

LA IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION IONOSFERICA EN LA ACTUALIDAD

Marta Mosert⁽¹⁾ Sandro M. Radicella⁽²⁾ Rodolfo G. Ezquer^(3,4)

(1) Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), San Juan Argentina

(2) Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italia

(3) Lab. de Ionosfera UNT, CONICET, Tucumán, Argentina

(4) Facultad Regional Tucumán, UTN, Tucumán Argentina

Introducción

El estudio de la atmósfera terrestre, de la cual la ionosfera forma parte, es de interés a los científicos de diferentes disciplinas. El conocimiento y entendimiento de los procesos que tienen lugar desde la tierra a los más altos niveles de la atmósfera es el resultado de las contribuciones combinadas de meteorólogos, físicos, magnetólogos, astrónomos, ingenieros en comunicaciones, científicos espaciales, entre otros.

Las variaciones de la actividad solar y de las emisiones de plasma desde el sol provocan cambios dramáticos en el ambiente espacial que circunda la tierra. Estos cambios forman parte de lo que ahora es llamado “space weather” o “meteorología espacial”. Este nuevo campo de estudio afecta una serie de actividades humanas que hacen uso de tecnologías avanzadas de alta complejidad. Para mitigar estos efectos es indispensable llegar a pronosticar el estado del ambiente espacial como ahora se hace con el estado del tiempo meteorológico de la baja atmósfera, que controla actividades como por ejemplo, la producción de alimentos. Haciendo una analogía se puede decir que el estudio de la meteorología espacial se encuentra actualmente al mismo nivel de conocimientos que tenía la meteorología de la atmósfera baja hace 40 años.

Este informe tiene por objeto dar a conocer en una forma muy general, las tendencias actuales en la investigación ionosférica y dado lo extenso del tema que nos ocupa, es incompleto. Pretende solamente dar a conocer algunos temas de interés con perspectivas de futuro.

Un poco de historia

La primera exposición de la humanidad a un fenómeno ionosférico fué la aparición de las auroras polares. Las auroras son mencionadas por los chinos (2000 a.C), en el Antiguo Testamento y por los filósofos griegos (Aristóteles, *Meteorológica*) siendo las explicaciones que se daban para este fenómeno erradas. Hay que esperar la mitad del siglo XIX para ver establecida la relación que existe entre las auroras, las perturbaciones geomagnéticas y las manchas solares (la actividad solar).

La existencia de lo que hoy llamamos ionosfera fue postulada por Carl Gauss en 1841 y luego por Balfour Stewart en 1881 y su presencia fue establecida experimentalmente cuando Marconi logró transmitir señales de radio a través del Atlántico en 1901, indicando que las ondas eran reflejadas por una zona conductora de la atmósfera superior.

En 1902 A. E. Kennelly y O. Heaveside sugirieron que posibles cargas libres en la atmósfera superior podían actuar como un reflector para las ondas radio y en 1903 J. E. Taylor presentó la primera teoría física sobre la formación del estrato reflector de las ondas radio, atribuyendo la misma a la radiación ultravioleta solar.

Los primeros experimentos para determinar la altura de la capa reflectora fueron realizados entre 1912 y 1914 por L. de Forest y L. F. Fuller. Estos experimentos fueron poco conocidos. Las experiencias definitivas para determinar la altura de la capa conductora en la atmósfera fueron realizados independientemente por G. Breit and M. A. Tuve and E. V. Appleton and M. A. F Barnett en 1925. La técnica de pulsos utilizada por Breit y Tuve es en esencia la misma que se utiliza aun en los modernos sondadores ionosféricos.

El nombre “ionósfera” fue propuesto en 1926 por R. A. Watson-Watt pero el término apareció en la literatura científica solamente en 1929. En 1931 S. Chapman desarrolló la teoría de los procesos de absorción e ionización de la radiación X y UV solar en la atmósfera.

