



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

INFLUENCIA DE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS EN  
LOS RAYOS CÓSMICOS REGISTRADOS POR EL  
TELESCOPIO DE NEUTRONES SOLARES EN SIERRA  
NEGRA DE 2004 - 2015

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA - ESPACIALES

PRESENTA:

STEPHANIE DE LA TORRE CASTILLEJA

TUTOR:

DR. LUIS XAVIER GONZÁLEZ MÉNDEZ

Ciudad de México, México Mayo 2023





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*La muchacha desnuda toma el sol  
apenas cubierta  
por la presencia de las frondas.*

*Abre su cuerpo al sol  
que en lluvia de fuego  
la llena de luz.*

*Entre sus ojos cerrados  
la eternidad se vuelve instante de oro.  
La luz nació para que el resplandor de este cuerpo*

*le diera vida.  
Un día más  
sobrevive la tierra gracias a ella*

*que sin saberlo  
es el sol  
entre el rumor de las frondas.*

-José Emilio Pacheco

*Para Ian*

# Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que estuvieron directa e indirectamente presentes a lo largo del desarrollo de este trabajo. Principalmente a mi tutor, Dr. Luis Xavier, no sólo por haberme guiado y darme las bases para el trabajo, sino por mantener la motivación constante como profesional. A mis sinodales, por haberse tomado el tiempo de contribuir en correcciones, observaciones e ideas para hacer de esta tesis una más completa.

Agradezco a mis colegas. Óscar Batalla, por haber estado, literalmente, desde el día uno hasta el último en este recorrido académico; por siempre estar apoyando e impulsando a la aspiración científica. A Jania Newton, por pacientemente ayudarme en la manipulación del código y estar constantemente apoyando.

A mi familia: mi mamá, mi papá, mi hermana y Fernando. Por fomentar a poder concluir, por fin, una licenciatura a pesar de las circunstancias.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1 El Sol</b>	<b>4</b>
1.1 Características del Sol . . . . .	4
1.2 Interior Solar . . . . .	5
1.2.1 Núcleo . . . . .	5
1.2.2 Zona Radiativa . . . . .	6
1.2.3 Zona Convectiva . . . . .	6
1.3 Atmósfera Solar . . . . .	7
1.3.1 Fotósfera . . . . .	7
1.3.2 Cromósfera . . . . .	7
1.3.3 Corona . . . . .	8
1.3.4 Viento Solar . . . . .	9
1.3.5 Regiones de Interacción Corrotante . . . . .	10
1.4 Actividad Solar . . . . .	10
1.4.1 Fulguraciones . . . . .	12
1.4.2 Eyecciones de Masa Coronal . . . . .	14
<b>2 Rayos Cósmicos</b>	<b>16</b>
2.1 Espectro de Energía . . . . .	16
2.2 Clasificación . . . . .	17
2.3 Cascadas de Partículas . . . . .	18
2.3.1 Componente Muónica . . . . .	19
2.3.2 Componente Hadrónica/Nucleónica . . . . .	19
2.3.3 Componente Electromagnética . . . . .	20
2.4 Modulación Solar . . . . .	20
2.5 Rigidez Umbral . . . . .	23
<b>3 Tormentas Geomagnéticas</b>	<b>25</b>
3.1 Índices Geomagnéticos . . . . .	26
<b>4 Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra</b>	<b>28</b>
<b>5 Eventos Y Selección de Datos</b>	<b>31</b>
5.1 Obtención de Datos . . . . .	33

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	v
<b>6 Resultados</b>	<b>35</b>
6.1 Discusión de Resultados . . . . .	47
<b>Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>50</b>
<b>Referencias</b>	<b>63</b>

# Resumen

El telescopio de neutrones solares ubicado en Sierra Negra, Puebla, México (TNS-SN) a  $19^{\circ}\text{N}$  y  $97.3^{\circ}\text{O}$ , 4580 msnm, forma parte de la red de telescopios de neutrones a nivel global. Este detector es capaz de registrar el fondo de rayos cósmicos y el flujo de partículas neutras y cargadas que penetran hacia la superficie terrestre.

Una tormenta geomagnética (TG) ocurre cuando el campo magnético de la Tierra es perturbado por el impacto de las emisiones del Sol.

El objetivo de esta tesis es corroborar la influencia de las TGs en el flujo de rayos cósmicos detectado por el TNS-SN, desde su instalación en el 2004, hasta el año 2015, además de identificar el fenómeno que provocó la tormenta.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron herramientas de programación con base en Python para eliminar ruidos de los datos obtenidos, manipular temporalmente y proporcionar una lectura más amigable de los datos.

La primera etapa de este trabajo consistió en seleccionar las tormentas geomagnéticas clasificadas como moderadas e intensas con base en el índice Dst. Una vez clasificadas, se seleccionaron los datos del TNS-SN para cada una de las TG y se suavizaron mediante el uso de códigos desarrollados; posteriormente, se graficaron y analizaron las firmas registradas.

Se pudieron estudiar 29 tormentas, donde 9 de ellas no tuvieron firmas estadísticamente significativas en el registro y en las 20 restantes, se encontraron incrementos y/o decrementos en las cuentas de partículas detectadas. De los eventos con variaciones significativas, el 35 % corresponde a únicamente eventos Forbush y sólo un 10 % para únicamente incremento de partículas. El resto, tuvieron tanto incrementos como decrementos, ya sea en un mismo canal de detección (que corresponde a un rango de energía de las partículas) o en diferentes canales.

Cuando el Sol se encontraba en una fase de alta actividad, las tormentas geomagnéticas fueron provocadas por eyecciones de masa coronal y se registraron principalmente eventos Forbush; pero cuando el Sol se encontraba en una fase de baja actividad, las tormentas geomagnéticas se producían por eventos de regiones de interacción corrotantes y los registros eran principalmente de incremento de partículas.

Con esto, se pudo confirmar la correcta operatividad del TNS-SN y la relación de las firmas en el flujo de los rayos cósmicos con las tormentas geomagnéticas.



# Introducción

Se conoce como Clima Espacial o Meteorología del Espacio a la medición y el análisis en tiempo real del conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre, que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en la infraestructura, tecnología, sociedad y salud. Estos fenómenos representan serios riesgos para el desarrollo humano, puesto que se ha demostrado que afectan de forma global la tecnología e infraestructura espacial y terrestre. Una de las mayores afectaciones del Clima Espacial son las tormentas geomagnéticas (TG), las cuales son perturbaciones prolongadas del campo geomagnético. Una TG es cuantificada por diversos índices geomagnéticos que miden su intensidad a escala global y local; de este modo, podemos catalogarlas como débil, moderada o intensa. En este escrito, se utiliza la clasificación de [1] para catalogar las intensidades y más adelante se muestran detalladamente. Las TG moderadas e intensas pueden provocar variaciones en el flujo de rayos cósmicos detectados a nivel de tierra; así, se pueden estudiar estas variaciones para conocer la relación entre la intensidad de las TG y los registros en los detectores especializados durante las fases de los ciclos solares. El telescopio de neutrones solares ubicado en la cima de Sierra Negra en Puebla, México (TNS-SN), es capaz de detectar el fondo de rayos cósmicos galácticos, así como los neutrones solares que se emiten en las fulguraciones más intensas. El TNS está en funcionamiento desde el año 2004 y su base de datos permite desarrollar un método para analizar las firmas que provocan las TG.

Para poder realizar estudios del Clima Espacial, es necesario comprender la dinámica que ocurre entre el ambiente Sol-Tierra, que está controlada por la actividad solar. El entorno incluye plasmas ionizados (viento solar), parcialmente ionizados (ionosfera) y neutros (atmósfera terrestre), mismos que son analizados con la magnetohidrodinámica. Parámetros como el viento solar y campos magnéticos (solar e interplanetario) dominan las variaciones que pueden llegar a perturbar las condiciones del geoespacio, causando subtormentas, tormentas geomagnéticas, aceleraciones de partículas, disminuciones y aumentos en la penetración de partículas, entre otras. El análisis de estos fenómenos engloba muchas actividades del Sol, que tienen diferentes consecuencias en la Tierra; por lo tanto, es fundamental iniciar con el estudio de nuestra estrella. Para este trabajo, el enfoque es en los rayos cósmicos (RC) -definidos en su capítulo- y neutrones solares, ya que se hace el estudio del telescopio mencionado para contribuir en los aspectos del Clima Espacial. Con el análisis de las variaciones de los rayos cósmicos, se buscan firmas significativas para México atribuidas a las perturbaciones que causan TG. Con esto, se puede desarrollar un método para incentivar esta área de investigación a medida que su importancia crece con el interés del humano de usar el espacio como parte de un dominio a través de las comunicaciones espaciales. De forma más teórica, el estudio de los neutrones y partículas energéticas, siempre será fundamental para el avance de la física.

En la estructura de este trabajo, se comienza con un resumen de nuestra estrella, ya que es la fuente principal de todos los fenómenos físicos de nuestro Sistema Solar y su actividad tiene influencia sobre las partículas provenientes tanto del medio interestelar, como del espacio fuera de nuestra Galaxia. Después, se continúa con la descripción de los rayos cósmicos, ya que la teoría es fundamental para conocer la eficiencia del TNS-SN. Posteriormente, se presenta el telescopio y sus características y más adelante se definen las tormentas geomagnéticas. Por último, se presentan los análisis realizados a partir de los datos obtenidos del TNS, así como una discusión y sus conclusiones. Cabe mencionar que toda esta información es relevante para la comprensión del Clima Espacial y se pretende generar una pieza más para este gran rompecabezas.

# Capítulo 1

## El Sol

### 1.1. Características del Sol

A pesar de ser una estrella común dentro de las miles de millones de nuestra galaxia, el Sol es la más importante para nosotros, no sólo porque nos provee de energía para la vida, sino porque es el laboratorio de plasma más cercano que tenemos, permitiendo estudiar todos los parámetros físicos y energéticos que lo rigen. Siendo de clasificación espectral G2V, el Sol se encuentra a la mitad de su vida con  $4.57 \times 10^9$  años, mismo que es calculado por su masa de  $1.989 \times 10^{33}$  g. La masa de una estrella es lo que determina las etapas por las cuales pasará su ciclo de vida, por lo que podemos conocer cómo y cuándo será su final. Las estrellas similares al Sol, que se encuentran en la secuencia principal, es decir, en la quema de hidrógeno, se transforman en una Gigante Roja cuando su combustible parece agotarse y concluyen su vida como una Nebulosa. Los parámetros más importantes de esta estrella están enlistados en la Tabla 1.1; y en la Figura 1.1, se muestran las capas y características más relevantes que serán descritas a continuación.

Propiedades Básicas del Sol	
Radio	695,500 km
Masa	$1.989 \times 10^{33}$ g
Densidad promedio	$1.409 \text{ g/cm}^3$
Gravedad en superficie	$274 \text{ m/s}^2$
Velocidad de escape en superficie	617.7 km/s
Período rotación sinódico	27.3 días en ecuador
Período rotación sideral	25.4 días en ecuador
Distancia promedio a la Tierra	149,597,870 km = 1 UA
Luminosidad	$3.844 \times 10^{26}$ W
Edad	$4.57 \times 10^9$ años
Temperatura en núcleo	$15.7 \times 10^6$ K
Temperatura en superficie	6400 K

Tabla 1.1: Propiedades básicas del Sol [2]

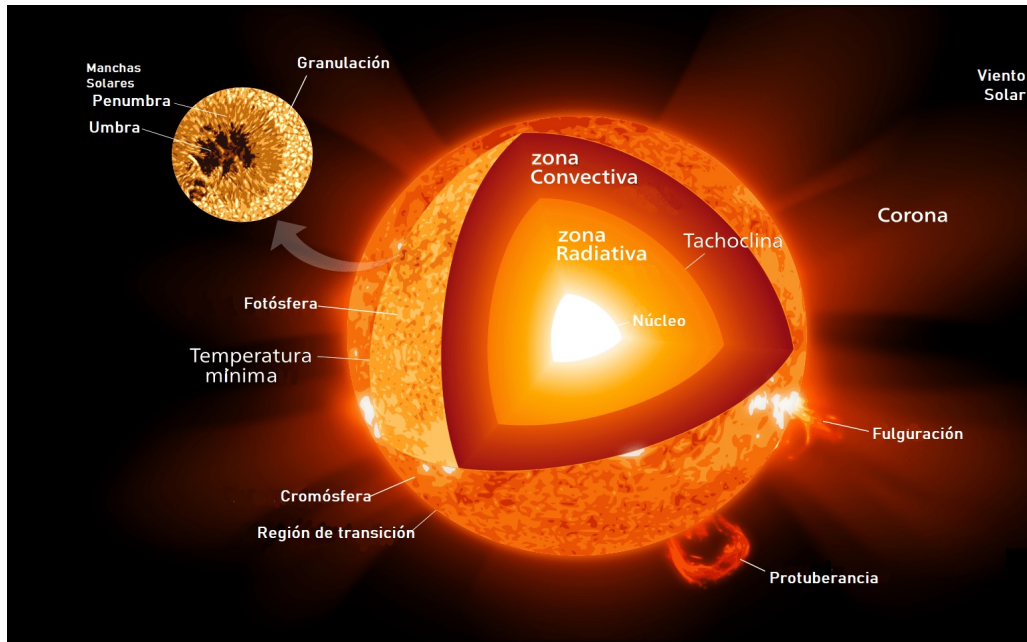
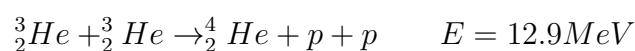
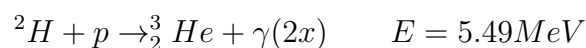
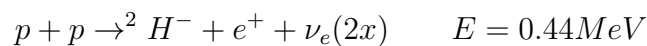


Figura 1.1: Capas internas, atmósfera solar y actividad solar. (Imagen modificada de [15]).

## 1.2. Interior Solar

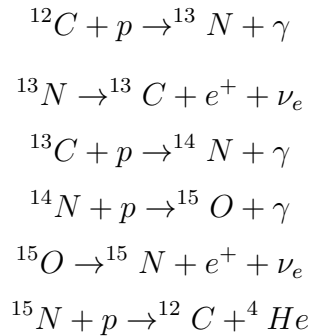
### 1.2.1. Núcleo

El Sol no sólo domina a todos los planetas de nuestro sistema de manera independiente, sino que influye y modela todo el espacio (que no está vacío), donde se encuentran sumergidos. Este espacio se llama heliósfera (o magnetósfera solar) y está gobernada por los movimientos y procesos que ocurren en el interior del Sol, hasta su atmósfera. Por definición, una proto estrella se clasifica como estrella una vez que acumula masa suficiente para poder comenzar procesos termonucleares. Una vez que sucede, se genera un equilibrio hidrostático entre la fuerza de gravedad de la masa y la presión del gas generada por las fusiones. Es en esta primera capa donde el Sol genera la máxima fuente de energía del Sistema Solar. Dependiendo de la masa, ocurren diversas reacciones nucleares en cadena, y en este caso, la principal es la fusión de hidrógeno para producir helio, a través de la cadena protón-protón. Debido a las elevadas condiciones de densidad y temperatura, que alcanzan los 15 millones de K, se convierte 0.7% de masa en radiación ( $E = mc^2$ ). La reacción de fusión de protones tiene un resultado neto de un átomo de Helio, dos partículas beta, dos neutrinos y dos rayos gamma y se muestra a continuación con la energía liberada en cada etapa:



La energía total de la reacción es 24.76 MeV.

Otra reacción que ocurre en estrellas de esta masa para mantener la presión interna y el balance, es la cadena CNO - Carbono, Nitrógeno, Oxígeno. Ésta comienza con un carbono que actúa como un catalizador, por ende, es una reacción secundaria, ya que no abunda este elemento. La cadena de reacciones es la siguiente:



Con esta información se intuye que la composición principal del Sol es de 92.1 % hidrógeno, 7.8 % helio y 0.1 % de elementos más pesados. La cadena p-p produce 98.5 % de la energía solar y el resto, el ciclo CNO. Cuando se agote el hidrógeno, el Sol comenzará a quemar helio y otros elementos más pesados, pasando a la siguiente etapa de su ciclo de vida.

Gracias a la heliosismología, se ha podido calcular que el núcleo se extiende hasta aproximadamente 0.25 radios solares, es decir 170,000 kilómetros [3]. La densidad en el centro es de  $150\text{g}/\text{cm}^3$  y disminuye hasta  $20\text{g}/\text{cm}^3$ , donde ya no es suficiente para producir fusión. Modelos numéricos han estimado que la presión central es de  $2.50 \times 10^{16}\text{Nm}^2$ , sin embargo es un cálculo que supone una densidad constante en referencia a la profundidad y considerando que esta presión se debe al peso suprayacente de toda la masa solar.

### 1.2.2. Zona Radiativa

La siguiente capa se llama Zona Radiativa y se encuentra entre 0.25 y 0.8 radios solares, abarcando un 70 % del radio total. Todas las capas tienen un mecanismo de transporte de energía diferente y en ésta predomina la radiación -he ahí su nombre. Los rayos gamma que resultaron de las reacciones del núcleo comienzan a perder energía tras colisionar con electrones, formando fotones de menor energía (longitud de onda mayor): rayos X. Éstos fotones van encontrando una salida hacia la siguiente capa que tiene menor temperatura y presión. Esta radiación puede tardar hasta millones de años en alcanzar la superficie, ya que, aunque sí viajan a la velocidad de la luz, es una zona muy densa y no logran escapar con facilidad. Los fotones se encuentran en constantes colisiones, por lo que son dispersados, absorbidos e irradiados, perdiendo su energía, inhibiendo su salida; y cuando logran penetrar a la siguiente capa, su longitud de onda ya es mucho mayor, llegando a la región visible para nosotros. Por esta razón es que los “rayos” del Sol que recibimos, resultaron de una reacción llevada a cabo hace millones de años.

### 1.2.3. Zona Convectiva

Separando la zona radiativa de la última capa interna, se encuentra la taoclina, a  $\sim 0.693$  radios solares. Se trata de una zona de transición de cambios abruptos en la tasa de rotación interna y desempeña un papel importante en la generación del campo magnético solar. Esta zona sigue siendo un elemento de estudio. Consiguiente a ésta, se encuentra la Zona Convectiva,

ubicada entre 0.8 y 1 radio solar. El transporte de energía es a través de la convección, donde gas caliente se expande y asciende por su menor densidad, se enfría al irradiar calor en la superficie, se hace más denso y fluye hacia abajo, formando corrientes térmicas que pueden ser descritas como Coriolis. El movimiento es posible por la diferencia de temperaturas de la parte inferior y superior, siendo  $\sim 2 \times 10^6$  K y  $\sim 5,800$  K, respectivamente. Este método de transferencia es mucho más rápido que la radiativa y es visible en la fotosfera, ya que se forman celdas de granulación o supergranulación que tienen tamaños desde los  $\sim 1,000$  km. manifestando así las convecciones.

## 1.3. Atmósfera Solar

### 1.3.1. Fotosfera

Aunque el Sol no sea una esfera sólida, se le considera como superficie a la Fotosfera, ya que al tener una temperatura de  $\approx 6,400$  K, las longitudes de onda en la que emite y a la que los fotones escapan, se encuentran principalmente en el espectro visible, por ende, es la zona que podemos observar a simple vista. Esta capa es muy delgada, con un espesor de aproximadamente 300 km y tiene una densidad de  $10^{23}$  *partículas*/m<sup>3</sup>. Como ya se mencionó, la granulación convectiva es evidente en esta zona y se forman las celdas que la cubren. Los tubos de flujo magnético formados en la tacoclina, emergen en la superficie de la fotosfera y, cuando son muy intensos, aparecen como manchas solares. Estas últimas son las regiones menos calientes de la fotosfera, con temperaturas de hasta 1500 K menor a su alrededor, ya que es donde emergen campos magnéticos muy intensos, mismos que inhiben el transporte convectivo de calor por el incremento en la presión magnética. Las manchas solares generalmente vienen en pares de diferente polaridad y consisten en una umbra, que es la parte interna oscura con menor temperatura y la penumbra, que es la parte externa y presenta filamentos claros. La umbra es más oscura, porque, al tener un campo magnético alto (¡cerca de 2500 veces el campo magnético de la Tierra!), emite alrededor del 20% del flujo solar promedio. El tamaño de las manchas varía, pero en promedio, son del mismo tamaño que el planeta Tierra y su campo magnético puede llegar hasta los 3000 G, por ende, son indicadores de la actividad solar, que será descrita más adelante. Al ser tan visibles, desde el siglo XVII se han tenido observaciones directas de sus apariciones, generando así un registro desde su incremento en número hasta su desaparición, a lo que se llamó el Ciclo Solar. La variación de la presencia de manchas dura, en promedio, 11 años y cuando el Sol se encuentra en su pico de actividad, se conoce como el máximo solar y en su etapa más quieta, el mínimo solar. El diagrama mariposa, mostrado en la figura 1.2, muestra el ciclo de las manchas solares con respecto a su posición latitudinal y el tiempo, evidenciando que en el máximo solar se forman más cercanas al ecuador. Cada que empieza un nuevo ciclo, la polaridad de las nuevas manchas solares, cambia.

### 1.3.2. Cromósfera

La Cromósfera es la parte más baja de la atmósfera solar, con  $\approx 2000$  km de espesor y menor densidad que la anterior, con  $10^{17}$  *partículas*/m<sup>3</sup>. La temperatura de esta capa varía desde los 4300 K hasta alrededor de 10,000 K en la parte superior. Su espectro de emisión no se encuentra en el rango visible y sus líneas de emisión principales se conocen como las Líneas

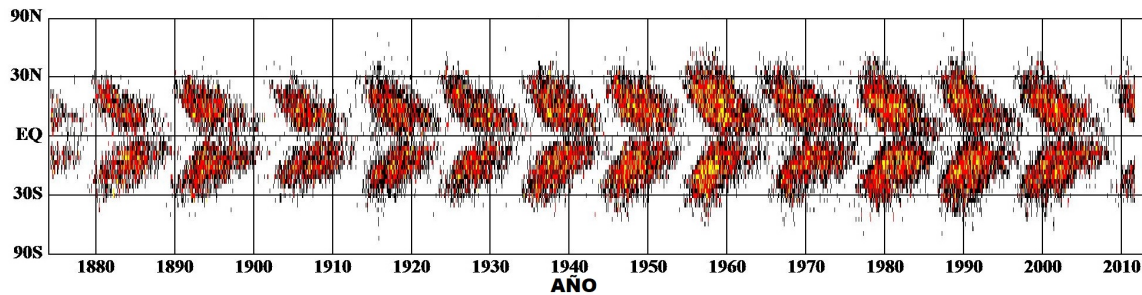


Figura 1.2: Diagrama de aparición de manchas solares respecto a su latitud (Modificada de [16]).

de Fraunhofer, donde se incluye la emisión de  $H \alpha$ . Dependiendo de cuál se utilice para su observación, se muestran diferentes características de la cromósfera, incluyendo la granulación, elementos magnéticos, oscilaciones y estructuras como filamentos y espículas. Las espículas son chorros de plasma que alcanzan una velocidad de 20 km/s y arrastran flujos hacia la Corona.

### 1.3.3. Corona

La última capa atmosférica es la tenue Corona, que puede revelarse únicamente al cubrir la fotosfera; siendo posible en un eclipse o con un coronógrafo. Su densidad es baja con  $10^{15} \text{partículas}/\text{m}^3$  y disminuye conforme se extiende al medio interplanetario aun estando confinado por el campo gravitacional del Sol, convirtiéndose en viento solar. El parámetro más intrigante es su temperatura, la cual llega a alcanzar los  $10^6$  K, siendo lo contrario a lo que se esperaría: que la temperatura disminuya al alejarse de la superficie del Sol. La división entre la Cromosfera y la Corona, donde ocurre este cambio abrupto de incremento de temperatura, se le llama región de transición. La Corona es una estructura muy dinámica que varía con el tiempo y depende mucho del estado magnético y la distribución de la polaridad y se cree que su incremento de temperatura se debe a reconexiones magnéticas. Las configuraciones que toma, se clasifican en la actividad y los tres tipos son:

- Regiones activas (RA) - Áreas de concentración de campos magnéticos muy fuertes y de líneas cerradas, manifestadas generalmente por las manchas solares. En estas zonas es donde ocurren procesos como eyecciones de masa coronal, fulguraciones y calentamiento de plasma que forman bucles coronales.
- Regiones del Sol tranquilo - Zonas más tranquilas que las RA, pero también con mucha dinámica, tales como calentamiento, fulguraciones más pequeñas, eventos explosivos, emisiones de rayos X suaves y arcos coronales.
- Hoyos coronales - Son regiones oscuras concentradas mayormente en los polos y están dominadas por las líneas de campo magnético abiertas, las cuales actúan como conductos para la emisión del plasma hacia el medio interplanetario. Son las fuentes del viento solar rápido y como expulsan plasma, aparecen mucho más oscuras que el Sol tranquilo.

En la figura 1.3 se muestran las diferentes estructuras de la corona y en la figura 1.4, se aprecia la diferencia de la geometría general de la corona en un máximo y mínimo solar, respectivamente.

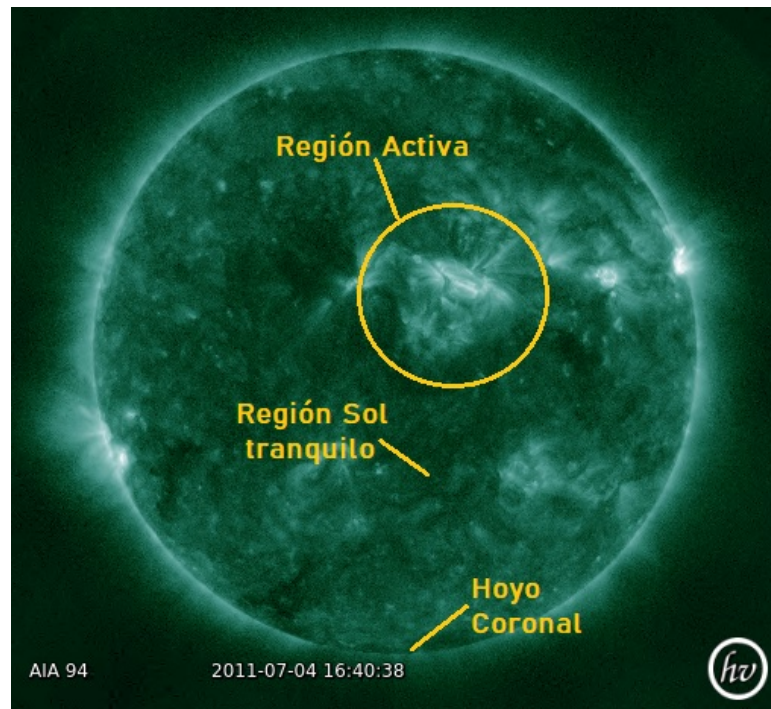


Figura 1.3: Estructuras de la corona [17].

