

**PREDICCIONES A CORTO PLAZO DE LAS FRECUENCIAS CRÍTICAS,
DE LAS FRECUENCIAS MÁXIMAS UTILIZABLES DE EXPLOTACIÓN
Y DEL CONTENIDO ELECTRÓNICO TOTAL**

(Programa de Estudios 27C/6)

(1982-1986-1990)

1. Introducción

Es sabido que, tanto en las épocas de calma solar como durante las tormentas magnéticas, los valores diarios de foF2 varían de un 15% a un 20%, aproximadamente, con respecto al valor mediano mensual de foF2. Estas variaciones pueden superponerse a desplazamientos ascendentes o descendentes más lentos de los valores a lo largo de varios días. Convendría predecir todas estas variaciones, con miras a la eficacia de las radiocomunicaciones.

King y Slater [1973] han señalado la necesidad de predecir las variaciones de un día a otro de la ionosfera y han mostrado que, en latitudes medias, la gama mensual del cuartilo de los valores diarios observados de foF2, en un lugar y a una hora local determinados, es dos veces superior, por término medio, y cinco veces superior, en verano, al error del valor mediano correspondiente predicho por el Informe 340. Los diagramas dados por Wilkinson [1979] muestran claramente la dispersión de foF2 en las estaciones ionosféricas australianas de latitudes bajas a altas. Rush y otros [1974] han estudiado las consecuencias de la variabilidad diaria de la región F2 en circuitos oblicuos de ondas decamétricas, simulando las características de los circuitos mediante técnicas de trazado del rayo.

La predicción de las variaciones diarias de las regiones E y F1 no presenta gran dificultad ya que éstas pueden representarse por los valores medianos mensuales de foE y foF1 [Rush y Gibbs, 1973].

El método básico empleado en la predicción a corto plazo de parámetros ionosféricos es la extrapolación de una serie de observaciones pasadas, partiendo de la hipótesis de que la tendencia actual se mantenga al menos en un futuro próximo. La extrapolación puede hacerse sobre el propio parámetro ionosférico (por ejemplo, foF2), sobre un índice derivado de parámetros ionosféricos o sobre un parámetro físico que guarde una correlación adecuadamente elevada con el parámetro ionosférico.

Las predicciones pueden hacerse con distintas antelaciones, según la fidelidad con que hayan de seguirse las variaciones de la ionosfera y el intervalo de muestreo ha de ajustarse a la antelación. Por ejemplo, si en una hora se producen considerables variaciones de la ionosfera, habría que efectuar observaciones cada 5 a 10 min y hacer las predicciones con antelaciones similares.

Rush [1976] ha descrito detalladamente la utilidad y requisitos de una red de observaciones ionosféricas, en tierra y a bordo de satélite, cuyas mediciones habrán de utilizarse para la predicción a corto plazo de las condiciones de propagación de las radiocomunicaciones. Sin embargo, conviene señalar que las correlaciones relativamente altas encontradas por Rush corresponden a días de fuerte perturbación (es decir, días de tormenta ionosférica), mientras que en días en que las desviaciones con respecto a los valores medianos son relativamente pequeñas no siempre se obtiene correlaciones tan elevadas [McNamara y Wilkinson, 1986; Milsom, 1986]

* Este Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 3 y 8.

2. Predicciones a corto plazo de foF2 y de la MUF de explotación

2.1 Causas de las variaciones de la MUF a corto plazo

Las variaciones a corto plazo de las condiciones ionosféricas debidas a fulguraciones solares, a las corrientes de viento solar de gran velocidad procedentes de los huecos de la corona y a las variaciones del flujo de ionización del Sol se tratan en el Informe 727. En general, las variaciones debidas a fulguraciones solares y a los huecos de la corona tienen un momento de comienzo bastante bien definido, pueden relacionarse con el fenómeno solar que los causa y pueden preverse con cierto éxito.

Incluso en condiciones de calma desde el punto de vista magnético, la ionosfera presenta variaciones de un día a otro debidas a cambios del flujo UV ionizante del Sol y a cambios del viento solar y su interacción con la magnetosfera y la ionosfera. En este último caso, el efecto total es sumamente complejo, y no se ha establecido una cadena causal completa. El estudio de las variaciones mencionadas en primer término presenta asimismo problemas insolubles, porque la medición del flujo UV plantea grandes dificultades.

Superpuestas a estas variaciones existen otras del orden de 10 minutos a unas cuantas horas, debidas a las perturbaciones ionosféricas itinerantes (Travelling Ionospheric Disturbances-TID), que constituyen en realidad la identificación ionosférica de las ondas gravitacionales en la atmósfera neutra [Hines, 1974]. Se ha observado que las grandes TID se originan en latitudes elevadas junto con grandes perturbaciones geomagnéticas [Francis, 1975; Richmond y Roble, 1979], en tanto que otras más pequeñas tienen al parecer un origen meteorológico local [Bertin y otros, 1978].

Las TID pueden modificar foF2 en 1 ó 2 MHz, e introducir múltiples componentes de efecto Doppler que dan lugar a desvanecimientos periódicos largos y a la consiguiente disminución de la calidad de circuito. Sin embargo, los efectos de las TID pueden suprimirse a menudo utilizando la diversidad espacial o de polarización.

