

DETERMINACION DE LOS EFECTOS IONOSFERICOS SOBRE SEÑALES
TRANSIONOSFERICAS EN LA ARGENTINA. Parte I: Predicciones de la
Ionósfera Internacional de Referencia (IRI - 86)

Rodolfo G. Ezquer, Nieves Ortiz de Adler y Teresita Heredia

Laboratorio de Ionósfera, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y
Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

RESUMEN

La mayoría de los efectos que la ionósfera produce en las ondas de radio que la atraviesan son proporcionales al contenido electrónico total (TEC) -número de electrones libres presentes en una columna de sección unidad que se extiende desde el suelo hasta unos 2.000 km de altura. De estos efectos el de mayor importancia para los sistemas de detección y rastreo de misiles y satélites, posicionado de puntos geodésicos y navegación, es el tiempo de retardo de grupo (τ) que se produce en una señal transionosférica. Para una señal de frecuencia f el τ está relacionado con el TEC por la ecuación $\tau = 1,34 \times 10^{-7} \text{ TEC}/f^2$ (seg).

En este trabajo se ha puesto a punto un sistema operativo que permite calcular el TEC para cualquier punto geográfico, época del año, actividad solar y hora del día, a partir de los perfiles de densidad electrónica obtenidos con uno de los más recientes modelos ionosféricos: The International Reference Ionosphere - 1986 (IRI - 86). La integración en altura de estos perfiles da el TEC. Usando este modelo se ha calculado el TEC y el τ para distintas frecuencias de señal, actividad solar, épocas del año, horas del día y puntos geográficos de la Argentina. Los valores de TEC calculados para Tucumán se compararon con valores experimentales obtenidos en esa estación. Se observa que con el IRI - 86 es posible corregir el 70% del máximo tiempo de retardo en la mayoría de los casos analizados.

ABSTRACT

Most of the effects that ionosphere produces on the radio waves that traverse it are proportional to the total electron content (TEC) -number of free electrons in a unit area column of ionosphere from the ground to a height around 2.000 km. The more important effect for the missile and satellite detection and tracking, satellite geodesy and navigational systems, is the group time delay (τ) produced on a transionospheric radio wave. For a signal of frequency f the time delay is related with TEC by the equation $\tau = 1.34 \times 10^{-7} \times \text{TEC}/f^2$ (sec).

This work presents a system to calculate TEC for any station, season, solar ac-

2 Determinación...Parte I.

tivity and hour, starting from the electron density profiles given by a recent ionospheric model: The International Reference - 1986 (IRI - 86). The integration of these profiles gives the TEC. Using this model, TEC and τ for different signal frequencies, solar activity, seasons, hours and Argentinien stations, have been calculated. The calculated TEC values for Tucumán are compared with experimental values obtained at this station. It can be seen that, with IRI - 86, is possible to remove 70% of the maximum in the most considered cases.

INTRODUCCION

Se sabe que la ionósfera produce varios efectos en las señales de radio que la a traviesan. Estos efectos son:

1. Retardo de grupo (τ).
2. Avance de fase de la señal portadora.
3. Corrimiento Doppler en la señal portadora.
4. Rotación Faraday.
5. Refracción angular del camino de la onda a medida que esta atraviesa la ionósfera.
6. Distorsión del pulso transmitido.
7. Centelleo de amplitud y fase.

Los seis primeros son directamente proporcionales al contenido electrónico total (TEC) -números de electrones libres presentes en una columna de sección unidad que se extiende desde el suelo hasta unos 2.000 km de altura.

De los siete efectos mencionados el más importante es el retardo de grupo. La relación entre el τ y el TEC se describe a continuación.

Sea t el tiempo que tarda una señal en viajar una distancia s en el vacío, y t' el tiempo que tarda en viajar una distancia igual en la ionósfera. El retardo de grupo es:

$$\tau = t' - t \quad (1)$$

que en el caso en que la ionósfera presente el mismo índice de refracción en todo el camino, se puede escribir como:

$$\tau = \frac{s}{v_g} - \frac{s}{c} \quad (2)$$

donde v_g = velocidad de grupo en la ionósfera.