#### 1.3.4. Viento Solar

La expansión de la atmósfera solar es producida por una diferencia de presiones entre la Corona y el espacio interplanetario que arrastra al plasma radialmente hacia afuera, escapando de la influencia de la gravedad solar. Esto forma un flujo supersónico de plasma altamente ionizado junto con líneas de campo magnético que permea todo el medio y es lo que se conoce como viento solar (VS). La composición consiste en electrones, protones, iones pesados y helio ionizado. Hay dos tipos de VS:

- Rápido - Se origina de los hoyos coronales y tiene una velocidad entre 400 km/s y 800 km/s
- Lento - Se origina de regiones del ecuador magnético en un mínimo solar y de cascos coronales en un máximo solar. Tiene una velocidad de entre 250 km/s a 400 km/s.

La expansión radial conforma la heliosfera, determinando el dominio electromagnético del Sol y debido a su diversificación por la actividad solar, la variabilidad es transferida hacia los planetas, de manera que hay perturbaciones esporádicas. El VS es el responsable de las fluctuaciones geomagnéticas, las variaciones de rayos cósmicos y demás fenómenos observables. A la distancia Sol-Tierra (1 UA), el viento solar tiene una densidad de 5 a 10 partículas/ $cm^3$ , que es calculada por la temperatura de la Corona. Tiene una velocidad promedio de 400 km/s y las líneas de campo magnético, que se configuran como un espiral por la rotación solar, tienen una intensidad promedio de 10 nT [4]. Las regiones de campo abierto del Sol durante un mínimo solar, se encuentran mayormente en los polos y durante el máximo solar, en otras latitudes. Estas son las fuentes del viento solar rápido y se conectan con el campo interplanetario. Por otro lado, las regiones de campo cerradas, son la fuente del viento solar lento.



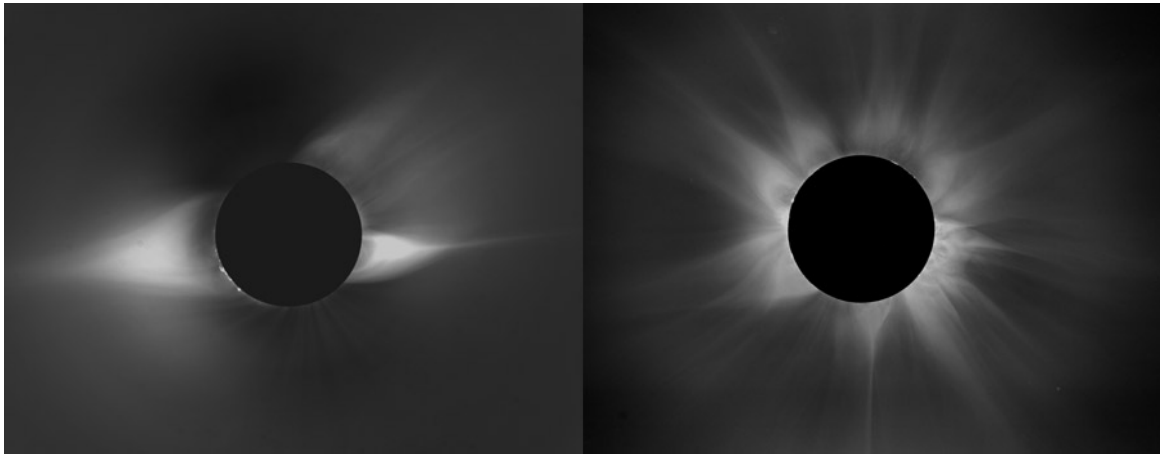


Figura 1.4: Izquierda: Corona en mínimo solar; Derecha: Corona en máximo solar [18].

### 1.3.5. Regiones de Interacción Corrotante

Debido a que los flujos mencionados ocurren de diferentes fuentes, están ligadas por diferentes líneas magnéticas y no se entrelazan (al menos que ocurra una reconexión magnética que en este caso, no es común) y cuando están viajando de manera radial, se pueden encontrar a cierta distancia, chocando y ocasionando regiones de interacción corrotante (RIC). Esto es la interacción de ambos flujos del VS en el plano ecuatorial, corrotando junto con el Sol (teniendo un patrón de 27 días) y formando regiones de compresión. Estas estructuras producen cambios en la dirección del flujo y regiones de mayor densidad y fuerza magnética en el viento solar. Las RIC están delimitadas por un choque frontal y un choque inverso y se muestra en la figura 1.5, donde las flechas indican la dirección del viento solar; la región de compresión está alineada con el campo magnético espiral y las fuerzas asociadas con los gradientes de presión tienen componentes transversales y radiales. Se muestra también la sección de rarefacción, la cual es producida al calentar el plasma y disminuir la densidad por la energía cinética del VS rápido.

Las RIC, junto con las eyecciones de masa coronal (que serán descritas más adelante), son, hasta ahora, las dos fuentes interplanetarias principales que causan disturbios geomagnéticos y es por eso su gran importancia. Las RIC son estructuras que producen regiones de densidades muy concentradas y campos magnéticos muy fuertes en el viento solar cercano al plano de la eclíptica. Las perturbaciones del viento solar conllevan a tormentas magnéticas y cuando hay un incremento en la velocidad del plasma junto con la componente sur del campo magnético [1], los efectos de perturbación son mayores en el geoespacio. Por lo tanto, la característica más importante de las RIC es el campo magnético intenso, el cual puede llegar hasta los 30 nT, cuando el promedio es entre 10-15 nT [5]. Las perturbaciones son de menor duración e intermitentes, pero sí permiten la inyección de partículas hacia la magnetósfera.

## 1.4. Actividad Solar

El Sol está emitiendo energía constantemente, teniendo liberaciones de  $3.9 \times 10^{33}$  erg/s [6]. Sin embargo, no toda es descargada de la misma manera. Las emisiones consisten en las siguientes formas:

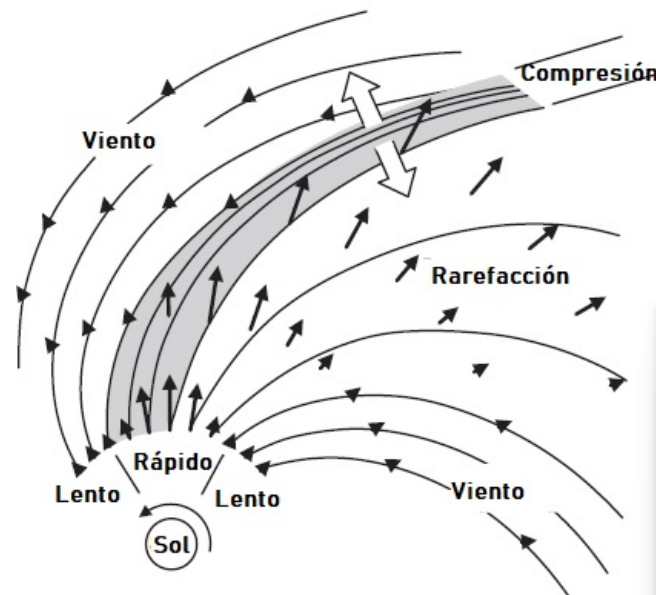


Figura 1.5: Estructura de una RIC (Modificado de [2]).

- Radiación de cuerpo negro - equivalente a la luz solar
- Emisiones electromagnéticas - en forma de rayos X y radiación UV
- Emisión de partículas - conocidas como SEP por sus siglas en inglés (Solar Energetic Particles), varían en su energía, desde los 1 keV hasta 10 GeV. Las de baja energía incluyen el viento solar y las de alta energía son los rayos cósmicos solares.

El campo magnético es lo que controla la actividad solar y éste es generado por la convección y rotación diferencial de un dínamo en el interior del Sol. Su rotación no es de manera uniforme, ya que tiene un período de 25 días en el ecuador y 31 en los polos, como consecuencia de la anisotropía de la convección. Un dínamo es el proceso de convertir energía mecánica a electromagnética a través de la inducción, por ende, su teoría se basa principalmente en la ecuación de inducción ( $\frac{\delta B}{\delta t} = -\nabla \times E$ ), que se deriva de las ecuaciones de Faraday y Ohm. La generación de un campo magnético es autoconsistente y se da por el movimiento de un fluido conductor. El dínamo solar invierte la polaridad del Sol y regresa a su configuración original cada 22 años, a lo que se conoce como el ciclo magnético. Este proceso hace que las líneas de campo inicien con una configuración dipolar, pasen por un estrés magnético que circula meridionalmente a los polos para cambiar su orientación a un estado toroidal, para posteriormente regresar al estado dipolar en un mínimo solar. Como ya mencionado, las manchas solares son uno de los fenómenos magnéticos con un periodo de 22 años que incluye la inversión de polaridades cada 11 años y son el indicador de las fases del ciclo.

Las emisiones mencionadas pueden emerger de cualquier parte del Sol, sin embargo hay una preferencia de regiones donde son emitidas, llamadas regiones activas. Éstas son zonas de complejos de actividad y concentraciones magnéticas y es donde pueden salir las manchas solares, las eyecciones de masa coronal, fulguraciones, entre otros, mostrándose como un abrigamiento. Estas regiones tienden a ser bipolares, es decir, vienen en pares de polaridad opuesta. La apariencia de las regiones activas es a través de bucles filamentosos que son más calientes

y densos que la Corona como consecuencia del calentamiento del plasma en la Cromosfera, que transforma los flujos ascendentes en bucles coronales. La interacción constante del plasma y los campos magnéticos, crean diversas estructuras coronales, manifestadas en las regiones activas y es esta interacción la que causa perturbaciones en la actividad geomagnética cuando se interconectan con el campo terrestre. Los eventos más importantes para el Clima Espacial provienen de estas regiones mostradas en la figura 1.6, mismos que serán detallados más adelante y forman parte de los fenómenos eruptivos causados por desequilibrios magnéticos y por ende, reconexiones magnéticas.

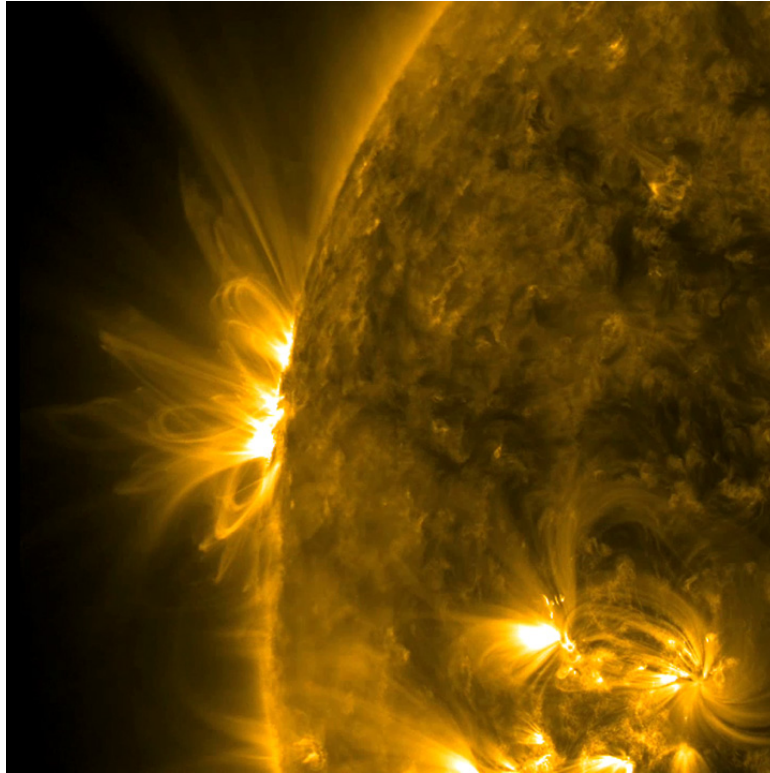


Figura 1.6: Regiones activas mostradas como bucles brillantes [19].

### 1.4.1. Fulguraciones

La reconexión magnética es un proceso muy importante para todos los fenómenos tratados en este escrito. De manera general, es un proceso donde líneas magnéticas son interrumpidas y buscan ajustarse y reestructurarse al reconectarse con polaridades opuestas. Este proceso libera mucha energía al convertir energía magnética en cinética y térmica, calentando el plasma y acelerando partículas. Es muy común que ocurra esto en la atmósfera del Sol, ya que el campo magnético se encuentra en un estrés constante por los procesos internos (dínamo, convección y rotacionales). La liberación puede ocurrir de manera apacible; sin embargo, es más común que se lleve a cabo por eventos violentos como fulguraciones y eyecciones de masa coronal.

Las fulguraciones son intensos abrigantamientos que son observables, ya que parte de su emisión es en el espectro visible. Los procesos de aceleración de partículas y reconexiones producen emisiones en todas las longitudes de onda, desde radio hasta las gamas. Esta sucesión de

liberación se asocia con la liberación de energía de la Corona, provocado por energía magnética no potencial y desencadenado por inestabilidades en la configuración magnética. Aparte de radiación electromagnética, también es liberada como calentamiento de plasma y es capaz de acelerar partículas a velocidades cercanas a las de la luz. Todas las fulguraciones tienen líneas de campo cerradas y se interceptan en dos puntos, donde la energía térmica y las partículas fluyen, mostrado en la figura 1.7. En términos generales, cuando hay inestabilidades en tubos magnéticos, éstos pueden doblarse y romperse, causando una erupción que conduce a una reconexión magnética. Esto produce un calentamiento en los lazos, resultando una aparición de bucles calientes en la superficie y de menor temperatura debajo de ellos.



Figura 1.7: Configuración de una fulguración (Modificada de [20]).

Las fases de una fulguración consisten en su etapa precursora, impulsiva/explosiva y gradual. La primera tiene una duración de 10 a 30 minutos y expulsa rayos X suaves y EUV. En la siguiente, la protuberancia explota más rápido, ya que dura de 10 a 1000 segundos y puede emitir rayos gamma, rayos X duros y microondas. Durante la última fase, la intensidad decreciente lentamente y puede durar horas y los lazos se separan.

La línea de emisión  $H\alpha$  está muy presente en las emisiones ópticas de las fulguraciones, por lo que sus clasificaciones se deben a esta aparición, basándose en su intensidad y área de brillo. En la tabla 1.2 se muestra esta clasificación, la cual es acompañada de un número base. Cabe mencionar que las fulguraciones solares son los únicos mecanismos que pueden producir reacciones nucleares en la atmósfera solar y generar neutrones solares.

Clasificación	Magnitud de flujo [W m <sup>-2</sup> ]
A	$10^{-8}$
B	$10^{-7}$
C	$10^{-6}$
M	$10^{-5}$
X	$10^{-4}$

Tabla 1.2: Clasificación de fulguraciones

### 1.4.2. Eyecciones de Masa Coronal

El viento solar es una manera en la que el Sol pierde masa. La segunda, es a través de las eyecciones de masa coronal (EMC), ya que son emisiones de burbujas de plasma magnetizado y pueden contener de  $10^{14} - 10^{16}$  g. También, similar al VS, las EMC pueden clasificarse por su velocidad, donde un rango de 400 - 600 km/s se atribuye a EMC graduales, relacionadas con erupciones y las que alcanzan más de más de 750 km/s son las rápidas, relacionadas a las fulguraciones [7]. Las eyecciones están vinculadas con las fulguraciones y a pesar de que muchas veces se observan ambas y se pensaba que siempre iban acompañadas, pueden ocurrir de manera independiente. Las EMC se consideran la evolución más dramática de la Corona solar y toma un papel importante para la evolución de su estructura y es una de las maneras en las que la atmósfera solar se re-configura como respuesta a los cambios magnéticos. En la figura 1.8 se muestra una EMC que sí fue resultante de una fulguración de clasificación X, observada por el telescopio SOHO.

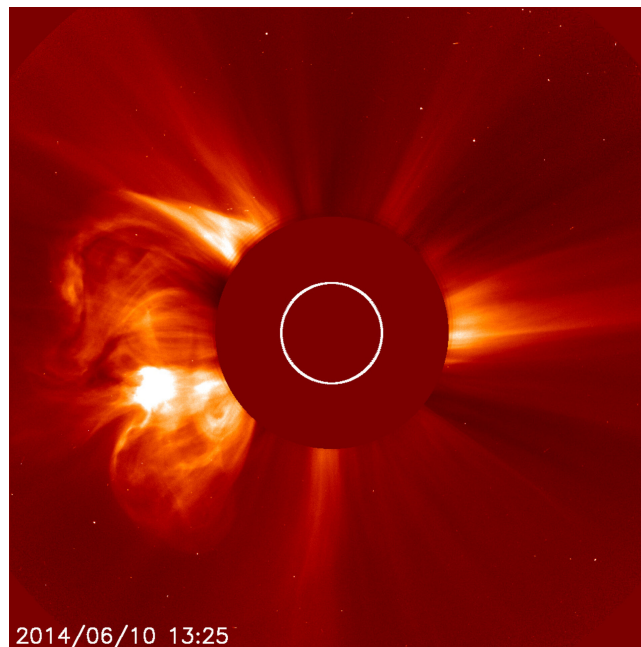


Figura 1.8: EMC en lado izquierdo, observada con el instrumento LASCO a bordo de SOHO [21].

El origen de las EMC es en regiones de campo cerradas, donde el campo magnético es lo suficientemente fuerte como para restringir al plasma de expandirse en forma de VS. En un

mínimo solar, las eyecciones salen cerca del ecuador y en un máximo, tienen un rango latitudinal mucho más amplio. Como ya se mencionó, el estrés magnético es la causa del evento. En promedio, el Sol emite 3.5 EMC/día en un máximo solar y 1 EMC cada 10 días en un mínimo de actividad [2]. Su geometría tiene una variedad de formas topológicas desde esféricas hasta flujos helicoidales y conforme se van propagando, pueden expandir su tamaño. Los estudios de su propagación contienen mucha información del espacio interplanetario, viento solar, choques interplanetarios, partículas energéticas solares, etc., lo cual las hace muy relevantes para el estudio general del clima espacial.

Lo más relevante de las eyecciones para este trabajo, es su gran influencia en la perturbación geomagnética. Al ser tan masivas, cuando se propagan con dirección a la Tierra y tienen una componente ( $B_z$ ) negativo, provocan tormentas geomagnéticas y eventos de clima espacial en general. Debido a la curvatura de la espiral de Parker del campo interplanetario, si la EMC está dirigida hacia la Tierra, ésta puede envolver la magnetósfera terrestre y causar disturbios por contener flujos magnéticos solares y así, perturbar el estado tranquilo del campo geomagnético y generar las tormentas. Éstas últimas, que serán descritas más adelante, pueden causar interrupciones en comunicaciones y redes de navegación, así como fallas satelitales y en sistemas eléctricos.

Las EMC pueden generar choques en la Corona y éstos aceleran partículas. El efecto producido al barrer el campo geomagnético, va a permitir la entrada de estas partículas. Lo mismo sucede con la penetración de los rayos cósmicos. Por lo tanto, los eventos de partículas energéticas registrados a nivel de tierra se producen a causa de las fulguraciones y/o las eyecciones de masa coronal. En la siguiente sección se describirán estas partículas energéticas.

# Capítulo 2

## Rayos C3smicos

Los rayos c3smicos (RC) son part3culas cargadas muy energ3ticas, principalmente n3cleos de 3tomos completamente ionizados. Predominan en un 90 % los protones, al ser el hidr3geno el elemento m3s abundante; seguido por los n3cleos de helio, conocidos como part3culas  $\alpha$  y los dem3s elementos conforman el 1 %, recalcando que la fracci3n de n3cleos pesados es mayor con el incremento de energ3a. Dependiendo de la energ3a que tengan las part3culas, se intuye su origen y clasificaci3n: ya sean solares, gal3cticos, extragal3cticos y an3malos. Entre los mecanismos de aceleraci3n de estas part3culas est3n la aceleraci3n de Fermi que sucede en el Sol, otras estrellas, supernovas y sus remanentes, estrellas de neutrones, hoyos negros y en n3cleos de galaxias. Estas part3culas son capaces de viajar por todo el medio interestelar, interactuando con la materia y campos magn3ticos que se encuentran en su camino; as3 es c3mo estas part3culas, que pueden generarse dentro o fuera de nuestra galaxia, llegan a la heli3sfera.

### 2.1. Espectro de Energ3a

La unidad utilizada para definir la energ3a de estas part3culas es el electronvoltio, eV. Se define como la energ3a adquirida por un electr3n al ser acelerado por un campo el3ctrico de un voltio. En t3rminos matem3ticos, 1 eV es igual a la carga elemental de un electr3n ( $1.602 \times 10^{-19}$  Coulombs), multiplicada por la diferencia de potencial el3ctrico de un voltio. Esto da como resultado una energ3a de  $1.602 \times 10^{-19}$  Joules. Por lo tanto, el eV es una unidad 3til para medir peque 3as cantidades de energ3a, especialmente en el contexto de la f3sica de part3culas y la energ3a at3mica y puede ir desde los keV ( $10^3$  eV), MeV ( $10^6$  eV), GeV ( $10^9$  eV) hasta TeV ( $10^{12}$  eV).

Debido a que la energ3a de las part3culas ofrece mucha informaci3n de los procesos astrof3sicos, se cre3 el espectro energ3tico de rayos c3smicos que permite observar el flujo de part3culas que pasan a trav3s de una unidad de 3rea de superficie en una unidad de tiempo, desde un 3ngulo de espacio unitario por unidad de energ3a que es aproximado por la ecuaci3n de potencias siguiente:

$$\frac{dN}{dE} = E^{-\gamma} \quad (2.1)$$

donde  $\gamma$ : 3ndice espectral que var3a respecto a la energ3a, N: flujo, E: energ3a

En la figura 2.1 se muestra el espectro diferencial y la energía de los rayos cósmicos. Con energías menores a  $10^6 eV$ , las partículas son sujetas a la modulación solar, que será descrita más adelante, y no se ajustan a la ley exponencial y se tratan de los RC solares por su alto flujo y bajas energías. A partir de  $10^9 eV$  hasta  $10^{15} eV$ , el valor de  $\gamma = 2.7$  y corresponde a los rayos cósmicos galácticos. Conforme disminuye el flujo, el espectro es más inclinado y se llega a la parte que se conoce como “rodilla”, teniendo un  $\gamma = 3.1$ , correspondiente a los RC extragalácticos. El espectro se empieza a aplanar a partir de  $10^{20} eV$  y a esta parte se le llama “Tobillo”, tiene una  $\gamma = 3.3$ , que se ajusta a las partículas de muy altas energías.

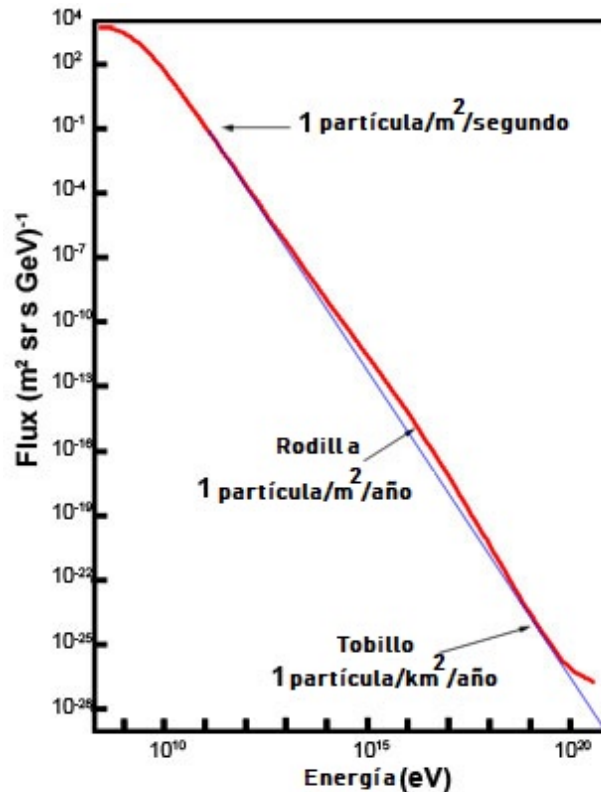


Figura 2.1: Espectro de energía de los rayos cósmicos (Modificada de [22]).

## 2.2. Clasificación

Mencionamos que los RC se producen en eventos astrofísicos violentos, como supernovas y explosiones de rayos gamma, donde se liberan enormes cantidades de energía. Sin embargo, en los años 40's se descubrieron los Rayos Cósmicos Solares, los cuales se originan en las explosiones del Sol, acelerados por las fulguraciones y eyecciones de masa coronal. La energía para los protones puede ir de 1 keV hasta 10 GeV. Los más energéticos son capaces de ingresar a la atmósfera y provocar una cascada de partículas descrita más adelante. A estas partículas que pueden detectarse a nivel de superficie también se les conoce como SEP (por sus siglas en inglés para Solar Energetic Particles).



Los rayos cósmicos galácticos (RCG) son partículas que se originan fuera de nuestro Sistema Solar, ya que dentro de éste, no existen fenómenos que puedan acelerar partículas más allá de los  $10^{10}$  eV. Estos RC están compuestos principalmente de protones y núcleos atómicos, aunque también pueden contener electrones, positrones y otros tipos de partículas. Se aceleran a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y viajan a través del espacio interestelar hasta llegar a la Tierra. Una vez en la heliósfera, su interacción con campos magnéticos y plasmas modifica tanto su energía, como su trayectoria. Un 20 % es capaz de atravesar la heliopausa; un 60 % son neutralizados por el viento solar y únicamente el 10 % logran penetrar, pero pueden ser bloqueados de los planetas por sus campos magnéticos y/o atmósferas.

Los Rayos Cósmicos Extragalácticos o de ultra alta energía que van más allá de los  $10^{18}$  eV, es decir, sobrepasa la parte del tobillo del espectro energético, donde sólo se detecta 1 partícula/ $km^2/año$ , por lo que se requieren detectores muy amplios para poder registrarlos y la tasa de detección cambia a 1 partícula/ $km^2/siglo$ . Los fenómenos potenciales para su aceleración se encuentran en pulsares, explosiones de rayos gamma y galaxias con núcleos activos.