Iniciada la era espacial los cohetes militares alemanes V-2, requisados por los EEUU y la Unión Soviética al finalizar la segunda guerra mundial, fueron usados para medir la densidad de los electrones libres con la altura. Con el mismo fin se siguieron utilizando cohetes desarrollados por las dos potencias dominantes en toda la década de 1950. Los cohetes y los satélites artificiales - a partir del primer Sputnik lanzado en octubre de 1957 - inician una nueva era en la investigación de la ionosfera, sin que las mediciones desde tierra perdieran actualidad.

Los vehículos espaciales permiten: transmitir o recibir señales radio para estudiar las propiedades de la ionosfera, medir la ionosfera a la altura del vehículo que órbita alrededor de la tierra, mapear la ionosfera globalmente, con mediciones remotas desde satélites artificiales.

En los últimos años, el Año Geofísico Internacional (IGY) 1957-1958 marca un momento importante en el estudio de la ionosfera. Fue un programa internacional, con la participación de unas 30.000 personas de 66 países, entre los cuales figuraba la Argentina, para el estudio de los fenómenos terrestres y solares y sus relaciones. Con el IGY las investigaciones de la ionosfera y del espacio cercano tuvieron un avance extraordinario gracias también a las nuevas tecnologías espaciales. Otro programa internacional de relevancia fue el Año Internacional del Sol Quiet (IYQS) 1964-1965

En los últimos 50 años la investigación ha pasado de una exploración experimental del ambiente ionosférico, al estudio detallado de los procesos físicos y químicos y los mecanismos de acoplamiento entre el sol y la ionosfera; de la observación detallada de la ionosfera en lugares determinados a la caracterización de la ionosfera a escala global como parte de la meteorología espacial (“space weather”); del uso masivo de la ionosfera para las telecomunicaciones a la corrección de los efectos ionosféricos en la navegación y el posicionado satelital; de la solución de simples ecuaciones empíricas que describen algunas características de la ionosfera a los complejos modelos físicos y a la ingestión o asimilación de datos en modelos para describir la ionosfera en tiempo real. El objetivo final es el de producir un modelo físico del sistema Sol-Tierra (en el cual juega un rol importante la ionosfera) y describir los efectos del sistema en las actividades humanas.

Las investigaciones ionosféricas en la Argentina

En 1950 la Armada Nacional comienza los sondeos ionosféricos en la Antártida y en Buenos Aires y durante el IGY (1957) comienzan las observaciones ionosféricas y las primeras investigaciones físicas de la ionosfera en Tucumán (UNT). En 1964 y 1967 se realizan lanzamientos de cohetes desde Chamental, La Rioja para investigar la ionosfera y entre 1967-1974 se realizan investigaciones ionosféricas en La Plata (UNLP).

En 1969 se establece el Programa Nacional de Ionosfera que tomará luego el nombre de Programa Nacional de Radiopropagación (PRONARP) y perdurará hasta los años 2000.

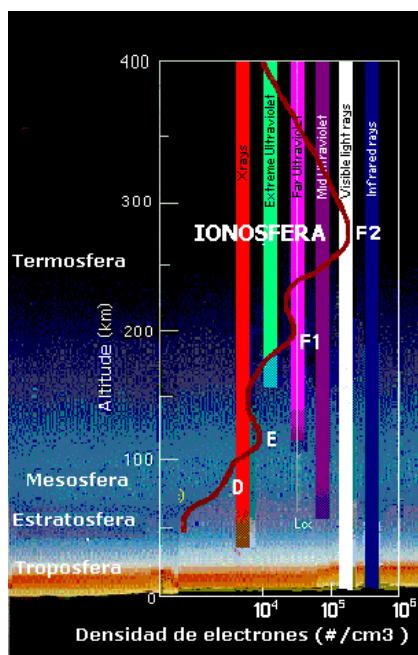
En 1970 empiezan en Tucumán las investigaciones ionosféricas utilizando señales de satélites y en 1971 empiezan las mediciones ionosféricas en San Juan (OAFa). Desde 1993 el grupo de San Juan (CASLEO) contribuye activamente al desarrollo del modelo internacional IRI.

