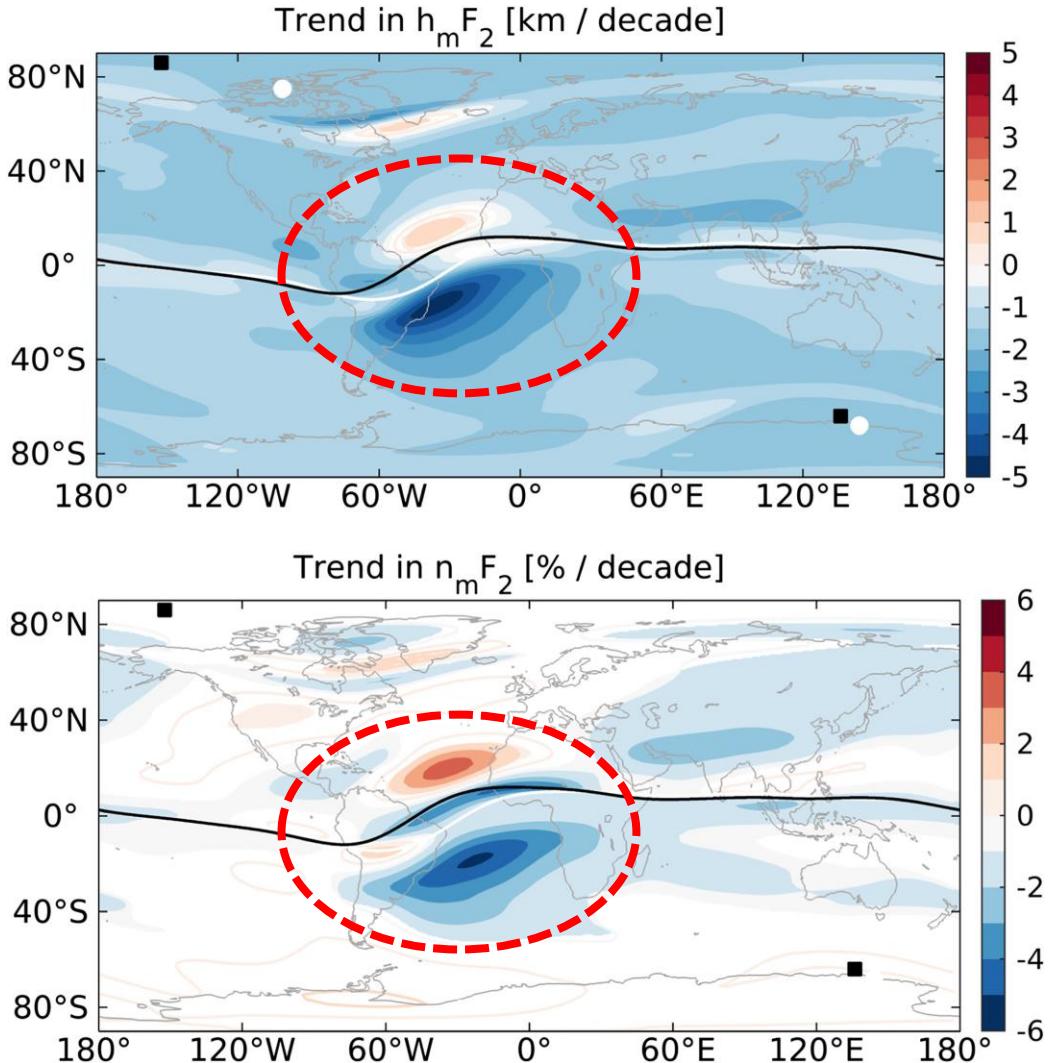
$$\Delta W = U_x \cos(\delta_i) \sin(I_i) \cos(I_i) - U_x \cos(\delta_f) \sin(I_f) \cos(I_f)$$

$$\Delta hmF2 \approx \frac{H^2}{D} \Delta W \approx \Delta [U_x \sin(I) \cos(I)]$$

$$\frac{\Delta foF2}{foF2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta NmF2}{NmF2} \approx 0.375 \frac{H}{D_m} \Delta [U_x \sin(I) \cos(I)]$$

# Resultados utilizando modelos más complejos y considerando el campo “real” - IGRF junto con el efecto antropogénico

## WACCM-X for IT system



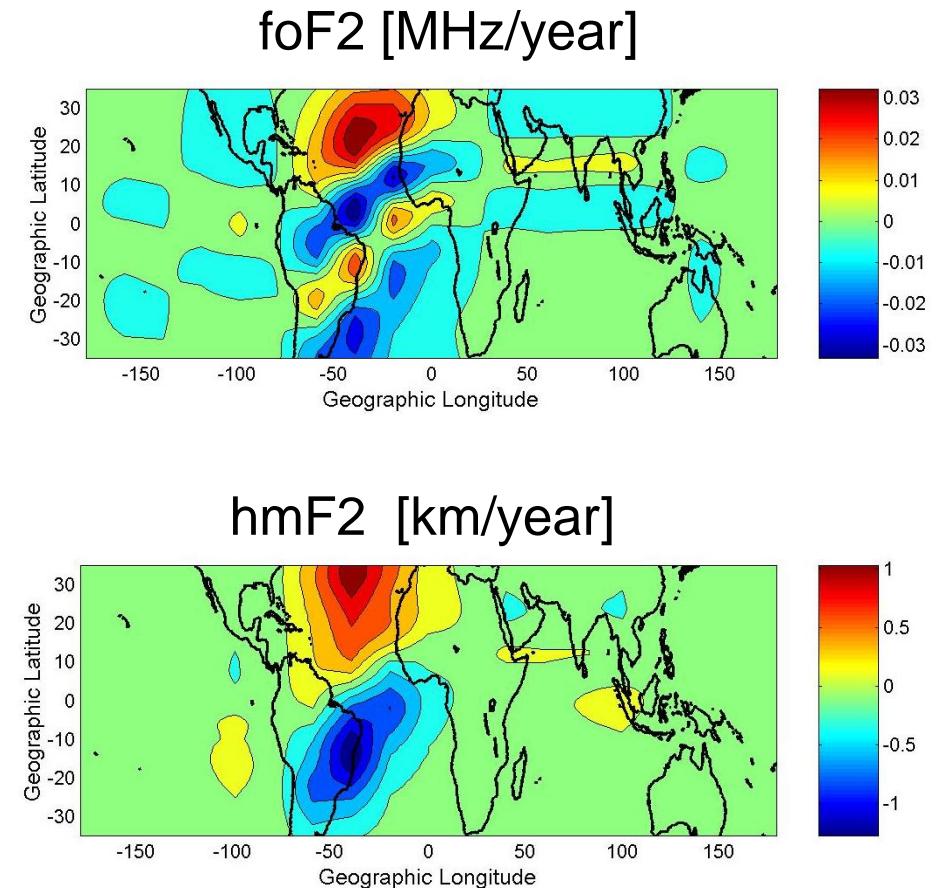
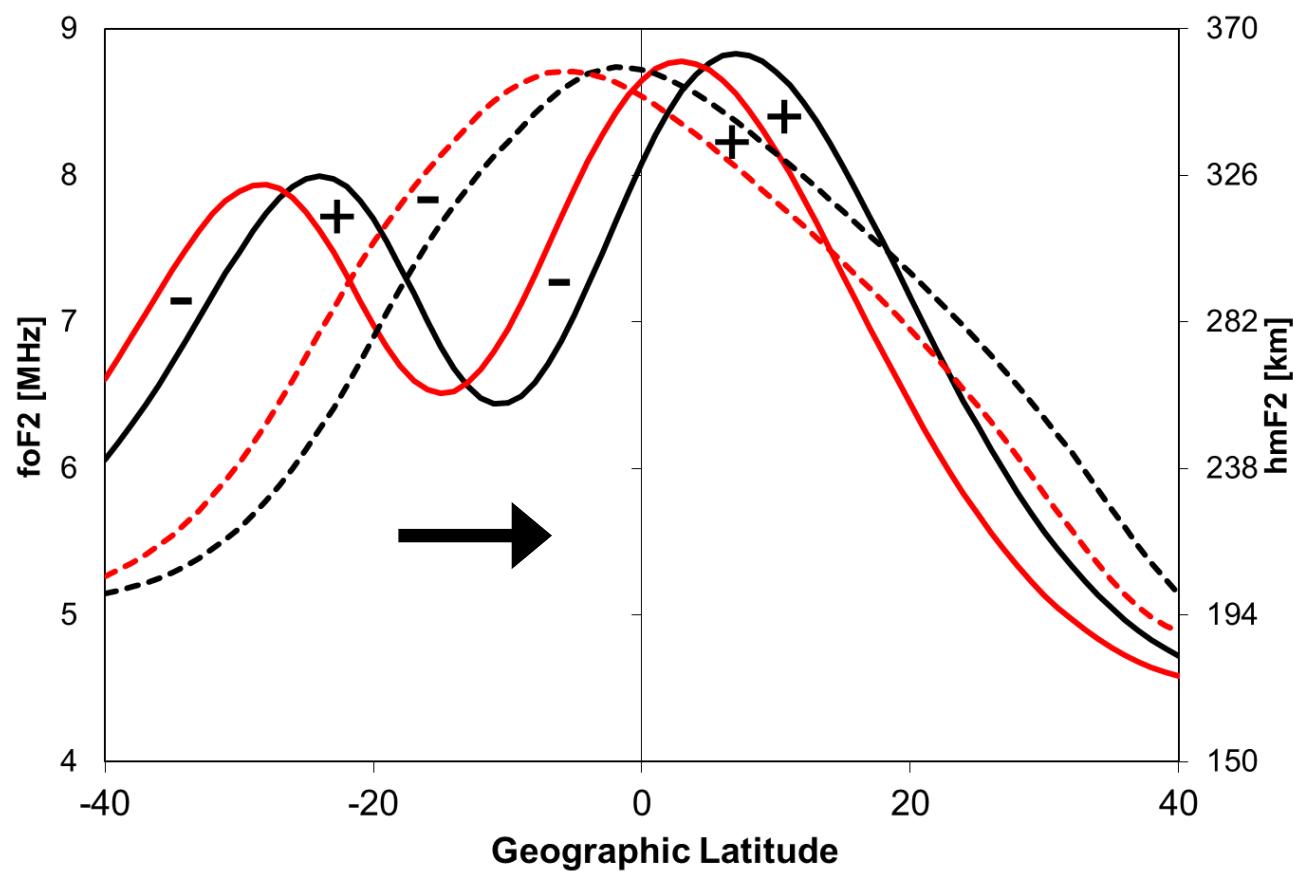
- ✓ El patrón espacial de las tendencias del TEC es similar al de NmF2
- ✓ La estructura espacial de tendencias indica una superposición de efectos del CO<sub>2</sub> y del campo magnético
- ✓ Las tendencias entre ~60°O y 20°E, se asocian con cambios en el campo magnético principal (especialmente el desplazamiento del ecuador magnético)
- ✓ Hay efectos debido al movimiento del polo magnético y la región auroral, particularmente en el hemisferio norte, donde dicho movimiento ha sido más pronunciado.
- ✓ La disminución general de hmF2 y de NmF2 concuerda de manera cualitativa (y están dentro del orden de magnitud) con el efecto esperado por el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>

Trends in hmF2 (km/decade, **left**) and NmF2 (%/decade, **right**). Filled contours indicate that trends are statistically significant at the 95% confidence level, while line contours are used for non-significant trends. The location of the magnetic equator and magnetic poles in 1950 (2015) are marked with a white (black) line and white circles (black squares), respectively. (Cnossen, 2020)

Cnossen, I. Analysis and attribution of climate change in the upper atmosphere from 1950 to 2015 simulated by WACCM-X. *J. Geophys. Res.* **2020**, *125*, e2020JA028623.

## $E \times B$ drift $\Rightarrow$ Equatorial Ionization Anomaly (EIA)

foF2 (solid lines) and hmF2 (dotted lines) latitudinal profile for June in two different years (1964: red line – 1996: black line) at 60°W where the dip equator is moving northward.



## Efectos en la conductividad: combinación de la variación secular del campo magnético y el efecto invernadero:

$$\sigma_H = \frac{ne}{B} \left( -\frac{\omega_i^2}{v_i^2 + \omega_i^2} + \frac{\omega_e^2}{v_e^2 + \omega_e^2} \right) \quad \sigma_P = \frac{ne}{B} \left( \frac{\omega_i v_i}{v_i^2 + \omega_i^2} + \frac{\omega_e v_e}{v_e^2 + \omega_e^2} \right)$$
$$\omega_e = \frac{eB}{m_e}$$
$$\omega_i = \frac{eB}{m_i}$$

& donde  $I=0 \Rightarrow \sigma_c = \sigma_P + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P}$

$$Y, \text{ usando modelos sencillos: } v_e = 5.4 \times 10^{-10} N \sqrt{T} \quad v_i = 2.6 \times 10^{-9} \frac{N}{\sqrt{M}}$$

La concentración de gases de efecto invernadero afecta a: **n & v**

Las variaciones del campo magnético de la Tierra afectan a:  **$\omega$**

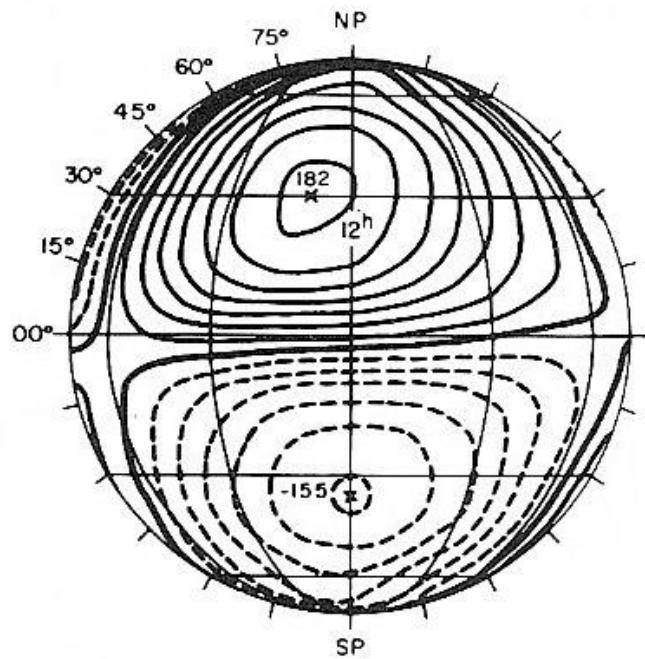
### Consequences for the dynamo region:

Its altitude range is ~90–150 km → defined by the relative magnitudes of  $v$  and  $\omega$

$v$  is affected by the increasing greenhouse gas effect on T and n

$\omega$  is affected mainly by the Earth's magnetic field (B)

# Tendencias en Sq?



Principales variables:

- conductividad ionosférica
- campo eléctrico dinamo
- marea diurna solar
- concentración de electrones en la región E

Suponiendo un plano de corriente J infinito



la variación Sq de H ( $\Delta H$ )  $\propto J$



$$J = \sum (V \times B + E_p)$$

**Efecto invernadero:**

$$\Sigma = \int \sigma dh \Rightarrow NmE \Rightarrow foE$$

aumento de CO<sub>2</sub>  $\Rightarrow$  aumento en foE  $\Rightarrow$  aumento de  $\Sigma \Rightarrow$  tendencia positiva en Sq

**Efecto de la variación secular del campo magnético de la Tierra:**

$$J = \sum (V \times B + E_p) \text{ pero } \Sigma \propto 1/B \Rightarrow \text{tendencia en Sq opuesta a la de B}$$

# Tendencias en el índice de refracción ?

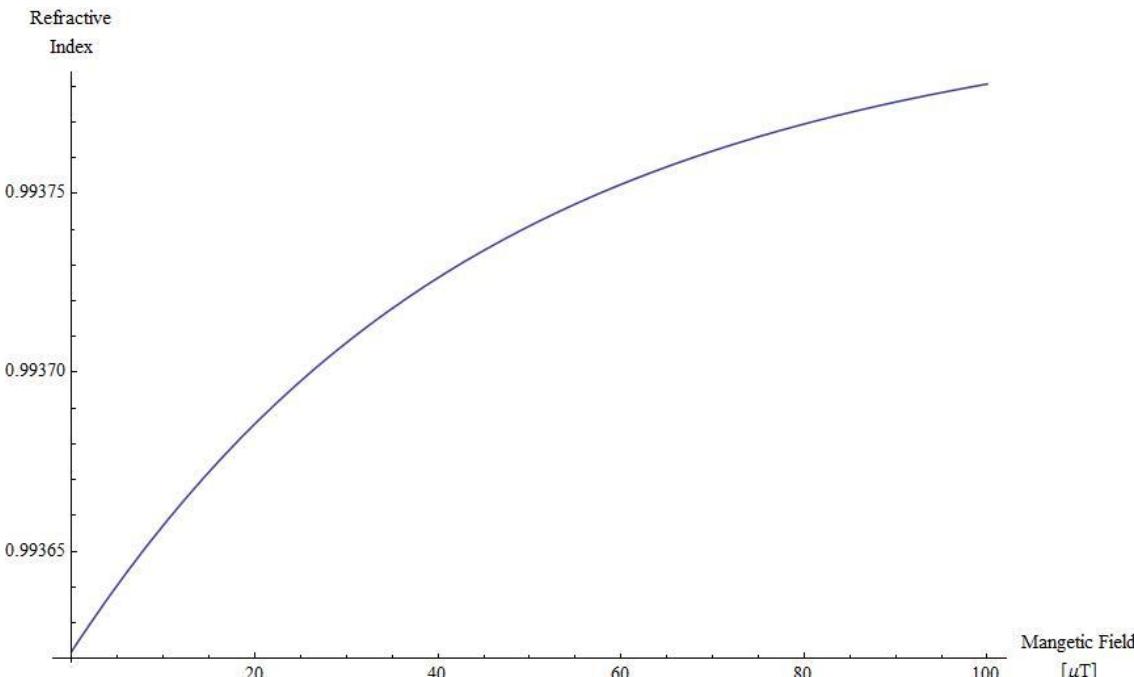
Fagre, M., Zossi, B.S., Yiğit, E., Amit, H, Elias, A.G., High frequency sky wave propagation during geomagnetic field reversals. *Stud Geophys Geod* **64**, 130–142, 2020.

## Appleton-Hartree equation for the refractive index with some simplifications

Hypothesis: collision frequency  $\rightarrow 0 \Rightarrow$  refractive index  $n \rightarrow \mu$  (real)

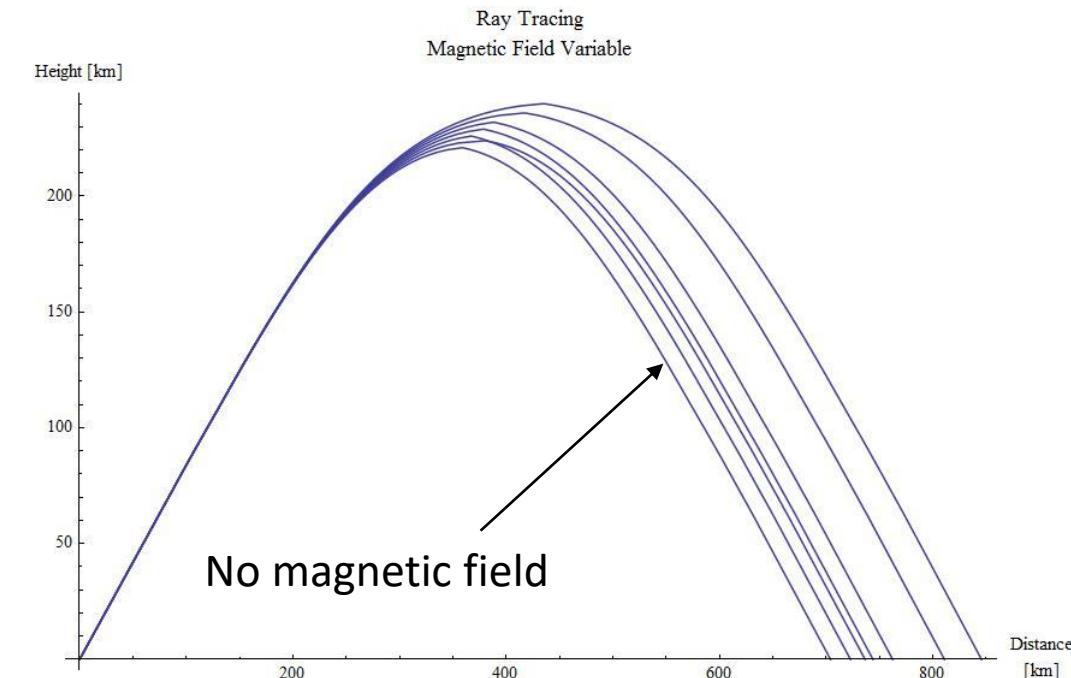
$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}} \quad X = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2} = \left(\frac{f_0 F_2}{f}\right)^2, \quad Y_L = \frac{eB_L}{m\omega}, \quad Y_T = \frac{eB_T}{m\omega}$$

With magnetic field the ionosphere is more like free space:  $\mu \rightarrow 1$



Hypothesis: collision frequency  $\rightarrow 0$  and  $B \rightarrow 0$

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \left(\frac{f_0 F_2}{f}\right)^2 = 1 - k \frac{N}{f^2}$$



**Cannon, P.S., N.C. Rogers and C.M. Hall (2004), Trends in critical frequencies and layer heights over Tromso and their consequential impact for radio system modelling, Adv. Space Res., 34, 2085–2091.**

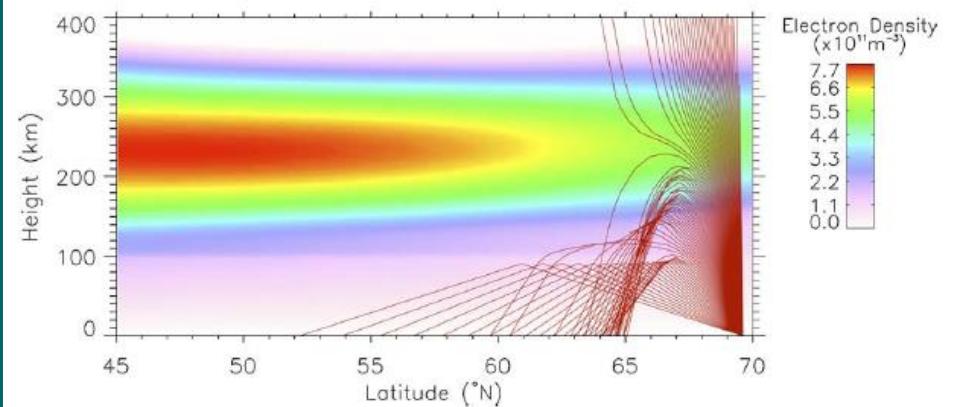
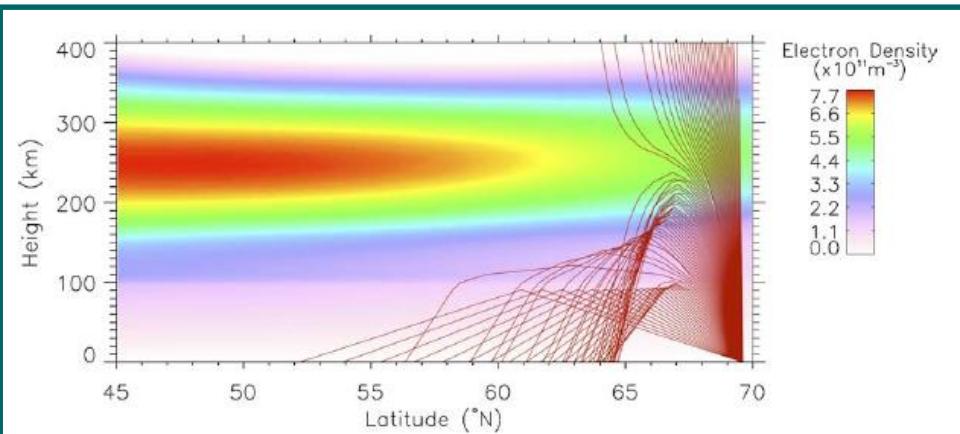


Fig. 3 (from Cannon et al., 2004). Ray tracing due south from Tromso, 8 MHz, December 12 UT, Sunspot number = 50. Top: CCIR (Oslo) coefficients. Bottom: CCIR with  $h_{\text{mF2}}$  reduced by 16 km.

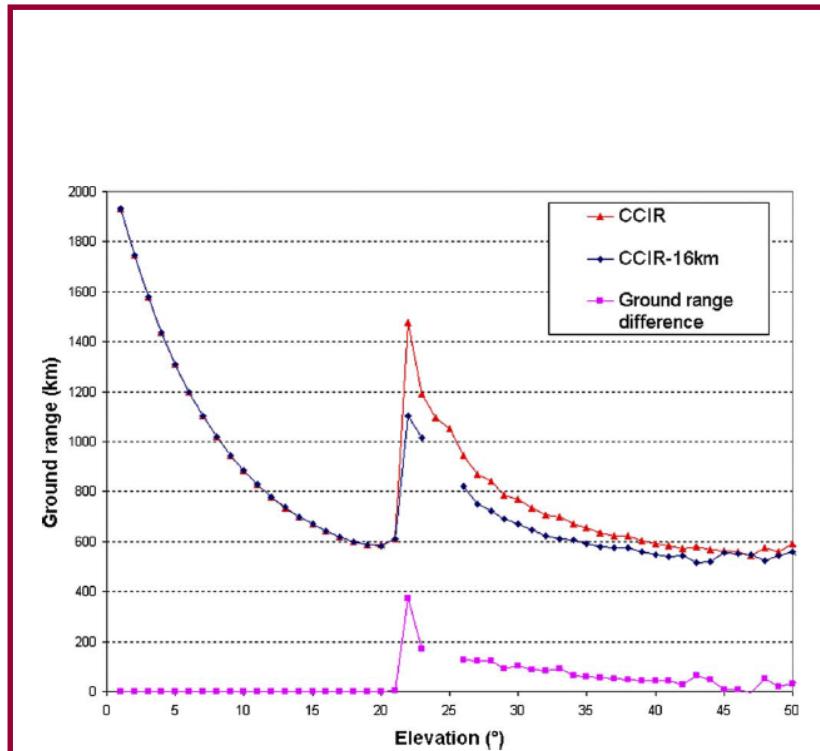


Fig. 4 (from Cannon et al., 2004). Impact of 16 km reduction in  $h_{\text{mF2}}$  at 8 MHz for December 12 UT, Sunspot number = 0.

# Efecto del aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la densidad de la termosfera:

## CLIMATE CHANGE IN SPACE: THERMOSPHERIC DENSITY REDUCTIONS IN LEO AND THE IMPACT ON THE DEBRIS ENVIRONMENT

M. K. Brown<sup>(1)</sup>, H. G. Lewis<sup>(1)</sup>, A. J. Kavanagh<sup>(2)</sup>, and I. Cnossen<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>University of Southampton, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Boldrewood Innovation Campus, Southampton, SO16 7QF, United Kingdom, Email: {mkb1g12, H.G.Lewis}@soton.ac.uk

<sup>(2)</sup>British Antarctic Survey, High Cross, Madingley Road, Cambridge, CB3 0ET, United Kingdom

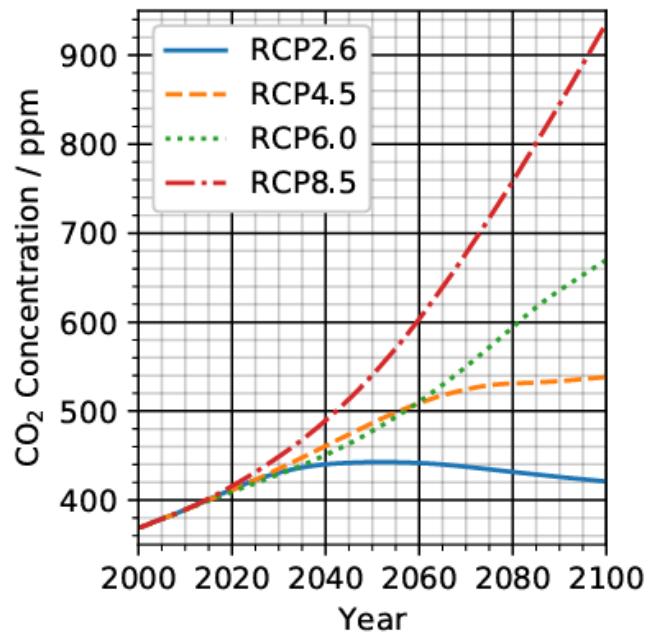


Figure 1. Representative Concentration Pathways (RCPs) published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) showing four possible scenarios for ground-level CO<sub>2</sub> concentrations through to the year 2100 [25].