Como el índice de refracción de grupo de la señal es $\mu^g = c/v_g$, se puede escribir:

$$\tau = \frac{1}{c} (\mu' - 1) s \quad (3)$$

Dado que en realidad la ionósfera presenta un índice de refracción que varía a lo largo del camino resulta

$$\tau = \frac{1}{c} \int (\mu' - 1) ds \quad (4)$$

μ' está relacionado con el índice de refracción de fase μ por:

$$\mu' = \frac{d}{df} (\mu f) \quad (5)$$

Para una densidad electrónica N correspondiente a una frecuencia de plasma f_p , y despreciando los efectos de las colisiones y del campo magnético, lo cual es aproximadamente válido para las frecuencias usualmente utilizados en la propagación Tierra-Espacio, se tiene:

$$\mu^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} = 1 - 80,6 \frac{N}{f^2} \quad (6)$$

$$\mu = \left[1 - 80,6 \frac{N}{f^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

donde N está en elec/m³ y f en Hertz. Desarrollando el binomio de (7) y usando (5) se tiene:

$$\mu' - 1 = \frac{d}{df} (\mu f) - 1 = - \frac{d}{df} \left[\frac{40,3}{f} N \right] = 40,3 \frac{N}{f^2} \quad (8)$$

con lo que el retardo de grupo resulta:

$$\tau = \frac{1}{c} \frac{40,3}{f^2} \int N ds \quad (9)$$

donde τ está en seg y c en m/seg.

Para el caso de incidencia vertical es:

$$= \frac{1}{c} \frac{40,3}{f^2} \int N dh = \frac{1}{c} \frac{40,3}{f^2} (\text{TEC}) \quad (10)$$

o sea:

$$\tau = \frac{1,34}{f^2} \cdot 10^{-7} \quad (\text{TEC})$$

4 Determinación...Parte I

Esta última ecuación muestra que, para una dada frecuencia, τ es directamente proporcional al TEC. En otras palabras, hablar de τ es equivalente a hablar del TEC.

En consecuencia, los sistemas que se ven afectados por la ionósfera (de navegación por satélites, de rastreo de satélites, etc.) deben conocer el valor del TEC para efectuar las correcciones necesarias, y para ello se mide este parámetro o se recurre a modelos ionosféricos para predecir su valor.

En este trabajo se calculó el τ para distintas frecuencias de señal, latitudes (cubriendo territorio argentino), actividad solar, épocas del año y horas del día, usando el modelo International Reference Ionosphere (IRI - 86)(Bilitza, 1986).

MODELO Y RESULTADOS

El IRI - 86 es un modelo empírico que provee perfiles en altura de los principales parámetros de la ionósfera como: densidad electrónica, temperatura de neutros, iones y electrones, y densidad de iones.

En cuanto al perfil de densidad electrónica, el IRI divide a la ionósfera en 6 regiones, a saber:

- 1) Región F superior (ó de tope)
- 2) Base de la Región F2
- 3) Región F1
- 4) Región intermedia
- 5) Región del Valle "E"
- 6) Región D.

Cada una de estas regiones está dada por una descripción matemática.

El programa de cálculo del IRI requiere como datos de entrada, entre otros, los valores de la frecuencia crítica de la región F2 (f_oF2) y la altura del pico de N (hm). Este programa tiene también la posibilidad de generar los valores de estos datos usando la base de datos del Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR). En este trabajo (f_oF2) y hm fueron obtenidos de mediciones de ionosondas y se los introdujo como parámetros de entrada.

El TEC se calculó como la integración en altura del perfil de N dado por el IRI, el que llega hasta los 1.000 km de altura. El contenido electrónico entre 1.000 y 2.000 km se desprecia. En efecto, si N permaneciera constante entre 1.000 y 2.000 km e igual a $N(1000)$, sería

$$\int_{1000}^{2000} N dh = 0,1 \text{ TEC}$$

La figura 1a muestra los valores de contenido electrónico dados por el IRI-86 en función de los años, para Tucumán (latitud dip = -12°), así como los tiempos de

retardo para 100, 500 MHzertz y 1 GHzertz (τ_1 , τ_2 y τ_3).

Se han elegido los meses de setiembre (.-.) y abril (x-x) como representativos de época equinoccial y de julio (+-+) para el solsticio de invierno.

Para el solsticio de verano no se ha podido calcular el TEC debido a la falta de datos de foF2. Esta figura corresponde a la hora de máximo foF2 para la cual es de esperar los mayores valores de TEC y por lo tanto del tiempo de retardo.

Para los equinoccios de setiembre y abril la hora de máximo está entre las 15 y 16 TL en períodos de mínima actividad solar (1976 - 1977) y entre las 17 y 18 TL para actividad máxima (1980).

La figura 1b muestra los valores de TEC y τ para las mismas condiciones, pero a las 12 TL.

