

Pulsaciones geomagnéticas generadas en la ionosfera durante las desviaciones súbitas de frecuencias (SFD)

ARTURO D' COSTA, BIENVENIDO LAZO, REMOIR V. SCHEPETNOV,
y RAMÓN ÁLVAREZ

RESUMEN

Se encontró que en los magnetogramas cubanos las pulsaciones geomagnéticas asociadas a los destellos solares, y por tanto a las desviaciones súbitas de frecuencia (SFD), se observan sólo cuando el destello ocurre próximo al mediodía y su geoelectividad es tal que provoca alteraciones de la componente horizontal del campo magnético superiores a 5 nT. Fue posible hacer una clasificación morfológica y espectral de las pulsaciones asociadas a destellos solares (Pif). El origen ionosférico de las Pif fue probado directamente usando datos de satélites. Por medio del análisis espectral, se determinó que estas Pif se generan a la altura de la capa F de la ionosfera y asociadas a la radiación ultravioleta lejana del destello solar, extendiendo así la zona de generación planteada por otros autores.

1. INTRODUCCIÓN

En los registros de magnetómetros de inducción, obtenidos durante fuertes destellos solares ocurridos en el año Geofísico Internacional, se detectaron, por vez primera, pulsaciones geomagnéticas asociadas a este fenómeno (KATO *et al.*, 1959). Posteriormente, KALIJMAN *et al.* (1972), estudiando más detalladamente estas pulsaciones, que denominaron Pif ("pulsation irregular flare"), pusieron de manifiesto sus interrelaciones con algunos parámetros solares e ionosféricos, lo que apoya la segunda hipótesis dada por KATO *et al.* (1959) acerca de su génesis. Según esta hipótesis, un conjunto de fenómenos geofísicos es provocado, durante un destello, por la ionización de las capas bajas de la ionosfera, debida a los rayos roentgen.

Las Pif, según KALIJMAN *et al.* (1972), surgen como consecuencia de las fluctuaciones de las corrientes, adicionales al sistema Sq, que apa-

Manuscrito aprobado el 28 de febrero de 1981.

A. D'Costa, B. Lazo, y R. Álvarez pertenecen al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba. R. V. Schepetnov pertenece al Instituto de Física de la Tierra, de la Academia de Ciencias de la URSS.

recen en la region del dínamo, debido al aumento de ionización en la ionosfera baja provocado por los rayos X del destello.

El objetivo de este trabajo es dar una demostración directa del origen ionosférico de las Pif y establecer su relación con la región F de la ionosfera, utilizando registros del campo magnético de satélites geoestacionarios y registros del corrimiento Doppler sufrido por señales de 10 y 15 Mhz, en la traza Boulder-Habana, durante perturbaciones ionosféricas súbitas (SID).

2. MATERIALES EXPERIMENTALES

En la realización de este trabajo se utilizaron los magnetogramas de los observatorios Soroa y Río Carpintero (GUELLER *et al.*, 1977), cuyas coordenadas se dan en la Tabla 1. También se emplearon los registros del satélite GOES-2, ubicado a fines de 1977 en una órbita geoestacionaria, y cuya longitud geográfica, 75°W, prácticamente coincidía con la de los observatorios cubanos.

Las mediciones del corrimiento Doppler de frecuencia se hicieron en base del registro del batido, obtenido mediante la interferencia de una señal continua reflejada en la ionosfera con la señal de un generador de apoyo en la estación receptora (BIELII *et al.*, 1977).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Analizando los registros de magnetómetros de inducción en dos observatorios cubanos, Soroa y Río Carpintero, cuyas coordenadas geográficas aparecen en la Tabla 1, fue posible reconocer un tipo de pulsación irregular asociada a los destellos solares, que presenta la misma forma de las Pif reportadas por otros autores (KATO *et al.*, 1959; KALIJMAN *et al.*, 1972).

Estas pulsaciones no se observaron en todos los casos de destellos analizados; la probabilidad de ocurrir aumenta en los destellos que se producen, próximos al mediodía local y que provocan "crochets" magnéticos de amplitud superior a 5 nT en la componente H. Esto último coincide con lo encontrado por KALIJMAN *et al.* (1972).

TABLA 1. Coordenadas geográficas utilizadas.

