

ALGUNOS RESULTADOS DE LA RADIOMETEOROLOGIA DE BAJAS FRECUENCIAS EN LA REPUBLICA MEXICANA

JOSÉ MERINO Y CORONADO*

RESUMEN

La identificación de masas de aire es relativamente sencilla con los métodos radiometeorológicos de frecuencias elevadas, que se reducen en última instancia a la determinación del número de Avogadro y el índice de refracción del aire, utilizando las medidas directas hechas con refractómetros o a las observaciones de los radiosondeos. Cuando no se dispone de estos elementos, es posible utilizar la forma, el número y la intensidad de las descargas de la estática atmosférica, registradas en frecuencias muy bajas, del orden de 27 a 100 KHz, para identificar la mayoría de las masas de aire sobre la República Mexicana. Se encuentra, además, que es posible pronosticar la ocurrencia de turbonadas y tormentas eléctricas con algunas horas de anticipación, en zonas restringidas por la sensibilidad de los aparatos de registro usados. Se da un resumen de los resultados obtenidos en los últimos 10 años de observaciones realizadas en el Instituto de Geofísica y en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional.

INTRODUCCIÓN

Desde hace 50 o más años se sabe que los grandes fenómenos meteorológicos son productores de estática, la cual puede registrarse en cualquier aparato de radio sintonizado a la frecuencia adecuada. Aparentemente los rayos serían la fuente más importante de los ruidos atmosféricos al registrar la estática y efectivamente es así si consideramos únicamente los grandes ruidos. Pero, existen muchos otros cuyo origen no está bien conocido —aunque deben provenir de descargas eléctricas en el seno de

* Departamento de Sismología y Física del Interior de la Tierra, Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

nubes o de variaciones de campo en las burbujas ascendentes de aire caliente— y estos ruidos son llamados por los operadores radiotelegrafistas con toda propiedad “ruidos de fondo” o “ruidos de fritura”.

Tanto los ruidos de fondo como los producidos por las descargas visibles pueden observarse en una gama de frecuencias muy extensa, desde unas decenas de Hertz hasta unos 15 Mhz, con intensidad decreciente, una función muy compleja de la frecuencia de registro. El estudio experimental de las descargas atmosféricas de diversos tipos, principalmente en sus relaciones con fenómenos meteorológicos cuya previsión pudiera ser posible utilizando los métodos que se conocen como “radiometeorología de bajas frecuencias”, ha dado algunos buenos resultados desde hace unos 15 años. Las observaciones se llevaron a cabo en parte en el Instituto de Geofísica y en parte en los laboratorios de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional como trabajo personal del autor, ya que hasta hace muy poco tiempo ha habido algún interés oficial de parte de ambas, especialmente de la ESIME, pues comienza a verse la posibilidad de aplicaciones a líneas de transmisión eléctrica, amenazadas casi todos los años por daños producidos por descargas.

Los resultados obtenidos más o menos diariamente se compararon siempre con los mapas de superficie del Servicio Meteorológico Nacional y con fotografías de satélites meteorológicos (APT) obtenidas por cortesía del operador del aparato del Instituto de Geofísica, Sr. Eroza o publicadas en los diarios como una cortesía de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

DESCARGAS Y BAJAS FRECUENCIAS

Planteamiento del Problema. Si experimentalmente se observa que casi todos los frentes fríos, los ciclones tropicales y muchos otros fenómenos meteorológicos importantes están asociados a descargas eléctricas de un determinado tipo, el problema se reduce a encontrar una teoría para la generación de esas descargas y a estudiar la transmisión de las ondas electromagnéticas por ellas generadas, con objeto de localizar la fuente por cualquiera de los métodos usuales en la técnica de las bajas frecuencias. Las observaciones del autor en México y de otros autores en diversos países permiten afirmar sin lugar a duda que muchos fenómenos meteorológicos y las diversas masas de aire están siempre asociados a determinados tipos de estática que pueden considerarse como característicos (Golde, R. H., 1950; Lugeon, J., 1928, 1938; Merino y Coronado, J., 1936a

y b; Watson, G., 1919). La transmisión de ondas de baja frecuencia y de ondas de frecuencias extremadamente bajas no es sencilla, si se ha de tomar en cuenta la acción del campo magnético terrestre, como tampoco es sencilla la teoría para explicar la generación de dichas ondas durante los grandes fenómenos meteorológicos, pero en los últimos años se ha avanzado mucho a este respecto (Al'pert Ya y D. S. Fligel, 1970).

Transmisión de las Ondas de Baja Frecuencia. La transmisión de estas ondas es hoy bastante conocida y se sabe que se propagan siguiendo una guía de ondas formada por la tierra y por la ionosfera o más exactamente, por la capa D durante el día y la capa E durante la noche. Para distancias no mayores de unos 2,000 Km es posible considerar una guía de ondas plana, ya que el error cometido al despreciar la cur-

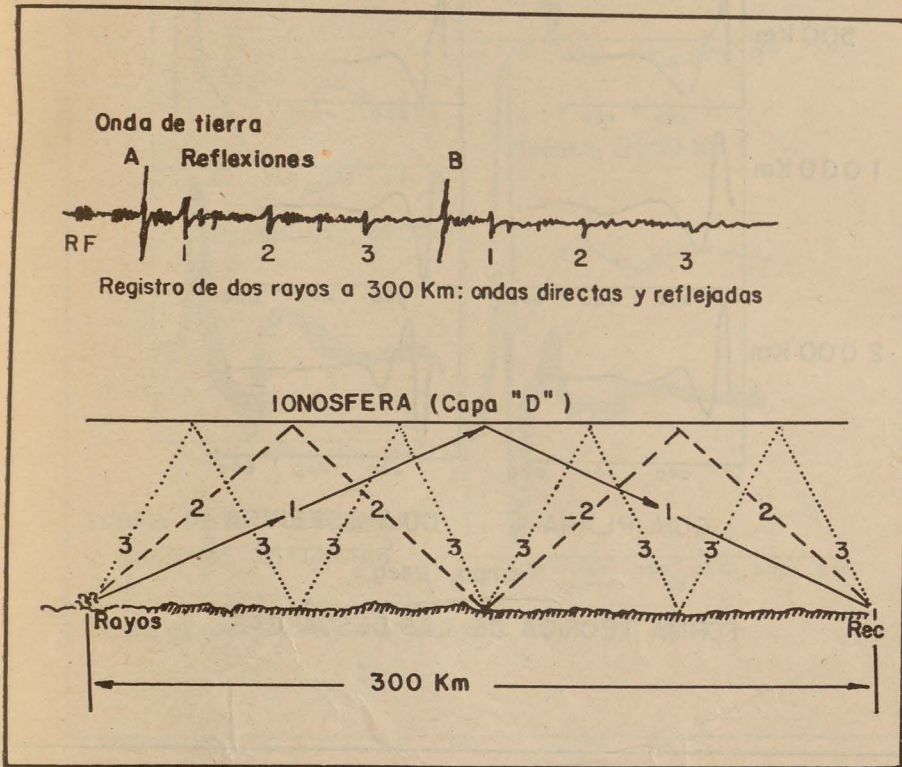


Fig. 1. A 300 km se recibe una onda directa y varias ondas reflejas (1, 2, 3) que pueden diferenciarse en un registro rápido como el de la parte superior.

vatura de la Tierra carece de importancia para fines de la radiometeorología. A distancias mayores es necesario tomar en cuenta que la guía de ondas es esférica, pero el autor no tuvo necesidad de hacerlo, ya que nunca trabajó a distancias mayores de unos 1,500 a 2,000 Km.