2.2 Predicciones que utilizan parámetros solares y geofísicos

Se han realizado predicciones a corto plazo de foF2 relacionando los cambios de foF2 con los cambios correspondientes de variables geofísicas elegidas, como el flujo solar en 10,7 cm y el índice geomagnético, K_p [Bennett y Friedland, 1970; Ichinose y otros, 1980]. El inconveniente de un enfoque de esta índole es que hay que comenzar por predecir las variables geofísicas independientes de las que se supone dependen las variaciones de foF2. Incluso si esto pudiera hacerse, la predicción de foF2 sólo tendría un éxito limitado [McNamara, 1976a; Wilkinson, 1979].

Está bien establecida la alta correlación entre los valores medios a largo plazo del flujo de radiación solar en 10,7 cm con los parámetros ionosféricos, lo que ha llevado al uso de índices de predicción ionosférica basados en el flujo en 10,7 cm (Recomendación 371). Aunque esta elevada correlación sugiere la posibilidad de elaborar un sistema de predicción a corto plazo basado en la predicción del flujo en 10,7 cm con una antelación de días y semanas, en realidad la correlación entre el flujo en 10,7 cm y la foF2 para intervalos de tiempo reducidos es limitada. Ello se debe probablemente a que el flujo solar UV que ioniza la ionosfera y la relación entre los dos flujos no es conocida para intervalos de tiempo reducidos [Hall y otros, 1969; Hall y Hinteregger, 1970].

Se ha tenido un cierto éxito en la utilización de valores medios a largo plazo del flujo en 10,7 cm [McNamara, 1976a; Da Rosa y otros, 1973], aunque en general la correlación entre valores diarios del flujo y foF2 o CET no es suficientemente elevada para obtener predicciones útiles de los últimos parámetros.

Zevakina y Lavrova [1980] han constatado una correlación entre la dirección del campo magnético interplanetario (Interplanetary Magnetic Field - IMF) y el sentido de la desviación de foF2 de su valor mediano. En los días en que el IMF apunta fuera del Sol, los valores de foF2 en latitudes elevadas y medias son, en la mayoría de los casos, más elevados que los valores medianos, en tanto que en los días en que el IMF se dirige al Sol, los valores son más bajos. La dirección de la componente del IMF perpendicular a la eclíptica también afecta al sentido de las desviaciones de foF2 de sus valores medianos.

Estas relaciones entre la dirección del IMF y las desviaciones de foF2 ofrecen alguna posibilidad de predicción, pero normalmente no se dispone de mediciones del IMF en tiempo real, y las interferencias sobre su dirección a partir de magnetogramas de latitudes elevadas [Svalgaard, 1972; Fougere, 1974; Wilcox, 1972] no siempre son correctas.

Se ha elaborado un método que utiliza conjuntamente las predicciones asociadas con parámetros geofísicos y la información actualizada de sondas [Reilly y Daehler, 1986]. En ese método, el modelo de la mediana mensual estadística, normalmente basado en un número medio de manchas solares o en un flujo radioeléctrico solar de 10,7 cm, se reajusta para que se corresponda con las observaciones de sondas en un trayecto dado, definiéndose así un parámetro solar reactualizado que puede utilizarse para predecir propiedades en ondas decamétricas para otros trayectos.

Kiseliova y Zevakina [1984] informan que han conseguido en cierta medida relacionar las perturbaciones positivas de foF2 con cambios en los parámetros del viento solar, la estructura sectorial del IMF y los índices de actividad geomagnética. Zevakina [1986] presenta una reseña de los avances realizados recientemente por la URSS en la predicción a corto plazo de las perturbaciones ionosféricas.

2.3 *Predicciones utilizando parámetros ionosféricos*

Un enfoque más satisfactorio para la predicción a corto plazo de foF2, o de una MUF para determinado circuito radioeléctrico, es el esquema de predicción basado directamente en las observaciones inmediatamente anteriores de foF2 o MUF. Tales esquemas de predicción de foF2 los describen, por ejemplo, Rush y Gibbs [1973], Lyakhova y Kostina [1973], McNamara [1976b] y Wilkinson [1979].

Rush y Gibbs [1973] utilizaron un valor medio ponderado de cinco días de foF2, para predecir valores diarios y horarios de este parámetro. El método de Lyakhova y Kostina [1973] se basó en la observación de que los coeficientes de correlación entre las desviaciones de foF2 de los valores medianos siguen siendo mayores de 0,5 para hasta cuatro horas. La elevada correlación existente entre las variaciones de una hora a otra de foF2 ha sido tratada por Lyakhova [1960], Radinov [1963], Gautier y Zacharisen [1965] y Rush [1972].

McNamara [1976b] hizo predicciones de foF2 en determinada ubicación, con una antelación de hasta 3 horas, extrapolando la tendencia de las desviaciones, respecto de un valor mediano móvil de 15 días, de las observaciones realizadas durante las últimas horas. Por otra parte, Wilkinson [1979] extrapoló simplemente en el tiempo la desviación de un valor observado de foF2 respecto del valor mediano previsto de foF2. Halló que la técnica era eficaz con una antelación de hasta 3 horas.