Las investigaciones ionosféricas en la Argentina se han realizado en colaboración entre diferentes institutos tales, como: Laboratorio de Ionosfera del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT); Facultad Regional de Tucumán de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN); la Facultad de Ciencias Exactas, UNSa, Salta; Instituto Antártico Argentino (IAA), DNA, Buenos Aires; Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata; el Laboratorio de Aeronomía y Radiopropagación del ICTP, Trieste, Italia; el Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanología de Roma., Italia; el Instituto de Física Atmosférica de Praga, República Checa; el Observatorio de Ebro, España; el INTA, El Arenosillo, España; la Universidad Nacional de Concepción, Chile.

La ionosfera

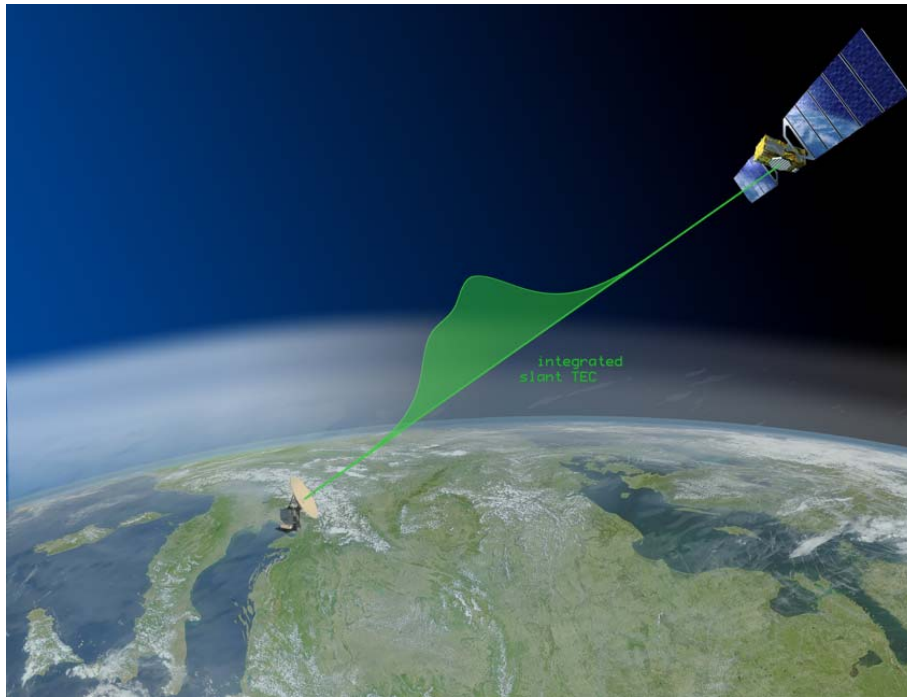
El planeta Tierra, ubicado a la distancia de aproximadamente 150 millones de kilómetros del sol, está rodeado de una atmósfera constituida esencialmente de oxígeno y nitrógeno y tiene un campo magnético prácticamente bipolar. Las altas frecuencias del espectro de emisión electromagnética solar en la banda UV y X disocian e ionizan las partículas atmosféricas, dando lugar al plasma de la ionosfera que es altamente variable y que a su vez es influenciado por el campo magnético.

En la ionosfera diurna se distinguen diferentes regiones y estratos: la región D (60-90 km), la región E (90-140 km) y la región F con los estratos F1 (140-200 km) y F2, que se extiende desde los 200 km hasta alcanzar un máximo que varía entre los 300 y 450 km en función de varios factores tales como la latitud, estación del año y actividad solar. Por encima del máximo, la densidad electrónica disminuye de manera regular siguiendo una función básicamente exponencial. La ionosfera nocturna presenta solamente el estrato F2.