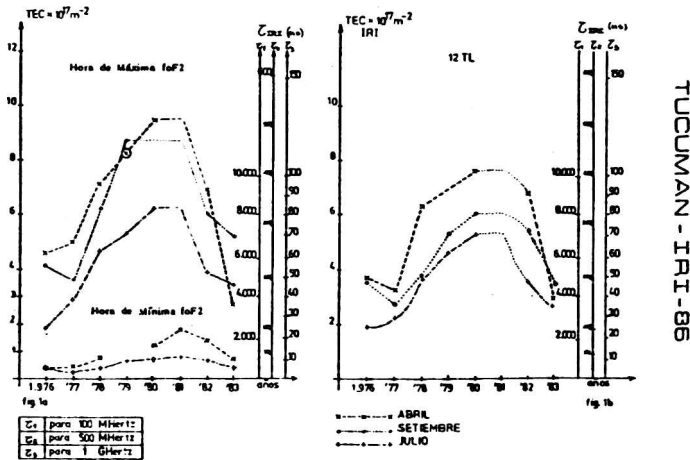


Fig. 1.a: Contenido electrónico y tiempo de retardo en función de los años para las horas de máxima y mínima foF2, calculados con el IRI - 86.

Fig. 1.b: Idem para las 12 TL.

La figura 2 muestra la variación del flujo solar en F10.7 cm en función de los años. De las figuras 1a, 1b y 2 se ve que los valores más altos de TEC ($\delta \tau$) corresponden a los años de actividad solar mayor.

La variación del TEC con la actividad solar es grande. Para períodos de solsticio los valores son de $2 \times 10^{17} m^{-2}$ a $6 \times 10^{17} m^{-2}$ cuando la actividad solar va de un mínimo a un máximo.

Para períodos equinociales varía desde $4 \times 10^{17} m^{-2}$ a $9 \times 10^{17} m^{-2}$.

Las figuras 1a y 1b indican el ensanchamiento de los perfiles de densidad elec-

6 Determinación...Parte I.

trónica por efecto de la anomalía ecuatorial (AE) sobre todo en período equinoccial.

Considerando los valores de TEC del año 1980 en abril - setiembre a la hora del máximo foF2 (18 TL), el TEC es del orden de $9,5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ y a las 12 TL es de 7,5 en abril y 6 en setiembre.

En el solsticio de invierno el valor del TEC es del orden de $6 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ a la hora de máximo foF2 ($\sim 18 \text{ TL}$) y $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ a las 12 TL.

En meses equinocciales el TEC muestra una diferencia del orden del 50% (setiembre) entre las 18 y 12 TL, lo cual se debe tener en cuenta cuando se requiera conocer el TEC.

La figura 1a muestra también los valores del TEC de abril y julio para las 06 TL, hora de mínimo foF2.

Se ve que en los años de actividad solar alta el valor de las 06 TL en abril es comparable al máximo de julio de actividad solar mínima.

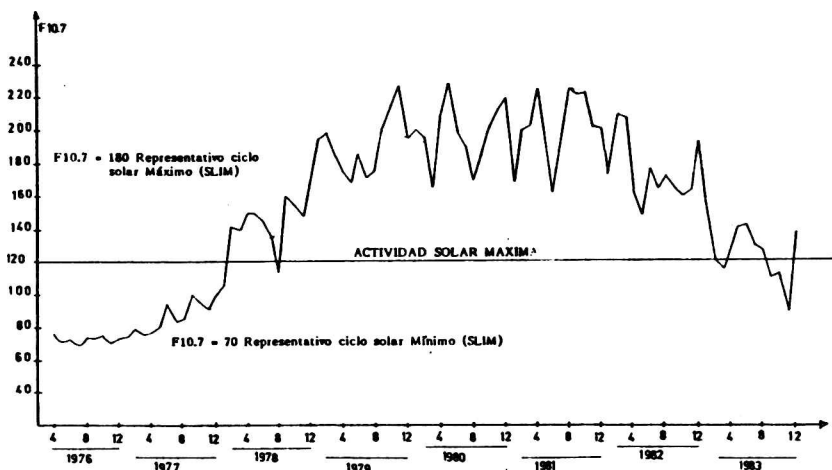


Fig. 2: Flujo solar en F10.7 cm en función de los años.

