

FULGURACIONES SOLARES DE SEPTIEMBRE 2017 REGISTRADAS POR EL OBSERVATORIO
GEOMAGNÉTICO DE VILLA REMEDIOS Y EL MONITOR DE NEUTRONES NM-64 DE CHACALTAYA
COTEJADAS CON REGISTROS DE FLUJO DE RAYOS X SOLARES DEL SATÉLITE GOES

SOLAR FULGURATIONS REGISTERED IN SEPTEMBER 2017 BY THE GEOMAGNETIC
OBSERVATORY IN VILLA REMEDIOS AND THE NEUTRON MONITOR NM-64 OF CHACALTAYA
CORRELATED WITH SOLAR X-RAYS FROM THE GOES SATELLITE

EDGAR LIBORIO RICARDI-YARVI¹, ROLANDO TICONA-PERALTA², PEDRO MIRANDA-LOZA³, & JAVIER
QUISPE-MAMANI⁴

Instituto de Investigaciones Físicas, Área de Geofísica (AGF)
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

(Recibido 25 de septiembre de 2017; aceptado 13 de noviembre de 2017)

RESUMEN

El Observatorio Geomagnético de Villa Remedios, latitud de $16^{\circ}46'0''$ S, longitud de $68^{\circ}10'0.1''$ W y está situado a 3949 metros sobre el nivel del mar (msnm), en tanto que el Monitor de Neutrones (NM-64) del Laboratorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya, está ubicado a una latitud de $16^{\circ}25'60''$ S, una longitud de $68^{\circ}10'0.1''$ W y 5220 msnm; ambos situados en las cercanías de la ciudad de La Paz, Bolivia, registran continuamente el comportamiento tanto del campo magnético de la Tierra como el arribo de radiación y partículas de rayos cósmicos. Sus registros de septiembre 2017 muestran eventos, denominados crochets magnéticos que están en correlación con los aumentos de intensidad del flujo de rayos X (Rx) registrados por los sensores instalados en los satélites GOES de la NASA ampliamente publicados que son el resultado del desarrollo de dos fulguraciones solares notables, además de sus consecuencias: la generación de una Tormenta de Radiación denominada GLE, inmediatamente después de la fulguración del 06.09.2017 y el 10.09.2017 y Tormentas Geomagnéticas, unas horas después, debidas a la eyección de masa coronal. Las fulguraciones solares convierten al Sol en un potente acelerador natural de partículas y en un emisor de masa coronal. Aquí se discuten algunas de las características de estos eventos y su posible aislamiento para posteriores estudios de detalle.

Código(s) PACS: 91.25.-r — 13.85.Tp — 28.20.-v

Descriptores: Geomagnetismo — Interacciones de rayos cósmicos — Física del neutrón

ABSTRACT

The Geomagnetic Observatory of Villa Remedios, with latitude $16^{\circ}46'0''$ S and longitude $68^{\circ}10'0.1''$ W located at 3949 masl and the Neutron Monitor (NM-64) of the Cosmic Ray Laboratory of Chacaltaya, located at a latitude of $16^{\circ}25'60''$ S, and longitude $68^{\circ}10'0.1''$ W and 5220 masl, both located in the vicinity of the city of La Paz Bolivia, continuously record the behavior of both the earths magnetic field and the radiation from cosmic ray particles. The September 2017 records show events called magnetic crochets, that correlate to increases in X-ray flux intensity recorded by sensors installed on the widely published NASA GOES satellites. These events are the result of the development of two notable solar flares, and the consequent generation of a radiation storm called GLE immediately arising from the fulguration of 06.09.2017 and 10.09.2017 together with geomagnetic storms which occurred a few hours after the coronal mass ejection, are shown. The solar flares convert the Sun into a powerful natural particle accelerator and a coronal mass emitter. Here we discuss some of the characteristics of these events and their possible isolation and use in further more detail studies.

Subject headings: Geomagnetism — Cosmic-ray interactions — Neutron physics

¹ericaldi@fiumsa.edu.bo

²rticona@fiumsa.edu.bo

³pmiranda@fiumsa.edu.bo

⁴javierlinux21@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros días del mes de septiembre de 2017, la NOAA/SWPC anuncia la evolución de algunas regiones activas del Sol a la producción de potentes fulguraciones (Boulder (2017)). Estas condiciones del Sol implican poderosos campos magnéticos, una temperatura promedio de 60 000 K en su superficie y que su atmósfera en la parte de su corona sea muy caliente, alcanzando millones de K, genera dos hipótesis que tratan de explicarlas Zeilik & Gregory (1997): calentamiento de la corona solar a través de interacciones magnéticas, los bucles magnéticos coronales realizarían reconexiones y chasquidos desprendiendo calor, y ondas magnéticas que se originarían al interior de la superficie del Sol que por burbujeo liberarían energía magnética a la corona, la cual se tornaría en energía térmica. Estas estructuras convierten al Sol en un formidable acelerador de partículas, permitiendo así, el estudio detallado de la aceleración de los electrones y protones pero aun inconclusa de los iones, que a veces alcanzan energías correspondientes a velocidades relativistas. La superficie solar emite la mayor parte de la radiación electromagnética como luz visible como lo señalan Murphy (2008) y Hoeksema *et al.* (1982).

Con la finalidad de evitar el efecto de estos campos magnéticos, se estudian (observan) las partículas secundarias neutras y las radiaciones solares, puesto que estas se registran con excelente resolución espacial y temporal. Los neutrones solares se producen por reacciones nucleares a partir de la interacción entre los iones acelerados con energías de alrededor de 100 MeV y la atmósfera solar, librándose de la contaminación de radiación de electrones como lo exponen Ricaldi-Yarvi *et al.* (2007), Sako *et al.* (2007) y Muraki *et al.* (2008). Los electrones acelerados que habitan la atmósfera solar se mueven a energías extremadamente elevadas, convirtiendo a esta en una fuente natural de Rx por efecto sincrotrón, desaceleración de electrones, reducción de su velocidad en trayectorias espirales alrededor de las líneas de campo magnético de las protuberancias solares, produciendo pérdida de energía que genera Rx como lo mencionan Cordaro *et al.* (2018), y Kumar *et al.* (2015). La energía de estos Rx se reduce grandemente durante su viaje a la Tierra y pueden ser registrados de diversas formas, ya sea de manera directa o por sus efectos secundarios; entre estos, por variaciones del campo magnético de la Tierra en los observatorios geomagnéticos tal como lo indican Sako *et al.* (2007), y Matsushita & Campbell (1967).

2. INTERACCIÓN SOL-TIERRA

El campo magnético del Sol varía de estructuras complejas en años de Sol activo a configuraciones más simples en años de Sol quieto. Muchas de las variaciones magnéticas observables en la superficie de la Tierra tienen su origen en el comportamiento del Sol; estableciéndose relaciones entre el interior del Sol con la corona solar y en consecuencia relaciones entre el comportamiento del Sol

y la Tierra. Eventos solares, especialmente aquellos que ocurren en las zonas de actividad del Sol, las manchas solares, que producen radiación electromagnética pueden ser registrados por los correspondientes sensores instalados en satélites de investigación, de manera continua, como el satélite GOES de la NOAA/SPWC, que pueden medir el flujo de Rx que provienen del Sol, como lo especifican NOAA-SWPC (2017), Boulder (2017), y Hoeksema *et al.* (1982). Los observatorios geomagnéticos instalados sobre determinados puntos de la superficie de la Tierra, pueden también registrar estos eventos solares si son suficientemente intensos y únicamente en horas en que estos puntos están de frente al disco solar; es decir, durante las horas en que se tiene al Sol de frente y en consecuencia no registrarán eventos que se produzcan en horas de la noche terrestre, puesto que estos eventos, los electromagnéticos se producen a grandes velocidades por cortos intervalos de tiempo. Entonces, muchas de las fulguraciones del Sol no dejarán huellas en los registros magnéticos de otros puntos de la superficie de la Tierra tal como lo establece Hoeksema *et al.* (1982).