La ionosfera representa solamente el 1% de la atmósfera terrestre, pero puede ser considerada como la componente del ambiente espacial más sensible a las variaciones solares y a las variaciones del espacio cercano que dependen de éstas. La ionosfera, con su comportamiento altamente complejo y dinámico, representa un importante laboratorio natural para el monitoreo de las interacciones Sol-Tierra. Por esta razón, el conocimiento de la “meteorología ionosférica” (“ionospheric weather”) es fundamental para la comprensión de la “meteorología espacial” en general y de sus efectos sobre las actividades humanas.

El principal parámetro, que define el comportamiento de la ionosfera, es la distribución espacial y temporal de la densidad electrónica. Un parámetro derivado de esa distribución, que reviste gran importancia para la propagación transionosférica de las ondas de radio, es el contenido electrónico total (TEC) que mide el número de electrones que contiene un tubo de área unidad y de longitud determinada por la distancia entre el transmisor y el receptor.



Técnicas de mediciones ionosféricas

Teniendo en cuenta el rango de alturas sobre la superficie terrestre que abarca la ionosfera (70-2000 km) no es sorprendente que la mayor parte de su exploración sea llevada a cabo por técnicas a distancia desde la Tierra. A estas técnicas se ha agregado en los últimos años las mediciones desde satélites y cohetes que han aportado una importante contribución al entendimiento de los procesos físicos que controlan la ionosfera.

Técnicas de detección a distancia desde tierra

Scatter incoherent radar (densidad electrónica, temperatura iónica, temperatura electrónica, frecuencia de colisión entre iones y moléculas, drift ionosférico)

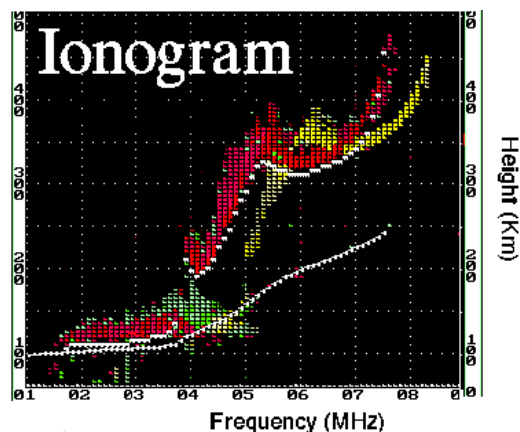
Ionosondas (densidad electrónica de base, estructura ionosférica horizontal, drift ionosférico)

Satélites y cohetes

Medidas in situ (densidad electrónica, temperatura electrónica, velocidad drifts de los iones)

Sondeos de tope (densidad electrónica de tope).

Propagación transionosférica (TEC, centelleo)



Mediciones ópticas (desde tierra, satélites, cohetes)

La técnica de medición más difundida se basa en el uso de ionosondas (analógicas, digitales, híbridas, FM/CW, sondadores de tope) los que dan información de variables ionosféricas hasta unos 400 km de altura (ionograma).

La climatología y meteorología ionosférica

La “climatología ionosférica” está representada por las condiciones medias de los principales parámetros ionosféricos (densidad electrónica, contenido electrónico total, (TEC) y sus variaciones casi periódicas en función de la hora local, estación del año, actividad solar, posición geográfica. La “climatología ionosférica” ha sido ampliamente estudiada. Sin embargo, un pronóstico meteorológico del estado de la ionosfera presupone un conocimiento muy profundo de los fenómenos y procesos físicos y químicos que ocurren en el laboratorio natural representado por la atmósfera superior de la tierra, bajo la acción constante de la radiación solar. Este conocimiento no está suficientemente desarrollado.

Desde el punto de vista de “la meteorología espacial” y de sus efectos sobre las actividades humanas, los fenómenos meteorológicos ionosféricos más importantes son aquellos que apartan la ionosfera de sus condiciones medias o climáticas de manera significativa. Ejemplos de dichos fenómenos son las perturbaciones ionosféricas súbitas (SID), las tormentas ionosféricas, centelleo ionosférico, etc.