Ames y Egan [1967], Ames y otros [1970], Krause y otros [1970; 1973a y b] y D'Accardi [1978] han aplicado técnicas similares a circuitos oblicuos.

El éxito de estos esquemas de predicción dependerá de las circunstancias particulares del uso a que se destinan, especialmente en lo que hace a la precisión y antelación requeridas de la predicción. La mayoría de los esquemas han dado resultados razonablemente satisfactorios en la predicción de una MUF de explotación que se aproxima más al valor real que al valor mediano mensual predicho, pero únicamente para una antelación del orden de una hora o menos.

2.4 *Predicciones utilizando índices ionosféricos*

Para efectuar predicciones a corto plazo sobre circuitos para los que no existen observaciones en tiempo real, el comportamiento de la ionosfera ha de deducirse de los datos disponibles, utilizando esas observaciones para inferir los valores a lo largo del circuito requerido.

En numerosos estudios se han comunicado coeficientes de correlación que ilustran el grado de relación de las desviaciones horarias de parámetros ionosféricos en dos o más ubicaciones [Gautier y Zacharisen, 1965; Zacharisen, 1965; Zevakina y otros, 1967a; Rush, 1972].

McNamara [1979] utilizó observaciones en las proximidades de estaciones ionosféricas para determinar un índice ionosférico eficaz, utilizado luego junto con mapas sinópticos de valores medianos mensuales de foF2 para predecir el valor de foF2 en el punto de reflexión del circuito en cuestión.

Se hicieron predicciones extrapolando el índice hacia adelante en el tiempo. Se consideraron antelaciones de 0 a 3 h y de 24 h, y se observó que las predicciones con 24 h de antelación no eran en general menos precisas que las efectuadas con una antelación de 0 a 3 h. Los errores de los valores de predicción de foF2 en dos estaciones de latitudes medias fueron inferiores al 10% en el 50 y 70% de los casos, en los periodos considerados. El que esta proporción corresponda o no a un nivel de error aceptable dependerá de la aplicación prevista.

Thompson y Secan [1979] y Tascione y otros [1979] han descrito métodos más complicados, basados en mapas sinópticos actualizados de parámetros ionosféricos en tiempo real. Wilkinson [1986] describe un esquema de predicción basado en el uso de los índices ionosféricos diarios.

En el límite, antelación cero, la «predicción» se convierte en realidad en una evaluación de la ionosfera en tiempo real.

2.5 *Métodos prácticos para las previsiones a corto y a medio plazo*

Los métodos prácticos para las previsiones a corto y a medio plazo de las condiciones de la ionosfera y de la propagación radioeléctrica, se basan en diversas combinaciones de los tres enfoques descritos anteriormente.

Las predicciones en datos ionosféricos obtenidos sólo unas horas antes y destinados a cubrir únicamente algunas horas, pueden tener en cuenta las desviaciones de un día a otro de las predicciones a largo plazo y las debidas a la perturbación magnética en curso, si ésta no es demasiado importante. Subsiste la dificultad de que las desviaciones no sólo varían en función del tiempo, sino también entre distintos lugares en un mismo momento por lo que son necesarias observaciones en las inmediaciones de determinado circuito, o a lo largo de él, utilizando técnicas de incidencia vertical u oblicua, o de retrodispersión.

Uffelman [1982], y Uffelman y otros [1982] han descrito una técnica efectiva para la aplicación de observaciones de sondas de incidencia oblicua de un circuito a la predicción de la frecuencia MUF en un circuito próximo. —————

Otro procedimiento consiste en hacer predicciones para zonas, dentro de las cuales las desviaciones son menores que de una zona a la otra, empleando por ejemplo, el método de Zevakina y otros [1967b]. La investigación de datos obtenidos mediante sondeos desde arriba con fines de predicción, realizada por Piggott [1970], ha servido para poner de relieve las anomalías espaciales, incluidas las grandes diferencias entre los hemisferios Norte y Sur. Las técnicas avanzadas de ionosondas digitales [Bibl y Reinisch, 1978] ofrecen la posibilidad de identificar e interpretar condiciones ionosféricas complejas en tiempo casi real [Reinisch y Huang, 1982; Wright y Pitterway, 1982]. Una red mundial de estas ionosondas [Wright, 1981], mediante sondeos oblicuos y verticales, podría proporcionar un sistema de predicción global.

El método de la Deutsche Bundespost se basa en registros continuos de 20 circuitos radioeléctricos europeos y ultramarinos, además de las técnicas de predicción de las perturbaciones magnéticas y de la actividad solar ya descritas. Las desviaciones porcentuales de las predicciones se examinan cada 24 horas en relación con los fenómenos solares y geofísicos que se producen y con las condiciones imperantes en la misma fase de ciclos solares pasados. Como las previsiones están destinadas principalmente a circuitos ya comprobados, se evita el efecto de las anomalías espaciales, estando el método sometido a la misma clase de incertidumbres ya mencionadas. Este método se ha desarrollado a base de las técnicas anteriores descritas por Ochs [1970]. Damboldt [1979] ha informado de un método de predicción basado en datos geofísicos-solares y en la intensidad de campo en tiempo real de las mediciones de transmisores distantes en ondas decamétricas en 26 frecuencias. La característica distintiva de las predicciones es que aparecen en forma de una cifra de calidad que guarda relación con la intensidad de campo prevista diaria.