Observatorio	Latitud	Longitud
Soroa (Sor)	22°47' N	83°00' W
Río Carpintero (RCC)	19°59' N	75°42' W
GOES-2		75° W
Centro Geofísico	22°58' N	82° 9' W

El análisis sistemático de un gran número de Pif registradas en 1977 y 1978 en los observatorios cubanos, nos permitió encontrar algunas particularidades morfológicas que parecen relacionarse con la duración de la desviación súbita de frecuencias (SFD) correspondiente, independientemente de que ésta ocurra en horas de la mañana o de la tarde.

Estas particularidades nos permitieron clasificar las Pif observadas en cuatro grupos:

- I₁. Pulsaciones irregulares de comienzo súbito y corta duración; son muy notables en los magnetogramas aún cuando aparezcan superpuestas a regímenes de pulsaciones continuas. Están siempre asociadas a SFD que duran entre 5 y 10 minutos. Estas pulsaciones comienzan y concluyen simultáneamente con la SFD asociada a ellas.
- I₂. Pulsaciones irregulares de comienzo súbito, muy parecidas al tipo I₁, pero son de mayor duración y están asociadas a SFD también de mayor duración que en el caso anterior. Su inicio no coincide con el de la SFD, sino con el momento de ocurrencia del máximo de desplazamiento Doppler positivo, el cual regularmente va seguido de una fase negativa (DONNELLY, 1969). Cuando la SFD muestra en estos registros un doble pico positivo, el comienzo de la Pif coincide con la ocurrencia del primer pico. Esta combinación de Pif y SFD se observó un poco menos frecuentemente que las demás.
- II₁. Pulsaciones irregulares de comienzo gradual, asociadas a SFD de gran duración (20-30 minutos). Predominan las oscilaciones de baja frecuencia y su amplitud crece hasta alcanzar valores notables en el máximo. Concluyen antes de que finalice la SFD asociada.
- II₂. Pulsaciones irregulares de comienzo gradual, similares a las del tipo II₁, pero que se presentan en series de Pif. A veces se prolongan después de concluida la SFD asociada a ellas.

Fue posible comparar los registros de Pif ocurridas en los meses de septiembre y diciembre de 1977, con los obtenidos en el satélite geoestacionario GOES-2. La Fig. 1 muestra los registros simultáneos de los observatorios terrestres "Centro Geofísico" y "Soroa", y del satélite GOES-2, en los momentos en que ocurría un destello solar. En las componentes H y D de la estación Centro Geofísico se distingue un "crochet" de amplitud superior a 10 nT. La pulsación Pif asociada a este destello aparece también en la figura en las componentes NS y EW de la estación Soroa. En los registros simultáneos del satélite GOES-2 no se observa pulsación alguna. Esta ausencia de pulsaciones en los registros de satélites se observa en todos los casos analizados.

La ausencia de pulsaciones en los registros de satélites en momentos en que se registran Pif en las estaciones terrestres cubanas apoya la hipótesis de que éstas se generan en la ionosfera y no en la magnetosfera (KALIJMAN *et al.*, 1972).