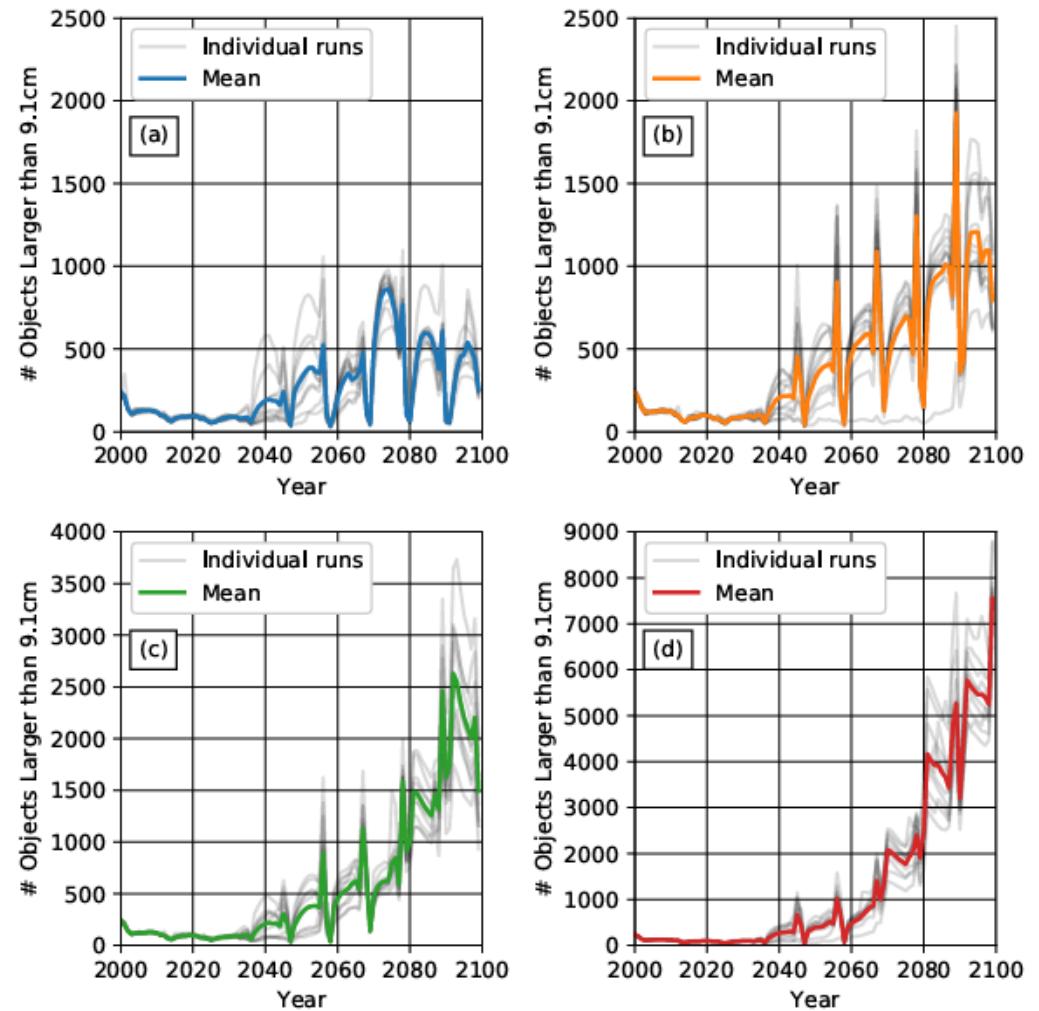


Figure 7. Debris environment Monte Carlo modelled within BRAD, plotting objects greater than 9.1 cm and with a perigee below 500 km. Similar colours denote the RCPs as in Figure 1, namely (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, and (d) RCP8.5. While the y axes are the same in (a) and (b), they have been resized for (c) and (d) to make it easier to pick out the solar cycle effect.

# Estimación de tendencias con datos experimentales

## A) Método de dos pasos:

1. Se filtra el efecto de la actividad solar:

$$\Delta \text{foF2} = \text{foF2}_{\text{exp}} - \text{foF2}_{\text{mod}}$$

$\text{foF2}_{\text{exp}}$ : valor experimental de foF2

$\text{foF2}_{\text{mod}}$ : valor modelado de foF2 generalmente a través de una regresión en un proxy del EUV solar  $\Rightarrow$

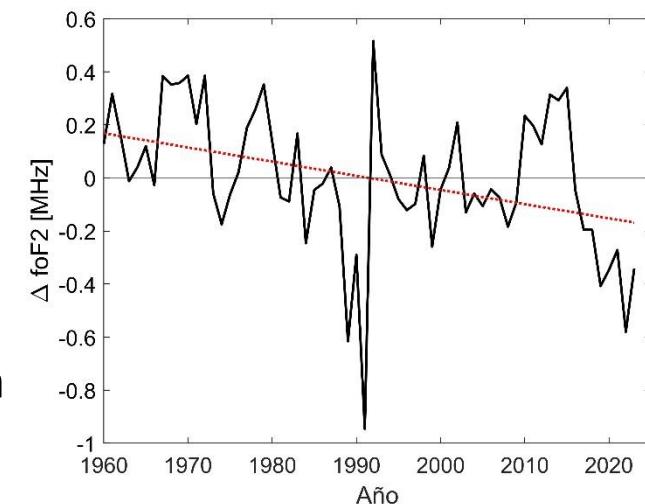
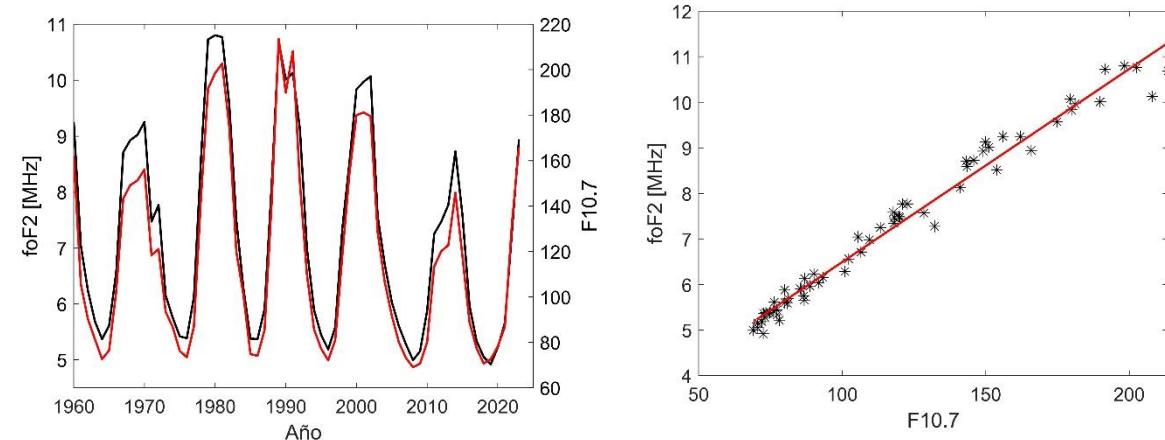
$$\text{foF2}_{\text{mod}} = A X + B$$

También se puede incorporar  $A_p$ , y término cuadrático (inclusive cúbico) en  $X \Rightarrow$

$$\text{foF2}_{\text{mod}} = A X + B X + C A_p + D$$

2. Se estima la tendencia lineal,  $\alpha$ , a partir de la regresión de foF2 filtrado ( $\Delta \text{foF2}$ ) con el tiempo

$$\Delta \text{foF2} = \alpha t + \beta$$



Juliuruh, 12 LT,  
promedio anual:  
 $\alpha = -0.0053 \text{ MHz/año}$   
Error: 0.0017  
p-value: 0.0024

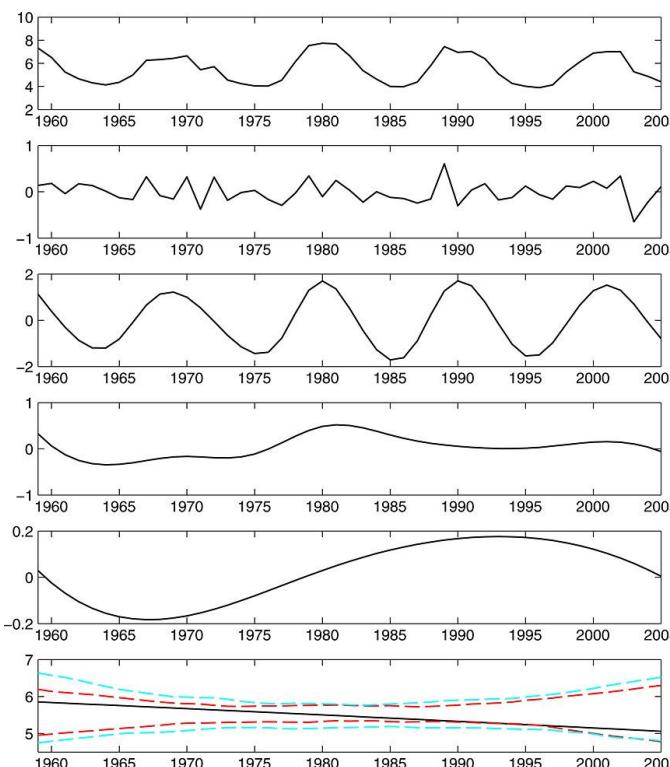
B) Tendencia lineal,  $\alpha$ , estimada a partir de una regresión lineal múltiple:  $\text{foF2} = a R_z + \alpha t + \gamma$

Existen métodos más "sofisticados" para estimar tendencias:

## Empirical Mode Decomposition (EMD) & Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)

The time series is decomposed into a finite number of intrinsic mode functions (IMF) and a residual which has the trend we are seeking.

$$x(t) = \sum_{j=1}^M \psi_j(t) + R(t)$$



**Figure 3.** Example of the EEMD analysis applied to  $f_0F_2$  data from Juliusruh/Rugen (same data as used in Figure 1a). (first row) The original  $f_0F_2$  time series, (second to fifth rows) its IMFs, and (sixth row) the residual are shown. Sixth row also indicates the 5–95% percentile ranges for both statistical null models: red, phase scrambling; cyan, AR process. In the example shown the residual (the trend) is just significant against the phase scrambling null model, but not against the AR null model.

Crossen, I., and C. Franzke (2014), The role of the Sun in long-term change in the F2 peak ionosphere: New insights from EEMD and numerical modeling, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 8610–8623, doi:10.1002/2014JA020048.

Wavelet analysis, Machine learning methods, ...

Ojo !!! Algunos necesitan series completas !!!

# Resultados más recientes:

Duran, T., Melendi, Y.D., Zossi, B.S., Juan, A., Elias, A.G., Contribution to ionospheric F2 region long-term trend studies through seasonal and diurnal pattern analysis, Global and Planetary Change, 229, 104249, 2023.

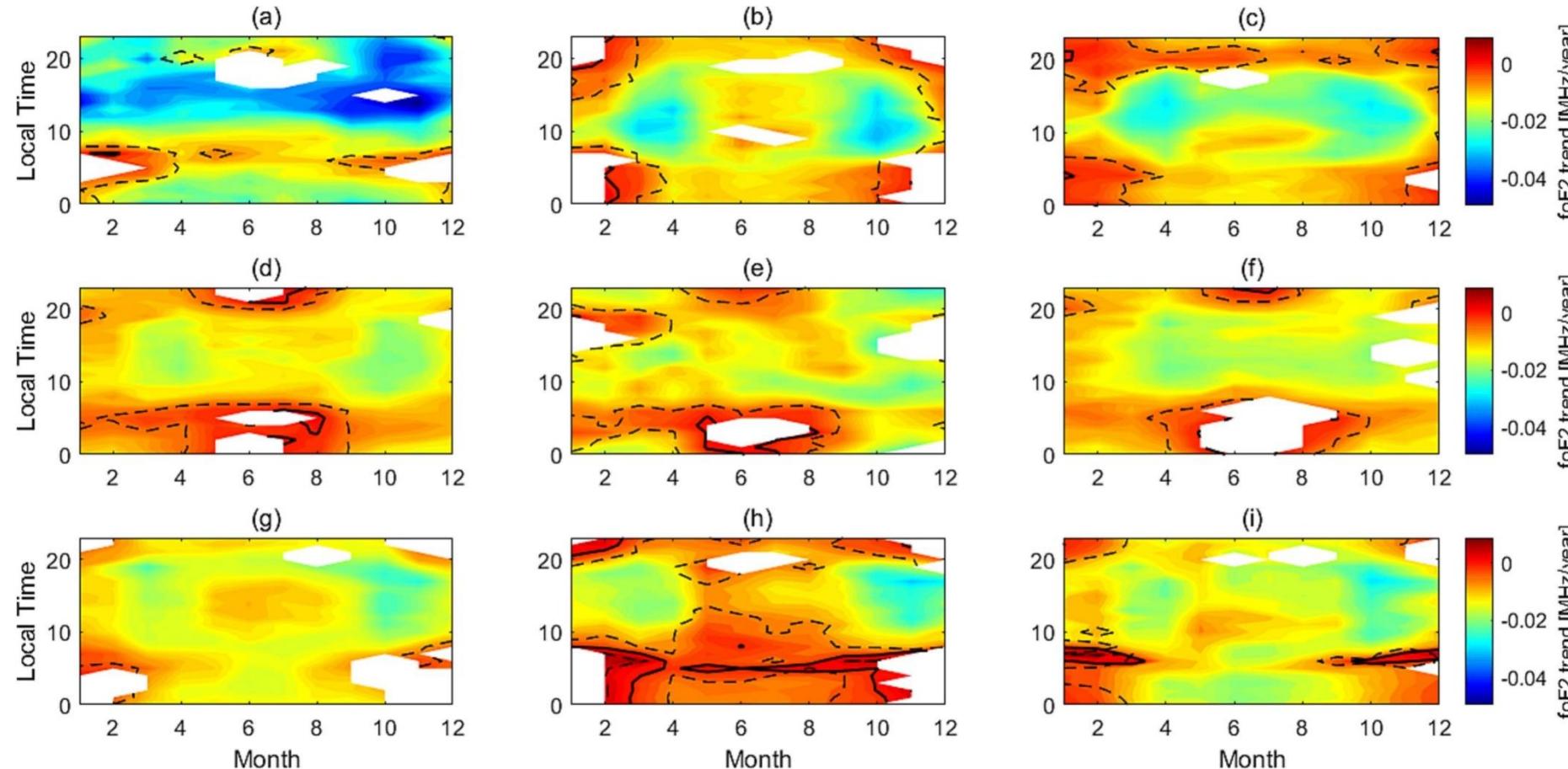


Fig. 3. Seasonal-diurnal variation of foF2 trend,  $\alpha$  [MHz/year], using Eq. (1) with MgII index (extended version) as a solar proxy and Ap, considering the complete period 1960–2022 (M1) for: (a) Okinawa, (b) Wakkanai, (c) Kokubunji, (d) Canberra, (e) Townsville, (f) Hobart, (g) Juliusruh, (h) Boulder, and (i) Rome. Months-hours with  $r^2 < 0.75$  where excluded. Solid black line:  $\alpha = 0$ . Dashed black line: lowest  $\alpha$  with 95% significance.