Las masas coronales eyectadas (MCE, CME, Coronal Mass Ejection en inglés) consecuencia de las Fulguraciones Solares también son registradas por los Observatorios Magnéticos de Superficie (OMS) con determinadas características. Así por ejemplo, un Comienzo Repentino de Tormenta (CRT, SSC, Sudden storm commencement por sus siglas en inglés) nítidas o difusas, a cualquier hora del día, incluidas horas de la noche, continuadas por las Tormentas Magnéticas (TM, MS, Magnetic Storm por sus siglas en inglés), intensas o débiles, como resultado de la interacción de la Nube de Plasma Eyectada (CME-Coronal Mass Ejection) por el Sol con el Campo Magnético (propio) de la Tierra. Lo anterior es explicado por Zeilik & Gregory (1997).

El nexo entre los fenómenos solares y los de la Tierra se realiza a través del Viento Solar (VS, SW, Solar Wind), la radiación solar constante y esporádica, el Campo Magnético Interplanetario (CMI, IMF, Interplanetary Magnetic Field), que se expanden en el espacio entre el Sol y la Tierra. El Campo Magnético del Sol se extiende allende de la posición de la Tierra; espacio a través del cual viaja la MCE (CME, Coronal Mass Ejection) del Sol, tal como lo establecen Matsushita & Campbell (1967), y Iyemori *et al.* (1979).

3. REGISTROS DE FLUJO DE RX Y OTROS, POR SENSORES INSTALADO EN EL SATÉLITE GOES DE LA NOAA/SPWC

Las Figs. 1 y 2 ilustran por separado los registros temporales de incremento significativo del flujo de Rx, obtenidos por los sensores del satélite GOES de la NOAA/SPWC. Con un incremento de $\Delta = 10^3$ W/m² sobre el nivel base para el 06.09.2017 y un incremento de $\Delta = 10^5$ W/m² sobre el nivel base para el 10.09.2017, respectivamente. Siendo este último el más significativo.

En la Tabla 1 se procede a elaborar una lista de los momentos significativos del comportamiento de

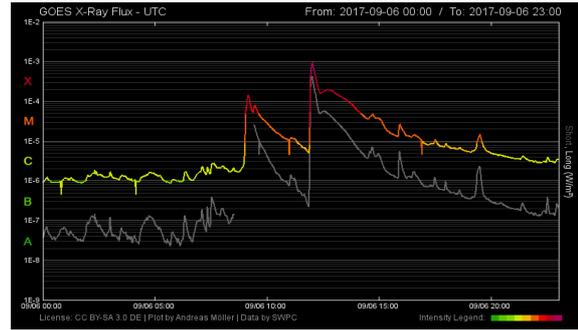
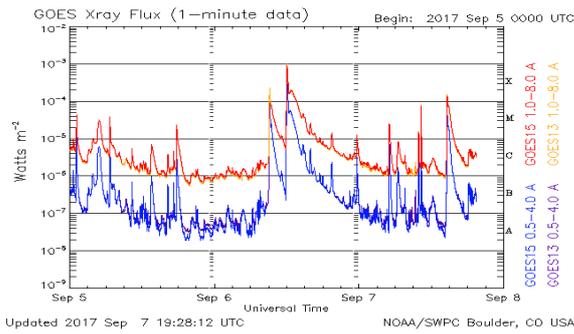


FIG. 1.— Registro del flujo de Rx del 06.09.2017.

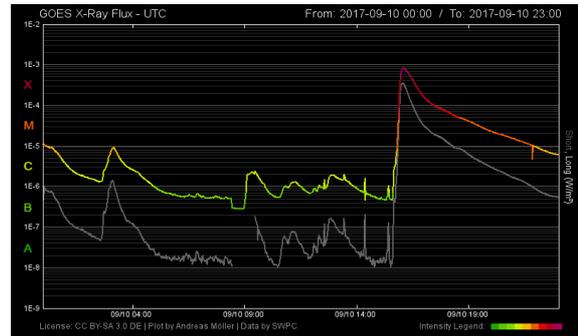
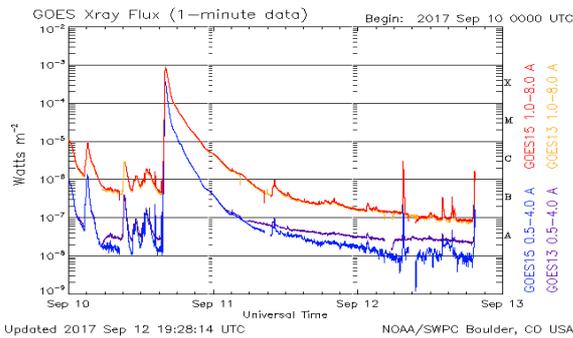


FIG. 2.— Registro del flujo de Rx del 10.09.2017.

CORRELACION: DATOS FLUJO DE RAYOS X CON REGISTROS MAGNETICOS
 Registros: GOES X - ray Flux (1-Minute data)
 Registros: Componentes H,D y Z, Observatorio Villa Remedios - Bolivia (1-Minute data)

AÑO	MES	DIA	INICIO	MAXIMO	FINAL	Flujo, Watts/m2	Clase	Registro magnetico del Flare	Tiempo viaje radiacion	Posicion Area activa solar	Registro magnetico, componente H	Tiempo viaje Nube plasma
2017	9	3	4:18	4:41	4:54	10 ⁻⁵	C1.0	Imperceptible			Quieto	
2017	9	4	8:08	8:14	8:24	10 ⁻⁵	C2.9	Imperceptible			Quieto	
2017	9	4	12:12	12:25	12:33		C8.3	Imperceptible			Quieto	
2017	9	4	20:45	20:50	20:55	10 ⁻⁵	C1.9	Imperceptible			Quieto	
2017	9	5	0:30	0:36	0:41	10 ⁻⁵	C9.8	Imperceptible			Quieto	
2017	9	5	4:33	4:53	5:07		M3.2	Imperceptible			Quieto	
2017	9	5	16:14	16:19	16:22	10 ⁻⁵	C3.7	Imperceptible			Quieto	
2017	9	5	17:20	17:39	17:48	10 ⁻⁵	C6.0	Crochet, 17:47:00, apenas reconocible	0:08	Casi frontal, 12674-E	Quieto	
2017	9	6	7:29	7:34	7:48		C2.7	Imperceptible			Quieto	
2017	9	6	8:57	9:10	9:17	10 ⁻⁶	X2.2	Crochet, 09:18:00, reconocible	0:08	Casi frontal, 12674-E-N	Quieto	
2017	9	6	11:53	12:02	12:10	10 ⁻³	X9.3	Crochet, 12:10:00, bien definida	0:08	Frontal, 12673-E-S	Quieto	
2017	9	6	21:06	21:12	21:20		C1.5	Imperceptible			Quieto	
	9	6	23:50								Variable, 23:50 SSC, tormenta, Kp=5, G1	1 dia 6 h 3 min
2017	9	7	4:59	5:02	5:08	10 ⁻⁴	M2.4	05:12:00, apenas reconocible.	0:08		Disturbado	
2017	9	7	6:19	6:28	6:42		C8.2	Imperceptible			Disturbado	
2017	9	7	10:11	10:15	10:18		M7.3	10:23:00, apenas reconocible.	0:08		Disturbado	
2017	9	7	14:20	14:36	14:55		X1.3	Crochet, 14:44:00, reconocible.	0:08	Casi frontal, 12673-E-S	Disturbado	
	9	7	20:50								Variable, 20:50, sin SSC, Tormenta, Kp=6, G2	1 dia 11h 42min
	9	7	23:05								Variable, 23:05 SSC, tormenta, Kp=6, G2	1 dia 10h 50min
2017	9	7	23:33	23:39	23:44		M1.2	Imperceptible				
2017	9	8	5:31	5:48	5:53	10 ⁻⁴	C8.2	05:56:00, apenas reconocible	0:08		Disturbado	
2017	9	8	7:40	7:49	7:58		M8.1	07:57:00, apenas reconocible	0:08		Disturbado	
2017	9	8	15:09	15:47	16:04		M2.9	Crochet, 15:55:00, reconocible	0:08	12673, Lejano E	Disturbado	
	9	8	22:50								Variable, 22:50 SSC, sin tormenta	1 dia 8h 4min
	9	8									Disturbado, alta frecuencia entre 12:00-18:00	
2017	9	9	0:36	0:39	0:46	10 ⁻⁴	C1.0	Imperceptible			Quieto	
2017	9	9	3:57	4:01	4:07		C4.2	Imperceptible			Quieto	
2017	9	9	10:57	11:04	11:42		M3.7	Crochet, 11:12:00, apenas reconocible	0:08	12673 en el limbo E	Quieto	
2017	9	9	23:33	23:45	23:56		M2.1	Imperceptible			Quieto	
2017	9	10	2:40	3:09	3:25	10 ⁻⁵	C9.0	Imperceptible			Quieto	
2017	9	10	9:02	9:20	9:37		C2.9	09:28:00, apenas reconocible	0:08		Quieto	
2017	9	10	12:38	12:54	13:24	10 ⁻⁵	C1.9	13:02:00, apenas reconocible	0:08		Quieto	
2017	9	10	15:35	16:02	16:31	10 ⁻³	X8.2	Crochet, 16:10:00, bien definido	0:08	Frontal, 12678	Quieto	
	9	10	22:45								Variable, 22:45 SSC, tormenta, Kp=5, G1	1 dia 11h 33min
2017	9	11	10:00	10:12	10:xx	10 ⁻⁶		10:19			Quieto	
2017	9	12	7:22	7:27	7:34	10 ⁻⁶	C3.0	07:35:00, apenas reconocible	0:08		Disturbado	
2017	9	12	20:01								Variable, 00:40 SSC, sin tormenta	1 dia 9h 26min
											Variable, 20:01 SSC, tormenta, Kp=6, G2	1 dia 9h 32min

