



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

VARIACIONES EN LOS RAYOS CÓSMICOS  
DETECTADOS POR EL OBSERVATORIO DE RAYOS  
CÓSMICOS DE LA CDMX ASOCIADAS CON  
TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS DURANTE EL  
CICLO SOLAR 24

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Licenciada en Ciencias de la Tierra**

PRESENTA:

**Shaden Saray Hernández Anaya**

TUTOR:

Dr. Luis Xavier González Méndez



Ciudad Universitaria, 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Hoja de Datos del Jurado

1. Datos de alumno

Hernández  
Anaya  
Shaden Saray  
55 20 73 60 45  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
310193850

2. Datos del tutor

Dr  
Luis Xavier  
González  
Méndez

3. Datos del sinodal 1

Dr  
Mario  
Rodríguez  
Martínez

4. Datos del sinodal 2

Dra  
Marni Margarita  
Pazos  
Espejel

5. Datos del sinodal 3

Dr  
Julio César  
Mejía  
Ambriz

6. Datos del sinodal 4

Dr  
Ernesto  
Ortíz  
Fragoso

7. Datos del trabajo escrito

Variaciones en los Rayos Cósmicos Detectados por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la CDMX Asociadas con Tormentas Geomagnéticas Durante el Ciclo Solar 24  
80 p  
2018

*A mi madre: Erika Anaya Rodea, con toda admiración, cariño y gratitud.*



# Agradecimientos

---

Existen mil maneras de agradecer a una persona todo el apoyo que te ha brindado en algún momento de la vida, pero para mí, esta será la mejor manera de hacerlo. Quiero que sepan que cada una de las personas aquí mencionadas son importantes en mi vida, en mi camino, en mis decisiones y en todo lo que soy. Cada una tiene una parte de mi corazón y no me queda más que decirles: ¡¡GRACIAS!!

Comenzaré con la persona que me dió la oportunidad de ser Shaden Saray Hernández Anaya: mi madre. Gracias Erika, por no dejarte vencer y continuar tu camino con mi hermana y conmigo, por enseñarme a ser responsable desde pequeña, por enseñarme que si yo no lo hago, nadie más lo va a ser por mí. Hoy esta es la manera en que recompenso cada día de desvelo, cada hora de trabajo y cada uno de los sacrificios que has hecho por darnos lo mejor a mi hermana y a mí. Eres la mejor madre del universo. Te amo.

Agradezco a mi compañera de vida, mi hermana: Zeltzin, mi Cuca. Quien a pesar de nuestras mil diferencias es quien me mantiene de pie, porque por algo el destino nos mandó a este mundo juntas porque sabía que necesitaría a alguien por quien ser fuerte, a quien enseñar y quien me enseñara que sin importar lo extraño de la vida, nunca estarás solo.

También quiero agradecer a Misa y Nahur que aunque no somos hermanos así crecimos, juntos, en un mundo de prisas en el que, aunque a mí siempre me pusieron de ejemplo para ustedes son ustedes quienes me han dejado mil lecciones que nunca olvidaré.

Pero que hubiera sido de mi madre, mi hermana y yo sin el apoyo de mi familia, GRACIAS a mi mamá Aurora, a mi papá Benito, a mi Tita Rosa y a mi Tito Chucho. Son los mejores abuelos que una persona pueda tener y el mejor apoyo que mi padres tuvieron. Gracias por cuidarnos, querernos y apoyarnos incondicionalmente.

Gracias a mis tíos: Xochitl, Ray, Daniel, Susana y Moy. Cada uno de ustedes me ha enseñado a luchar por lo que quiero, me han enseñado que no hay que rendirse nunca, no importa lo difícil de la situación o que el mundo te diga que no se puede, siempre se puede.

Xochitl, gracias por cuidarme, por preocuparte por mí, gracias por regalarme a dos de las personas más lindas del mundo: Nahur y Brisia.

Ray, gracias por la inspiración y por enseñarme que siempre hay que ser mejor.

Susy y Moy gracias porque es por ustedes que despertó en mí el ser curioso, el querer saber que pasa en la naturaleza, gracias por darme la oportunidad de conocer lugares increíbles en el país, por vivir grandes aventuras en mi infancia, por el apoyo incondicional y por enseñarme que el amor verdadero si existe.

Daniel, gracias por los consejos, por el cuidado y cada aventura.

Gracias a los mejores padrinos del mundo: mi madrina Fausta y mi padrino Juan. Sobre todo, gracias por esas tres mujeres tan maravillosas: Bety, Gaby y Fer, a quienes les debo mil consejos, mil aventuras y mil recuerdos de mi infancia y quienes después de 23 años siguen estando presentes en mi vida con tanto cariño, apoyo y ejemplo.

Quiero agradecer a Filiberto, quien siempre ha estado para mi madre, mi hermana y para mí. Gracias por los paseos, por ayudar en mis tareas, por ir hasta el fin del mundo a buscar lo que necesitábamos, pero sobre todo por estar.

Tal vez en la lista de mi familia sea el último en ser mencionado, pero no por eso es el menos importante. Gracias papá: Jesús. Porque a pesar de no estar muy presente en mi vida, me dejaste algo muy importante, algo que nunca voy a olvidar y que hoy puedo decir con orgullo. Alguna vez me dijiste “Cuando te pregunten qué quieres ser de grande, nunca digas que quieres ser alguien en la vida, porque tú ya eres alguien en la vida, eres Shaden, tú responde qué quieres hacer con tu vida” Y hoy sé que quiero hacer con mi vida y si volviera a ser niña y me lo volvieran a preguntar yo diría: “Yo ya soy alguien en la vida, soy Shaden y quiero ser Científica de la Tierra”.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Escuela Nacional Preparatoria No.5 “José Vasconcelos” y a la Facultad de Ciencias, que más que brindarme una educación casi gratuita y de excelente calidad me ha regalado los mejores momentos de mi vida y me ha dado una nueva familia. Porque que hubiera sido de mi en este camino de la vida que se llama escuela sin mis amigos, amigos verdaderos.

Gracias a Dann, Isaac, Cesar, Astrid, Ale y Vero por esas aventuras en la prepa y porque con ustedes aprendí que nunca hay que dejar de reír a carcajadas así estemos destrozados por dentro.

Gracias Martha, mi mejor amiga, porque contigo he compartido mi vida desde el primer día que nos volvimos parte de esta universidad. Te agradezco por escuchar mis historias interminables con tanta atención y gusto, por reír y llorar conmigo, pero sobre todo por creer en mí. Que aunque la vida universitaria nos ha distanciado un poco, siempre estamos al pendiente una de la otra y compartimos algunas preocupaciones de la vida.

Gracias a Sandra por ser una misma y convertirnos en Shandra, gracias por tantas aventuras, risas, lloraderas, fiestas, bailes, consejos, regaños, por todo.

Gracias Edson porque sin ti no hubiera terminado este trabajo, gracias por tanta paciencia al enseñarme y ayudarme con aquellas tareas que no entendía, sin duda eres el mejor profesor

que pude tener y el mejor amigo.

Julieta, mi primera compañera de equipo en la carrera y una de las personas más importantes en este camino.

Gracias Julio y Aldichi porque sin ustedes no sé qué me hubiera pasado en las prácticas de campo.

Gracias también a Monse, Orlando, Claudia y todos los espacialitos que son especiales: Karina, Diego, Abel.

Gracias a todos aquellos que alguna vez compartieron algo de la carrera conmigo y me enseñaron algo nuevo.

Gracias Griselda porque sin ti R hubiera acabado conmigo y por ayudarme a usar la magia que LaTeX, más que una compañera ya eres una amiga para mí.

Donovan, gracias por enseñarme a ver el mundo desde otra perspectiva y por tu apoyo en los últimos meses.

Y en este último periodo donde la realización de este trabajo exigía mayor disciplina y concentración, gracias Luis por hacer que no me rindiera, por inspirarme a escribir, por ayudarme a comprender cosas que no entendía, pero sobre todo por hacer que creyera en mí y en mi trabajo. Me has enseñado tanto.

Gracias al Dr. Luis Xavier por aceptarme en su grupo de trabajo, por la paciencia, la inspiración y todo el apoyo brindado en esta etapa que hoy, al fin rinde frutos. Al doctor Valdes-Galicia por confiar en mí y apoyarme mediante su proyecto PAPIIT. A la Dra. Blanca Mendoza por confiar en mi trabajo. Gracias a Lupita por el apoyo con esos trámites engorrosos, y gracias a todo el instituto de Geofísica.

Agradezco cada comentario por parte de mis sinodales y el tiempo que dedicaron a revisar mi trabajo: Dr. Julio Mejía, Dr. Mario Rodríguez, Dra. Marni Pazos y Dr. Ernesto Ortiz.





# Índice general

---

<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Introducción</b>	<b>XV</b>
<b>1. Actividad Solar</b>	<b>1</b>
1.1. Estructura del Sol . . . . .	3
1.1.1. Interior Solar . . . . .	3
1.1.2. Atmósfera Solar . . . . .	4
1.2. Emisiones de la Actividad Solar . . . . .	6
1.2.1. Manchas solares . . . . .	7
1.2.2. Viento solar . . . . .	8
1.2.3. Viento Solar Rápido . . . . .	8
1.2.4. Fulguraciones . . . . .	10
1.2.5. Eyecciones de Masa Coronal . . . . .	11
<b>2. Magnetosfera Terrestre</b>	<b>13</b>
2.1. Campo geomagnético . . . . .	13
2.2. Magnetosfera terrestre . . . . .	15
2.2.1. Estructura de la magnetosfera terrestre . . . . .	16
2.3. Ionosfera . . . . .	17
<b>3. Tormentas Geomagnéticas e Índices Geomagnéticos</b>	<b>21</b>
3.1. Índices geomagnéticos . . . . .	21
3.1.1. Índice Kp . . . . .	22
3.1.2. Índice Ap . . . . .	22
3.1.3. Índice AE . . . . .	22
3.1.4. Índice Dst . . . . .	23
3.2. Tormentas geomagnéticas . . . . .	23
<b>4. Rayos Cósmicos y su Detección</b>	<b>27</b>
4.1. Introducción . . . . .	27
4.2. Rayos Cósmicos . . . . .	28
4.2.1. Rayos Cósmicos Secundarios . . . . .	30
4.3. Variaciones en el flujo de rayos cósmicos . . . . .	32
4.3.1. Variación diurna . . . . .	32
4.3.2. Variación de 27 días . . . . .	32
4.3.3. Variación de 11 años . . . . .	33

---

4.3.4. Decrecimientos Forbush . . . . .	34
4.3.5. Variaciones debidas al campo geomagnético . . . . .	34
4.4. Observatorio de Rayos C3smicos de la Ciudad de M3xico . . . . .	36
4.4.1. Monitor de Neutrones . . . . .	37
4.4.2. Monitor de Neutrones de la CDMX (6-NM64) . . . . .	38
<b>5. An3lisis y Resultados</b>	<b>41</b>
5.1. Selecci3n de Tormentas Geomagn3ticas . . . . .	42
5.2. Eventos analizados . . . . .	45
5.2.1. Evento del 21 de junio 2015 . . . . .	46
5.2.2. Evento del 19 diciembre de 2015. . . . .	50
5.2.3. Evento del 6 de marzo de 2016 . . . . .	53
5.2.4. Evento del 12 de octubre 2016. . . . .	58
5.2.5. Evento de 16 julio 2017. . . . .	62
5.2.6. Evento del 7 de noviembre de 2017. . . . .	66
5.3. An3lisis general . . . . .	70
<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>A. Sistemas de corrientes magnetosf3ricos y ionosf3ricos</b>	<b>73</b>
<b>Referencias</b>	<b>77</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Configuración de las líneas del campo magnético del Sol debida a su rotación diferencial [1]. . . . .	2
1.2. Espiral de Arquímedes descrita por el campo magnético solar [5]. . . . .	2
1.3. Estructura del Sol . . . . .	3
1.4. Manchas solares en la fotosfera solar. . . . .	4
1.5. Cromosfera solar. . . . .	5
1.6. Corona Solar . . . . .	6
1.7. Ciclo Solar . . . . .	7
1.8. Diagrama del Ciclo de Maunder. . . . .	8
1.9. Corona Solar . . . . .	9
1.10. Fulguración . . . . .	10
1.11. Eyección de Masa Coronal . . . . .	11
2.1. Campo magnético de la Tierra [15]. . . . .	13
2.2. Magnetosfera terrestre . . . . .	15
2.3. Magnetosfera Interior de la Tierra . . . . .	17
2.4. Estructura de la ionosfera [1]. . . . .	19
3.1. Fases de una tormenta geomagnética observadas en el índice Dst [1] . . . . .	25
4.1. Espectro de Energía de los Rayos Cósmicos . . . . .	28
4.2. Composición de los Rayos Cósmicos . . . . .	29
4.3. Rayos Cósmicos Secundarios . . . . .	30
4.4. Variación diurna . . . . .	32
4.5. Variación de 27 días . . . . .	33
4.6. Variación de 11 años . . . . .	33
4.7. Decrecimiento Forbush detectado por el monitor de neutrones de la CDMX en junio de 2015. . . . .	34
4.8. Rigidez Umbral planetaria . . . . .	35
4.9. Efecto latitudinal en la Radiación Cósmica . . . . .	36
4.10. Esquema del Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México. Consta de: 6-NM64 y un Telescopio de Muones [28]. . . . .	37
4.11. Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (derecha). Monitor de Neutrones 6-NM64 (izquierda) [24] . . . . .	39
5.1. Firmas de Tormentas Geomagnéticas producidas por CME y CIRs [5]. . . . .	42

5.2. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 21 de junio de 2015. . . . .	48
5.3. Tormenta geomagnética del 21 de junio de 2015. . . . .	49
5.4. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 19 de diciembre de 2015 . . . . .	51
5.5. Tormenta geomagnética del 19 de diciembre de 2015. . . . .	52
5.6. Eyección de Masa Coronal detectada por el Satélite LASCO el 4 de marzo de 2016 a las 09:36:00 TU ( <a href="https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js_lasco.cgi">https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js_lasco.cgi</a> ). . . . .	53
5.7. Hoyo Coronal presente el 6 de marzo de 2016 . . . . .	54
5.8. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 6 de marzo de 2016. . . . .	56
5.9. Tormenta geomagnética del 6 de marzo de 2016. . . . .	57
5.10. Eyección de Masa Coronal y Hoyo Coronal durante la tormenta geomagnética del 12 de octubre de 2016 . . . . .	58
5.11. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 13 de octubre de 2016 . . . . .	60
5.12. Tormenta geomagnética del 12 de octubre de 2016. . . . .	61
5.13. Eyección de Masa Coronal del 14 de julio de 2017 . . . . .	62
5.14. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 16 de julio de 2017 . . . . .	64
5.15. Tormenta geomagnética del 16 de julio de 2017. . . . .	65
5.16. Hoyo coronal presente en la TG del 7 de noviembre de 2017. . . . .	66
5.17. Condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del Viento Solar durante la tormenta geomagnética del 7 de noviembre de 2017 . . . . .	68
5.18. Tormenta geomagnética del 7 de noviembre de 2017. . . . .	69
A.1. Corriente Sq . . . . .	73
A.2. Electrojet ecuatorial . . . . .	74
A.3. Electrojet auroral . . . . .	75
A.4. Corriente de anillo . . . . .	76

# Índice de tablas

---

1.1.	Características del Viento Solar cerca de la órbita de la Tierra ( $\sim 1 UA$ ) [5]. . .	9
1.2.	Clasificación de fulguraciones respecto al flujo de la componente suave de Rayos X [6]. . . . .	11
3.1.	Clasificación de Tormentas Geomagnéticas según la intensidad del índice Dst [9] [22] . . . . .	24
5.1.	Eventos de tormentas geomagnéticas durante la fase descendiente del ciclo solar 24 (años: 2015, 2016 y 2017). . . . .	44
5.2.	Decrecimientos Forbush durante tormentas geomagnéticas de la fase descendente del Ciclo Solar 24. . . . .	45
5.3.	Eventos de tormentas geomagnéticas seleccionados. . . . .	46
5.4.	Eyecciones de Masa Coronal que propiciaron la tormenta geomagnética del 21 de junio de 2015 [47]. . . . .	46



# Resumen

---

Este trabajo se realizó con el objetivo de detectar las variaciones en las cuentas de rayos cósmicos registrados por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México atribuidas a tormentas geomagnéticas con el fin de apoyar al estudio del clima espacial.

Este estudio se enfocó en las tormentas geomagnéticas (TG) moderadas e intensas presentadas durante la fase descendente del Ciclo Solar 24. Se identificaron 33 TG de acuerdo con el índice Dst publicado por el World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>). A partir de éstas, se determinó el periodo a analizar del flujo de rayos cósmicos (RC) registrado por el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX) del Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CDMX) (<http://www.cosmicrays.unam.mx/>), buscando variaciones mayores a 3 veces la desviación estándar ( $3\sigma$ ). Se infirió a que fenómeno solar se atribuye cada una de las TG identificadas, a partir de las condiciones del campo magnético interplanetario (CMI) y del viento solar (VS) obtenidos de OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Las TG son perturbaciones temporales del campo magnético de la Tierra que tienen su origen en procesos energéticos en el Sol como Eyecciones de Masa Coronal (EMC) y Regiones de Interacción Corrotante (RIC) y se desplazan por el medio interplanetario hasta encontrarse con la Tierra. Se observó que cuando el medio interplanetario está dominado por una EMC, las tormentas geomagnéticas son más intensas y el campo magnético sufre una mayor perturbación que la causada por una RIC. Se encontró que durante tormentas geomagnéticas moderadas ( $-50 nT \geq Dst \geq -100 nT$ ) las cuentas de rayos cósmicos tienen un incremento significativo mayor a  $3\sigma$ . Cuando una tormenta geomagnética alcanza la categoría intensa ( $-100 nT > Dst \geq -200 nT$ ) el efecto que sufren los rayos cósmicos es un decrecimiento Forbush, fenómeno donde las cuentas de rayos cósmicos detectados a nivel de tierra disminuyen abruptamente para posteriormente recuperarse.

En general, el flujo de rayos cósmicos detectado por el MN-CDMX se incrementa cuando el campo magnético terrestre se encuentra perturbado porque la rigidez umbral de la Ciudad de México (8.23 GV) disminuye, permitiendo que partículas con menores energías penetren las líneas de campo a nivel de la CDMX.

En este trabajo, observamos que las tormentas geomagnéticas incrementan significativamente el flujo de rayos cósmicos detectados por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México.





# Introducción

---

El analizar las variaciones en las cuentas de Rayos Cósmicos (RC) a través de Monitores de Neutrones (MN) desempeña un papel clave en el estudio y comprensión del clima espacial. El clima espacial como es definido en [1] y [2] se refiere a las condiciones físicas en el Sol, en el viento solar, en el medio interplanetario, la magnetosfera y la ionosfera que pueden influir en el rendimiento y la fiabilidad de sistemas tecnológicos e infraestructura espacial y terrestre.

De esta manera, los RC y sus variaciones funcionan como una medición de las perturbaciones del medio interplanetario, la magnetosfera y la atmósfera terrestre provocadas por la actividad solar y el viento solar [3].

Las tormentas geomagnéticas son un fenómeno inducido por la actividad solar en el que la intensidad del campo magnético terrestre cambia y por lo tanto modula la entrada de RC a la Tierra.

El objetivo de este trabajo es conocer mediante los registros de cuentas de rayos cósmicos del Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX), las variaciones que sufren los RC cuando se presenta una tormenta geomagnética. El MN-CDMX registra partículas con una energía de  $8.23 \text{ GeV}$ , cuando el campo geomagnético no está perturbado. Sin embargo, cuando se genera una TG, las líneas de campo magnético varían su intensidad. Cuando esta intensidad se reduce el MN-CDMX puede registrar partículas de menor energía que normalmente no ingresarían al nivel de la CDMX.

Debido a que las tormentas geomagnéticas tienen su origen en la actividad solar, en el **Capítulo 1** hablamos de las propiedades del Sol y de su actividad.

En el **Capítulo 2** se describe el origen y la estructura de la magnetosfera debido a que es la principal afectada por una tormenta geomagnética.

Este trabajo busca conocer cual es la variación que sufren los rayos cósmicos durante una tormenta geomagnética, por lo que en el **Capítulo 3**, se explica que es una tormenta geomagnética y como los índices geomagnéticos determinan su duración y la intensidad de este fenómeno.

Los rayos cósmicos son el protagonista de este trabajo, por lo que el **Capítulo 4** está dedicado a este tema: composición, energías, componentes, así como la modulación que sufren. En este mismo capítulo se incluye la localización, historia y funcionamiento del Monitor de

Neutrones de la Ciudad de México que forma parte del Observatorio de Rayos C3smicos de la Ciudad de M3xico.

En el *Capitulo 5* se presentan los resultados y an3lisis de este trabajo, terminando con las conclusiones.

# Actividad Solar

---

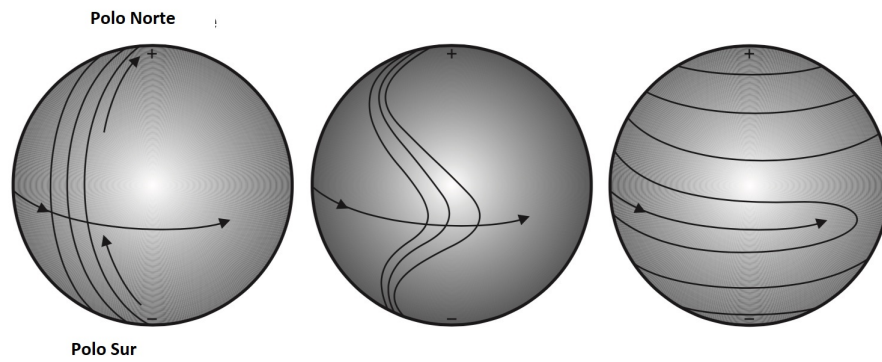
En este primer capítulo hablaremos de las características del Sol y de su actividad, enunciando fenómenos como las fulguraciones, eyecciones de masa coronal y viento solar, los cuales son conexión entre el Sol y la Tierra a través del medio interplanetario, el campo magnético terrestre y la atmósfera terrestre de los cuales se hablará en capítulos posteriores. El Sol y su actividad son la principal fuente de formación de una tormenta geomagnética, fenómeno importante para el desarrollo de esta tesis.

La Tierra está directamente influenciada por la actividad solar. Por lo tanto, al ser el Sol la principal fuente de energía, estudiar y comprender los fenómenos solares es parte fundamental para entender los fenómenos que afectan la Tierra.

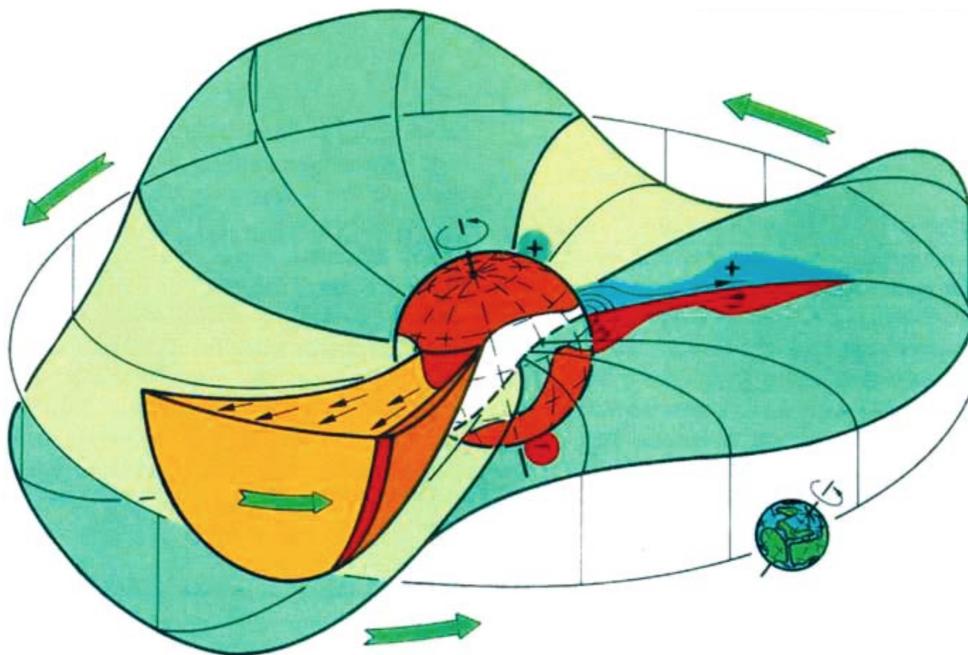
El Sol se formó hace aproximadamente 4500 millones de años, es el 99.8 % de la masa del Sistema Solar y con base en el diagrama Hertzsprung-Russell, es una estrella del tipo G2. Nuestra estrella tiene un diámetro de aproximadamente  $1.39 \times 10^9 m$  y una masa de  $1.989 \times 10^{30} kg$ ; está compuesta principalmente por 92.1 % de hidrógeno y 7.8 % de helio debido a que, como cualquier estrella dentro de la secuencia principal, realiza reacciones termonucleares en su interior y fusiona cuatro átomos de hidrógeno para formar uno de helio y libera  $26.7 MeV$  de energía y neutrinos.

La temperatura y la presión del Sol son tan elevadas que mantienen su material en forma de plasma. El plasma, al ser partículas cargadas en movimiento, produce corrientes eléctricas y estas corrientes producen a su vez campos magnéticos que se expanden por todo el Sistema Solar.

Estas partículas cargadas componen el viento solar (VS), un plasma compuesto principalmente por protones, núcleos de helio y electrones que se alejan de manera supersónica y llevan consigo el campo magnético del Sol. Toda la región del espacio que rodea al Sol y está dominada por el VS y su campo magnético, se conoce como heliosfera. Debido a la rotación diferencial del Sol, en el ecuador gira más rápido que en los polos como se muestra en la figura 1.1; las líneas de campo no son radiales, si no que describen una espiral de Arquímedes centrada en el Sol, figura 1.2. Las partículas fluyen hacia afuera con velocidad constante siguiendo las espirales giratorias [4].