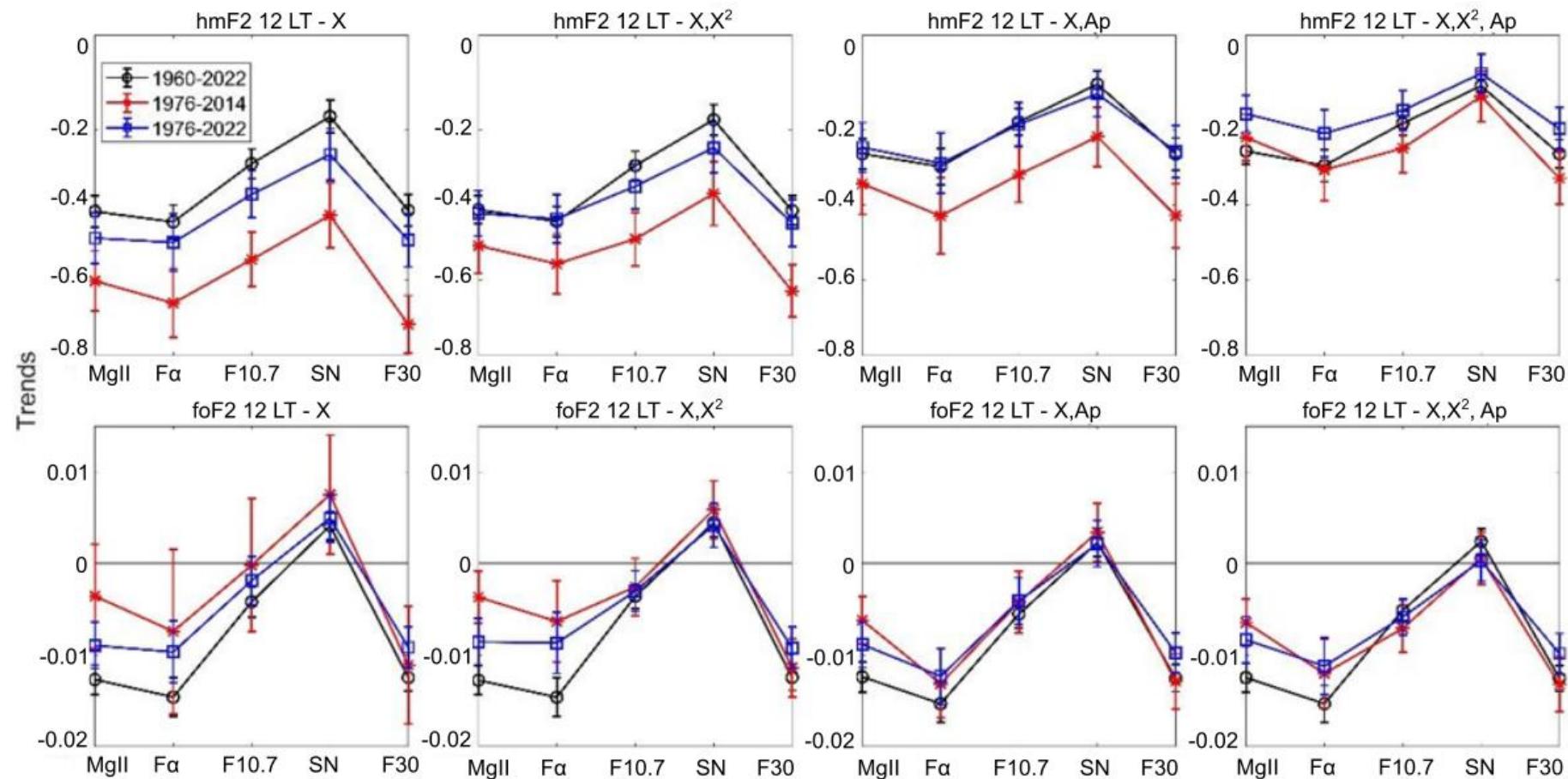
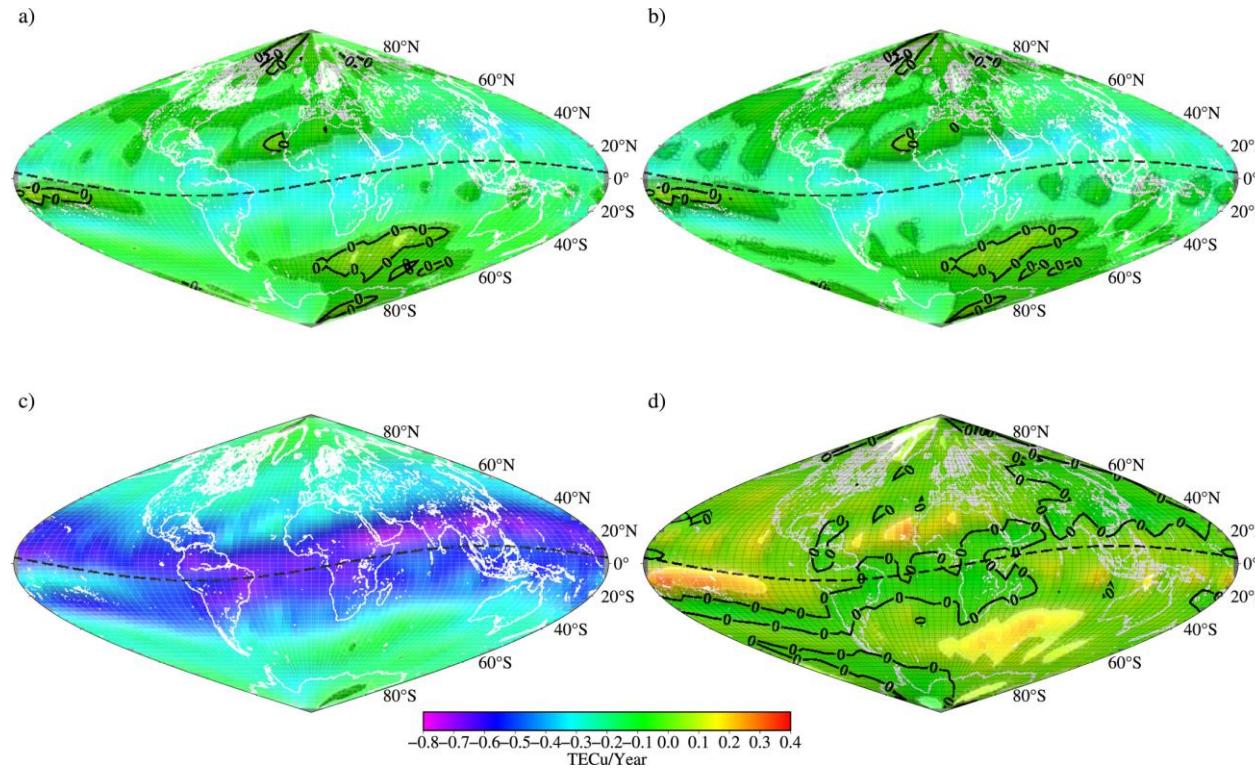


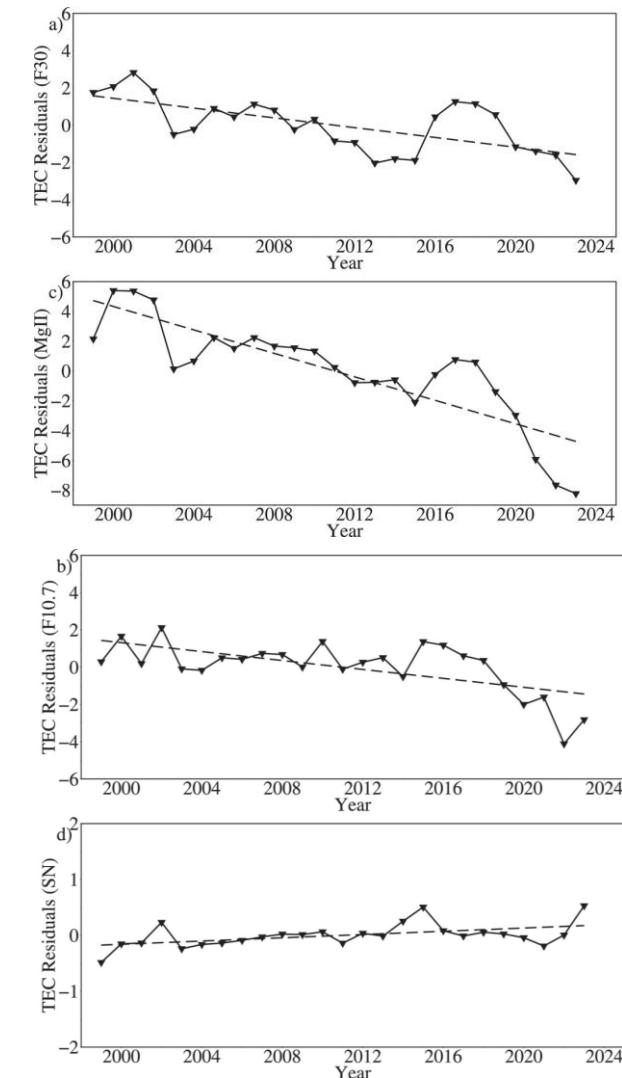
Figure 8. Linear trend of hmF2 (upper panels; in  $\text{km yr}^{-1}$ ) and foF2 (lower panels; in  $\text{MHz yr}^{-1}$ ) at 12:00 LT measured at Juliusruh, considering residuals filtered with each model (indicated at the top of each panel) in terms of each solar proxy (Mg II, F $\alpha$ , F10.7, SN, and F30). Time series periods are 1960–2022 (black), 1976–2014 (red), and 1976–2022 (blue).

# Tendencias en TEC?

Natali, M. P., Urutti, A., Castaño, J. M., Zossi, B. S., Duran, T., Meza, A., & Elias, A. G. (2024). Long term global ionospheric total electron content trend analysis. *Geophy. Res. Lett.*, 51, e2024GL112248.



Total electron content trend along 1999–2023 considering annual mean values from monthly medians at 12 LT, with (a) F30, (b) F10.7, (c) MgII, and (d) SN as the solar proxy in the filtering procedure. The black dashed line corresponds to the geomagnetic equator. Filled dark contours indicate that trends are non-significant. We use a 95% confidence level.



Global mean total electron content residuals, considering annual means at 12 LT, after filtering the solar activity effect with (a) F30, (b) F10.7, (c) MgII, (d) SN. The dashed line indicates the linear trend along the period 1999–2023.

## Escenario global de tendencias en la atmósfera superior

- ✓ Los primeros resultados experimentales sobre tendencias a largo plazo en la atmósfera superior y ionosfera eran “caóticos”, en parte contradictorios y no servían para armar un “escenario de las tendencias”.
- ✓ Con el aumento de resultados basados en observaciones y en modelos, comenzó a surgir un patrón sistemático de las tendencias.
- ✓ **Jan Lastovicka** (Institute of Atmospheric Physics, CAS) inicia un grupo de investigación internacional que se focaliza en el estudio de tendencias a largo plazo en la atmósfera superior ...

## WGII-F: Long-Term Trends in the Mesosphere, Thermosphere and Ionosphere (with ICMA and SCOSTEP)

Chair:

**Liying Qian**

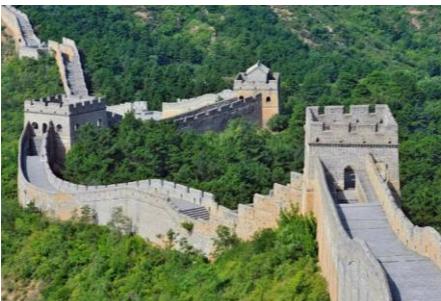
High Altitude Observatory  
National Center for Atmospheric Research  
3080 Center Green Dr.  
Boulder, CO 80301  
USA  
[lqian@ucar.edu](mailto:lqian@ucar.edu)

Co-chair:

**Ana G. Elias**

FACET, Universidad Nacional de Tucuman  
Av. Independencia 1800  
4000, Tucuman  
Argentina  
[aelias@herrera.unt.edu.ar](mailto:aelias@herrera.unt.edu.ar)