La figura 3 muestra el TEC experimental medido sobre Tucumán ($26,9^{\circ} \text{ S}$; $65,4^{\circ} \text{ W}$) (Ezquer y Adler, 1989) ($x-x-x$) y el calculado con el IRI - 86 (.....) para algunos meses de 1982 (actividad solar intermedia). Las barras verticales indican $\pm 30\%$ del valor experimental.

Se observa que el modelo:

- tiene buenas predicciones de las horas de ocurrencia de los máximos valores de TEC.
- presenta una sobreestimación del TEC alrededor del mínimo diario y una subestimación del mismo alrededor del máximo.
- para algunos meses los valores calculados alcanzan alrededor del

del 70% del máximo TEC medido. Para setiembre este porcentaje es menor del 70%.

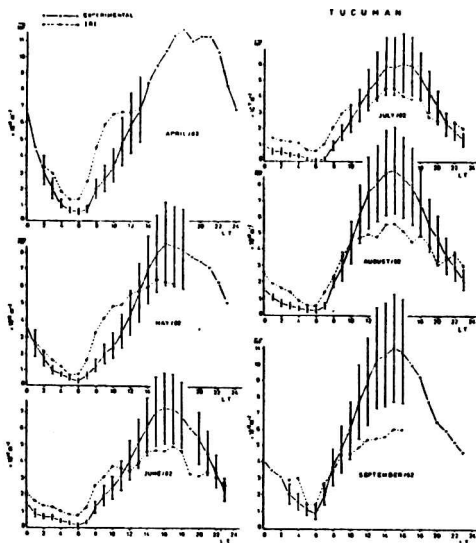


Fig. 3: Comparación entre el TEC medido en Tucumán y el calculado con el IRI - 86.

La figura 4 muestra la variación latitudinal del TEC (latitud Dip) para períodos de:

- baja actividad solar (1976 - 1977)
- actividad intermedia (78 - 79 - 82 - 83)
- actividad alta (79 - 80 - 81 - 82)

para el mes de abril.

Los valores del TEC de la figura 4a corresponden a la hora de máximo foF2 sobre Tucumán, y los de la 4b, a las 12 TL.

La figura 5 es una superposición de las figuras 4a y 4b para mínima y máxima actividad solar. Para las curvas que corresponden a actividad solar alta, el TEC de las 18 TL es mayor que el de las 12 TL, hasta aproximadamente -26° de latitud dip.

En cambio para mínima actividad el TEC de las 18 TL es mayor que el de las 12 TL hasta -15° de latitud dip. Esto indicaría que el aporte de ionización de la AE ocurre más tarde y afecta a latitudes mayores durante alta actividad solar.

La figura 6 muestra la variación latitudinal de la densidad electrónica del pico de la región F2 (Nmax) en condiciones idénticas a las de la figura 4.

Es evidente que el TEC dado por el IRI - 86 está fuertemente determinado por el Nmax.

8 Determinación... Parte I.

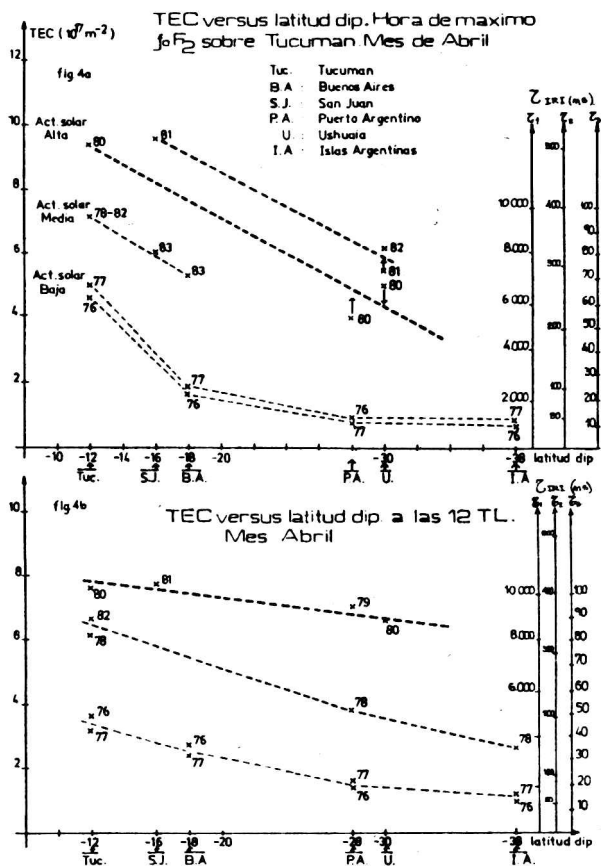


Fig. 4a: TEC y Z_{IRI} , calculados con el IRI - 86, en función de la latitud dip para la hora de máximo f_oF_2 sobre Tucumán, correspondientes al mes de abril en períodos de distinta actividad solar.