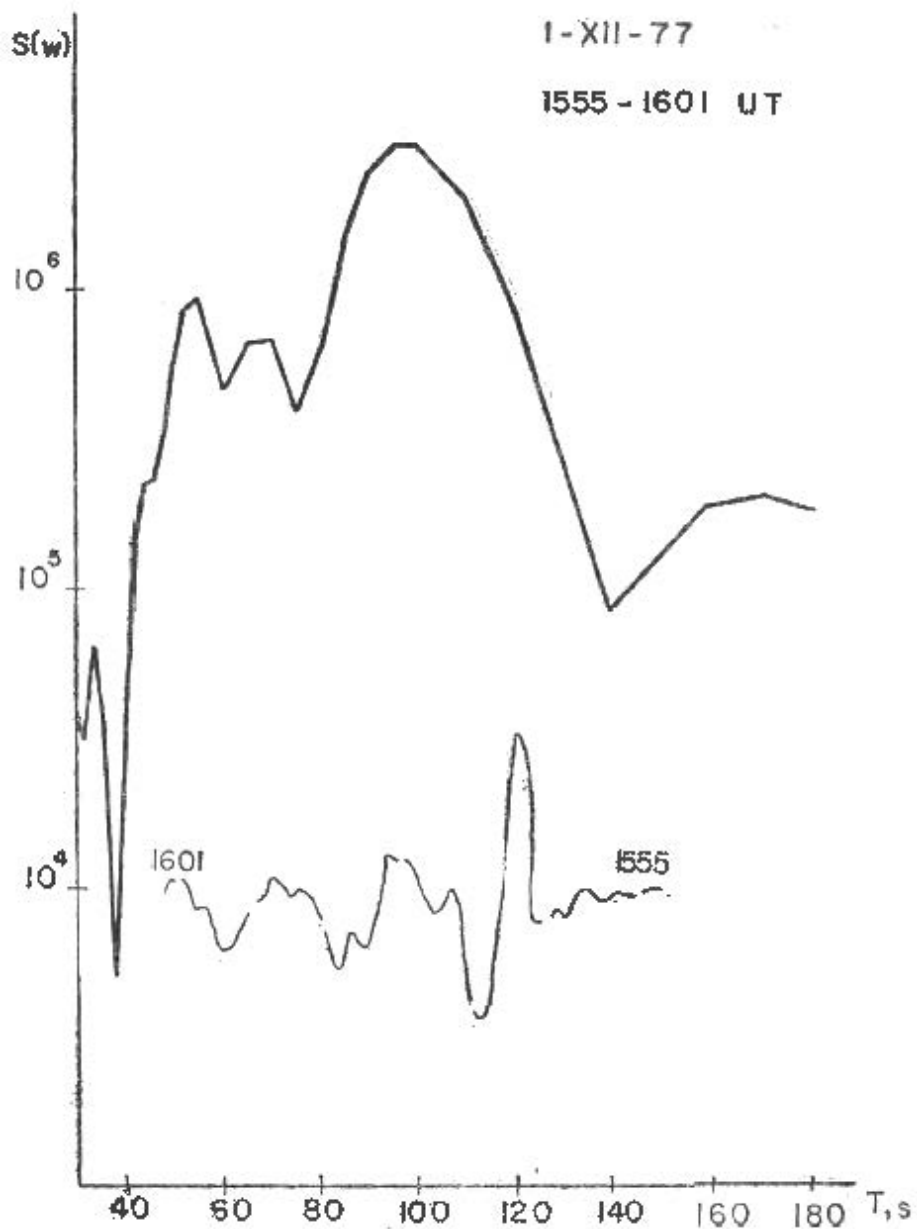


Fig. 1. Pif registrada durante un destello solar y su espectro de potencia.

Las Pif seleccionadas para este estudio fueron analizadas espectralmente, encontrándose algunas características comunes en todos los espectros. La Fig. 2 muestra la Pif registrada en la componente NS de Soroa, de las 1556 a las 1601 UT del 1ro de diciembre de 1977, junto con su espectro. En este intervalo ocurrió un destello solar. Los espectros de todas las pulsaciones analizadas se caracterizaron por la presencia de 2-3 componentes con densidad espectral muy superior a las restantes. El