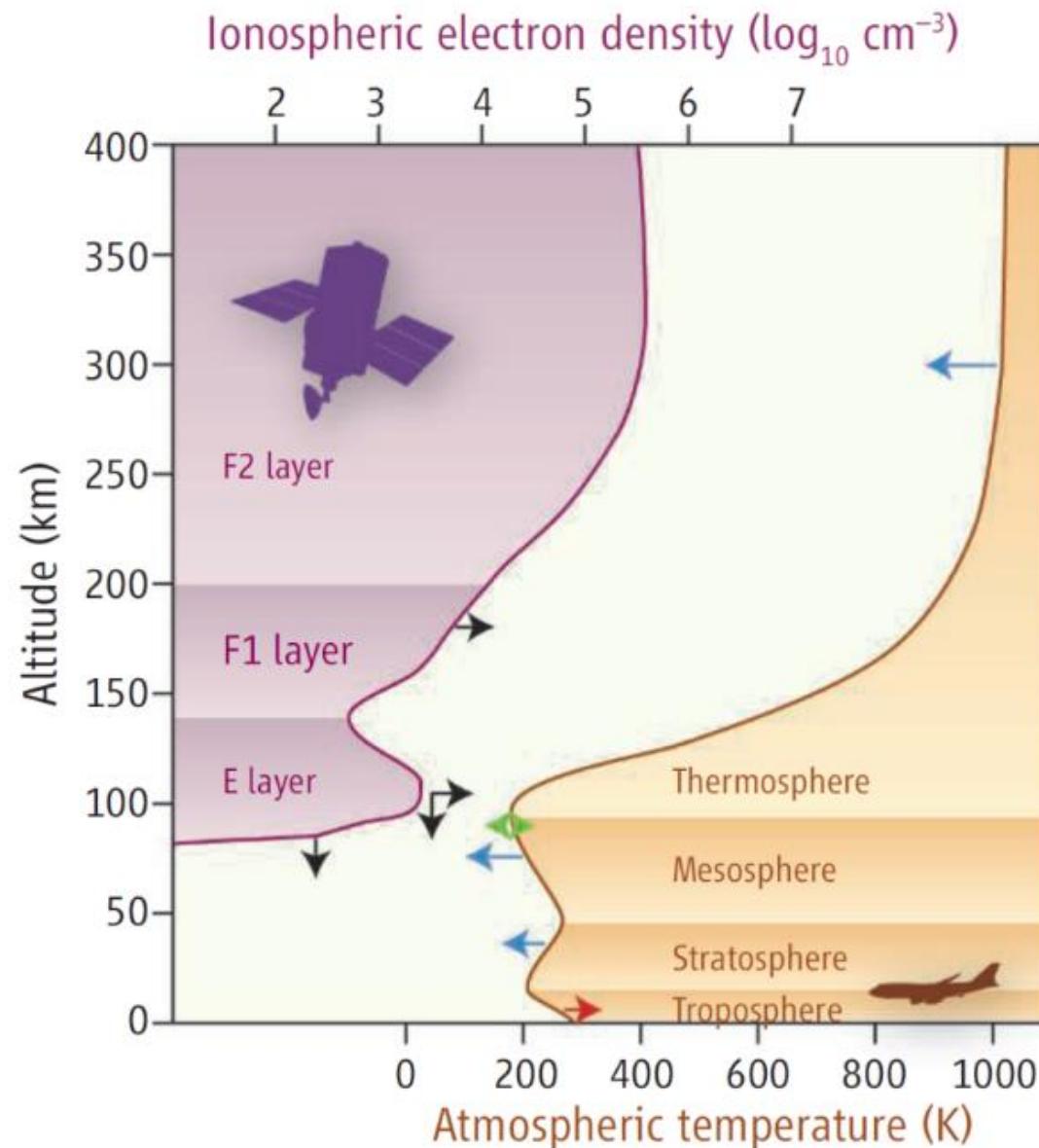
**Next 13th Trend Workshop: Beijing, China, May 18–22, 2026**



## Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere

- 12th: 2024, Ourense, Spain
- 11th: 2022, Helsinki, Finland
- 10th: 2018, Hefei, China
- 9th: 2016, Kühlungsborn, Germany
- 8th: 2014, Cambridge, United Kingdom
- 7th: 2012, Buenos Aires, Argentina
- 6th: 2010, Boulder, Colorado, USA
- 5th: 2008, Saint Petersburg, Russia
- 4th: 2006, Sodankylä, Finland
- 3rd: 2004, Sozopol, Bulgaria
- 2nd: 2001, Prague, Czech Republic
- 1st: 1999, Pune, India

- ✓ En 2006 se construye el primer escenario global de tendencias a largo plazo en la atmósfera superior y ionosfera (Lastovicka et al., 2006, 2008):



#### Structure and trends in Earth's atmosphere.

Atmospheric layers (orange, right) are defined by the temperature profile. Ionospheric layers (purple, left) are defined by the electron density profile (shown here at midnight at the equator). Arrows denote the direction of observed changes in the past 3 to 4 decades: Red, warming; blue, cooling; green, no temperature change; black, changes in maximum electron density (horizontal) and the height of ionospheric layers (vertical). Most spacecraft fly at altitudes above 300 km. The aircraft and satellite shown are not to scale.

Lastovicka et al. 2006: Global Change in the Upper Atmosphere, *Science*, **314**, 5803, 1253-1254.

# Resumen del escenario global actual de tendencias en la atmósfera superior:

Jan Laštovička (2023). Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere, Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 5783–5800.

Jan Lastovicka's presentation at the 12th International Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere. 6-10 May 2024. Ourense, Galicia, Spain.

- ✓ Se avanzó significativamente en el estudio de tendencias en la mesosfera y termosfera baja (MLT).
- ✓ La temperatura sigue con una tendencia general al enfriamiento.
- ✓ En la dinámica atmosférica, las tendencias de vientos y mareas son más complejas y variables regionalmente.
- ✓ La disminución de la densidad termosférica continúa, lo cual impacta la acumulación de escombro espacial en órbitas LEO.
- ✓ En la región E, las tendencias de foE dependen del tiempo local, siendo más notables en latitudes medias-altas de Europa.
- ✓ En la región F2, foF2 y hmF2 muestran tendencias negativas leves pero estadísticamente significativas.
- ✓ Se reportaron tendencias en dos nuevos parámetros: la densidad de electrones en la parte superior de la ionosfera (cerca de 840 km) y en "equatorial plasma bubbles".

- ✓ Algo importante en la investigación de tendencias de largo plazo es la especificación de los roles de los diferentes forzantes de tendencias. El más importante es el aumento en la concentración del CO<sub>2</sub>. El forzante más estudiado que le sigue a éste, es la variación secular del campo magnético de la Tierra.
- ✓ Los efectos de la variación secular del campo magnético son dominantes en foF2, hmF2, TEC y Te en el sector alrededor de 50° S–20° N, 110° W–20° E (donde es máximo el desplazamiento del ecuador magnético). Sin embargo, su efecto es positivo y negativo según la región, de manera que en promedio el efecto sería despreciable.
- ✓ Modelos como WACCM-X han simulado con éxito escenarios térmicos y químicos globales, desde la superficie hasta la exosfera.
- ✓ La tendencia en el ozono estratosférico parece también afectar la variación a largo plazo en la atmósfera superior (ciertos parámetros).

## Desafíos , aspectos por profundizar, controversias, incógnitas, .... Muchos aún !!! Queda mucho por hacer !!!

- ✓ Hay aún varios problemas en el cálculo de las tendencias, los cuales pueden dividirse en tres grupos: (1) variabilidad natural, (2) problema con los datos, y (3) metodología.
- ✓ A pesar del evidente progreso alcanzado, aún persisten múltiples desafíos y cuestiones abiertas.
- ✓ El principal problema se relaciona con las tendencias a largo plazo en la dinámica atmosférica, especialmente en la actividad de ondas atmosféricas, un componente crucial del acoplamiento vertical que afecta todas las capas de la atmósfera superior.
- ✓ También existen desafíos en la mejora de los modelos para el estudio e interpretación de tendencias a largo plazo.
- ✓ La tendencia de largo plazo en el Contenido Total de Electrones (TEC), con implicancias para la propagación de señales GNSS y su uso en posicionamiento y otras aplicaciones, sigue sin comprenderse adecuadamente.
- ✓ El rol de la mayoría de los forzantes no relacionados con CO<sub>2</sub> en las tendencias de la atmósfera superior solo se conoce de forma cualitativa y requiere una mejor caracterización.
- ✓ Muchos parámetros muestran dependencias con la hora local y la estación del año, aspectos que no han sido suficientemente estudiados.
- ✓ Aunque en los últimos años se lograron avances importantes, queda aún un largo camino por recorrer para lograr una "comprensión completa" de esta problemática.

# Consideraciones para estimar tendencias en la ionosfera con datos experimentales

## Problemas del filtrado:

- Proceso del filtrado (método, etc.)
  - Selección inapropiada de datos
  - Proxy seleccionado
  - ...
- 
- Todos afectan la estimación de la tendencia

### Problemas del filtrado en el caso de foF2:

- (1) Efecto de saturación
  - (2) Efecto de histéresis
  - (3) No-linealidad
  - (4) Elección del modelo o proxy del nivel de actividad solar
  - (5) Longitud (o extensión) del período considerado
- ...

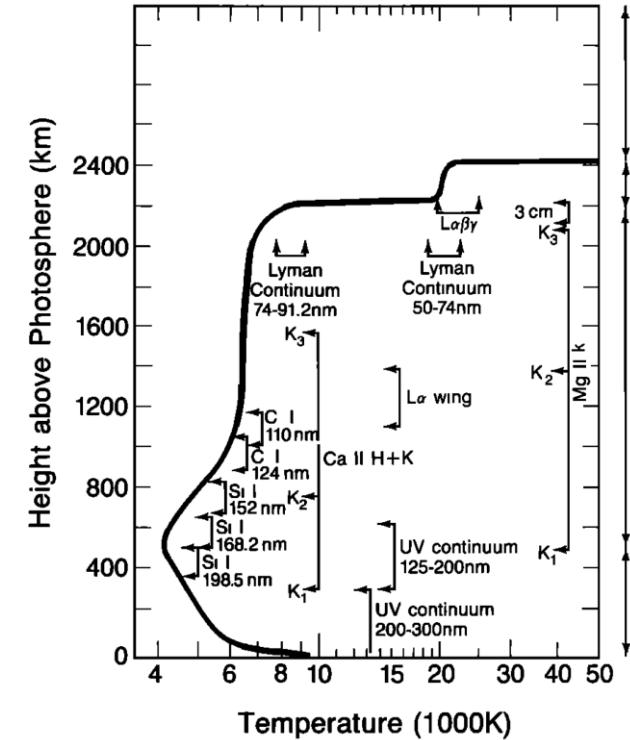
Con hmF2 se suma otro problema:

- ✓ como se estima hmF2 a partir de M3000(F2)

Problema actual: Proxy del EUV para filtrar el efecto de la actividad solar, previo a la estimación de la tendencia: Rz, F10.7, Mg II, F30, He II, o ...?

### Región de origen en el Sol:

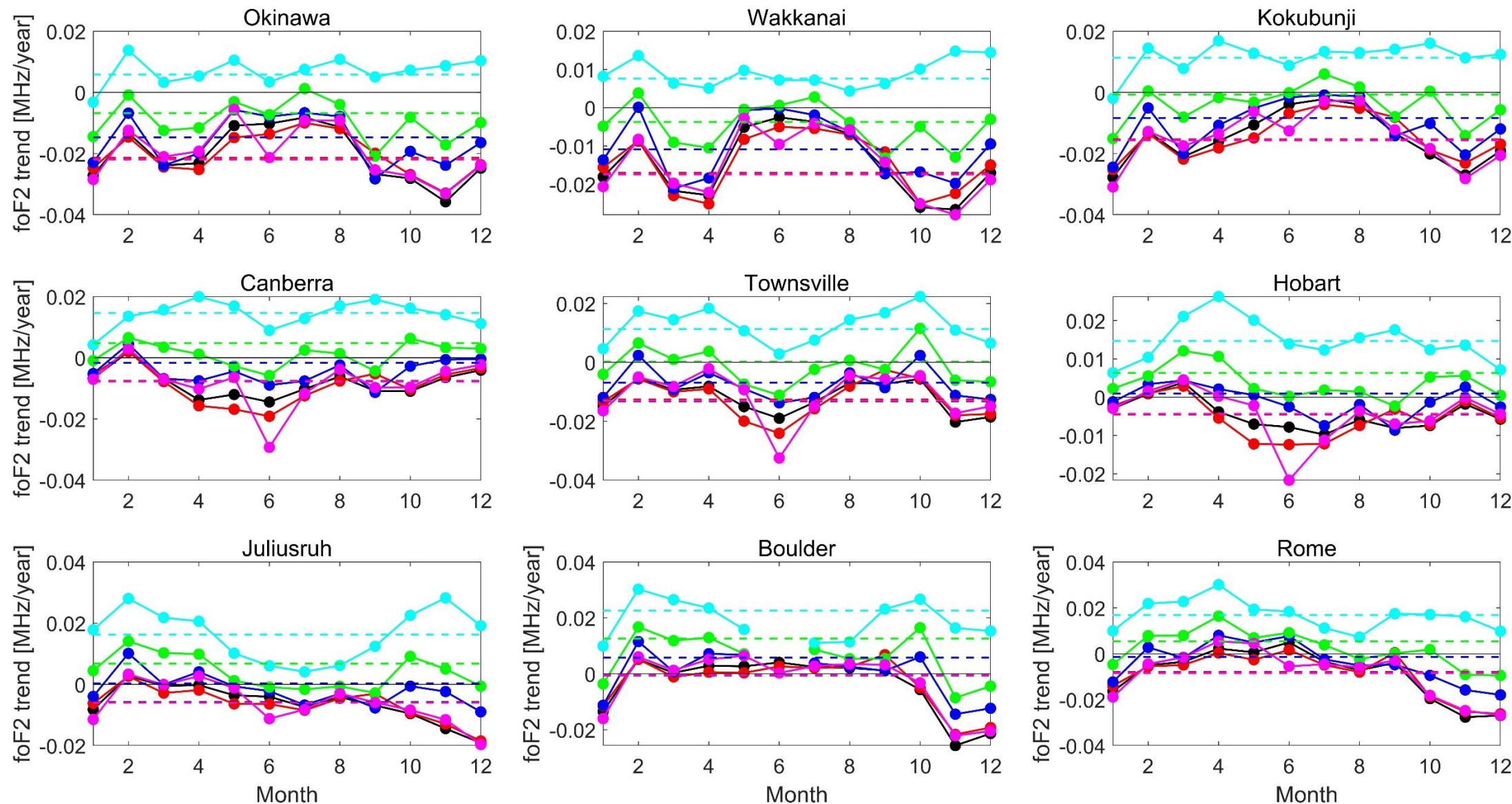
- Rz → fotosfera
- Mg II → alta cromosfera
- Lym  $\alpha$  → región de transición
- F10.7 → alta cromosfera y corona
- F30 → alta cromosfera y corona
- He II → región de transición