De acuerdo con la distancia de la fuente, el receptor registrará la onda

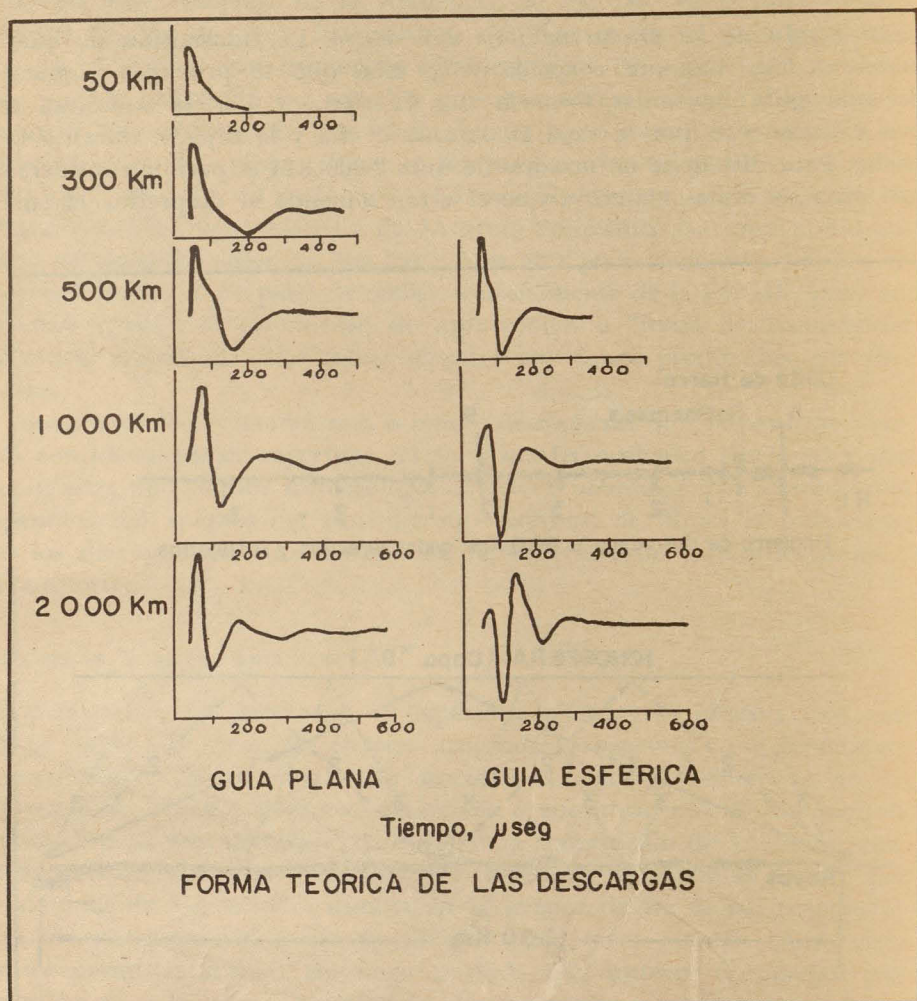


Fig. 2. Forma teórica de las descargas recibidas a diversas distancias. A la izquierda, suponiendo una guía de ondas planas y a la derecha, suponiendo una guía de ondas esféricas.

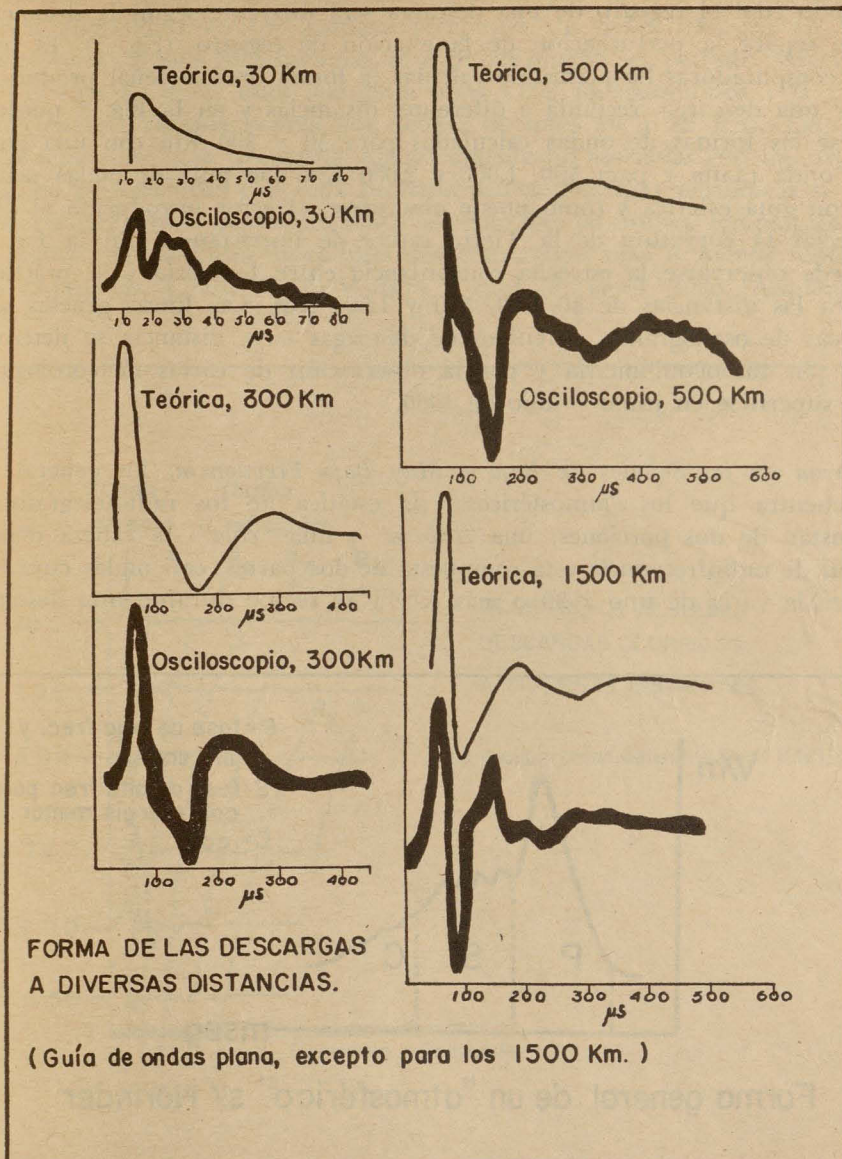


Fig. 3. Oscilogramas producidos por descargas a diversas distancias. La concordancia entre la forma real y la forma calculada es excelente.

directa y una, dos, tres o más reflexiones en la ionosfera y en la Tierra, con lo cual el registro de una descarga será diferente según la distancia que separe la perturbación de la estación de registro (Fig. 1). El uso de computadoras ha permitido calcular la forma de una señal producida por una descarga, recibida a diferentes distancias y en la Fig. 2 pueden verse las formas de ondas calculadas para 50 y 300 Km con una guía de onda plana y para 500, 1,000 y 2,000 Km con guía de ondas plana y con guía esférica y como puede observarse, el error introducido al despreciar la curvatura de la Tierra carece de importancia. En la Fig. 3 puede observarse la estrecha concordancia entre la teoría y la práctica, para las distancias de 30, 300, 500 y 1,500 Km. Las líneas gruesas son calcas de oscilogramas obtenidos de descargas cuya distancia se determinó por radiogoniometría y por la observación de cartas meteorológicas de superficie en junio y julio de 1960.

Forma de las Señales de Baja y Muy Baja Frecuencia. En general, se encuentra que los "atmosféricos" (la estática de los radiotelegrafistas) constan de dos porciones: una "cabeza" y una "cola"; la cabeza o porción de radiofrecuencia está compuesta de dos partes, con ondas cuya frecuencia varía de uno a 30 o más Khz y se recibe durante una descarga

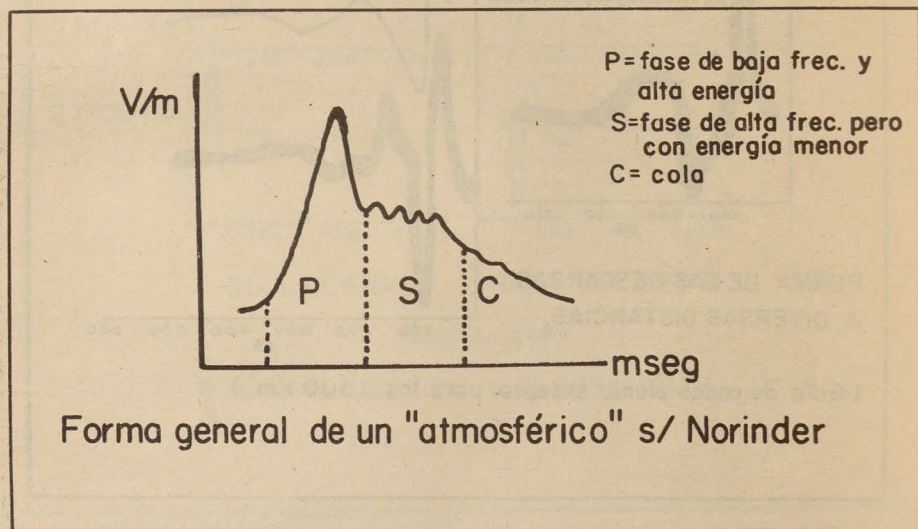


Fig. 4. Las tres posiciones principales de un parásito atmosférico, según Norinder. La cola puede faltar en muchas ocasiones.

eléctrica producida por un rayo (Fig. 4). La forma de las ondas es "casi periódica" y están fuertemente amortiguadas, por lo que se hace muy difícil eliminarlas en los aparatos receptores de radio, excepto en las ondas cortas, donde los armónicos se atenúan mucho; el periodo aumenta con el tiempo, desde unos 500 hasta unos 1,000 microsegundos y la máxima energía radiada ocurre por debajo de unos 10 a 12 Khz. Existen otras señales de baja frecuencia, aparentemente no asociadas con descargas visibles, pero debidas con toda probabilidad a descargas periódicas o de tipo oscilante que tienen lugar en el seno de las nubes tempestuosas, de nubes cumuliformes, o en procesos convectivos más o menos violentos (Appleton, E. U., R. A. Watson y L. J. F. Herd, 1926; Appleton,