**Figura 1.1:** Configuración de las líneas del campo magnético del Sol debida a su rotación diferencial [1].

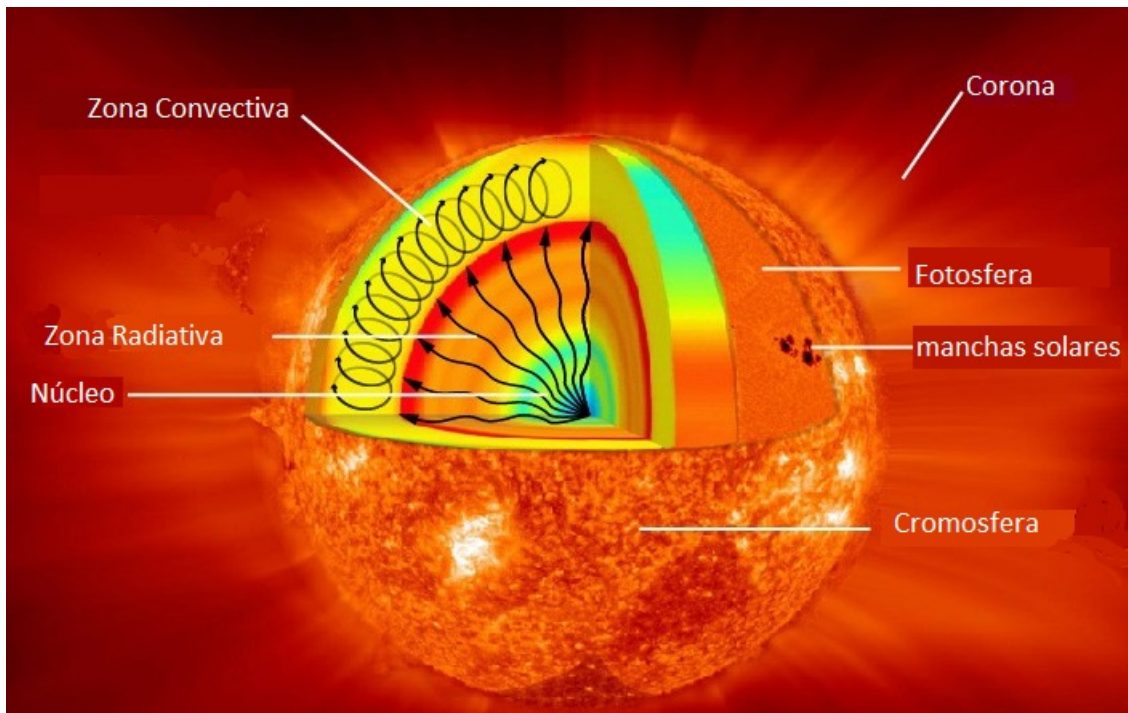


**Figura 1.2:** Espiral de Arquímedes descrita por el campo magnético solar [5].

## 1.1. Estructura del Sol

El Sol produce energía que abarca todo el espectro electromagnético y debido a que no es homogéneo en densidad y temperatura, el transporte de toda esta energía se da por diferentes mecanismos como la radiación y la convección. Estas diferencias nos permiten dividir el interior y el exterior solar en distintas capas [6].

### 1.1.1. Interior Solar



**Figura 1.3:** Estructura del Sol. Modificado de <https://www.nasa.gov/mission-pages/sunearth/science/sunlayers.htm>.

**Núcleo:** Es aproximadamente  $\frac{1}{3}$  del radio solar ( $200000 \text{ km}$ ). La temperatura es de  $1.56 \times 10^7 \text{ K}$  y la presión aproximadamente  $2.5 \times 10^{11} \text{ atm}$  [7]. Aquí se produce la mayor parte de energía solar mediante reacciones nucleares, es decir, núcleos ligeros se fusionan en núcleos más pesados cuya masa es más pequeña que la masa de sus constituyentes donde la pérdida de masa se transforma en energía de acuerdo con  $E = mc^2$  [6].

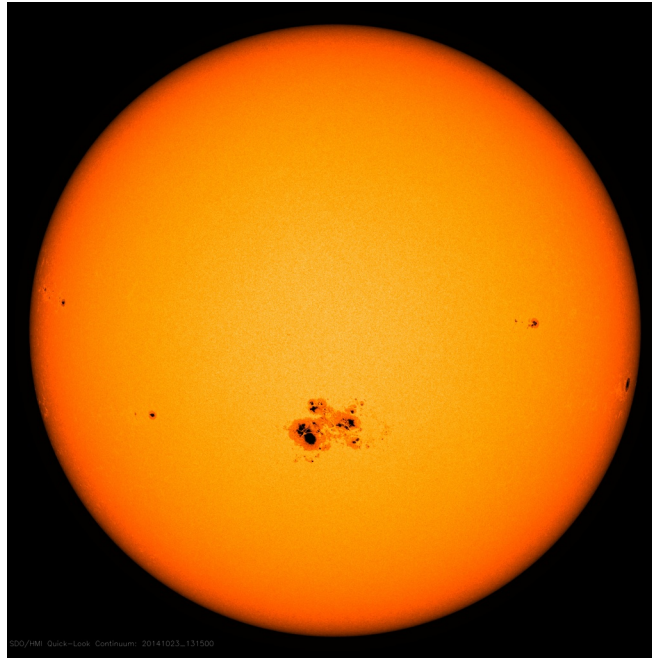
Principalmente las reacciones nucleares que se producen en el Sol son la reacción protón-protón que genera cerca del 99 % de la fusión del Sol y el 1 % restante se lleva a cabo mediante el ciclo CNO. La reacción protón-protón se lleva a cabo mediante núcleos de hidrógeno que se encuentran libres en el núcleo solar y cuando llegan a colisionar producen un núcleo de helio. El helio contiene dos protones y dos neutrones.

**Zona de radiación o radiativa:** Se extiende desde los  $0.25 R_S$  y hasta los  $0.8 R_S$ . En esta región la energía resultante de la fusión nuclear se emite en forma de rayos gamma, la forma más energética de radiación electromagnética. A medida que los rayos gamma atraviesan el Sol, colisionan, se absorben, son emitidos por el material en la zona radiativa y pierden energía, hasta salir de la fotosfera en forma de luz visible.

**Zona de convección:** Se localiza después de los  $0.8 R_S$  y llega a la fotosfera. Aquí la transferencia de calor se lleva a cabo por el mecanismo de convección, la temperatura cambia de los  $2 \times 10^6 K$  en la zona mas baja a los  $5800 K$  en la superficie. Las celdas convectivas que resultan en este intercambio de plasma caliente y frío forman columnas térmicas desde  $1000 km$  hasta  $30000 km$  de diámetro, que se muestran en la superficie solar en forma de granulación o supergranulación, respectivamente [8].

### 1.1.2. Atmósfera Solar

**Fotosfera:** comienza en la superficie y se extiende hasta  $500 km$ ; emite en su totalidad en el visible. La temperatura promedio de esta capa es de  $6000 K$ . En esta capa se localizan regiones oscuras de menor temperatura que el resto de la fotosfera, estas regiones son llamadas manchas solares, figura 1.4. Éstas son originadas por fuertes campos magnéticos radiales que afloran al nivel de la fotosfera con una intensidad de  $1000$  y  $4000$  Gauss [7] [8].



**Figura 1.4:** Manchas solares en la fotosfera solar (<https://images-assets.nasa.gov/>).

**Cromosfera:** se encuentra por encima de la fotosfera; tiene unos  $1500 km$  de espesor, se caracteriza por una temperatura superior a la de la fotosfera. La densidad del plasma y por lo tanto la cantidad de luz emitida cae rápidamente con la altura en esta capa, por esta razón, no es visible contra el fondo brillante de la fotosfera. La cromosfera puede ser muy dinámica

con chorros de gas (espículas) que se extienden por encima de la superficie como se muestra en la figura 1.5. Estos pueden extenderse miles de kilómetros por encima de la superficie solar y están hechos de material que ha sido expulsado de la superficie a velocidades de 20 a 100  $km/s$  [1].



**Figura 1.5:** La cromosfera del Sol puede observarse con el filtro H-alpha. Imagen tomada por el LACIGE de la ENES Morelia, UNAM (<http://www.lacige.unam.mx/>).

**Región de Transición:** La región de transición es una capa delgada y muy irregular de la atmósfera del Sol que separa la corona caliente de la cromosfera mucho más fría. El calor fluye desde la cromosfera hacia la corona donde la temperatura cambia rápidamente de  $2 \times 10^4 K$  a aproximadamente  $10^5 K$ . En esta región la luz emitida está dominada por iones de carbono, oxígeno y silicio. Estos iones emiten luz en la región ultravioleta del espectro solar que sólo es accesible desde el espacio.

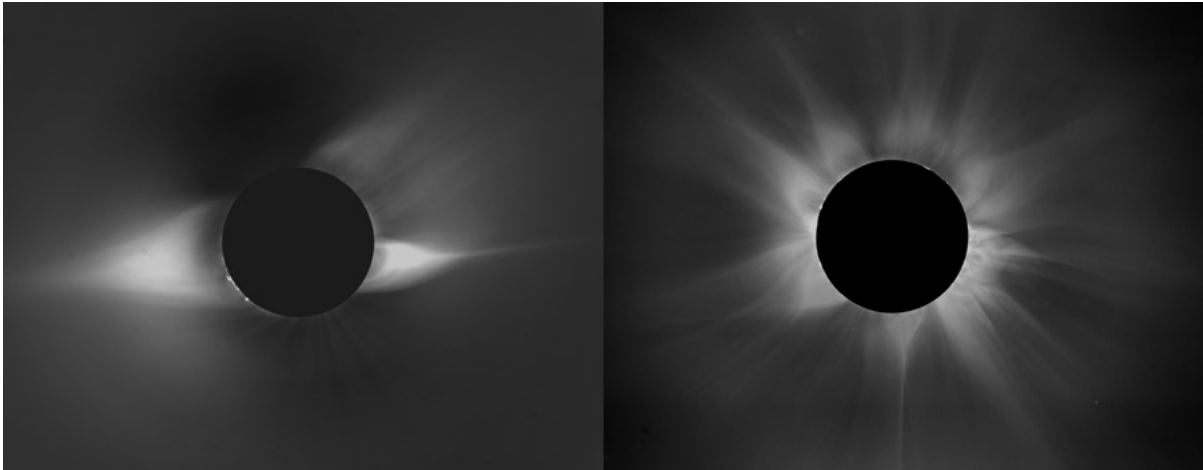
**Corona:** Es la región más superficial de la atmósfera solar. En el visible, la corona se observa como un halo durante un eclipse solar o mediante coronógrafos que bloquean la luz de la fotosfera que es mucho más brillante.

Debido a su alta temperatura ( $> 10^6 K$ ), la corona es un plasma de electrones y protones, principalmente. A medida que la temperatura aumenta, su densidad disminuye abruptamente y se expande continuamente hacia el medio interplanetario formando el viento solar [9]. La emisión de la corona no es constante, varía con el ciclo solar; cuando el Sol se encuentra en un máximo de actividad la corona se extiende asimétricamente, cuando es un mínimo solar la corona se concentra en latitudes ecuatoriales, como se muestra en la figura 1.6 [5].

Una característica fundamental de la corona son los hoyos coronales (figura 1.9). Los hoyos coronales son regiones de plasma de baja densidad en el Sol, que tienen líneas de campo magnético que se abren libremente en el espacio interplanetario. Cuando existe baja actividad



solar, los hoyos coronales cubren los polos solares. Durante los períodos más activos, los hoyos coronales pueden existir en todas las latitudes solares [8].



**Figura 1.6:** Corona solar durante el mínimo solar (izquierda). Corona solar durante el máximo solar (derecha) (<https://scied.ucar.edu/>).

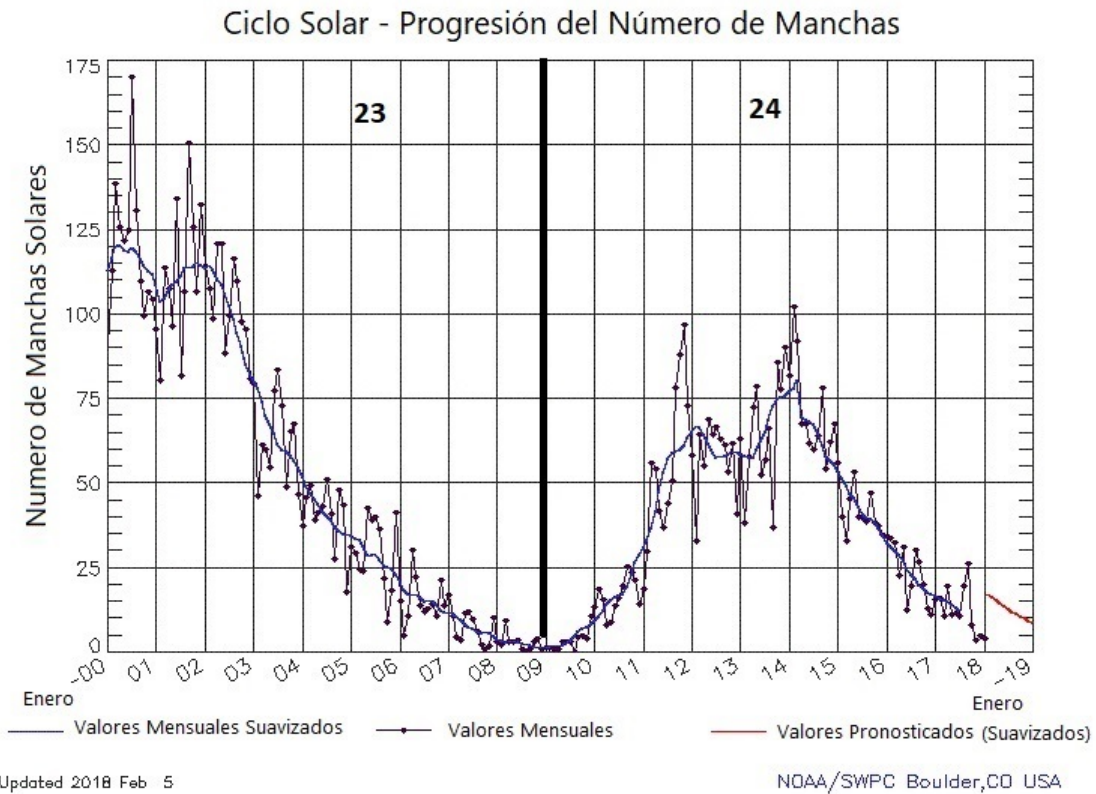
**Viento Solar:** Es el fluido ionizado resultado de la expansión libre de la corona solar. El viento solar también se considera parte importante de las emisiones de la actividad solar por lo que este tema se desarrolla a detalle más adelante.

## 1.2. Emisiones de la Actividad Solar

Debido a que el Sol no se encuentra estático, libera continuamente grandes cantidades de energía y materia al medio interplanetario (MI) a través de varios mecanismos, produciendo una diversidad de perturbaciones que se propagan a través del viento solar por el MI y algunas de ellas pueden llegar a alterar el campo magnético de la Tierra.

Los fenómenos originados en el Sol llegan a la Tierra en forma de radiación electromagnética unos ocho minutos después de producirse, y en forma de partículas y perturbaciones del campo magnético interplanetario entre varias horas y unos pocos días más tarde [10].

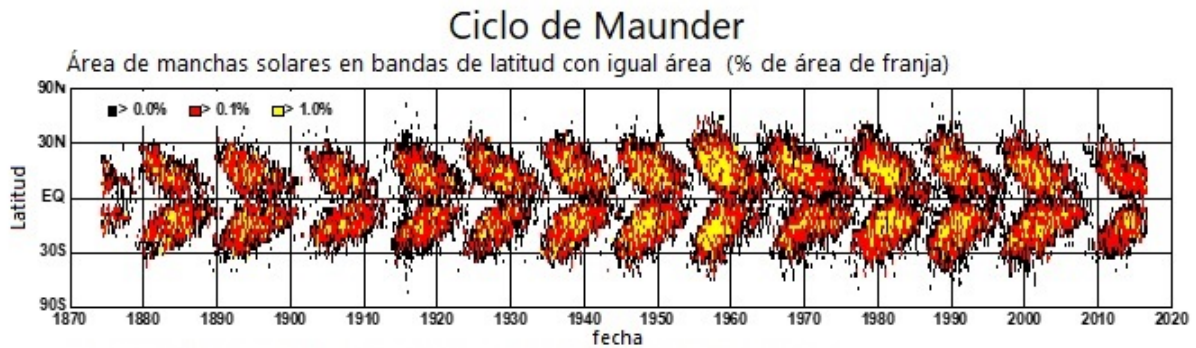
La actividad solar varía en intensidad aproximadamente cada 11 años, por lo que se define un ciclo de actividad solar, en el que el Sol tiene un máximo de actividad y un mínimo, como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7:** Progresión del Ciclo Solar a partir de enero de 2000 y hasta enero 2018 que corresponden a parte del ciclo solar 23 y el progreso del ciclo solar 24 respecto al número de manchas solares que se han observado al mes en la fotosfera solar (línea negra), la línea azul representa el promedio de manchas solares observadas y la línea roja representa el número de manchas solares esperadas hacia el mínimo del ciclo solar 24 (<https://www.swpc.noaa.gov/>).

### 1.2.1. Manchas solares

El principal indicador de los ciclos solares son las manchas observadas sobre la fotosfera solar. Su aparición y comportamiento son un reflejo de la dinámica del campo magnético solar. Al inicio del ciclo, el campo magnético se aproxima a un dipolo con su eje alineado aproximadamente al eje de rotación del Sol; con esta configuración, las líneas de campo magnético cerca del ecuador solar se encuentran cerradas formando arcos coronales, en altas latitudes estas se abren formando los hoyos coronales [9]. Conforme el ciclo se acerca a su máximo, la configuración magnética se vuelve más compleja y se encuentran arcos y hoyos coronales a distintas latitudes. De igual forma durante el inicio del ciclo las manchas se encuentran entre  $35^\circ$  y  $45^\circ$  de latitud en ambos hemisferios y conforme avanza el ciclo, las manchas migran al ecuador, esto se conoce como los diagramas de Mariposa de Maunder, figura 1.8.



**Figura 1.8:** Diagrama del Ciclo de Maunder. Se observa que las manchas solares se agrupan entre  $\pm 30^\circ$  del ecuador del disco solar (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>).

### 1.2.2. Viento solar

El viento solar (VS) es un plasma, es decir que es un fluido altamente ionizado, el cual está compuesto de una mezcla de electrones y protones, con una fracción menor de núcleos de helio y algunos elementos más pesados. Estos fluyen con velocidad que varía entre 300 y 1200  $km/s$  con un promedio de 350  $km/s$  en el MI. De esta manera, el VS transporta parte de la energía solar hacia el espacio.

Cuando el VS fluye en el MI, lleva consigo el campo magnético del Sol de la región de donde surgió, de esta manera el viento solar impregna al MI de campo magnético solar. A este campo arrastrado se le conoce como campo magnético interplanetario (CMI), el cual llega a la Tierra con una intensidad entre 5 y 10  $nT$ . El CMI determina en gran medida la intensidad con la que el viento solar interactúa con el geoespacio.

El viento solar es una conexión importante entre el Sol y la Tierra, esencialmente, hay dos tipos de viento solar: viento solar rápido y viento solar lento, en tabla 1.1 se describen sus principales características.

El viento solar que normalmente fluye con una velocidad entre 380 y 400  $km/s$ , se conoce como viento solar lento, y tiene una temperatura entre 1 y  $2 \times 10^6 K$ . El viento solar lento es mucho más variable y fluye de zonas cercanas al ecuador solar donde las líneas de campo son cerradas.

### 1.2.3. Viento Solar Rápido

El Viento Solar Rápido (VSR) procede de hoyos coronales, como los que se muestran en la figura 1.9. Los hoyos coronales son regiones de campo magnético abierto y emite VSR a velocidades mayor a 400  $km/s$  con un promedio de 800  $km/s$  y una temperatura de  $10^6 K$  [11].

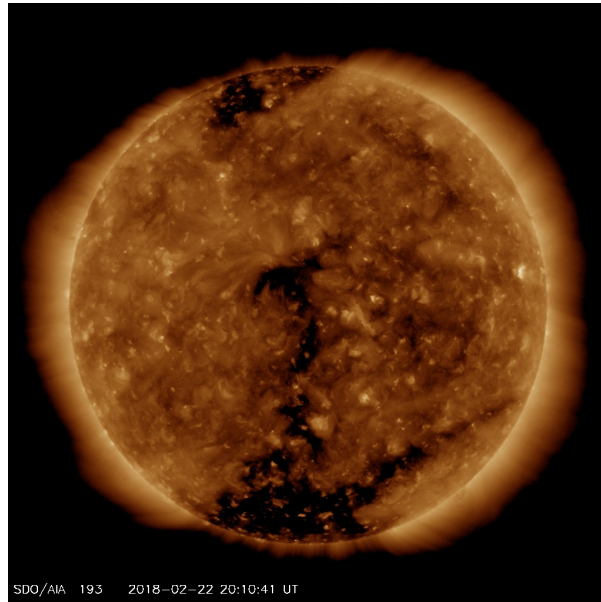
El VSR causa actividad geomagnética recurrente, que persiste por lo general durante varios días. En la fase decreciente del ciclo de manchas solares, la actividad geomagnética se debe

Viento Solar Rápido	Viento Solar Lento
$400 - 800 \text{ km/s}$	$\lesssim 400 \text{ km/s}$
$N_p \sim 3 \text{ cm}^{-3}$	$N_p \sim 7 - 10 \text{ cm}^{-3}$
$\sim 95\% H, \sim 5\% \text{ He}$ , iones menores y el mismo número de electrones	$\sim 94\% H, \sim 4\% \text{ He}$ , iones menores y el mismo número de electrones. Gran variabilidad
$T_p \sim 2 \times 10^5 \text{ K}$	$T_p \sim 4 \times 10^4 \text{ K}$
$B \sim 5 \text{ nT}$	$B \sim 4 \text{ nT}$
Origen en Hoyos Coronales	Cualquier punto del Sol

**Tabla 1.1:** Características del Viento Solar cerca de la órbita de la Tierra ( $\sim 1 \text{ UA}$ ) [5].

principalmente al gran número de eventos de VSR [12].

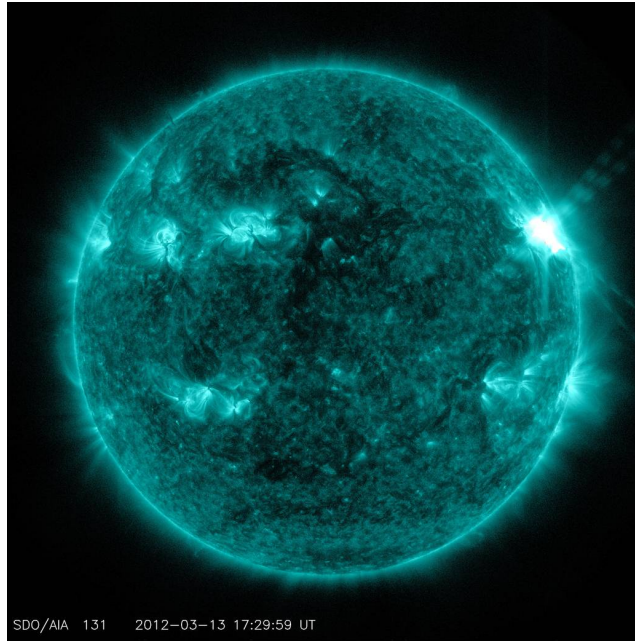
El viento solar rápido y lento están separados por fuertes gradientes de velocidad longitudinal, por lo que cuando el viento solar rápido atraviesa un viento que fluye más lento por delante se forma una región de interacción. Si la estructura es estable durante varias rotaciones, esta región de interacción se observa repetidamente en el espacio y, por lo tanto, se denomina región de interacción corrotante (RIC).



**Figura 1.9:** Corona solar en la que se observan regiones oscuras que se conocen como hoyos coronales (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>).

### 1.2.4. Fulguraciones

Las fulguraciones emiten en todo el espectro electromagnético y partículas. Se perciben como un abrillantamiento repentino en la cromosfera (figura 1.10), debido al rápido aumento en la emisión de rayos X y UVs en escalas de tiempo que van desde algunos minutos y hasta horas. Este fenómeno es resultado de la reconexión magnética de los campos magnéticos solares, lo que permite la liberación espontánea de energía almacenada en el campo magnético a través de cambios rápidos en la configuración de éste [13] [6].



**Figura 1.10:** Fulguración clase M en el Sol del 13 de marzo de 2012 capturada por el SDO con filtro 131Å. Se observa la fulguración como un abrillantamiento en el extremo derecho (<https://www.nasa.gov/>).

Las fulguraciones solares se catalogan en función de la intensidad del flujo de rayos X suaves ( $0.1 - 0.8 \text{ nm}$ ) que se emite en  $W/m^2$ , como se muestra en la tabla 1.2. Se consideran cinco grupos principales, que se nombran con las letras A, B, C, M y X, y dentro de cada uno de ellos existen nueve grados de intensidad. Una fulguración tipo X5 emitiría  $5 \times 10^{-4} W/m^2$ . Las clases M y X son las fulguraciones más intensas e indican fenómenos que pueden provocar efectos relevantes en el espacio próximo a la Tierra [10] [6].

Durante este fenómeno el flujo de partículas de alta energía puede incrementarse en los detectores a nivel de tierra [6].