TABLA 1
 EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD SOLAR

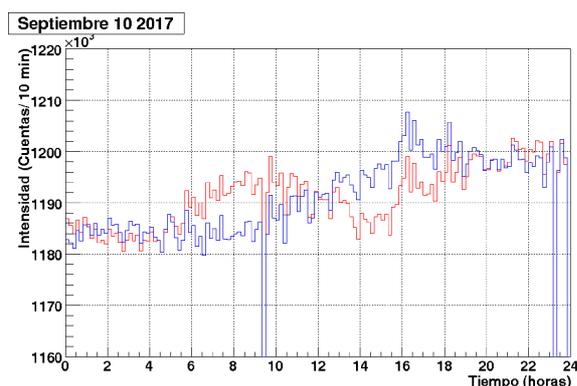


FIG. 3.— Registro de la fulguración solar del 10.09.2017 por el Monitor de Neutrones (MN) del Observatorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya (ORCCh) con una resolución promedio de cuentas cada 10 minutos. La línea azul es el registro de los eventos de neutrones, pasando de un nivel de 1185×10^2 a un nivel de 1208×10^2 cuentas por algunas horas, con un aumento de $23 \times 10^2 = 2300$ cuentas, la línea roja es el registro de la presión en el observatorio para corregir los eventos.

la actividad solar: fechas y horas de los eventos de Fulguraciones solares que se dieron en el transcurso del tiempo (del 3 al 13 de Septiembre), el Flujo expresado en W/m^2 , su clasificación correspondiente de acuerdo a escala en uso, la localización de la zona activa sobre el disco solar y se incluyen sus efectos más notables sobre el campo magnético de la Tierra, los Crochets y las Tormentas magnéticas, con finalidades de correlación.

4. REGISTROS DEL MONITOR DE NEUTRONES NM-64 DE CHACALTAYA

La Fig. 3 que se presenta a continuación ilustra el incremento temporal de las cuentas de neutrones solares para promedios de 10 minutos. La línea azul representa los eventos de neutrones y la línea roja la presión en el observatorio para fines de corrección.

La fulguración solar del 10.09.2017 de categoría X8.2 generó una Tormenta de Radiación (TR, RS Radiation Storm) de categoría S3 en la escala de la NOAA, que duró algunas horas. Además de producir neutrones, aceleró otras partículas como protones que arriban a la Tierra 30 minutos después, siendo estas denominadas Partículas Solares Energéticas (PSE, SEP solar energetic particles). Este Registro es uno de los más apropiados que define el denominado Aumento del Nivel de Base (ANB, GLE por sus siglas en inglés, Ground Level Enhancement), representando la segunda GLE del presente ciclo solar; en este caso, obtenido por un monitor de neutrones localizado a bajas latitudes, como lo es el Observatorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya (ORCCh) situado a una Latitud geográfica de $16^{\circ}25'60''$ S, a una longitud de $68^{\circ}10'0.1''$ W y a 5249 msnm. caracterizado por un cutoff, rigidez de corte magnética, alto de 12 GV. En este caso la conexión magnética Sol-Tierra se realiza por la Lámina de Corriente de la Heliosfera (LCH, HCS heliospheric Current Sheet) que consiste de una lámina que se origina en el ecuador solar y se extiende flameando como una pollera de bailar-

ina por todo el sistema solar. Todos los nueve planetas orbitan dentro de ella, esta es una Lámina de corrientes donde la polaridad del campo magnético del Sol cambia de positivo en el norte a negativo en el sur, dentro de ella fluye una corriente eléctrica muy pequeña de cerca de $10^{-10} [A/m^2]$. El espesor del plano de corriente es de cerca de 10000 km cerca de la órbita de la Tierra. La Tierra se zambulle hacia abajo y hacia arriba de la lámina de corriente ondulante. En una parte, el campo magnético del Sol apunta hacia el norte (hacia el Sol), en la otra parte este apunta hacia el sur (hacia fuera del Sol). Los campos magnéticos del Sol que apuntan hacia el sur tienden a cancelar el campo magnético propio de la Tierra, entonces la energía del viento solar puede penetrar el espacio local alrededor de nuestra planeta y alimentar las tormentas magnéticas.

5. REGISTROS DEL OBSERVATORIO GEOMAGNÉTICO DE VILLA REMEDIOS

El Observatorio Geomagnético de Villa Remedios (VRE) localizado en las coordenadas geográficas, $19K588448.58$ m W, 8145634 m S y 3949 m de elevación sobre el nivel del mar, ubicada a 13 Km al sur de la ciudad de La Paz, en sus registros correspondientes a los primeros días de Septiembre, 3 al 13 del 2017, en sus tres componentes: H , D y Z , muestra señales muy claras de origen solar.

La parte Variográfica del Observatorio consiste de una cabeza sensora de tres componentes, X, Y y Z , tipo Flux-gate, que junto a un sensor GPS y un Magnetómetro de Protones está conectado a un Registrador de Datos donde se registran los valores de t y F con X, Y, Z como variaciones relativas y se calculan H y D preliminares. A estos registros se acompaña con mediciones de Valores Absolutos de las componentes D e I que se realiza con un Teodolito magnético en la sala de Absolutas, los datos son procesados para producir los valores de H , D y Z en sus correspondientes magnitudes físicas y sus respectivas Líneas Base de control.