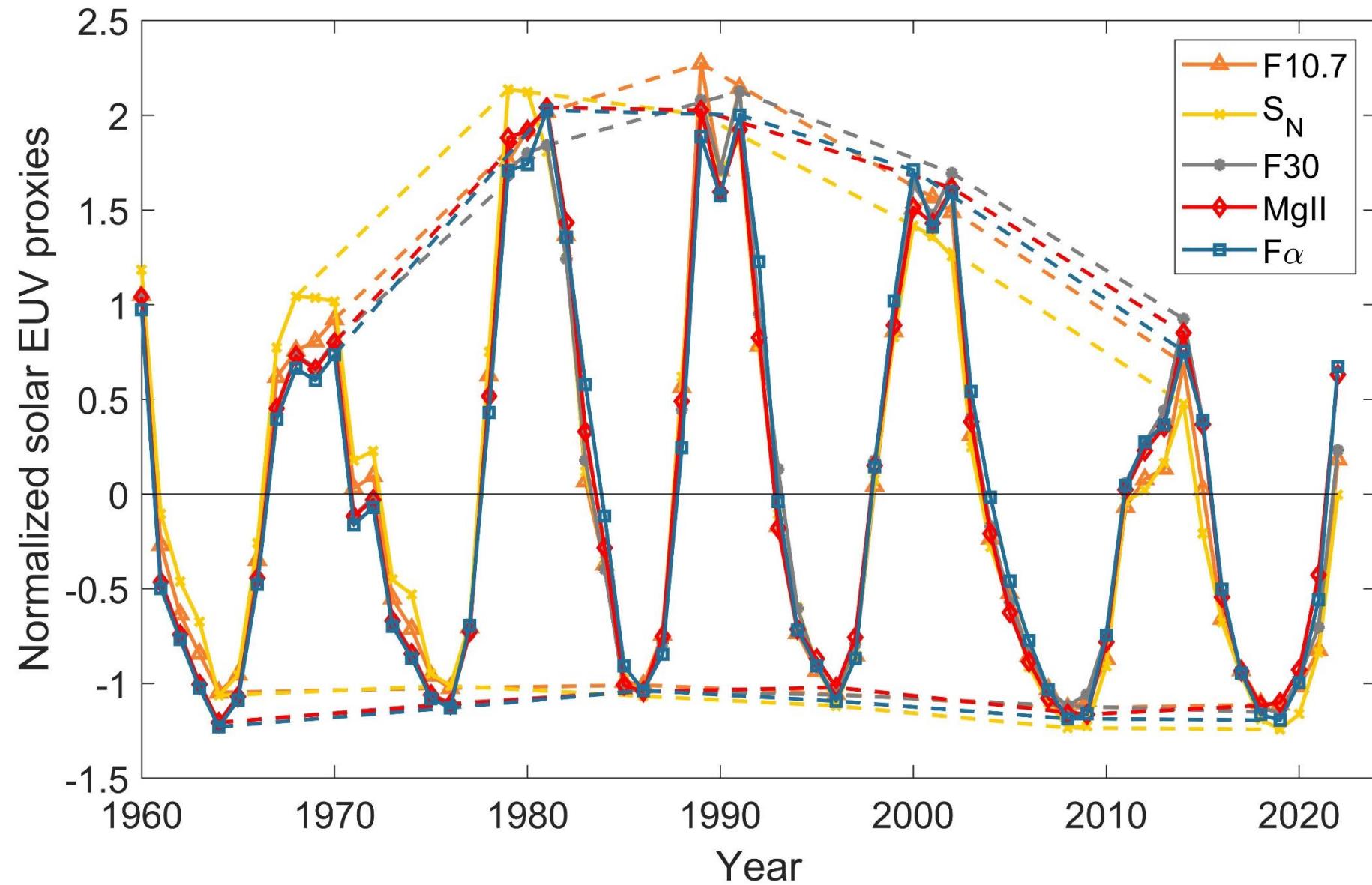


Coeficiente de correlación al cuadrado  
o coeficiente de determinación  
(% de varianza explicada)

	Mg II	Lyman $\alpha$	F10.7	Rz	F30	He II
Mg II	1					
Lyman $\alpha$	0.987	1				
F10.7	0.984	0.970	1			
Rz	0.974	0.959	0.987	1		
F30	0.987	0.982	0.987	0.974	1	
He II	0.940	0.935	0.962	0.974	0.941	1

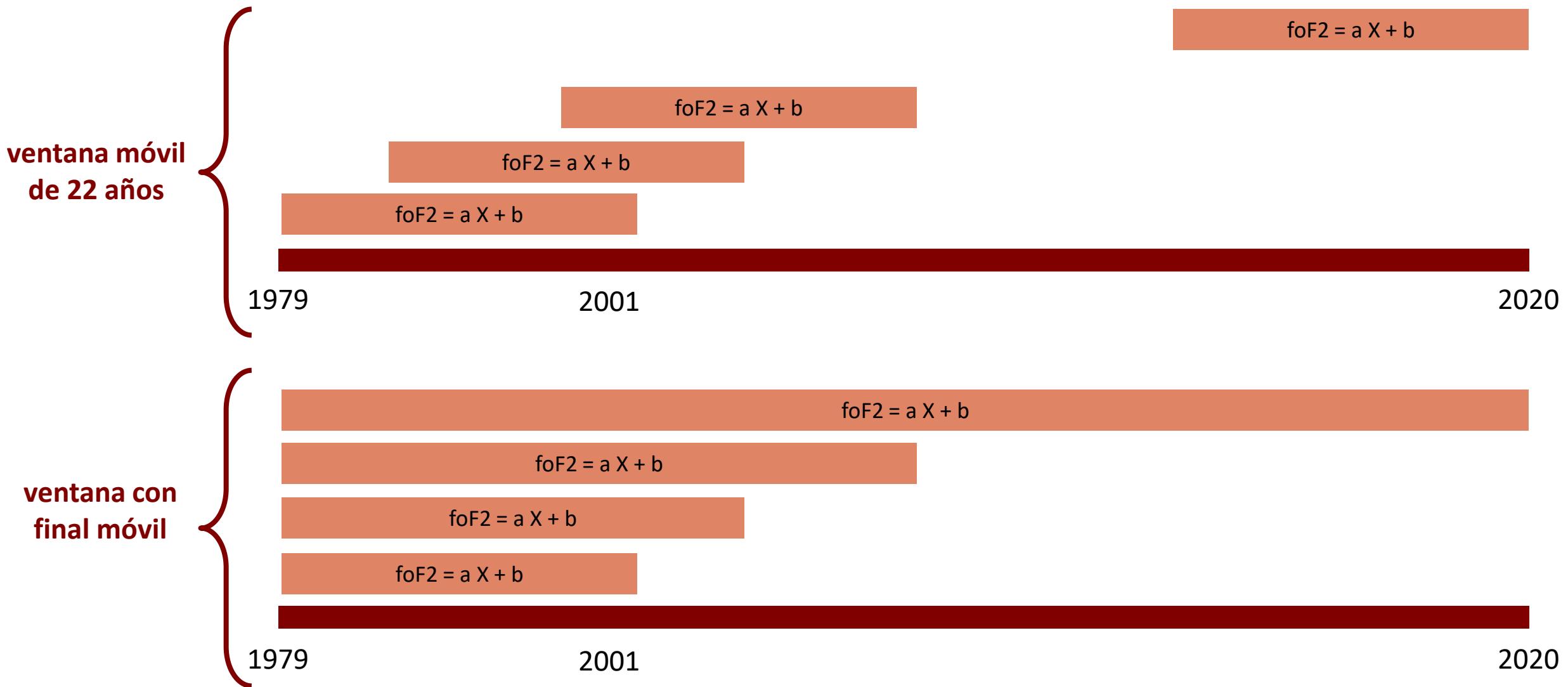
# Proxy EUV usado en el filtrado de foF2 (1960-2022): Mg II, Lyman $\alpha$ , F10.7, Rz, F30, He II



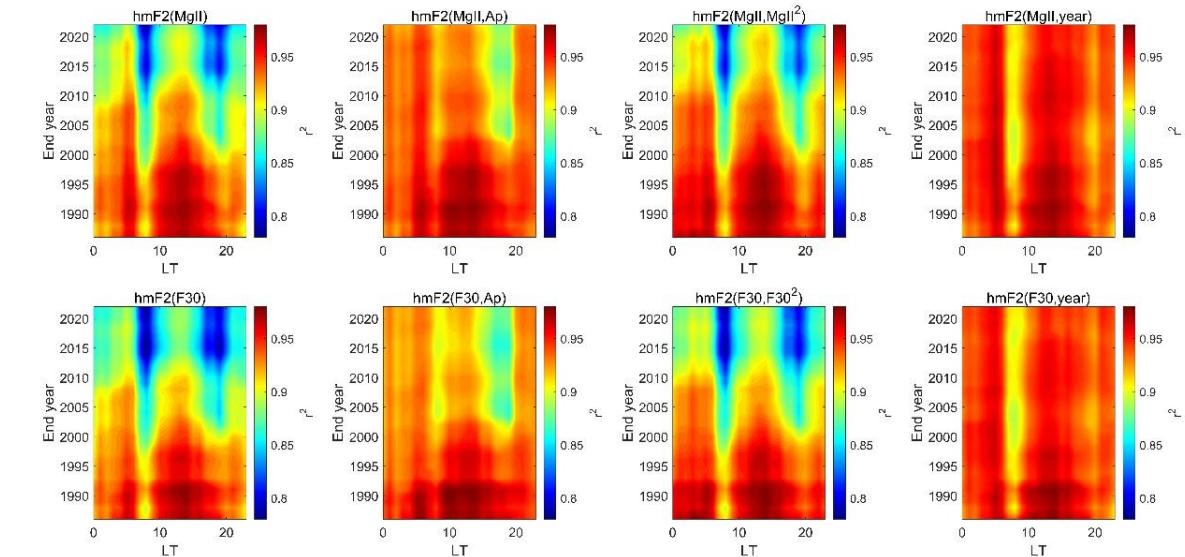
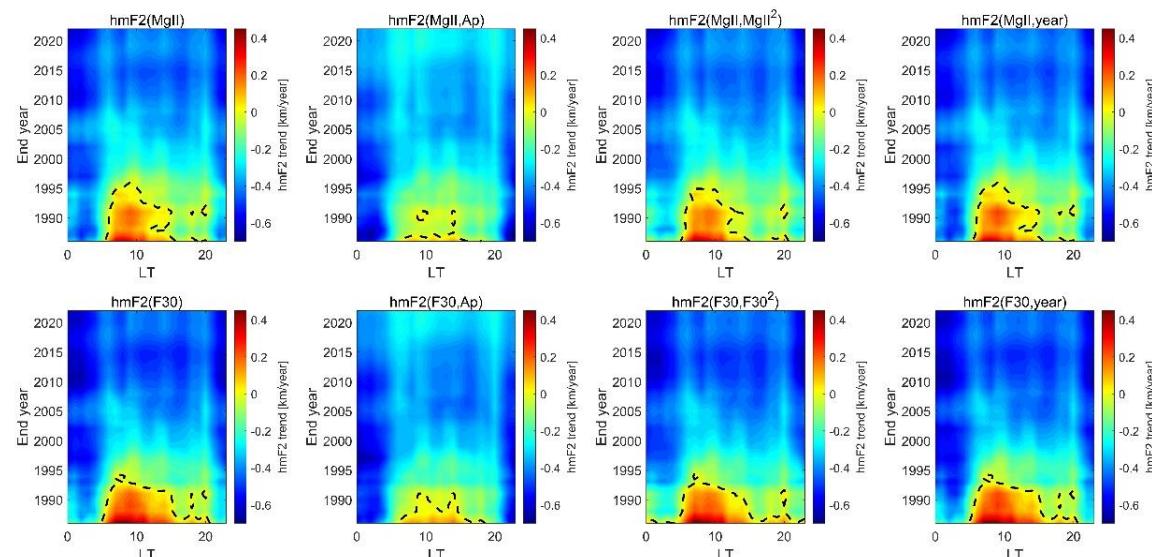
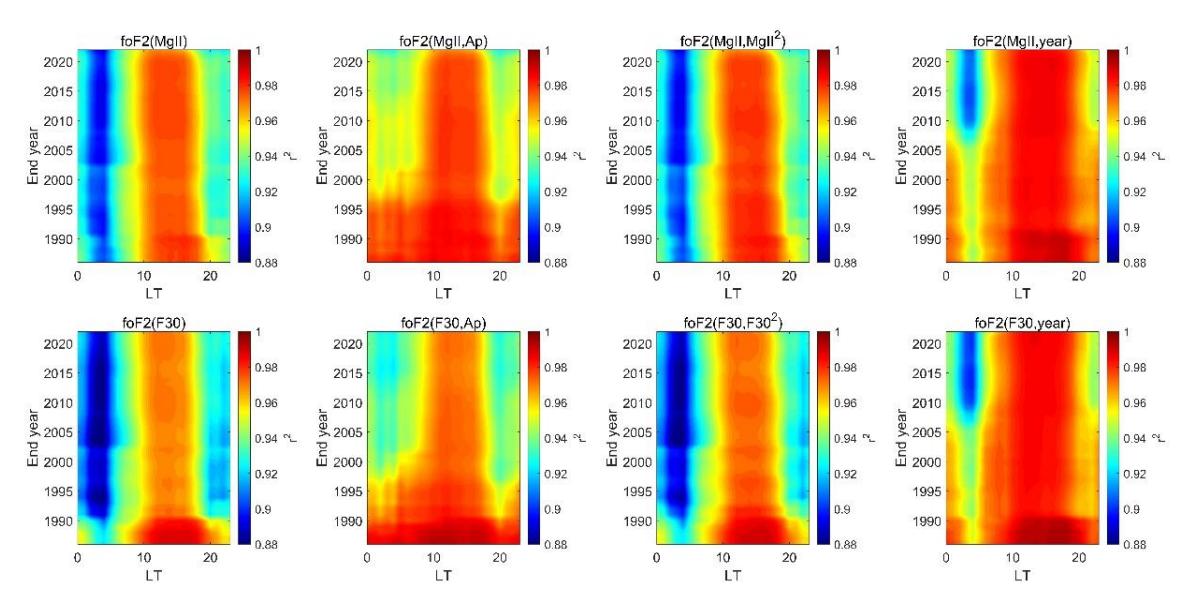
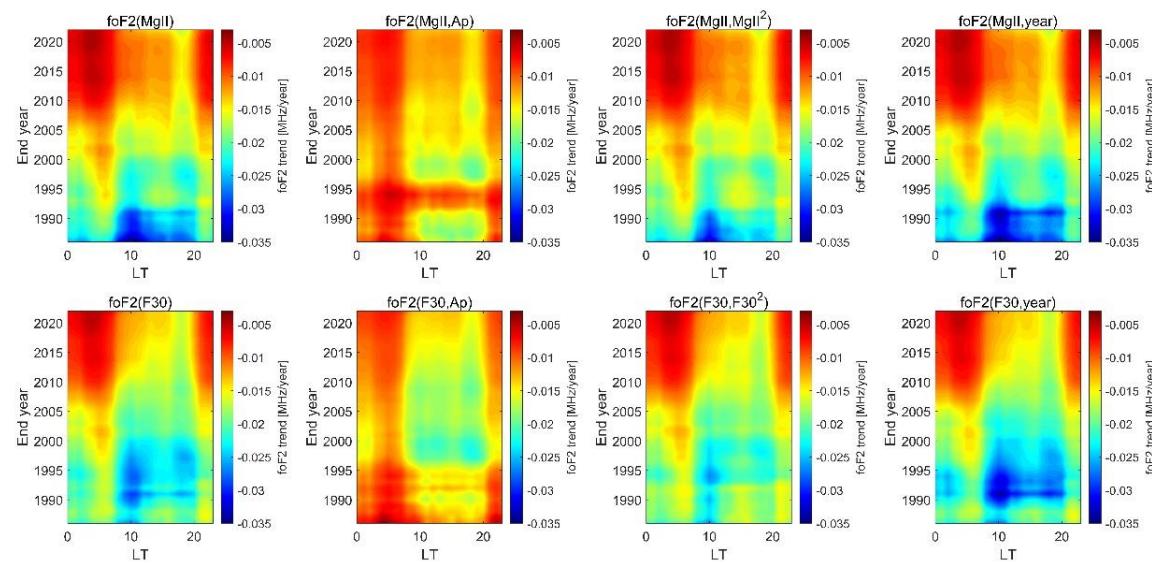


## Más problemas ...

Análisis de “estabilidad” de la asociación de foF2 con X a través de “regresión móvil”:



Que pasa a medida que actualizamos las series de tiempo desde 1996 hasta 2022 ? Es decir, que ocurría a medida que se incorporan los dos últimos mínimos solares que son mínimos "atípicos"?