Al clima ionosférico se suma una variedad de cambios de tipo meteorológico tales como: variaciones día a día, hora a hora e interhorarias que se manifiestan en un dado lugar geográfico, y que hacen que la meteorología ionosférica sea compleja

Para poder predecir los cambios meteorológicos en la ionosfera bajo el efecto de la actividad solar y geomagnética, como parte del problema general de la meteorología espacial, se hace necesario conocer cada vez más los procesos físicos que controlan dichos cambios.

Los modelos ionosféricos

Para comprender el comportamiento de la ionosfera y sus efectos sobre las actividades humanas es necesario modelar, por lo menos, la distribución de la densidad electrónica en altura en posición geográfica y en el tiempo. Hasta el presente no existe ningún modelo que consiga reproducir con suficiente exactitud tal distribución es decir que sea capaz de reproducir en manera satisfactoria tanto el clima como las variaciones meteorológicas de la ionosfera. Para poder mejorar los modelos existentes o desarrollar nuevos modelos es necesario disponer de una base de datos experimentales de alta calidad.

En la actualidad la mayoría de los modelos puede reproducir con suficiente precisión las características del clima ionosférico representado por las variaciones diurnas, estacionales y con el ciclo de actividad solar en un dado lugar o región.

Los modelos pueden dividirse en : (1) modelos teóricos o basados en principios físicos: en estos modelos se resuelven numéricamente las ecuaciones de conservación en función de las coordenadas espaciales y temporales para obtener densidades de electrones y iones, sus temperaturas y las velocidades de flujo y (2) modelos empíricos o semi-empíricos: se basan sobre una descripción analítica de la ionosfera con funciones derivadas de datos experimentales o calculados por modelos teóricos tales como la Ionosfera Internacional de Referencia (IRI), (3)“perfiladores” analíticos: describen el perfil de la densidad electrónica por medio de expresiones analíticas sencillas que se ajustan con datos experimentales de características ionosféricas básicas.

El modelado ionosférico constituye actualmente un capítulo muy importante en el estudio de la ionosfera.

Efectos de meteorología ionosférica sobre las actividades humanas

Los fenómenos englobados en la meteorología espacial en general, o ionosférica en particular, han ocurrido siempre. Su efecto sobre las actividades humanas se ha incrementado de manera substancial desde que se hace uso de manera masiva de sistemas tecnológicos de alta sofisticación en campos como el transporte y las comunicaciones. Estos sistemas operan en condiciones tales que, el mínimo fallo causado por un fenómeno espacial, puede quebrar la operación del sistema involucrado con consecuencias a veces catastróficas.

Los efectos que pueden ser relacionados más directamente con los fenómenos meteorológicos ionosféricos son: comunicaciones radio en HF, radares de HF, satélites de relevamiento, satélites de navegación, vigilancia espacial, seguimiento de satélites, redes de energía, oleoductos.

¿Porqué investigar la ionósfera hoy?

Una primera respuesta de carácter científico: *Las variaciones ionosféricas representan una componente importante de la meteorología espacial (“Space Weather”). Como tal, el conocimiento de sus causas y efectos, es indispensable para comprender los mecanismos que gobiernan el ambiente del espacio cercano y las relaciones Sol-Tierra.*

Otra respuesta de carácter científico: *La ionosfera sobre la Argentina se encuentra bajo los efectos de las anomalías ecuatorial y del Atlántico Sur, que introducen una gran complejidad y variabilidad en la meteorología ionosférica de la región. Por ello es particularmente importante su estudio.*

Dos respuestas de carácter tecnológico:(1)*El conocimiento detallado de la ionosfera es indispensable para el diseño de sistemas modernos de comunicaciones en onda corta que se basan en una descripción adecuada del canal de radiopropagación, (2) Los errores introducidos por la ionosfera en el posicionado y la navegación satelital siguen siendo los mas importantes y un conocimiento adecuado de la misma es esencial para el desarrollo de sistemas complementarios especialmente en las regiones de bajas latitudes.*

¿Porqué investigar la ionósfera hoy, en la Argentina?