Clasificación	Flujo de Rayos X ( $W/m^2$ )
A	$10^{-8}$
B	$10^{-7}$
C	$10^{-6}$
M	$10^{-5}$
X	$10^{-4}$

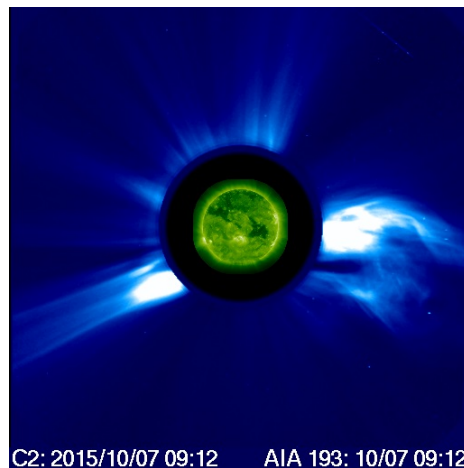
**Tabla 1.2:** Clasificación de fulguraciones respecto al flujo de la componente suave de Rayos X [6].

### 1.2.5. Eyecciones de Masa Coronal

Una eyección de masa coronal (EMC) es una expulsión repentina de una nube densa de plasma magnetizado proveniente de la atmósfera del Sol y es lanzada a gran velocidad hacia el MI, como se muestra en la figura 1.11. Su presencia está relacionada con el ciclo de manchas solares y durante el máximo de su actividad solar su frecuencia también alcanza su valor máximo [14].

Las CME juegan un papel importante en la evolución de la estructura de la corona solar y son la principal conexión entre la actividad solar, el MI y las perturbaciones geomagnéticas.

La actividad geomagnética relacionada a una EMC es causada por la propia eyección, y/o por la región de la onda de choque antes de ella, ya que por lo general tienen un componente de campo magnético relativamente fuerte y persistente hacia el sur [3].



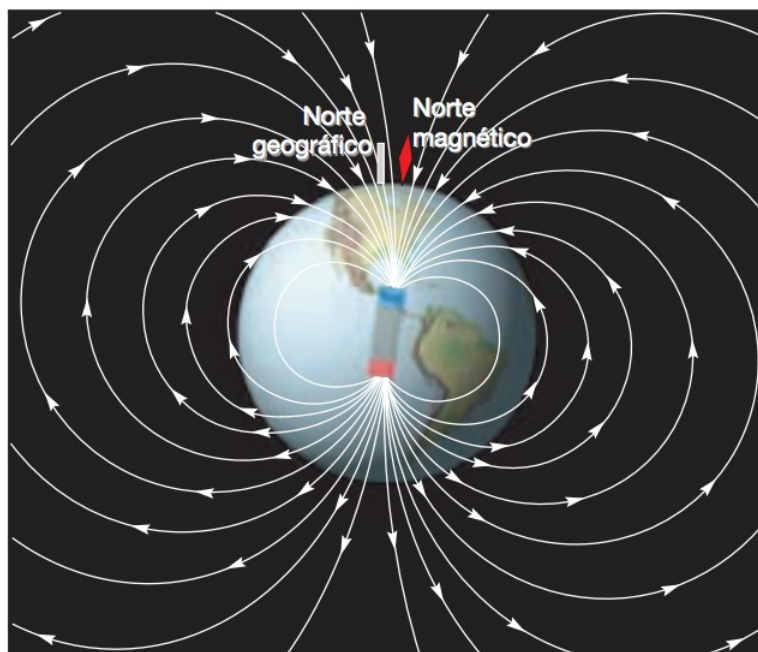
**Figura 1.11:** Eyección de Masa Coronal captada por la cámara C2 del telescopio LASCO a bordo del satélite SOHO el 7 de octubre de 2015. La CME se observa en el extremo derecho, en el centro se encuentra el coronógrafo y se muestra que ahí es donde se localiza el Sol (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/>).



# Magnetosfera Terrestre

Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones en el campo magnético terrestre, por lo cual este capítulo está dedicado al origen, características y estructura del campo geomagnético. Así mismo, se habla de la ionósfera, capa importante en la relación Sol-Tierra que contribuye a la perturbación del campo geomagnético e influye en el rendimiento y fiabilidad de sistemas tecnológicos y de telecomunicación.

## 2.1. Campo geomagnético



**Figura 2.1:** Campo magnético de la Tierra [15].



El campo magnético terrestre es similar al generado por una barra imantada, como se muestra en la figura 2.1. La explicación sobre el campo magnético de la Tierra aceptada de manera más generalizada exige que el núcleo esté compuesto por un material conductor de la electricidad, como el hierro y que sea móvil. De esta manera la teoría habla de un dínamo autosostenido, donde el campo principal es generado por la diferencia de rotación entre el núcleo interno que gira más lentamente que el núcleo externo terrestre. Conforme el hierro se mueve en el núcleo externo, interactúa con el campo geomagnético existente. Esta interacción genera una corriente eléctrica, que a su vez genera un campo magnético que refuerza el campo geomagnético. Mientras continúe el flujo en el interior del núcleo externo de hierro fundido, se producirán corrientes eléctricas y se mantendrá el campo geomagnético [15].

El dínamo autosostenido es la fuente principal de producción del campo magnético terrestre y es considerada una fuente interna; sin embargo, no es la única fuente.

A continuación se describen otras fuentes magnéticas:

1. La magnetización de la corteza: el magnetismo residual permanente existe en la corteza terrestre.
2. La radiación electromagnética solar: los vientos atmosféricos mueven partículas cargadas que generan una corriente ionosférica, la que a su vez produce un campo magnético.
3. La gravedad: el campo gravitacional del Sol y la Luna produce un movimiento de marea de las masas de aire que generan un campo en la misma forma, como lo hace el movimiento de aire vía el calentamiento solar.
4. La radiación corpuscular solar y el campo interplanetario: un buen número de contribuciones del campo geomagnético provienen directa o indirectamente de la interacción con el viento solar y su campo magnético por la presión del plasma externo, la intrusión de plasma solar en el campo magnético, el calentamiento del plasma dentro del campo geomagnético y surgimiento de campos magnetosféricos e interplanetarios [16].

De esta manera, la Tierra está rodeada por un campo magnético con carácter vectorial, por lo que cada punto de la superficie terrestre cuenta con un módulo, dirección y sentido.

La intensidad geomagnética total en el ecuador geográfico y cerca de los polos terrestres es de aproximadamente 30000 y 70000  $nT$ , respectivamente. La intensidad geomagnética tiene una serie de variaciones las cuales están asociadas a los cambios que se producen en el campo magnético de la Tierra. Principalmente se dan la variación diurna y la variación secular.

La variación secular es aquella que se presenta en una escala temporal mayor a cinco años y es resultado de 1) el cambio en la magnitud de la corriente principal dentro de la Tierra, 2) el movimiento de la corriente que origina un corrimiento en la alineación del eje dipolar y 3) cambios del movimiento de deriva hacia el oeste de la componentes no dipolares del campo magnético [16] [17].

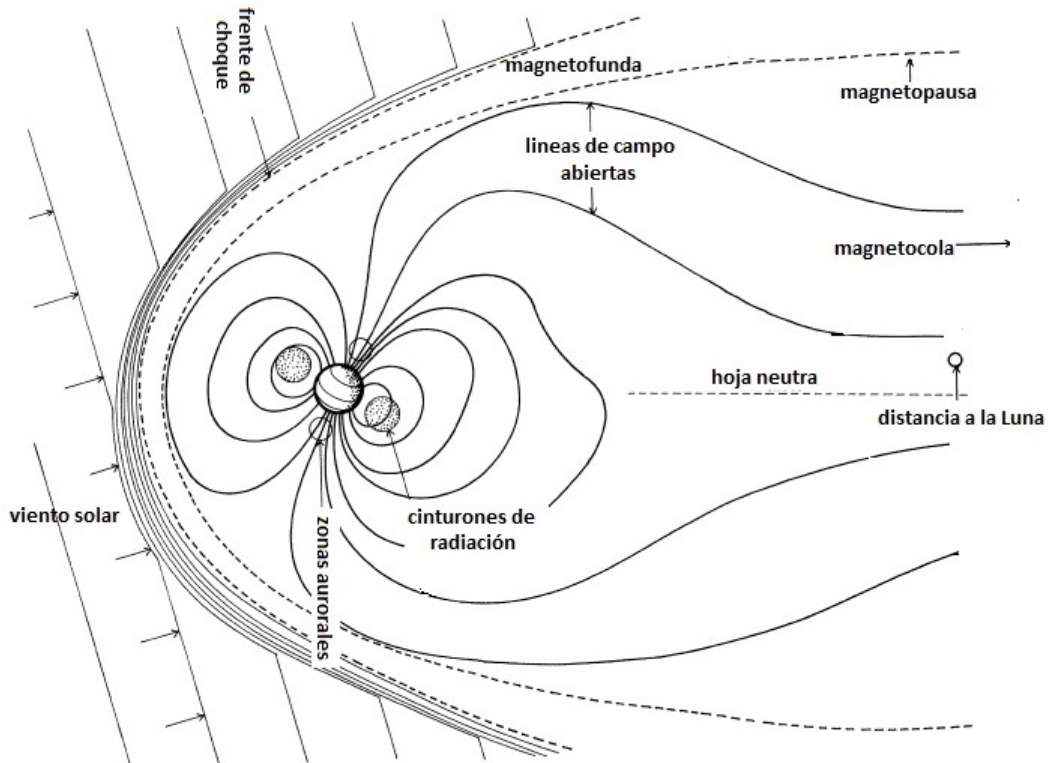
Por otro lado, la variación diurna tiene lugar con la variación diaria de luz solar que propicia una conductividad eléctrica de la atmósfera superior y el movimiento de partículas a través de

las líneas de campo geomagnético. Esta variación es importante ya que da origen a corrientes eléctricas en la magnetosfera que se mantienen constantes a menos de que haya una perturbación geomagnética externa [9].

En este trabajo se hablará de una de estas perturbaciones geomagnéticas: las tormentas geomagnéticas, las cuales reflejan una clara variación en el campo magnético terrestre en una escala temporal que va desde horas hasta algunos días.

## 2.2. Magnetosfera terrestre

La magnetosfera terrestre puede definirse como el espacio alrededor de la Tierra que es cubierta por el campo geomagnético y donde el viento solar es excluido.



**Figura 2.2:** Magnetosfera terrestre. Comienza a partir del choque del viento solar con el campo geomagnético formando una onda de choque, dentro de esta se localiza la magnetofunda y la magnetopausa. Del lado día la magnetosfera es simétrica. Hacia el lado noche es alargada lo que se conoce como magnetocola, las líneas de campo son abiertas y se localiza la hoja neutra [18].

A partir del límite marcado por la interacción del viento solar con el campo geomagnético, se comienzan a observar una serie de regiones definidas por diferentes poblaciones de partículas, densidades, temperaturas y corrientes, lo que da lugar a la estructura que se describe en la figura 2.2.

### 2.2.1. Estructura de la magnetosfera terrestre

El plasma de la magnetosfera consiste, en su mayoría, en electrones y protones donde la fuente de estas partículas son el viento solar y la ionosfera.

Cuando el viento solar que se mueve por el medio interplanetario se encuentra con el campo geomagnético, se forma una onda de choque o **frente de choque**. Las propiedades del plasma cambian bruscamente a partir de esta onda; el plasma solar que fluye antes de la onda no está perturbado, pero el que la atraviesa es calentado, comprimido y desacelerado, formando una nueva región turbulenta llamada **magnetofunda** [9]. Todo el plasma que no logra atravesar la onda de choque es desviado alrededor de la magnetosfera.

La **magnetopausa** es realmente la frontera de la magnetosfera, es aquí donde se equilibra la presión del viento solar y la presión del campo magnético terrestre. Dicha frontera, abarca de 10 a 12 radios terrestres ( $R_T$ ) del lado día, es decir, del lado donde se encuentra el Sol frente a la Tierra;  $15 R_T$  sobre los polos y por el lado noche se extiende hasta  $100 R_T$ . Realmente su tamaño y forma cambia a medida que la presión del viento solar fluctúa. La prolongación del campo magnético del lado noche es la llamada **magnetocola**.

La magnetocola consta de dos regiones magnéticas llamadas **lóbulos**. Estos contienen líneas de campo abiertas, por el lado norte se acercan a la Tierra y por el lado sur se alejan. Éstas dos regiones están separadas por la **hoja neutra de plasma**, aquí los electrones y protones tienen una densidad  $0.5 \text{ cm}^{-3}$ .

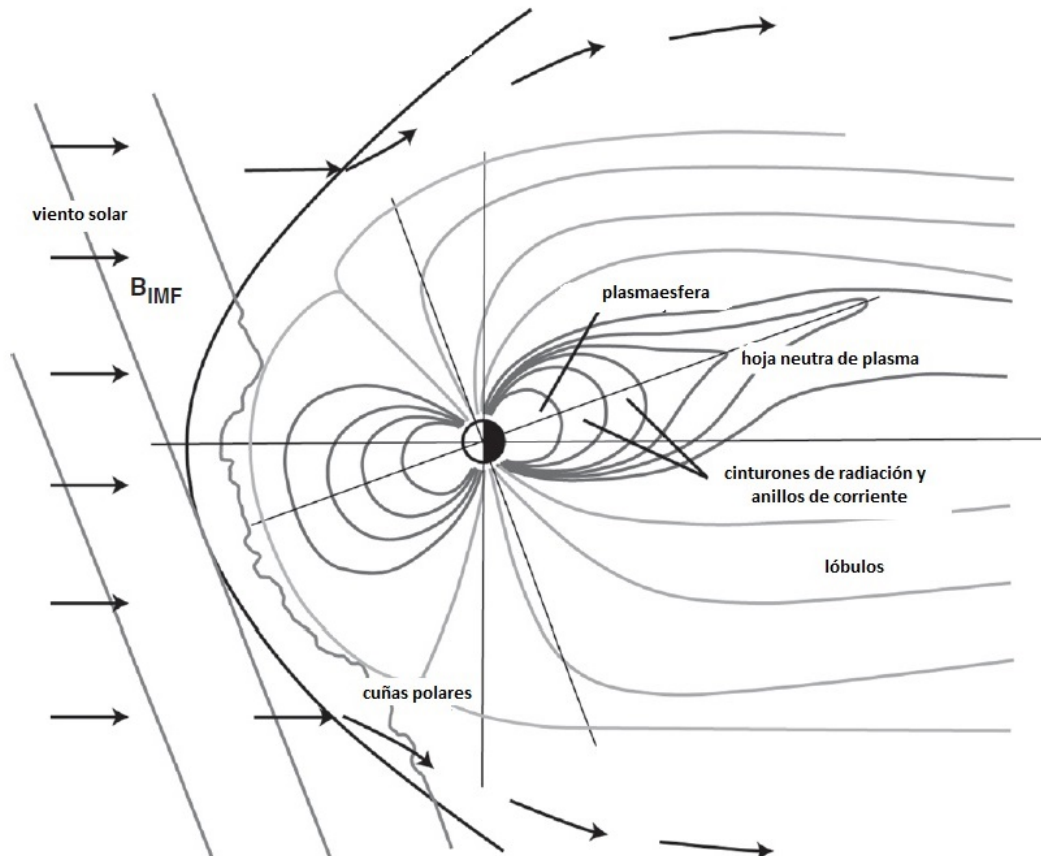
Las líneas de campo magnético divergen en las **cuñas polares** y es por donde el plasma contenido en la magnetofunda tiene acceso directo a la ionosfera, contribuyendo en gran parte a los sistemas de corrientes ionosféricas en altas latitudes y a la formación de auroras.

La estructura anteriormente descrita, corresponde a la magnetosfera exterior y se muestra en la figura 2.2, donde se observa que no es simétrica. En cambio al interior de la magnetosfera, el campo magnético forma un dipolo, como se muestra en la figura 2.3.

La **plasmaesfera** forma parte de la magnetosfera interior y es la región en forma de toroide que rodea la Tierra y es de origen ionosférico. Se extiende entre 4 y  $6 R_T$ . A partir de donde la densidad de electrones disminuye hasta  $1 \text{ cm}^{-3}$  se localiza la **plasmapausa**, que se extiende hasta las últimas líneas de campo que están cerradas tanto del lado día como del lado noche.

Dentro de la plasmaesfera se encuentran los **cinturones de radiación de Van Allen** y las **corrientes de anillo**. Estas dos regiones se caracterizan por partículas de alta energía atrapadas en ellas.

Los cinturones de radiación o de Van Allen tienen forma toroidal; el primer cinturón se encuentra entre 1 y  $2 R_T$ , en él hay protones con energía de  $50 MeV$  y electrones con energías  $> 30 MeV$ , por otro lado el cinturón externo se localiza entre 3 y  $4 R_T$ , aquí se concentran electrones y protones con menores energías. El cinturón interno es relativamente estable, mientras que el externo varía en el número de partículas con un factor de 100.



**Figura 2.3:** Magnetosfera Interior de la Tierra compuesta por la plasmasfera, los cinturones de radiación y las cuñas polares [1].

Dentro de la plasmasfera también se localizan los anillos de corriente, que están formados por partículas con energía de alrededor de  $200 KeV$  y son llamados así porque las partículas cargadas producen corrientes eléctricas.

## 2.3. Ionosfera

La ionosfera es menos del 1% de la masa de la atmósfera; sin embargo, esta capa se convierte en un conductor eléctrico que soporta corrientes eléctricas y la propagación de ondas de radio [6].

Esta capa recibe su nombre porque aquí los átomos son ionizados principalmente por la radiación electromagnética solar a través de un proceso llamado fotoionización. Sin embargo, otros fenómenos como las partículas energéticas solares y los rayos cósmicos galácticos también tienen un efecto ionizante y pueden contribuir a la ionosfera.

La densidad de iones y electrones en la ionosfera (densidad electrónica), cambia debido a la variabilidad de la radiación solar y a la densidad de diversos componentes en la atmósfera, por lo que de esta manera en el lado día la densidad de esta capa es máxima. Sin embargo, por la noche la ionosfera no desaparece completamente ya que el tiempo de recombinación de iones y electrones es comparable a la rotación de la Tierra [6] [1].

La densidad electrónica de la ionosfera varía con la posición de la Tierra respecto del Sol, al igual que con la altura, definiendo una serie de regiones a diferentes altitudes sobre la superficie de la Tierra.

La primera región ionosférica es la capa D, ésta se extiende entre los 50 y 90 *km* sobre la superficie de la Tierra. Los fotones UV solares son la principal fuente que ioniza las moléculas de óxido nítrico (NO) en esta capa. Durante las condiciones de tormentas solares, la componente dura de los rayos X logra ionizar el nitrógeno molecular y el oxígeno. La recombinación en esta región es alta, mientras la producción iónica es la más baja de toda la ionosfera. Esencialmente esta región está presente durante el día; sin embargo, como a esta altitud los rayos cósmicos logran ionizar, estos producen un nivel residual de ionización por la noche. La capa D es importante para la radiocomunicación de alta frecuencia, ya que absorbe las ondas de radio, de este modo, cuando hay una alta ionización en la región, la comunicación puede ser bloqueada [1].

Por encima de la capa D, se ubica la capa E que se extiende de 90 a 120 *km*, la cual se ioniza por los rayos X de baja energía del Sol hasta alcanzar una concentración de  $10^5$  electrones y iones por centímetro cúbico. La densidad máxima en ésta capa es 100 veces mayor que en la capa D, debido a que la recombinación es menos frecuente. Al igual que en la capa D, durante la noche, la entrada de partículas energéticas en la atmósfera, como la radiación cósmica, genera ionización permitiendo que la capa E no desaparezca por completo.

La región más densa de la ionosfera es la región F que se ioniza mediante la radiación UV, se divide en dos capas: F1 y F2 durante el día debido a la fotoionización y la distribución de los iones. La capa F2 es la dominante, alcanza hasta  $5 \times 10^5$  electrones por centímetro cúbico, durante el día los iones producidos a la altura de esta subcapa es constante y la densidad electrónica es alta. Conforme llega la noche, estos iones se difunden hacia abajo, logrando que no haya una distinción de densidad electrónica entre la capa F1 y F2 [19].

En general, la capa F se extiende desde 120 *km* y suele alcanzar una altura pico de 300 *km*. En la región por encima del pico, llamada ionosfera superior, la densidad disminuye lentamente y se mezcla con la plasmaesfera. La transición entre la ionosfera superior y la plasmaesfera es típicamente de unos 1000 *km* y aunque no hay un límite definido entre estas regiones, sí se nota un cambio en la presencia del ion dominante. En la ionosfera el ion dominante es del oxígeno mientras en la plasmaesfera lo es del hidrógeno. La ionización de la capa F disminuye por la noche, pero no tanto como la ionización de la capa E y D porque a esta altitud las tasas de

recombinación son más bajas y la capa consiste en oxígeno atómico en lugar de los iones moleculares que dominan en las regiones D y E. Los iones atómicos tienen tasas de recombinación mucho más bajas en general que los iones moleculares.

Además de la variabilidad de la ionosfera respecto a la posición de la Tierra con el Sol, también hay una variación respecto al ciclo solar, pues durante las tormentas solares, la estructura ionosférica puede ser drásticamente modificada por la actividad solar que es geoeffective. Por lo tanto, durante las tormentas geomagnéticas, la ionosfera es perturbada y se observan afectaciones al clima espacial.

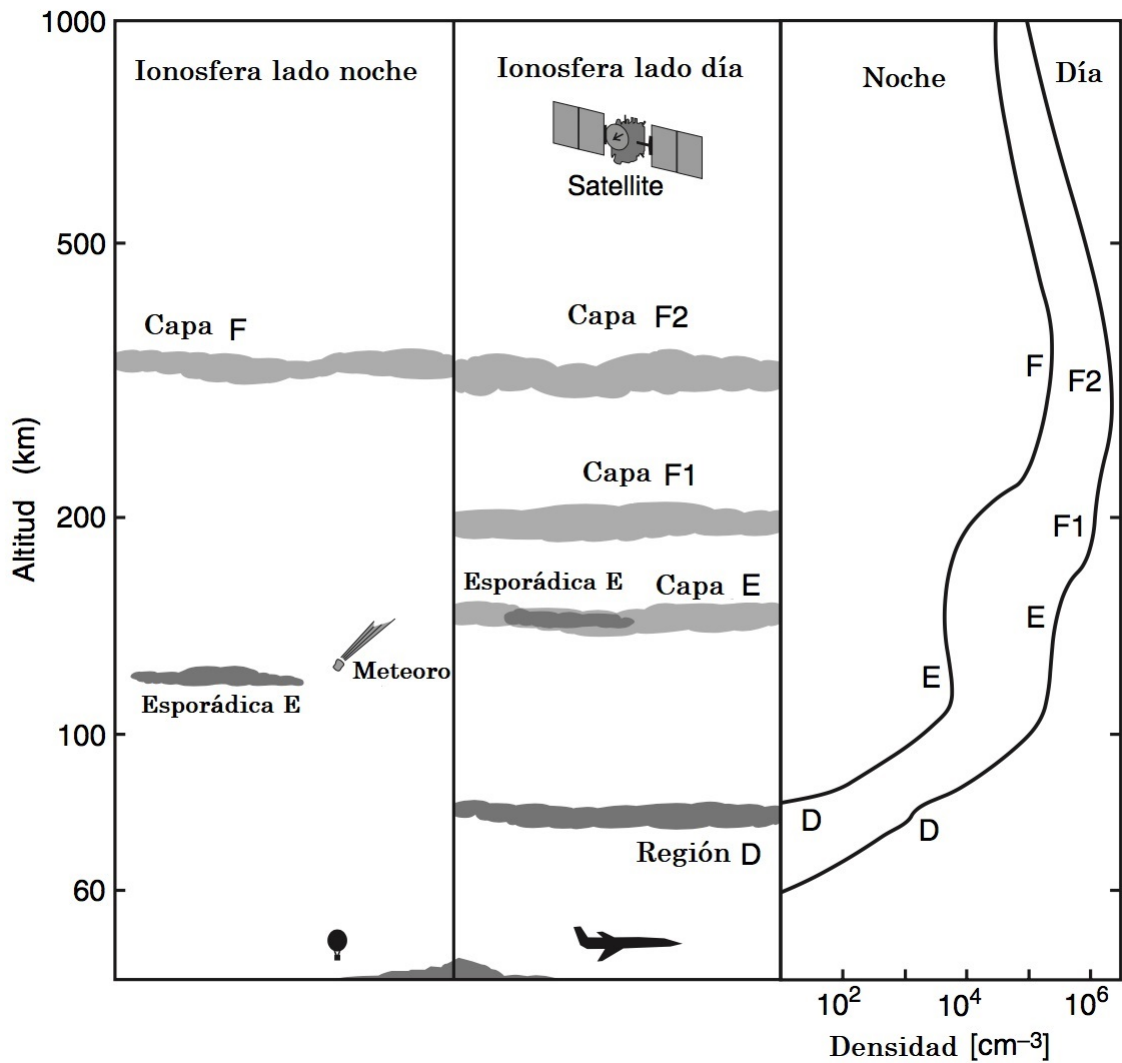


Figura 2.4: Estructura de la ionosfera [1].



# Tormentas Geomagnéticas e Índices Geomagnéticos

---

En este capítulo abordaremos las características que definen una tormenta geomagnética, así como de los índices que determinan la perturbación del campo geomagnético.

## 3.1. Índices geomagnéticos

La intensidad del campo magnético es medida a nivel de tierra, en observatorios especializados principalmente mediante magnetómetros y los datos suelen presentarse, generalmente, mediante índices medidos en intervalos de 3 horas, que producen una medida cuantitativa del nivel de actividad o perturbación geomagnética.

Principalmente, las perturbaciones del campo geomagnético son causadas tanto por cambios regulares en la actividad solar como los propiciados por eyecciones de masa coronal y de regiones de interacción corrotante, que incrementan el flujo de radiación electromagnética y de partículas solares hacia la Tierra; así como por cambios en sistemas de corrientes irregulares producidas por:

- a) la interacción del viento solar con la magnetosfera
- b) por la propia magnetosfera
- c) por las interacciones entre la magnetosfera y la ionosfera
- d) y por la ionosfera misma [6].