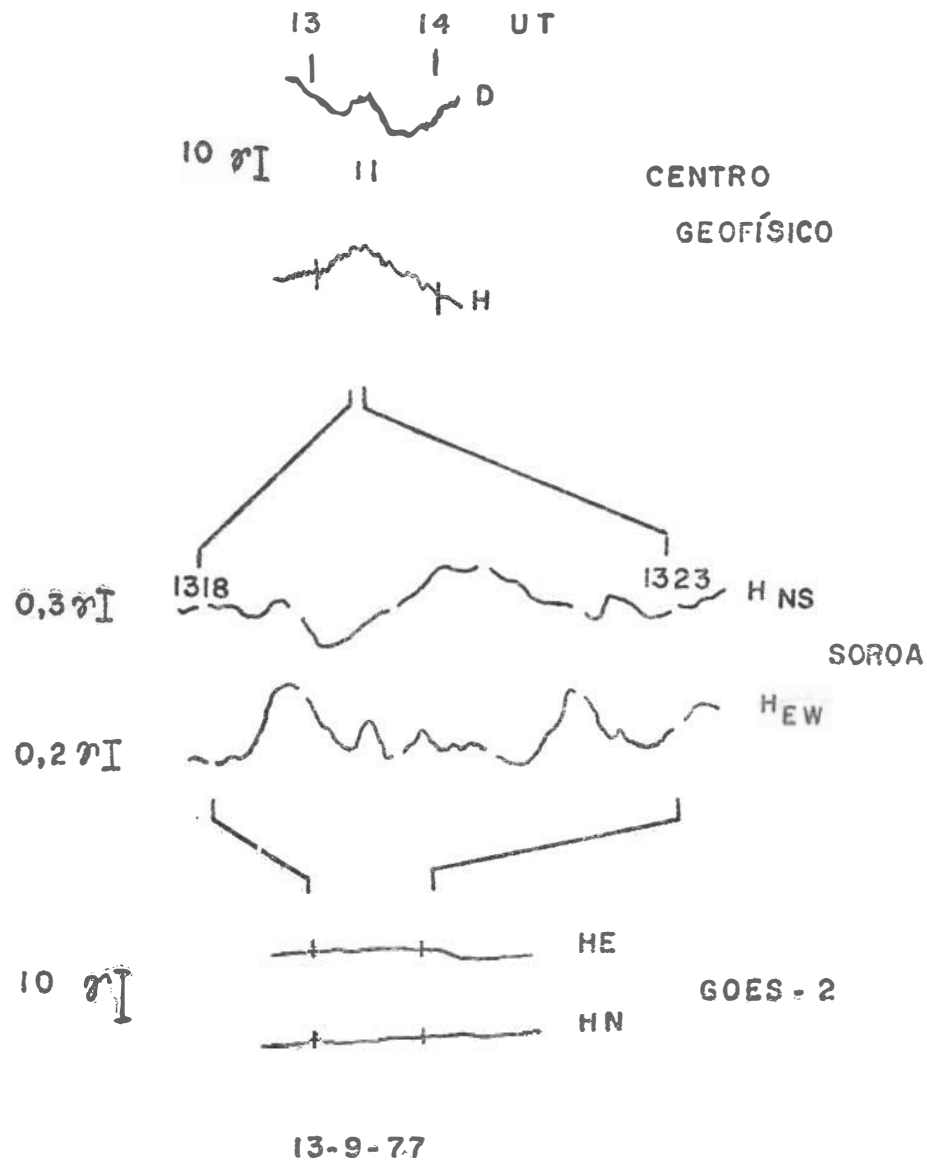


FIG. 2. Registros comparados de los observatorios terrestres y del satélite GOES-2 en los momentos en que ocurría un destello solar.

30-V-78

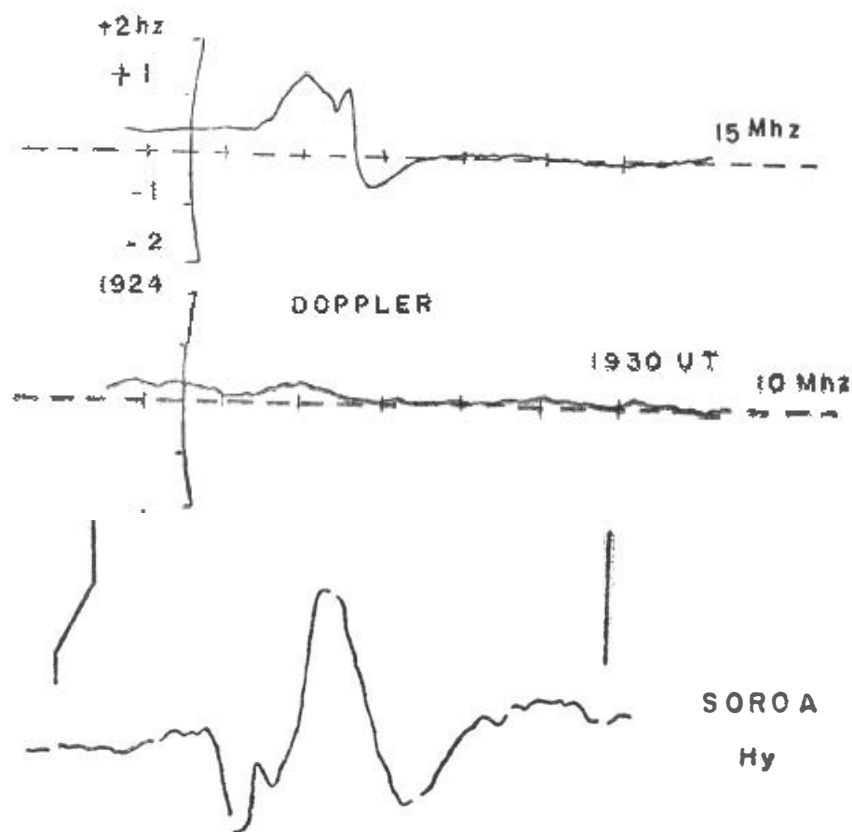


FIG. 3. Registros de una Pif en Soroa y de una SFD en los desplazamientos Doppler.

período de la componente de mayor densidad espectral se encontró siempre entre 90-140 s.