Algunos métodos de previsión se basan en modelos particulares. Por ejemplo, el modelo de Obayashi y Matura [1972], que explica la distribución de las variaciones de la densidad de electrones con la altura, la latitud y la estación del año durante la fase principal de una tormenta geomagnética, ha sido utilizada por Barclay [1976].

El método de predicción a corto plazo descrito por Barclay [1976] comprende la comparación de los valores horarios de foF2 de dos estaciones situadas en Europa Occidental con las correspondientes predicciones. Las MUF de explotación se prevén entonces bajas para el periodo siguiente si la perturbación magnética rebasa un determinado nivel; en otro caso se consideran normales, a menos que el número de manchas solares y el flujo radioeléctrico difieran considerablemente de los valores previstos. Las LUF se prevén altas en invierno, si la actividad magnética es fuerte; y altas o bajas dependiendo de las diferencias predeterminadas en el número de manchas solares y el nivel de flujo radioeléctrico. Esta manera de proceder permite a personas no experimentadas preparar predicciones de cierta utilidad, en periodos tranquilos.

Los estudios estadísticos sobre las variaciones de foF2 realizados en la URSS indican la existencia de intervalos «prohibidos» al comienzo de las tormentas para las estaciones ionosféricas de este país [URSS, 1957]. En la URSS se han predicho comunicaciones relativamente estables en la zona auroral a base de observaciones en tiempo real, pues se ha observado que no se producen marcadas fluctuaciones en foF2 durante periodos de 15 a 30 minutos cuando se producen reflexiones en la capa F2. En Estados Unidos de América se han analizado durante ciertos meses seleccionados del año 1958 y para todas las estaciones, las desviaciones diarias de foF2 con relación a la mediana mensual calculada. Las desviaciones muestran ciertos diagramas recurrentes a escala mundial, especialmente durante las perturbaciones ionosféricas [Jones y otros, 1973]. Zevakina [1986] analiza los principales avances realizados en la URSS en la previsión a corto plazo de perturbaciones ionosféricas.

El método de predicción a medio plazo (con una semana de antelación) utilizado por la Administración francesa se basa en modelos matemáticos establecidos aplicando la teoría de sistemas, de modelos y de su identificación [Le Roux, 1980]. Por sus características, estos modelos, que tienen en cuenta los índices geomagnéticos Ak y solares Φ permiten establecer la predicción semanal de las MUF básicas horarias para distintas regiones geográficas. Se publican semanalmente, con una semana de antelación, los mensajes que indican el porcentaje de desviaciones de la MUF básica con relación a las predicciones mensuales previamente publicadas. También se hace una previsión diaria de los niveles de MUF y LUF esperados en las próximas 24 horas, divididas en intervalos de seis horas, en una zona del Norte de Europa y una zona de Europa, basada en observaciones en Uppsala y Lannion [Bourdila y otros, 1984].

3. Predicción a corto plazo del contenido electrónico total

Métodos generales de predicción de efectos transionosféricos en ondas radioeléctricas figuran en Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Klobuchar, 1979], y se describen también en el Informe 263, mientras que los parámetros ionosféricos correspondientes se describen en el Informe 725.

Las predicciones de valores medios mensuales del contenido electrónico total (CET) se derivan normalmente de perfiles de la densidad de electrones contruidos a base de modelos de foF2 y de M(3000)F2 [Jones y otros, 1969; Jones y Obitts, 1970]. Por tanto, comprenden los errores inherentes en esos dos modelos empíricos.

Las comparaciones del CET mediano observado con los valores predichos en estaciones situadas en latitudes medias y bajas [McNamara y Wilkinson, 1983; McNamara, 1984] han mostrado que un error del 10% no es frecuente en latitudes medias y que en latitudes bajas se produce con frecuencia un error comprendido entre el 20 y el 30%.

La variabilidad a corto plazo del CET con respecto a los valores medios mensuales tiene una media cuadrática del 25%, con una distribución casi normal [Johanson y otros, 1978; Soicher y otros, 1982]. En latitudes medias, es varias veces el error de los valores medianos predichos.

Puede suponerse que la contribución plasmaférica (o protonosférica) al CET es durante el día del 15% del CET [Donnelly, 1979 y 1980].

3.1 *Efectos de las tormentas geomagnéticas sobre el CET*

La principal fuente de variación del CET respecto de las condiciones medias mensuales se debe a la actividad geomagnética asociada a los fenómenos que se producen en el Sol. Esas variaciones se tratan en el Informe 727.