Las Figs. 4 y 5, que continúan, por separado ilustran claramente por correlación temporal en sus tres componentes H , D y Z el momento y desarrollo de los Crochets magnéticos, variaciones algunas veces intensas y de corta duración, señales magnéticas impresas por los Rx y por los Neutrones emitidos por las fulguraciones solares del 6 y el 10 de Septiembre 2017, respectivamente.

De todos los registros disponibles y la información contenida en la Tabla 1, a continuación se resumen los eventos más notables:

SEÑALES RECONOCIBLES Y DESTACADAS EN LOS REGISTROS MAGNÉTICOS DE VILLA REMEDIOS

- 05.09.2017 17:47 crochet magnético claramente perceptible.
- 06.09.2017 09:16 Crochet magnético apenas perceptible, Fulguración clase X8.3
- 06.09.2017 12:10 crochet magnético bien definido, 30 [nT]/10 [min] en la componente H , Recuperando altura apuntando hacia el W., Fulguración X9.3, muy intensa.

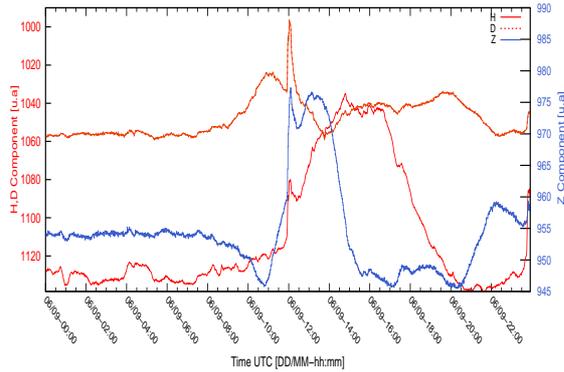


FIG. 4.— Registro de un Crochet, en las tres componentes del campo magnético, mejor definido en sus componentes H y Z , correspondiente al 06.09.2017, obtenido por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios (VRE) - Bolivia. H y Z se miden en [nT] (nano tesla) y D en minutos de arco (u.a. unidades arbitrarias) con el propósito de graficarlas todas en una sola figura.

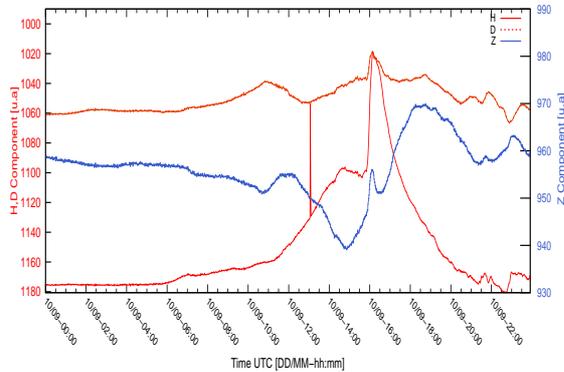


FIG. 5.— Registro de un Crochet, en las tres componentes del campo magnético, notable en su componente H , correspondiente al 10.09.2017, obtenido por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios (VRE), Bolivia. H y Z se miden en nT y D en minutos de arco (u.a. unidades arbitrarias) con el propósito de graficarlas todas en una sola Figura.

- 07.09.2017 14:44 crochet magnético perceptible, circuito horizontal hacia el E, cambio al W.
- 08.09.2017 15:55 Crochet magnético perceptible, compresión de H y Z , cambio hacia el W.
- 09.09.2017 11:12 crochet magnético apenas perceptible con cambio hacia el W.
- 10.09.2017 16:10 crochet magnético **bien definido**, 120 [nT]/80 [min] en H , cambio de dirección al W., Fulguración X 8.2
- 11.09.2017 10:19 crochet magnético apenas perceptible, cambios muy pequeños.

De la lista (items) mostrada se enlistan algunas de las señales magnéticas perceptibles al ojo humano que están en correspondencia (correlación) con los registros de Flujo de Rx solares del satélite GOES de las mismas fechas. Ver las Figs. 1, 2 y 3 correspondientes para mayor detalle.

6. DISTURBANCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO EN EL ECUADOR DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, EL ARO DE CORRIENTE ECUATORIAL, LOS ÍNDICES DST

Las Figs. 6, 7 y 8 que se muestran a continuación ilustran los registros magnéticos de días continuados en sus:

Componente H superpuesto con el modelo (p.a., primera aproximación) de su Variación Diaria Solar (VDS), aclarando los excesos de campo magnético, correspondientes a circuitos eléctricos ionosféricas y otros, y los déficits de campo magnético producidos por interacción entre la Masa Coronal Eyectada (MCE) con la Magnetosfera terrestre, Tormentas Magnéticas (MT). La Componente D superpuesta con su modelo VDS p.a. correspondiente, y La Componente Z , también superpuesta con su VDS p.a., respectivamente.

7. COMPARACIÓN DE LOS REGISTROS DE LOS DIFERENTES EXPERIMENTOS

A continuación con fines de comparación (correlación) presentamos los registros de días continuados, del 03 al 13 septiembre 2017, de los diferentes experimentos en consideración, adicionando la Curva de índices Dst para el mismo lapso de observación.

7.1. Curva de Residuos de la Componente H

La Fig. 9, Curva de residuos de la componente H , es el resultado de la supresión de la Variación Diaria Solar (VDS), la misma que fue definida como la media de las VDS's de los días más quietos del mes.

7.2. Curva de Residuos de la Componente H y la Curva de índices Dst .

La Fig. 10, muestra la superposición de la Curva de residuos de la Componente H con la Curva de índices Dst producida por el centro mundial de datos de Kyoto-Japón para las mismas fechas.

Los Excesos significativos por encima de la curva de índices Dst en la Figs. 10 y 11 corresponderían a los eventos denominados Crochets magnéticos desarrollados en fechas 06.09.2017 y 10.09.2017, que posiblemente no son considerados por el mecanismo que calculan estos índices, precisamente porque los crochets magnéticos son eventos generalmente de corta duración de menos de una hora y esporádicos, temporalmente irregulares, generados por fenómenos exclusivos de naturaleza electromagnética, radiaciones y partículas solares energéticas. Son premonitorios al desarrollo de las Tormentas Magnéticas, interacción del campo magnético de la Tierra con el plasma eyectado por la fulguración solar de naturaleza mecánica, no necesariamente registrable en los observatorios geomagnéticos debido a la direccionalidad de las erupciones del material solar. La sustracción de la Curva de índices Dst de la curva de Residuos de la Componente H proporciona una curva que denominamos Residuo final de H , que visualiza con mayor nitidez los eventos geomagnéticos de alta frecuencia, que se desarrollan rápidamente. Estos eventos positivos son de carácter electromagnético y en gran medida están vinculados a la Ionosfera en sus diferentes niveles y