Por último, los Rayos Cósmicos Anómalos son aquellos que tienen bajas energías (1-50 MeV/nucleón) y son partículas ionizadas una sola vez. Se cree que son partículas neutras interestelares que ingresan a la heliósfera para ser ionizadas por los rayos UV y posteriormente aceleradas.

### 2.3. Cascadas de Partículas

Cuando se utilizan detectores a nivel del suelo, como es el Telescopio de Neutrones Solares, es muy importante tomar en cuenta la profundidad atmosférica y su composición, ya que los rayos cósmicos, al entrar en el dominio de la Tierra, van a interactuar con nuevas moléculas. A pesar de que los detectores en superficie pueden tener una área efectiva más amplia que los satelitales y una mejor sensibilidad, no pueden obtener la composición química de los RC de manera puntual a causa de sus interacciones con la atmósfera. Cuando las partículas energéticas ingresan al tope de la atmósfera, se les consideran como RC primarios y una vez que interactúan con los núcleos presentes, principalmente nitrógeno y oxígeno, se les conoce como RC secundarios, ya que cambian su estado y características; y son éstas las que pueden ser detectadas. La interacción de los rayos cósmicos primarios produce tres tipos de fenómenos:

- Ionización - RC despojan de sus electrones de manera total o parcial a las moléculas atmosféricas
- Excitación - hay transferencia de momento de los RC a núcleos de átomos atmosféricos, excitándolos y provocando una emisión de longitud de onda específica como consecuencia de los estados de los electrones (que produce las auroras boreales y australes)
- Chubascos - hay rompimiento de átomos por parte de los RC, generando tres componentes: hadrónica, electromagnética y muónica

La cantidad de materia que puede atravesar un RC se conoce como profundidad atmosférica y es fundamental para la detección de partículas. Esta profundidad está descrita por la siguiente ecuación y es medida en  $g/cm^2$

$$X = X_0 e^{\frac{-h}{h_0}} \quad (2.2)$$

donde  $X$  es la profundidad atmosférica,  $X_0$  es la profundidad atmosférica a nivel del mar,  $h$  el nivel de observación y  $h_0$  es la altura de la atmósfera.

También conocidas como cascadas atmosféricas, los chubascos fueron estudiados por Bruno Rossi y Pierre Auger, quienes fueron los primeros en detectar energías de  $10^{15}$  eV, la cual es la energía mínima para poder registrar de manera indirecta los RC a través de los chubascos que provocan las partículas secundarias en la atmósfera terrestre. Una vez teniendo esta información, se pueden reconstruir las propiedades de las partículas primarias: de qué dirección vienen, cuál fue su mecanismo de aceleración, posible origen, etc. Dependiendo de la energía de la partícula primaria, pueden ocurrir diferentes procesos, tanto de absorción como de dispersión elástica o inelástica. En esta última, una parte de la energía del RC incidente se absorbe por el núcleo, excitándolo, para después generar una emisión. Una vez que un rayo cósmico primario produce una cascada o chubasco atmosférico, se producen tres componentes: la componente hadrónica, la dura o muónica y la blanda o electromagnética; y el mecanismo que predomina depende también de la energía inicial.

### 2.3.1. Componente Muónica

Las partículas resultantes por una colisión inelástica comienzan con los piones: componente de la clasificación de mesones, que es la más frecuente de crearse entre el choque instantáneo, junto con una cantidad menor de kaones. Los kaones también son una clase de mesones, son muy inestables y tienen una vida media corta (aproximadamente  $10^{-10}$  s). Se desintegran en otras partículas más ligeras a través de la interacción débil para producir piones, muones, electrones y/o neutrinos, entre otras partículas. Estas partículas son de menor energía que la partícula primaria, ya que parte de la energía es transferida a la fragmentación nuclear y la otra a los piones y kaones. Los piones cargados tienen un tiempo de vida de  $2.6 \times 10^{-8}$  segundos, lo que les da más tiempo para interactuar con moléculas circundantes antes de decaer por completo. En estas reacciones, más piones son creados hasta que llegan a un nivel energético lo suficientemente bajo que los hace decaer a muones y neutrinos, generando así la componente muónica:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

$$\pi^{+} \rightarrow \mu + \nu\mu$$

$$\pi^{-} \rightarrow \mu - \nu^{-}\mu$$

Los muones son las partículas secundarias más abundantes a nivel del mar (que incluso pueden penetrar la Tierra si su energía lo permite) y tienen una vida media de  $2.2 \times 10^{-6}$  segundos, para posteriormente decaer también en electrones y positrones:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_{\mu} + \nu_e$$

### 2.3.2. Componente Hadrónica/Nucleónica

La componente hadrónica está compuesta por fragmentos nucleares que incluyen a los protones, neutrones y partículas más ligeras como los piones cargados y kaones. Los mesones secundarios interactúan entre sí para formar las siguientes generaciones de cascadas hadrónicas. La mayor parte de las partículas secundarias producidas se propagan en la misma dirección que

la primaria, hasta que sus reacciones provocan una expansión y dispersión en forma de cascada. La componente hadrónica es la parte del chubasco de partículas que se registra por la mayoría de los detectores a nivel de tierra, como el telescopio de neutrones solares (TNS).

### 2.3.3. Componente Electromagnética

Existen los piones cargados y los neutros, donde estos últimos son muy inestables, por lo que decaen inmediatamente ( $8.4 \times 10^{-17} s$ ) en un par de fotones (gamma), mismos que producen un par de electrón-positrón ( $e^-, e^+$ ) al interactuar con una carga eléctrica, convirtiéndose así en la fuente dominante de la componente electromagnética (EM) y la más intensa del chubasco por sus procesos multiplicativos (producción de pares y bremsstrahlung). Este proceso se repite hasta que la energía que tenga el fotón sea menor a la energía de reposo del par  $e^- - e^+$  (por lo menos 1022 keV).

En la figura 2.2 se muestran estas tres interacciones y sus productos.

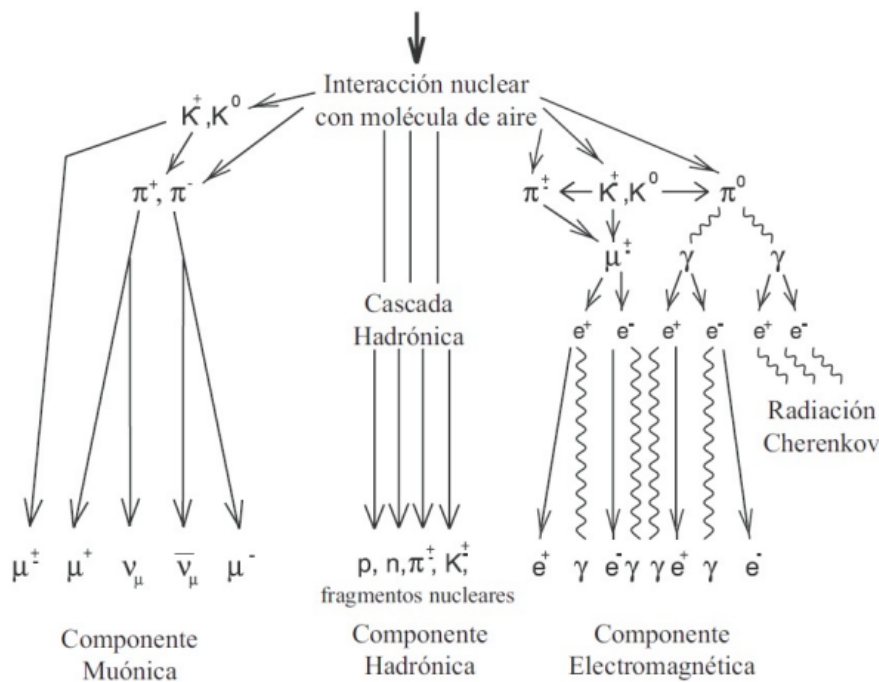


Figura 2.2: Chubasco atmosférico formado por la interacción de un RC primario con la atmósfera terrestre [23].

## 2.4. Modulación Solar

El campo magnético terrestre, la atmósfera y en general la heliosfera, nos protegen de los constantes bombardeos de los rayos cósmicos. De no ser así, la penetración de partículas sería mucho mayor. Las variaciones de los RC entonces están en función de la heliosfera y las condiciones de ésta son dirigidas principalmente por el Sol. A este conjunto de variabilidades se le conoce como Modulación Solar, ya que la influencia del Sol define las características

de los comportamientos de las partículas, y sus ciclos de alta y baja actividad condicionan estas dinámicas. En la figura 2.3 se muestra de manera gráfica la correlación inversa que se ha determinado entre la actividad solar (representada por la cantidad de manchas solares) y el flujo de RCG. En las gráficas se puede apreciar cómo, cuando hay un mínimo solar, hay un

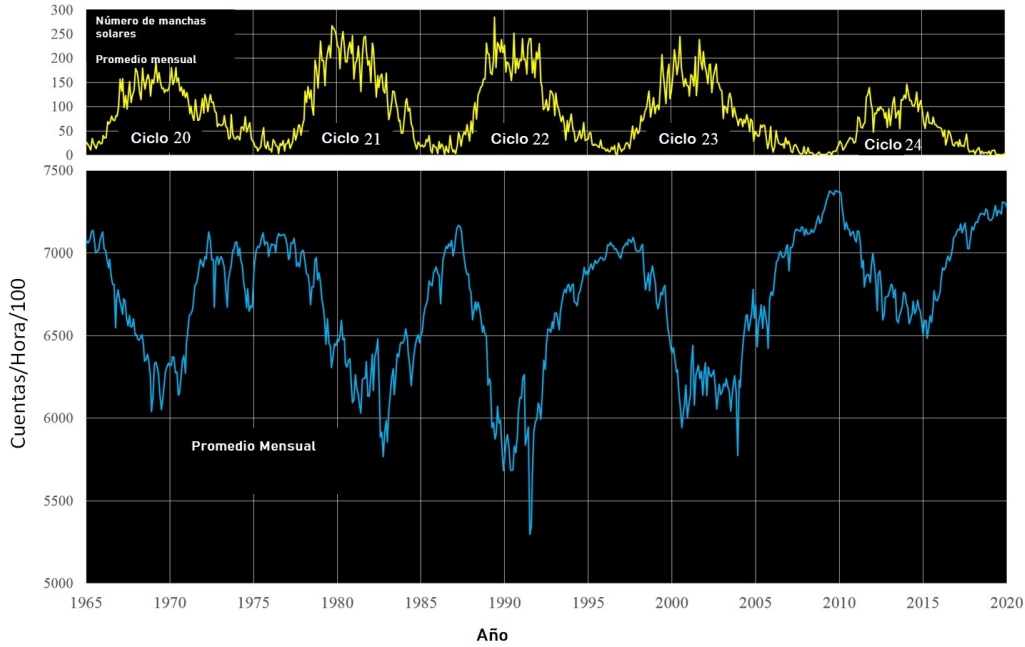


Figura 2.3: Gráfica superior: Número de manchas solares de cada ciclo, indicando su actividad [24]. Gráfica inferior: Cuentas de partículas de un detector de neutrones en Canadá [25].

máximo en los conteos de los RCG. Por lo tanto, entre mayores sean las emisiones solares, la intensidad del flujo de partículas será menor; esto porque las partículas giran y se propagan en torno a las líneas del campo magnético *congelado* en el plasma, por lo que las líneas son capaces de arrastrar a las partículas hacia los límites de la heliosfera, alejándolos y dando lugar a una disminución en la densidad. Existe la posibilidad que debido a muy altas energías (cientos de GeV), la modulación solar sea despreciable para ciertos RC. La modulación se debe a diferentes mecanismos físicos que son capaces de modificar el espectro de energía de los RC; estos son: convección, difusión, desaceleración adiabática y derivas. Estos procesos son gobernados por la ecuación de transporte de Parker [8] y se basa en la asunción que los RC son isotrópicos. La siguiente ecuación es la utilizada para describir de manera general el modelo de transporte de los RC en la Heliosfera:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(v_{sw} + \langle v_d \rangle) \cdot \vec{\nabla} f + \vec{\nabla} (K_s \cdot \vec{\nabla} f) + \frac{1}{3} (\vec{\nabla} \cdot v_{sw}) \frac{\partial f}{\partial \ln p} \quad (2.3)$$

donde la función  $f(r, p, t)$  es la distribución omnidireccional de los rayos cósmicos;  $r$  es la posición espacial en sistemas de coordenadas esféricas para la heliósfera ( $r, \theta, \phi$ );  $p$  es el momento de la partícula;  $t$  el tiempo;  $v_{sw}$  la velocidad del viento solar por sus siglas en inglés;  $v_d$  es la velocidad de deriva promedio del ángulo de inclinación y  $K_s$  es el tensor de difusión (que tiene 3 componentes: un paralelo, dos perpendiculares radiales y uno polar).

Es decir, el término  $v_{sw}$  describe la convección,  $\langle v_d \rangle$  la deriva,  $\vec{\nabla} (K_s \cdot \vec{\nabla} f)$  la difusión y el último

término,  $\frac{1}{3}(\vec{\nabla} \cdot v_{sw}) \frac{\partial f}{\partial lnp}$ , los cambios de la energía adiabática.

En los años 70's, con la ayuda del desarrollo de modelos numéricos, se pudo tener un progreso en el significado de la teoría de transporte [9]. Como ya vimos, el Sol tiene un ciclo de 11 años. Cuando se encuentra en su mínimo los RCG tienen un mayor acceso a la Tierra, por lo que se puede decir que los RC también siguen este ciclo, pero de manera inversa.

Con esta información se puede establecer que tanto las líneas magnéticas solares como las terrestres del campo geomagnético contribuyen al Clima Espacial al modular la precipitación de las partículas energéticas hacia la atmósfera terrestre. Cuando hay una perturbación en el campo geomagnético, que será descrito más adelante en la sección de Tormentas Geomagnéticas, la intensidad puede disminuir, permitiendo la entrada de partículas energéticas. A pesar de que los RC y sus variaciones están en función de las perturbaciones del medio interplanetario, mismas que son definidas por la actividad solar, es fundamental para nosotros conocer cuándo estas afectaciones van a alterar también al campo geomagnético.

Con la información de los detectores del flujo de los RC, se han deducido patrones a partir de sus observaciones. Desde reconocer que hay mayor flujo en latitudes más altas, hasta observar que se presentaba una disminución considerable en el flujo. Esto último fue reconocido primero por Forbush en 1930, para después ser estudiado y confirmado por Simpson et al. en 1953 [10]. Su equipo desarrolló un monitor de neutrones para detectar la componente hadrónica de los rayos cósmicos de baja energía. A este decremento de más del 6% le llamaron Decrecimiento Forbush. Este fenómeno tiene lugar cuando hay un decrecimiento rápido en la detección del flujo de RCG y ocurre después de una EMC o una RIC que impactan el ambiente terrestre, por lo tanto está relacionado a los efectos de la actividad solar. Es una consecuencia del arrastre del campo magnético del plasma hacia los RC, impidiendo su acercamiento a la Tierra. Con el tiempo, se ha confirmado que los decrecimientos Forbush tienen periodos más largos (generalmente dura algunos días) cuando hay mayor actividad solar y es mayor para la radiación primaria de menor energía. Los detectores de la componente hadrónica como el TNS, son muy útiles para estas detecciones, por lo que son parte de los resultados del análisis que será descrito.

Podemos saber entonces que la modulación solar, orienta a las partículas energéticas en su traslado dentro del Sistema Solar y su llegada a nuestro planeta. Para los RC, se puede hacer una división de las modulaciones según la escala de tiempo de variación:

- 11 años: Ciclo solar
- 27 días: Patrón de rotación del Sol
- Diurno: Surge de las observaciones realizadas desde el marco de referencia de la Tierra y representa una deriva neta de los RC y se produce por la rotación en conjunto con el Sol. Esta variación muestra un máximo del flujo de rayos cósmicos entre las 15 y 18 hrs TL en cualquier posición geográfica donde se encuentre instalado un detector.
- Tipo Forbush: Disminuciones del flujo de rayos cósmicos que puede durar días.

El proceso de modulación de rayos cósmicos en sí mismo es un fenómeno complicado que involucra al Clima Espacial y mecanismos de aceleración. Sus variaciones pueden utilizarse para medir las perturbaciones del medio interplanetario y poder atribuir los procesos del Sol.

Los RC Solares, que tienen una energía de 150 MeV - 10 GeV tienen la energía suficiente para producir chubascos de partículas capaces de penetrar la atmósfera y así, ser detectados a nivel de Tierra.

## 2.5. Rigidez Umbral

Como ya se comentó, la magnetósfera planetaria funciona como una barrera de protección hacia las partículas energéticas y sólo algunas son capaces de penetrar el dominio terrestre. El campo geomagnético es lo que impide el ingreso de esta radiación, que depende también de la energía de las partículas, por lo tanto, hay una energía mínima que requiere una partícula para alcanzar a penetrar. Esto se conoce como rigidez umbral y es diferente para cada punto geográfico, ya que depende del estado de las líneas geomagnéticas, mismas que asemejan a un dipolo. Es un parámetro que mide cuantitativamente el efecto de protección del campo magnético de la Tierra sobre las partículas energéticas y debido a que las líneas pueden ser modificadas, la rigidez es variable y se puede definir con la siguiente ecuación

$$R = \frac{mvc}{q} \quad (2.4)$$

donde m: masa, v: velocidad de la partícula, c: velocidad de la luz y q la carg de la partícula.

Es necesario adentrarse en la física involucrada para poder comprender la variación de la rigidez. Al tratarse de partículas cargadas, es imprescindible que interactúen con campos magnéticos y su trayectoria es descrita por la fuerza de Lorentz. Esta fuerza ejerce una fuerza de deflexión perpendicular a la velocidad de las partículas y a las líneas de campo. Como resultado, las partículas se mueven en espiral alrededor de las líneas de campo con movimientos de deriva antes de llegar a la Tierra (o cualquier planeta con campo magnético). Por lo tanto, la fuerza que tenga el campo magnético influirá en las fuerzas aplicadas a la partícula y en su rigidez mostrada en la ecuación anterior. Entre menor sea la rigidez de una partícula (proporcional a su masa y velocidad), mayor será la desviación por un campo magnético, o sea que la partícula no podría penetrar un campo magnético perpendicular. La siguiente ecuación de Störmer muestra la rigidez mínima requerida para que una partícula pueda penetrar el campo geomagnético

$$R_c = \frac{M}{4r_E^2} \times \cos^4(\lambda) \quad (2.5)$$

donde M: momento dipolar,  $r_E$ : radio de la Tierra,  $\lambda$ : latitud geomagnética.

Debido que la rigidez depende de la latitud geomagnética y que las líneas magnéticas de nuestro planeta asemejan a un dipolo, en los polos geomagnéticos se tiene una nula componente paralela, por lo que será más fácil que partículas con menor energía, penetren. De manera análoga, en el ecuador geomagnético se tienen líneas de campo paralelas a la superficie, por lo que será más difícil para una partícula penetrar. Dicho esto, en la figura 2.4 se muestran los valores de la rigidez umbral del mapa global, la cual va incrementando conforme se acerca al ecuador. Para México, que es de nuestro principal interés, la rigidez umbral es de 8.2 GV, en contraste a Finlandia, que es de 0.8 GV. Con estos datos, podemos intuir que México se encuentra más protegido ante las partículas energéticas por su localización.

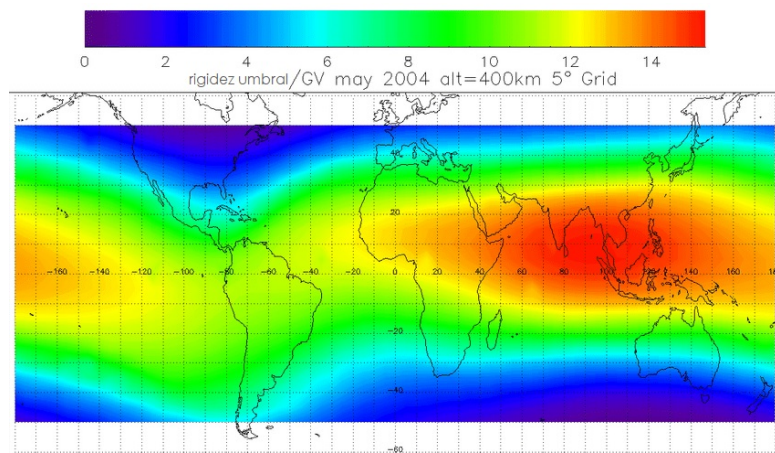


Figura 2.4: Rigidez umbral geomagnético vertical efectivo a una altitud de 400 km. (Modificado de [26]).

Cuando hay periodos de intensa actividad magnetosférica, como lo puede ser una tormenta geomagnética, el campo magnético se ve afectado, sufriendo compresiones o estiramientos y esto resulta en una disminución de su efectividad como barrera hacia las partículas energéticas, por lo tanto es importante estudiar los fenómenos que ocurren con la rigidez en estas etapas de estrés. Cuando la protección geomagnética disminuye causa de un fenómeno, las partículas pueden penetrar más fácilmente, ya que la rigidez umbral disminuye. En el siguiente capítulo se detallará el fenómeno principal que puede alterar la rigidez: las tormentas geomagnéticas.

## Capítulo 3

# Tormentas Geomagnéticas

Ya se ha mencionado más de una vez este fenómeno muy característico de la interacción Sol-Tierra y en este capítulo vamos a profundizar en sus propiedades. Detectadas por primera vez en los años 1800's por Alexander von Humboldt, podemos definir a una tormenta geomagnética (TG) como una alteración prolongada del campo geomagnético, producto de eventos explosivos del Sol que se direccionan hacia la Tierra. Las EMC son las principales causantes de las TG más intensas, aunque también las RIC pueden causarlas.

Una TG tiene una duración desde horas hasta días, dependiendo del fenómeno que la causó y su intensidad. La tormenta consta de tres fases: inicial, principal y de recuperación. La primera es cuando hay un incremento marcado en la medición magnética, para después tener una disminución, donde es la fase principal. Por último, se va recuperando al estado quieto, incrementando la intensidad magnética. Lo anterior se puede visualizar en la siguiente gráfica de la figura 3.1.

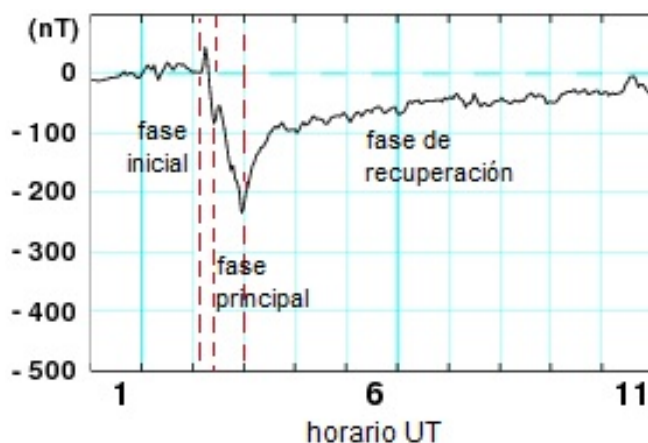


Figura 3.1: Gráfica del índice Dst. En el eje Y se muestran los nanoteslas (nT) y en el eje X la hora UT. La gráfica comienza en valores de 0, tiene un incremento súbito, posteriormente una caída y termina recuperándose de vuelta al valor inicial.

El geoespacio se compone de la magnetosfera (región dominada por el campo magnético del planeta, en este caso, la Tierra) y su estructura depende de la interacción con el viento solar. Dentro de la magnetosfera se encuentran poblaciones de partículas como los cinturones



de radiación (Van Allen), corrientes de anillo y la ionosfera. Estas zonas son modificadas por el cambio en las condiciones interplanetarias; por lo tanto, cuando sucede una tormenta geomagnética, conllevan a incrementos, pérdidas y redistribuciones en las corrientes eléctricas de la ionósfera y magnetósfera, cambios en el flujo de electrones en el cinturón de Van Allen y aumentos en la densidad de la alta atmósfera terrestre [11]. La unión del viento solar con la magnetósfera se incrementa cuando el campo interplanetario tiene dirección sur, ya que pueden ocurrir reconexiones magnéticas con las líneas de campo dipolares de la Tierra en el lado día.

Cuando una EMC arriba al geoespacio, ocurre una compresión de la magnetosfera de lado día y una extensión del lado opuesto, como se ilustra en la figura 3.2. Esto produce la configuración de la esfera, compuesta por un arco de choque, magnetopausa, magnetocola y una envoltura magnética.

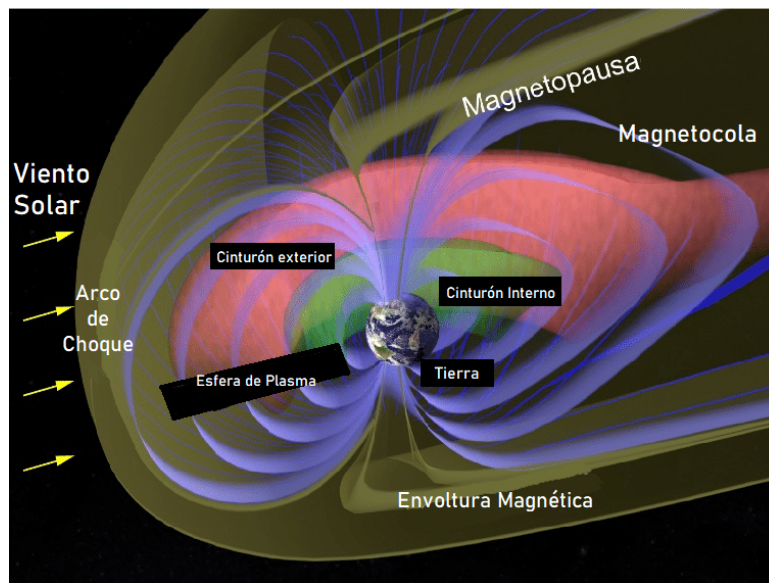


Figura 3.2: Configuración de la magnetosfera resultado de la interacción del viento solar y el campo geomagnético (Modificada de [27]).

Estas compresiones son asociadas con incrementos en la energía de las partículas de los cinturones de radiación, ocasionando disminuciones en los efectos o intensidad del campo geomagnético. Estos tipos de intercambio (y más que no serán descritos) generan transferencias de energía y un ejemplo evidente que tenemos son las auroras, ya que cuando las partículas cargadas se mueven a lo largo de las líneas de campo magnético, son aceleradas y pueden alcanzar la alta atmósfera. En esta zona chocan con las moléculas de los gases, ionizándolos y excitándolos y cuando regresan a su estado base, emiten luz en longitudes de onda que podemos observar en las auroras.