En los espectros de las Pif de tipo I_1 y I_2 , es decir, las de comienzo súbito, aparece un segundo pico espectral en los períodos entre 50 y 60 s. Para los casos de Pif de tipo II_1 y II_2 , se distinguen en los espectros tres picos principales, el más importante entre 90 y 140 s, como ya se dijo, el segundo pico para períodos superiores a 100 s, y un tercer pico, de densidad espectral no mucho menor que la del segundo, para períodos alrededor de los 70 s. En todos los espectros estudiados se observó que la

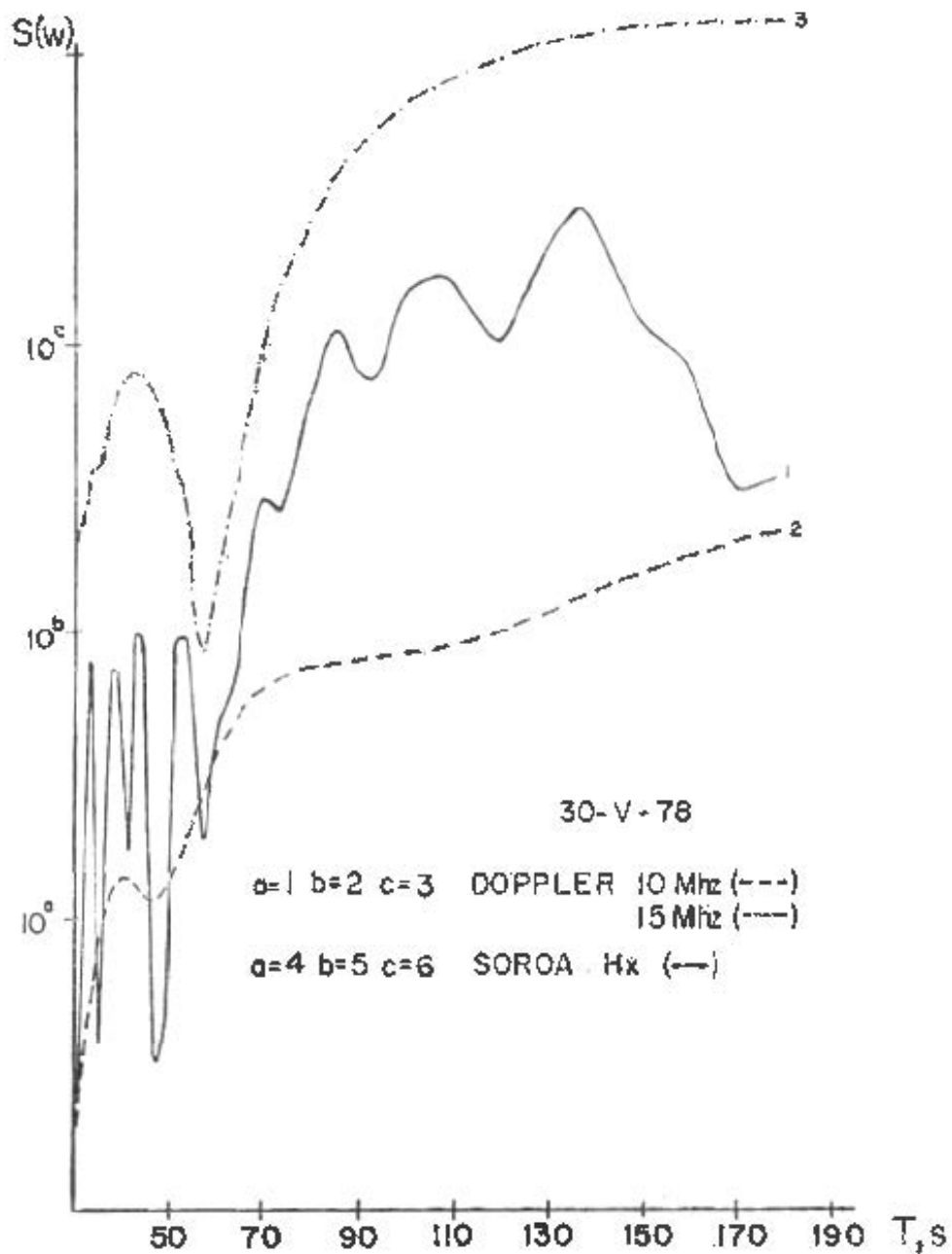


FIG. 4. Superposición de los espectros de potencia de una Pif (curva 1) y una SFD en 10 Mhz (curva 2) y 15 Mhz (curva 3). $a = 1, b = 2, c = 3$ (Doppler 10 y 15 Mhz); $a = 4, b = 5, c = 6$ (Soroa Hx).