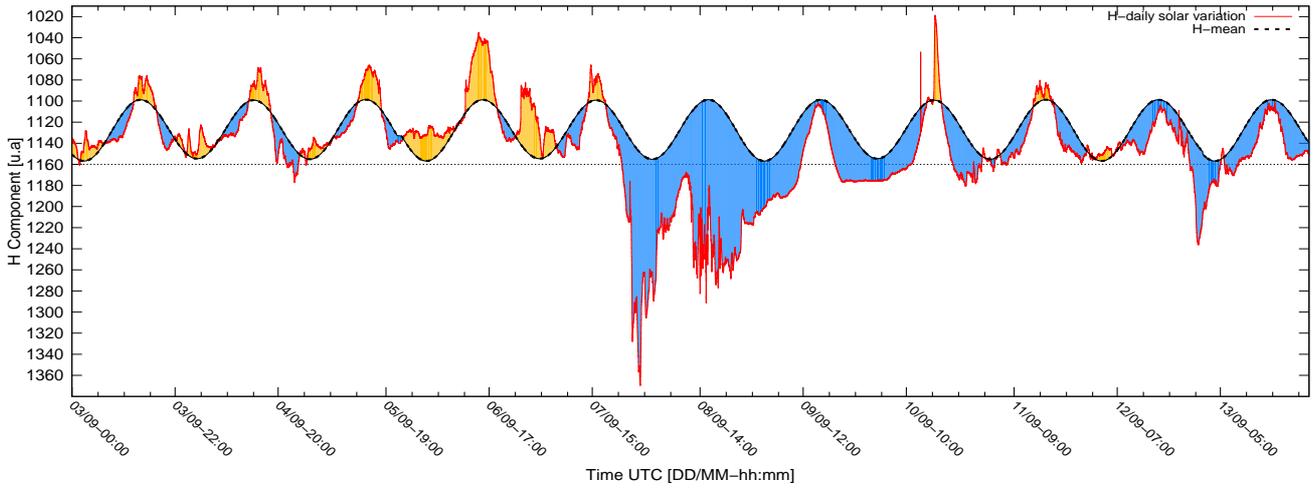


FIG. 6.— Registros de días continuados de la componente H incluyendo la superposición del modelo de la Variación Diaria solar (VDS p.a.), el remarcado con amarillo de los excesos de campo magnético correspondientes a Crochets y otros eventos magnéticos producto de corrientes eléctricas ionosféricas incrementadas y con azul los déficits de campo magnético producto de la interacción de la Masa Coronal Eyectada (MCE) con la Magnetosfera terrestre, Tormentas Magnéticas (TM).

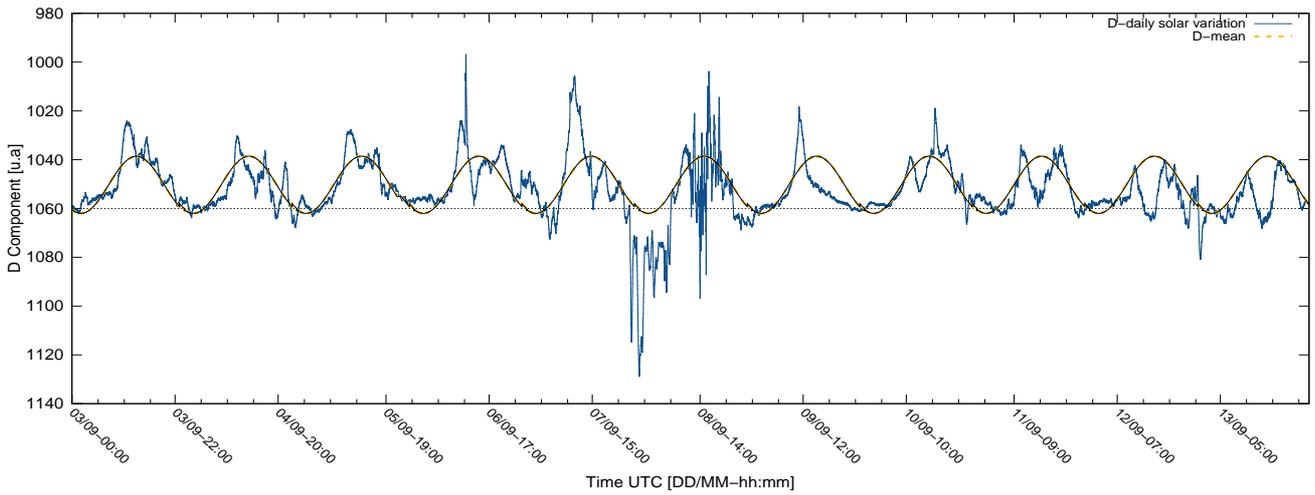


FIG. 7.— Registro de días continuados de la componente D con superposición del modelo de la VDS p.a, correspondiente.

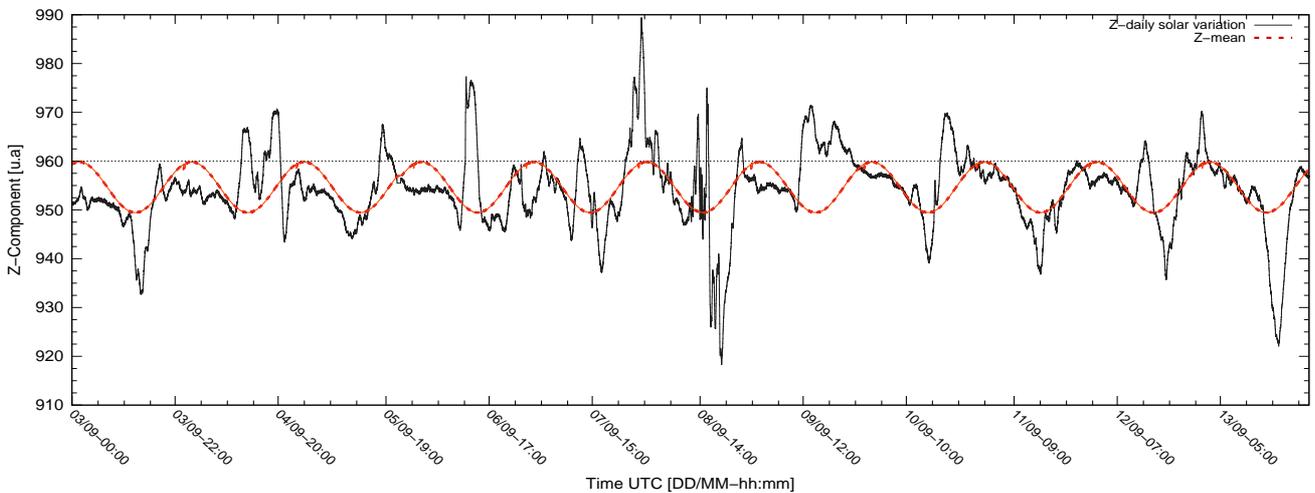


FIG. 8.— Registro de días continuados de la componente Z con superposición del modelo de la VDS p.a, correspondiente.

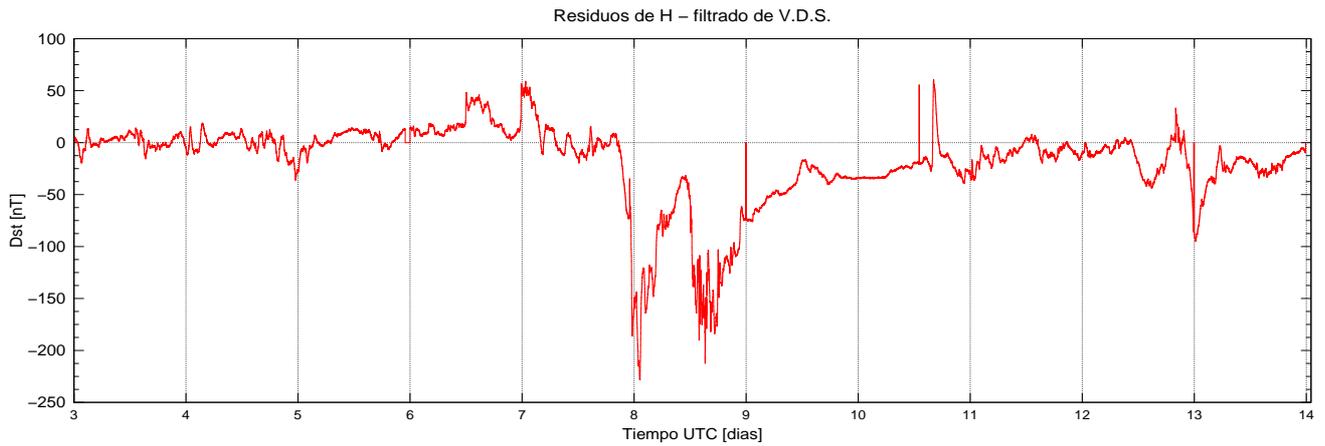


FIG. 9.— Curva de Residuos de la componente H , filtrada la Variación Diaria solar (VDS), registrada por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios (VRM) de Bolivia.