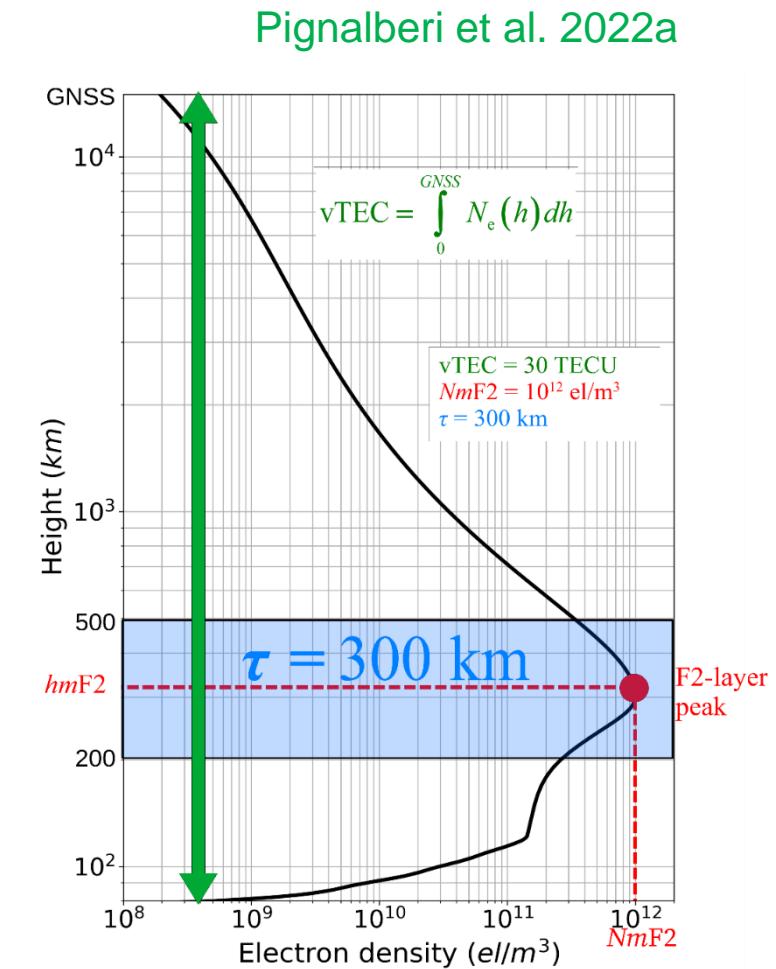
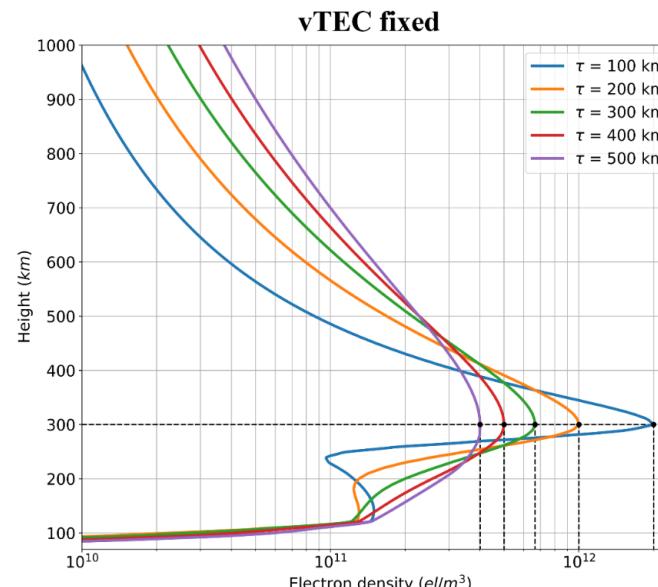
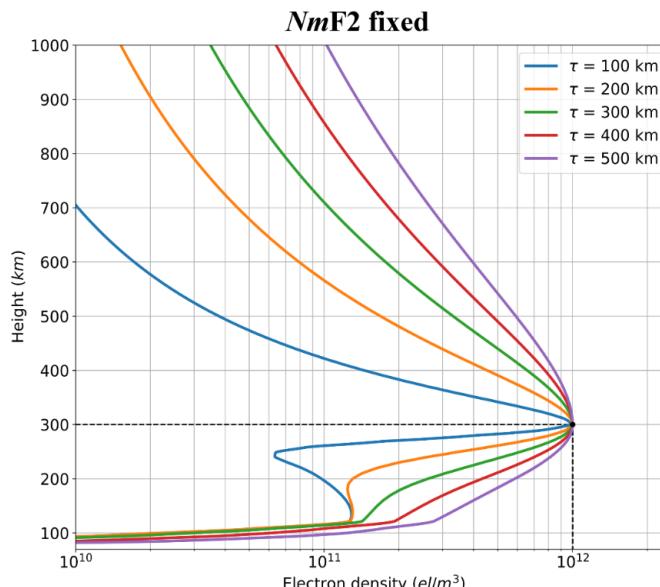
Trabajo en curso:

## Espesor equivalente de la ionosfera, $\tau$

The **ionospheric equivalent slab thickness**  $\tau$  is defined as the ratio between **vTEC** and **NmF2**:

$$\tau[m] = \frac{\text{vTEC}[el/m^2]}{NmF2[el/m^3]}$$

- represents the **thickness of an ideal ionospheric slab** of constant electron density equal to **NmF2** with a **vTEC** value equivalent to that of the entire vertical electron density profile.
- describes the **shape of the vertical electron density profile**.



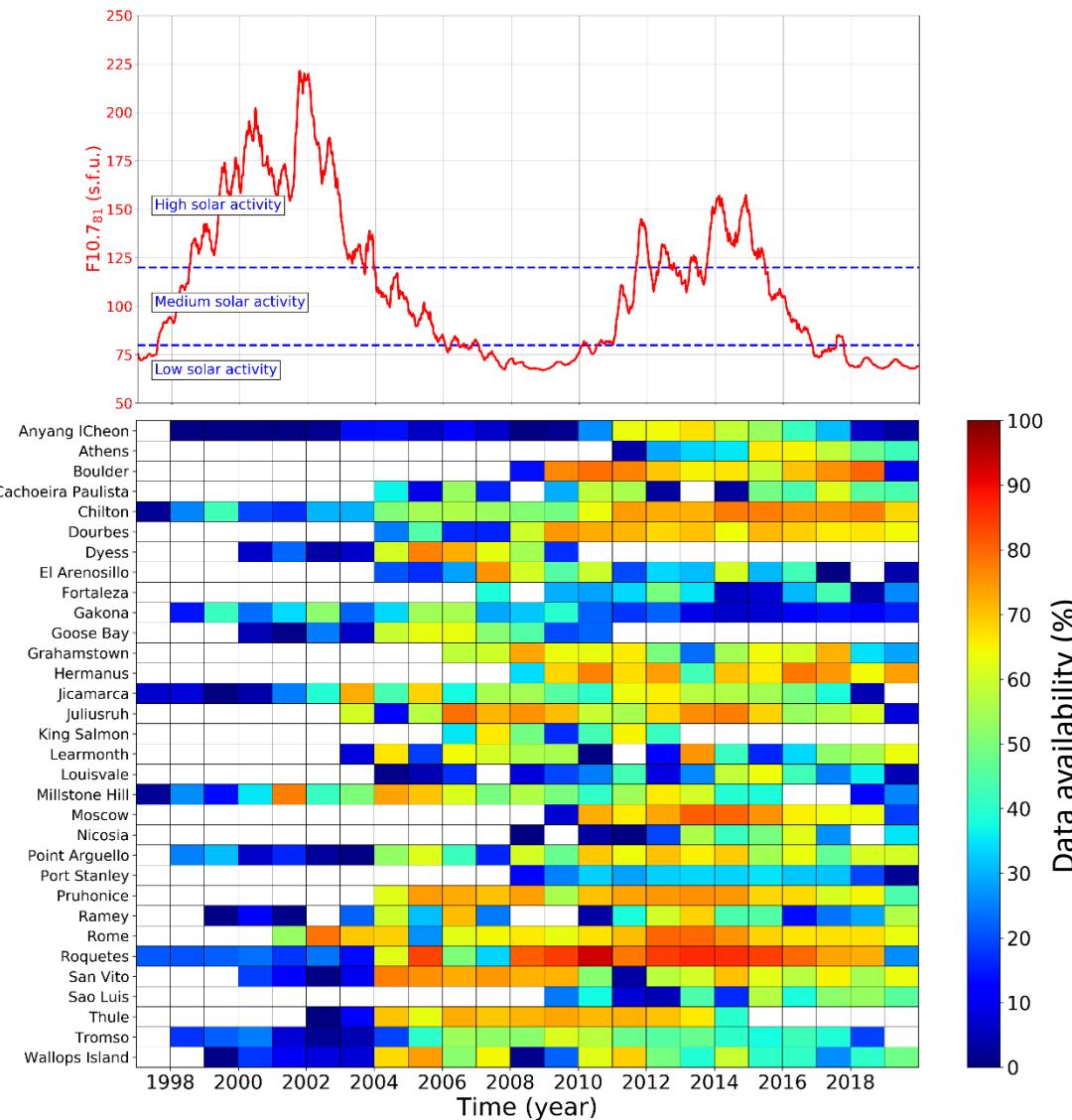
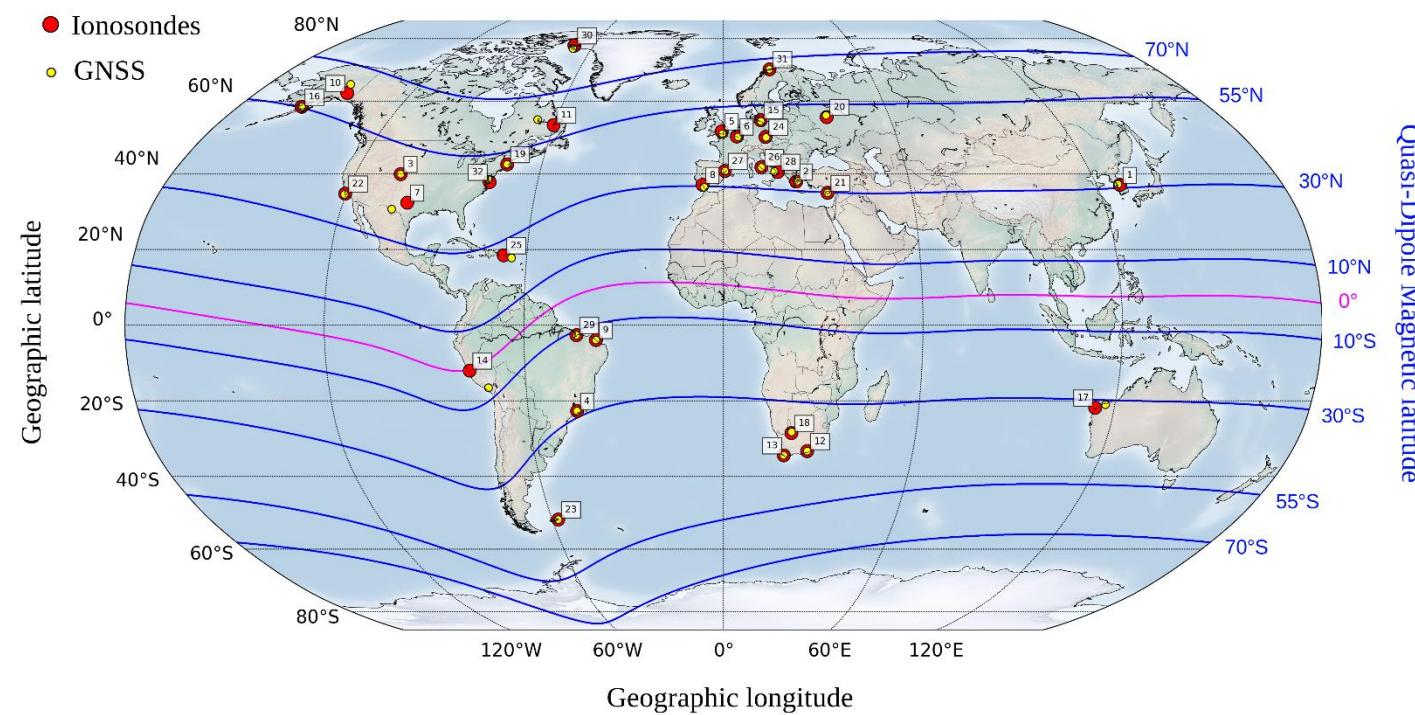


INGV

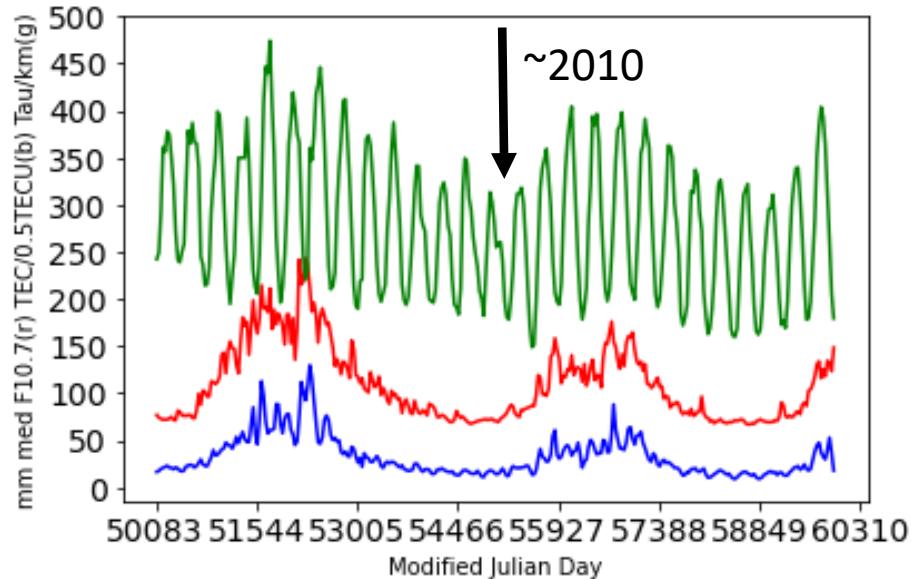
# Dataset of experimental slab thickness