Históricamente y debido a la distribución latitudinal donde son registrados, los índices mayormente usados son el Kp, Ap, AE y Dst. En general los índices geomagnéticos son un buen indicador de la variación del campo magnético terrestre.



### 3.1.1. Índice Kp

El índice planetario de 3 horas, Kp es el índice K normalizado, que se mide en 13 observatorios geomagnéticos entre  $44^\circ$  y  $60^\circ$  de latitud geomagnética norte o sur (zona subauroral), que refleja el nivel de actividad geomagnética planetaria. La escala es de 0 a 9 expresada en tercios de una unidad, es decir que cada unidad tiene 3 intensidades, por ejemplo: una intensidad de 5 puede ser 5-, 5 o 5+, donde 5- es  $4\frac{2}{3}$ , 5 es 5 y 5+ es  $5\frac{1}{3}$ . Este índice planetario está diseñado para medir la radiación de partículas solares mediante sus efectos magnéticos [20] [21] [12].

El índice K fue introducido por primera vez por J. Bartels en 1938. Es un índice local cuasi-logarítmico de un rango de 3 horas en la actividad magnética en relación con una curva de día quieto para un único observatorio geomagnético. Los valores consisten en un dígito de 0 a 9 para cada intervalo de 3 horas del día en tiempo universal (TU) [20] [9].

Aunque el índice Kp es capaz de describir el estado general de la actividad geomagnética planetaria, ésta tiene contribuciones del electrojet auroral y la corriente de anillo, (vease apéndice A), por lo que son necesarios otros índices.

### 3.1.2. Índice Ap

Este índice es medido en la misma zona y en el mismo intervalo de tiempo que el índice Kp. En 1951, Barrels introdujo la "amplitud planetaria equivalente diaria" conocida como índice Ap debido a que es más fácil trabajar con una escala lineal que con una cuasi-logarítmica. El índice Ap va de 0 a 400 y tiene una escala relacionada con el índice Kp, donde Ap=0 es un Kp=0 y un Ap=400 es igual a Kp=9 [12] [9].

### 3.1.3. Índice AE

Este índice fue definido y desarrollado por Davis y Sugiura en 1966; ha sido empleado tanto cualitativa como cuantitativamente como un índice correlativo en estudios del comportamiento de los satélites de comunicación, la propagación radioeléctrica, el centelleo radioeléctrico y el acoplamiento entre el CMI y la magnetosfera terrestre [6].

El índice AE (Auroral Electrojet) mide la actividad magnética en zonas aurorales. En estas, las variaciones del campo magnético son mucho mayores que en latitudes medias y bajas cuando la actividad magnetosférica se incrementa. Los óvalos aurorales son zonas donde se observan auroras brillantes y fuertes perturbaciones magnéticas. Estos óvalos se contraen durante intervalos tranquilos y se expanden hacia el ecuador cuando la actividad geomagnética se incrementa.

El electrojet auroral, por convección, es dividido en dos partes: 1) el electrojet que se dirige hacia el este, que predomina por el día; y 2) el electrojet que se dirige hacia el oeste, más intenso por la noche. Éstos fluyen en la ionosfera inferior y están unidos a corrientes de la magnetosfera.

Cada mes se determina un nivel en estado tranquilo para cada observatorio donde se mide. Se utilizan 12 observatorios, distribuidos entre  $55^\circ$  y  $77^\circ$  latitud Norte. La variación de la

componente H en cada observatorio, respecto a su estado tranquilo, en intervalos de 1 o 2.5 minutos, está superpuesta en TU con la variación de las otras estaciones.

Para un tiempo cualquiera, el mayor valor de las variaciones superpuestas se define como el índice AU, y el menor valor, como el índice AL. El índice AE se calcula a partir de la diferencia de los índices AU y AL, que son indicadores de la intensidad de los electrojets dirigidos hacia el este y hacia el oeste, respectivamente [20].

#### 3.1.4. Índice Dst

En latitudes bajas, la caída de la componente H del campo geomagnético atribuido al incremento del anillo de corriente, es el fenómeno representado por el índice Dst. Fue introducido por Sugiura en 1964. Este se determina de manera regular a partir de un conjunto de 4 observatorios ubicados a la misma latitud dipolar, entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$  lejos del ecuador magnético, con el objetivo de minimizar los efectos del electrojet ecuatorial. Éste es una medida comúnmente usada para describir la actividad de tormentas geomagnéticas.

El rango de observación del Dst es aproximadamente de 100 nT hasta  $-600nT$ , cuando el campo magnético no está perturbado el índice Dst es 0. Cuando hay una disminución en el Dst, la perturbación se debe principalmente a la intensificación de la corriente de anillo relacionada a procesos de reconexión magnética en la hoja neutra [6], mientras que la variación positiva del Dst es causada por una compresión de la magnetosfera debido al aumento de la presión del viento solar [12].

## 3.2. Tormentas geomagnéticas

Esencialmente, una tormenta geomagnética (TG) puede definirse como una perturbación temporal del campo magnético de la Tierra, por lo que es necesario establecer valores a esta perturbación debido a que el campo geomagnético está en constante interacción con el medio interplanetario y la ionosfera terrestre [6].

La principal característica de una TG es una disminución en la intensidad de la componente horizontal H del campo geomagnético y su posterior recuperación.

Las TGs tienen su origen en procesos energéticos violentos que ocurren en el Sol, conocidos como tormentas solares. Estos procesos son las fulguraciones solares, las eyecciones de masa coronal y las RICs de las cuales se habló anteriormente y que principalmente originan un incremento en la densidad del plasma y en la velocidad del viento solar orientado hacia la Tierra. Estos incrementos se traducen en un aumento de la presión del viento solar sobre la magnetopausa y en la deformación de la magnetosfera [10].

Una tormenta geomagnética intensa se genera bajo las siguientes tres condiciones:

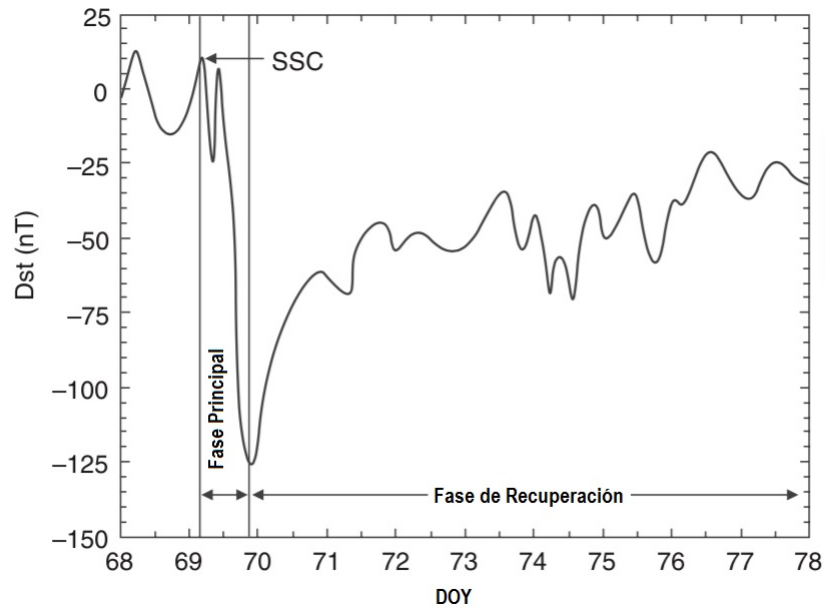
1. Que la tormenta solar sea suficientemente energética, alcanzando mínimo fulguraciones de la clase C, M o X.
2. Que la EMC esté dirigida hacia la Tierra, lo que requiere que la región activa donde se encuentran las manchas solares en las que se inició el proceso esté situada en la cara visible y alejada de los limbos.
3. Que la componente Bz del campo magnético interplanetario arrastrado por el viento solar sea negativa, de forma que se puedan unir las líneas de este campo con las de la Tierra y ocurra el fenómeno de reconexión.

Tormentas Geomagnéticas	
Categoría	Dst mínimo (nT)
Débil	$-30 \geq Dst \geq -50$
Moderada	$-50 \geq Dst \geq -100$
Intensa	$-100 \geq Dst \geq -200$
Supertormenta	$-200 \geq Dst$

**Tabla 3.1:** Clasificación de Tormentas Geomagnéticas según la intensidad del índice Dst [9] [22]

Una TG se clasifica respecto a la intensidad del índice Dst, como se muestra en la tabla 3.1 y se lleva a cabo en 3 diferentes fases, como podemos ver en la figura 3.1:

1. **Fase Inicial:** a menudo comienza con un SSC (Storm Sudden Commencement); en el que normalmente hay un aumento global y repentino de la componente H de 5 a 50 nT, esta variación puede durar una o dos horas, en latitudes ecuatoriales, atribuido al arribo de una onda de choque que comprime repentinamente la magnetosfera, debido a que la presión dinámica del viento solar aumenta.
2. **Fase Principal.** Después de que la componente H permanece positiva por algunos momentos, ésta disminuye drásticamente y alcanza un valor mínimo en un lapso de media hora a varias horas. Durante esta etapa se inyectan gran cantidad de partículas en la magnetosfera interior, que contribuyen al anillo de corriente y a la perturbación asociada del campo geomagnético. Para que esta fase se presente, es necesario que exista la componente sur del CMI, la cual permite la reconexión magnética entre las líneas de campo magnético terrestre y las de campo magnético interplanetario.
3. **Fase de Recuperación:** Comienza uno o dos días después de la fase principal y dura varios días. Durante esta fase la corriente del anillo disminuye y el campo magnético vuelve a la normalidad. Al mismo tiempo, las partículas cargadas son guiadas por las líneas de campo hacia la atmósfera superior. Esto produce los electrojets aurorales que fluyen de este a oeste en las regiones D y E de la ionosfera, provocando perturbaciones magnéticas en las zonas aurorales.



**Figura 3.1:** Fases de una tormenta geomagnética observadas en el índice Dst [1]

Tomando en cuenta las perturbaciones en general del campo geomagnético y todos los índices, [22] define una TG como un intervalo de tiempo en que un campo eléctrico convectivo suficientemente intenso y de larga duración conduce, a través de una energización substancial en el sistema magnetosfera-ionosfera, a una corriente de anillo intensificado, suficientemente fuerte como para exceder el umbral clave de la cuantificación del índice Dst.



# Rayos Cósmicos y su Detección

---

En este capítulo se desarrollará todo lo relacionado a los rayos cósmicos: composición, espectro de energía y componentes, así como las variaciones que estos pueden sufrir debido a su interacción con campos magnéticos como el interplanetario y el terrestre.

Debido a que esta tesis pretende encontrar la variación de la radiación cósmica registrada en la CDMX y atribuida a tormentas geomagnéticas, en este capítulo se menciona la ubicación y funcionamiento del Monitor de Neutrones de la CDMX perteneciente al Observatorio de Rayos Cósmicos de la CDMX.

## 4.1. Introducción

En 1912, Victor Franz Hess descubrió los rayos cósmicos (RC), hecho que lo llevó a ganar el Premio Nobel de Física en 1936. Este hallazgo ocurrió cuando realizaba un experimento sobre un globo aerostático a una altura de más de  $5\text{ km}$  en el que buscaba comprobar que la radiación disminuía al alejarse de la superficie terrestre, para su sorpresa ocurrió lo contrario, lo que constituyó la primera evidencia de que existía una radiación ionizante procedente del exterior terrestre. En 1926, Robert A. Millikan, nombró a esta radiación “rayos cósmicos” y comprobó que las partículas se desviaban en el campo magnético terrestre, por lo tanto, tienen carga eléctrica [23].

Tras varios años de definir, con diferentes experimentos e investigaciones, que tipo de partículas componían los rayos cósmicos, se determinó que estos eran radiación corpuscular, es decir, partículas subatómicas que se desplazan a gran velocidad con carácter ondulatorio y pueden o no tener carga eléctrica. Por lo tanto, los rayos cósmicos son partículas energéticas que se originan más allá de la Tierra e inciden en nuestra atmósfera desde todas direcciones. Las partículas abarcan energías sobre un amplio rango y son principalmente protones, partículas  $\alpha$ , electrones, rayos gamma y neutrinos.

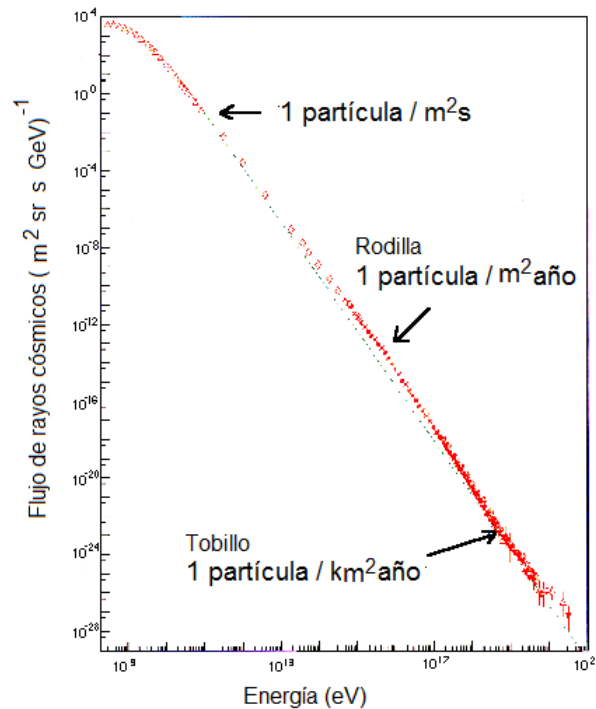
Los métodos que se utilizan en la detección de RC son diversos; sin embargo, se pueden clasificar en dos grupos dependiendo de la información que nos brinden. Un grupo son los detectores que muestran la traza de la trayectoria de la partícula; permitiendo medir el rango de forma directa y registrar el nivel de ionización. El segundo tipo de detectores sólo mide el

nivel de ionización [24].

## 4.2. Rayos Cósmicos

Se le denomina radiación cósmica primaria al conjunto de partículas que llegan al tope de la atmósfera terrestre. Son principalmente núcleos ionizados, que consisten en 90 % protones (Hidrógeno), 9 % partículas  $\alpha$  (Helio) y el resto son núcleos más pesados. También contiene un pequeño porcentaje de electrones y otras partículas neutras como: rayos  $\gamma$ , neutrones y neutrinos. Al ser partículas cargadas, en su camino hacia la Tierra son influenciados por campos magnéticos como el galáctico, interplanetario y terrestre.

El espectro diferencial de energía de los RC está basado en mediciones obtenidas con diferentes instrumentos cubriendo un rango de energía de  $10^9$  a  $10^{20}$   $eV^1$  lo que se conoce como espectro de energía y se muestra en la figura 4.1.



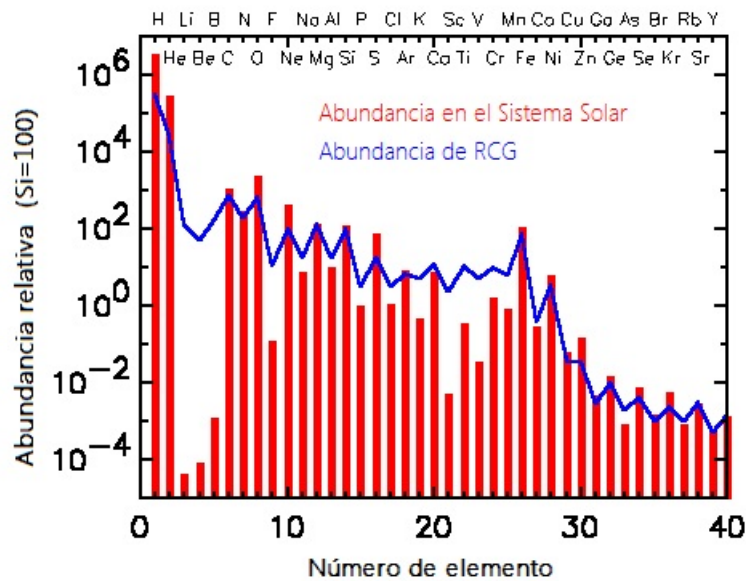
**Figura 4.1:** Espectro de Energía de los Rayos Cósmicos ([cosray.unibe.ch](http://cosray.unibe.ch)). En el eje horizontal se especifica la energía en eV. En el eje vertical está el flujo, es decir el número de rayos cósmicos por unidad de área por unidad de tiempo por estereorradián por energía (GeV). Por ejemplo el flujo para partículas con energías de aproximadamente  $10^{11}$  eV es de  $1 \text{ partícula} / m^2 sr s$ .

<sup>1</sup> $1 eV$  es la energía adquirida por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1V.  $1 eV = 1.6 \times 10^{-19} J$

La dependencia del flujo de rayos cósmicos en función de su energía, sigue aproximadamente una ley de potencias ( $j(E) \simeq K \cdot E^{-\gamma}$ ) con leves cambios en su índice espectral ( $\gamma \approx 3$ ). A finales de la década de 1950 se descubrió un quiebre del espectro alrededor de  $10^{15.5} eV$ , que recibe el nombre de “rodilla”. Otra peculiaridad denominada “tobillo”, aparece en el espectro entre  $10^{18}$  y  $10^{19} eV$  [25].

El rango mayor de energía ( $10^{21} eV$ ) pertenece a los RC extragalácticos, que son generados dentro de radiogalaxias y cuásares y viajan a través del espacio intergaláctico hasta llegar a la Vía Láctea, alcanzan la helioesfera y arriban a la atmósfera de la Tierra. Los RC galácticos tienen energías de hasta  $10^{15}$  o  $10^{16} eV$ ; se originan fuera del Sistema Solar pero dentro de la galaxia, se cree que son generados principalmente en explosiones y remanentes de supernovas. Los RC solares poseen energías de hasta  $10 GeV$  y son generados en la superficie solar durante ráfagas muy intensas. La actividad solar afecta el perfil del espectro de energía de los RC hasta  $10 GeV/nucleón$  [4].

La abundancia relativa de los rayos cósmicos comparada con la abundancia de los elementos presentes en el Sistema Solar se muestra en la figura 4.2. En ella podemos observar que los protones en los rayos cósmicos son menos abundantes que en el Sistema Solar. Debido a que los rayos cósmicos colisionan con el medio interestelar, provocan el rompimiento de núcleos de carbono y oxígeno que generan Li, Be y B, así como el rompimiento de hierro produce Sc, Ti, V, Cr y Mn. Por lo que el Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr y Mn son varios ordenes de magnitud más abundantes en los rayos cósmicos que el material del Sistema Solar [26].

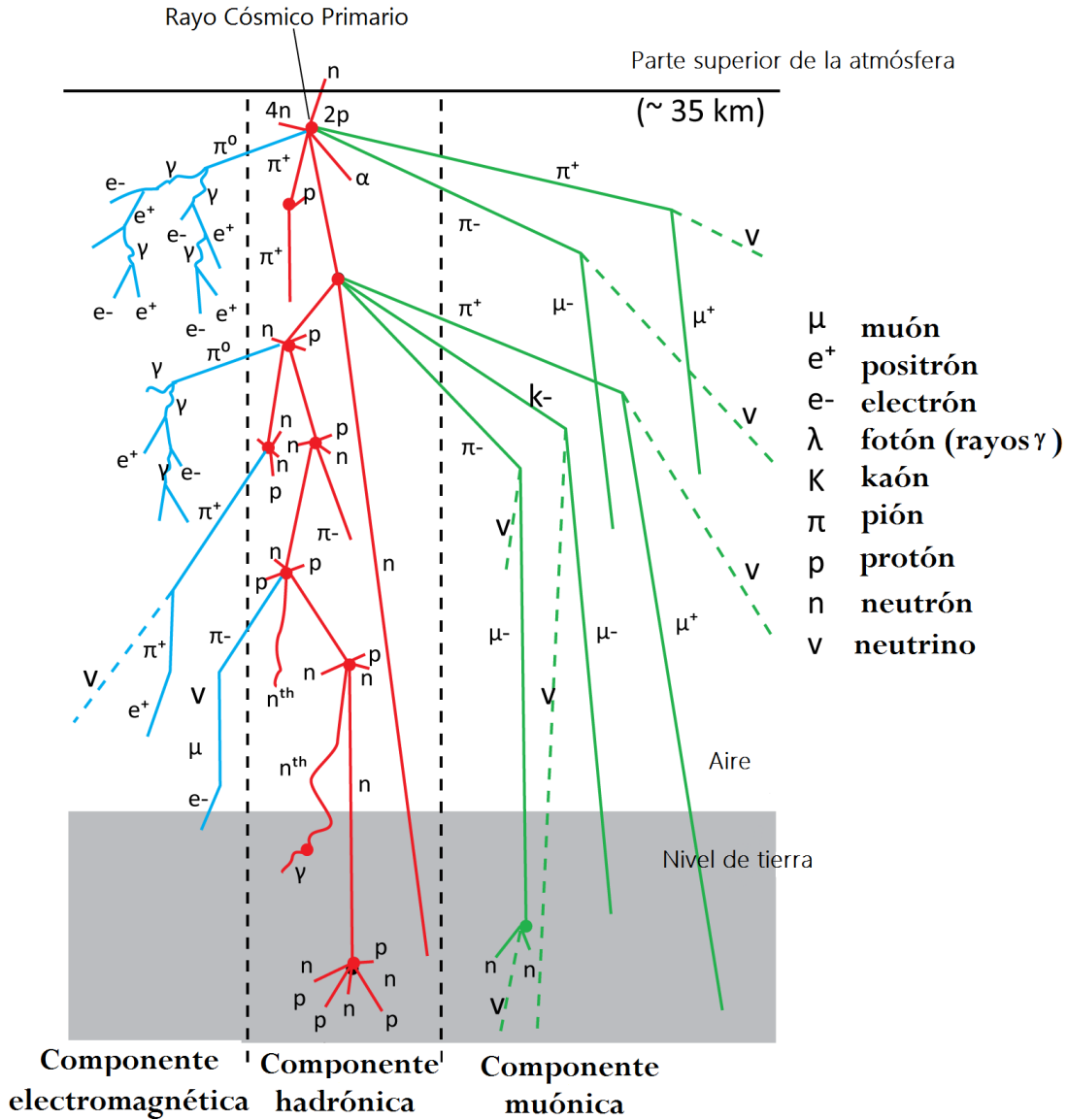


**Figura 4.2:** Composición química de los Rayos Cósmicos Galácticos (RCG), comparada con la abundancia de elementos en el Sistema Solar. Abundancia de elementos normalizada a Si=100. (<https://imagine.gsfc.nasa.gov/>).



### 4.2.1. Rayos Cósmicos Secundarios

Cuando los RC primarios penetran en la atmósfera terrestre, pueden tener interacciones con los átomos y moléculas del aire. La probabilidad de que un protón colisione con un núcleo del aire es muy pequeña; sin embargo, estos procesos involucran cambios de energía muy grande, y esto determina la formación de los rayos cósmicos secundarios.



**Figura 4.3:** Esquema del chubasco atmosférico generado por la interacción de un rayo cósmico primario y un núcleo de la atmósfera. En este se producen los rayos cósmicos secundarios [27].

La generación de los rayos cósmicos secundarios comienza con la producción de nucleones mediante la interacción nuclear de un protón primario con energía mayor a  $1 \times 10^9 \text{ eV}$  y un núcleo de la atmósfera terrestre. Si estos nucleones producidos cuentan con la energía suficiente, pueden tener nuevas interacciones nucleares y generar millones de partículas secundarias que se extienden a lo ancho del eje central, a este proceso en cascada se le conoce como chubasco atmosférico. En general, la producción de partículas secundarias depende de la energía de la partícula primaria y del balance entre las interacciones nucleares y el decaimiento de las partículas inestables [27].

Los chubascos atmosféricos consisten de tres componentes principales:

1. **Componente electromagnética.** La interacción nuclear entre un rayo cósmico primario y un núcleo atmosférico produce hadrones, en particular piones neutros inestables ( $\pi^0$ ) estos poseen una vida media de  $8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$ , los cuales decaen en dos rayos gamma ( $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ); posteriormente, estos rayos gamma pueden producir un par electrón-positrón que subsecuentemente experimentan bremsstrahlung<sup>1</sup>, generando nuevamente rayos gamma y así producción de pares electrón-positrón, y esto continua mientras la energía de los fotones exceda  $1.02 \text{ MeV}$ . La repetición de este proceso genera la componente electromagnética de la cascada, como se muestra en la figura 4.3 [27].
2. **Componente muónica.** Otro producto de las interacciones nucleares entre una partícula primaria y un núcleo atmosférico son los piones cargados ( $\pi^+$  y  $\pi^-$ ) que también son inestables y poseen una vida media de  $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$  y un camino libre medio de interacción de  $\approx 120 \text{ g/cm}^2$ . Ellos decaen mediante procesos ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ) generando muones y neutrinos que fácilmente penetran en la atmósfera. Los muones poseen una vida media de  $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$ , y son los que mayormente sobreviven hasta nivel del mar debido a que son relativistas. Estos son los que integran la componente muónica o dura de la cascada (figura 4.3). Sin embargo, también contribuyen a la componente electromagnética ya que algunos muones decaen y producen electrones y neutrinos mediante los procesos ( $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu$ ) y ( $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu$ ).
3. **Componente hadrónica.** También llamada nucleónica, las interacciones nucleares entre partículas primarias y núcleos atmosféricos, producen nucleones, que en su mayoría son hadrones. Si estos cuentan con la energía suficiente, experimentan nuevas interacciones nucleares y así producen nuevos nucleones (figura 4.3), este proceso se puede repetir mientras los nucleones producidos tengan una energía mayor a  $1 \text{ GeV}$ . Son estos nucleones producidos los que generan la componente nucleónica del chubasco.

Conforme la radiación cósmica secundaria atraviesa la atmósfera, su composición se ve afectada debido a la interacción con las partículas atmosféricas. Esta interacción está en función de distintos parámetros que afectan a esta última, como son la temperatura y la presión. Por lo tanto, si las condiciones atmosféricas varían, entonces debe variar también la intensidad de partículas secundarias registradas en detectores en tierra [28].