3.2 *Utilización de mediciones casi en tiempo real del CET para mejorar las predicciones a corto plazo*

Los valores medios mensuales de retardo de tiempo, incluso con correcciones para una actividad media de tormentas magnéticas que provocan variaciones del CET, pueden no ser suficientemente precisos para ciertos sistemas o algunas clases de usuarios. Pueden requerir efectuar mediciones casi en tiempo real de la ionosfera local, bien de foF2 o del CET, para actualizar modelos de valores medianos. Alternativamente, debiera considerarse la utilización de dos frecuencias muy separadas para medir realmente y corregir el error de retardo de tiempo ionosférico de primer orden en tiempo real. Las técnicas de actualización incluyen la elaboración de valores medianos semanales o mensuales mejorados que sirvan de base para las predicciones de las horas siguientes.

Utilizando datos de foF2 [Wilkinson, 1979] y de CET [Donatelli y Allen, 1978, 1981; Leitinger y otros, 1978] se han realizado estudios de técnicas adaptativas que utilizan observaciones en tiempo real para reducir el promedio de los errores medios cuadráticos mensuales de las predicciones. Para disminuir apreciablemente el error residual (el 50% aproximadamente) cuando se utilizan observaciones en el mismo emplazamiento, los intervalos de predicción deben ser inferiores a los siguientes:

- máximo solar:
 - horas diurnas: 3 h,
 - horas nocturnas: 1 h,
- mínimo solar:
 - horas diurnas: 1 h,
 - horas nocturnas: 30 min.

Los intervalos para efectuar una actualización útil durante el mínimo solar deben ser más breves logrando igual reducción en porcentaje. El error residual es muy inferior en el curso de las condiciones de mínimo solar.

3.3 *Proyecciones espaciales de mediciones en tiempo casi real*

La proyección espacial de observaciones se ha considerado en estudios de correlación que utilizan foF2 [Rush, 1976] y CET [Klobuchar y Johanson, 1977; Soicher, 1978, 1979]. El trabajo de Klobuchar y Johanson [1977] indica una distancia de correlación latitudinal que es aproximadamente la mitad de la distancia de correlación longitudinal. Esto debe tenerse en cuenta con los efectos de tiempo en cualquier técnica adaptativa en que se utilicen observaciones en tiempo real para la actualización de los datos en una ubicación distinta de aquella en que se hizo la observación. Esto se ha examinado utilizando datos de CET de estaciones situadas en latitudes medias [Allen y otros, 1977]. La mayor tasa de crecimiento de errores representa una superposición de fluctuaciones espaciales y temporales. Reduciendo el intervalo espacio-tiempo a un intervalo de tiempo equivalente, puede estimarse un intervalo de actualización utilizable. Una buena aproximación para estaciones situadas en latitudes medias puede obtenerse por medio de la ecuación siguiente [Klobuchar, 1979]:

$$\Delta ET = \frac{1}{15} \left[(\Delta LON)^2 + (2\Delta LAT)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \begin{cases} \Delta T \\ 0 \\ |\Delta T - \Delta LT| \end{cases} \quad (1)$$

donde

ΔLON : separación longitudinal (grados),

ΔLAT : separación latitudinal (grados),

ΔT : intervalo de tiempo entre la observación y la actualización (horas),

ΔLT : $\Delta LON/15$ (horas),

ΔET : intervalo de tiempo equivalente (horas).

{ } : se refiere a la elección de la dirección Este u Oeste desde la ubicación en que se realiza la observación y aquella en que se efectúa la actualización; ΔT si $W \rightarrow E$, $|\Delta T - \Delta LT|$ si $E \rightarrow W$.

4. Predicciones de otros parámetros

La predicción a corto plazo de la MUF de explotación en un circuito es generalmente todo lo que se necesitaría para circuitos telefónicos y telegráficos de baja velocidad. Para enlaces de datos de velocidad media, revisten importancia otros parámetros, como los periodos de desvanecimiento y la dispersión de frecuencias por efecto Doppler, puesto que afectan a la tasa de errores. Si bien es posible predecir estos parámetros a corto plazo, generalmente se coincide en que la gestión de frecuencias en tiempo real es esencial para la explotación de enlaces de datos de media velocidad [Clarke, 1979]. La capa E esporádica es especialmente importante al respecto, puesto que no es posible predecirla con éxito pero puede proporcionar comunicaciones sumamente estables.

Debido a la naturaleza variable de la aparición y de la intensidad de la ionización de E esporádica (Es), las predicciones deben ser de carácter estadístico.

Harnischmacher y Rawer [1970] describieron las posibilidades de predecir las «ventanas» en la capa E esporádica basadas en mediciones de los desplazamientos de la región E; describieron asimismo una serie de mediciones de Es que aparecía diariamente a la misma hora local más una hora por día, con una mayor absorción al final de tal secuencia. Zevakina y otros [1967] tienen en cuenta, en el Manual de la URSS, las variaciones estacionales de Es.

Un estudio efectuado en Sudamérica por Giráldez y Mesterman [1973] durante el ciclo solar ha demostrado que la aparición de Es durante el día depende de la altura virtual de Es en el momento del orto.

Parece que los fenómenos determinantes de la concentración de partículas y de los campos eléctricos dependen esencialmente del estado de la magnetosfera (densidad y temperatura de los electrones). En estas condiciones, el medio más eficaz de predecir la ionización E esporádica podría ser muy bien el empleo de satélites destinados a estudiar la magnetosfera.