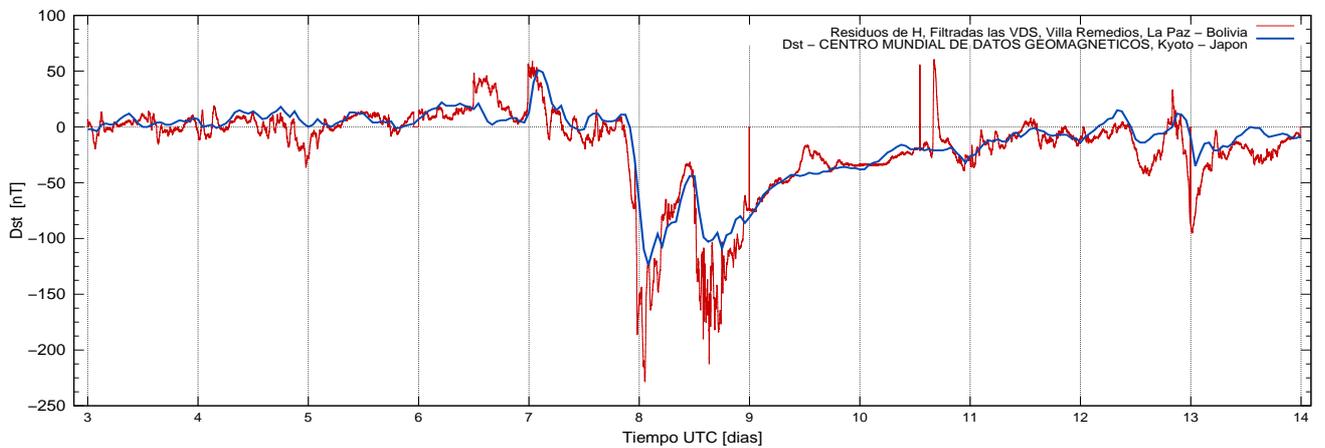


FIG. 10.— Superposición de la curva de residuos de la componente H , filtrada la Variación Diaria Solar (VDS), registrada por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios (VRM) de Bolivia con la Curva de índices Dst producida por el Centro Mundial de Datos de Kyoto- Japón para las mismas fechas.

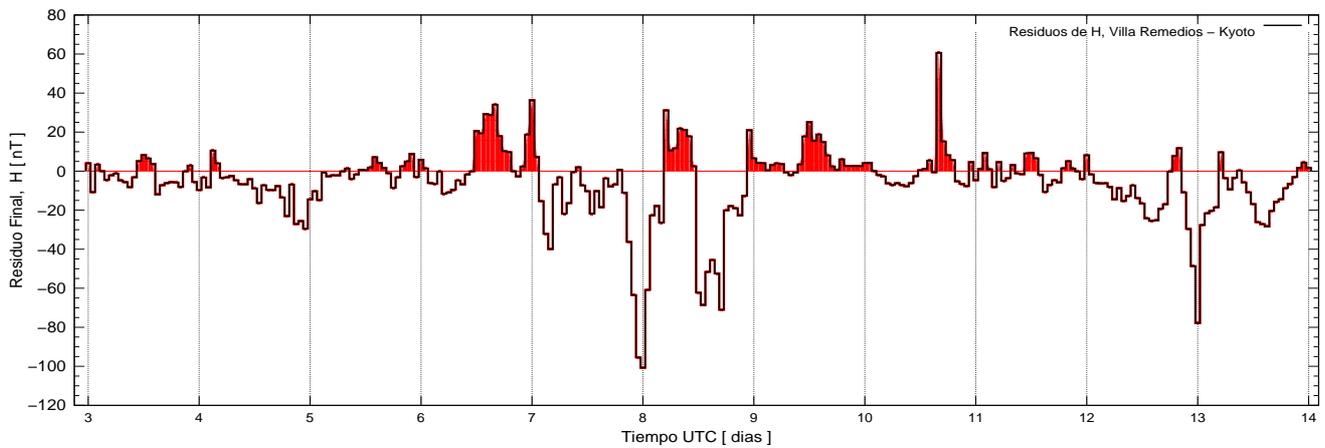


FIG. 11.— Curva de residuos finales de H . Las señales positivas pintadas de rojo corresponden a circuitos eléctricos que se desarrollan en la ionosfera, dos de los más notables son los de los días 06.09.2017 y 10.09.2017. Los demás no son inmediatamente reconocibles en el registro inicial. Las variaciones negativas también son de alta frecuencia en consecuencia de carácter electromagnético que se dan en la magnetosfera.

a flujos de corriente por la lámina neutral de la magnetosfera, mientras que los negativos estarían vinculados a fluctuaciones rápidas de la magnetosfera en su aro de corriente.

7.3. Registros del Flujo de Rx del Satélite GOES de la NASA

Los excesos significativos del flujo de Rx de la Fig. 12 obtenidos por el Satélite GOES de la NASA/SWPC, corresponden a los eventos denominados Crochets magnéticos desarrollados en fechas 06.09.2017 y 10.09.2017.

7.4. Registros del monitor de neutrones MN-64 del observatorio de rayos cósmicos de Chacaltaya - Bolivia.

Los registros de las Figs. 11 y 13 no alcanzan a ilustrar una clara correlación inversa entre los comportamientos del Campo Magnético de la Tierra (CMT) y el Flujo de Neutrones Solares (FNS) que llegan a la Tierra. La Tormenta Magnética (TM) generada el 10.09.2017, no es clara en su CRT y también es baja en intensidad. Pero si se observa un GLE muy nítido.

8. CROCHETS MAGNÉTICOS

Dos de los Crochet magnéticos enlistados están claramente muy bien definidos y están en correspondencia con la emisión de Rx, emitidos desde una posición frontal de la Región Activa (Mancha Solar) Nro. 12673 en Septiembre 6 y de la Región Activa Nro. 12678 no frontal en Septiembre 10, respectivamente, observados con relación a la posición terrestre de Villa Remedios donde fueron registrados a las 12:10 y 16:14 UT, 8:10 y 12:14 hora local (LT), horas de la mañana, en el lugar de registro, respectivamente. En los registros de Flujo de Rx del GOES, los momentos de máxima intensidad de las Fulguraciones son indicadas con las horas 12:02 y 16:06 UT, respectivamente. De los datos indicados se infiere una diferencia de tiempo igual a 8 minutos que correspondería al tiempo de viaje entre el Sol y la Tierra de esta radiación de alta energía. La intensidad de la Variación del Campo Magnético Terrestre producidas por ambas Fulguraciones solares son relativamente pequeñas, de 30 [nT] con 20 [min] de duración y de 120 [nT] con 80 [min] de duración en la componente H , respectivamente. Son campos magnéticos adicionales que se enganchan al Campo Magnético Propio de la Tierra, denominados Crochets magnéticos (CM). El primer crochet magnético sería el resultado de un chorro de corriente eléctrica que se mueve hacia el Este hacia alturas mayores con un gran cambio de dirección hacia el Oeste en horas de la mañana (8:10 LT). El segundo provendría de un chorro de corriente eléctrica que se mueve horizontalmente hacia el Este sin un cambio de dirección significativo hacia el Oeste, comenzando justo al medio día con un tiempo de duración de 80 minutos, que como se dijo anteriormente están en correspondencia con las Fulguraciones solares con emisión de Rx de gran intensidad de clase X.