Fig. 4b: Idem para las 12 TL.

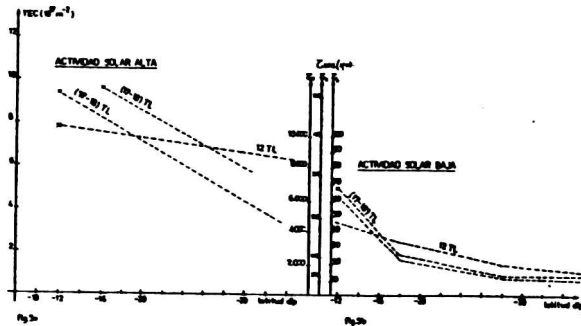


Fig. 5a.: Superposición de las gráficas de TEC y τ , calculados con el IRI - 86, versus latitud dip correspondientes a las 12 TL y a la hora de máximo foF2 sobre Tucumán, para alta actividad solar.

Fig. 5b: Idem para baja actividad solar.

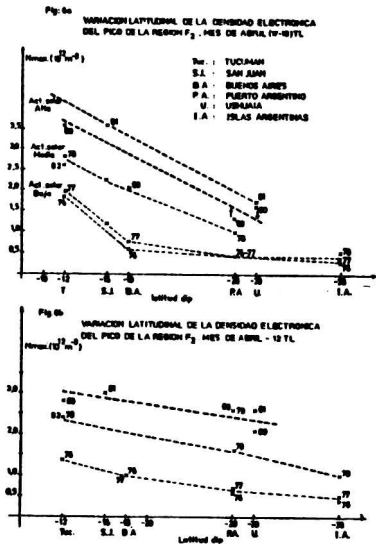


Fig. 6a: Nmax experimental en función de la latitud dip para la hora de máximo foF2 sobre Tucumán, correspondiente al mes de abril en períodos de distinta actividad solar.

Fig. 6b: Idem para las 12 TL.

CONCLUSIONES

- 1) Se ha puesto operativo un programa de cálculo que permite determinar el valor del TEC, y a través de éste, los efectos en las ondas transionosféricas que dependen de él, haciendo uso del IRI - 86.
- 2) Los resultados indican que el valor del contenido electrónico depende fuertemente de la actividad solar y de la época del año. Para período equinoccial los mayores valores de TEC en actividad solar mínima son del orden de $4,5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ y para actividad solar máxima de $\sim 9 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$. En solsticios los valores son 2×10^{17} y 6×10^{17} respectivamente. Estos valores corresponden a Tucumán. Esto muestra que la diferencia entre equinoccio y solsticio es comparable para mínima y máxima actividad.
- 3) Sobre Tucumán el mayor τ ocurre en horas de la tarde, especialmente en equinoccios durante alta actividad solar. Para setiembre, en alta actividad solar, la diferencia del TEC entre las 12 y 18 TL es del 50%. Esto se debería a la influencia de la AE.
- 4) El aporte de ionización de la AE ocurre más tarde y afecta a latitudes mayores durante alta actividad solar.
- 5) El TEC dado por el IRI - 86 depende fuertemente de foF2. De manera que es conveniente usar valores experimentales de foF2 y no la base de datos del CCIR para el cálculo del TEC. Los valores interpolados del TEC, a partir de su variación latitudinal, serían mejores que los calculados con el CCIR.
- 6) La comparación con datos experimentales con Tucumán muestran que los valores del TEC, y por lo tanto de todos los efectos que de él dependen, pueden predecirse hasta en un 70% en horas de máximo TEC (mayor τ) en general.
- 7) Es de esperar que el IRI tenga mejores predicciones de TEC en latitudes en donde la influencia de la AE es menor que sobre Tucumán.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente subvencionado por el CONICET a través del PRONARP. Rodolfo G. Ezquer es investigador del CONICET.

Los autores agradecen a Ricardo J. Ezquer la colaboración brindada en la obtención de los datos y la confección del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Bilitza, D., 1986: International Reference Ionosphere: Recent Developments; Radio Science, 21, 343.
- Ezquer, R.G.; Adler N.O. de, 1989: Electron content over Tucumán; Journal of Geophysical Research, 94 A7, 9029.