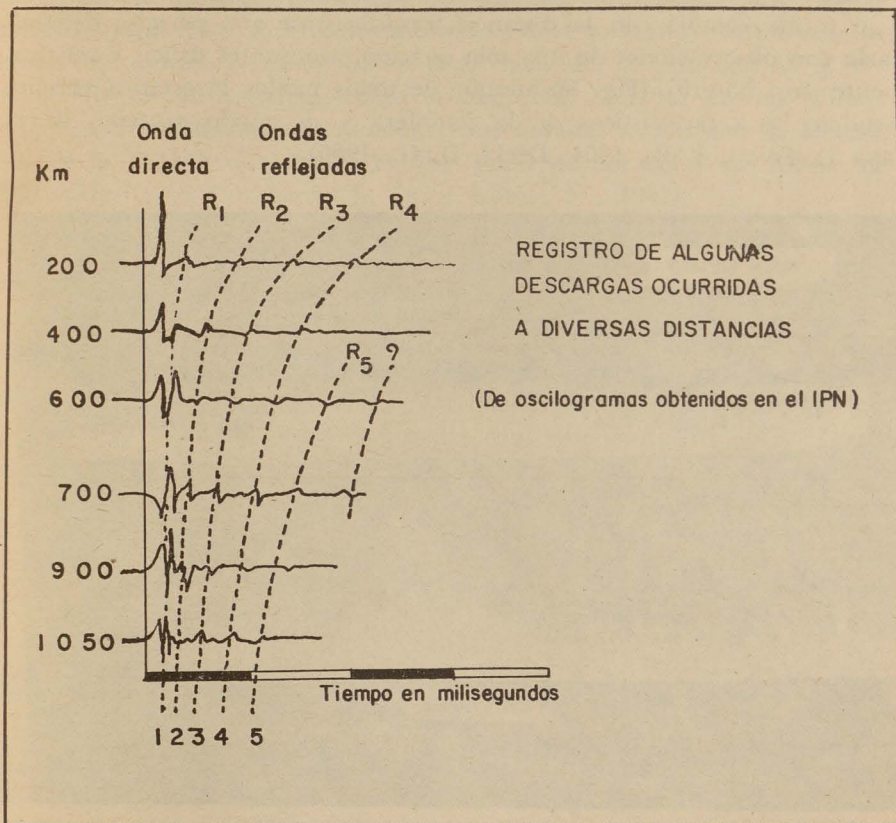


Fig. 5. La forma de los oscilogramas atmosféricos producidos a diversas distancias depende del número de ondas reflejadas y son típicos para cada distancia.

E. U. y F. W. Chapman, 1937; Hepburn, F. y E. Pierce, 1953; Morrison, R. B., 1953).

La cola no siempre está presente y cuando existe, después de que la amplitud de la cabeza se vuelve muy pequeña, la amplitud de la señal aumenta de nueva cuenta y aparece una larga cola de 300 a 500 milisegundos y hasta más, formando la porción de baja frecuencia del atmosférico, con frecuencias de menos de 3 KHz y energías máximas en las frecuencias comprendidas entre unos 60 y unos 200 hertz. Aun cuando Tépley (1959) habla de que casi todos los atmosféricos fuertes (el 98%) tienen una cola, el autor no ha podido hallarla más que en la mitad de ellos (55%) y eso principalmente en las horas que preceden a la salida del Sol, tal vez debido a las insuficiencias instrumentales del equipo de que disponía. Las señales de la estática se reflejan en la ionósfera y su forma cambia con la distancia, característica que permite determinarla con observaciones de una sola estación, aunque es difícil y relativamente caro hacerlo (Fig. 5), aunque de todos modos la estática permite estudiar las características de la ionósfera y de modo especial, de la capa D (Wait, J. R., 1964; Deeks, D. G., 1966).

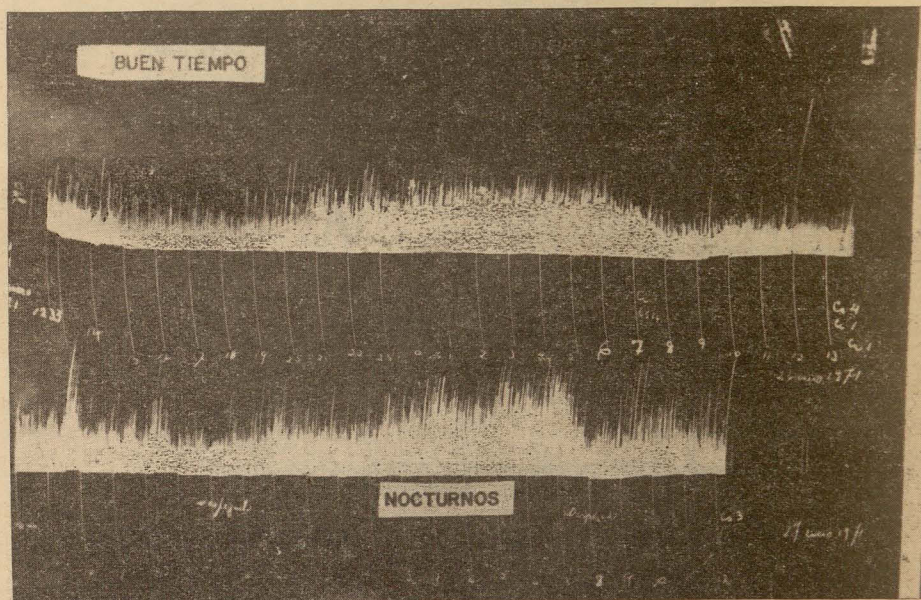


FIG. 6. Registro del Radiomaximógrafo del 25 al 27 de enero de 1971, con cielos despejados en todo el altiplano. La estática recibida a más de 1500 km aumenta durante la noche (hora del meridiano 90°W).

Propagación de los Atmosféricos. Durante el día se propagan como cualquier señal de ondas muy largas, por reflexiones alternadas en la capa D y en la Tierra, lo cual limita grandemente su alcance. Pero, durante la noche el alcance aumenta mucho, pudiéndose recibir con aparatos sencillos de no muy alta sensibilidad los atmosféricos originados en centros tempestuosos situados a más de unos 2,000 Km. Con los receptores que utilizó el autor, durante el día se registraron tormentas o descargas en un radio de unos 1,000 Km, llegándose a más de 3,000 Km durante la noche (Fig. 6). Se observa muy frecuentemente la influencia de la salida y de la puesta del Sol, como lo ilustra la Fig. 7, en la cual vemos registros de varios días consecutivos, con el aparato ajustado para que el fenómeno fuera registrado de modo preferente.

Durante los Eclipses Totales de Sol, cuando la ionófera pasa rápidamente de condiciones diurnas a condiciones "casi nocturnas" se pueden observar con mucha claridad las diversas fases de la propagación y del alcance de los atmosféricos, como lo comprobó el autor en un trabajo reciente sobre observaciones radioeléctricas llevadas a cabo por la Delegación de la ESIME durante el Eclipse Total de Sol del 7 de Marzo de 1970. (Merino y Coronado, J., 1970; König, N., 1961).

IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AIRE.

RADIOMETEOROLOGÍA DE ALTA FRECUENCIA

Se sabe que la polarización de un fluido polar bajo la influencia de un campo de radiofrecuencia elevada, puede determinarse mediante mediciones del número de Avogadro, de la constante dieléctrica, de la temperatura y de la densidad. Se llega así a la igualdad siguiente:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3kT} \right] \quad (1)$$

en la que

- ϵ es la constante dieléctrica
- M es el peso molecular
- ρ es la densidad
- α_0 es la polarizabilidad media de las moléculas, suponiendo que no existe interacción de unas con otras
- k es la constante de Boltzman
- T es la temperatura absoluta