La ionosfera en latitudes elevadas presenta problemas especiales debido a su variabilidad y complejidad (Informe 886). Besprozvannaya y otros [1979] indican que los métodos utilizados para la predicción en latitudes medias no son apropiados para latitudes elevadas, y que un método más adecuado podría basarse en la observación de características en gran escala de la distribución de la ionización que son proyecciones sobre la alta ionosfera de características estructurales en gran escala del plasma magnetosférico. Esto puede hacerse utilizando ionosondas con base en tierra, en ubicaciones adecuadas, o bien mediante satélites.

La evaluación en tiempo real de la depresión en latitudes elevadas y sus efectos sobre las comunicaciones puede hacerse, por ejemplo, utilizando fotografías aurales DMSP (Defense Meteorological Satellite Programme), para indicar el borde de la depresión hacia el polo, y emplear luego el modelo de depresión descrita por Halcrow y Nisbet [1977].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E., HARTMANN, G. K. y LEITINGER, R. [1977] Adaptive mapping of mid-latitude ionosphere. Report AFGL-TR-77-0176. Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Estados Unidos de América.
- AMES, J. W. y EGAN, R. D. [1967] Digital recording and short-term prediction of oblique ionospheric propagation. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 3, 382-389.
- AMES, J. W., EGAN, R. D. y MCGINTIE, G. F. [1970] Short-term prediction of HF communication circuit performance. *Ionospheric Forecasting*, Ed. V. Agy, AGARD Conf. Proc. No. 49, Paper 22.
- BARCLAY, L. W. [1976] An ionospheric storm model used for forecasting. AGARD Conf. Proc. 173. Radio Systems and the Ionosphere, Atenas, Grecia.

- BENNET, S. M. y FRIEDLAND, A. B. [1970] Prediction of daily fluctuation of the F-region plasma frequency. *Ionospheric Forecasting*. Ed. V. Agy, AGARD Conf. Proc. No. 49, Paper 31.
- BERTIN, F., TESTUD, J., KERSLEY, L. y REES, P. R. [1978] The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere: an experimental study. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 1161-1184.
- BESPROZVANNAYA, A. S., SHIROCHKOV, A. V. y SHOHUKA, T. I. [1979] On the approach to forecasting ionospheric problems. *STPP**, Vol. II, 528-542.
- BIBL, K. y REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.
- BOURDILA, A. M., FLEURY, R. y LE ROUX, Y. M. [1984] Short-term radio propagation predictions in the HF range. Documento presentado en el «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, Francia, 18-22 de junio de 1984.
- CLARKE, R. H. [1979] Influence of ionospheric irregularities on HF skywave communications. *Abstracts of the Sydney Ionospheric Propagation Conference of May 14-17, 1979*. Eds. D. G. Cole and L. F. McNamara, Ionospheric Prediction Service Series X Reports, IPS-X9, Sydney, Australia.
- D'ACCARDI, R. J. [1978] Time-series modeling and analysis of high frequency (HF) vertical and short-path oblique incidence ionospheric soundings. US Army Communications R&D Command Research and Development Tech. Rep. CORADCOM 78-7, NTIS Accession No. AD A058 630. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Estados Unidos de América.
- DAMBOLDT, T. [1979] HF short-term fields strength predictions and their agreement with observations. AGARD Conf. Proc. No. 238, Vol. 1, *Operational Modelling of the Aerospace Propagation Environment*. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N79-18094. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Estados Unidos de América.
- DA ROSA, A. V., WALDMAN, H., BENDITO, J. y GARRIOTT, O. K. [1973] Response of the ionospheric electron content to fluctuations in solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1429-1442.
- DONATELLI, D. E. y ALLEN, R. S. [1978] Temporal variability of ionospheric refraction correction. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 490-496. Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Stock No. 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.
- DONATELLI, D. E. y ALLEN, R. S. [1981] Time cells for adaptive prediction of total electron content. *Radio Sci.*, Vol. 16, 2, 261-270.
- DONNELLY, R. F. Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:
- Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.
- Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
- Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.
- Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.
- FOUGERE, P. F. [1974] Dependence of inferred magnetic sector structure upon geomagnetic and solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 22, 8, 1173-1184.
- FRANCIS, S. [1975] Global properties of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1011-1054.
- GAUTIER, T. N. y ZACHARISEN, D. H. [1965] Use of space and time correlation in short-term ionospheric predictions. First IEEE Annual Communications Convention, 7-9 de junio, Boulder, Colo., Estados Unidos de América, Conf. Record, 671-676.
- GIRÁLDEZ, A. E. y MESTERMAN, I. [1973] Procesos físicos y guías para las predicciones de la Es (en español). LIARA, Informe C-21, Laboratorio Ionosférico de la Armada, República Argentina.
- HALCROW, B. W. y NISBET, J. S. [1977] A model of F2 peak electron densities in the main trough of the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 12, 5, 815-820.
- HALL, L. A., HIGGINS, J. E. CHAGNON, C. W. y HINTEREGGER, H. E. [1969] Solar cycle variation of extreme ultraviolet radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 4181-4183.
- HALL, L. A. y HINTEREGGER, H. E. [1970] Solar radiation in the extreme ultraviolet and its variation with solar rotation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6959-6965.
- HARNISCHMACHER, E. y RAWER, K. [1970] Precursor events for possible forecasting of sporadic-E and increased absorption. *Ionospheric Forecasting*. Ed. V. Agy, AGARD Conf. Proc. No. 49, Paper 32.
- HINES, C. O. [1974] *The Upper Atmosphere in Motion*. American Geophysical Union, Washington, DC, Estados Unidos de América.
- ICHINOSE, M., MAEDA, R. e ITO, S. [1980] Short-term prediction of maximum usable frequency for radio communications over the Japan area. *J. Radio Res. Labs. (Japón)*, Vol. 27, 124, 179-185.
- JOHANSON, J. M., BUONSANTO, M. J. y KLOBUCHAR, J. A. [1978] The variability of ionospheric time delay. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 479-485. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Stock No. 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.