<sup>1</sup>Mecanismo mediante el cual los electrones pierden energía al interactuar con el campo electroestático de un núcleo. Cuando una partícula cargada es desacelerada su energía cinética se ve disminuida y para no violar la ley de conservación de energía, esta emite radiación electromagnética llamada "bremsstrahlung" [27].

### 4.3. Variaciones en el flujo de rayos cósmicos

En general, las partículas cargadas que penetran la parte superior de la atmósfera son moduladas por el viento solar y el campo geomagnético. A continuación se describen estas variaciones, tomando en cuenta que este trabajo tiene como objetivo explicar la variación de RC de acuerdo con el comportamiento del campo geomagnético.

#### 4.3.1. Variación diurna

Esta variación se debe a la modulación de los RC por el campo magnético interplanetario (CMI) mediante el balance de dos procesos: el flujo difusivo y el flujo convectivo.

El flujo difusivo se da cuando los rayos cósmicos que se propagan en la heliosfera son atrapados por las líneas del CMI, esto favorece la propagación de los RC hacia adentro de la heliosfera y el flujo convectivo se da debido a que las líneas del CMI son arrastradas hacia afuera de la heliosfera, y por la expansión del viento solar, los RC también son arrastrados hacia afuera de la heliosfera. Como podemos ver en la figura 4.4, el flujo neto de los RC es la suma vectorial entre el flujo difusivo y el flujo convectivo. La intensidad de los RC tendrá un máximo a las 18 horas, hora local. [16] [27] [4].

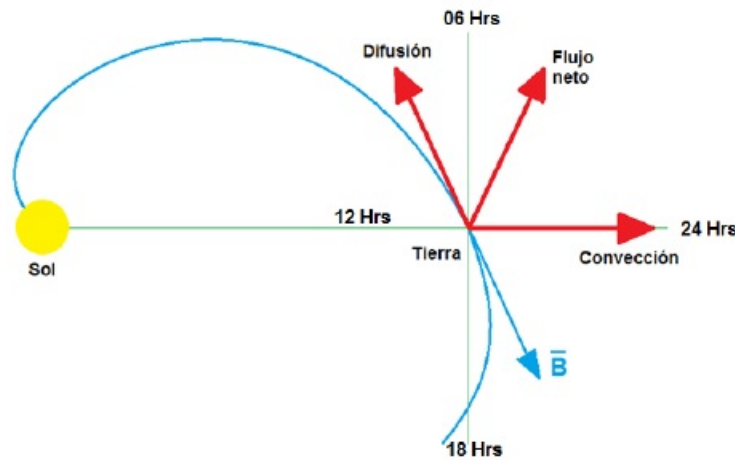
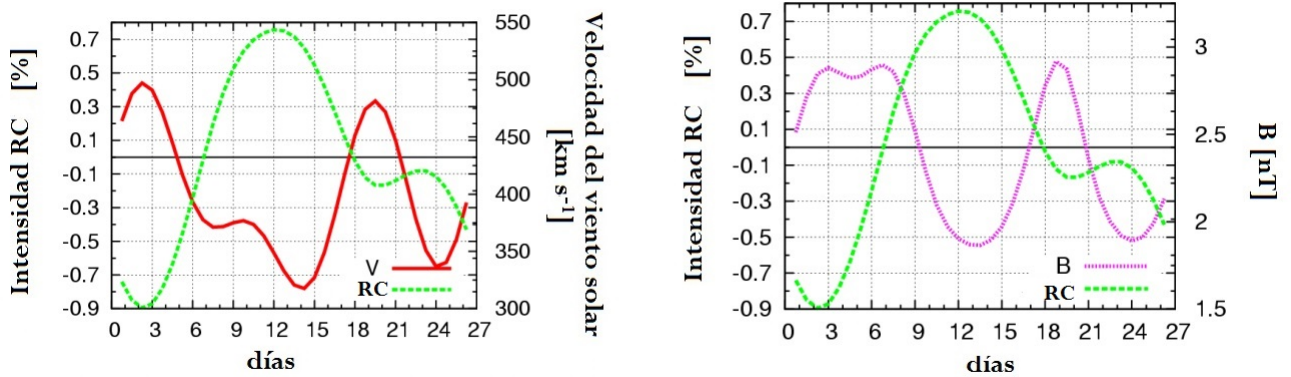


Figura 4.4: Esquema de la variación diurna [16].

#### 4.3.2. Variación de 27 días

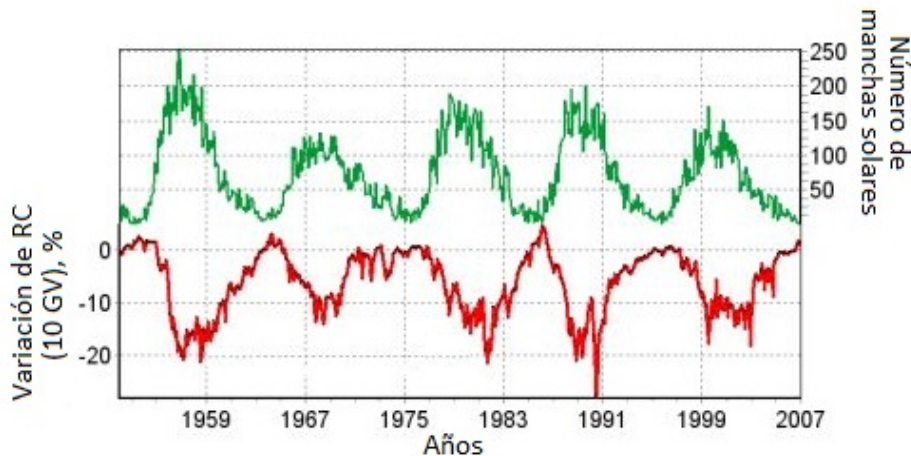
Pueden observarse anomalías en el flujo de RC en intervalos de aproximadamente de 27 días. Esta periodicidad está relacionada con el periodo de rotación de 27 días del Sol. Las variaciones son causadas por la distribución no homogénea de regiones activas en la superficie del Sol y dependen del tiempo que duren y permeen el medio interplanetario. En la figura 4.5 podemos observar esta variación según el cambio en la velocidad del viento solar y de la intensidad del campo magnético interplanetario en un periodo de 27 días [29].



**Figura 4.5:** Relación del flujo de RC dependiendo de la velocidad del viento solar (gráfica izquierda) y relación del flujo de RC de acuerdo con la intensidad del CMI (gráfica derecha) [29].

#### 4.3.3. Variación de 11 años

Esta oscilación está relacionada directamente con el ciclo de actividad solar: durante el mínimo solar se presenta un flujo alto de rayos cósmicos; en cambio en el máximo solar el flujo de rayos cósmicos disminuye debido a que durante el máximo de la actividad solar se transportan campos magnéticos de mayor intensidad hacia fuera del Sol, arrastrado por el viento solar, desviando un número mayor de partículas. Esto significa que existe una anticorrelación con la actividad solar, pues la presencia de mayor número de manchas solares coincide con el mínimo en la intensidad de rayos cósmicos detectados a nivel de tierra, como puede observarse en la figura 4.6 [3] [16].



**Figura 4.6:** La variación de 11 años muestra una anticorrelación entre el número de manchas solares (línea verde) y el conteo de rayos cósmicos (línea roja); cuando el número de manchas solares es máximo, los rayos cósmicos tienen un mínimo y viceversa [30].

Se observan variaciones más sutiles que probablemente están relacionadas con la inversión de la polaridad del campo magnético solar, éstas coinciden con los máximos de las manchas solares y tienen una periodicidad de 22 años, llamado ciclo Hale. En este ciclo se muestra una alternancia de 11 años en la forma de los máximos de los RC entre picos más agudos y otros más redondeados.

#### 4.3.4. Decrecimientos Forbush

En 1937, Forbush observó una disminución mundial de los RC durante una fuerte tormenta magnética, dando la primera evidencia de una relación entre la actividad solar y los RCs [31]. Esta disminución fue nombrada decrecimiento Forbush (dF), dicho fenómeno se caracteriza por un descenso en la intensidad de los rayos cósmicos en dos fases: una disminución repentina que dura algunas horas; y una recuperación gradual en un lapso de tiempo de días o hasta semanas, como se observa en la figura 4.7 [16].

Los dFs están generalmente correlacionados con regiones de interacción corrotantes (RICs), choques interplanetarios o eyecciones de masa coronal (EMC) originadas en el Sol.



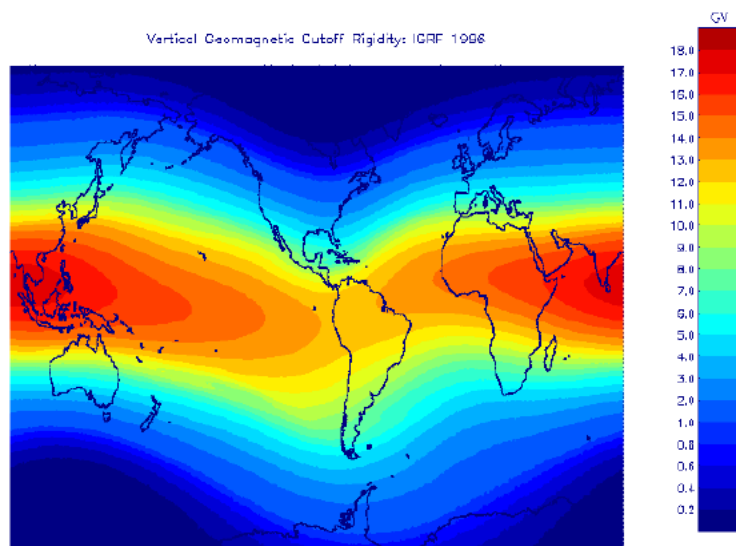
**Figura 4.7:** Decrecimiento Forbush detectado por el monitor de neutrones de la CDMX en junio de 2015.

#### 4.3.5. Variaciones debidas al campo geomagnético

Esta variación también está asociada a la actividad solar; por ejemplo, el campo magnético terrestre es comprimido por el plasma que se emite en el Sol y, en casos con fuertes emisiones solares, puede provocar rompimiento de líneas de campo geomagnético. Cuando las líneas de

campo se rompen, pueden permitir que partículas de baja energía penetren y lleguen a nivel de tierra con mayor facilidad, las cuales pueden generar variaciones en los registros de los rayos cósmicos galácticos que ingresan a la Tierra y son detectados por observatorios especializados como los monitores de neutrones (MN) [16].

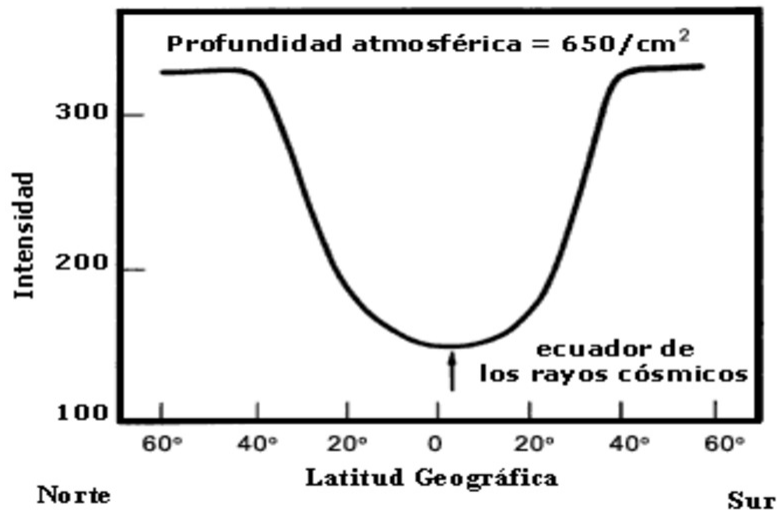
Como los RC son partículas cargadas, cuando se acercan a la magnetosfera su propagación se ve afectada por lo que resulta conveniente caracterizar a las partículas por su rigidez magnética (medida de la resistencia de la partícula a ser desviada por un campo magnético) ya que las partículas con la misma rigidez magnética seguirán trayectorias similares. La rigidez magnética de una partícula equivale a la energía por unidad de carga eléctrica. En la figura 4.8 se observa la rigidez magnética de acuerdo a la latitud.



**Figura 4.8:** Rigidez Magnética para cada latitud del planeta. La rigidez magnética se mide en GV ([https://www.researchgate.net/figure/Global-grid-of-quietest-vertical-geomagnetic-cutoff-rigidities-GV-calculated-from\\_fig9\\_221924543](https://www.researchgate.net/figure/Global-grid-of-quietest-vertical-geomagnetic-cutoff-rigidities-GV-calculated-from_fig9_221924543)).

La trayectoria de la partícula en un campo homogéneo será una hélice. En el caso de partículas que se mueven dentro de un dipolo, las trayectorias incluyen derivas causadas por la curvatura y gradiente del campo terrestre.

La intensidad del campo magnético terrestre varía con la latitud y de esta manera las partículas necesitan una energía mínima para ingresar en un punto específico de la magnetosfera y ser detectada por un monitor a cierta latitud geográfica, esta energía se conoce como rigidez umbral magnética. De esta manera, los detectores localizados a bajas latitudes registran un menor número de partículas, mientras que detectores localizados cerca de los polos magnéticos de la Tierra registran una mayor cantidad de partículas, dicho fenómeno se conoce como efecto latitudinal (figura 4.9) [32].



**Figura 4.9:** Efecto latitudinal en la intensidad de la radiación cósmica. Cada curva se refiere a partículas de una rigidez magnética en partículas y da el número total de dichas partículas que llegan al tope de la atmósfera como función de la latitud geomagnética [32].

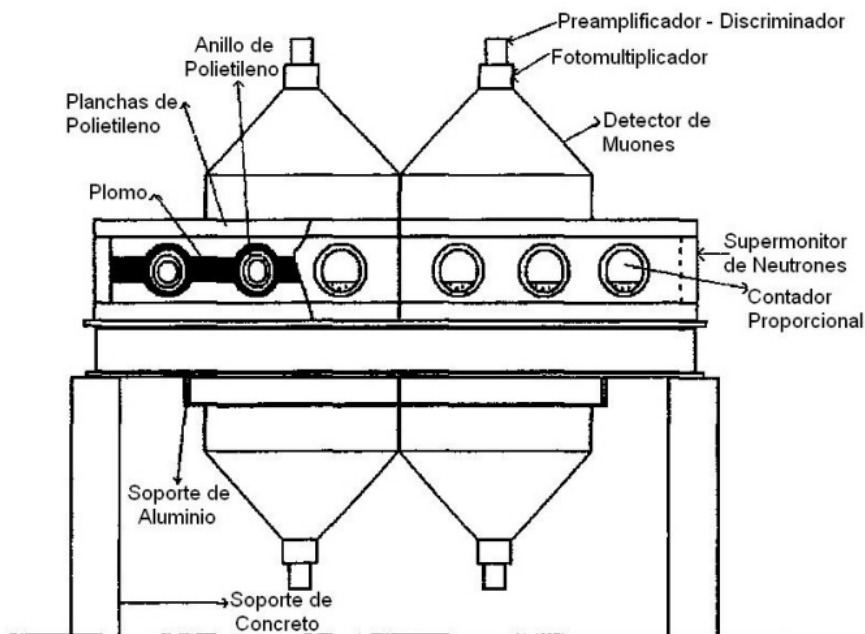
En los polos magnéticos la rigidez magnética es cercana a cero mientras que en el ecuador es aproximadamente  $15\text{ GV}$  para la incidencia vertical. Además de la rigidez magnética, existe un límite atmosférico dependiente de la altitud, evitando que las partículas de baja energía lleguen a nivel de tierra debido a las interacciones con la atmósfera.

#### 4.4. Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México

Alrededor del mundo se encuentra localizada una red de más de 50 observatorios con monitores encargados de detectar la radiación cósmica que llega a la Tierra proveniente de todas direcciones del espacio (<http://www.nmdb.eu/>). En México, se ubica el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CDMX), perteneciente a dicha red.

El ORC-CDMX se encuentra a cargo del grupo de Rayos Cósmicos del Instituto de Geofísica de la UNAM; está ubicado dentro del Campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. El observatorio trabaja de manera continua desde 1990 [33].

Este observatorio está conformado por dos sistemas de monitoreo de partículas: un Telescopio de Muones y el Monitor de Neutrones 6-NM64, como se muestra en la figura 4.10. En este estudio se emplearon los datos obtenidos por el monitor de neutrones.



**Figura 4.10:** Esquema del Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México. Consta de: 6-NM64 y un Telescopio de Muones [28].

#### 4.4.1. Monitor de Neutrones

En general, un monitor de neutrones (MN) es un detector estándar para detectar la variación de la radiación cósmica a nivel de tierra. A pesar de que es un dispositivo estándar, el sitio en donde se localice el MN puede variar la eficiencia del sistema de detección y causar una desviación del  $\pm 15\%$  de la “unidad estándar” de medición [34]. Estos detectores son sensibles a RC que penetran la atmósfera de la Tierra con energías de aproximadamente  $0.5 - 20 \text{ GeV}$ .

En particular, los MN proporcionan un registro continuo de la componente hadrónica o nucleónica de la componente secundaria de los RCs, principalmente neutrones y protones.

Con el propósito de iniciar la red internacional de detectores de neutrones para el estudio de rayos cósmicos, en 1964, Hugh Carmichael diseñó el Super Monitor de Neutrones NM64 en los laboratorios Chalk River. Fue el detector de rayos cósmicos estándar en el congreso International Quiet Sun Year (IQSY) [35].

Los MN están compuestos por tubos llenos de gas, llamados contadores proporcionales y están rodeados por un moderador, un material productor hecho de plomo y un reflector. Los nucleones que inciden en el monitor (protones y neutrones) provocan reacciones nucleares en el plomo. Estas reacciones generan neutrones de evaporación de baja energía. A su vez, el moderador reduce la velocidad de estos nuevos neutrones del rango de los MeV hasta el de energías térmicas. Finalmente, cerca de un  $6\%$  de estos neutrones será detectado por los tubos



contadores [30].

El principio de funcionamiento del MN se basa en la reacción 4.1 que se produce dentro de los contadores proporcionales, dicha reacción se da entre neutrones térmicos con energías de  $0.025\text{ eV}$  y el gas que se encuentra en el interior de los contadores. Generalmente, el gas es trifluoruro de boro ( $BF_3$ ), enriquecido al 96% con el isótopo  $^{10}\text{B}$ , a una presión de 0.27 bar [8] [28] [35].



Si los neutrones incidentes son demasiado rápidos, tendrán muy poca probabilidad de provocar la reacción con el gas del contador y de ser detectados. Para aumentar la probabilidad de detección los neutrones tienen que ser desacelerados por el moderador que es una capa de polietileno que rodea los contadores.

El productor, que es la fuente de neutrones, está hecho de plomo con una pureza del 99% en forma de anillos de  $10.2\text{ cm}$  de grosor que rodean al moderador. La tarea del productor es generar neutrones de evaporación y neutrones de baja energía mediante reacciones nucleares entre las partículas energéticas incidentes y el plomo. Los neutrones de evaporación que se producen tienen una distribución de energía con un máximo cerca de los  $2\text{ MeV}$ , alcanzando máximos de aproximadamente  $15\text{ MeV}$ .

Por encima del productor se encuentra el reflector, que es una capa de polietileno de baja densidad con  $7.5\text{ cm}$  de ancho y cuyo propósito es impedir la salida de neutrones producidos en el plomo, así como absorber los neutrones de baja energía provenientes de la vecindad del monitor.

Cada MN se identifica de acuerdo al número de contadores proporcionales que posee. El Monitor de Neutrones de la CDMX posee 6 contadores proporcionales, de ahí su nombre: 6-NM64.

Los monitores de neutrones no permiten conocer la energía primaria, ni la dirección de arribo de la partícula incidente de forma directa.

#### 4.4.2. Monitor de Neutrones de la CDMX (6-NM64)

En 1946, el Instituto Carnegie instaló en la Ciudad de México (CDMX) una cámara de ionización, la cual fue el primer detector de radiación cósmica operando en forma continua en México.

En 1954, la Universidad de Chicago donó un monitor IGY y fue instalado en el Pabellón de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México. Para 1964, el Instituto de Geofísica de la UNAM comenzó la instalación de un monitor de neutrones NM64, donado por el Dr. John Bland de la Universidad de Calgary.

A principios de 1976 el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu, desmantela el NM64 y comienza su reconstrucción hacia el año 1982. Durante los siguientes años, el Observatorio de

Rayos Cósmicos (ORC) se moderniza y para 1990 se publican por primera vez los datos registrados por el monitor.

Con la dirección del Dr. José Francisco Valdés Galicia, se instaló el telescopio de muones en el ORC-CDMX, que funciona desde 2008.

Actualmente, el monitor se localiza a  $19.33^{\circ}N$  latitud,  $260.82^{\circ}E$  longitud y 2274m sobre el nivel del mar, detectando partículas con una rigidez umbral de 8.23 GV, trabajando 24 horas al día, los 365 días del año. Los datos utilizados en este trabajo fueron consultados en [33].



**Figura 4.11:** Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (derecha). Monitor de Neutrones 6-NM64 (izquierda) [24]



---

## Análisis y Resultados

---

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo identifica las variaciones en las cuentas de rayos cósmicos (RC) que son detectados por el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX) del Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México [33] atribuidas a tormentas geomagnéticas (TG). De este modo, se utilizan los datos de RC detectados por el MN-CDMX, además de la intensidad del índice Dst publicado por el World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [36], con el que se identificaron los eventos de TG.

Además, para el análisis y la identificación de los eventos geomagnéticos, pero sobre todo, aquellos que fueron geoefectivos; se consultaron los reportes sobre el clima espacial de la NOAA [37], el Servicio de Clima Espacial-México (SCiESMEX) [2] y datos del medio interplanetario en OMNI database [38], Solar Monitor [39], LASCO [40], entre otros.

Con el propósito de conocer cuales son las afectaciones en el flujo de rayos cósmicos registrados por el MN-CDMX cuando hay una tormenta geomagnética, también se tuvo que analizar cuál fue el fenómeno que propició la perturbación del campo geomagnético. Se identificaron y asociaron las TG a dos fenómenos principalmente: eyecciones de masa coronal (EMC) y regiones de interacción corrotante (RIC), ya que dejan una firma singular en el índice Dst, como se muestra en la figura 5.1.

Como se menciona en [41] [5] [12] [42], las tormentas geomagnéticas tienen su origen en el medio interplanetario y varían con el ciclo solar. Durante el máximo solar, los fenómenos que dominan el medio interplanetario y causan tormentas geomagnéticas intensas son EMC. Durante el mínimo del ciclo solar, el viento solar rápido emitido por los hoyos coronales en los polos solares dominan la actividad del medio interplanetario y se ve invadido por diversas RIC.

Cuando se considera una CME, las firmas más comunes en las propiedades del viento solar y el campo magnético interplanetario son: aumento en la intensidad del campo magnético ( $> 10 nT$ ), temperatura de protones baja, la velocidad del VS aumenta rápidamente y cae lentamente y densidad de protones baja [43].

En el caso de las RIC de acuerdo con [44], las características físicas básicas del medio interplanetario y el viento solar son: densidad alta durante aproximadamente un día, la temperatura del viento solar varía con un patrón similar al de su velocidad; en una región de baja densidad la temperatura es alta y viceversa. La magnitud del CMI es intensa, entre  $10 - 15 nT$ .

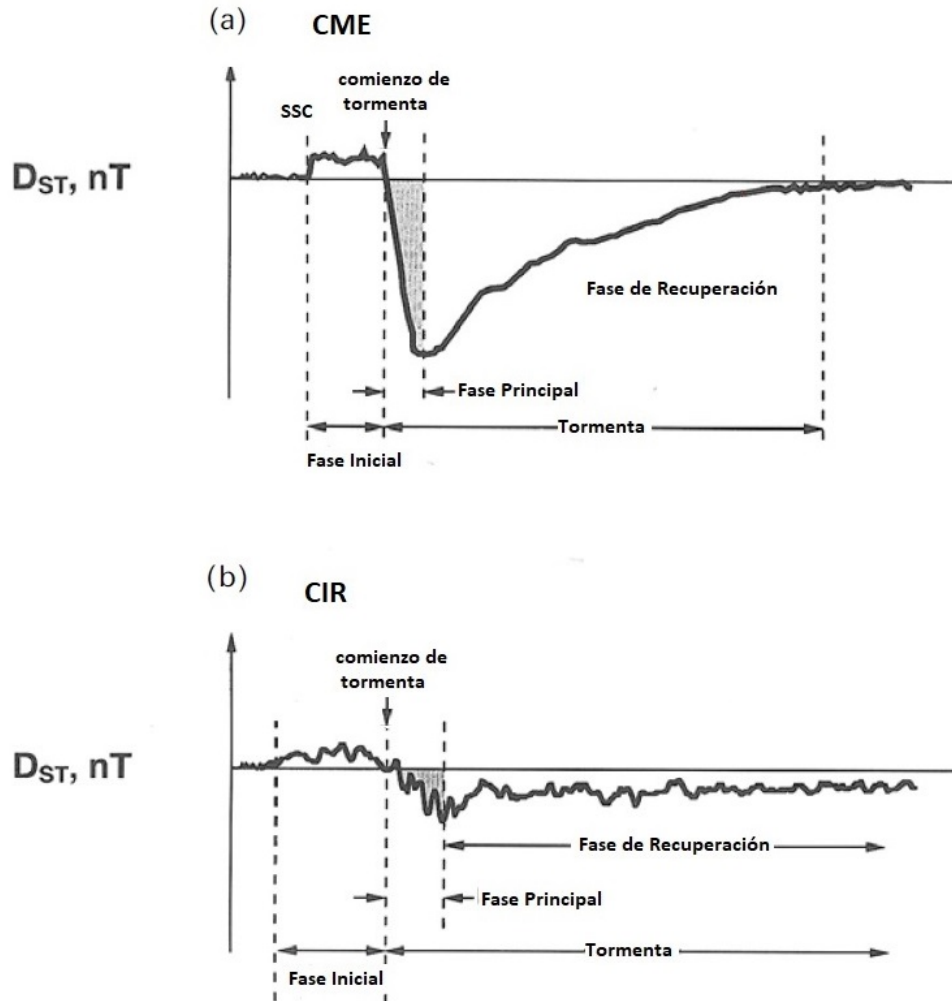


Figura 5.1: Firmas de Tormentas Geomagnéticas producidas por CME y CIRs [5].