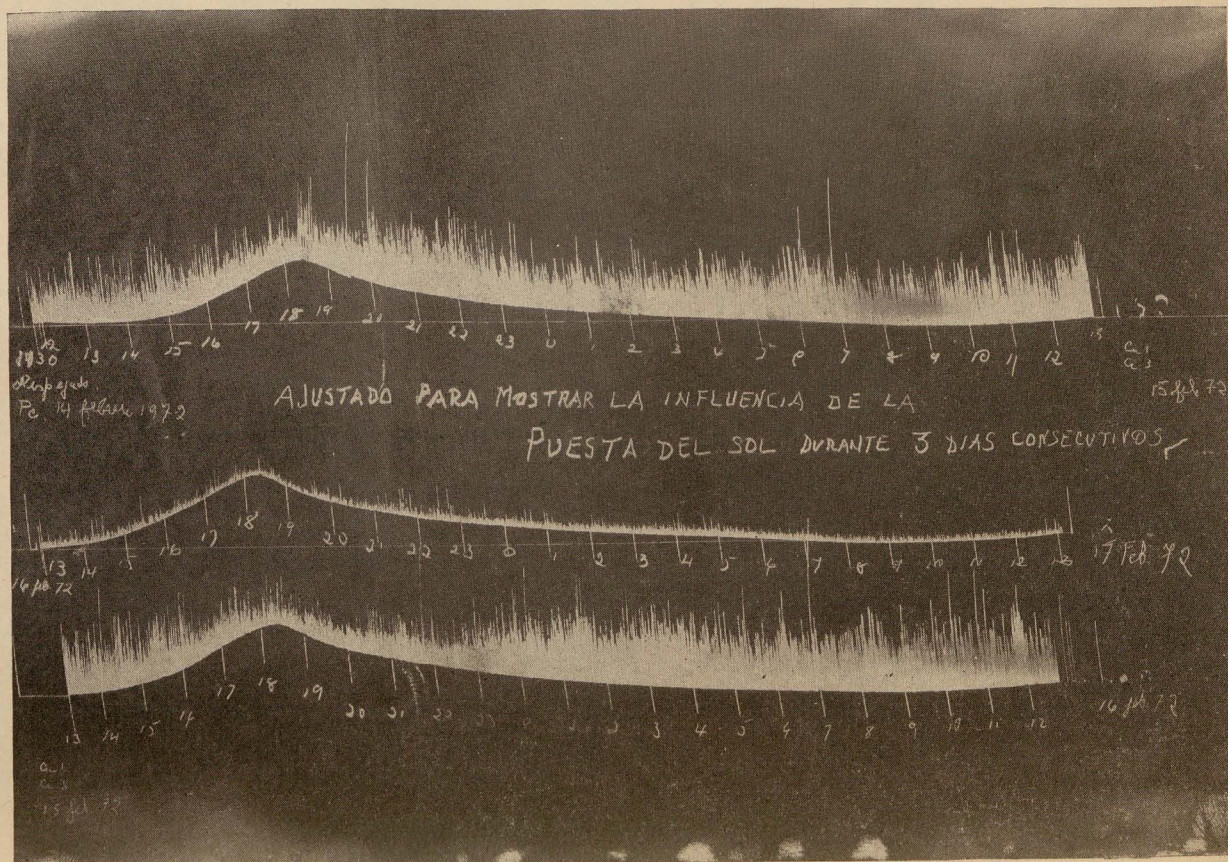


FIG. 7. Influencia de la puesta del Sol en el registro del Radiomaximógrafo, con cielos despejados en todo el altiplano mexicano. La influencia de la salida del sol puede verse (7^h) en la Fig. 6.

N es el número de Avogadro y
 μ es el momento permanente del dipolo.

Si llamamos n al índice de refracción de la tropósfera, donde tenemos solamente un gas polar (vapor de agua),

$$n = \sqrt{\mu\epsilon}$$

donde μ es la permeabilidad del medio, aproximadamente unitaria para el aire.

Como

$$n = \sqrt{1 + (\mu\epsilon - 1)}$$

podemos aproximar y escribimos

$$n - 1 \approx \frac{\mu\epsilon - 1}{2} \quad (2)$$

Pero el número de Avogadro se puede expresar como

$$N = K_1 \frac{P_g}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} + K_4 \frac{P_c}{T} = (n - 1) 10^6 \quad (3)$$

donde

N es el número de Avogadro,
 P_s es la presión parcial del aire seco
 e es la presión parcial del vapor de agua,
 P_c es la presión parcial del CO_2
 T es la temperatura absoluta y las
 K son constantes

y es posible caracterizar el aire de una porción de la tropósfera determinando directamente su índice de refracción n , o de modo indirecto, midiéndole su constante dieléctrica.

Este tipo de mediciones es de gran importancia, porque permite predecir el comportamiento de los haces de ondas de los radares y de otras ayudas a la navegación aérea bajo diversas condiciones meteorológicas. En efecto, de (3) se infiere que con los datos suministrados por un radiosondeo es posible calcular el número de Avogadro o el índice de refracción del aire para diversas alturas. El autor determinó en muchas ocasiones este último, para calcular el número de Avogadro, usando para ello aparatos de dos tipos:

- a) de cavidad resonante y
- b) de capacidad patrón.

En ambos casos se utilizaron frecuencias muy elevadas, como es usual en este tipo de determinaciones.

Como la fabricación de una cavidad resonante patrón nos ofrece siempre algunas dificultades, utilizamos de preferencia el método del oscilador de frecuencias muy elevadas, cuyo circuito tanque se sintoniza alternativamente con una capacidad patrón encerrada en un recipiente lleno de nitrógeno y con una capacidad geoméricamente idéntica, pero colocada en el aire ambiente.

Las diferencias de frecuencia entre las dos medidas se miden con un frecuencímetro de precisión y a partir de ellas se calcula directamente el índice de refracción. El aparato construido en el Instituto Politécnico es en esencia un "Refractómetro de Hay".

Debido a lo difícil que es obtener acceso a los datos de los radiosondeos que se llevan a cabo en el país, este método de identificación de masas de aire se abandonó. De todos modos, en otros lugares se ha tratado el tema con bastante extensión y hoy sólo se trataría de aplicar a México estas técnicas que son muy prometedoras, sobre todo para pronosticar el posible comportamiento de los aparatos de radar utilizados en los aeropuertos, bajo diversas condiciones meteorológicas.

IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AIRE.

RADIOMETEOROLOGÍA DE BAJA FRECUENCIA

Está más al alcance de los medios de que dispone el autor, el empleo de los métodos de la radiometeorología de baja frecuencia. En efecto, en cualquier parte del mundo un receptor de radio sintonizado a frecuencias comprendidas entre unos 14 Khz y unos 100 Khz recibirá entre 3 y 50 o 60 descargas *por segundo*, dependiendo de la sensibilidad a la que se ajuste el instrumento.

Si suponemos que las ondas electromagnéticas producidas por los rayos visibles se generan con una potencia media aproximadamente semejante para todas las descargas, la intensidad de la recepción será alguna función de la distancia.

Se utilizaron tres aparatos muy sencillos para la mayoría de las observaciones de Radiometeorología de Baja Frecuencia:

- a) un Radiomaximógrafo
- b) un Contador de descargas por minuto y
- c) un Radiogoniómetro de sector estrecho

así como algunos electrómetros para la medición del campo eléctrico de la atmósfera bajo distintas condiciones meteorológicas.

A cualquiera de los aparatos puede acoplársele un osciloscopio con una buena base de tiempos, lo que así se hace algunas veces, para obtener ciertos registros importantes, aunque a causa del alto costo de dichas observaciones, éstas no se llevan a cabo frecuentemente.

El *Radiomaximógrafo* es simplemente un receptor de R. F. S. acordado sobre 27 Khz, cuya salida se mide con un voltímetro de válvula que registra de modo continuo sobre una tira de papel ahumado. Debido a la constante de tiempo del instrumento de medida, se obtiene una gráfica que casi llega a ser la envolvente de las máximas que ocurren por encima de un determinado valor.

El *Contador de Descargas* es un receptor idéntico al anterior, pero cuya salida está provista de un integrador o frecuencímetro a constante de tiempo, que registra igualmente sobre una tira de papel ahumado.

El *Radiogoniómetro de Sector Estrecho* es un instrumento con dos cuadros colocados a 90° sobre un mismo eje, de modo que pueden girar juntos conservando su posición relativa. Mientras uno de los cuadros tiene una respuesta en cardioide, el otro la tiene en lemniscata. Se obtiene una salida registrable únicamente en el caso de que el cuadro cardioide registre un máximo cuando simultáneamente el cuadro en lemniscata esté registrando cero, con lo cual se asegura una lectura en azimut con un error de apertura no mayor de dos o tres grados. Con este aparato se determina el azimut de cualquier centro productor de estática que se encuentre dentro de un radio de unos 1500 Km, que es el alcance ordinario diario del instrumento.

Identificación del Aire Marítimo Tropical. Este aire se caracteriza por su alto contenido de humedad, por su temperatura relativamente alta, por sus fenómenos convectivos y por su alta actividad eléctrica.

Cuando este tipo de masa de aire se encuentra sobre el altiplano, el valor del campo electrostático de la atmósfera crece mucho y llega a alcanzar valores de miles de voltios por metro cuando se prepara una tormenta eléctrica en las cercanías, como puede comprobarse utilizando un electrómetro adecuado, que en este caso, es uno muy sensible, o sea un tipo de voltímetro de válvula que registra sobre una tira de papel ahumado.

Según, C. T. R. Wilson, al ocurrir una descarga visible en las proxi-

midades de la estación de observación, la intensidad del campo electrostático varía como lo indica la Fig. 8. En la Ciudad Universitaria, sin embargo, no todas las descargas producidas por los rayos ocurridos en un radio de unos 4 Km ocasionan ese tipo de variaciones del campo y un

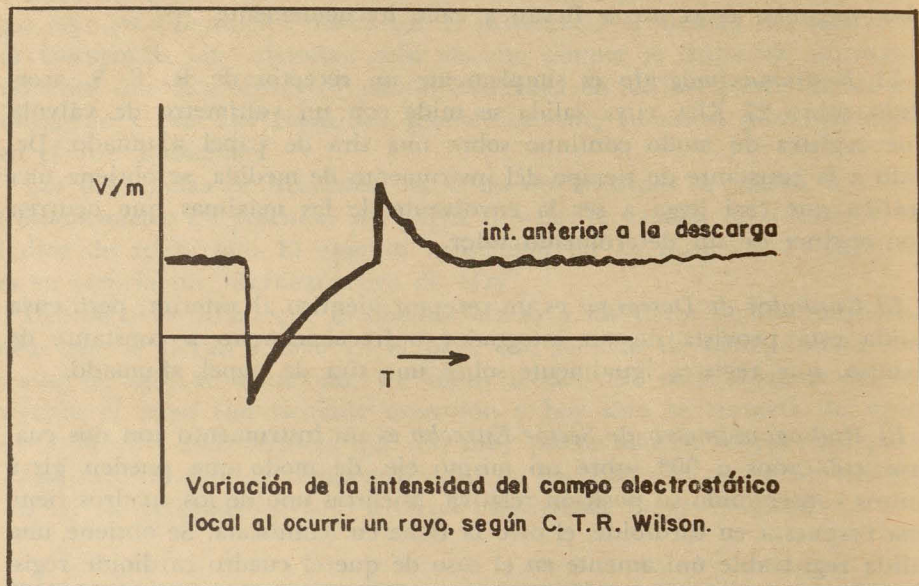


FIG. 8. Modelo aceptado de la variación del campo eléctrico de la atmósfera al ocurrir un rayo en las cercanías de la estación de observación.

porcentaje muy apreciable de ellas no se comporta así (Fig. 9). Este tipo de estudios puede ser de utilidad para las empresas productoras de electricidad, las radiodifusoras y las compañías de aviación.