8.1. Tormentas magnéticas

Ambas Fulguraciones solares han logrado la Eyección de Masa Coronal (CME), Nube de Plasma Solar (NPS), que producen Tormentas Magnéticas (TM) en el Campo Magnético Propio de la Tierra (CMT). La primera de aproximadamente 800 nT, y la segunda de muy escasa magnitud, al haberse producido el contacto de la MCE con el Campo Magnético de la Tierra (CMT, Magnetósfera) con las siguientes características:

- A las 23:05 UT del 7 de Septiembre, significando un tiempo de viaje de 34 h 45 min, es decir 1 día 10 h y 45 min, generando un Comienzo Repentino de Tormenta (CRT=SSC, Sudden Storm Commencement) pequeño de 30 [nT] y 15 minutos de duración, correspondiente a la etapa de compresión del CMT para continuar con una abrupta caída de su Fase Principal (FPT), descompresión o expansión de la magnetosfera terrestre o del CMT, a niveles muy bajos respecto del Nivel de Referencia Normal (NRN), 250 [nT] aproximadamente. Continuada por una Fase de Recuperación (FR) suave de más de 1 día de duración. El nivel de la componente H retorna a valores bajos durante todo el día, 8 de Septiembre. Debido a la ocurrencia de una nueva perturbación se presentan altas frecuencias a partir de las 12:00 UT hasta las 16:00 UT para luego alcanzar una fase recuperativa nueva suave hasta el medio día del siguiente día, 9. Tormenta Magnética (TM) que puede ser calificada de nivel: índice $K_p = 7$ a 8, $G3$ a $G4$.

La segunda que arriba a las 00:40 UT del 12 de septiembre que no genera un CRT (Storm Sudden Commencement) claro, de apenas 8 nT y 20 min, de duración y que tampoco genera una Tormenta (Magnetic Storm) de características intensa, pero si logra generar una fase principal de 100 nT y una fase recuperativa suave característica de 1 día de duración.

Los demás registros de las Fulguraciones Solares (Flares) muestran características similares pero son difíciles de reconocerlas magnéticamente.

En fecha 10.09.2017 el Monitor de Neutrones NM-64 localizado en el monte Chacaltaya, también en sus registros muestra una señal notable en su gráfica construida con base en promedios de 10 minutos, que coinciden con los tiempos de arribo del flujo de Rx del sensor del satélite GOES. Los Rx junto con otras radiaciones penetrantes no cuentan con masa ni carga viajan a velocidades iguales a la de la Luz y no son interferidos por los campos magnéticos interplanetarios y tiene capacidad de ionización. Los neutrones que si tienen masa se mueven a velocidades por debajo de la velocidad de la luz, es decir tardan un poco más que las radiaciones y tienen capacidad de ionización por interacción nuclear.

Estos eventos solares, como ya dijimos, impactan

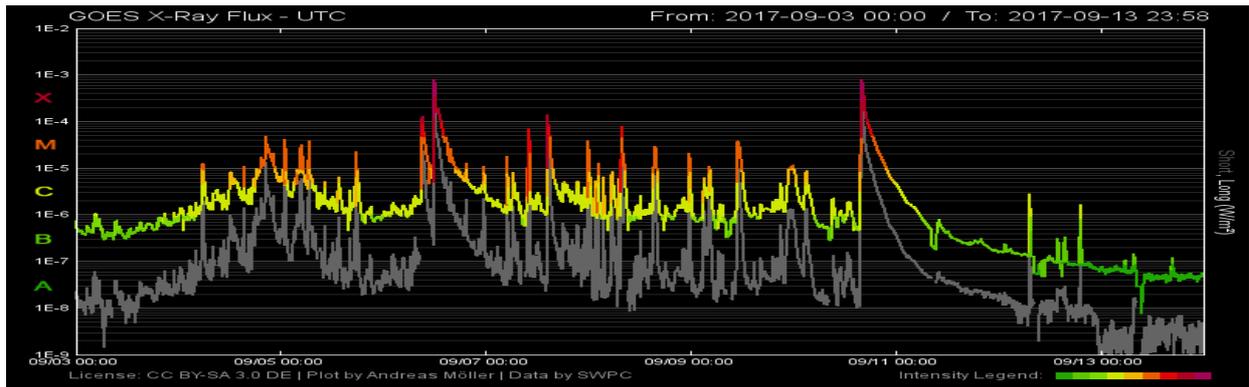


FIG. 12.— Registro de días continuados de flujo de Rx solares obtenidos por el Satélite GOES de la NASA/SWPC., mostrando dos picos notables en fechas: 06.09.2017 y 10.09.2017 que están en correspondencia con las fulguraciones que se desarrollan en la superficie del Sol.

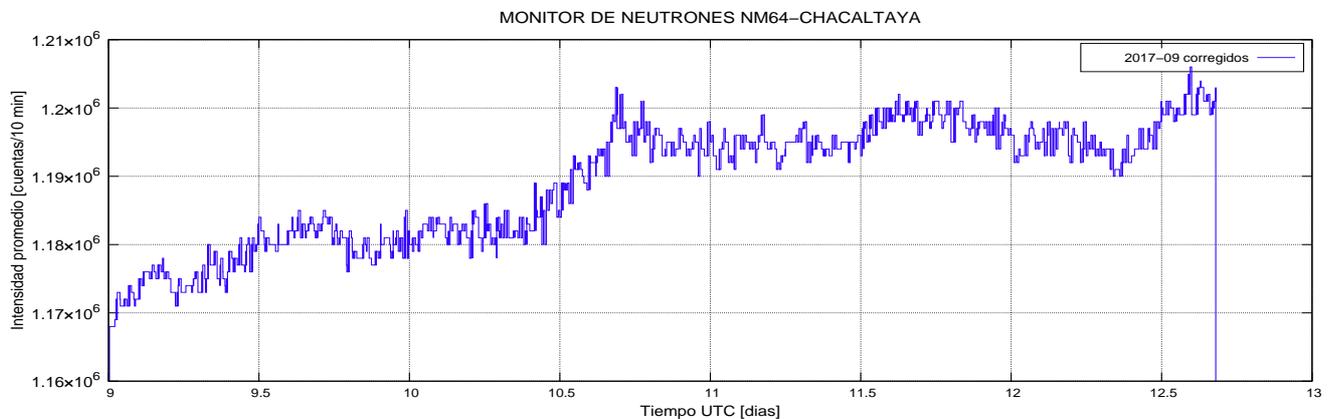


FIG. 13.— Registro de días continuados de las Cuentas de neutrones con promedio de 10 minutos, corregidos ilustrando el paso de un nivel de 1.18×10^6 a 1.2×10^6 representando un incremento de $\Delta = 0.02 \times 10^6 = 2.0 \times 10^4 = 20000$ cuentas en la intensidad de los neutrones solares, definiendo un GLE (Ground Level Enhancement) que sería el segundo del presente ciclo solar, a continuación del momento de desatarse la fulguración solar del 10.09.2017.

de acuerdo a su comportamiento sobre los átomos de la ionosfera que principalmente son de oxígeno, generando circuitos eléctricos intensos de corta duración que modifican de acuerdo a dirección de arribo los circuitos eléctricos a nivel ionosfera circunscriptos al lado iluminado de la Tierra que son los responsables para la generación de los campos magnéticos secundarios denominados Crochets magnéticos.

9. CONCLUSIONES

La observación cuidadosa de los registros de la Tabla 1 de resumen muestra las características del comportamiento del campo magnético terrestre relacionado al comportamiento del Sol, que es motivo de estudio en el presente trabajo, y que nos conducen a las siguientes conclusiones:

- Las imágenes del Sol en diferentes frecuencias y para diferentes radiaciones y los registros del flujo de Rx logrados por el satélite GOES proporcionan abundante información de lo que sucede en la superficie y la atmósfera solar: Velocidad de movimiento rotacional del Sol alrededor de su propio eje de rotación, número y posición de las regiones activas (manchas) del

Sol y proporciona la posibilidad de estudiar los mecanismos de generación de las diferentes radiaciones como: los rayos gamma, Rx, protones e iones en general, las estructuras que las disparan al espacio exterior, las direcciones preferenciales de emisión de las radiaciones electromagnéticas y la eyección de masa coronal (partículas), además de otros.