## 5.1. Selección de Tormentas Geomagnéticas

En este estudio, se tomaron en cuenta las TG moderadas ( $-50 \geq Dst \geq -100$ ) e intensas ( $-100 \geq Dst \geq -200$ ) de la fase descendente del ciclo solar 24 (años 2015, 2016 y 2017), debido a que una tormenta débil no produce afectaciones significativas al clima espacial [37].

El periodo de cada TG se definió principalmente con el índice Dst con una resolución de 1 hora, identificando cada una de las fases que debería tener una TG. A partir del SSC o de la fase inicial, donde el índice Dst se incrementa repentinamente, se consideraron 2 días antes para poder ver el comienzo del evento. Se identificó la fase de recuperación y se determinó el término de cada TG cuando el índice Dst volvió a un valor cercano al que tenía antes del inicio de la TG. La duración por evento fue desde 5 hasta 10 días.

Para analizar los eventos que pudiesen generar variaciones significativas en las cuentas de rayos cósmicos, se utilizaron datos con resolución de 1 hora del MN-CDMX, que se correspondieron al tiempo de las TG identificadas con anterioridad. Con base en los datos de RC corregidos por presión, se calculó y trazó una curva que representa la tendencia promedio de RC y se calculó la significancia de  $\pm 3$  veces la desviación estándar ( $\pm 3\sigma$ ).

Se consideró tomar una significancia de  $\pm 3\sigma$  porque:

1. De acuerdo con [45], la variación diurna registrada por el MN-CDMX es del 0.7% sobre el promedio del flujo detectado, lo que corresponde a  $2.5\sigma$ , en promedio. De este modo, con una significancia de  $3\sigma$  aseguramos que los incrementos identificados no corresponden a esta variación periódica.
2. Debido a que las variaciones no pueden atribuirse a la variación diurna, podemos inferir que el flujo registrado, en correspondencia con la TG, se generó por la fluctuación de la intensidad de las líneas de campo geomagnético, que generó que la rigidez umbral bajara de  $8.23 GV$ , permitiendo que partículas con menores energías ingresaran a nivel de la CDMX.

En la tabla 5.1, podemos observar las 33 TG identificadas durante la fase descendente del Ciclo Solar 24, numeradas en la columna 1. En las siguientes 4 columnas se enlistan valores importantes para identificar una tormenta geomagnética como son:

- a) La fecha de inicio de cada TG. que está representado en la columna 2 y está dada por el valor máximo del índice Dst, presentado en la columna 3.
- b) La fecha en la que el índice Dst alcanzó un valor mínimo en cada TG, debido a que, de acuerdo con la tabla 3.1, este nos indica la intensidad de la TG. El valor mínimo y la fecha en que se presentó, se muestran en las columnas 4 y 3, respectivamente.

Las siguientes dos columnas hacen referencia al flujo de rayos cósmicos registrado por el MN-CDMX. En todos los eventos de TG, donde el flujo de RC presentó un incremento mayor a  $3\sigma$ , se calculó la significancia real del incremento; en la columna 6, nombrada sigmas, se indica dicho valor y en la columna 7 el momento del máximo.

En algunos casos, el fenómeno que se presentó en el flujo de RC fue un decrecimiento Forbush, lo cual se marca como dF en la columna sigmas. Finalmente, en la columna 8 se nombra el fenómeno solar al que se atribuyó cada tormenta geomagnética.

Evento	Fecha de inicio (TU)	Dst máx (nT)	Fecha Dst mín (nT)	Dst mín	Sigmas	Fecha (TU)	CME/CIR
1	07/01/2015 07:00	18	07/01/2015 11:00	-99	3.55	07/01/2015 15:00	EMC
2	17/03/2015 00:00	56	17/03/2015 22:00	-223	3.29 (dF)	17/03/2015 01:00	EMC
3	09/04/2015 22:00	24	11/04/2015 09:00	-75			RIC
4	07/06/2015 18:00	25	08/06/2015 08:00	-73			RIC/EMC
5	21/06/2015 19:00	36	23/06/2015 04:00	-204	dF		EMC
6	04/07/2015 16:00	34	05/07/2015 05:00	-68	3.81	04/07/2015 22:00	EMC
7	21/07/2015 01:00	29	23/07/2015 07:00	-64	4.42	20/07/2015 10:00	EMC
8	15/08/2015 09:00	26	16/08/2015 07:00	-84			EMC/RIC
9	06/09/2015 02:00	3	09/09/2015 12:00	-98	4.36	07/09/2015 16:00	RIC
10	20/09/2015 02:00	2	20/09/2015 15:00	-75			RIC
11	06/10/2015 08:00	-10	07/10/2015 22:00	-124	7.68	07/10/2015 18:00	RIC
12	03/11/2015 07:00	34	07/11/2015 07:00	-89	dF		RIC/EMC
13	19/12/2015 22:00	43	20/12/2015 22:00	-155	6.45	19/12/2015 16:00	EMC
14	31/12/2015 01:00	20	01/01/2016 00:00	-110	dF		EMC
15	18/01/2016 22:00	19	20/01/2016 16:00	-93	dF		EMC
16	02/02/2016 13:00	16	03/02/2016 02:00	-53	5.24	16/02/2016	EMC/RIC
17	06/03/2016 10:00	28	06/03/2016 21:00	-98	10.53	06/03/2016 22:00	RIC
18	14/03/2016 18:00	47	15/03/2016 07:00	-50	8.3	28/03/2016 18:00	RIC
19	02/04/2016 14:00	35	02/04/2016 23:00	-56			RIC/EMC
20	08/05/2016 01:00	9	08/05/2016 08:00	-88			RIC
21	03/08/2016 02:00	13	03/08/2016 11:00	-52			RIC
22	23/08/2016 11:00	15	23/08/2016 21:00	-74			RIC
23	12/10/2016 22:00	22	13/10/2016 17:00	-103	8.17	14/10/2016 14:00	EMC/RIC
24	09/11/2016 07:00	16	10/11/2016 17:00	-59	3.83	12/11/2016 16:00	RIC
25	01/03/2017 07:00	14	01/03/2017 21:00	-61	4.76	01/03/2017 20:00	RIC
26	26/03/2017 22:00	15	27/03/2017 14:00	-74			RIC
27	27/05/2017 21:00	43	28/05/2017 07:00	-125	4.38	29/05/2017	EMC
28	16/07/2017 05:00	43	16/07/2017 15:00	-72	3.87 (dF)	16/07/2017	RIC
29	31/08/2017 06:00	59	31/08/2017 11:00	-50	5.15	01/09/2017	RIC
30	07/09/2017 01:00	32	08/09/2017 01:00	-124	dF		EMC
31	14/09/2017 12:00	30	14/09/2017 20:00	-53	6.95	13/09/2017 00:00	RIC
32	27/09/2017 05:00	42	28/09/2017 06:00	-55	3.96	27/09/2017 14:00	RIC
33	07/11/2017 04:00	28	08/11/2017 06:00	-76	5.11	08/11/2017	RIC

**Tabla 5.1:** Eventos de tormentas geomagnéticas durante la fase descendiente del ciclo solar 24 (años: 2015, 2016 y 2017).

En la tabla 5.2 se muestran la caída y tiempo de duración de los decrecimientos Forbush (dF) de acuerdo con [46].

No. de Tormenta	Comienzo del dF (TU)	Porcentaje de caída (%)	Duración (horas)
2	17/03/2015 16:00	2.2	192
5	22/06/2015 19:00	6.7	192
12	06/11/2015 18:00	2.1	264
14	31/12/2015 17:00	2.6	183
15	19/01/2016 17:00	2.6	81
28	16/07/2017 10:00	2.8	74
30	08/09/2017 12:00	4.1	72

**Tabla 5.2:** Decrecimientos Forbush durante tormentas geomagnéticas de la fase descendente del Ciclo Solar 24.

Se registrarán 33 tormentas geomagnéticas: 7 intensas y 26 moderadas; de las cuales 30.3 % fueron propiciadas por EMC, 48.5 % por CIR y el 21.2 % puede atribuirse a ambos fenómenos. En 19 de las 33 tormentas observamos incrementos sobre el  $3\sigma$ , durante 7 TG ocurren decrecimientos Forbush y en las 9 restantes las cuentas de RC no mostraron variaciones significativas. Cabe mencionar que el evento ocurrido el 16 de julio de 2017 fue un decrecimiento Forbush, que en la etapa de recuperación, sobrepasó la significancia  $3\sigma$ .

De los eventos importantes para el clima espacial, el 52.6 % fueron ocasionados por RIC, 31.5 % por EMC y el 15.8 % restante fueron ocasionadas por ambas estructuras.

Lo anterior corresponde con la literatura: durante la fase descendente del ciclo solar, las tormentas geomagnéticas son ocasionadas en su mayoría por RIC.

Además, por cada tormenta a analizar se tiene un gráfico que muestra las condiciones del campo magnético interplanetario (CMI) y del viento solar (VS) en el mismo intervalo de tiempo que se graficó el flujo de RC y el índice Dst. Como hemos mencionado antes, estos datos son de utilidad para: 1) conocer si hubo las condiciones necesarias para que se formará una tormenta geomagnética; 2) identificar el fenómeno que provocó la TG.

## 5.2. Eventos analizados

De las 33 TG se han elegido 6 eventos que son los más representativos para mostrar las variaciones del CMI y del VS, cuando estos están influenciados por una EMC y/o una RIC; además, se analizaron las implicaciones cuando se genera una TG moderada, una TG intensa y cómo varía el flujo de los rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX. Las tormentas analizadas se muestran en la tabla 5.3 cuando se genera una TG moderada o una TG intensa y como varía el flujo de rayos cósmicos.



Tormenta Geomagnética	EMC/RIC	Categoría	Significancia
21/06/2015	EMC	intensa	dF
19/12/2015	EMC	intensa	$6.45\sigma$
6/03/2016	RIC	moderada	$10.53\sigma$
12/10/2016	EMC/RIC	intensa	$8.17\sigma$
16/07/2017	EMC	moderada	dF
07/11/2017	RIC	moderada	$5.11\sigma$

**Tabla 5.3:** Eventos de tormentas geomagnéticas seleccionados.

### 5.2.1. Evento del 21 de junio 2015

Durante junio de 2015 se presentaron una serie de fulguraciones clase M [39] y de EMC que arribaron a Tierra y causaron perturbaciones en el CMI y en el VS, provocando la tormenta geomagnética que inicio el 21 de junio de 2015.

De acuerdo con el catálogo de eyecciones de masa coronal detectadas por LASCO ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) y [47], se presentaron las siguientes CME, que influyeron en la evolución de la tormenta geomagnética en cuestion:

EMC	fecha de registro	arribo a la Tierra
EMC_1	18-06-2015 17:24	21-06-2015 15:40
EMC_2	19-06-2015 06:42	22-06-2015 4:50
EMC_3	21-06-2015 02:36	22-06-2015 17:59
EMC_4	22-06-2015 18:36	24-06-2015 12:57
EMC_5	25-06-2015 08:36	27-06-2015 03:30

**Tabla 5.4:** Eyecciones de Masa Coronal que propiciaron la tormenta geomagnética del 21 de junio de 2015 [47].

Con base en el registro del índice Dst (figura 5.3), el inicio de la tormenta geomagnética fue a las 15:00 hrs TU del 21 de junio de 2015. Se muestra un SSC (línea verde en la figura 5.3) y la tormenta alcanzó la categoría de intensa con la llegada de la EMC\_1 alrededor de las 14:40 hrs, como se muestra en la tabla 5.4 y las figuras 5.3 y 5.2.

A partir de este momento, el índice Dst disminuyó durante aproximadamente 14 horas hasta la llegada de la segunda EMC (EMC\_2) el 22/06/2015 a las 4:50 hrs TU, donde el Dst tuvo

un ligero incremento. Durante este periodo, la intensidad del campo magnético interplanetario (CMI) se incrementó hasta  $10 nT$ , la componente Bz se mantuvo dirigida hacia el norte, la densidad del VS se incrementó, para posteriormente disminuir de forma gradual, mientras la temperatura se mantuvo baja y la velocidad del viento solar comenzó a aumentar.

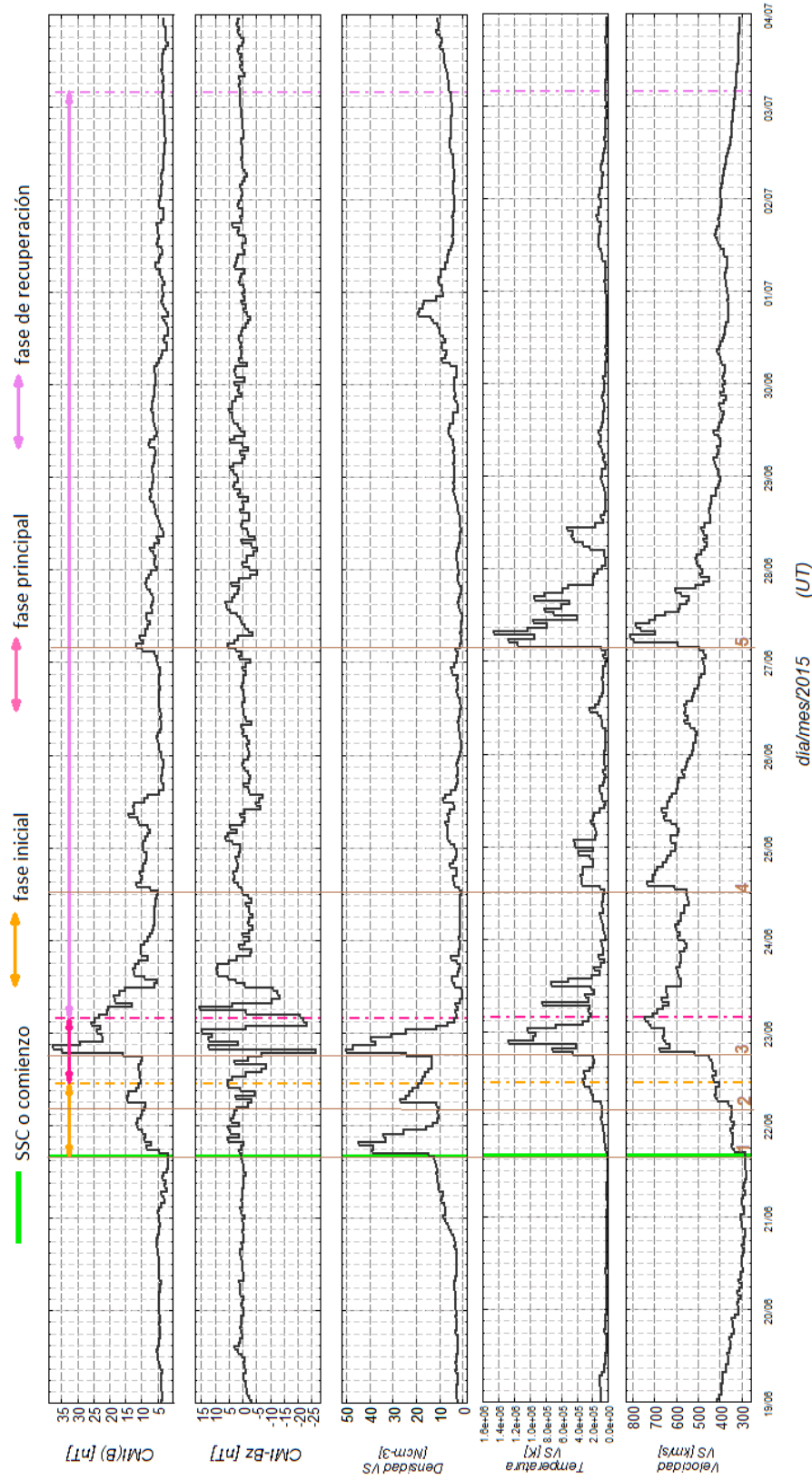
La segunda EMC asociada a una fulguración M6 (línea café, número 2 en las figuras 5.3 y 5.2) tuvo influencia en el CMI y el VS durante aproximadamente 13 horas. La intensidad del CMI se mantuvo entre  $10$  y  $15 nT$ , la componente Bz mostró variaciones entre el sur y norte, la densidad del VS sufrió un ligero aumento y comenzó a disminuir poco a poco. La temperatura se incrementó ligeramente al igual que la velocidad.

Por la tarde del 22 de junio (18:00 TU), se observó un segundo SSC ocasionado por una tercer EMC. Este choque provocó que el CMI se incrementará hasta  $40 nT$ , la componente Bz se dirigiera hacia el sur con una intensidad  $< -25 nT$ , la densidad del VS se incrementó hasta  $50 Ncm^{-3}$  y comenzó a disminuir rápidamente, llegando a su mínimo en 12 horas. La temperatura también sufrió una oscilación y disminuyó en casi un día. La velocidad se incrementó a más de  $700 km/s$ , para después disminuir gradualmente.

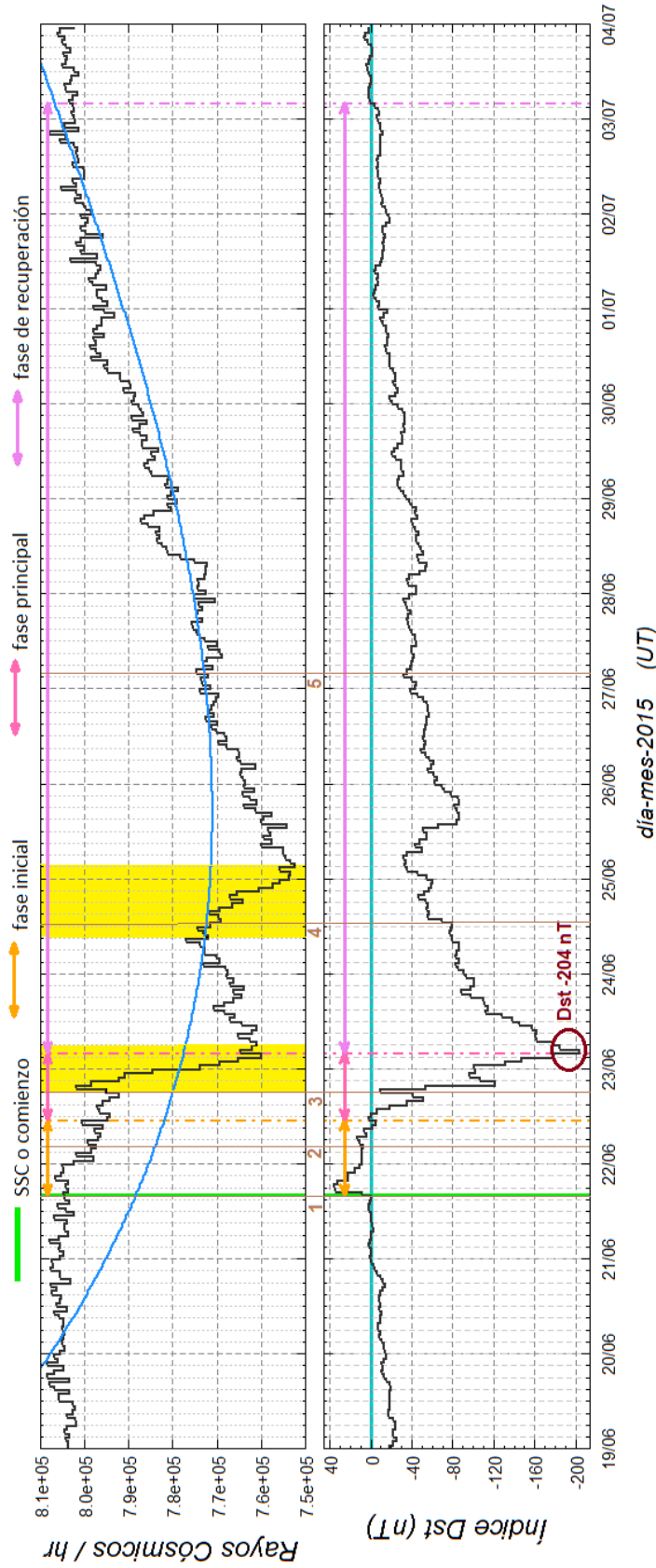
A la llegada de la cuarta EMC, el 24 de junio, la intensidad del CMI y la componente Bz ya no sufrieron grandes cambios, ambas se mantuvieron en niveles bajos, al igual que la densidad y temperatura del VS. La velocidad del VS mostró un aumento hasta alcanzar los  $750 km/s$  y comenzó a disminuir lentamente.

Finalmente, una quinta EMC asociada con una fulguración clase M7 del 25 de junio, impactó la Tierra el 27 junio alrededor de las 3:00 TU. La velocidad del viento solar aumentó a  $800 km/h$  y comenzó a disminuir lentamente a valores de viento solar lento, los cuales mantuvo hasta el final de la TG. La temperatura sufrió el mismo patrón que la velocidad durante la influencia de esta EMC, mientras la densidad, el CMI y la componente Bz se mantuvieron en los mismos niveles que las ultimas EMC.

En la figura 5.3 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, en esta figura podemos observar que el campo geomagnético se encontraba alrededor de  $0 nT$ , antes del comienzo de la tormenta geomagnética. Como se mencionó anteriormente, este evento comenzó el 21 de junio de 2015, cerca de las 16:00 hrs TU con un SSC, donde el índice Dst alcanzó un valor máximo de  $36 nT$ . Esta TG entra en la categoría de tormenta intensa debido a que el índice Dst alcanzó un valor mínimo de  $-204 nT$  (marcado con un círculo rojo en la figura 5.3). La variación que presentó el flujo de rayos cósmicos durante este evento fueron dos decrecimientos Forbush. El primero comenzó el 22 de junio de 2015 alrededor de las 18:33 TU y el segundo el 24 de junio a las 12:00 TU, de acuerdo con [47]. El primer dF fue de 5.4 % y el segundo de 3.4 %.



**Figura 5.2:** Datos de las condiciones del Campo Magnético Interplanetario (CMI) y del viento solar en el mismo intervalo de tiempo de la tormenta geomagnética del 21 de junio de 2015. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del viento solar, 4) temperatura del viento solar, 5) velocidad del viento solar. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: 1) línea verde es el comienzo, 2) intervalo naranja es la fase inicial, 3) intervalo rosa corresponde a la fase principal y 4) intervalo morado es la fase de recuperación. Las líneas de color café representan la llegada de las 5 eyecciones de masa coronal, se numeran con base en su fecha de arriba.



**Figura 5.3:** Tormenta geomagn6tica del 21 de junio de 2015. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C3smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, los periodos en color amarillo corresponde a los dF's mencionados. En el panel inferior se muestra el 6ndice Dst en el mismo intervalo de tiempo que las cuentas de RC. En esta gr6fica el c6rculo rojo indica el valor m6nimo para el 6ndice Dst; la l6nea turquesa marca el 6ndice Dst en valor  $0\text{ nT}$ , donde el campo magn6tico no est1 perturbado. En ambas gr6ficas se muestran las fases de la tormenta geomagn6tica, la l6nea verde muestra el comienzo de la TG, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperaci3n. Las l6neas de color caf1 representan la llegada de las 5 eyecciones de masa coronal, se numeran con base en su fecha de arribo.

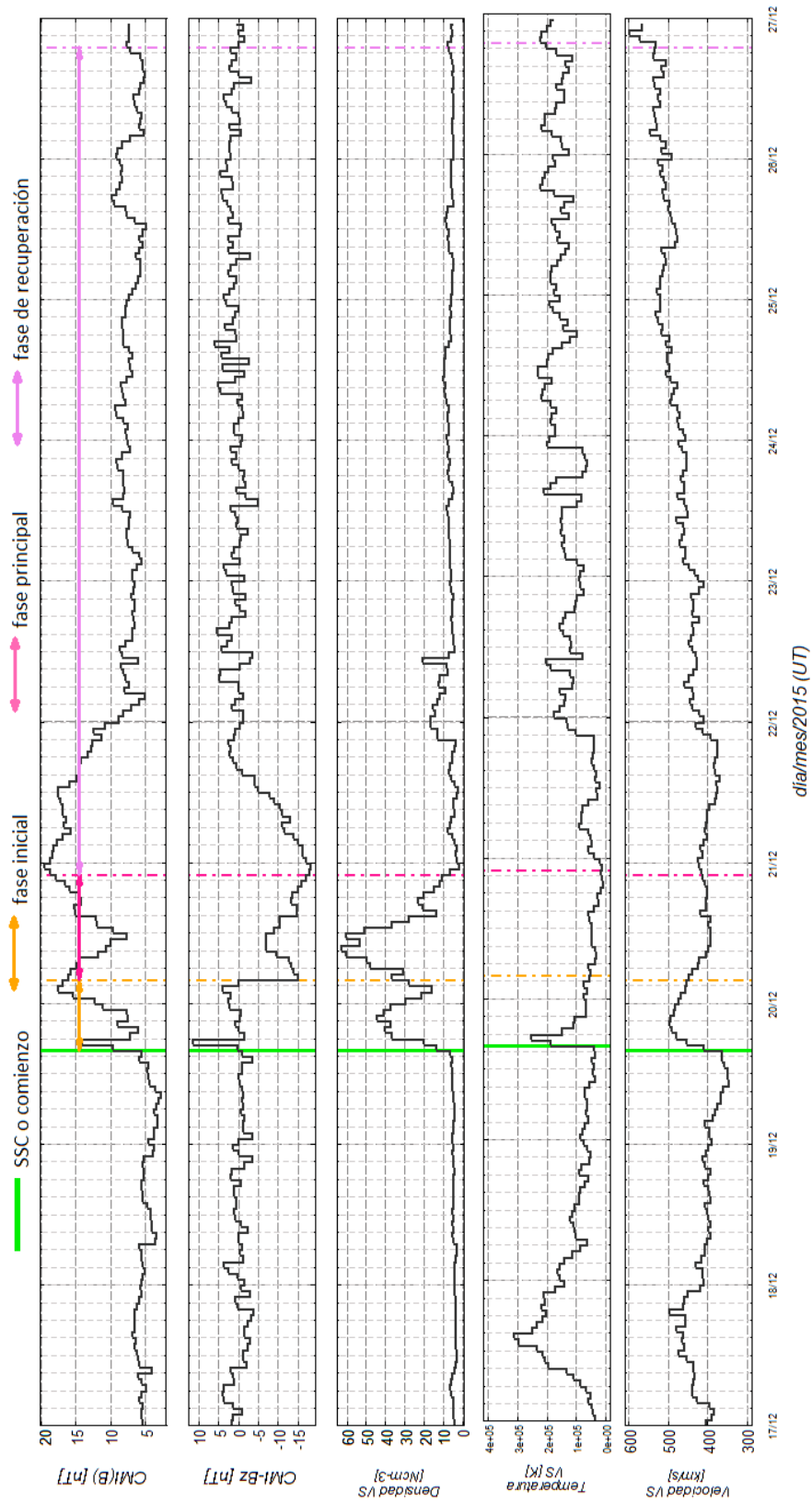
### 5.2.2. Evento del 19 diciembre de 2015.