Cuando la descarga ocurre muy cerca de la estación de observación se observan primeramente cuatro o cinco trenes de ondas cuya frecuencia es de unos 20 Khz y duran poco menos de 10 o 12 milisegundos, trenes que van seguidos por un fuerte ruido con duración de dos o tres milisegundos, pero no siempre el fenómeno es completo, ya que puede faltar en ocasiones la porción de radiofrecuencia.

Cuando la tormenta ocurre a distancias mayores de 100 Km, la forma de los registros varía mucho, debido a las reflexiones de las ondas en la capa D principalmente. Se recibe entonces una "onda de tierra" directa y algunas ondas reflejadas. Si se tiene la suerte de que los rayos no caigan muy seguidos en el tiempo, es posible obtener buenos oscilo-

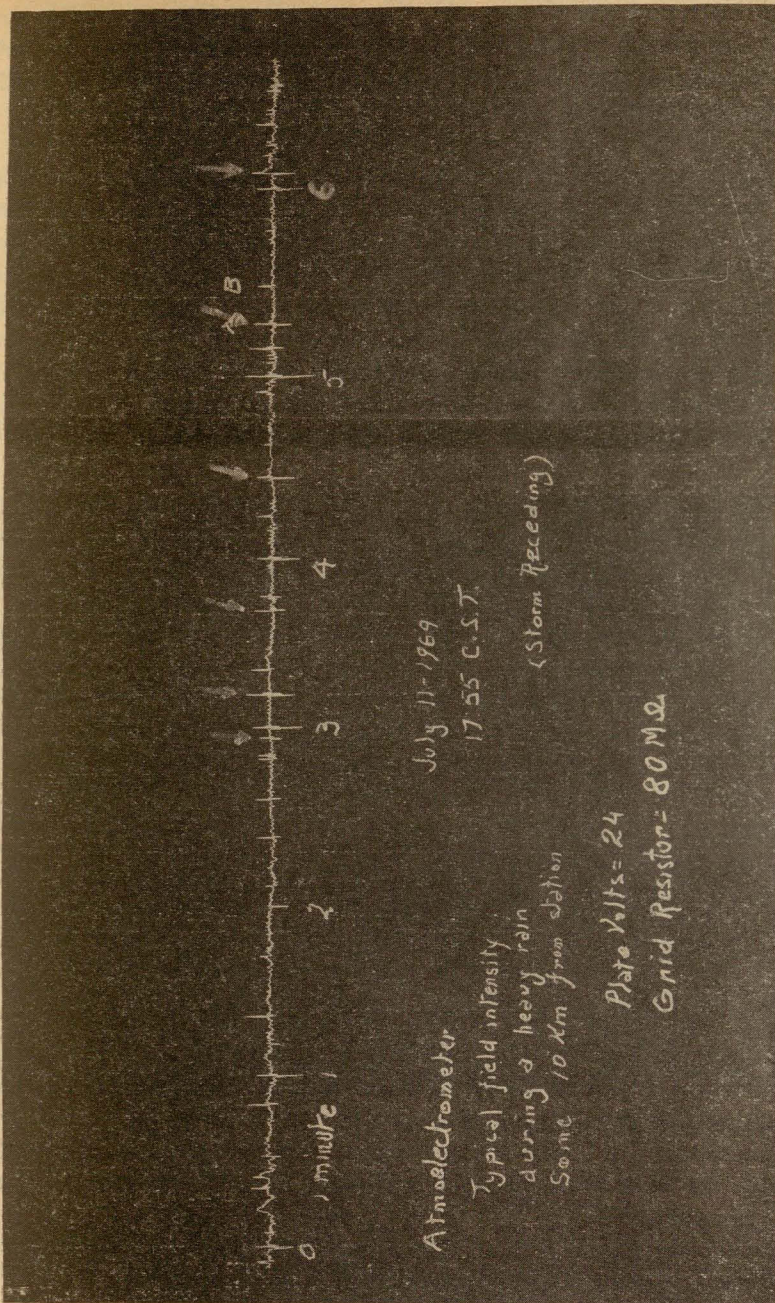


FIG. 9. Registro de la intensidad de campo durante una turbonada a unos 10 km de Ciudad Universitaria. Las flechas indican las descargas de acuerdo con el modelo de Wilson. Hay muchas otras descargas que no se ajustan al modelo.

gramas de las ondas que producen y con ellos es posible calcular la distancia de la fuente, con alguna precisión. Sin embargo, este método no es recomendable por lo costoso e inseguro, aunque se hayan obtenido algunos buenos resultados con él.

Identificación de Aire Polar Continental. Este aire contiene poca humedad y cuando cubre la mayor parte del país, el Radiomaximógrafo registra muy poca estática. Ajustando su sensibilidad a unos 1 000 Km, el contador de descargas registra menos de 20 o 25 por minuto. Pero tan pronto como comienza a modificarse, la estática aumenta igualmente en su intensidad y en el número de descargas por minuto.

Con registros continuos durante varios días, no es posible equivocarse en la identificación. De todos modos, antes de una invasión de aire continental polar registraremos el paso de algún tipo de frente frío.

Identificación de Aire Superior. Los métodos de la radiometeorología de baja frecuencia con una sola estación no son suficientes para poder diferenciar el aire superior del polar continental modificado pero si se mide el índice de refracción (o el número de Avogadro) el problema se simplifica y, en este caso, la radiometeorología de altas frecuencias ofrece más posibilidades, ya sea utilizando un refractómetro de Hay o uno de cavidad resonante, o, también utilizando los datos de un radiosondeo, aunque en este último caso no se logra nada, ya que precisamente la información suministrada por los radiosondeos se utiliza primariamente para la identificación de las masas de aire.

Si se dispusiera de varias estaciones radiometeorológicas de baja frecuencia completas, la identificación de las masas de aire que invaden el país en las distintas épocas del año, podría hacerse fácilmente.

LOCALIZACIÓN DE ALGUNOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS PARTICULARES Y AYUDA EN EL PRONÓSTICO DE LOS MISMOS

Insistimos una vez más: la radiometeorología de alta o de baja frecuencia no es un sustituto de los métodos usuales de pronóstico, sino un nuevo campo que permite complementarlos y esta afirmación debe quedar bien clara. La ayuda de esta nueva técnica será tanto más apreciable, cuanto más precarios sean los medios de que se disponga para realizar un buen pronóstico.

Veamos algunos fenómenos cuya localización o pronósticos se facilitan con las técnicas de la radiometeorología de baja frecuencia.

Llamaradas Solares (Ráfagas). Muchos observatorios astronómicos llevan hoy un registro de la estática atmosférica durante las horas del día en que el sol se encuentra sobre el horizonte, ya que un aumento repentino de la misma indica la presencia de una ráfaga solar; la mayor cantidad de rayos ultravioleta recibidos hace más conductora la ionosfera y las descargas de los rayos, que existen en todo momento en diversos puntos de la Tierra, se recibirán de distancias mayores, aumentando así el registro de la estática.

Este método, conocido en inglés como "SEA" (Sudden Enhancement of Atmospheric) se utilizó ampliamente durante todo el Año Geofísico Internacional (1957-58) y se sigue usando hoy para vigilar el sol durante los días nublados, en los cuales las observaciones telescópicas son imposibles de realizar. En la Fig. 10 tenemos un registro del radiomaximógrafo durante una ráfaga solar que ocasionó una fuerte tormenta magnética.

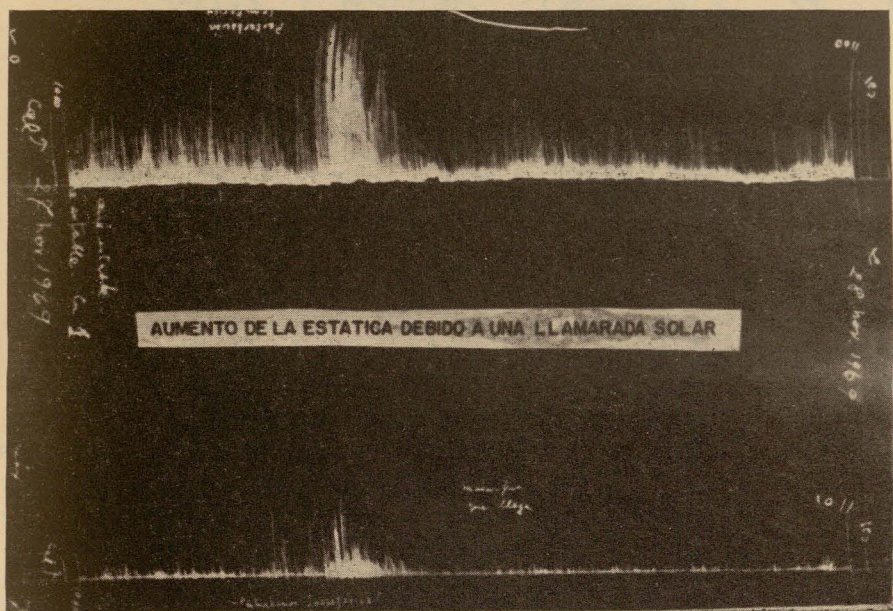


FIG. 10. Durante el arribo de una masa Pc se produjo una llamarada solar que hizo aumentar la estática casi 4 veces. La gráfica inferior es de un aparato idéntico al de arriba, pero ajustado a una sensibilidad 3 veces menor.