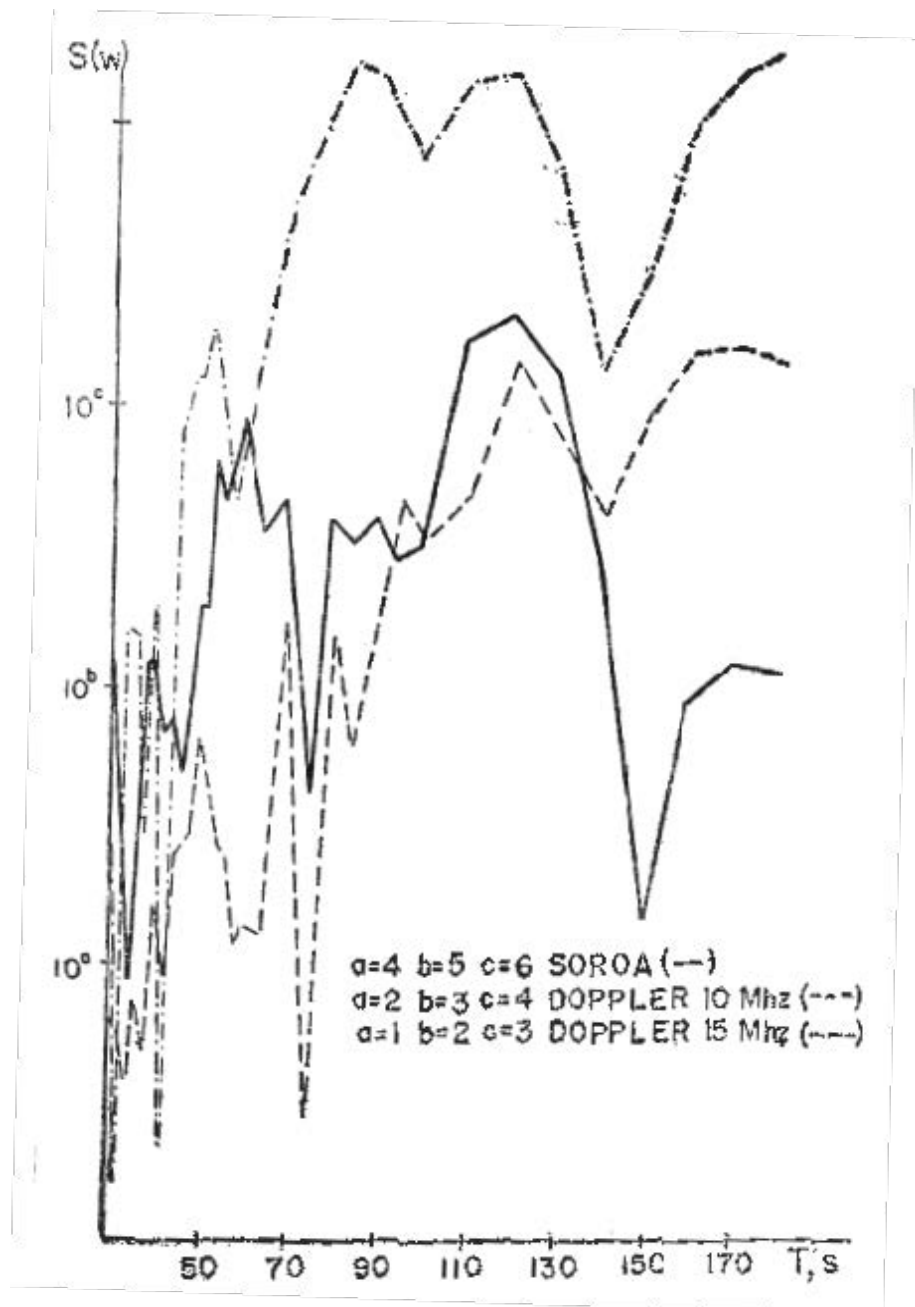


FIG. 5. Registros de una Pif en Soroa y de una SFD en los desplazamientos Doppler.

energía de las pulsaciones está asociada, en su mayor parte, a las componentes con períodos entre 70 y 160 s.