Durante el periodo de la primer tormenta geomagnética, generada en diciembre de 2015, la actividad solar fue baja y se emitieron fulguraciones clase C, que propiciaron dos EMC durante el 16 de diciembre [37]. La primer EMC asociada a una fulguración C6, comenzó el 16 de diciembre a las 09:36 TU. La segunda CME se asoció a una erupción de filamento y se observó a las 14:24 TU. Ambas estructuras arribaron a la Tierra la tarde del 19 de diciembre alrededor de las 15:00 TU.

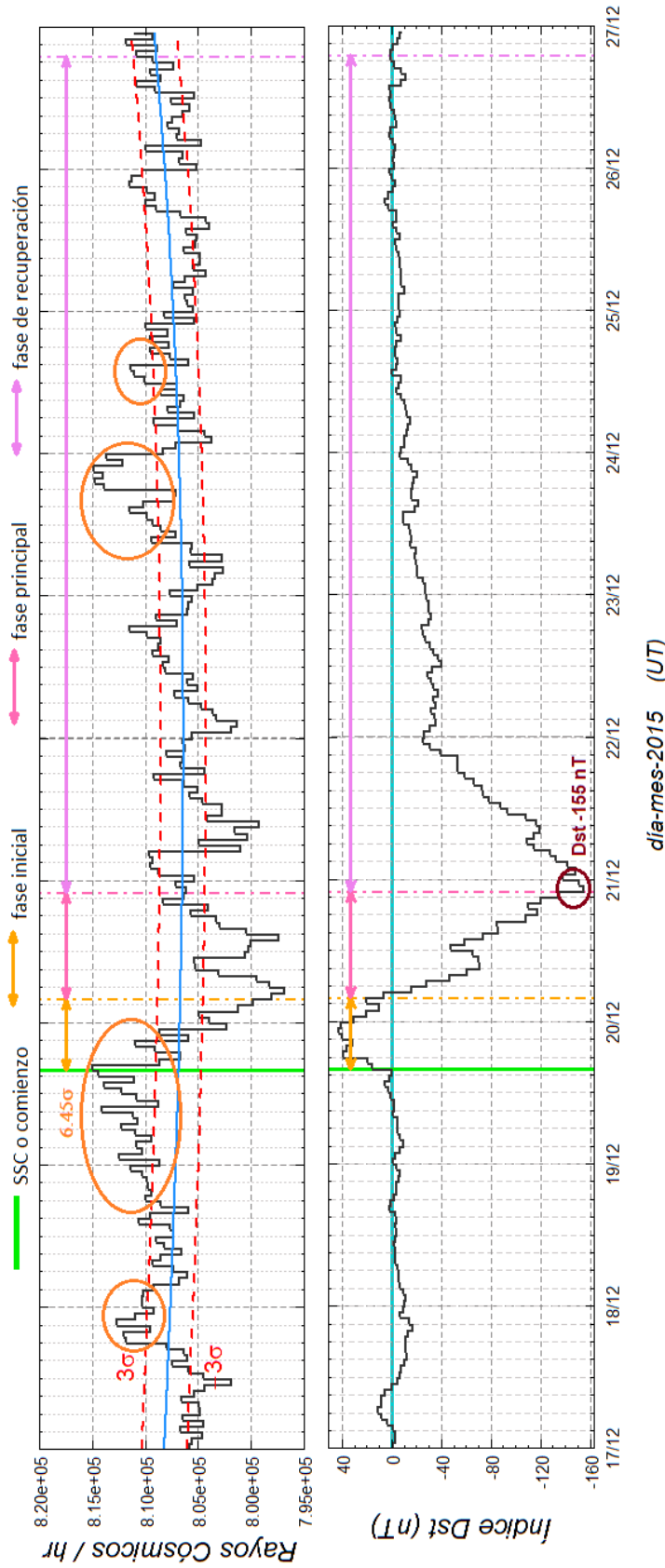
En la figura 5.4 podemos observar el comportamiento del CMI y del VS durante la TG del 19 de diciembre de 2015. A continuación se describe este comportamiento:

1. La intensidad del CMI se incrementó de 5 nT a 17 nT.
2. La componente Bz se dirigió fuertemente hacia el sur, poco después del paso del choque inicial. Durante un periodo prolongado entre el 19 y el 20 de diciembre, la componente Bz se mantuvo hacia al sur.
3. La densidad del VS aumentó con la llegada de la EMC y alcanzó su valor mínimo al comenzar la fase de recuperación de la TG.
4. La temperatura fue relativamente baja durante toda la TG.
5. El viento solar se mantuvo en velocidades cercanas a las de un viento solar lento, sin pasar los  $500 \text{ km/s}$ .

En la figura 5.5 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, en ella podemos observar que el índice Dst pequeñas perturbaciones antes del inicio de la TG, la cual comenzó el 19 de diciembre alrededor de las 15:00 TU. El índice Dst subió hasta 43 nT el 19 de diciembre a las 22:00 TU. Las variaciones en el flujo de RC registrado por el MN-CDMX se presentaron desde antes de la TG. El incremento más significativo ocurrió horas antes y durante la llegada de la EMC. Como se muestra en la figura 5.5, el flujo de RC alcanzó un máximo de  $6.45\sigma$  al momento de la llegada de la EMC y cuando el índice Dst comenzaba a subir. Debido a las perturbaciones en el campo magnético terrestre, partículas con energías menores a  $8.23 \text{ GV}$  pudieron ingresar a la Ciudad de México. Durante el periodo de TG se presentaron 2 incrementos mayores a  $3\sigma$  el 23 y 24 de diciembre.



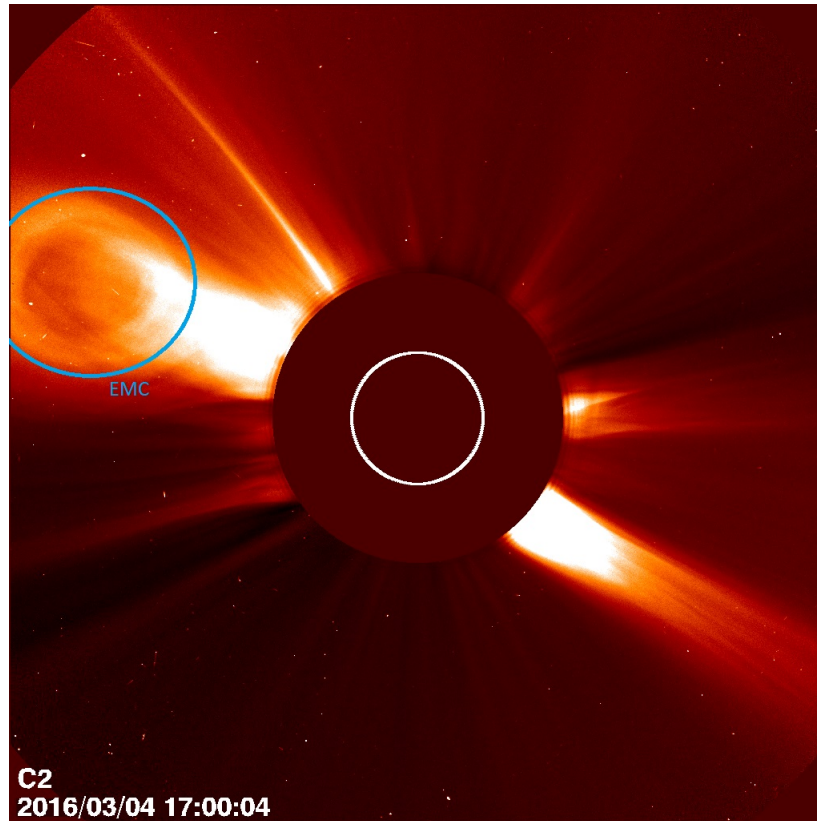
**Figura 5.4:** Datos de las condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del viento solar en el mismo intervalo de tiempo de la tormenta geomagnética del 19 de diciembre de 2015. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del viento solar, 4) temperatura del viento solar, 5) velocidad del viento solar. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: 1) línea verde es el comienzo, 2) intervalo naranja es la fase inicial, 3) intervalo rosa corresponde a la fase principal y 4) intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



**Figura 5.5:** Tormenta geomagnética del 19 de diciembre de 2015. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C6smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, las líneas rojas discontinuas indican la significancia de  $\pm 3\sigma$ , respectivamente; los círculos color naranja señalan los incrementos significativos en el flujo de RC ( $< 3\sigma$ ). En el panel inferior se muestra el comportamiento del índice Dst en el mismo periodo que las cuentas de RC. En esta gráfica el círculo rojo indica el valor mínimo que alcanzó el índice Dst; la línea turquesa marca el índice Dst en valor  $0\text{ nT}$ , donde el campo magnético no está perturbado. En ambas gráficas se muestran las fases de la tormenta geomagnética, la línea verde muestra el comienzo de la TG, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.

### 5.2.3. Evento del 6 de marzo de 2016

Según datos de Solar Monitor (<https://www.solarmonitor.org/>) y del SOLAR and ASTROPHYSICS LABORATORY (<http://www.lmsal.com/>), el 4 de marzo de 2016 a las 08:28:00 TU el Sol presentó una fulguración tipo C. Con base en el catálogo de eyecciones de masa coronal detectadas por LASCO (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov>), el 4 de marzo a las 09:36:00 TU, se liberó una EMC (figura 5.6) que no fue geoefectiva [37].



**Figura 5.6:** Eyección de Masa Coronal detectada por el Satélite LASCO el 4 de marzo de 2016 a las 09:36:00 TU ([https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js\\_lasco.cgi](https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js_lasco.cgi)).

El 6 de marzo arribó a la Tierra una corriente de viento solar rápido proveniente de un hoyo coronal presente en el Sol, que domino la actividad geomagética mediante una RIC (figura 5.7).



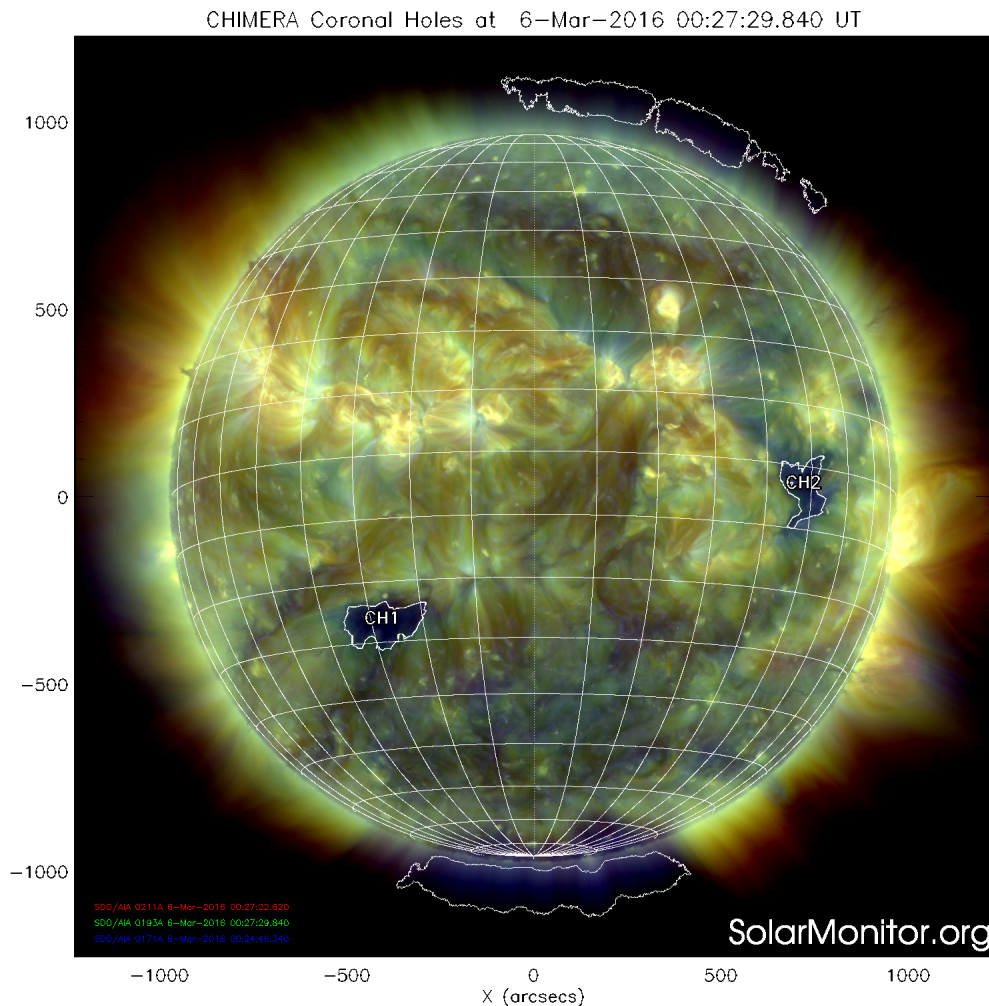


Figura 5.7: Hoyo Coronal presente el 6 de marzo de 2016 (<https://solarmonitor.org/>).

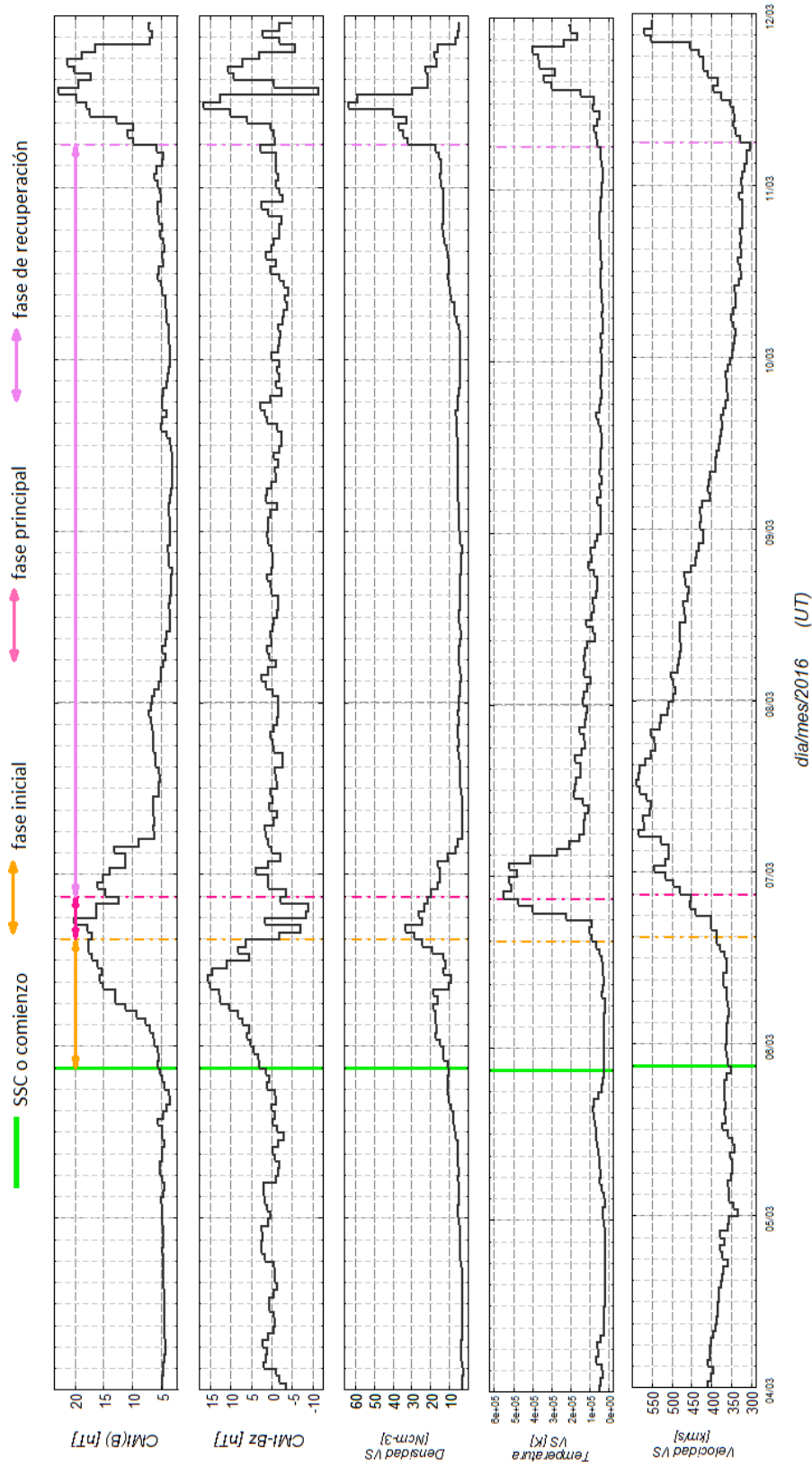
En la figura 5.8, en orden descendiente podemos observar las condiciones del CMI y del VS durante el paso de la RIC :

1. El campo magnético interplanetario comenzó a aumentar horas antes del SSC de la TG y así se mantuvo hasta la fase de recuperación.
2. La componente  $B_z$  del CMI se mantuvo hacia el sur durante la fase inicial y la fase principal de la TG.
3. La temperatura del VS fue mínima días antes de que se presentará la TG. Durante la fase principal, se incrementó debido al choque de la EMC y para la fase de recuperación disminuyó.
4. La densidad del VS también fue mínima días antes de la TG. Posteriormente, sufrió un aumento repentino durante la fase principal de la TG y volvió a caer a sus valores mínimos.

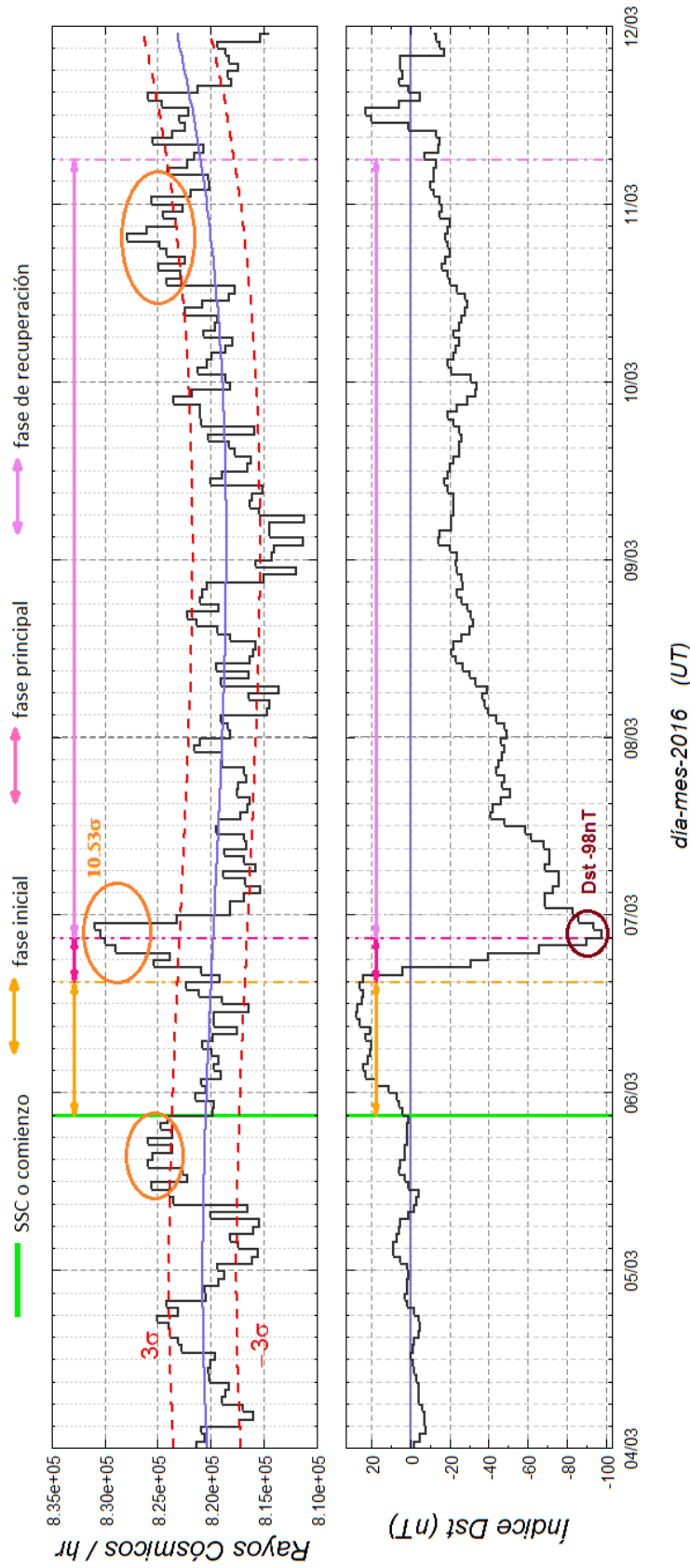
5. La velocidad del VS se mantuvo constante días antes del inicio de la TG, aumentó gradualmente durante la fase inicial y la fase principal. Posteriormente, durante la fase de recuperación, la velocidad disminuyó de forma gradual.

En la figura 5.9 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, en esta figura podemos observar que la TG comenzó el 5 de marzo alrededor de las 21:00 hrs TU. El índice Dst subió hasta 28 nT. Las variaciones en el flujo de RC registrado por el MN-CDMX se presentaron desde el 4 de marzo, atribuidas a las pequeñas perturbaciones presentadas antes del registro de la TG. Como se muestra en la figura 5.9, durante la fase principal de la TG, el flujo de RC alcanzó un máximo de  $10.53\sigma$  el 6 de marzo a las 22:00 hrs TU, que es consistente con la máxima caída del índice Dst ( $-98 nT$ ). Cada incremento en las cuentas de rayos cósmicos coincide con una disminución en la rigidez umbral, permitiendo la entrada de partículas con energías menores a  $8.23 GV$ , que es la energía que necesitan los RC para ingresar a nivel de la Ciudad de México. También se observa que las perturbaciones anteriores al inicio de la TG generaron variaciones significativas en los RC registrados, como se muestra el 5 de marzo alrededor de las 11:00 hrs TU. Más variaciones superaron la significancia para el 9 de marzo a las 21:00 hrs y el 10 de marzo a las 12:00 hrs.

De todos los eventos registrados en este trabajo, esta tormenta geomagnética fue la que pudo causar una mayor afectación al clima espacial, ya que el incremento en las cuentas de rayos cósmicos fue 7 veces mayor a lo normal.