- Al momento de estudiar los registros de los observatorios geomagnéticos de superficie es muy importante considerar la posición relativa de estos respecto a lo que sucede en la atmósfera solar como por ejemplo la posición de frente del observatorio geomagnético respecto del disco solar, la posición de las regiones activas del Sol respecto de su meridiano central, si están adelantadas retrasadas o están en el limbo del disco solar a punto de pasar al otro lado, parte trasera del disco solar.
- No todas las señales de flujo de Rx registradas por los detectores y las cámaras fotográficas de los satélites están registradas como señales magnéticas en los registros de los observatorios

de superficie.

- Porque, sin importar la posición de la región activar solar que la genera, La dirección de emisión de los Rx emitidos por el Sol parece ser radial (hay que estudiar con mas detenimiento para determinar si tiene alguna dirección preferencial, que parece que la tiene!), produciendo señales de diferente intensidad.
- Las fulguraciones que se produjeron en horas de la noche correspondiente al observatorio en consideración.
- Los efectos magnéticos de los Rx y del proceso de fulguración en sí, son tan rápidos que no pueden dejar huellas en otros instantes.
- Fulguraciones poderosas de regiones activas del Sol que no estuviera en posición frontal no están en posibilidad de generar señales geomagnéticas observables en horas del día del observatorio.
- No todas las Eyecciones de masa coronal (CME) que pudieran generar las fulguraciones solares están en posibilidades de generar Tormentas magnéticas, ni siquiera SSC claras debido a que:
- Las CME son direccionales, con dirección preferencial radial. Para lograr generar tormentas magnéticas deben tener una posición muy cercana a la frontal, adelante o atrás, observada desde el observatorio geomagnético. De lo contrario, por más que en la superficie del Sol se produzcan poderosas fulguraciones con gran emisión de CME estas no impactaran sobre la magnetosfera terrestre.
- La Fulguración de categoría X9.3 ocurrida, el 06.09.2017, en la superficie solar produjo:
- Un crochet magnético claramente definido por la correlación temporal de señales en las tres componentes del campo magnético terrestre registradas por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios, las mismas que también están en correlación temporal con los registros de Flujo de Rx obtenidos por los sensores instalados sobre el satélite GOES de la NASA.

- Esta misma fulguración solar eyecta masa coronal que después de un viaje de 34 horas con 45 minutos impactan sobre la magnetosfera terrestre generado una Tormenta Magnética típica
- la Fulguración solar del 10.09.2017 de categoría X8.2, también produce:
- Un crochet magnético, como resultado de una clarísima correlación temporal de las variaciones en los registros de las tres componentes del campo magnético, obtenidos por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. También, estas señales están en perfecta correlación temporal con los registros de Flujo de Rx obtenidos por el satélite GOES de la NASA y con los registros de Flujo de Neutrones del Monitor de Neutrones del observatorio de Rayos cósmicos de Chacaltaya, en este caso continuada por una Tormenta de Radiaciones.
- Esta fulguración, aun siendo muy potente, habiendo eyectado masa coronal, esta no impacta frontalmente con la magnetosfera de la Tierra y en consecuencia no genera una Tormenta Magnética típica, resulta con un Comienzo Repentino de Tormenta nada nítida y una Tormenta Magnética débil en intensidad.
- La superposición de la curva de Residuos de la Componente H del campo magnético de la Tierra y la curva de índices *Dst*, ilustran que los residuos positivos respecto de la curva de índices *Dst* corresponden a los crochet magnéticos y los negativos a efectos magnetosféricos residuales, posiblemente vinculados a las corrientes que circulan por el plano neutro de la magnetosfera. La curva resultante de la sustracción de la curva de índices *Dst* de la curva de Residuos de la componente H podría convertirse en una muy buena herramienta para el aislamiento de las curvas producidas por eventos como los crochets magnéticos, eventos de carácter totalmente electromagnéticos y otros de carácter electromecánicos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

REFERENCIAS

- Boulder, N. 2017, GOES X-ray flux data (NOAA/AWPC)
- Calcina, M. 2009, Revista Boliviana de Física, **15**, 44
- Chu, W. & Qin, G. 2016, Annales Geophysicae, **34**, 45
- Cordaro, E. G., Venegas, P., & Laroze, D. 2018, Annales Geophysicae, **36**, 275
- Echer, E., Vieira, L. E. A., Rigozo, N. R., Pereira de Souza, M., & Nordemann, D. J. R. 2001, Proceedings of the 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, Brazil, 1369
- Hoeksema, J. T., Wilcox, J. M., & Scherrer, P. H. 1982, Journal of Geophysical Research: Space Physics, **87**, 10331
- Iyemori, T., Maeda, H., & Kamei, T. 1979, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, **31**, 1
- Kugi–Kyoto. 2018, http://wsc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_real-time/index.html. (Kyoto, Japón)
- Kumar, P., C Bhatt, Y., Jain, R., & S Shishodia, Y. 2015, 1
- Matsushita, S. & Campbell, W. H., Eds. 1967, Physics of geomagnetic phenomena: International Geophysics Series, Vol. 2 (New York, Academic Press)
- Mayaud, P. N. 1980, Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices, Vol. 22 (Washington DC, American Geophysical Union)
- McLeod, M. G. & Coleman Jr, P. J. 1980, Physics of the Earth and Planetary Interiors, **23**, P5
- Mendoza, M. & Morales, J. 2004, Analysis of the Interaction of the Solar Wind with the Terrestrial Magnetosphere, Tech. Rep. Physics/0409012

- Muraki, Y., Matsubara, Y., Masuda, S., Sakakibara, S., Sako, T., Watanabe, K., Bütikofer, R., Flückiger, E., Chilingarian, A., Hovsepyan, G., et al. 2008, *Astroparticle Physics*, **29**, 229.
- Murphy, R. 2008, *Exploring solar flares with gamma rays and neutrons*, Technical Reports, Naval Research Laboratories, Washington DC
- Noaa-Swpc. 2017, <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>.
- Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. 2017, Informe IIF, Carrera de Física, UMSA.
- Observatorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya 2017, Informe IIF, Carrera de Física, UMSA.
- Polar-Light. 2018, <http://www.polarlightvorhersage.de/goes/2018-08>.
- Rangarajan, G. 1989, *Geomagnetism*, **3**, 323
- Ricaldi Yarvi, E., Miranda Loza, P., Bustos, R., Ticona I, R., Burgoa, O., López, D., & Matsubara, Y. 2007, *Revista Boliviana de Física*, **13**, 29.
- Ricaldi-Yarvi, E. & Miranda-Loza, P. 2008, *Revista Boliviana de Física*, **14**, 85.
- Sako, T., Watanabe, K., Muraki, Y., Matsubara, Y., Tsujihara, H., Yamashita, M., Sakai, T., Shibata, S., Vald-Galicia, J., González, L., Hurtado, A., Musalem, ., Miranda, P., Martinic, N., Ticona, R., Velarde, A., Kakimoto, F., Ogio, S., Tsunesada, Y., Tokuno, H., Tanaka, Y., Yoshilawa, I., Terasawa, T., Saito, Y., Mulai, T., & Grosm, M. 2007, *Revista Boliviana de Física*, **13**, 39.
- Zeilik, M. & Gregory, A. 1997, *Introductory astronomy and astrophysics* (New York, Saunders College Publishing),