* La abreviatura STPP se utiliza para designar las "Solar-Terrestrial Predictions Proceedings", publicadas en cuatro volúmenes por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del Departamento de Comercio de Estados Unidos de América, y editadas por R. F. Donnelly (véase Donnelly, 1979 y 1980).

- JONES, W. B., GALLET, R. M. y LEFTIN, M. y STEWART, F. G. [1973] Analysis and representation of the daily departures of the foF2 from the monthly median. Office of Telecommunications, Report 73-12, US Dept. of Commerce. Supt. of Documents. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. y LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS-75. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B. y OBITTS, D. L. [1970] Global representation and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecomm. Res. Rep. OT/ITS/TRR3. Office of Telecommunications, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- KING, J. W. y SLATER, A. J. [1973] Comparación entre los errores de predicción de los valores de foF2 y hmF2 y la variabilidad diaria observada. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 40, 766-770.
- KISELIOVA, M. V. y ZEVAKINA, R. A. [1984] Forecasting of positive ionospheric disturbances. Documento presentado en el «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, Francia, 18-22 de junio de 1984.
- KLOBUCHAR, J. A. [1979] Transionospheric propagation predictions. *STPP*, Vol. II, 213-245.
- KLOBUCHAR, J. A. y JOHANSON, J. M. [1977] Correlation distance of mean daytime electron content. Report AFGL-TR-77-0185, DCA No. ADA 048117. Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Estados Unidos de América.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. y ROSWELL, E. L. [1970] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (60 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-3345.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. y ROSWELL, E. L. [1973a] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (200 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4144.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. y ROSWELL, E. L. [1973b] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (500 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4145.
- LEITINGER, R., ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E. y HARTMANN, G. K. [1978] Adaptive mapping of ionospheric features. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 530-537. Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- LE ROUX, Y. M. [1980] Prévisions ionosphériques à court terme par modélisation mathématique prédictive *Ann. de Géophys.*, Vol. 36, 251-261.
- LYAKHOVA, L. N. [1960] Short-range forecasting of the state of the ionosphere. *Trudy IZMIRAN*, 17, 240-281.
- LYAKHOVA, L. N. y KOSTINA, L. I. [1973] On quantitative ionospheric forecasting. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 13, 1, 50-53.
- McNAMARA, L. F. [1976a] The correlation of individual values of foF2 and M(3000)F2 with the solar 10.7 cm flux under magnetically quiet conditions. Ionospheric Prediction Service Series R Reports, IPS-R30, Sydney, Australia.
- McNAMARA, L. F. [1976b] Short-term forecasting of foF2. Ionospheric Prediction Service Series R Reports, IPS-R33, Sydney, Australia.
- McNAMARA, L. F. [1979] The use of ionospheric indices to make real- and near-real-time predictions of foF2 around Australia. *STPP*, Vol. I, 249-258.
- McNAMARA, L. F. [1984] Prediction of total electron content using international reference ionosphere. *Adv. Space Res.*, 4, 25-50.
- McNAMARA, L. F. y WILKINSON, P. J. [1983] Prediction of total electron content using the international reference ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 169-174.
- McNAMARA, L. F. y WILKINSON, P. J. [1986] A cautionary note on the use of F2 region correlation coefficients for short-term forecasting purposes. *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, Francia*, 18-22 de junio de 1984. 529, Ed. P. A. Simon, G. Heckman y M. A. Shea, Publicado por National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA, y Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, USA.
- MILSON, J. D. [1986] Towards improving a short-term ionospheric forecasting service. *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, Francia*, 18-22 de junio de 1984. 524, Ed. P. A. Simon, G. Heckman y M. A. Shea, Publicado por National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA, y Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, USA.
- OBAYASHI, T. y MATUURA, N. [1972] Theoretical model of F-region storm. *Solar-terrestrial Physics*, 1970, parte IV, 199-211.
- OCHS, A. [1970] The forecasting system of the Fernmeldetechnisches Zentralamt. AGARD Conf. Proc. No. 49. *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 30, Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Estados Unidos de América.
- PIGGOTT, W. R. [1970] The use of satellite data for prediction purposes. AGARD Conf. Proc. No. 49. *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 19. Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Estados Unidos de América.