Aguaceros o Turbonadas del Verano. La Fig. 11 ilustra el mecanismo de la formación de una turbonada. Es cosa bien sabida que la actividad

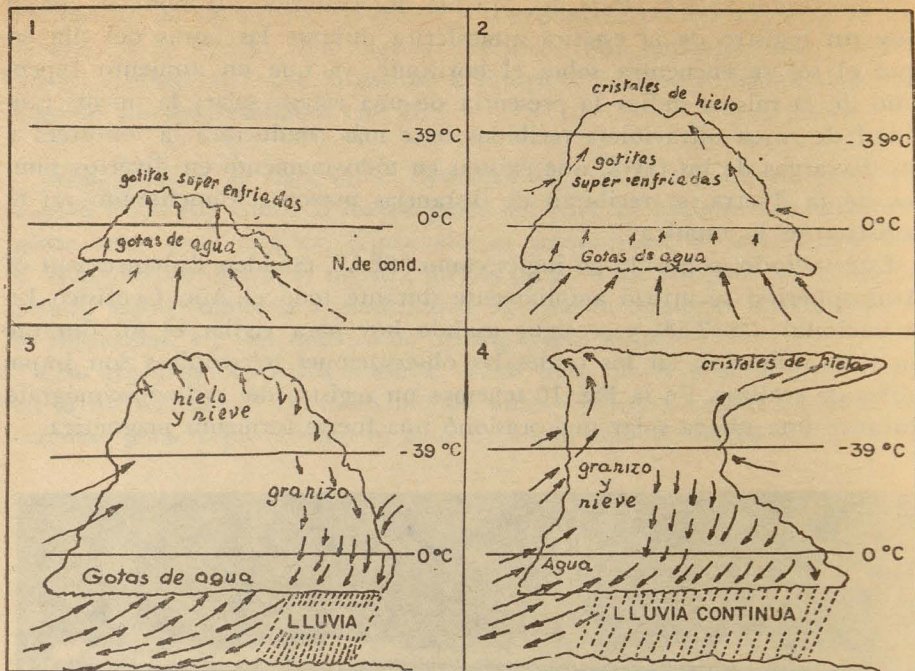
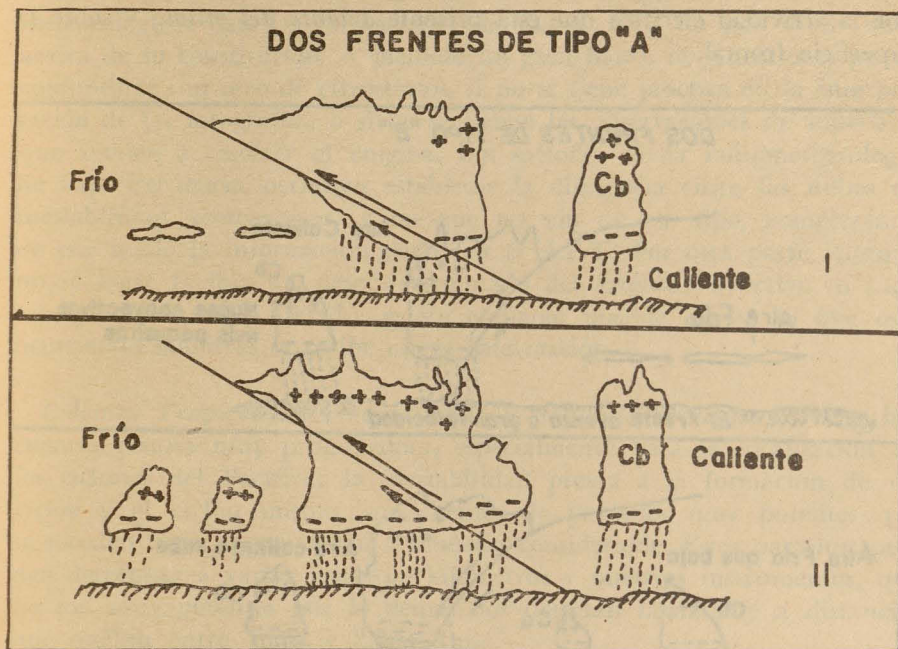


Fig. 11. Las cuatro etapas en la formación de una turbonada. Antes de que sea visible la nube cumuliforme de la primera etapa, la actividad eléctrica permite determinar su formación posterior.

eléctrica es muy intensa en este tipo de fenómeno, muy difícil de pronosticar por lo demás, por ser de carácter muy localizado. Sin embargo, aún antes de que aparezcan las primeras nubes cumuliformes de la primera etapa, el radiomaximógrafo y el contador de descargas producen un registro característico que puede facilitar el pronóstico con algunas horas de anticipación. Si nos auxiliamos de un buen osciloscopio, o mejor aún, de dos estaciones radiogoniométricas espaciadas de modo conveniente (una de ellas puede ser móvil, montada en cualquier tipo de vehículo adecuado) la localización de los lugares donde va a ocurrir una turbonada es por lo demás segura; el autor de este trabajo ha logrado pronosticar unas 70 de ellas en los últimos 10 años, con un error inferior al 10%.

Llegada de Nortes y Frentes Fríos. No todos los frentes acusan una actividad eléctrica peculiar y definida. Como regla general puede afirmarse que mientras el frente frío es ruidoso eléctricamente hablando, el frente caliente es mudo.

La Fig. 12 muestra dos frentes del tipo A. En la parte superior (I) tenemos el caso de una masa fría *estable*, mientras que la masa de aire caliente es *inestable* o *convectivamente inestable*. Las nubes convectivas se formarán como en la figura, la actividad eléctrica será *pequeña* o *débil* y el frente es difícilmente detectable.



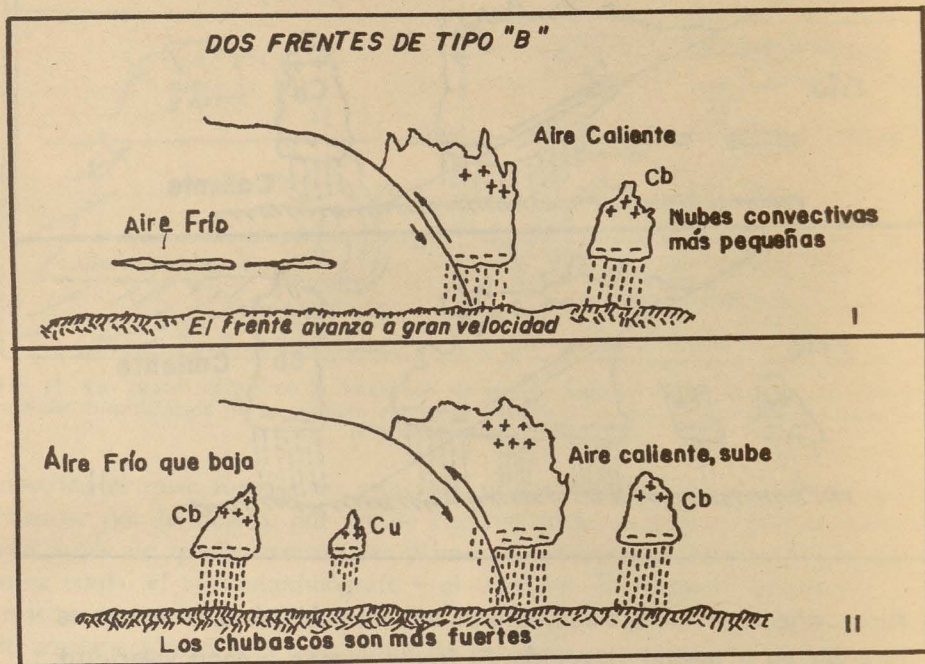
- I. Aire caliente estable, o convectivamente inestable. Ambas masas se mueven en la misma dirección. El frente avanza a poca velocidad.
- II. Ambas masas inestables, o convectivamente inestables y se mueven en la misma dirección. El frente avanza a poca velocidad.

Fig. 12. El frente del tipo esquematizado en I es difícilmente detectable por radiometeorología de baja frecuencia. El frente esquematizado en II sí se puede detectar.

Si el aire frío es también *inestable* (II) se formarán nubes de inestabilidad también en la masa fría, *bajo la superficie frontal*. La actividad eléctrica del frente será mayor y será posible detectarlo por radiometeorología de baja frecuencia.