La respuesta de carácter tecnológico: *El país quiere dotarse de sistemas avanzados de navegación satelital para optimizar la gestión del tráfico aéreo, marítimo y terrestre. La posición geográfica de la Argentina es tal que dichos sistemas deberán estar en condición de corregir los efectos ionosféricos sobre los mismos. Para ello es necesario conocer detalladamente el comportamiento de la ionósfera sobre la Argentina.*

La investigación ionosférica en las próximas décadas

Un excitante aspecto de la investigación ionosférica moderna es el importante rol de la atmósfera inferior en la variabilidad de la atmósfera superior. Evidencias experimentales han mostrado la existencia de correlaciones entre parámetros de la atmósfera superior e inferior. La razón de esta correlación estaría en la propagación hacia arriba de ondas atmosféricas internas (planetarias, mareas y gravitatorias) desde la troposfera y estratosfera como una esencial fuente de energía para la termosfera e ionósfera. El estudio de las ondas atmosféricas internas es del ámbito de la meteorología, una disciplina que tiene sus problemas propios, diferentes de los de la física ionosférica. Sin embargo estas ondas internas producidas por diferentes fuentes en la troposfera y estratosfera parecen ser capaces de penetrar en la ionósfera, donde disipan su energía. (Muchos de los fenómenos ionosféricos no pueden ser explicados en términos de los procesos fotoquímicos, inyección de partículas solares o efectos de explosiones solares. Hay evidencias de que existen eventos debido al efecto de oscilaciones atmosféricas: “spread F”, ocurrencia de esporádicas, etc.).

Uno de los principales desafíos que se nos presenta en el futuro es el de entender el sistema atmósfera-ionósfera como un todo. Este sistema es mucho más grande que la suma de sus componentes. El foco científico debe colocarse en los procesos interactivos entre las diferentes regiones del espacio en adición al estudio tradicional de las diferentes regiones individualmente. Este es el concepto de base del programa STEP (International Solar-Terrestrial Energy Program).

En los últimos tiempos el tema del calentamiento global debido al llamado efecto “greenhouse” está sujeto a controversias, especulación y confusión. Sin embargo, el consenso de la mayoría de los científicos dedicados a este tema es que el calentamiento global ocurrirá. Por otra parte los cambios esperados no están confinados solamente a la atmósfera inferior sino que también se extienden a la mesosfera, termosfera y regiones ionosféricas y deberían también conducir a algunas alteraciones en la circulación global en la distribución latitudinal de la temperatura y composición y a la respuesta del sistema atmosférico a la variabilidad solar.

De acuerdo a predicciones de modelos el efecto “greenhouse” conduciría a un significativo enfriamiento de la atmósfera superior y los cambios resultantes en los parámetros F2 de la ionósfera: un descenso de la altura h_mF2 con pequeños cambios en la frecuencia crítica f_oF2 . Los cambios de estas magnitudes fueron reportados por algunas estaciones ionosféricas del hemisferio Norte y durante el período de tiempo 1965-1991. Los resultados por el momento no son concluyentes. Estudios adicionales son necesarios junto con el chequeo de la homogeneidad de datos.

¿Un posible efecto de origen sísmico en la ionósfera?

Algunos autores han reportado algunos posibles efectos de los terremotos sobre la ionósfera encuadrando su estudio en la predicción de los fenómenos sísmicos.

La predicción sísmica y en concreto la búsqueda de precursores, han sido objetivos permanentes de la sismología desde sus inicios como ciencia moderna. En trabajos de la década del 90 ya se señalaba esta meta y se incluían entre los posibles precursores de las condiciones meteorológicas, el comportamiento animal y algunos efectos eléctricos. Desde entonces hasta la actualidad la actitud de los investigadores hacia la prevención sísmica ha pasado por etapas de optimismo seguidas por otras de desánimo.