Pignalberi et al. 2022a

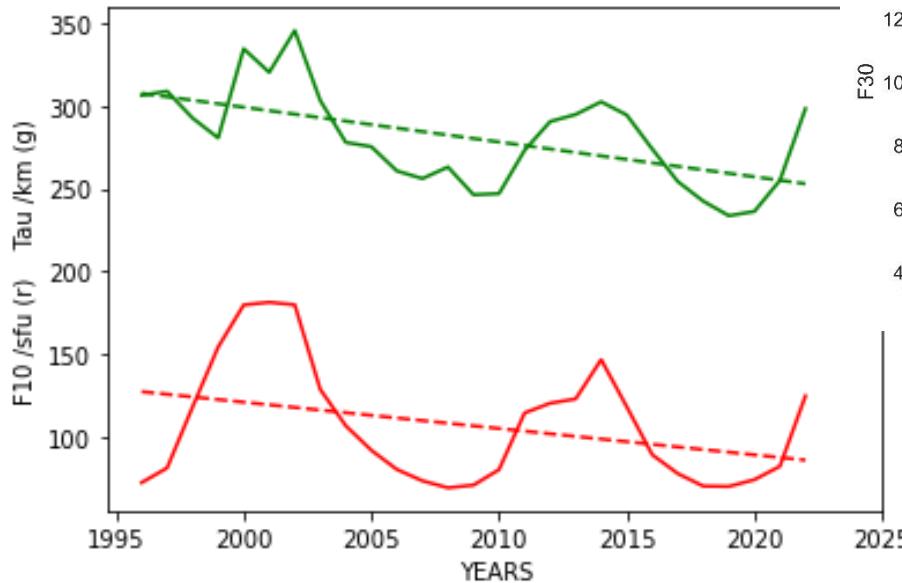
- **NmF2** from **32 ionosondes** located all over the world;
- **vTEC** from **32 ground-based GNSS receivers co-located with ionosondes**;
- **15 minutes time resolution**, due to the ionosondes time sampling;
- **Data from 1997 to 2023**, i.e., covering the last two solar cycles;
- **Only magnetically quiet data**:  $-25 \text{ nT} \leq \text{Sym-H} \leq 5 \text{ nT}$  and  $\text{AE} \leq 300 \text{ nT}$ .



# Norbert Jakowski's results (German Aerospace Center, Institute for Solar-Terrestrial Physics, Neustrelitz, Germany)



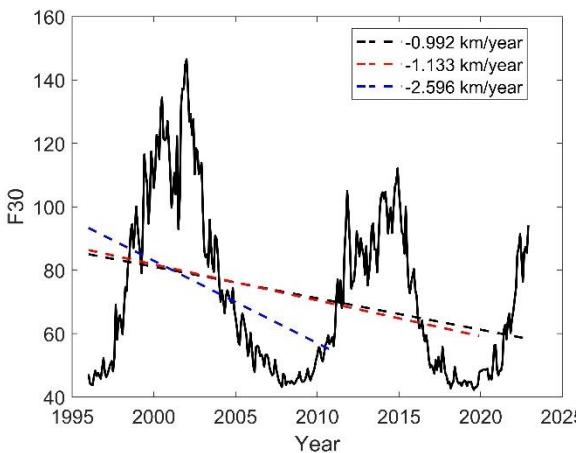
Monthly medians of equivalent slab thickness,  $\tau$  (green), and TEC over Juliusruh at 13 LT (blue) in comparison with monthly means of F10.7 (red).



Yearly averaged equivalent slab thickness (green) and Solar radio flux index F10.7 (red) over Juliusruh at 13 LT. Decrease rates of linear regression line:  $\tau$ : -2.1 km/y F10.7: -1.6 sfu/y

$$\tau = 4.13 H \quad \text{where} \quad H = \frac{k \cdot T_n}{m \cdot g}$$

**Norbert:** "The focus on daytime values of the slab thickness around noon is not only needed for Tn determination. I recommend to principally separate daytime and nighttime data from trend analyses if reference is made to solar activity indices." More explanation on Thursday 10:50 talk: "**Long-term solar activity impact on ionospheric ionization**"

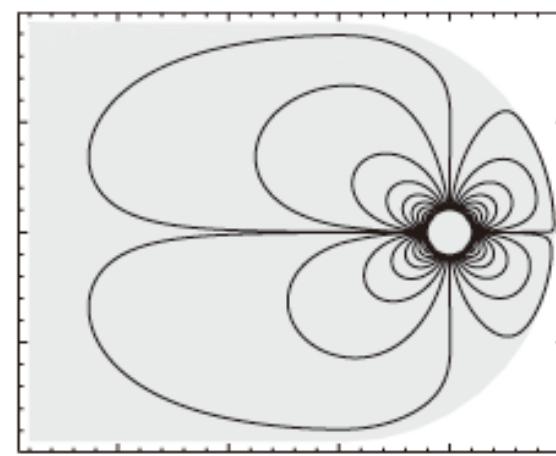
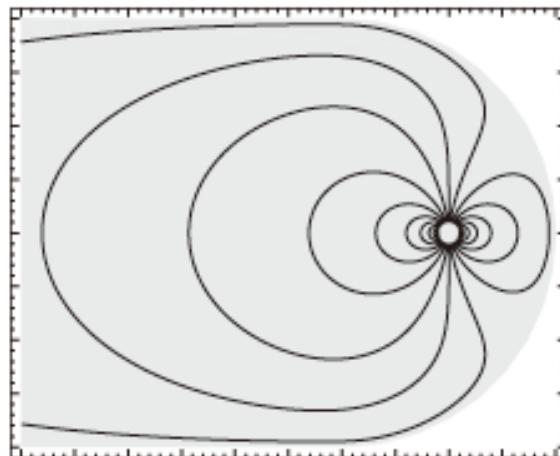


## Resumen & Conclusiones

- La ionosfera terrestre presenta tendencias a largo plazo que han sido de interés desde un estudio pionero en 1989, el cual sugería que el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero produciría un enfriamiento global en la atmósfera superior, además del calentamiento global en la troposfera.
- Aunque el forzante antropogénico parece ser la causa de estas tendencias, existen otros factores, como la variación secular del campo magnético terrestre.
- El efecto antropogénico, y el de otros forzantes de tendencias, es tan pequeño que todas las otras variabilidades deben filtrarse antes para hacer una correcta estimación.
- Las tendencias en la ionosfera implican cambios en la densidad electrónica, las corrientes eléctricas, la conductividad ionosférica, el índice de refracción para la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (HF), entre otros.
- Por lo tanto, también se esperan cambios en el Clima Espacial (Space Weather)
- Aunque en los últimos años se lograron avances importantes, queda aún un largo camino por recorrer para lograr una "comprensión completa" de esta problemática.

- Mientras que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero eventualmente se detendrá, el campo magnético terrestre experimentará una inversión en algún momento, mostrando una configuración completamente diferente y compleja durante la fase de transición.
- Esto implica una configuración ionosférica totalmente distinta y la aparición de anomalías, con tendencias significativas y probablemente no lineales en el muy largo plazo. Además, las condiciones para la geoefectividad de las tormentas geomagnéticas podrían volverse muy diferentes.

Not to sound alarmist, but ....



Dipolar field (now) and possible transition scenario: quadrupolar field.  
[From: Stadelmann et al. (2010), Cosmic ray and solar energetic particle flux in paleomagnetospheres, Stadelmann et al., Earth Planets Space]

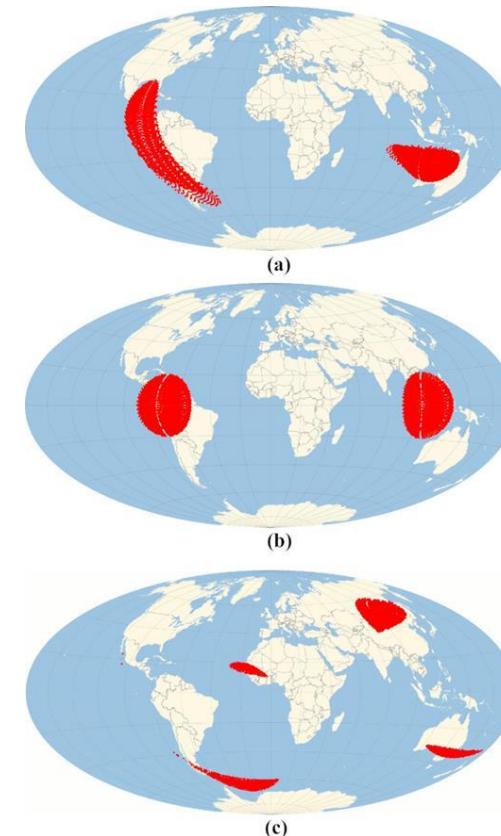


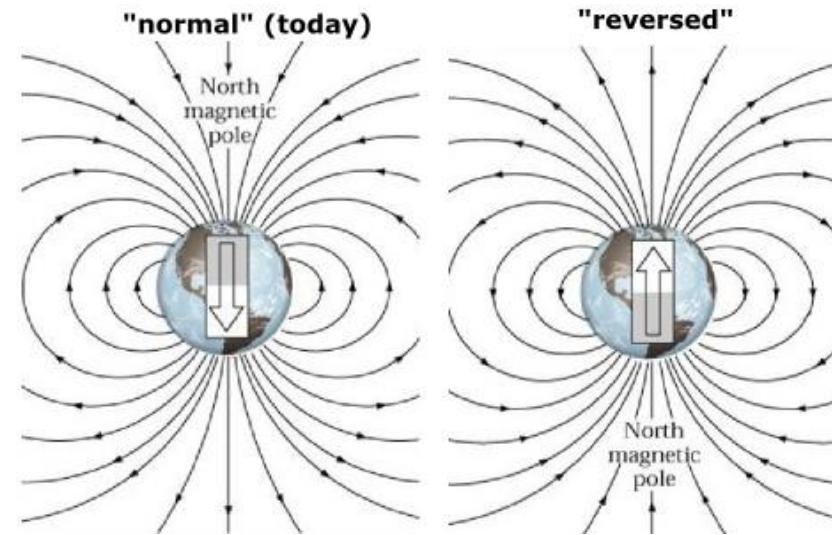
Figure 5. Polar caps' locations for (a) axial dipole collapse, (b) dipole rotation where axial dipole energy is transferred to the equatorial dipole and (c) energy cascade where dipolar energy is transferred to the quadrupolar and octupolar terms.

## ¿Y qué ocurrirá en unos ~100 mil años?

Durante un período de transición hacia una inversión de polaridad, aunque parezca un evento muy lejano en el tiempo, estos cambios sin duda superarán todo lo que podamos imaginar!  
Y... ¡serán un desafío fascinante!



Tal vez podamos ver auroras en el Caribe !!



CAN'T WAIT TO SEE YOU!

¿Y qué pasará con la ionosfera?

En general, el movimiento del plasma ionosférico está condicionado por el campo magnético, por lo que un debilitamiento del campo podría implicar un plasma con mayor libertad de movimiento.

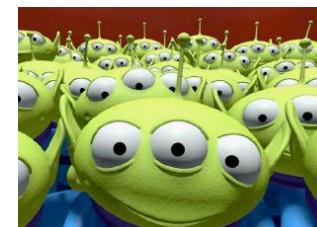


## ¿Importancia de las tendencias a largo plazo en la ionosfera?

- ✓ La ionosfera es parte fundamental del entorno del clima espacial (space weather) y desempeña un papel crucial al modular el circuito electrodinámico global, acoplarse con la magnetosfera y servir como un medio clave para las comunicaciones, el sondeo y la navegación.
- ✓ Para comprender el clima espacial y el space weather resulta esencial la comprensión de la variabilidad de la ionosfera en todas las escalas de tiempo, incluyendo las tendencias.
- ✓ Aunque las tendencias ionosféricas son débiles en comparación con otras variaciones, son "persistentes" y podrían adquirir mayor relevancia en el futuro.
- ✓ El desplazamiento relativamente rápido del ecuador magnético en algunas regiones podría tener gran importancia, considerando que muchas perturbaciones ionosféricas ocurren precisamente sobre el ecuador magnético (como las TIDs, burbujas de plasma, sporadic-E, etc.)

Por qué es importante medir y entender las variaciones a largo plazo de la atmósfera?

**Vivimos en la Tierra y queremos entender y predecir el comportamiento de la atmósfera en todas su extensión, la cual es esencial para la vida y actividades humanas.**



Why do we appear to be  
alone in the Universe?

# **Laboratorio de Ionofera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera (LIANM - FACET, UNT)**

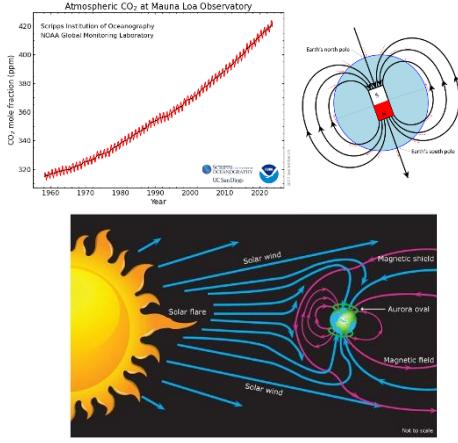
Las puertas están abiertas para quien quiera trabajar con nosotros en cualquiera de nuestras líneas de investigación, solicitar colaboración, proponer trabajos conjuntos, ...



- Página: <https://www.facet.unt.edu.ar/labatmosfera/>
- Pueden escribirnos a: [aelias@herrera.unt.edu.ar](mailto:aelias@herrera.unt.edu.ar)  
[bdeharo@herrera.unt.edu.ar](mailto:bdeharo@herrera.unt.edu.ar)
- Pueden visitarnos en el LIANM: Oficina 2-3-10  
Av. Independencia 1800, FACET, UNT  
4000 Tucumán, Argentina



Abril, 2025



# Fin

Muchas gracias por su atención !!