Si ambas masas están estratificadas de modo estable, o si solamente la masa fría es inestable, la actividad eléctrica será tan pequeña que la detección del frente se torna imposible, aun si en el segundo caso se forman algunas nubes cumuliformes.

La fig. 13 muestra dos frentes de tipo B, que están expuestos al fenómeno de frontolisis. En I el aire caliente es inestable o convectivamente inestable, mientras que el aire frío es estable. Este frente es detectable por la actividad eléctrica que está presente *delante del mismo* y sobre la superficie frontal.



Las dos masas se desplazan en direcciones opuestas. El frente avanza con gran velocidad. I. Aire caliente inestable, o convectivamente inestable. II. Ambas masas inestables, o convectivamente inestables.

Fig. 13. En el caso I sólo se puede detectar lo que ocurre adelante del frente. En el caso II también se puede detectar el frente mismo y las nubes cumuliformes que se forman detrás de él.

Cuando ambas masas son inestables, o convectivamente inestables, los chubascos son fuertes, la velocidad de avance del frente es grande y la actividad eléctrica también lo es.

La detección de estos frentes es segura a centenares de kilómetros de distancia.

El uso de dos o más radiogoniómetros permite determinar el avance de este tipo de frentes, avance que se lleva a cabo siempre a gran velocidad.

Ayuda a las Observaciones del A.P.T. Las fotografías de los satélites meteorológicos dan las *formaciones de nubes*, pero no nos dicen nada acerca de su constitución. A menudo un gran banco de Altostratos puede confundirse con otro de cirrostratos, si no se tiene práctica en la interpretación de las fotografías, o si no se tienen las observaciones de superficie que ayuden a resolver el enigma. Los métodos de la radiometeorología de baja frecuencia permiten establecer la diferencia entre las nubes de inestabilidad (convectivas) y las que no son de ese tipo, completando de este modo la información dada por el A.P.T. Por otra parte, aunque no se logre recibir un paso determinado del satélite respectivo, o bien este paso está muy alejado, es sin embargo posible captar lo que está ocurriendo mientras se recibe nueva información.

Ciclones Tropicales. Es aquí donde la radiometeorología de baja frecuencia resulta muy prometedora, especialmente para la localización de los ciclones del Pacífico; la inestabilidad previa a la formación de un ciclón y el ciclón mismo, son fuentes de parásitos muy potentes que se suceden unos a otros a una frecuencia considerable. Estos parásitos pueden detectarse a varios miles de kilómetros y nuestros instrumentos, que no son muy potentes por lo demás, los detectan fácilmente a distancias que oscilan entre 1,500 y 2,000 Kms.

Para seguir la marcha de los ciclones del Pacífico utilizamos un radiogoniómetro de sector estrecho, un radiomaximógrafo y un contador de descargas intonizados a 27 Khz. En ocasiones también utilizamos un buen osciloscopio, pero no es este un instrumento del que disponemos frecuentemente en nuestra estación de observación. Con estos instrumentos hemos podido seguir la trayectoria de al menos 35 ciclones del Pacífico en los últimos 15 años.

Hemos tenido siempre la limitación de trabajar aisladamente con una sola estación, por lo cual, cuando fue posible llevar a cabo observaciones desde lugares separados por algunos centenares de kilómetros, esas observaciones no fueron nunca simultáneas y las distancias tuvieron siempre que ser determinadas por la forma de las descargas observadas en el osciloscopio, método que no es recomendable a causa de lo inseguro, caro

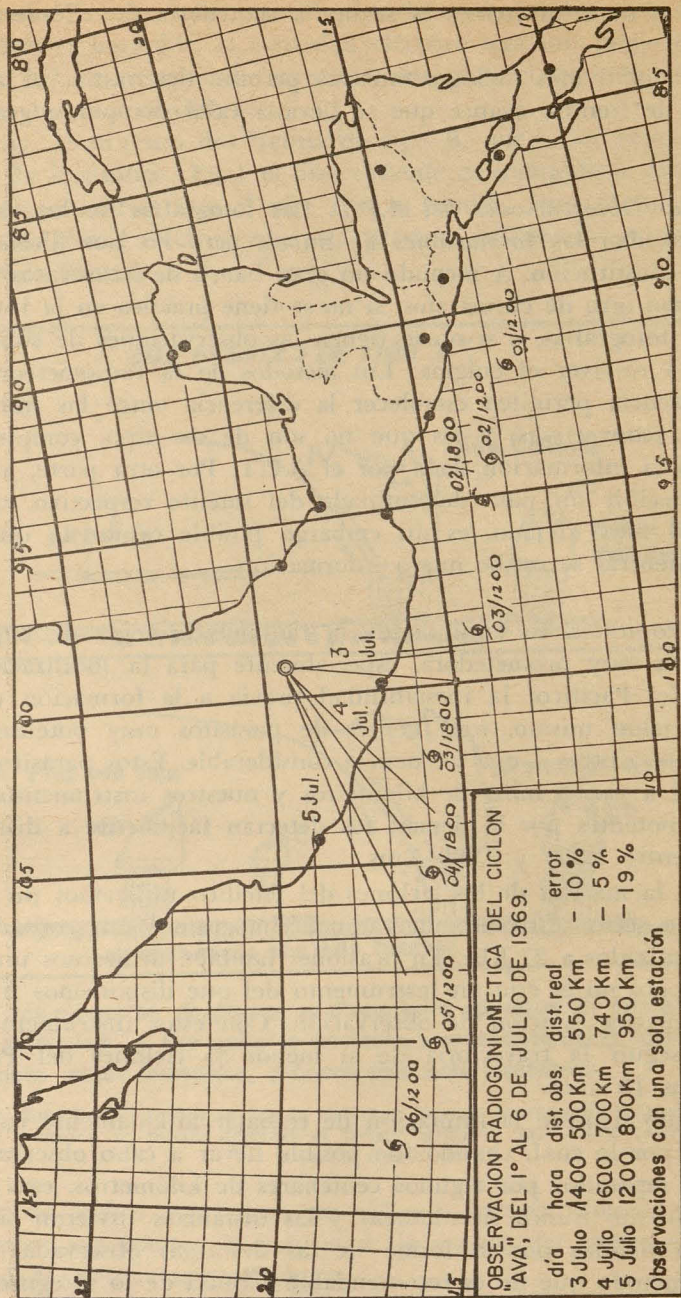


Fig. 14. Como se pudo seguir buena parte de la trayectoria del ciclón AVA (1° al 6 de julio de 1969) con un radiogoniómetro y un radiomaximógrafo.

y de complicada elaboración, ya que es necesario tomar varias decenas de fotografías antes de poder obtener dos o tres que sirvan para el caso.

Dos ejemplos de observaciones bastarán para dar una muy clara idea de la seguridad que ofrecen las observaciones radioeléctricas para la localización de los ciclones del Pacífico.

La Fig. 14 indica la manera como pudimos seguir buena parte de la trayectoria del ciclón AVA (1º al 6 de julio de 1969) y comparar nuestros resultados con las observaciones del Servicio Meteorológico de la Secretaría de Agricultura. En ella se dan las posiciones determinadas por éste a las horas marcadas en la carta.

El autor no observó con el radiogoniómetro más que los días 3 de julio a las 14 h, 4 de julio a las 16 h y 5 de julio a las 12 h, por haberse descompuesto el aparato, pero se tienen los registros continuos del radiomaximógrafo y del contador de descargas durante toda la duración del meteoro, registros que no se reproducen por falta de espacio.

Aparecen en la carta los ángulos dados por el radiogoniómetro para la fuente de estática del ciclón: la bisectriz de cada uno de ellos nos lleva a un punto situado *un poco atrás* del ojo de la tormenta, de acuerdo con la distancia determinada por observaciones con el osciloscopio. Los resultados son bastante buenos; no solamente la dirección corresponde muy bien a la posición probable del ciclón a la hora de la observación, sino que el error en la determinación de las distancias puede considerarse como muy pequeño si se toma en cuenta la pobreza de los medios utilizados.

Las distancias resultaron siempre demasiado cortas: 10% el día 3 de julio; 5% el día 4 y 19% el día 5. Si hubiésemos dispuesto de dos estaciones separadas unos 200 a 300 Kms para llevar a cabo observaciones radiogoniométricas simultáneas, la localización de AVA, como la de muchos otros ciclones observados, habría sido perfecta sin duda alguna.

En la Fig. 15 tenemos el registro del radiomaximógrafo y el del electrómetro de intensidad de campo entre las 11:30 del 14 de octubre y las 15 h del día 15 de octubre de 1971. Existía una perturbación frente al puerto de Manzanillo, reportada por el Servicio Meteorológico y localizada igualmente por radiogoniometría. De las 15 a las 18 h del día 14 se observa una fuerte estática de origen convectivo local. Luego la estática cambia al régimen nocturno típico de los ciclones y apenas se nota el descenso de intensidad usual a la salida del sol, a las 7 h del día 15, a pesar de que todo el altiplano tenía cielos despejados.