Para realizar un estudio comparativo de las desviaciones súbitas de frecuencias y las pulsaciones geomagnéticas asociadas a los destellos solares, se escogieron algunos casos de SFD y Pif para los cuales se tenían registros de corrimientos Doppler y magnetogramas. En todos los casos, los registros fueron digitalizados y determinados sus espectros de potencia. La Fig. 3 muestra los registros para el caso del 30 de mayo de 1978, y la Fig. 4 una superposición de los espectros obtenidos para la pulsación irregular (curva 1) y para las SFD sufridas por las frecuencias de 10 Mhz (curva 2) y de 15 Mhz (curva 3) durante el destello solar de las 1925 UT del mismo día.

Los picos espectrales en 34, 39, 44, y 53 segundos que aparecen en el espectro de la Pif, se ven en forma de 'hombros' (34 y 53 s) o como un solo pico (42 s) en la curva 3. El pico de 42 s también está presente, aunque con menor importancia en la curva 2. La zona de altos períodos del espectro de la Pif coincide con el máximo presente en la curva 3. De la comparación de las curvas se concluye que hay una gran coincidencia entre los espectros de la Pif y de las SFD, en particular en el caso de la Fig. 4, entre las curvas 1 y 3. La SFD del 30 de mayo de 1978 fue

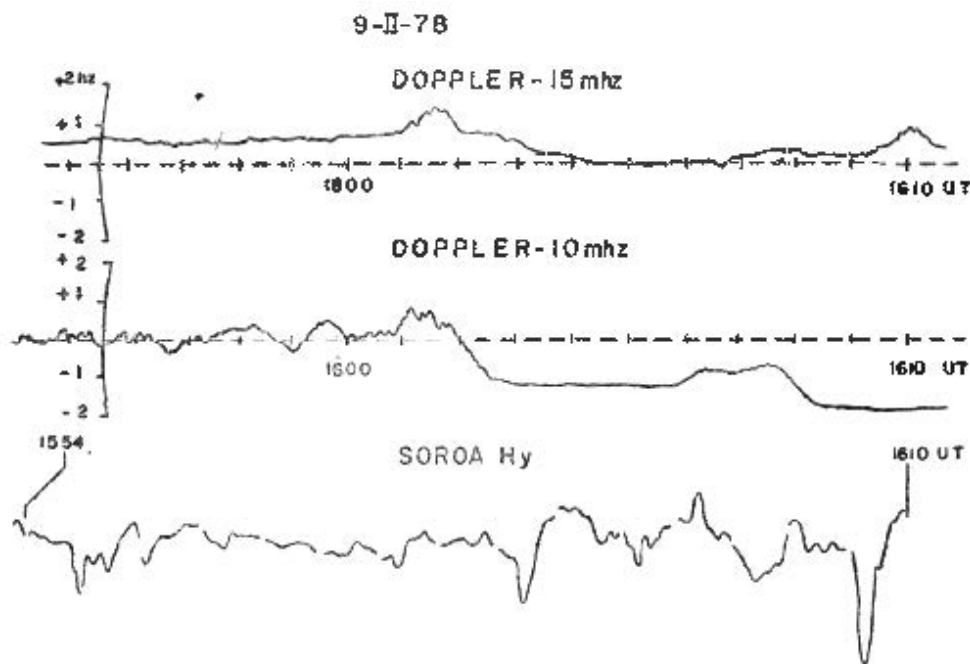


FIG. 6. Superposición de espectros de potencia de una Pif y de una SFD en 10 y 15 Mhz.

mucho más notable en 15 Mhz que en 10 Mhz (Fig. 3), y en la Pif asociada se manifiestan similares variaciones periódicas que las mostradas por los corrimientos Doppler para una frecuencia de 15 Mhz.

Esta correlación entre los espectros de las Pif y las SFD ocurre en todos los casos estudiados. La Fig. 5 muestra los espectros en el caso de la SFD y la Pif ocurridas el 9 de febrero de 1978, de las 1558 a las 1612 UT. En este caso la SFD se observó con variaciones de corto período, superpuestas, tanto en 10 como en 15 Mhz (Fig. 6), pero mucho más notable en 10 Mhz. Los picos espectrales obtenidos para la Pif en 40, 50, 70, 80, 120, y 170 s coinciden con los encontrados para la densidad espectral de los corrimientos Doppler en 10 Mhz de frecuencia. Los picos en 54, 90, 120, y 170 s se observan en los espectros de la Pif y de la SFD en 15 Mhz. Se ve que en la pulsación irregular se reúnen variaciones correspondientes a corrimientos Doppler sufridos por ondas de 10 y 15 Mhz en su propagación.