### 3.1. Índices Geomagnéticos

Para poder tener una mejor noción, registro y análisis de las tormentas, se crearon índices que miden y cuantifican su intensidad. Se calculan en la superficie de la Tierra y son la medida del nivel de alteración del clima espacial. Existen diversos índices y cada uno se especifica en

una respuesta de una zona geográfica en particular y dependen de la estación en donde es calculada. Se utilizan tanto para parametrizar modelos empíricos (por ejemplo, de la ionosfera de la zona auroral), como para mantener un registro histórico continuo a largo plazo del clima espacial en forma concisa. Los índices son los siguientes:

- Kp: Indicador de la magnitud de las tormentas geomagnéticas, cuantificando en promedio las perturbaciones detectadas en magnetómetros encontrados en observatorios en latitudes norte y sur. Utiliza una escala llamada G, la cual describe si podría haber trastornos en sistemas terrestres. Algunas corrientes producidas en la magnetosfera siguen el campo magnético y se llaman corrientes alineadas con el campo. Éstas se conectan a corrientes intensas en la ionosfera auroral, conocidas como electrochorros aurales y también producen grandes perturbaciones magnéticas. En conjunto, estas corrientes y las desviaciones magnéticas que producen en el suelo se utilizan para generar este índice.
- Ap: Tiene el mismo funcionamiento que el Kp, pero tiene un registro de 24 horas asociado a la tormenta y proporciona una medida de perturbación máxima para identificar las principales tormentas geomagnéticas, organizadas de mayor a menor amplitud y de manera cronológica.
- AE: Mide las modificaciones del campo magnético a nivel de suelo por las corrientes de los electrochorros aurales (he ahí su nombre, AE-Auroral Electrojet). Mide las corrientes ionosféricas de la zona auroral en monitores a altas y medias latitudes.
- AO: Los índices AE y AO miden la actividad global de electrochorros en la zona auroral. Con ayuda de los observatorios en esta zona, se hacen diferentes medidas de las intensidades de las corrientes fuertes y el índice AE representa la actividad general de los electrojets; mientras que el índice AO representa la medida de la corriente zonal equivalente.
- Dst: Por su siglas en inglés, Disturbance Storm Time, se deriva de 4 observatorios geomagnéticos, ubicados en latitudes cercanas al ecuador (entre 20° y 30°). Éstos miden la intensidad magnética de las corrientes de la magnetósfera, que se generan por la deriva de las partículas cargadas del campo geomagnético. Las variaciones de los anillos de corriente son monitoreadas y éstas son proporcionales a la energía cinética de las partículas de esta zona. La resolución temporal es por hora y se hace un promedio de la desviación de la componente horizontal magnética, H. La componente H del campo geomagnético tiene diferentes fases y cuando se encuentra una gran perturbación magnética, éste es disminuido en todo el período hasta que se recupera a un nivel promedio. De manera numérica, entre menor sea el número Dst, indica una mayor alteración, ergo una tormenta geomagnética más intensa. Un incremento muy rápido del Dst es un indicador de que el anillo de corriente está creciendo y que una tormenta magnética está en proceso y por eso podemos ver este incremento en la fase inicial, mostrado en la figura 4.1. Por su ubicación, es el índice más utilizado para México, por lo tanto es la base que se usa para este trabajo.

## Capítulo 4

# Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra

El telescopio de neutrones solares de Sierra Negra (TNS-SN) es un observatorio que forma parte de una red de telescopios de neutrones a nivel global, colocados cada uno estratégicamente para un mejor funcionamiento y recopilación de datos. El de México, fue instalado en el 2003 con la colaboración del STELab de la Universidad de Nagoya, Japón y el Instituto de Geofísica de la UNAM y comenzó a operar en julio del 2004. Está ubicado en la cima de Sierra Negra, Puebla, localizado a 4580 msnm, mismo que ofrece características específicas para su desempeño, como lo es la profundidad atmosférica. Sus coordenadas son 19°N y 97.3° O y en la figura 4.1 se puede ver un mapa con la ubicación de este tipo de telescopios, todos a latitudes medias. Para poder detectar neutrones asociados a las fulguraciones solares, es recomendado hacerlo lo más cercano al ecuador, ya que la exposición al Sol es más constante a lo largo de las estaciones del año y también porque la rigidez umbral es mayor que en los polos, eliminando la posible influencia o contaminación de protones emitidos en los mismos eventos. El TNS forma

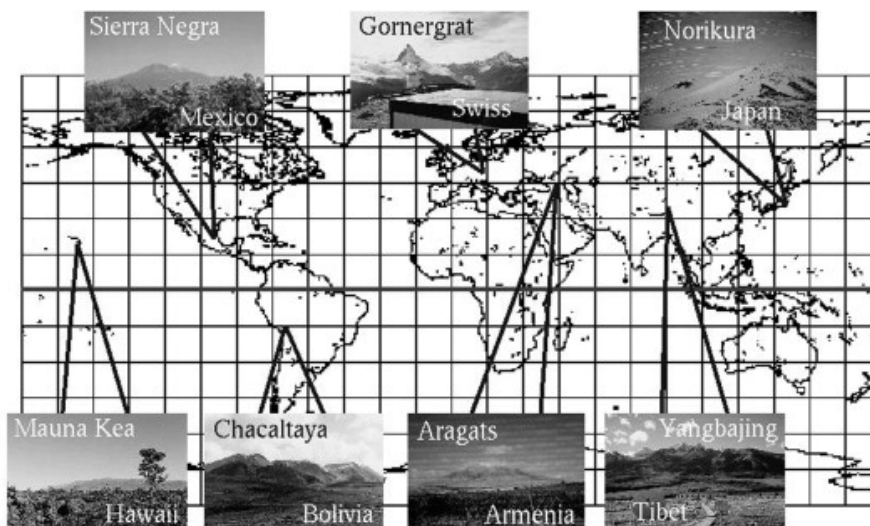


Figura 4.1: Ubicación de los telescopios de neutrones solares [23]

parte del Observatorio de Rayos Cósmicos de Sierra Negra (ORC-SN), que también incluye un monitor de campos eléctricos atmosféricos, una estación meteorológica de gran altura y

el telescopio centellador de RC. El objetivo del TNS-SN es la detección de neutrones solares y del fondo de rayos cósmicos galácticos; es capaz de detectar partículas neutras y cargadas y mediante un sistema de anti-coincidencias electrónicas, puede diferenciar las señales emitidas.

Está construido con cuatro plásticos centelladores (PC) de poliestireno ( $C_8H_8$ ). Gracias a este material, se producen las reacciones necesarias para poder discernir entre las partículas detectadas: Cuando un neutrón interactúa con el hidrógeno y el carbono, se producen protones. Éstos protones tienen una energía proporcional a la del neutrón incidente que ioniza PC y emite un fotón que posteriormente es detectado por los fotomultiplicadores. Cabe mencionar que la energía del fotón es proporcional a la energía cinética del protón [12], considerando la disminución entre colisiones. El detector cuenta con diferentes canales donde se almacenan los datos: S1, S2, S3, S4, S1 Anti, S2Anti, S3Anti y S4Anti, los cuales reciben información cada 10 segundos de las partículas cargadas y neutras con niveles de deposición de energía de  $E \geq 30, 60, 90$  y  $120$  MeV, respectivamente. En la parte superior de los PC se encuentran placas de plomo donde más de la mitad de los fotones incidentes son convertidos en un par de electrón-positrón y sirven para bloquear y reducir los fotones del fondo [13].

Para poder diferenciar las partículas neutras de las cargadas, el detector utiliza unos contadores proporcionales que únicamente detectan partículas cargadas. Éstos se encuentran en la parte superior y posterior de los plásticos centelladores. Para ser registrados, las partículas ionizan un gas aislado en unos tubos y son aceleradas por una diferencia de voltaje para producir una señal eléctrica. Para diferenciar el flujo provocado por las partículas, se comparan las señales del plástico centellador y de los contadores proporcionales: las cargadas tendrán dos señales mientras que las neutras una. En la figura 4.2 se muestra una imagen representativa del detector y sus partes.

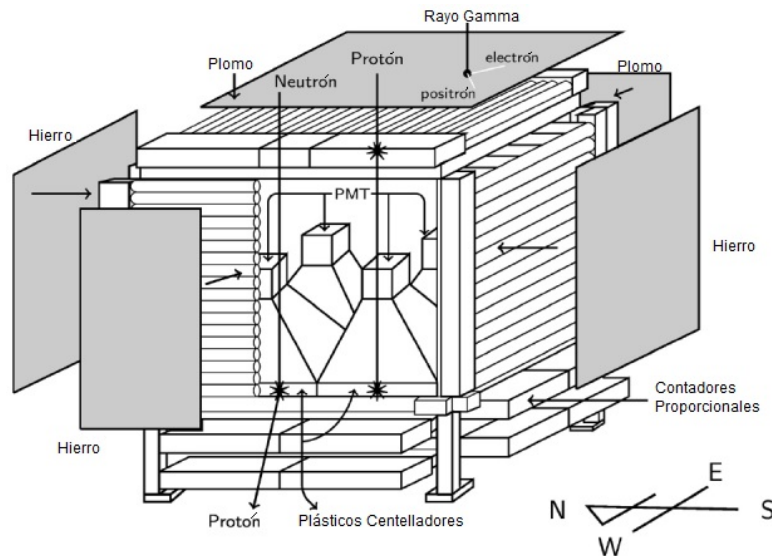


Figura 4.2: Esquema del TNS-SN [23]

Los datos son amplificados con módulos de computación, que se aseguran de eliminar el ruido de las observaciones e identificar las detecciones en cada canal correspondiente. La base de datos del detector permite desarrollar un método para analizar las firmas que provocan las

tormentas geomagnéticas.

Algo que sobresalta de las partículas neutras, es que no son afectadas por los campos magnéticos. Por lo tanto, si se tiene su detección, se podrá conocer la dirección de arribo y su energía inicial, dando pistas de su origen o mecanismo de aceleración. Por esto, el detector también cuenta con cinco tubos que pueden determinar la energía depositada y la dirección de arribo con una precisión de  $15^\circ$ . La probabilidad de supervivencia de un neutrón ante los campos electromagnéticos se puede determinar mediante la siguiente ecuación

$$P(E) = e^{-\frac{t}{\gamma\tau}} \quad (4.1)$$

donde  $t$ : tiempo de vuelo del neutrón entre el Sol y la Tierra,  $\gamma$ : factor de Lorentz y  $\tau$ : vida media del neutrón, 880.2 segundos.

Únicamente los neutrones que se encuentran cerca del limbo solar, pueden ser detectados y sólo la mitad de los neutrones energéticos solares pueden llegar a la Tierra. Por lo mismo, no podemos detectar neutrones galácticos por la inestabilidad.

# Capítulo 5

## Eventos Y Selección de Datos

Como se mencionó, el TNS-SN comenzó a operar en el año 2004 y no se tenía una base de datos analizada entre el 2004 - 2015. En este trabajo, se identificaron las tormentas geomagnéticas moderadas e intensas registradas con base en el índice Dst desde el 2004 hasta el 2015, para poder analizar los datos obtenidos del telescopio de este período de tiempo. La fecha final se determinó debido a que ya se tiene un estudio realizado del 2015 - 2020. En la tabla 5.1 se muestran de manera cronológica las tormentas geomagnéticas elegidas para este período. La primera columna indica el número de la TG, la siguiente la fecha de duración, seguido por el índice Dst y el fenómeno asociado a la tormenta. Las TG moderadas se destacan en naranja y las intensas, en rojo.

Tabla 5.1: Enlistado de las TG moderadas e intensas del periodo del 2004-2015.

TG	FECHA		ÍNDICE DST	FENÓMENO ASOCIADO
	Inicial	Final		
1	16/07/2004	18/07/2004	-76	EMC
2	22/07/2004	30/07/2004	-170	EMC
3	30/08/2004	02/09/2004	-129	EMC
4	07/11/2004	23/11/2004	-374	EMC
5	07/01/2005	09/01/2005	-93	EMC
6	16/01/2005	27/01/2005	-97	EMC & RIC
7	07/05/2005	24/05/2005	-247	EMC
8	29/05/2005	31/05/2005	-113	RIC
9	12/06/2005	15/06/2005	-106	EMC
10	23/06/2005	27/06/2005	-85	RIC
11	24/08/2005	31/08/2005	-184	EMC
12	31/08/2005	10/09/2005	-122	EMC & RIC
13	10/09/2005	24/09/2005	-139	RIC
14	04/04/2006	13/04/2006	-79	EMC
15	14/04/2006	19/04/2006	-81	EMC & RIC
16	06/12/2006	22/12/2006	-162	EMC & RIC
17	20/11/2007	26/11/2007	-59	RIC
18	21/07/2009	26/07/2009	-83	RIC

Tabla 5.1: Enlistado de las TG moderadas e intensas del periodo del 2004-2015.

TG	FECHA		ÍNDICE DST	FENÓMENO ASOCIADO
19	02/05/2010	10/05/2010	-70	RIC
20	28/05/2010	05/06/2010	-80	RIC
21	03/08/2010	08/08/2010	-74	RIC
22	11/10/2010	14/10/2010	-75	RIC
23	01/03/2011	05/03/2011	-88	RIC
24	09/03/2011	13/03/2011	-83	EMC & RIC
25	27/05/2011	03/06/2011	-80	RIC
26	05/08/2011	11/08/2011	-115	EMC
27	09/09/2011	19/09/2011	-75	EMC
28	26/09/2011	30/09/2011	-118	EMC
29	24/10/2011	30/10/2011	-147	EMC & RIC
30	22/01/2012	28/01/2012	-71	RIC
31	01/03/2012	22/03/2023	-145	EMC
32	23/04/2012	27/04/2012	-120	EMC
33	17/06/2012	22/06/2012	-86	RIC
34	08/07/2012	20/07/2012	-139	EMC
35	30/09/2012	04/10/2012	-122	EMC
36	07/10/2012	19/10/2012	-109	EMC
37	01/11/2012	04/11/2012	-65	RIC
38	13/11/2012	17/11/2012	-108	EMC
39	15/03/2013	25/03/2013	-132	EMC
40	01/06/2013	09/06/2013	-124	EMC & RIC
41	28/06/2013	30/06/2013	-102	RIC
42	05/07/2013	17/07/2013	-87	RIC
43	16/02/2014	23/02/2014	-119	EMC
44	26/02/2014	02/03/2014	-97	RIC
45	11/04/2014	16/04/2014	-87	EMC
46	27/08/2014	31/08/2014	-79	EMC
47	12/09/2014	15/09/2014	-88	RIC
48	01/01/2015	15/01/2015	-107	RIC
49	15/03/2015	25/03/2015	-234	EMC & RIC
50	09/04/2015	20/04/2015	-85	EMC
51	22/06/2015	30/06/2015	-198	EMC
52	15/08/2015	31/08/2015	-103	EMC
53	03/09/2015	22/09/2015	-105	EMC
54	01/10/2015	17/10/2015	-130	RIC
55	31/10/2015	15/11/2015	-80	RIC
56	20/12/2015	25/12/2015	-166	EMC

Como contexto, en el 2004, el Sol se encontraba en su fase descendente del ciclo solar #23, en el 2008 llegó a su mínimo y en el 2010 comenzó la fase ascendente del ciclo solar #24,

llegando a su pico máximo en el 2015. Conocer el estado del Sol permite relacionar los análisis encontrados.

## 5.1. Obtención de Datos

Para poder visualizar los datos obtenidos del TNS, se utilizó un programa desarrollado en Python previamente realizado por [12], adaptándose a los datos de este trabajo. Este programa permite el conteo de las partículas neutras y cargadas por resoluciones de 1 minuto y 1 hora, tomando en cuenta 3 días anteriores y posteriores de la tormenta para poder visualizar mejor el momento de la perturbación geomagnética.

El objetivo de los análisis es encontrar variaciones en la cuenta de partículas, ya sean incrementos o disminuciones. Para lograr esto, fue necesario considerar la Variación Diurna (VD) presentada a causa de la rigidez umbral y de la ubicación y altura del telescopio, misma que opacaba las posibles variaciones que se pretendían encontrar. Por esto, el programa consta de una sección para reducir esta influencia, pero manteniendo la información y así, encontrar la tendencia de los datos más precisa sin este ruido.

Sabemos que el TNS es capaz de detectar el fondo de RCG en un estado “normal” o quieto y cuando ocurre una tormenta geomagnética. El flujo de radiación puede ser representado como una curva de polinomio de tercer grado; por lo tanto, se utilizó como base para analizar las variaciones. Es necesario tener una gráfica base para comparar las diferencias de un tiempo quieto a uno con TG. Se programó la tendencia del polinomio para cada evento. En la figura 5.1, la curva es representada por la línea negra y las líneas punteadas de alrededor, representan el % de la variación diurna. La tendencia de los datos se muestra con la curva roja. Cuando no existe una TG, claramente la curva roja se ajusta al polinomio de curva negra.

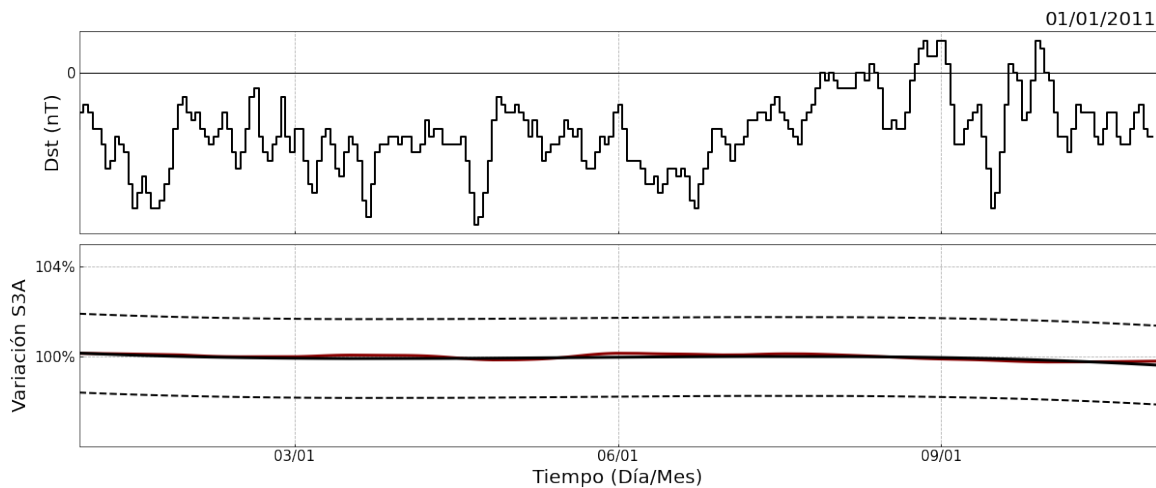


Figura 5.1: Arriba: Gráfica del índice Dst en un tiempo quieto. Abajo: Ajuste de polinomio y tendencia de datos.

Para analizar los eventos, se compararon entonces la curva del polinomio que se aproxima al comportamiento normal (sin perturbación del campo geomagnético) de los datos con la curva obtenida a partir de la tendencia de los datos. Si esta última curva presenta una variación más allá de la VD calculada, se consideran resultados significativos. Cuando es un aumento,



corresponde a un incremento en las cuentas detectadas y cuando es una disminución, se trata de un decrecimiento Forbush.

En la figura 5.2 se tiene una gráfica con una variación significativa, en este caso como decrecimiento Forbush. En color café claro se sombrea la tormenta y en este caso, es evidente cómo la curva roja (de tendencia) tiene una disminución cuando la tormenta se encontraba en su fase principal. Esta zona que sobrepasa el % de la VD está iluminada de color azul para facilitar la visualización.

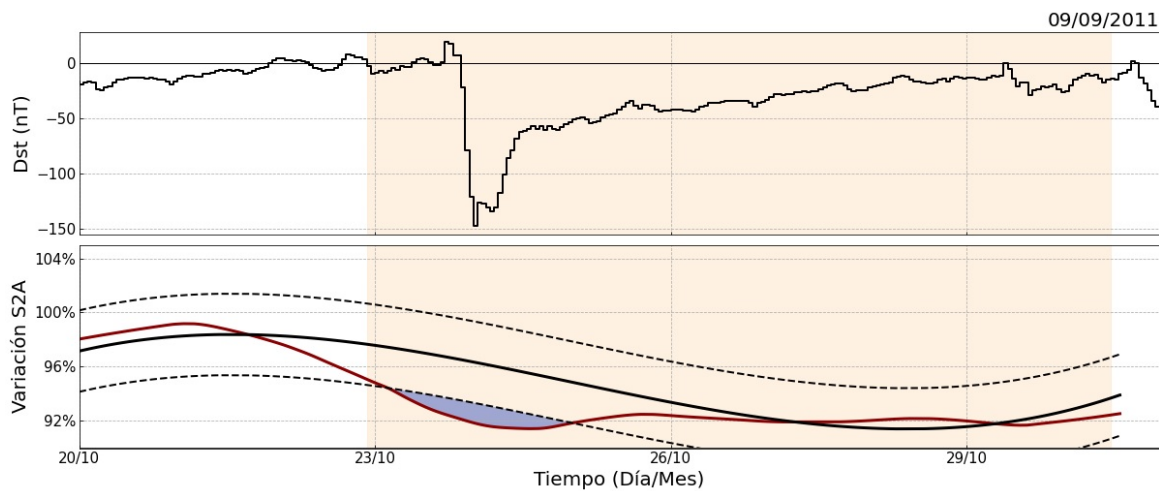


Figura 5.2: Arriba: Gráfica Dst para una TG. Abajo: Ajuste de polinomio y tendencia de datos, evidenciando una disminución en las cuentas. El área sombreada en café claro representa la afectación de la TG.

Una vez teniendo estas gráficas para cada tormenta, se seleccionaron las estadísticamente significativas y se calculó el porcentaje de variación que se tuvo para cada una.

# Capítulo 6

## Resultados

En la tabla 6.1, se condensan los resultados obtenidos de las cuentas de partículas para cada evento. La primera columna indica la tormenta y las demás, el canal correspondiente. Se delimitó a los canales S2 Anti, S3 Anti, S4 Anti, S2, S3 y S4, ya que el canal de menores energías, S1 Anti y S1, presentaba errores en la lectura de varias tormentas. Las siglas SD representan a una falta de datos del TNS, “Sin Datos”; NS corresponde a los valores “No Significativos”, es decir, que la tendencia de datos (curva representada por el color rojo) no sobrepasa el % de variación diurna. El incremento de cuentas en partículas está iluminado por color magenta e indica su porcentaje de incremento; la disminución, o eventos Forbush, está en verde; y cuando se encontraron tanto incrementos como decrementos, está representados por color azul, también con sus porcentajes.

Tabla 6.1: Resultados de los canales de energía.

TG	S2 Anti	S3 Anti	S4 Anti	S2	S3	S4
1	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
3	SD	SD	SD	SD	SD	SD
4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
5	SD	SD	SD	SD	SD	SD
6	SD	SD	SD	SD	SD	SD
7	SD	SD	SD	SD	SD	SD
8	SD	SD	SD	SD	SD	SD
9	SD	SD	SD	SD	SD	SD
10	SD	SD	SD	SD	SD	SD
11	SD	SD	SD	SD	SD	SD
12	SD	SD	SD	SD	SD	SD
13	SD	SD	SD	SD	SD	SD
14	SD	SD	SD	SD	SD	SD
15	SD	SD	SD	SD	SD	SD
16	SD	SD	SD	SD	SD	SD
17	SD	SD	SD	SD	SD	SD
18	NS	NS	NS	NS	NS	NS
19	NS	NS	NS	99.07 %	NS	NS

Tabla 6.1: Resultados de los canales de energía.

TG	S2 Anti	S3 Anti	S4 Anti	S2	S3	S4
20	SD	SD	SD	SD	SD	SD
21	SD	SD	SD	SD	SD	SD
22	SD	SD	SD	SD	SD	SD
23	NS	NS	NS	NS	NS	NS
24	NS	NS	NS	NS	NS	NS
25	107.97 %	107.77 %	110.35 %	NS	NS	NS
26	103 %	102.17 %	104 %	NS	NS	NS
27	90.53 %	92.83 %	88.6 %	100.48 % y 97.54 %	100.48 % y 97.12 %	100.62 % y 96.92 %
28	NS	NS	NS	NS	NS	NS
29	96.42 %	97.9 %	NS	NS	NS	NS
30	NS	NS	NS	NS	NS	NS
31	105.95 % y 95.9 %	104.37 % y 96.3 %	101 % y 93.93 %	102 % y 96 %	101.86 % y 96 %	92.42 %
32	93.02 %	94.38 %	102.03 %	98.74 %	98.41 %	103.15 %
33	103 %	103 %	95 %	NS	NS	86.58 %
34	NS	NS	NS	NS	NS	NS
35	SD	SD	SD	SD	SD	SD
36	SD	SD	SD	SD	SD	SD
37	NS	NS	NS	NS	NS	NS
38	NS	NS	NS	NS	NS	NS
39	NS	97.3 %	110.51 %	97.69 %	97.43 %	113.53 %
40	102.51 %	102.59 %	93.34 %	NS	NS	91.66 %
41	SD	SD	SD	SD	SD	SD
42	101.69 %	101.76 % y 98.53 %	106.79 %	98.76 %	98.33 %	108.41 %
43	SD	SD	SD	SD	SD	SD
44	NS	NS	NS	98.4 %	NS	89.89 %
45	NS	NS	NS	NS	NS	NS
46	NS	NS	89.3 %	NS	NS	89.28 %
47	NS	NS	118.17 % y 92.88 %	NS	NS	122.33 %
48	106.02 %	101.15 %	129.49 %	96.03 %	95.09 %	120.65 %
49	NS	NS	NS	98.48 %	98.22 %	110.86 % y 89.4 %
50	97.59 %	97.99 %	NS	98.46 %	NS	NS
51	95.42 %	95.42 %	NS	96.19 %	95.98 %	NS
52	SD	SD	SD	SD	SD	SD
53	SD	SD	SD	SD	SD	SD
54	SD	SD	SD	SD	SD	SD
55	NS	NS	NS	98.26 %	98.14 %	NS

Tabla 6.1: Resultados de los canales de energía.