En la tarde del día 15, fenómenos locales hicieron aumentar la estática y hubo aguaceros con tormenta eléctrica y granizo de las 13:30 a las

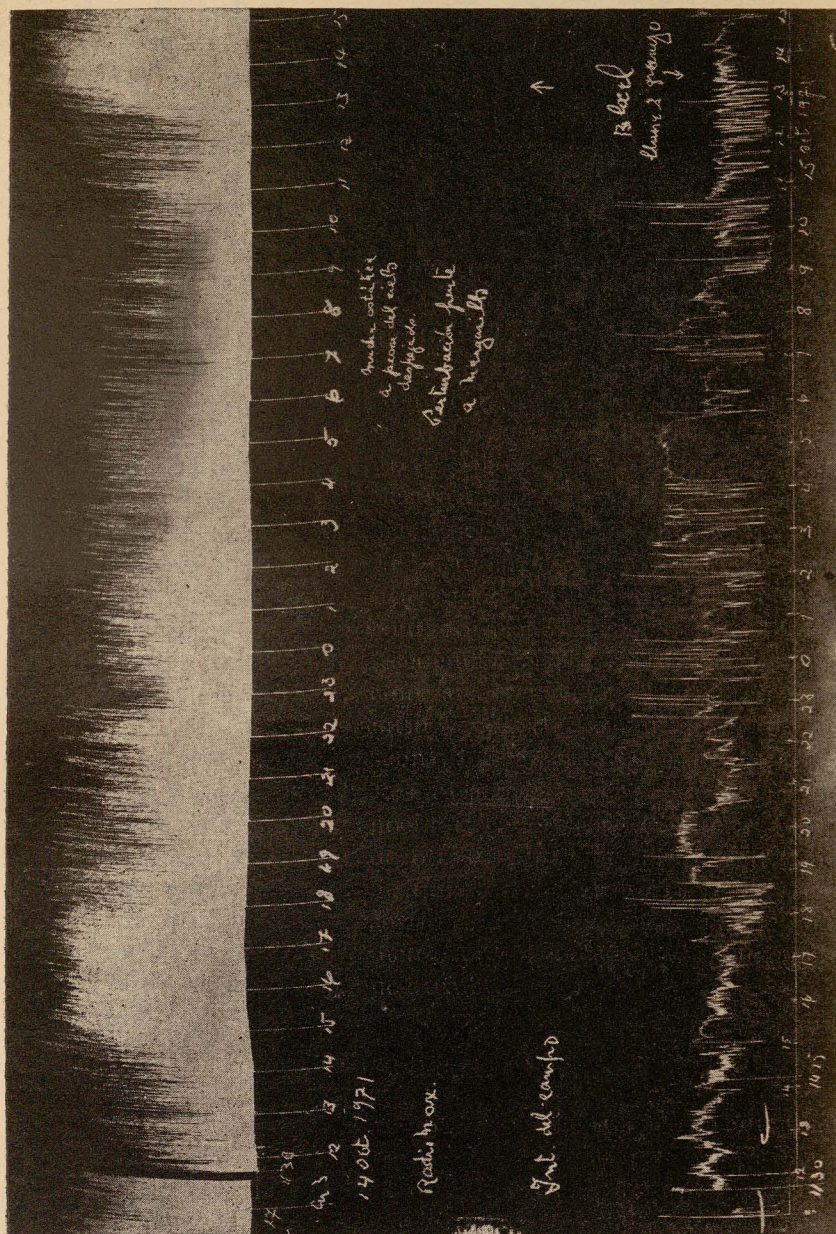


Fig. 15. La noche del 14 al 15 de octubre de 1971 había una perturbación frente a Manzanillo y cielos despejados en el Altiplano. La estática era muy fuerte y el registro es típico de los días de ciclos en nuestras costas. Abajo, intensidad del campo eléctrico en Ciudad Universitaria.

14:45 h. Las variaciones del campo electrostático entre las 21:30 del 14 y las 6:30 del 15 corresponden a las que se observan a menudo cuando hay ciclones del Pacífico a la distancia conveniente para que sean registradas con claridad.

Con respecto a las observaciones de los ciclones, podemos establecer las siguientes CONCLUSIONES:

- A) Existe siempre una actividad eléctrica frecuente en los Cumulonimbus (Cb) de la periferia y del anillo de intensa convección alrededor del "ojo" de la tormenta.
- B) La actividad eléctrica aumenta durante la *formación* del ciclón, disminuye durante su madurez y vuelve a aumentar durante su disipación. "Se han observado rayos frecuentes, casi continuos, en el semicírculo destructor de las tormentas tropicales... Las tormentas eléctricas se han observado más frecuentemente después de que el centro ha pasado, por lo que se considera a veces que la tormenta eléctrica es un signo de que ya pasó el ciclón". (Tannehill 1928). Tal fue el caso del ciclón de Manzanillo en 1959.
- C) El radiomaximógrafo registra *siempre* un gran aumento de la estática cuando aparecen ciclones dentro de su radio de acción. Si el contador de descargas registra al mismo tiempo un aumento en la frecuencia de las mismas, ha de sospecharse la presencia de un ciclón, si es la temporada de éstos. Entonces el radiogoniómetro permitirá localizar el azimut (y la distancia si se tiene un osciloscopio acoplado al instrumento) de la tormenta.
- D) Las observaciones para "cazar ciclones" deben hacerse durante la noche, unas dos horas después de la puesta del sol, pero no menos de otras dos antes de la salida del mismo, con el fin de asegurarse de que toda la trayectoria de las ondas de la estática va a ser recorrida dentro de una "guía de ondas" que se encuentra totalmente en la obscuridad y sujeta por ello a un régimen totalmente nocturno.

CONCLUSIONES FINALES

La radiometeorología es, en general, un campo muy prometedor para investigaciones de ciencia aplicada y, en el caso de los ciclones del Pacífico, parece un medio barato y eficiente para ofrecer una mayor protección a los navegantes de las costas mexicanas del Pacífico, sin que su costo sea tan elevado como el de las estaciones de radar y sería de desear

que pudieran establecerse al menos dos estaciones completas, separadas por una distancia conveniente, a fin de hacer observaciones simultáneas en la próxima temporada de ciclones y continuarlas durante un tiempo prudencial que permita obtener conclusiones efectivas acerca de la bondad del método.

Parece ser que donde quiera que existan fenómenos de convección en la atmósfera, los métodos radiometeorológicos se prestan para efectuar pronósticos de mejor calidad, auxiliando a los sistemas y prácticas usuales en la meteorología en estos casos.

BIBLIOGRAFIA.

- WATSON, G. The transmission of electric waves round the Earth. Proc. Roy. Soc. 95A:546 (1919).
- LUGEON, JEAN. Enregistreur d'intensité des parasites atmosphériques. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt. (1938).
- LUGEON, JEAN. Un appareil pour déceler l'origine géographique de l'air. Séance de la G. M. A., 1927. Archives Sc. Phy. et Nat. 5me Période, Vol. 10, Genève, 1928.
- MERINO Y CORONADO, J. La prevision del tiempo mediante el Radio. Anuario de C. R. (libro) 1936.
- MERINO Y CORONADO, J. Weather forecasting by short waves. Short Wave & Television, Oct. 1936.
- GOLDE, R. H. Spherics and the Lightning discharge. Meteorol. Mag. London, 79: 940. 1950.
- AL'PERT YA Y D. S. FLIGEL'. Propagation of ELF and VLF waves near the Earth. (libro) Traducción del Ruso. Consultants Bureau, New York, 1970.
- MERINO Y CORONADO, J. Identificación de masas de aire utilizando la Radiometeorología de Baja Frecuencia. Trabajo presentado al Congreso de Electrónica de la AMICEE. Oct. 1971.
- APPLETON, E. V., R. A. WATSON-WATT y L. J. F. HERD. On the nature of atmospherics. Proc. Roy. Soc. 11A:615, 1926.
- HEPBURN, F. y E. PIERCE. Atmospherics with very low frequency components. Nature, 171:837. 1953.
- APPLETON, E. V. y F. W. CHAPMAN. On the nature of atmospherics. Proc. Roy. Soc. 158A (1), 1937.
- MORRISON, R. B. The variation with distance in the range 0-100 Km of atmospherics waveforms. Phil. Mag. 44:980. 1953.
- TEPLEY, L. A comparison of spherics as observed in the VLF and ELF bands. J. Geophys. Res. 64:2315. 1959.
- WAIT, J. R. The relation between VLF propagation and D-Layer characteristics. IEEE Trans. AP-12(2). 1964.
- DEEKS, D. G. D-region electron distribution in middle latitudes using the reflection of long radio waves. Proc. Roy. Soc. 291A:413. 1966.
- MERINO Y CORONADO, J. Observaciones radioeléctricas de la Delegación de la ESIME durante el eclipse total de sol del 7 de marzo de 1970. 15 págs., 10 figs. ESIME, Inst. Polit. (mimeógrafo).
- KONIG, H. El registro de señales eléctricas de muy baja frecuencia durante el eclipse solar del 15 de febrero de 1961 (en alemán) Z. Angew. Phys. 13 (10). 1961.
- BEAN, R. B. y J. DUTTON. Radio Meteorology (libro). Dover Publications, New York. 1968.
- TANNEHILL, H. HURRICANES. Their Nature and history (libro). Princeton University Press, Princeton, 1928.
- MERINO Y CORONADO, J. Los registradores de estática y las llamaradas solares. Anales del Instituto de Geofísica, Vol. 4. 1958.