Se hizo una valoración de la región donde se originó la SFD, calculando las alturas de reflejo de la señal recibida, mediante la transformación de las características de altura-frecuencia de sondeo vertical en características de altura-frecuencia de sondeo inclinado, utilizando para ello los datos de sondeo vertical de la ionosfera, de la estación "Centro Geofísico", y las curvas de transmisión (WRIGHT *et al.*, 1957).

En todos los casos analizados la altura de reflejo correspondió con la de la región F. En la SFD del 30 de mayo de 1978 la propagación de la señal de 15 Mhz fue por un salto, y la de 10 Mhz por dos saltos; esto provocó una mayor absorción en la señal de 10 Mhz, lo cual hace mucho menos notable la SFD en esta frecuencia (Fig. 3). La altura de reflejo de la señal, en este caso, era de 470 km, estando pues provocada la SFD por la radiación ultravioleta lejana, que es la que interviene en la ionización de la ionosfera a estas alturas. Situaciones similares se observaron en los demás casos analizados, es decir, reflejos a la altura de la capa F.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados apoyan la identificación de las Pif como efectos posteriores de los destellos solares y, además, dan evidencia experimental de su origen ionosférico, apoyándose en datos de satélites. La relación entre las composiciones espectrales de las Pif y las SFD permite asociar estos fenómenos por su origen, señalando de esta forma la posible generación de Pif a la altura de la región F, y vinculada a las variaciones de la radiación ultravioleta lejana que provocan las SFD en esa región. Esto no desecha la posibilidad de producción de Pif en la región E de la ionosfera, debido al incremento de la radiación roentgen, como señalan otros autores (KALIJMAN *et al.*, 1972).

Creemos que es necesario llevar a cabo el estudio de un mayor número de casos y comparar con datos de radiación solar en distintas bandas, para precisar la extensión de la zona de generación de estas pulsaciones, cuyo origen ionosférico se confirma experimentalmente en este trabajo.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer al compañero Roberto Hourruitinier su valiosa ayuda en la elaboración de los materiales experimentales utilizados en este trabajo, y al Lic. Enrique Menéndez su colaboración en el análisis espectral de las señales.

REFERENCIAS

- BIELII, V. V., VAZHERKIN, V. A., LAZO, B., LOIS, L., LOVACHESKII, L. A., NOVIKOV, V. D., y SERGUIENKO, O. S., (1977): Algunos resultados del estudio de la ionosfera de las bajas latitudes con ayuda del método Doppler [en ruso]. *Geomag. Aeron.*, 17(4):663-666.
- DONNELLY, R. S. (1969): Contribution of X-rays and EUV bursts of solar flares to sudden frequency deviations. *J. Geophys. Res.*, 74(7):1873-1877.
- GUELLER, L. A., GORBIN, V. A., D'COSTA, A., y GUASCH, E. (1977): Variaciones rápidas del campo electromagnético de la tierra en Cuba. *Acad. Cien. Cuba, Inf. Cien.-Téc.*, 18:1-9.
- KALIJMAN, A. D., NEFEDIEV, V. P., y PARJOMOV, V. A. (1972): Radiación roentgen y de radio, y pulsaciones geomagnéticas, relacionadas con los destellos cromosféricos [en ruso]. *Issled. Geomag. Aeron.*, 24:258-263.
- KATO, Y., TAMAO, T., y SAITO, T. (1959): Geomagnetic pulsations accompanying the intense solar flare. *J. Geomag. Geoelec.*, 10(4):203-207.
- WRIGHT, J. W., KNECHT, R. W., y DAVIES, K., eds. (1957): *Manual de sondeo vertical de la ionosfera* [en ruso]. Ed. Acad. Cien. URSS, Moscú, 345 pp.

ABSTRACT

In magnetograms from the Cuban observatories "Soroa" and "Río Carpintero" it was possible to recognize irregular pulsations associated to solar flares, and with the same shape of Pif reported by other authors. These pulsations were recorded in Cuba during flares occurring near local midday and producing magnetic crochets with amplitudes over 5 nT. Systematic analyses of a big number of Pif made it possible to classify them considering their commencements and durations relative to those of the associated SFD. The absence of pulsations in the records from satellite GOES-2 when Pif are recorded at Cuban terrestrial observatories is given as a direct proof of the ionospheric origin of these pulsations. An evaluation was made of the ionospheric region where the SFD was originated by calculating the reflection heights of the signal used for the determination of Doppler shifts. In all cases studied the reflection height corresponded to that of the F region, being thus both the SFD and the associated Pif generated by EUV radiation of the solar flare, which is the one producing ionospheric ionization at these heights.