Optimismo: La posibilidad de la predicción pareció muy próxima cuando en 1975 los sismólogos chinos asignaron con acierto la ocurrencia del terremoto que sacudió a la ciudad de Haicheng. En esta ocasión, la observación sistemática y conjunta de numerosos fenómenos considerados precursores sísmicos entre los que se incluían señales geoelectricas, permitió realizar predicciones que concluyeron con el anuncio de un terremoto de magnitud 7.3. en esta circunstancia fue posible el desalojo de la ciudad y reducir casi por completo la pérdida de vidas humanas. Sin ninguna duda, a este éxito contribuyó considerablemente la férrea estructura social y política del país en esa época, que permitió que la alarma dada por los científicos se tradujera en medidas concretas y útiles de evacuación.

Pesimismo: La información sobre el grado de éxito de esta predicción fue puesta en tela de juicio en los últimos años. Además, el sismo ocurrido un año más tarde en Tangshan (a 150km de Pekin) que causó más de 600 mil víctimas y sobre el cual no hubo aviso previo, demostró que la predicción de los terremotos era todavía mucha más un deseo que una realidad.

Los estudios para avanzar en este objetivo se intensificaron en la década de los 80 y en este contexto la Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI) sugirió en 1989 la elaboración de una lista de “fenómenos candidatos” a ser considerados como precursores y su selección de acuerdo a criterios determinados: (1) la anomalía observada debe tener relación con la deformación, esfuerzo o algún mecanismo tectónico que conduzca el terremoto; (2) debe ser observada al mismo tiempo en dos o más instrumentos o en dos o más lugares; (3) su amplitud debe guardar relación con la distancia al lugar con el posible terremoto. De los 40 fenómenos candidatos a ser considerados precursores presentados hasta 1997, solo 5 han sido incluidos en la Relación Preliminar de Precursores Significativos y ninguno de ellos se relaciona con fenómenos electromagnéticos.

En los últimos años se han estudiado variaciones de numerosos parámetros ionosféricos con vistas a su posible aplicación en la predicción de terremotos (aumento en la concentración de electrones a alturas de la capa E: 125km, aparición de ondas de gravedad en la capa F2, variaciones en el contenido electrónico de las capas E y F) con su correspondiente causa posible. Se ha señalado como causa primordial de la alteración de la ionosfera por terremotos, a la emisión de las señales electromagnéticas y su posterior propagación e interacción con las diversas partes de la ionosfera. Otra causa señalada es la emisión de diversos elementos fundamentalmente radón, que es la fuente principal de ionización en la baja atmósfera.

Los posibles efectos de los terremotos sobre la ionosfera es un tema de controversia tanto en el ámbito de la Física ionosférica como de la Sismología. Sin embargo, la coincidencia en ciertas regiones geográficas de una sismicidad importante y bien conocida, con la disponibilidad de datos ionosféricos y de ozono, plantea la posibilidad de abordar este tipo de estudios en el campo de investigación ionosférica en las próximas décadas.

Una lectura con mayor detalle sobre los temas mencionados puede realizarse en el libro editado por Herraiz y de la Morena (2000)

COMENTARIOS FINALES

Se puede afirmar que el uso de sistemas tecnológicos de alta sofisticación ha puesto de manifiesto la importancia del conocimiento de las variaciones meteorológicas del ambiente espacial de la tierra. Así como la producción de alimentos, factor esencial para la vida humana, depende críticamente de las condiciones meteorológicas de la baja atmósfera, el uso eficiente de sistemas de alta tecnología, esenciales para la sociedad moderna, depende del conocimiento de las condiciones del ambiente espacial. En particular, las condiciones de la ionosfera controlan el funcionamiento de una vasta gama de comunicaciones vía radio y sistemas de navegación satelital. La optimización del uso de estos sistemas de comunicaciones y navegación depende crucialmente de la capacidad de comprender y predecir los cambios meteorológicos que ocurren en la ionosfera.

Un importante desafío para los años venideros: la cuestión del acoplamiento entre la atmósfera inferior y superior

Referencias

Herraiz, M., de la Morena, B.(Editores), “FISICA DE LA TIERRA. Tendencias actuales en la investigación de la ionosfera”, Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense, Madrid, N° 12, 2000.