TG	S2_Anti	S3_Anti	S4_Anti	S2	S3	S4
56	101.67 % y 97.87 %	101.74 % y 97.59 %	101.54 % y 97.44 %	98.35 %	98.08 %	102.22 % y 97.92 %

A continuación, se interpretarán y discutirán algunas de las tormentas geomagnéticas con resultados significativos. En el Apéndice A, se podrán encontrar todas las gráficas de las tormentas significativas de la tabla 6.1.

### **Tormenta Geomagnética 27: 09/09/2011 - 19/09/2011**

En la gráfica del índice Dst para la fecha de esta tormenta, se puede notar que tuvo dos fases principales, ya que cuando parece estar en la fase de recuperación, tiene un segunda subida súbita y vuelve a disminuir. En la primera fase de caída, llegó hasta los -75 nT y en la segunda, a -72 nT. Esta tormenta inició a las 13 UT del 09/09/2011 y se estabilizó el 19/09/2011 a las 13 UT. En la siguiente figura 6.1, se muestran cuatro gráficas para las partículas neutras. La primera muestra el índice Dst, la segunda corresponde al canal S2 Anti ( $E \geq 60$  MeV), la tercera al S3 Anti ( $E \geq 90$  MeV) y la cuarta al S4 Anti ( $E \geq 120$  MeV).

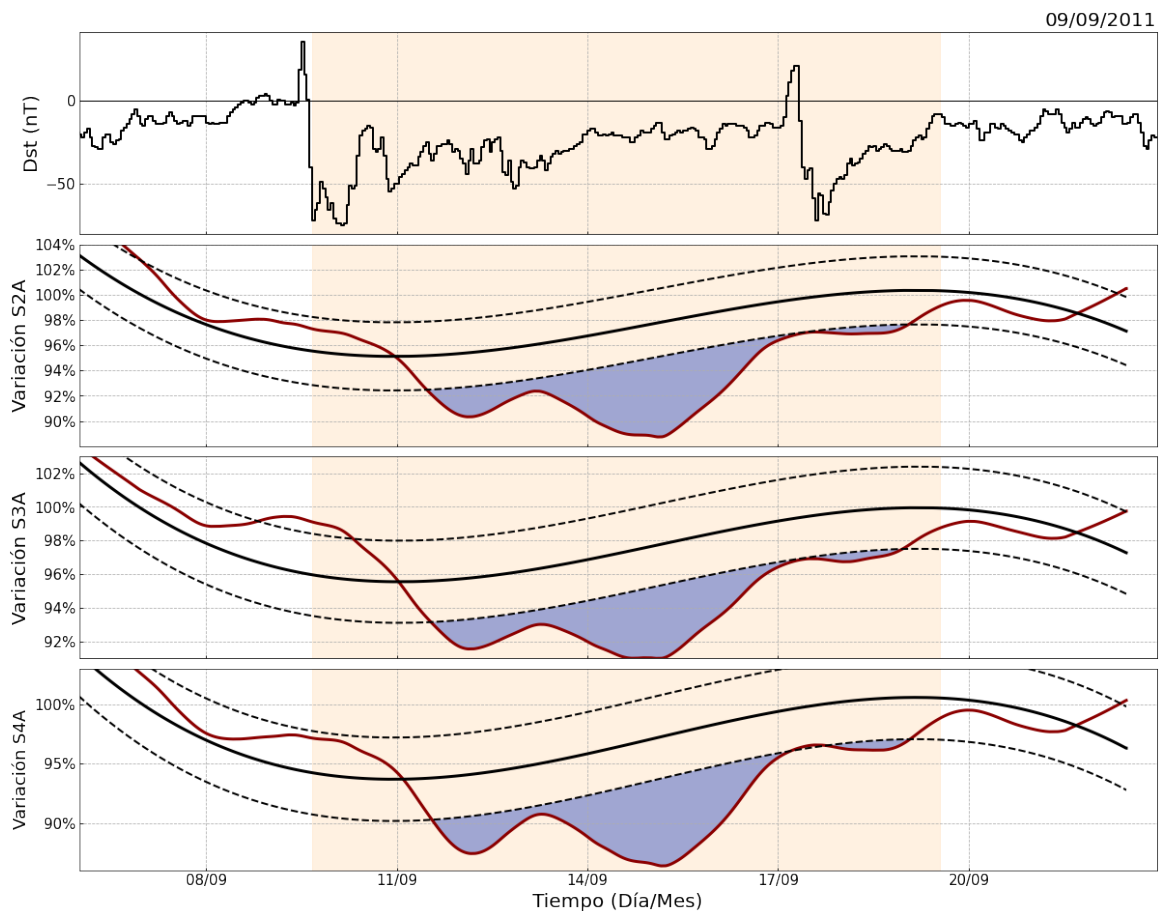


Figura 6.1: Gráficas correspondientes a la detección de las partículas neutras de la TG 27. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2A, S3A y S4A del TNS-SN, colectivamente.

En los tres canales se pudo detectar un decrecimiento Forbush entre las dos fases principales. Como se mencionó, en esta fecha, el ciclo solar comenzaba su fase ascendente, por lo que apenas comenzaba a estar más activo. Conforme a los datos registrados en el Archivo de Reportes de Actividad Solar [14], la velocidad del viento solar al inicio de la tormenta, osciló entre 284 y 499 km/s. La EMC fue detectada con el satélite ACE con el campo magnético interplanetario volviéndose fuertemente hacia el sur. Varios magnetómetros registraron las condiciones de K9 en el pico de la perturbación. Para la segunda fase, la velocidad del viento solar osciló entre 346 y 535 km/s. Se observó un choque de viento solar en el satélite SOHO con la llegada de la EMC. Después del choque, el campo magnético interplanetario fue de moderado a fuerte hacia el sur, lo que provocó la gran tormenta geomagnética.

El canal S4 tuvo mayor % de disminución (88.6 %) y el S2 el menor (92.83 %).

En la figura 6.2 se observa la misma alineación de gráficas, pero para las partículas cargadas.

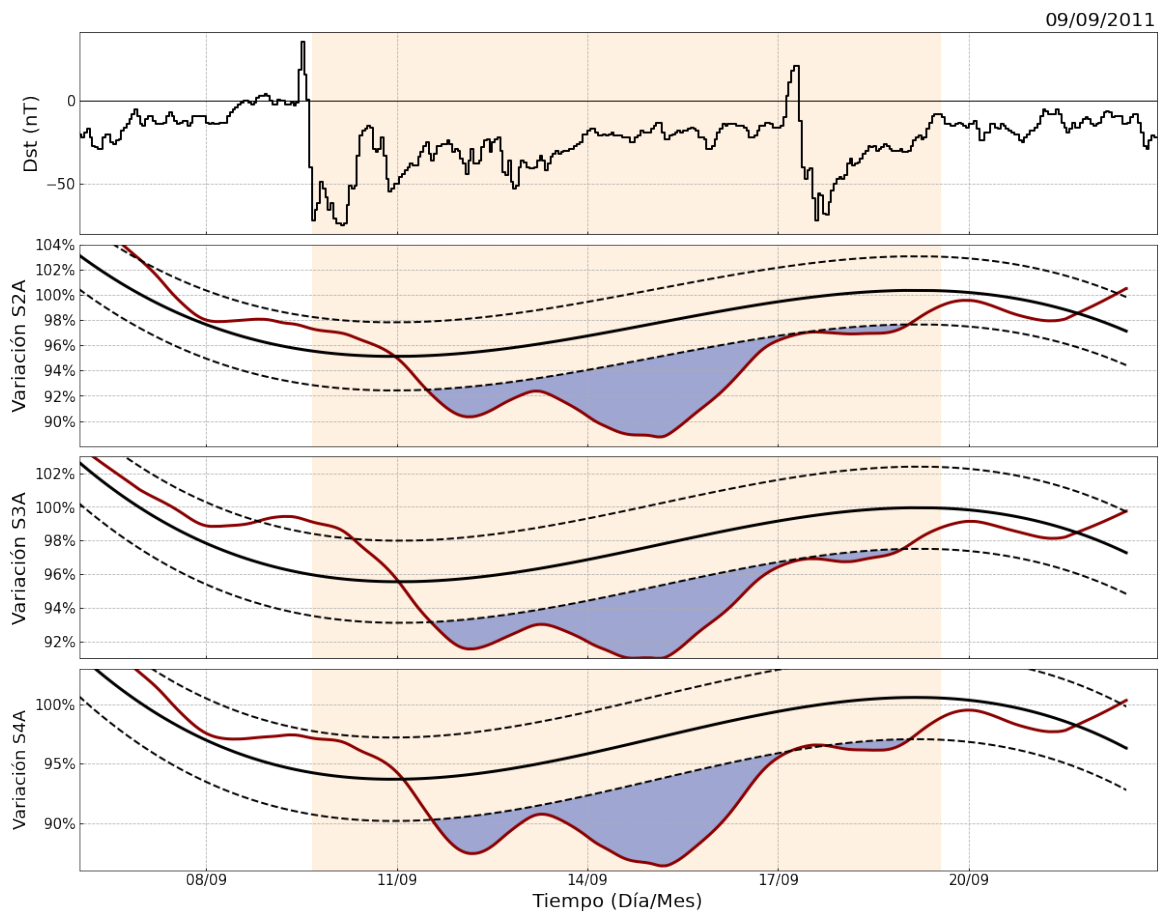


Figura 6.2: Gráficas correspondientes a la detección de partículas cargadas de la TG 27. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2, S3 y S4 del TNS-SN, colectivamente.

En este caso, se puede observar que hubo un incremento en la cuenta de partículas de todos los canales cuando la TG tiene su primer incremento súbito. Posteriormente, se detecta un Forbush en tiempo similar al de las neutras.

### **Tormenta Geomagnética 31: 01/03/2012 - 22/03/2012**

Basta con ver el tiempo de afectación para reconocer que esta tormenta fue muy extensa y su índice Dst mínimo indica que fue intensa. A pesar de que comienza desde el inicio de mes, no es hasta el 6 - 9 que tiene su caída de fase principal.

En la figura 6.3 se muestran los canales para las partículas neutras, donde se observa un incremento en las cuentas de los tres canales al inicio de la tormenta y en su fase de recuperación, un decrecimiento. El canal S4 Anti, se desfasa un poco a los otros y muestra también otro decrecimiento en las cuentas en la última fase de la tormenta.

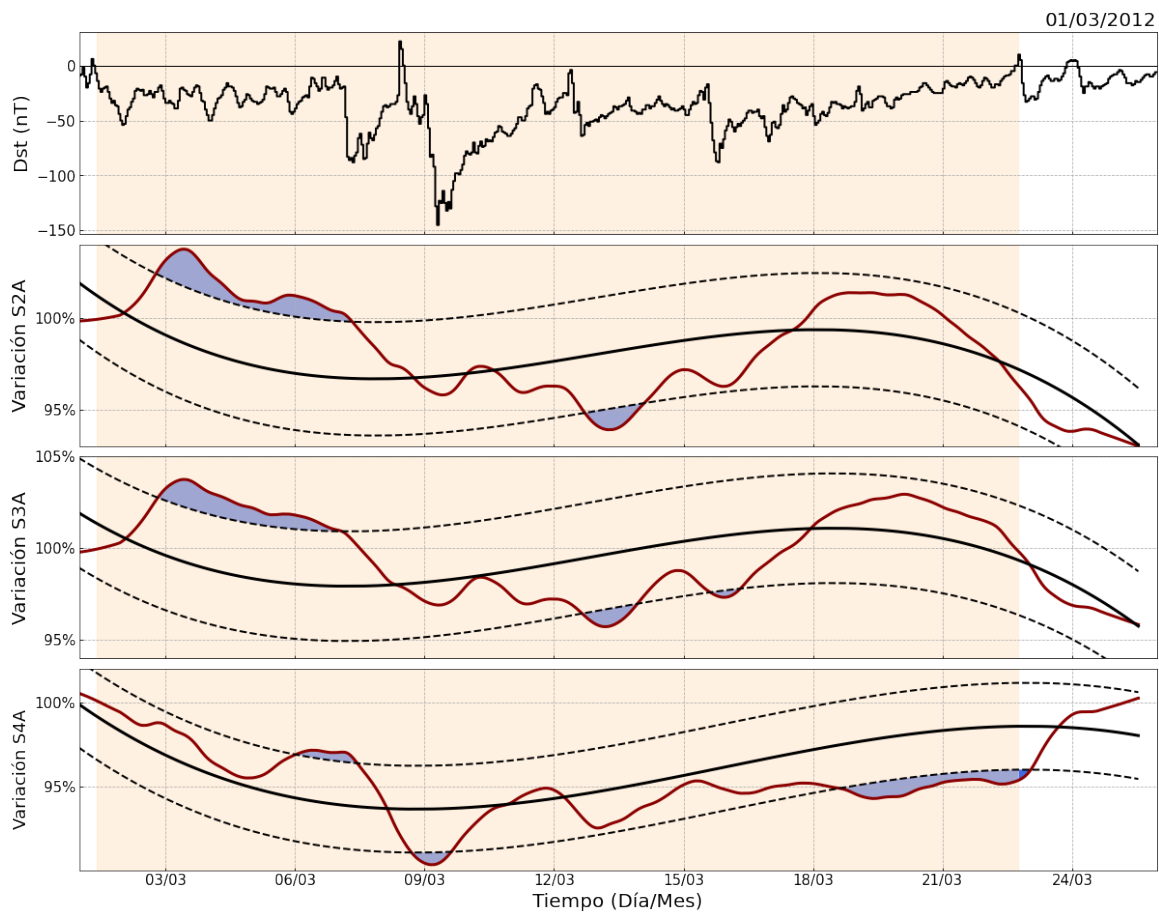


Figura 6.3: Gráficas correspondientes a la detección de partículas neutras de la TG 31. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2A, S3A y S4A del TNS-SN, colectivamente.

En esta tormenta, la velocidad del viento solar en SOHO osciló entre 456 y 828 km/s y en esta misma sonda se observó un fuerte choque de viento solar y posteriormente, la llegada de las EMC, alrededor del 7 de marzo. La perturbación se intensificó el 9 de marzo con condiciones de tormenta importantes observadas. El menor valor del índice Dst corresponde a -145 nT el día 9 de marzo.

Las gráficas de las partículas cargadas se muestran a continuación.

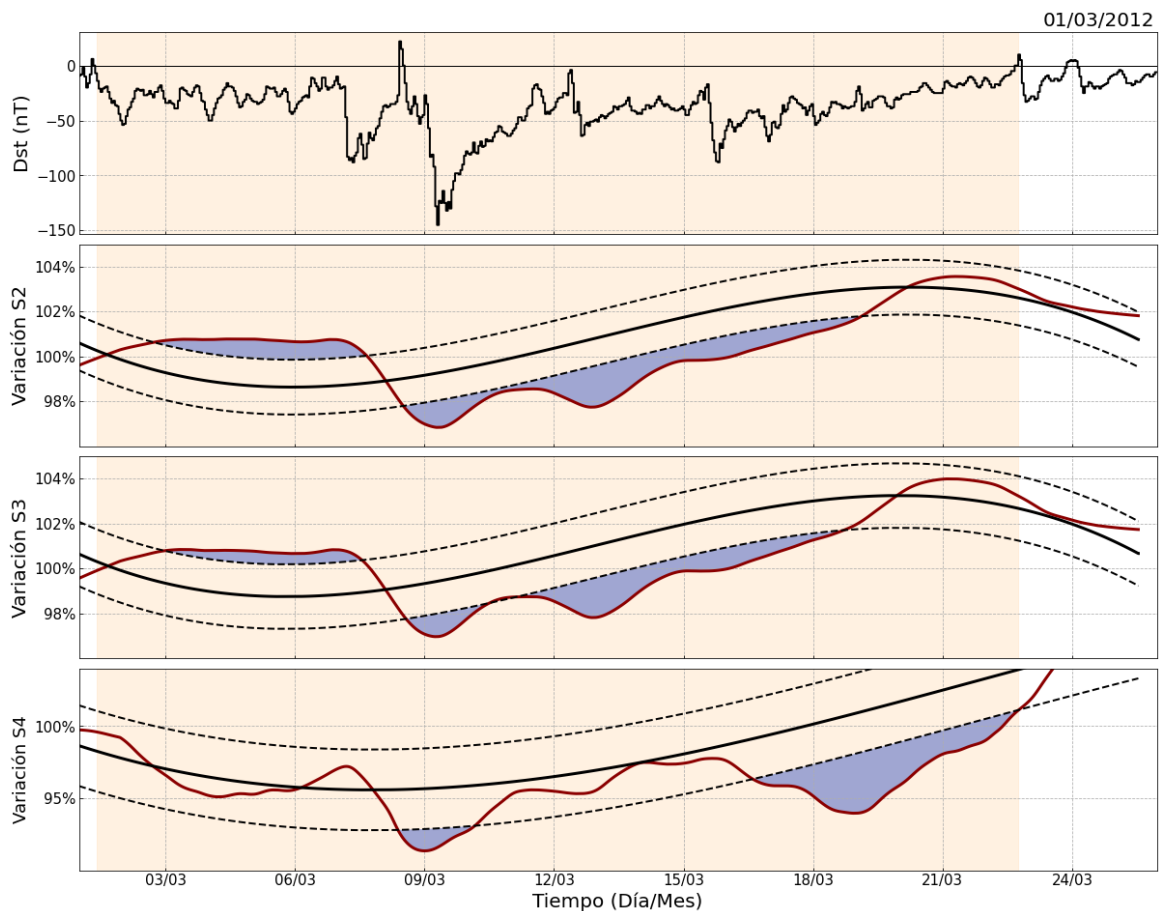


Figura 6.4: Gráficas correspondientes a la detección de partículas cargadas de la TG 31. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2, S3 y S4 del TNS-SN, colectivamente.

Como se enlista en la tabla 6.1, la gran mayoría de los canales tuvieron tanto incrementos como decrementos de partículas, estando el mayor en el canal S2 Anti y el menor en el S4.

### **Tormenta Geomagnética 42: 05/07/2013- 17/07/2013**

Esta TG moderada inició su fase principal el 5 de julio y fue causada por una RIC, asociada a un hoyo coronal del hemisferio norte. La velocidad del viento solar en SOHO osciló entre 318 y 383 km/s. Una perturbación débil estuvo en curso la mayor parte del día y se intensificó temprano el 6 de julio. En la gráfica Dst se puede notar que el campo geomagnético tardó varios días en regresar a un estado neutro. El TNS detectó incrementos en los tres canales anti, incluyendo una disminución en el S2 Anti como se muestra en la siguiente figura 6.5.



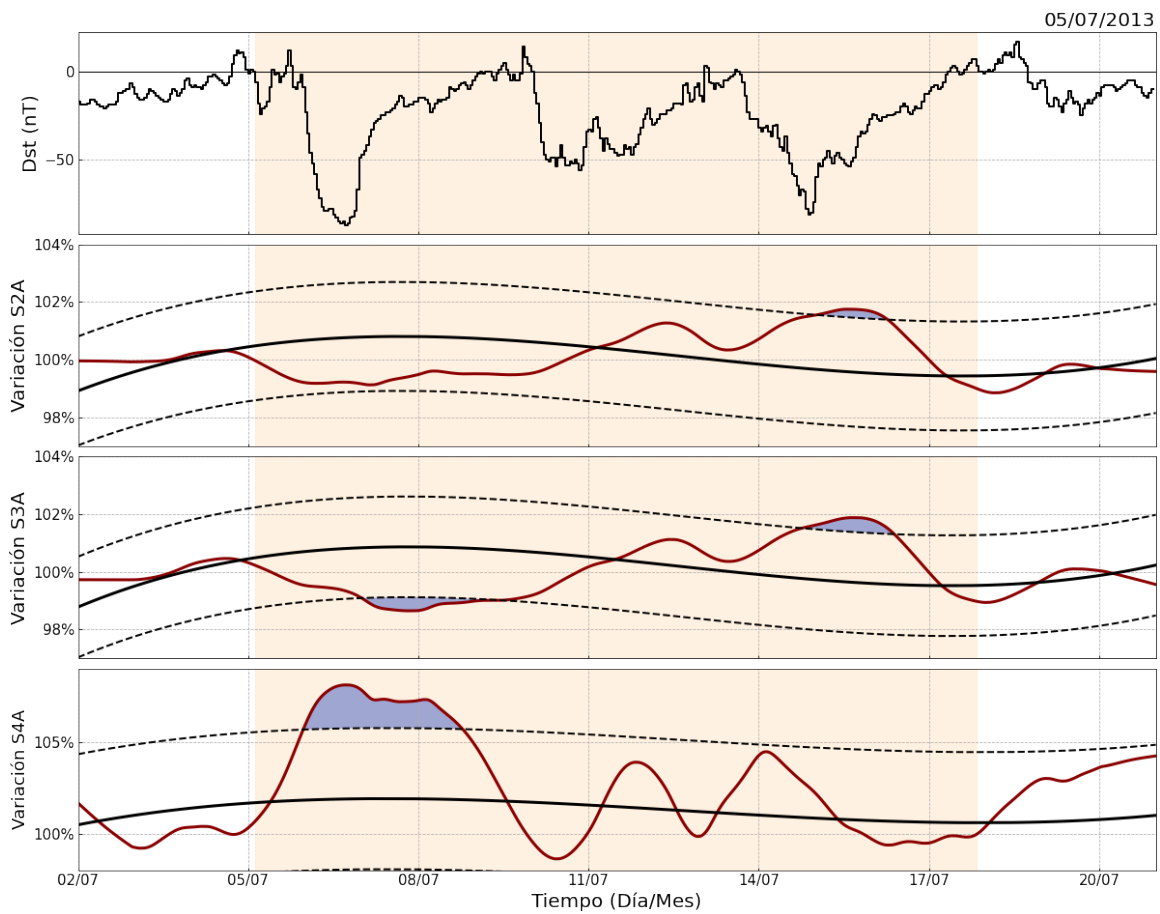


Figura 6.5: Gráficas correspondientes a la detección de partículas neutras de la TG 42. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2A, S3A y S4A del TNS-SN, colectivamente.

En el caso de las partículas cargadas, el canal S4 fue el que mostró mayor significancia, al tener un incremento del 108.41 %, similar al canal S4A. De los canales S2 y S3, también se tuvo un decremento similar a los Anti.

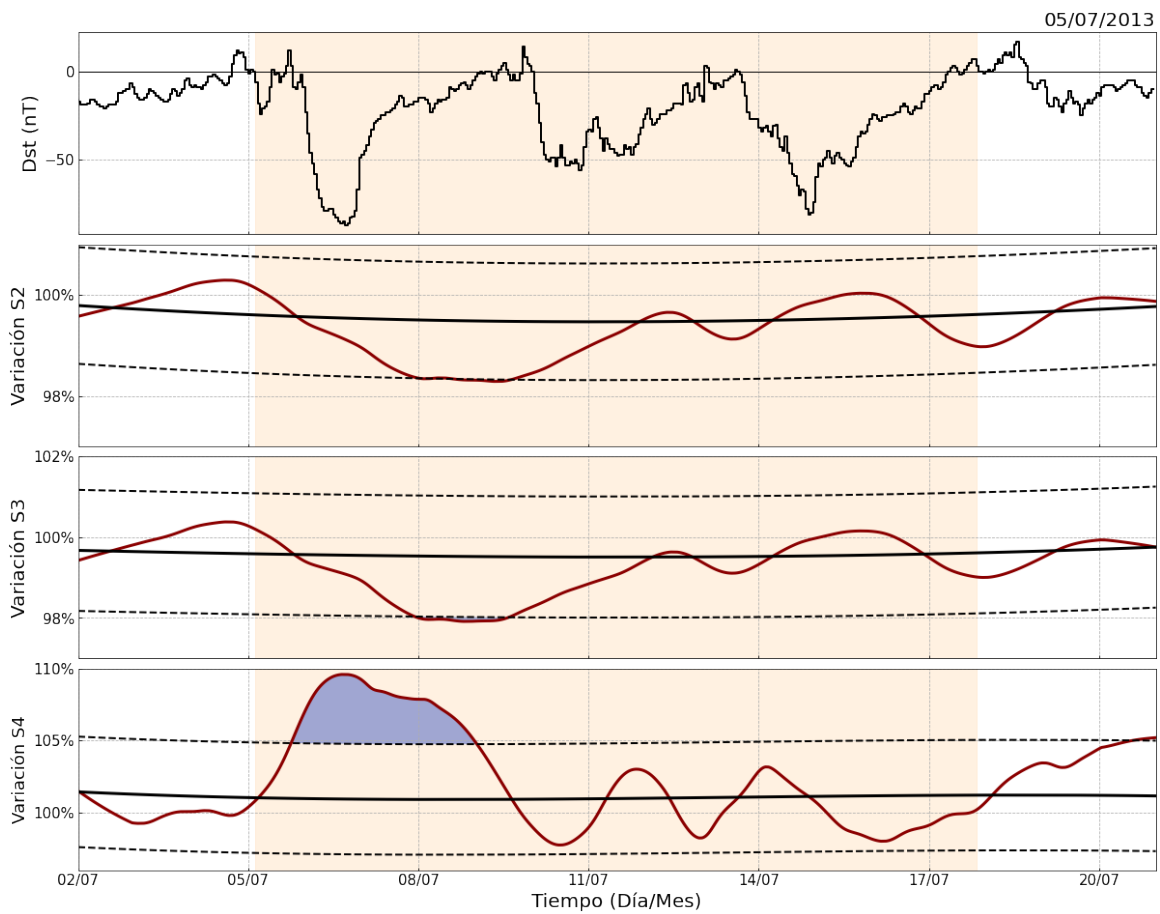


Figura 6.6: Gráficas correspondientes a la detección de partículas cargadas de la TG 42. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2, S3 y S4 del TNS-SN, colectivamente.

**Tormenta Geomagnética 48: 01/01/2015 - 15/01/2015**

La fase principal de esta tormenta comienza el 6 de enero y es justo alrededor de esta fecha donde se ve el mayor incremento de las cuentas de las partículas neutras, mostradas en la figura 6.6. El mayor incremento lo tuvo el canal S4 Anti y el Dst menor de -107 nT.