- RADINOV, Ya. S. [1963] Autocorrelative characteristics of critical frequency and ionization-density fluctuations. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 985-990.
- REILLY, M. H. y DAEHLER, M. [1986] Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths. *Radio Science*, Vol. 21, No. 6, 1001-1008.
- REINISCH, B. W. y HUANG, X. [1982] Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, Vol. 17, 837-844.
- RICHMOND, A. D. y ROBLE, R. G. [1979] Dynamic effects of aurora-generated gravity waves on the mid-latitude ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 41, 7-8, 841-852.
- RUSH, C. M. [1972] Improvements in ionospheric forecasting capability. Report AFCRL-72-0138. Air Force Cambridge Research Labs., Bedford, Mass., Estados Unidos de América.
- RUSH, C. M. [1976] Red de observaciones ionosféricas para las predicciones de propagación a corto plazo. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 43, 544-548.
- RUSH, C. M. y GIBBS, J. [1973] Predicting the day-to-day variability of the mid-latitude ionosphere for application to HF propagation predictions. Report AFCRL-TR-73-0335. Air Force Cambridge Research Labs., Bedford, Mass., Estados Unidos de América. Air Force Surveys in Geophysics, No. 268.
- RUSH, C. M., MILLER, D. y GIBBS, J. [1974] The relative daily variability of foF2 and hmF2 and their implications for HF radio propagation. *Radio Sci.*, Vol. 9, 749-756.
- SOICHER, H. [1978] Spatial correlation of transionospheric signal time delays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-26, 311-314.
- SOICHER, H. [1979] Correlation of satellite signal time delays at widely separated locations. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 888-890.
- SOICHER, H., HOUMINER, Z. y SHUVAL, A. [1982] Total electron content structure in the Middle East. *Radio Sci.*, Vol. 17, 1623-1631.
- SVALGAARD, L. [1972] Interplanetary magnetic-sector structure 1926-1971. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 4027-4034.
- TASCIONE, T. F., FLATTERY, T. W., PATTERSON, V. G., SECAN, J. A. y TAYLOR, J. W., hijo [1979] Ionospheric modeling at Air Force Global Weather Central. *STPP*, Vol. I, 367-377.
- THOMPSON, R. L. y SECAN, J. A. [1979] Geophysical forecasting at AFGWC. *STPP*, Vol. I, 350-366.
- UFFELMAN, D. R. [1982] HF propagation assessment studies over paths in the Atlantic. IES 1981, *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems*. Eds. J. M. Goodman, F. D. Clarke and J. Aarons. US Govt. Printing Office, Washington DC 20402.
- UFFELMAN, D. R., HARNISH, L. O. y GOODMAN, J. M. [1982] The application of real-time model update by oblique ionospheric sounders to frequency sharing. AGARD Conf. Proc. No.332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 12-1 to 12-11. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, USA.
- URSS [1975] Annals of the corpuscular conference of the Academy of Sciences of the USSR, Moscú (en ruso).
- WILCOX, J. M. [1972] Inferring the interplanetary magnetic field by observing the polar geomagnetic field. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, 1003-1014.
- WILKINSON, P. J. [1979] Prediction limits for foF2. *STPP*, Vol. I, 259-278.
- WILKINSON, P. J. [1986] Short-term forecasting using daily ionospheric indices. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, Francia, 18-22 de junio de 1984, 509, Ed. P. A. Simon, G. Heckman y M. A. Shea, Publicado por National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América y Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Estados Unidos de América.
- WRIGHT, J. W. [1981] Global real-time ionospheric monitoring. *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems*. Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Library of Congress, Catalog No. 82-600510.
- WRIGHT, J. W. y PITTEWAY, M. L. [1982] Application of dopplionograms and goniograms to atmospheric gravity wave disturbances in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 1719.
- ZACHARISEN, D. H. [1965] Space-time correlation coefficients for use in short-term ionospheric predictions. NBS Report 8811. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Estados Unidos de América.
- ZEVAKINA, R. A. [1986] Development of short-term ionospheric predictions. A review. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, Francia, 18-22 de junio de 1984, 519, Ed. P. A. Simon, G. Heckman y M. A. Shea, Publicado por National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América y Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Estados Unidos de América.
- ZEVAKINA, R. A. y LAVROVA, E. V. [1980] On the possibility of predicting variations in the F2-region parameters as a function of the IMF direction. *STPP*, Vol. IV, C-27 a C-36.
- ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. y LYAKHOVA, L. N. [1967a] Manual on short-term prediction of ionospheric geomagnetic storms and radio-propagation forecasting service. Nauka Publishing House, Moscú, URSS.
- ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. y LYAKHOVA, L. N. [1967b] *Principles for Predicting Ionospheric and Magnetic Disturbances* (en ruso) Nauka Publishing House, Moscú, URSS.

BIBLIOGRAFÍA

TCHERNOV, Y. A. [1971] *Sondeo de Retrodispersión de la Ionosfera* (en ruso). Sviaz, Moscú, URSS