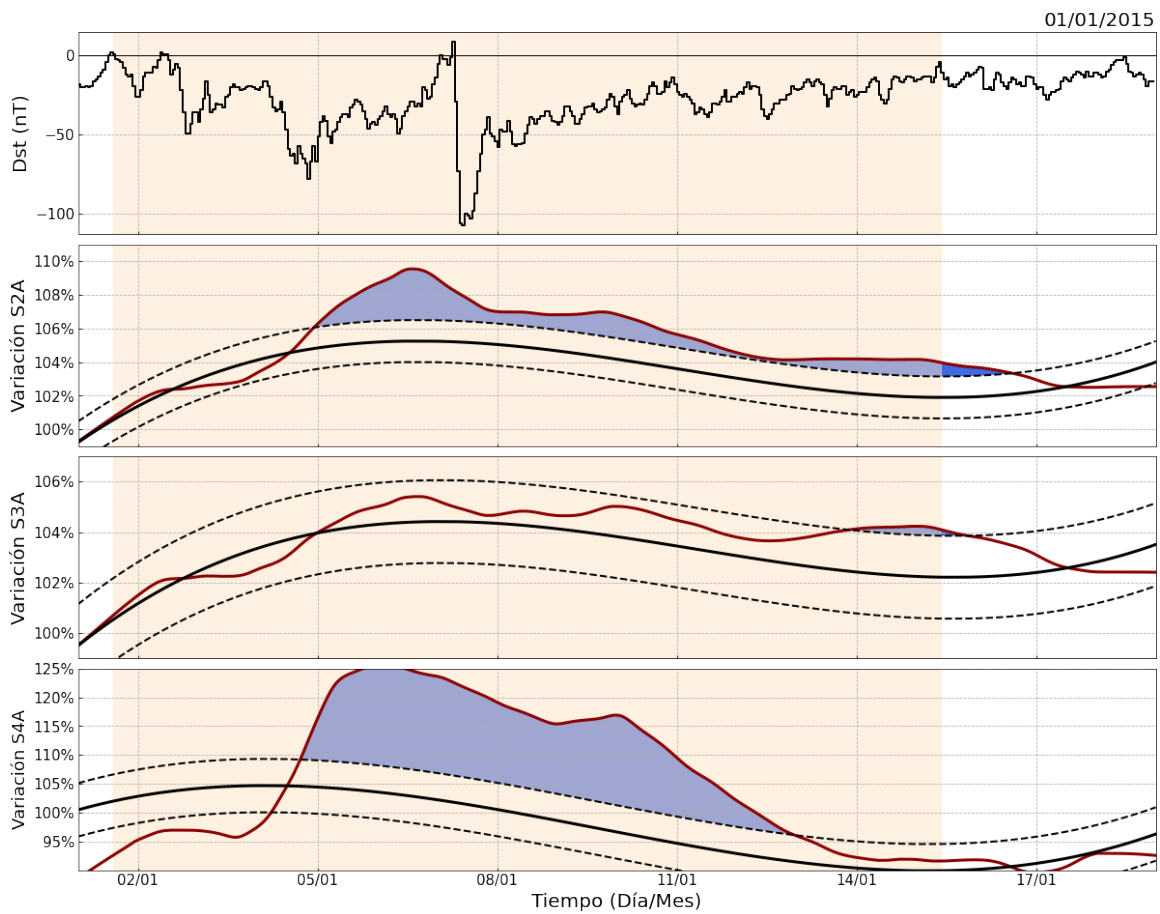


Figura 6.7: Gráficas correspondientes a la detección de partículas neutras de la TG 48. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2A, S3A y S4A del TNS-SN, colectivamente.

En caso de las partículas cargadas, la significancia coincide temporalmente, sin embargo en los primeros dos canales corresponden a un decremento en lugar de incremento. El mayor decremento fue en el S2, con un 96.03 % y el incremento del S4 fue muy similar al de las neutras.

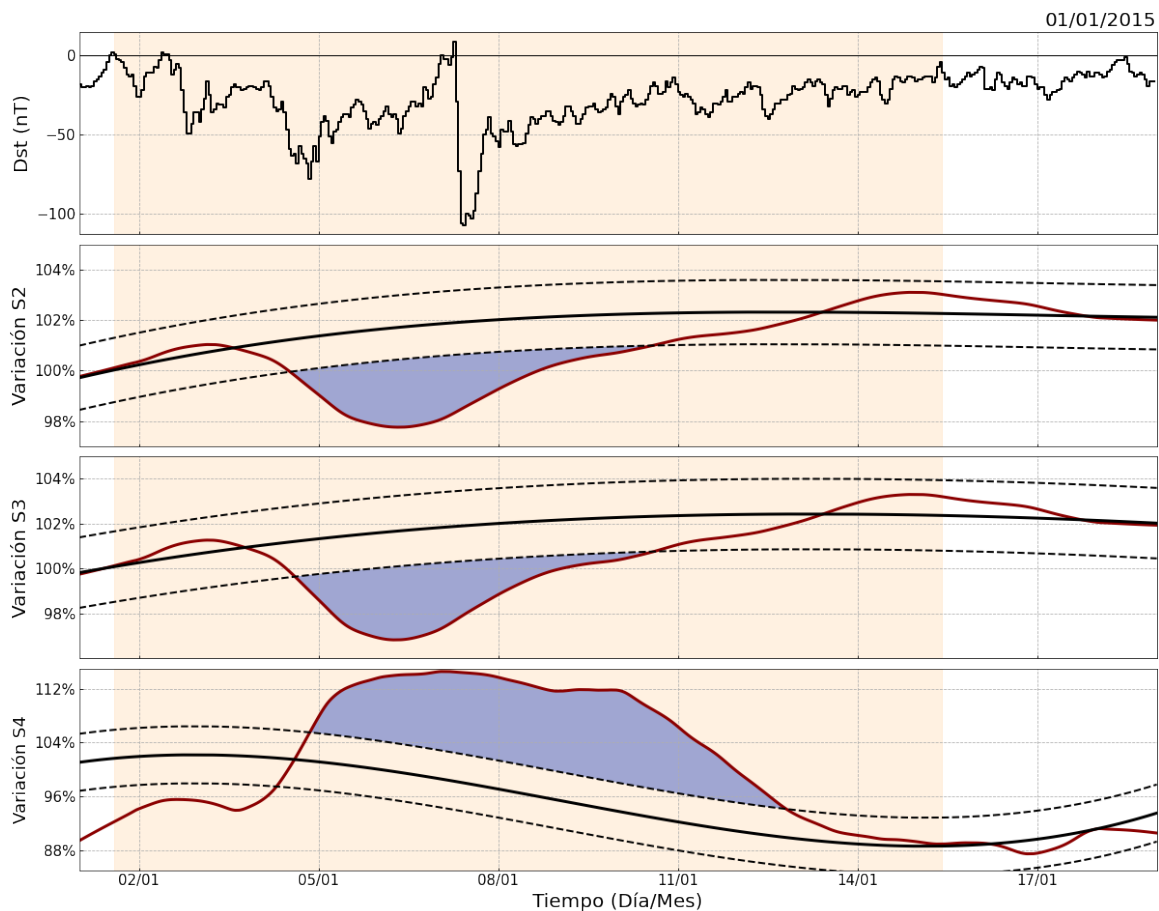


Figura 6.8: Gráficas correspondientes a la detección de partículas cargadas de la TG 48. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2, S3 y S4 del TNS-SN, colectivamente.

Debido a que en esta fecha no se detectaron EMC ni choques de viento solar, se relaciona el evento a una región de interacción corrotante. La perturbación geomagnética fue inesperada y la velocidad del viento solar en SOHO osciló entre 389 y 491 km/s.

### **Tormenta Geomagnética 51: 22/06/2015 - 30/06/2015**

Con un índice Dst de -198 el 23 de junio a las 5 UT, en esta tormenta se obtuvieron eventos Forbush para el canal S2 Anti y S3 Anti.

La velocidad del viento solar en SOHO osciló entre 335 y 712 km/s y se observó un aumento repentino en la velocidad cuando se aproximaba la EMC, el 19 de junio. Se registró un fuerte choque de viento solar el 21 de junio, anunciando la llegada de la eyección. El campo magnético interplanetario estaba muy fuerte en su componente hacia el sur justo después del choque y esto provocó la tormenta geomagnética intensa.

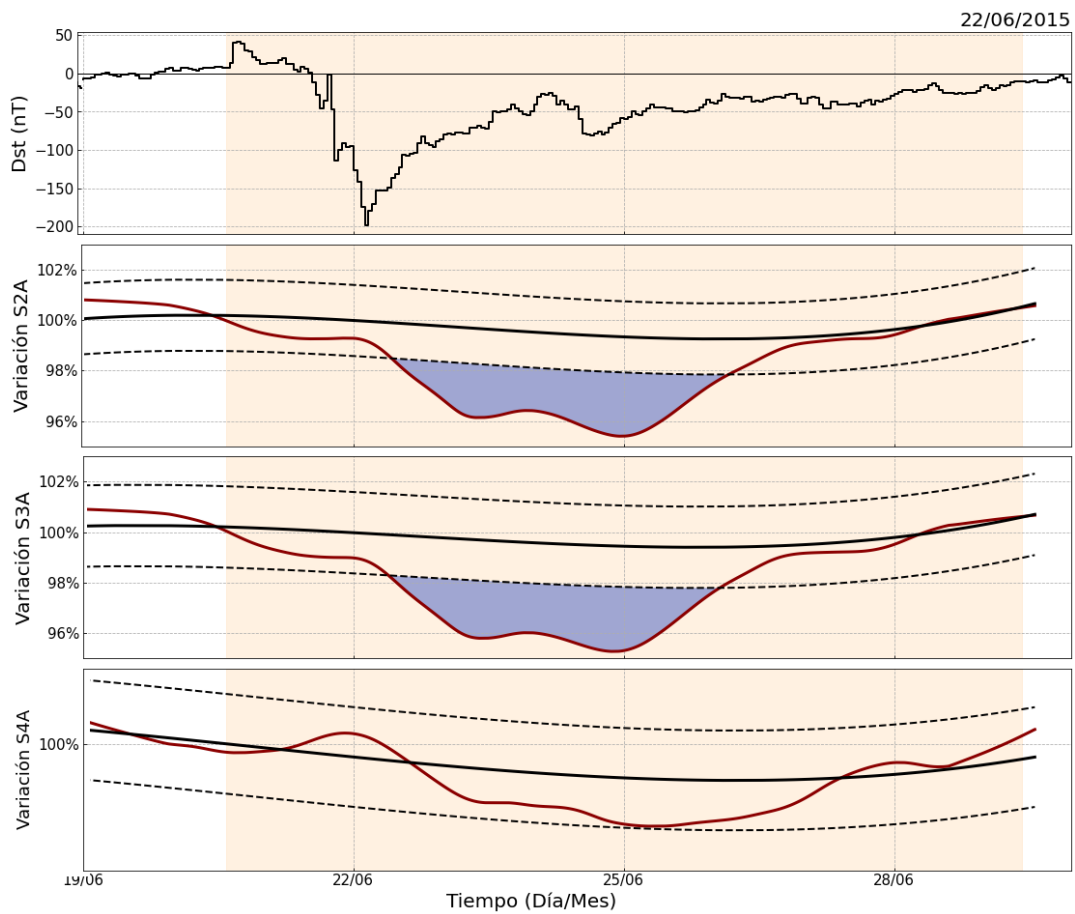


Figura 6.9: Gráficas correspondientes a la detección de partículas neutras de la TG 51. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2A, S3A y S4A del TNS-SN, colectivamente.

Para las cargadas, la detección fue muy similar, ya que se registraron decaimientos en las cuentas de las partículas con  $E \geq 60, 90$  MeV justo en la fase de recuperación de la tormenta, mostrado en la figura 6.10.

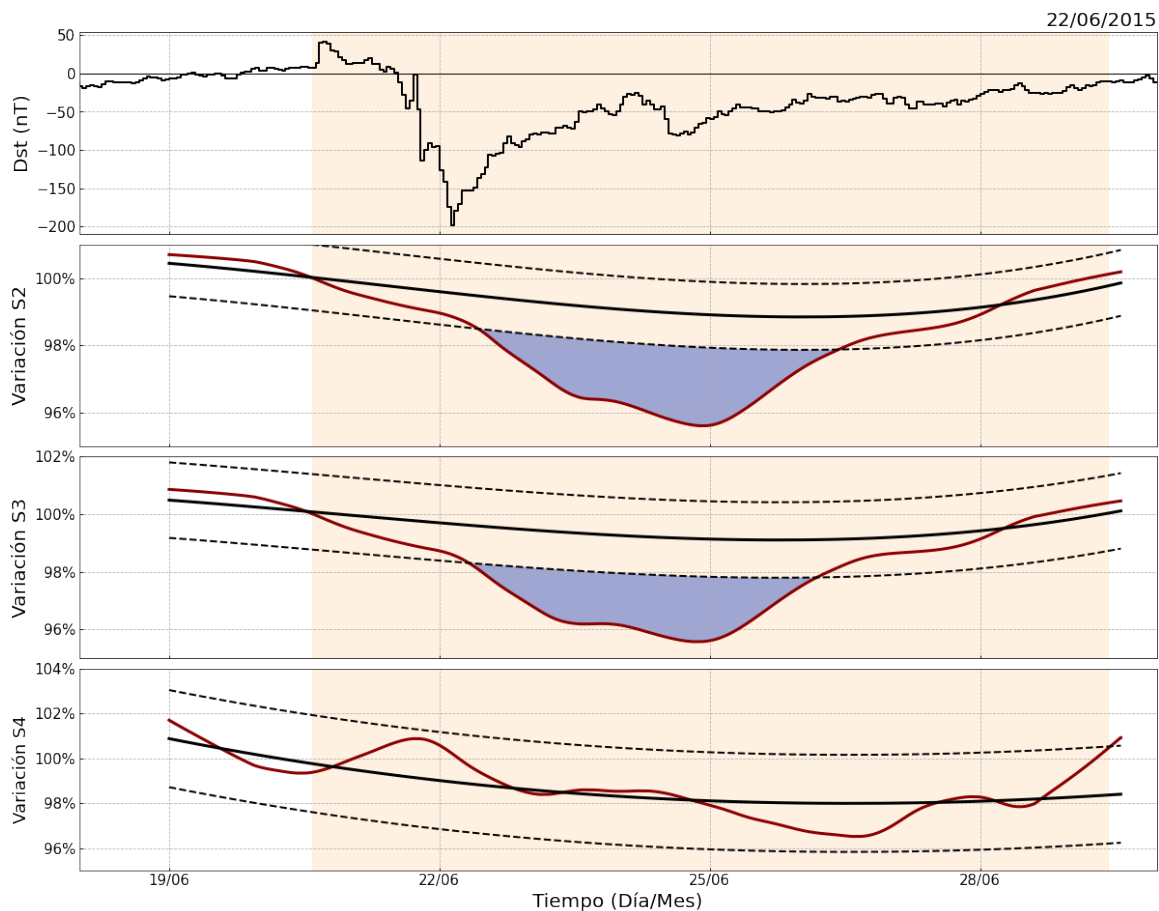


Figura 6.10: Gráficas correspondientes a la detección de partículas cargadas de la TG 51. La gráfica superior corresponde al índice Dst y las siguientes a los canales S2, S3 y S4 del TNS-SN, colectivamente.

## 6.1. Discusión de Resultados

De las 56 tormentas geomagnéticas intensas y moderadas encontradas con base en el índice Dst en el rango de tiempo del 2004 - 2015, únicamente se pudo hacer el análisis para 29 de ellas, ya que en los primeros meses de funcionamiento, no se guardaron correctamente los datos o en algunos otros casos, se tuvo alguna falla electrónica. De las restantes, 9 de ellas no fueron significativas en ningún canal, tanto para partículas neutras como cargadas. Para el resto, se tuvo por lo menos un canal significativo.

El 55 % de las tormentas analizadas presentaron incrementos como decrementos, tanto en el mismo canal o en diferentes. El 35 % corresponde a únicamente eventos Forbush y sólo un 10 % para únicamente incremento de partículas. En la mayoría de las tormentas donde se detectaron incrementos (sin decrementos), corresponden a las partículas neutras.

Tras comparar las tablas 6.1 y 5.1, podemos concluir que todas las TG causadas por eyecciones de masa coronal, produjeron eventos Forbush. Esto confirma que tal fenómeno es capaz de arrastrar y desviar a los rayos cósmicos. No obstante, también cambia la rigidez umbral y es por eso que en la gran mayoría de los eventos, también se detectaron incrementos en el mismo

canal, ya sea antes o después de los decrementos.

Las tormentas que fueron producidas por una región de interacción corrotante, resultaron en una detección de incremento de partículas en ciertos canales, pero una disminución en otras, no en la misma a diferencia de las EMC. Esto también confirma que las RIC son también capaces de modificar la rigidez umbral. En comparación con la actividad del Sol, durante la fase descendente y/o mínimo solar, las RIC son dominantes, pero en una fase ascendente o pico máximo, las EMC son las que más afectan el ambiente terrestre y producen variaciones de los rayos cósmicos secundarios que se detectan a nivel de tierra.

De manera global, la tormenta que mayor porcentaje de incremento de cuentas fue la TG48, con 129.49% presentado en el canal S3 Anti. En contraste, la que presentó un mayor decrecimiento, fue la TG44, con un 89.89% de disminución. Es interesante notar que la tormenta con un menor índice Dst, o sea la más intensa, fue la TG49, que llegó hasta los -234 nT.

# Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue obtener la base de datos del telescopio de neutrones solares de Sierra Negra desde su instalación hasta el 2015 y analizar la influencia de las tormentas geomagnéticas moderadas e intensas en el flujo de partículas registrado, además de corroborar el óptimo funcionamiento del TNS-SN. Tras hacer una limpieza de los datos de la variación diurna utilizando herramientas de programación, pudimos suavizar y observar gráfica y numéricamente las influencias de las tormentas geomagnéticas en las partículas registradas por el TNS-SN, junto con el fondo de rayos cósmicos.

Los resultados muestran que para el 69% de las TG analizadas, el flujo de la radiación cósmica detectada fue significativa para todos los canales de energía. El 35% corresponde únicamente a eventos Forbush y sólo un 10% para incrementos de partículas (sin decrementos). Es decir que en la mayoría de las detecciones, se encontraron tanto incrementos como decrementos para los diferentes canales de detección de energía del TNS-SN.

La tendencia de los datos muestra que una eyección de masa coronal (EMC) llevará a cabo un decremento en el flujo de partículas tipo Forbush. Por otro lado, cuando se presenta una TG causada por una región de interacción corrotante (RIC), es más probable que ocurra un incremento en la detección de partículas. Para conocer qué fenómeno es más probable que ocurra, se puede inferir en el estado del ciclo que se encuentre el Sol, ya que en un punto de actividad máxima, las EMC serán predominantes y en un estado de actividad mínima, son RIC.

El constante registro de partículas energéticas del TNS-SN comprueba que la rigidez umbral en el centro de México es lo suficientemente elevada (8.2 GV) para evitar el ingreso del flujo de partículas energéticas; sin embargo, si la rigidez es alterada por una tormenta geomagnética, se observa que pueden ingresar flujos espurios de partículas que no deberían ingresar en un ambiente geomagnético quieto.



# Apéndice A

A continuación, se presentan las gráficas de las tormentas geomagnéticas que tuvieron variaciones significativas para los canales de partículas neutras: S2 Anti ( $E \geq 60$  MeV), S3 Anti ( $E \geq 90$  MeV), S4 Anti ( $E \geq 120$  MeV) y partículas cargadas: S2 ( $E \geq 60$  MeV), S3 ( $E \geq 90$  MeV) y S4 ( $E \geq 120$  MeV).

Figura 6.11: Tormenta Geomagnética 19:

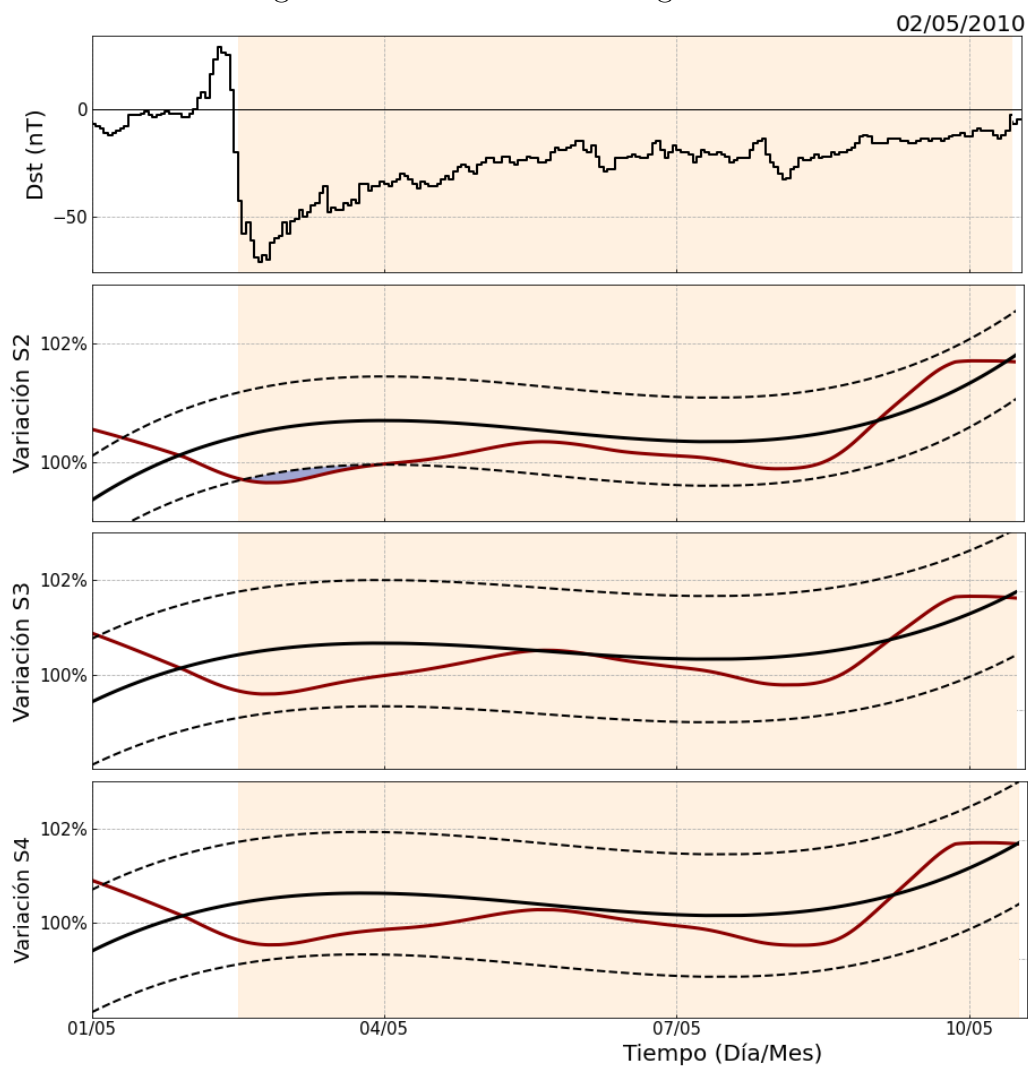


Figura 6.12: Tormenta Geomagnética 25:

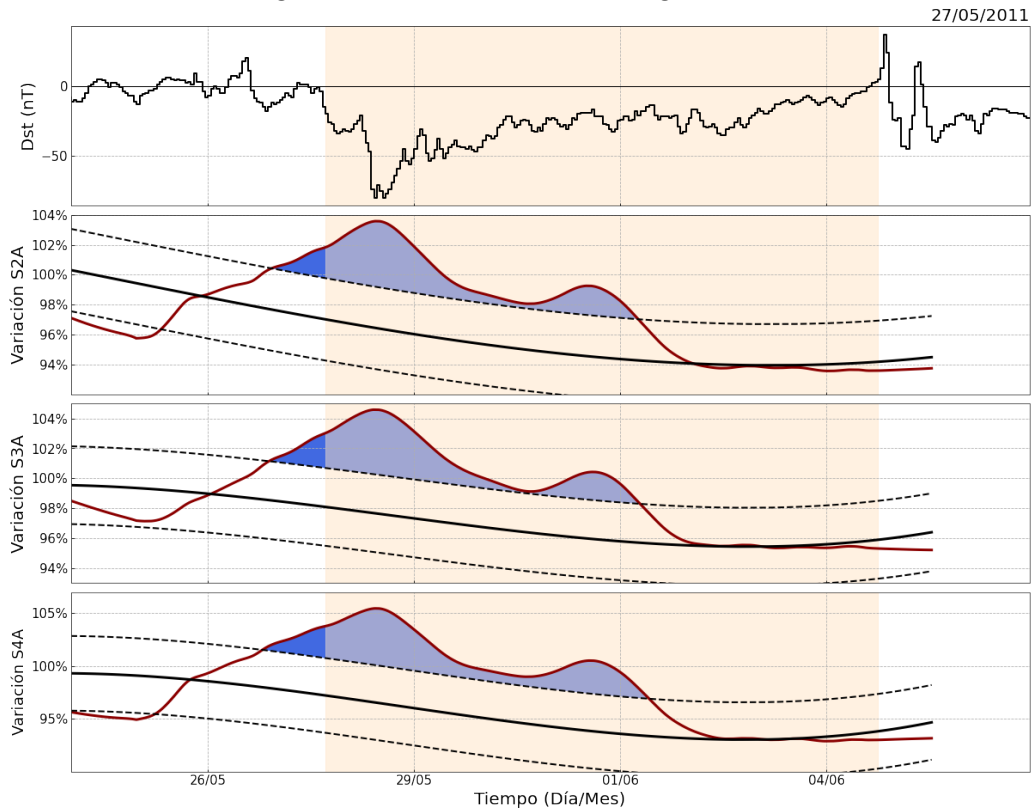


Figura 6.13: Tormenta Geomagnética 26:

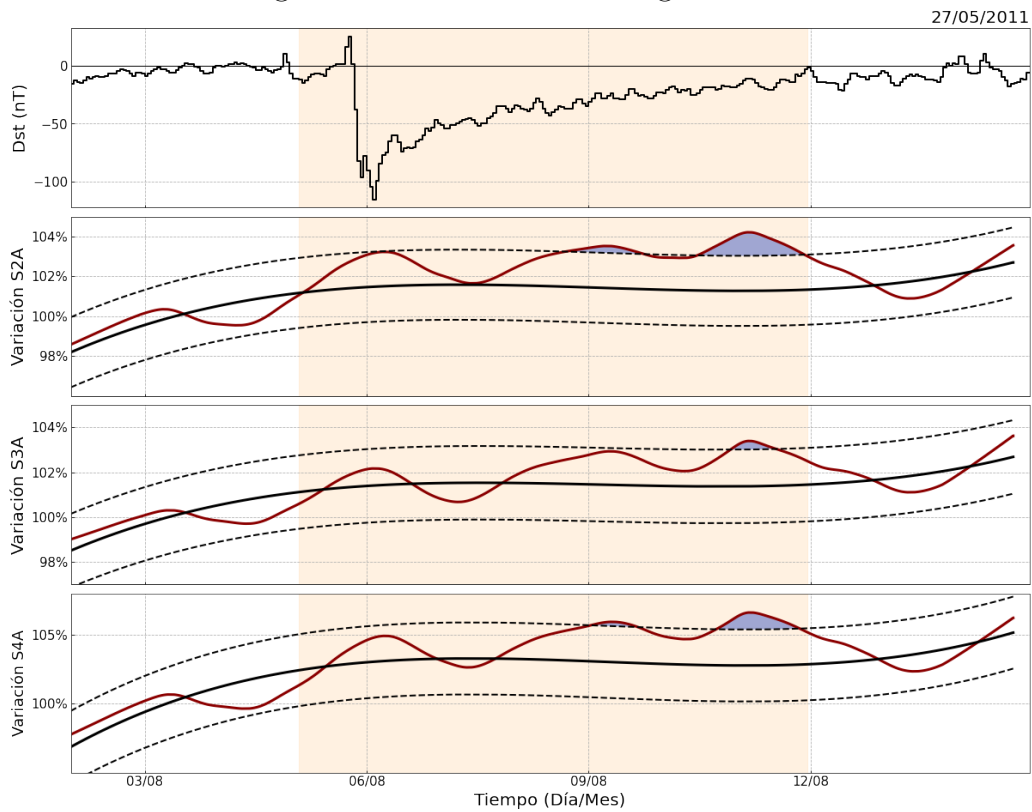


Figura 6.14: Tormenta Geomagnética 29:

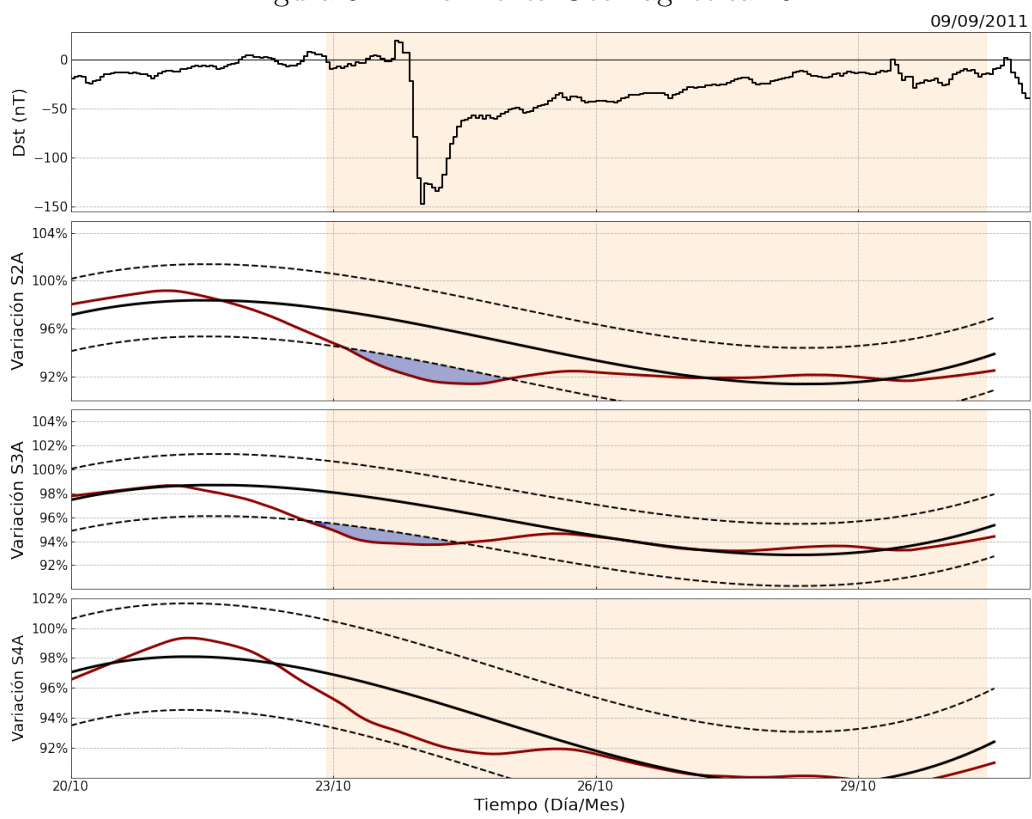


Figura 6.15: Tormenta Geomagnética 32:

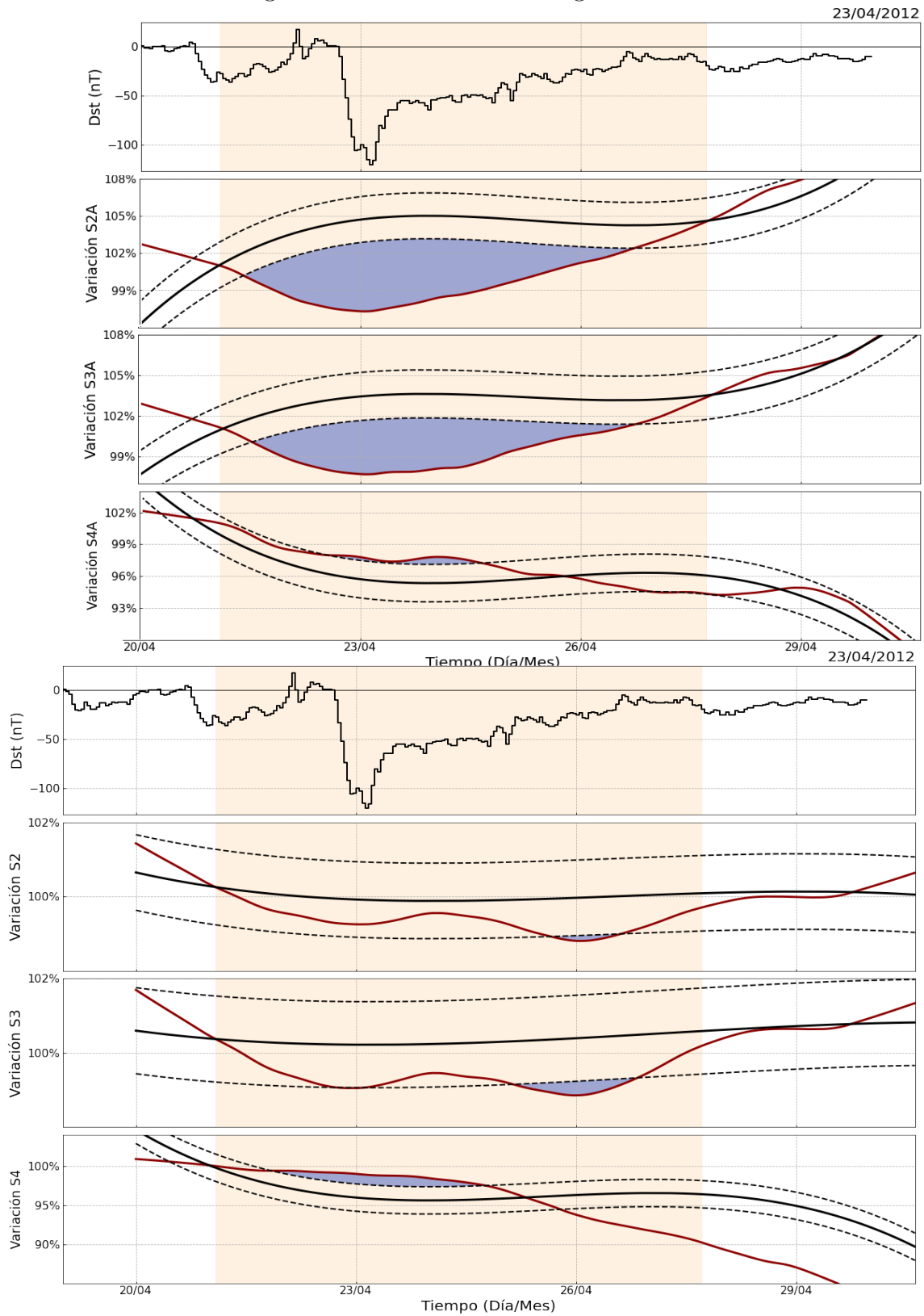


Figura 6.16: Tormenta Geomagnética 33:

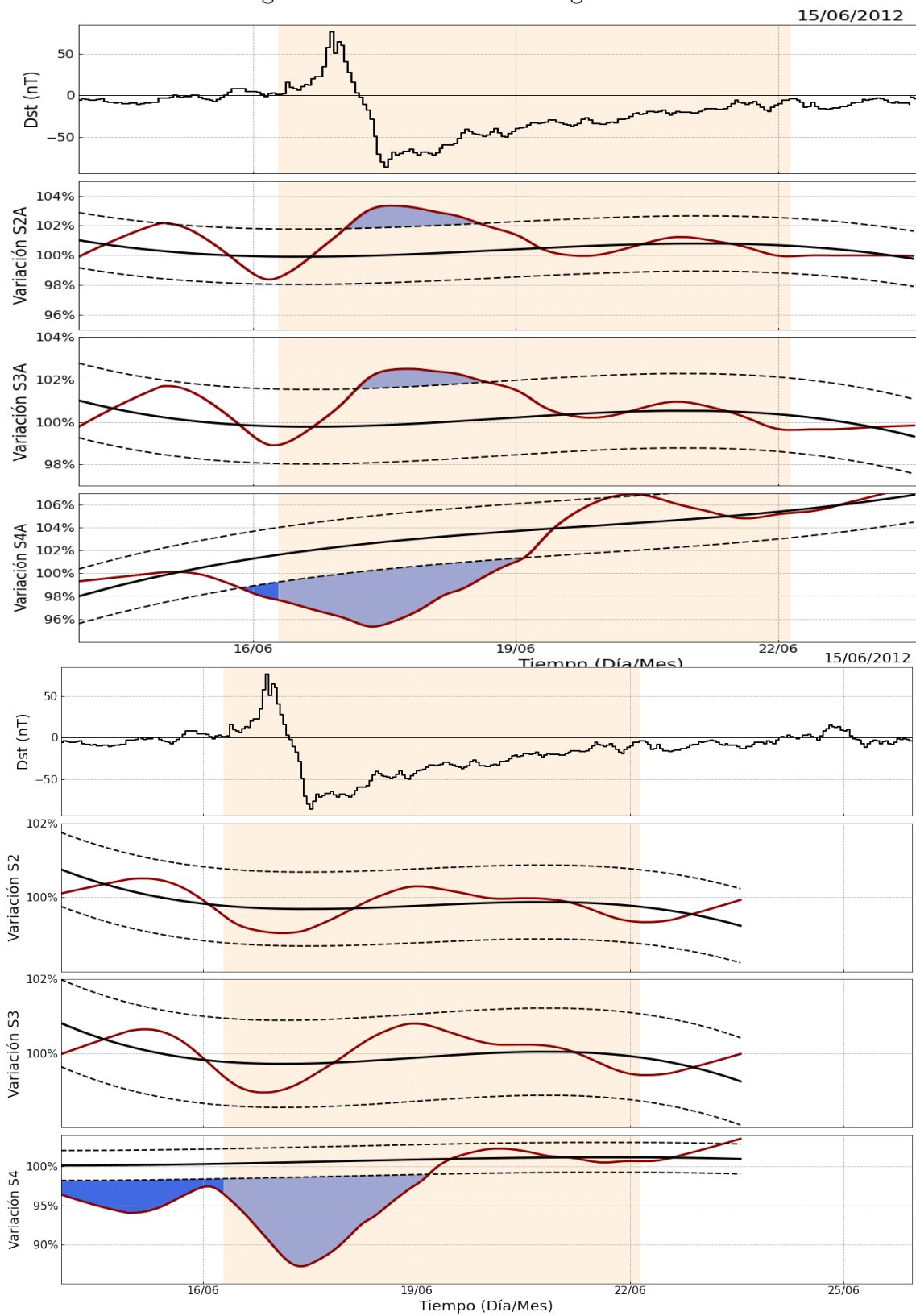


Figura 6.17: Tormenta Geomagnética 39:

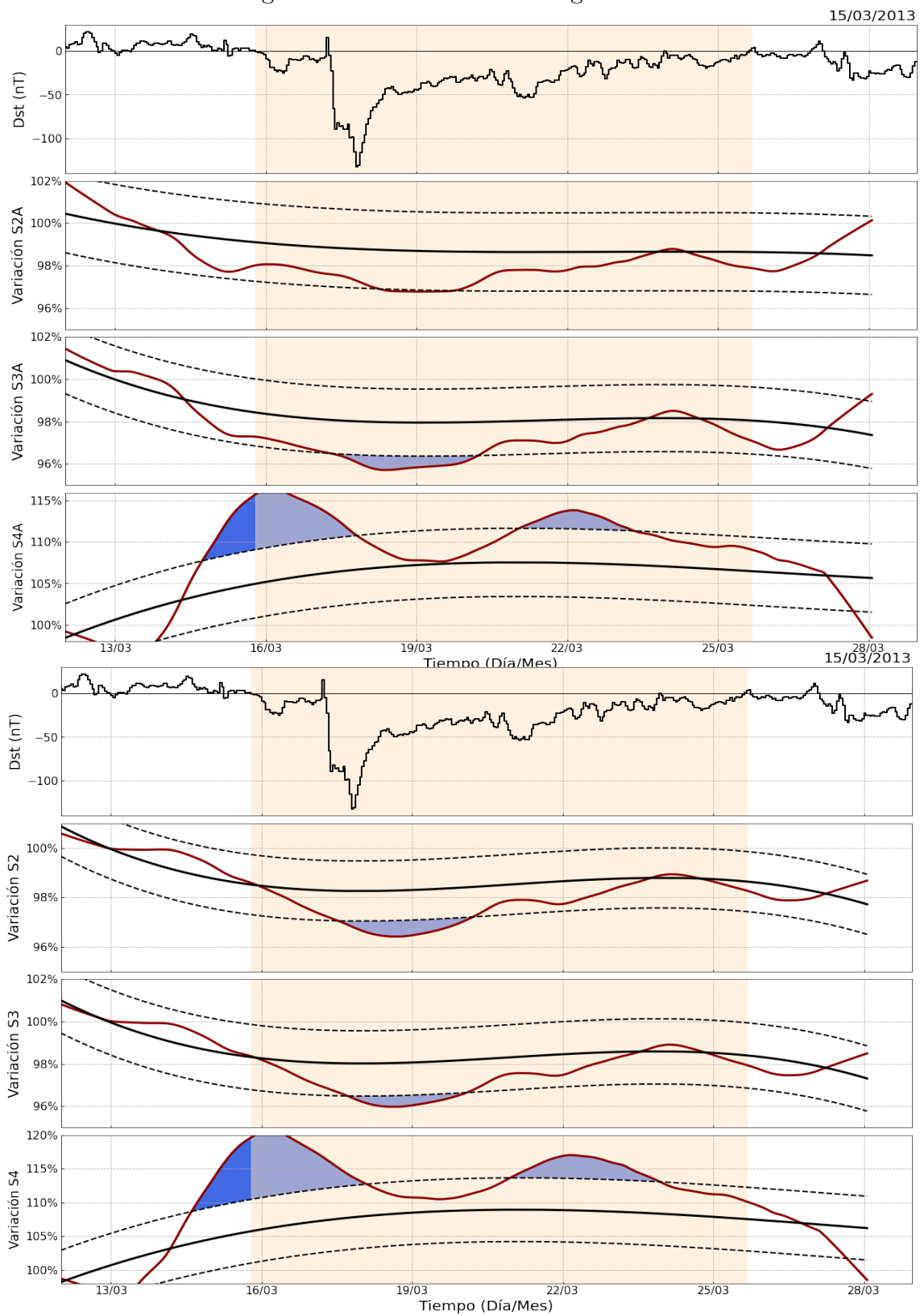


Figura 6.18: Tormenta Geomagnética 40:

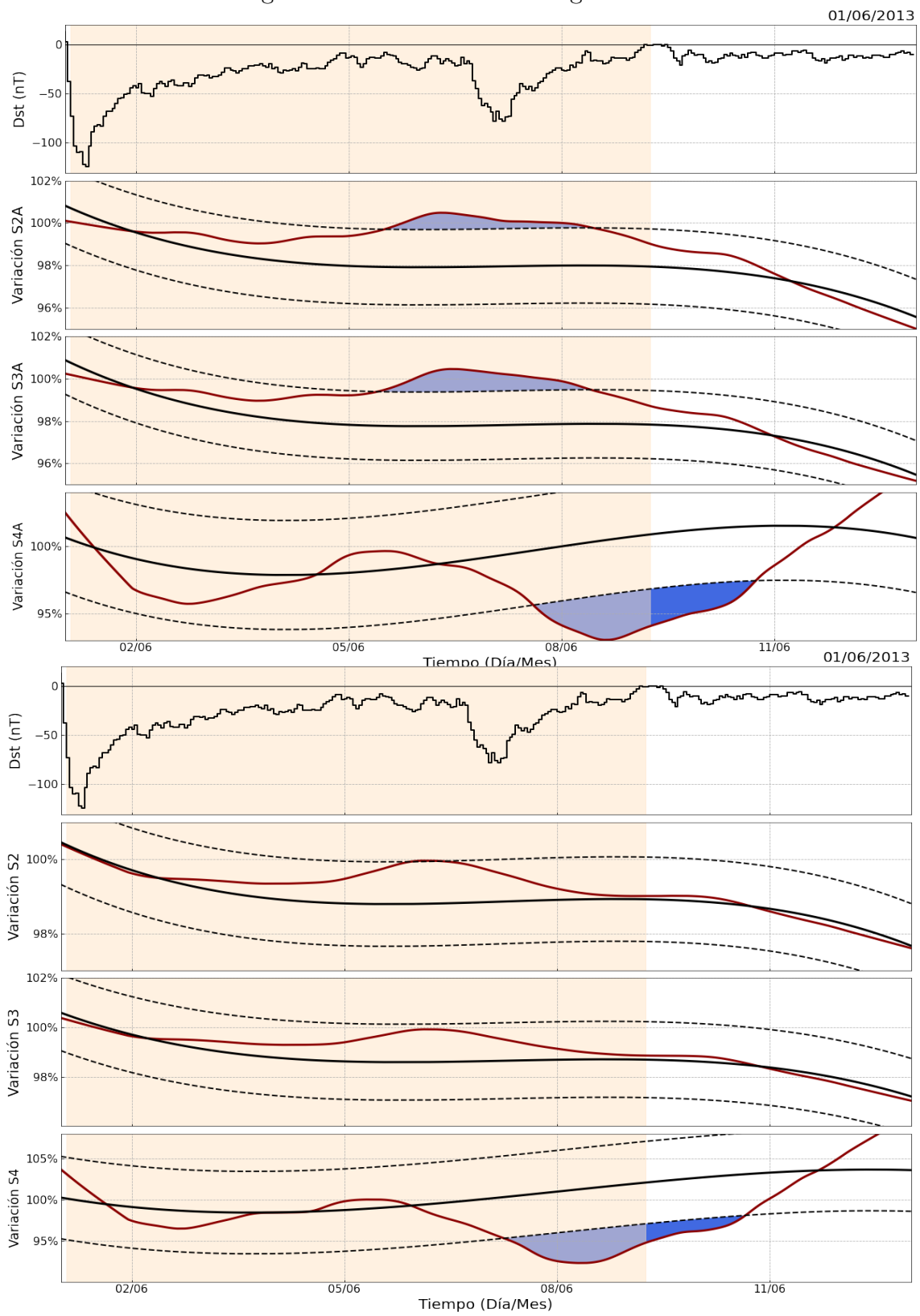


Figura 6.19: Tormenta Geomagnética 44:

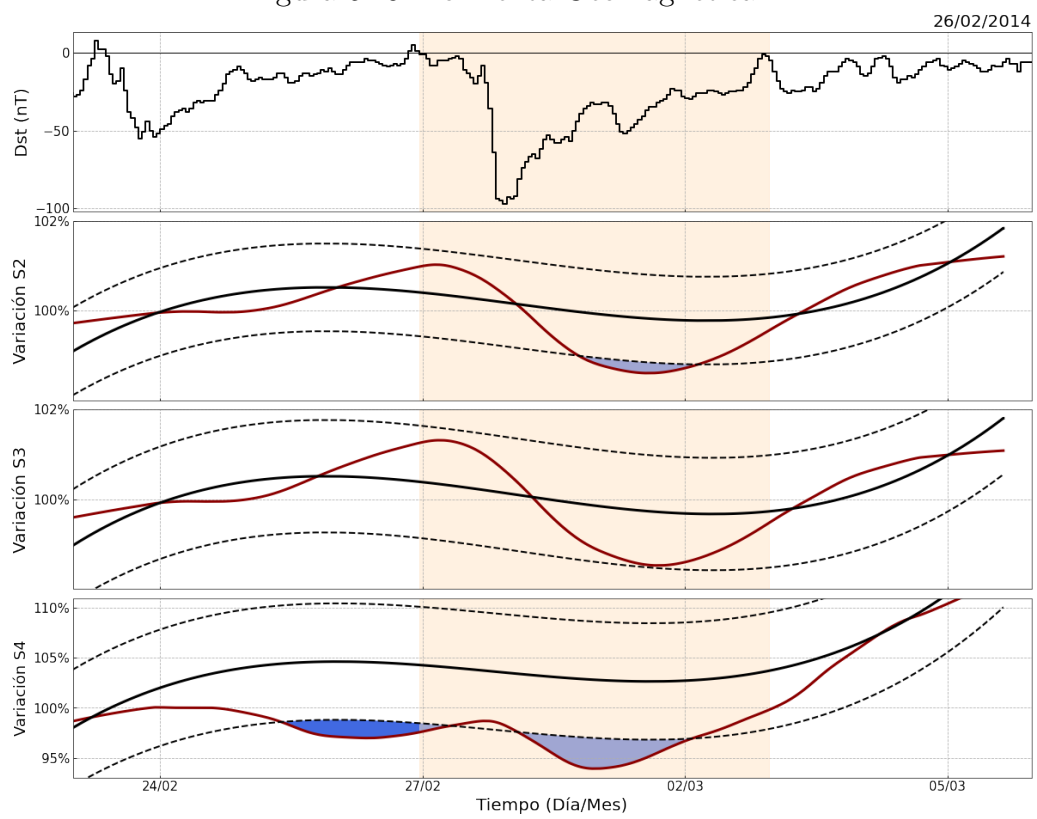




Figura 6.20: Tormenta Geomagnética 46:

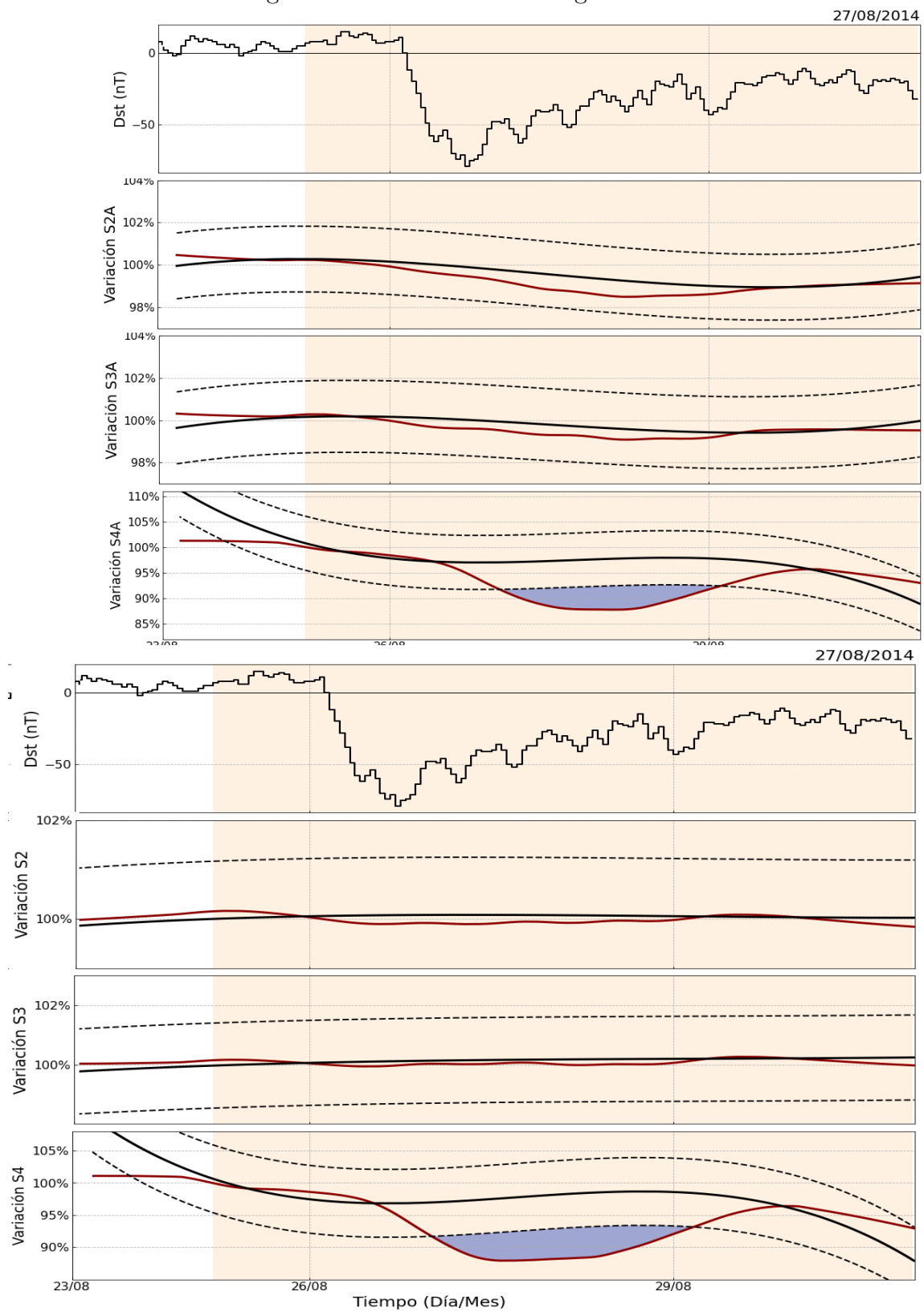


Figura 6.21: Tormenta Geomagnética 47:

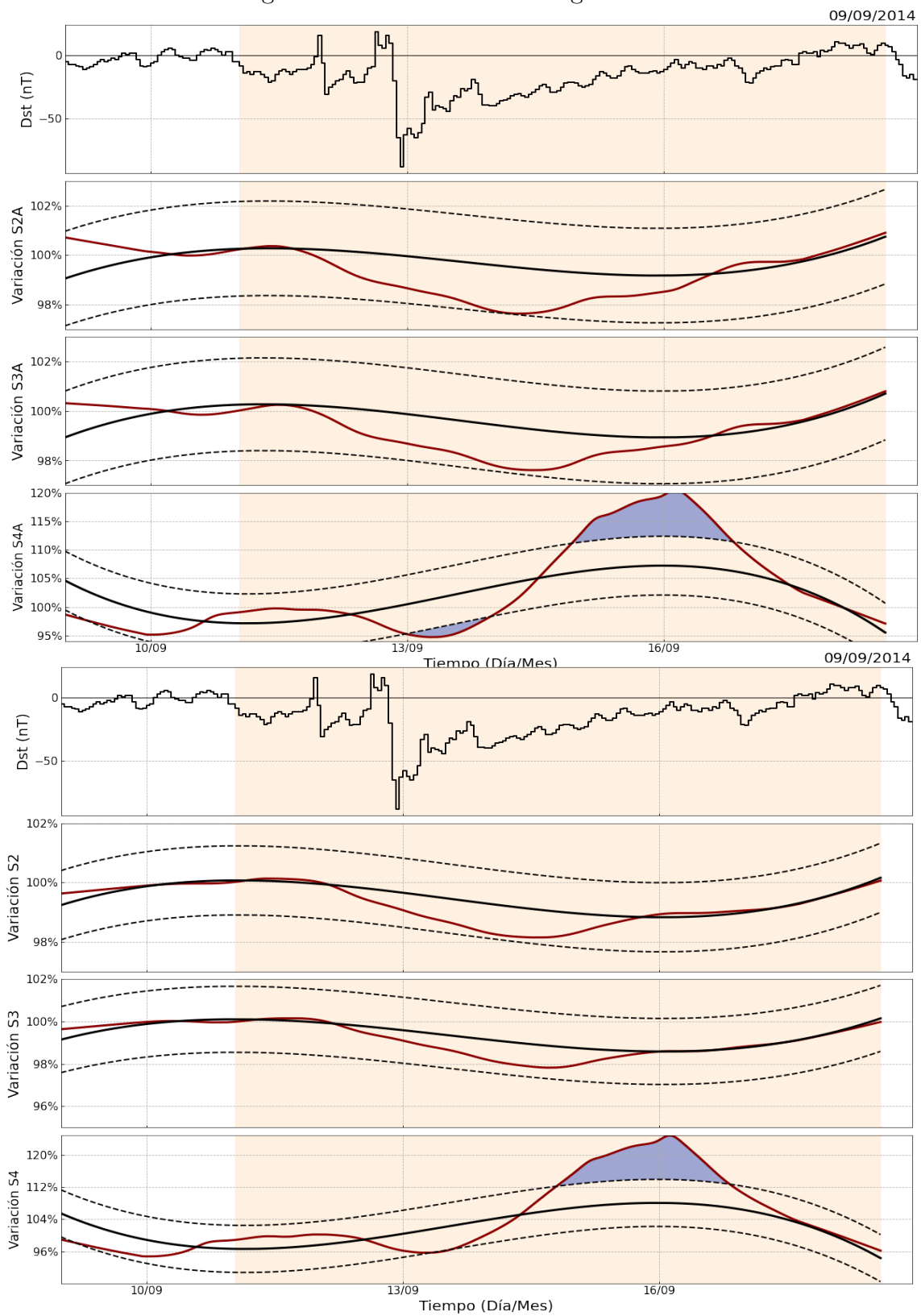


Figura 6.22: Tormenta Geomagnética 49:

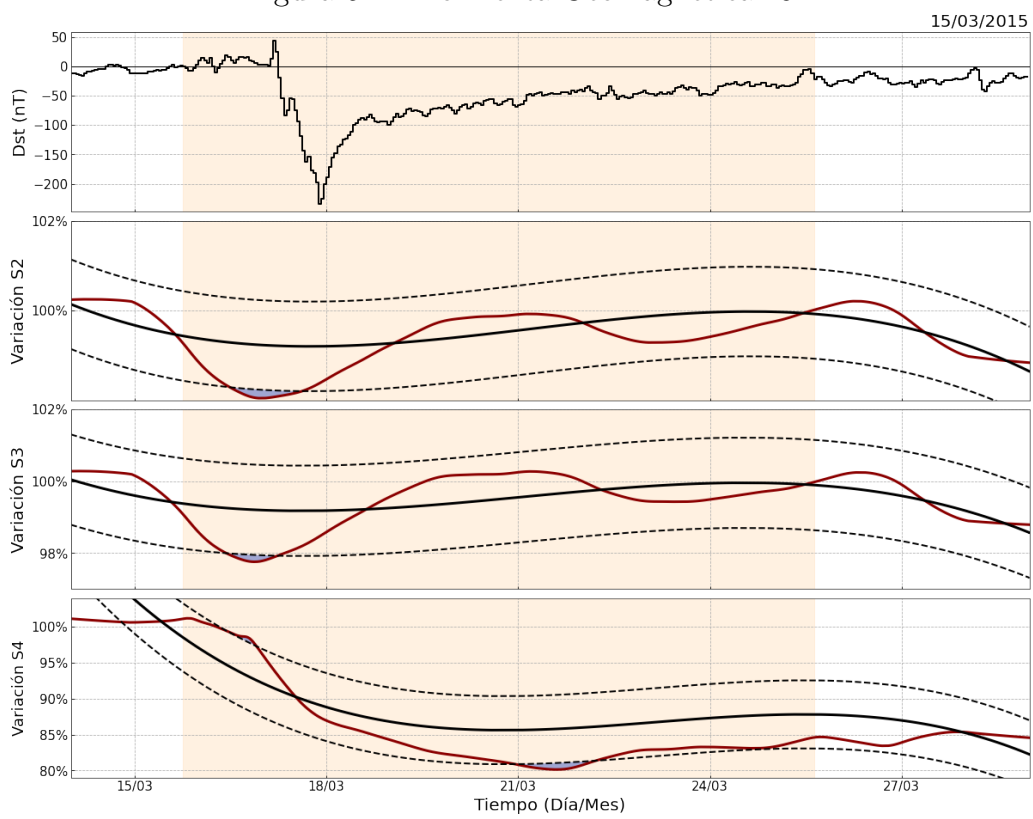


Figura 6.23: Tormenta Geomagnética 50:

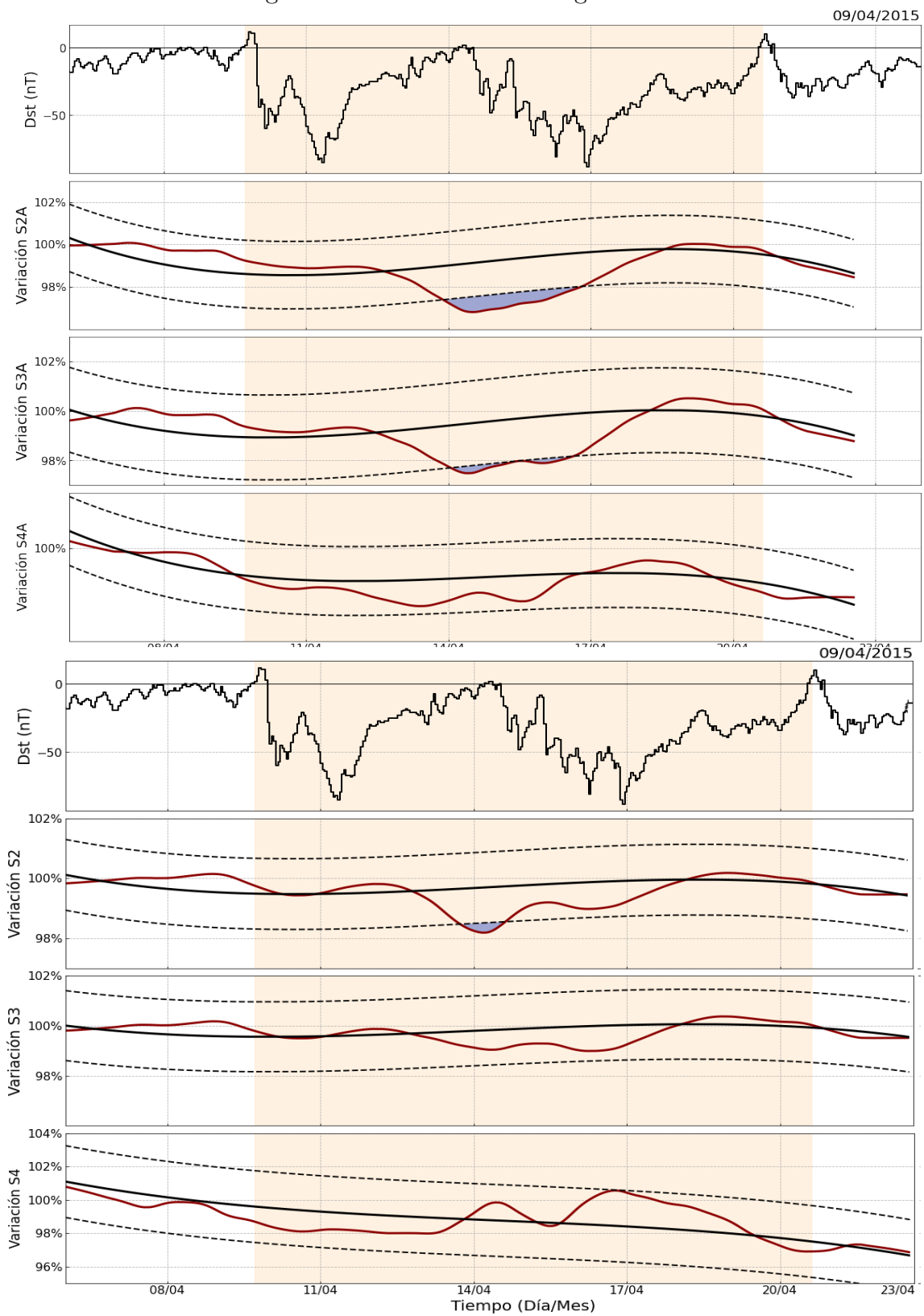


Figura 6.24: Tormenta Geomagnética 55:

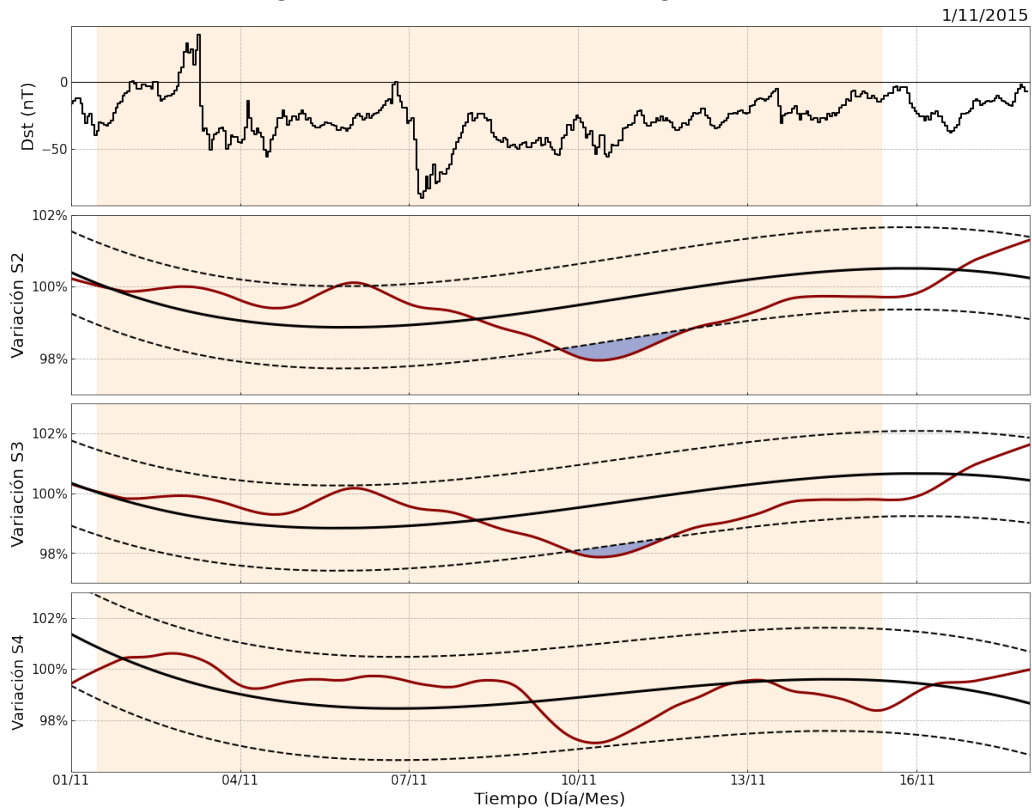
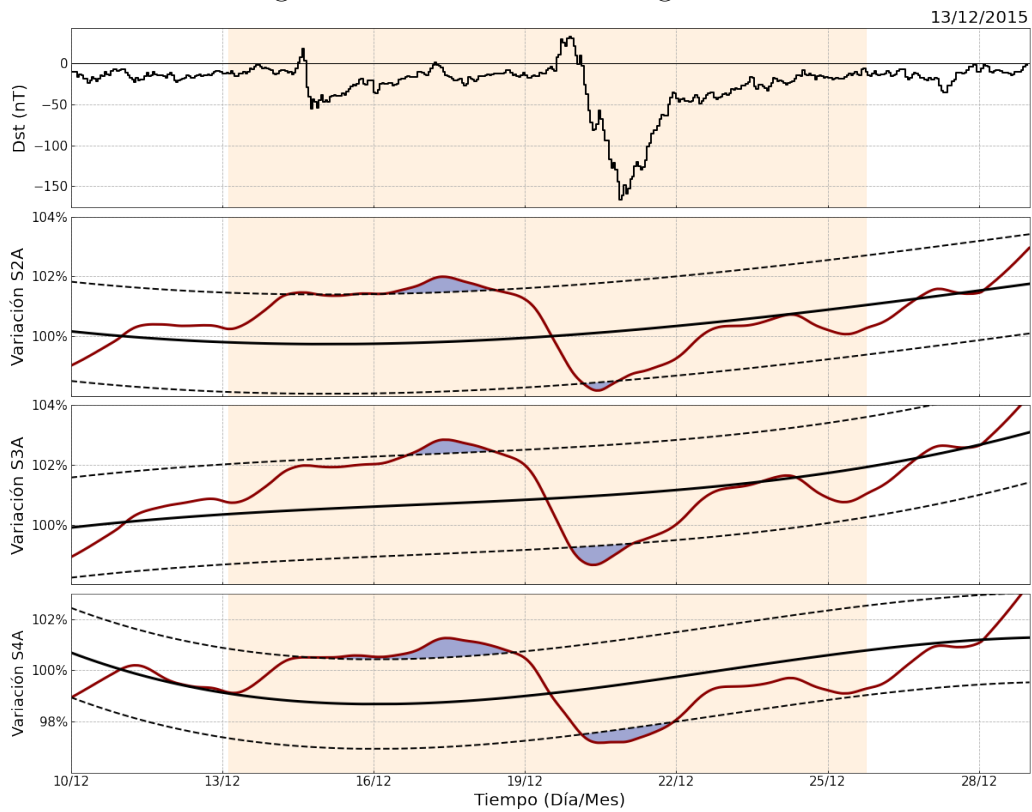


Figura 6.25: Tormenta Geomagnética 56:



# Referencias

- [1] Gonzalez, W. D., and B. T. Tsurutani (1987), Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ( $Dst < 100nT$ ), Planet. Space Sci., 35, 1101–1109.
- [2] Spohn, T., Breuer, D., & Johnson, T. V. (Eds.). (2014). Encyclopedia of the Solar System (3rd ed.). Elsevier.
- [3] National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). Solar Science: The Solar Interior. Retrieved from <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>
- [4] Moldwin, M. B. (2008). An Introduction to Space Weather. Cambridge University Press.
- [5] Gonzalez, W. D., B. T. Tsurutani, and A. L. Clua de Gonzalez (1999), Interplanetary origin of geomagnetic storms, Space Sci. Rev., 88, 529–562
- [6] Kamide, Y., & Chian, A. C. (2007). Handbook of the solar-terrestrial environment. Springer.
- [7] Sheeley Jr., N. R., Walters, J. H., Wang, Y.-M., & Howard, R. A. (1999). Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 104(A10), 23,095–23,107. <https://doi.org/10.1029/1999JA900282>
- [8] Parker, E. (1964). The Passage of Energetic Charged Particles Through Interplanetary Space. Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies and Department of Physics, University of Chicago. Chicago, Illinois. Planet. Space Sci. 1965. Vol. 13, pp. 9 to 49.
- [9] Potgieter, M.S. Solar Modulation of Cosmic Rays. Living Rev. Sol. Phys. 10, 3 (2013). <https://doi.org/10.12942/2013-3>
- [10] Lockwood, J. A. (1971). Forbush decreases in the cosmic radiation. Reviews of Geophysics, 9(2), 177–208. doi: 10.1029/RG009i002p00177
- [11] Ritter, P., Lühr, H., and Doornbos, E. (2010). Substorm-related thermospheric density and wind disturbances derived from CHAMP observations. Ann. Geophys. 28, 1207–1220. doi:10.5194/angeo-28-1207-2010
- [12] Perea Contreras, S. (2021). Firmas de las afectaciones al Clima Espacial con base en el Observatorio de Rayos Cósmicos en Sierra Negra. Tesis para el grado de Maestría. Ciudad Universitaria, CDMX.

- [13] Valdés-Galicia, J. F., Muraki, Y., Tsujihara, H., Sako, T., Musalem, O., Hurtado, A., et al. (2004). An improved solar neutron telescope installed at a very high altitude in Mexico. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 535, 656.
- [14] Archive of Solar Terrestrial Activity Reports. Retrieved from [https://solen.info/solar/old\\_reports/](https://solen.info/solar/old_reports/)
- [15] Universetoday.com. (n.d.). The Sun. Retrieved from <https://www.universetoday.com/16338/the-sun/:text=The%20interior%20of%20the%20Sun,a%20photosphere%2C%20and%20an%20atmos>
- [16] NASA Marshall Space Flight Center. (n.d.). The Sunspot Cycle. Retrieved from <https://solarscience.nasa.gov/>
- [17] Helioviewer.org. Retrieved from <https://www.helioviewer.org/>
- [18] UCAR Center for Science Education. (n.d.). The Sun's Corona: Solar Min to Solar Max. Retrieved from <https://scied.ucar.edu/image/suns-corona-solar-min-solar-max>
- [19] NASA. (2019, July 30). SDO Shows Active Regions Across Front of Sun. Retrieved from <https://www.nasa.gov/feature/sdo-shows-active-regions-across-front-of-sun>
- [20] National Radio Astronomy Observatory. (2013, October 1). ALMA Observations Reveal Unusual Composition of Interstellar Comet 2I/Borisov. Retrieved from <https://public.nrao.edu/news/10-01-13-11-51-4/>
- [21] NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. (2015). Earth's Seasons [Video]. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/11811>
- [22] Cosmos - The SAO Encyclopedia of Astronomy. (n.d.). Cosmic Ray Energies. Swinburne University of Technology. Retrieved from <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/c/cosmic+ray+ener>
- [23] González, L. X. (2010). El Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra y Aceleración de Iones en la Atmósfera Solar (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [24] Silso. (n.d.). SILSO Datafiles. Retrieved from <https://www.sidc.be/silso/datafiles>
- [25] University of Delaware, Bartol Research Institute. (n.d.). Bartol Cosmic Ray Group. Retrieved from <https://neutronm.bartol.udel.edu/>
- [26] Heber, B. (2014). Radiation Field in Low Earth Orbit: Measurements from MATROSHKA DOSTEL onboard ISS [Doctoral dissertation, University of Cologne]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.>
- [27] Wrbanek, J. D., & Wrbanek, S. (2020). Space Radiation and Impact on Instrumentation Technologies (NASA/TP—2020-220002).
- [28] Gonzalez, W. D., B. T. Tsurutani, and A. L. Clua de Gonzalez (1999), Interplanetary origin of geomagnetic storms, *Space Sci. Rev.*, 88, 529–562
- [29] Jursa, A. S. (1985). *Handbook of Geophysics and the Space Environment*. 4th edition. Air Force Geophysics Lab., Hanscom AFB, MA.
- [30] University of California, Los Angeles (UCLA). (n.d.). Magnetic Index. Retrieved from [http://lucid.igpp.ucla.edu/lessons/ess265/Week03\\_PDF&CDF/Lect03\\_MagIndex.htm](http://lucid.igpp.ucla.edu/lessons/ess265/Week03_PDF&CDF/Lect03_MagIndex.htm)

- [31] GFZ German Research Centre for Geosciences. (n.d.). Kp and ap indices - Data since 1932. [https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/Kp\\_ap\\_AP5NF107\\_since1932.txt](https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/Kp_ap_AP5NF107_since1932.txt)
- [32] Miyake, Y., Kataoka, R., & Miyoshi, Y. (2021). 27-day Variation of Galactic Cosmic Ray-Induced Secondary Cosmic Rays Observed by the GRAPES-3 Experiment. *Space Weather*, 19, e2020SW002641. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- [33] Valdés-Galicia, J. F., Muraki, Y., Tsujihara, H., Sako, T., Musalem, O., Hurtado, A., González, L. X., Matsubara, Y., Watanabe, K., Hirano, N., Tateiwa, N., Shibata, S., & Sakai, T. (2013). An improved solar neutron telescope installed at a very high altitude in México. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 729, 764-771. doi:10.1016/j.nima.2013.07.007
- [34] NOAA Space Weather Prediction Center. (n.d.). Solar Cycle Progression. Retrieved from <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [35] SolarHam. (n.d.). SolarHam.com - Solar Cycle 25 - Space Weather - Amateur Radio - Real Time & News. Retrieved from <https://www.solarham.net/>
- [36] Labrenz, J. (2014). Radiation Field in Low Earth Orbit: Measurements from MATROSHKA DOSTEL onboard ISS. doi:10.13140/RG.2.2.11166.18246
- [37] Zhang, Y., Sun, W., Feng, X. S., Deehr, C. S., Fry, C. D., & Dryer, M. (2011). Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116, A11108. <https://doi.org/10.1029/2011JA016602>
- [38] Richardson, I. G., Webb, D. F., Zhang, J., Berdichevsky, D. B., Biesecker, D. A., Kasper, J. C., Kataoka, R., Steinberg, J. T., Thompson, B. J., Wu, C.-C., & Zhukov, A. N. (2017).
- [39] Kyoto World Data Center for Geomagnetism. (n.d.). Dst Index - Kyoto World Data Center for Geomagnetism. Retrieved from <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>
- [40] Major geomagnetic storms ( $Dst - 100nT$ ) generated by corotating interaction regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 13,406–13,424. <https://doi.org/10.1002/2017JA021000>
- [41] Grandin, M., Aikio, A. T., & Kozlovsky, A. (2016). Properties and geoeffectiveness of solar wind high-speed streams and stream interaction regions during solar cycles 23 and 24. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 11,452–11,471. <https://doi.org/10.1002/2016JA021000>
- [42] Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (2011). *The Feynman Lectures on Physics: New Millennium Edition*. California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer. Basic Books.
- [43] Golub, L. D., & Pasachoff, J. M. (2010). *The Solar Corona* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [44] Cairns, I. (n.d.). Lecture 14 - Cosmic Rays - Interactions with Matter. Retrieved from <http://www.physics.usyd.edu.au/cairns/teaching/lecture14/node4.html>



- [45] Chu, W., Yang, Y., Xu, S., Qin, G., Huang, J., Zeren, Z., & Shen, X. (2022). Study on Long-Term Variation Characteristics of Geomagnetic Cutoff Rigidities of Energetic Protons Caused by Long-Term Variation of Geomagnetic Field. *Advances in Space Research*, 69(3), 1136-1143. doi: 10.1016/j.asr.2021.10.021
- [46] Watanabe, K., Muraki, Y., Matsubara, Y., Murakami, K., Sako, T., Tsuchiya, H., ... Shirasaki, Y. (2002). Solar Neutron Event in Association with a Large Solar Flare on 2000 November 24. *The Astrophysical Journal*, 580(2), L185-L188. <https://doi.org/10.1086/345847>
- [47] Planetary Science Institute. (2001, December 13). Solar Neutron Event Produced by November 2000 Flare [Press release]. Retrieved from <https://www.psi.edu/news/solarneutrons>
- [48] Alves, M. V., Echer, E., & Gonzalez, W. D. (2011). Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(2-3), 219-224. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.017>
- [49] SolarMonitor.org. (n.d.). Retrieved from <https://solarmonitor.org/>
- [50] Heber, B., Sanderson, T. R., & Zhang, M. (2018). Corotating interaction regions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 172, 45-62. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.010>
- [51] Particle Data Group. (2020). Review of Particle Physics. *Physical Review D*, 98(3), 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>
- [52] Jursa, A. S. (Ed.). (1985). *Handbook of Geophysics and the Space Environment*. Air Force Geophysics Laboratory, U.S. Air Force Systems Command.
- [53] Applied Physics Laboratory (APL). (n.d.). Space Weather Index. Johns Hopkins University. Retrieved June 12, 2023, from <https://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index/>
- [54] Cholis, I., & McKinnon, I. (2019). Constraining the Charge-, Time- and Rigidity-Dependence of Cosmic-Ray Solar Modulation with *AMS – 02* Observations during Solar Cycle 24. *The Astrophysical Journal*, 881(1), 7. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2b0a>
- [55] González, L. X., Sánchez, F., & Valdés-Galicia, J. F. (2009). Geant4 simulation of the solar neutron telescope at Sierra Negra, Mexico. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 608(1), 111 – 116. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.040>
- [56] Barrantes, M., Valdés-Galicia, J. F., Musalem, O., Hurtado, A., Anzorena, M., García, R., Taylor, R., Muraki, Y., Matsubara, Y., Sako, T., Sasai, Y., Hinaro, N., Tateiwa, N., Tsujihara, H., González, L. X., Ortiz, E., Shibata, S., Watanabe, K., & Sakai, T. (2013). Atmospheric corrections of the cosmic ray fluxes detected by the Solar Neutron Telescope at the Summit of the Sierra Negra Volcano in Mexico. *Advances in Space Research*, 52(2), 320-330. doi: 10.1016/j.asr.2013.03.028