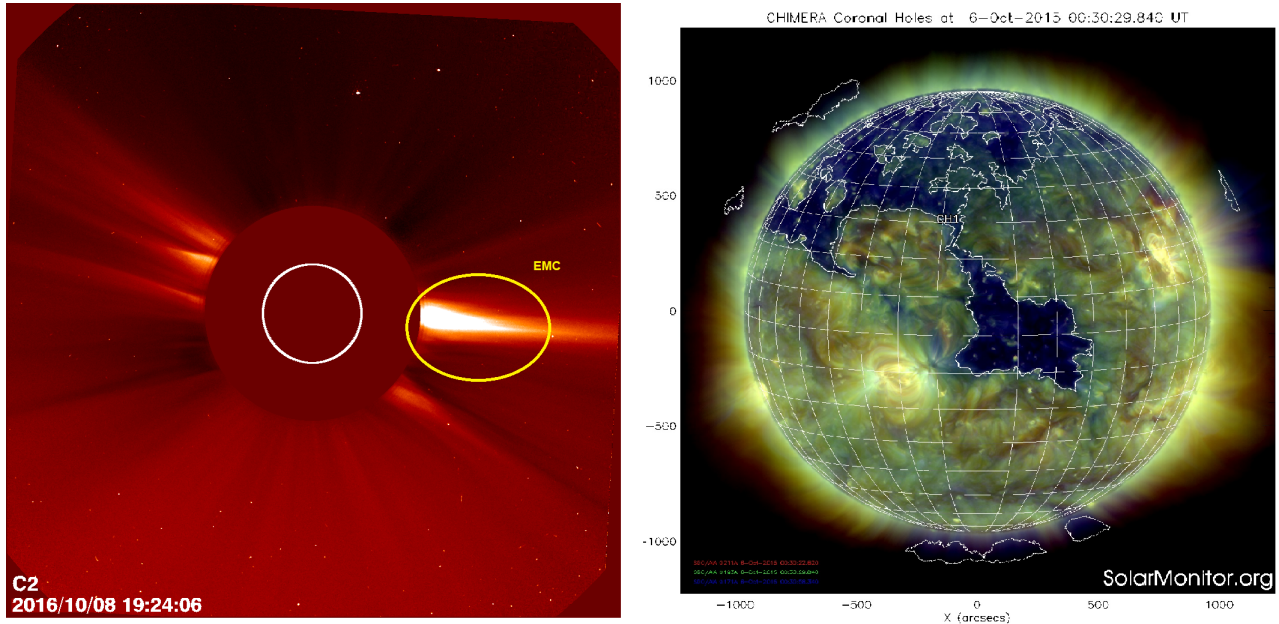
**Figura 5.8:** Datos de las condiciones del Campo Magnético Interplanetario y del viento solar en el mismo intervalo de tiempo de la tormenta geomagnética del 6 de marzo de 2016. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del viento solar, 4) temperatura del viento solar, 5) velocidad del viento solar. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: 1) línea verde es el comienzo, 2) intervalo naranja es la fase inicial, 3) intervalo rosa corresponde a la fase principal y 4) intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



**Figura 5.9:** Tormenta geomagn3tica del 6 de marzo de 2016. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C3smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, las l3neas rojas discontinuas indican la significancia de  $\pm 3\sigma$ , respectivamente; los c3rculos color naranja se3alan los incrementos significativos en el flujo de RC ( $> 3\sigma$ ). En el panel inferior se muestra el 3ndice Dst en el mismo periodo que las cuentas de RC. En esta gr3fica el c3rculo rojo indica el valor m3nimo que alcanz3 el 3ndice Dst; la l3nea turquesa marca el 3ndice Dst en valor  $0 nT$ , donde el campo magn3tico no est3 perturbado. En ambas gr3ficas se muestran las fases de la tormenta geomagn3tica, la l3nea verde muestra el comienzo de la TG, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperaci3n. El final de cada fase est3 indicado con una l3nea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.

### 5.2.4. Evento del 12 de octubre 2016.

A las 22 hrs TU del 12 de octubre y hasta el 15 de octubre, la actividad geomagnética estuvo influenciada por la llegada de una EMC producida el 8 de octubre. A partir del 16 de octubre el CMI y el VS estuvo influenciado por una RIC proveniente de un hoyo coronal observado el mismo día. Ver figura 5.10.



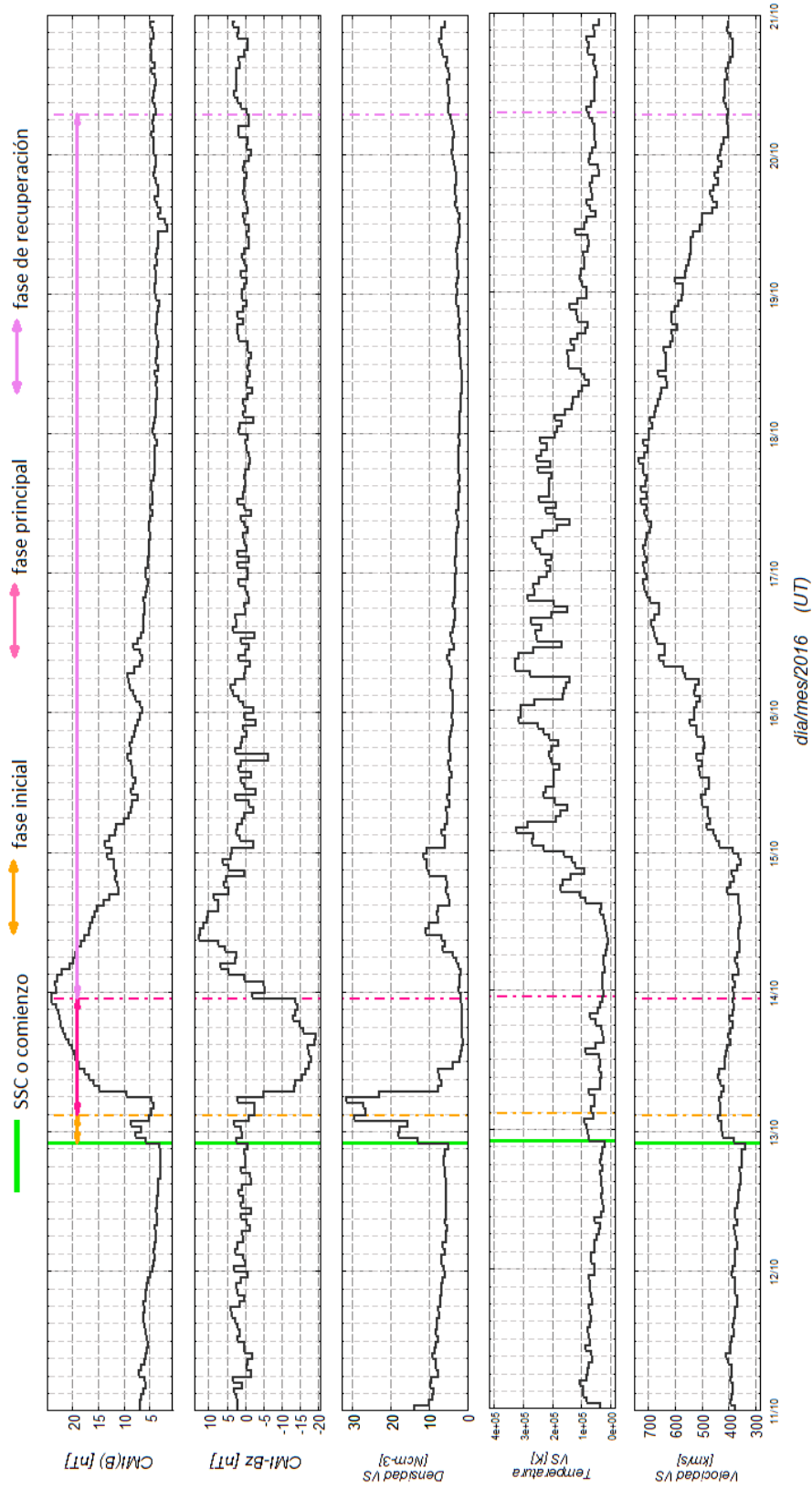
**Figura 5.10:** De lado izquierdo se encuentra la Eyección de Masa Coronal liberada el 8 de octubre de 2016 ([https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js\\_lasco.cgi](https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js_lasco.cgi)). De lado derecho, se muestra el hoyo coronal que abarco todo el hemisferio norte del Sol presente durante el 16 de octubre de 2016 (<https://solarmonitor.org>).

En la figura 5.11 podemos observar la evolución de las condiciones del CMI y del VS durante esta TG.

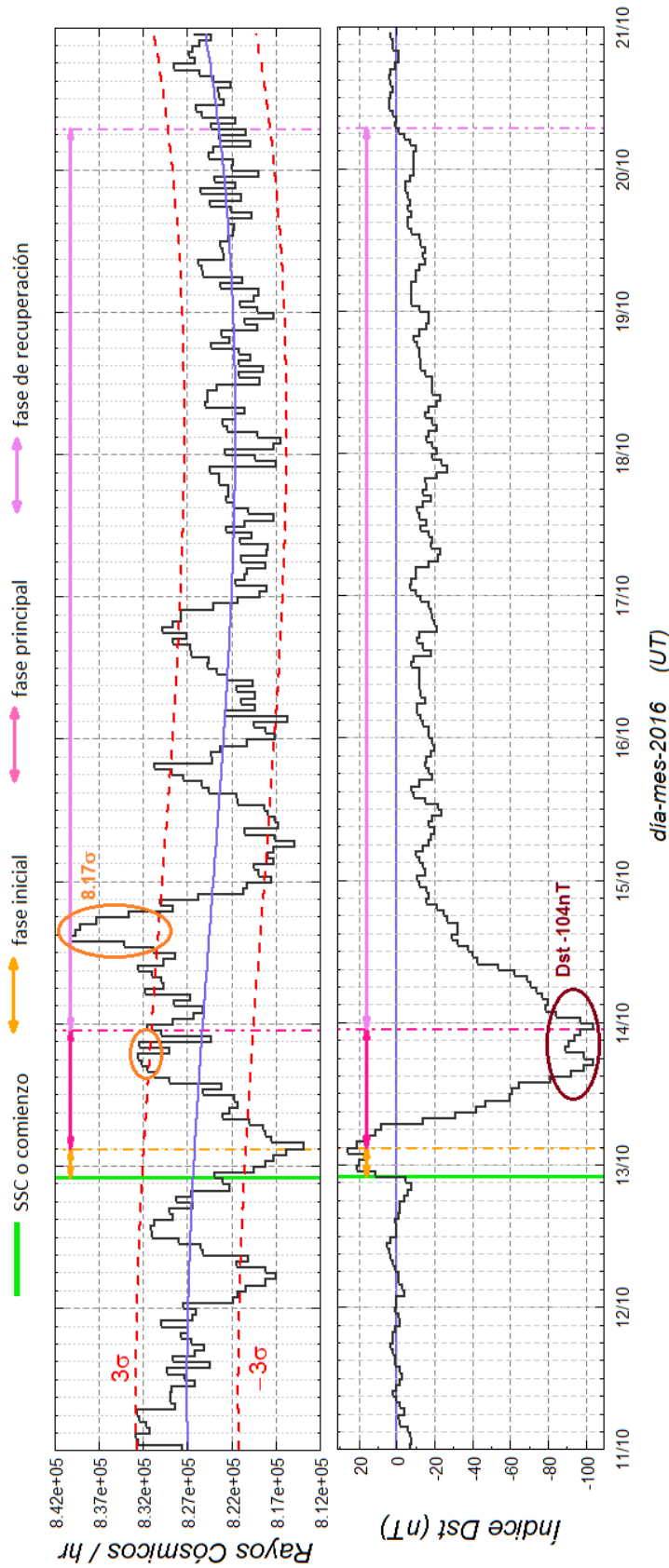
1. La intensidad del campo magnético sufrió un pequeño incremento a la llegada de la EMC. Conforme al paso de la EMC, el campo magnético se intensificó llegando a un valor máximo de  $25 nT$ .
2. Aproximadamente 5 horas después de la llegada de la EMC, la componente  $B_z$  rotó hacia el sur con un valor de  $-20 nT$ , posteriormente rotó lentamente hacia el norte.
3. La densidad aumentó drásticamente al paso de la EMC y posteriormente disminuir al mismo tiempo que el CMI alcanzó su valor máximo.
4. La temperatura del VS se mantuvo baja durante el paso de la EMC. Cuando la RIC dominó el medio interplanetario, la temperatura aumento rápidamente.

5. El viento solar se mantuvo lento durante la llegada de la EMC. A partir del 15 de octubre, la velocidad del VS alcanzó valores de viento solar rápido ( $700 \text{ km/s}$ ). Hacia el termino de esta TG, el VS volvió a sus condiciones iniciales.

En la figura 5.12 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, en esta figura obsevamos que la TG se dio el 12 de octubre alrededor de las 21:00 TU (línea verde), con un SSC de  $42 \text{ nT}$ . El flujo de RC registrado por el MN-CDMX sufrió dos incrementos significativos. El primero, que apenas sobrepasó el  $3\sigma$ , se presentó el 13 octubre entre las 15:00 y las 21:00 TU, este incremento coincide con la primer caída del índice Dst ( $-104 \text{ nT}$ ). Durante la fase de recuperación, el 14 de octubre, surgió un segundo incremento en un perido de 7 horas, el cual alcanzó una significancia de  $8.17\sigma$  (señalados en la figura 5.15 con círculos naranja). Esto significa que RC con energías menores a  $8.23 \text{ GV}$  pudieron ingresar a la Ciudad de México, ya que las líneas de campo geomagnético se encontraban perturbadas y disminuyeron su intensidad, permitiendo la entrada de partículas que normalmente no deberían ingresar durante este periodo. El 15 y 16 de octubre se observan otros pequeños incrementos, estos no son de importancia debido a que no sobrepasan  $3\sigma$  por más de 3 horas.



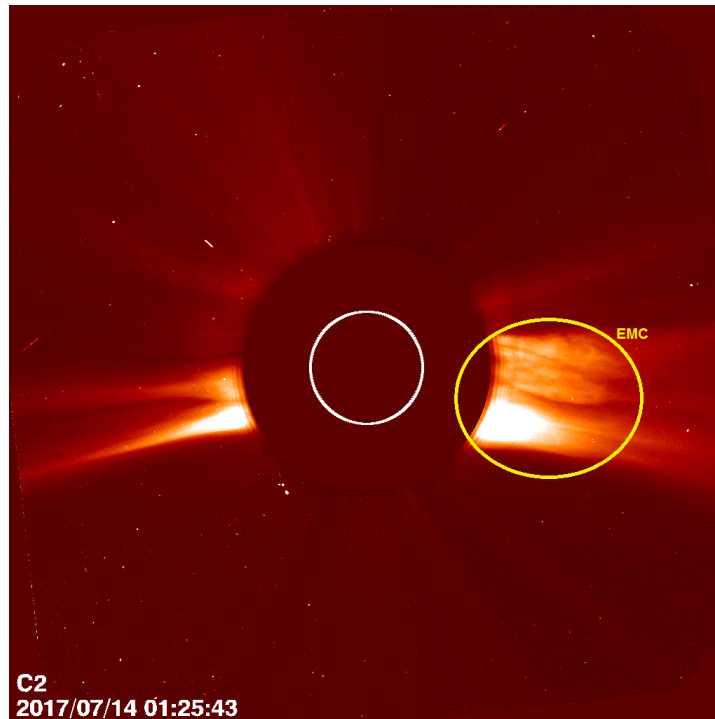
**Figura 5.11:** Condiciones del CMI y del VS en el mismo intervalo de tiempo que la tormenta geomagnética del 13 de octubre de 2016. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del viento solar, 4) temperatura del viento solar, 5) velocidad del viento solar. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: 1) línea verde es el comienzo, 2) intervalo naranja es la fase inicial, 3) intervalo rosa corresponde a la fase principal y 4) intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



**Figura 5.12:** Tormenta geomagn3tica del 12 de octubre de 2016. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C3smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, las l3neas rojas discontinuas indican la significancia de  $\pm 3\sigma$ , respectivamente; el c3rculo color naranja se3ala el incremento significativo en el flujo de RC ( $> 3\sigma$ ). En el panel inferior se muestra el 3ndice Dst en el mismo periodo que las cuentas de RC. En esta gr3fica el c3rculo rojo indica el valor m3nimo que alcanz3 el 3ndice Dst; la l3nea turquesa marca el 3ndice Dst en valor  $0\text{ nT}$ , donde el campo magn3tico no est3 perturbado. En ambas gr3ficas se muestran las fases de la tormenta geomagn3tica, la l3nea verde muestra el comienzo de la TG, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperaci3n. El final de cada fase est3 indicado con una l3nea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



### 5.2.5. Evento de 16 julio 2017.

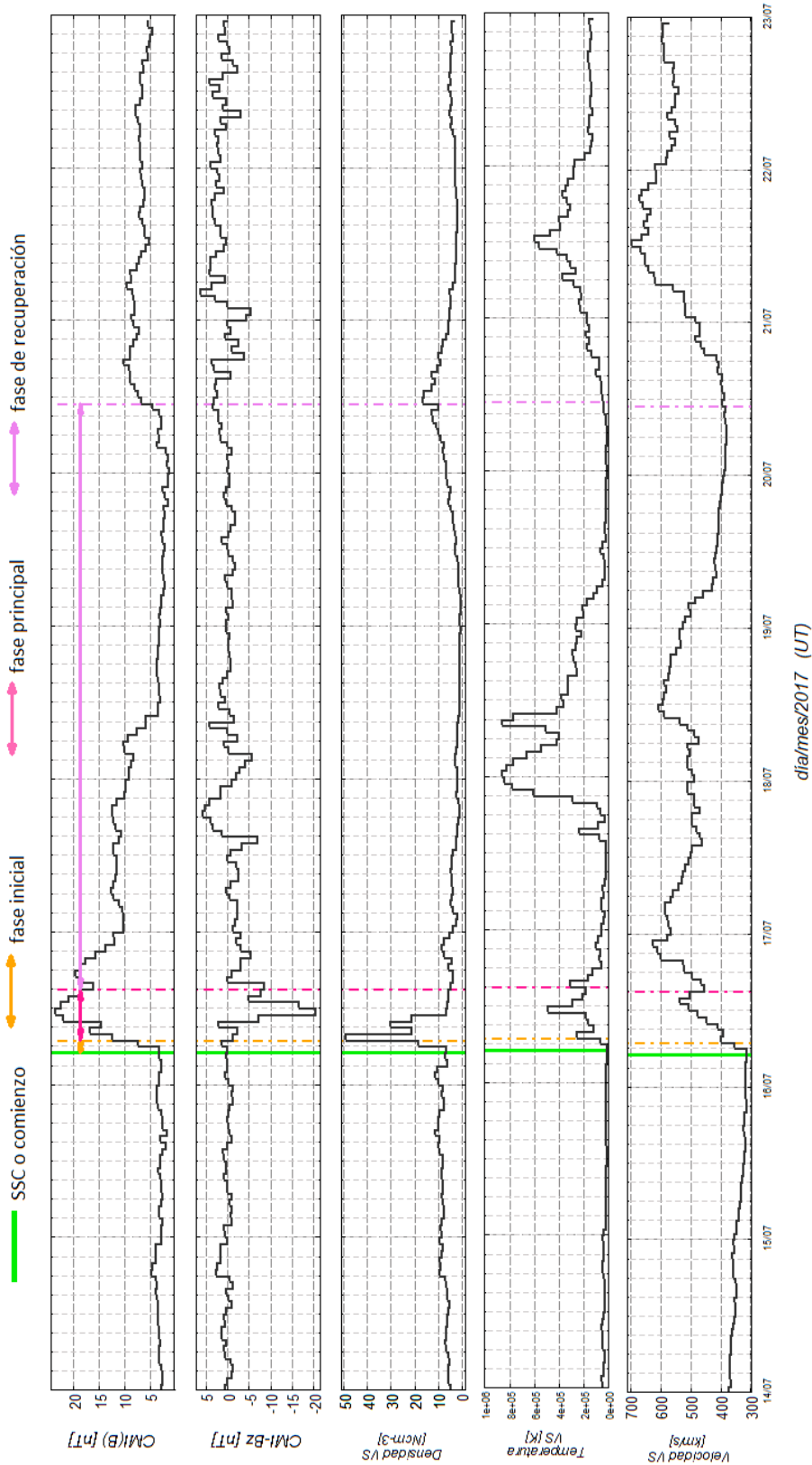


**Figura 5.13:** Eyección de Masa Coronal detectada por el Satélite LASCO el 14 de julio de 2017 a las 01:25:00 TU ([https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js\\_lasco.cgi](https://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/js_lasco.cgi)).

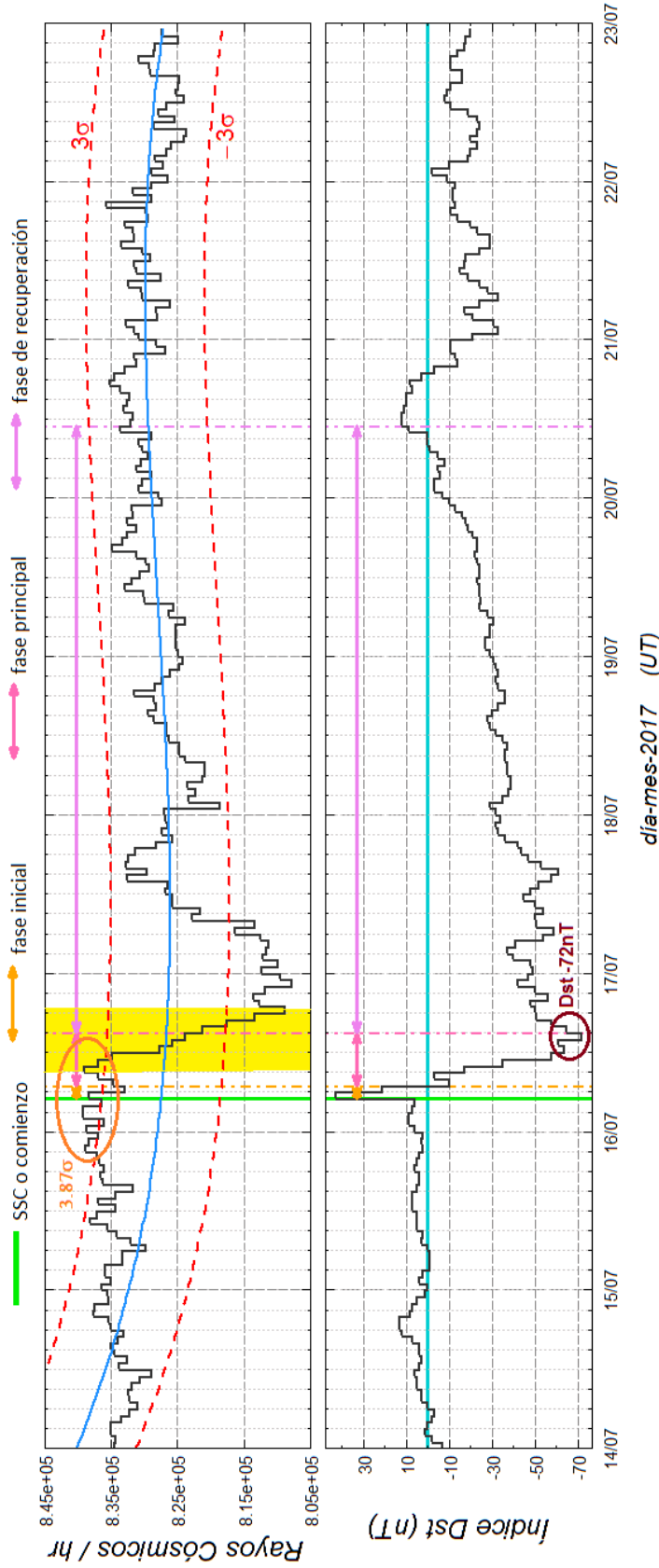
El 16 de julio de 2017 comenzó una TG, con un SSC a las 5:00 TU, generada por el impacto de una EMC detectada el 14 de julio a la 1:25 TU, como se observa en la figura 5.13. En la figura 5.14 podemos observar que:

1. El CMI alcanzó su máximo valor aproximadamente 6 horas después del inicio de la TG, posteriormente disminuyó lentamente.
2. La componente  $B_z$  se tornó hacia el sur a partir de la llegada de la EMC, alcanzando un valor de  $-20 nT$  y permaneció en dirección sur durante un período prolongado después de la llegada del impacto.
3. La densidad del viento solar alcanzó un pico de  $50 \text{partículas}/\text{cm}^3$  después de la llegada de la EMC y disminuyó a sus valores mínimos rápidamente.
4. La temperatura sufrió un primer aumento al mismo tiempo que la densidad se incrementó. Sin embargo, sufrió un segundo incremento, el 17 de julio a las 18:00 TU y volvió a su valor mínimo 33 horas después.
5. La velocidad del viento solar aumentó repentinamente de  $300 \text{ km/s}$  a  $500 \text{ km/s}$  entre el comienzo de la TG y el 17 de julio, posteriormente disminuyó de forma gradual, hasta un segundo incremento el 18 de julio a las 9:00 TU. Dicho aumento pudo deberse a una corriente de viento solar rápido.

En la figura 5.15 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, en esta figura podemos observar que el campo geomagnético presentaba ligeros aumentos antes del comienzo de la TG, el cual se dio el 16 de julio alrededor de las 06:00 TU (línea verde), con un SSC de  $43 nT$ . El flujo de RC registrado por el MN-CDMX sufrió un incremento significativo durante cerca de 14 horas, con valor máximo de  $3.87\sigma$  antes del comienzo de la TG (señalado en la figura 5.15 con un círculo naranja). Durante este periodo RC con energías menores a  $8.23 GV$  pudieron ingresar a la Ciudad de México, ya que las líneas de campo geomagnético se encontraban perturbadas y disminuyeron su intensidad, permitiendo la entrada de partículas que normalmente no deberían ingresar durante este periodo. Al comienzo de la TG, el flujo de RC experimentó un decrecimiento Forbush entre las las 9:00 y las 18:00 TU del 16 de julio (señalado en color amarillo en la figura 5.15).



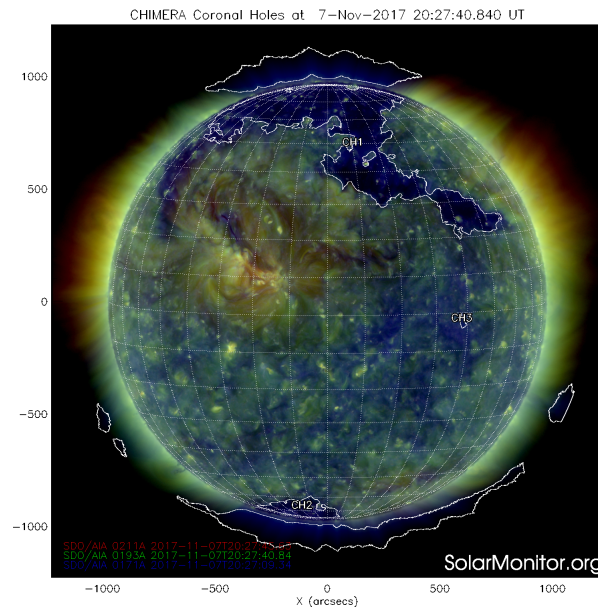
**Figura 5.14:** Datos de las condiciones del CMI y del VS durante la tormenta geomagnética del 16 de julio de 2017. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del VS, 4) temperatura del VS, 5) velocidad del VS. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: a) línea verde es el comienzo, b) intervalo naranja es la fase inicial, c) intervalo rosa corresponde a la fase principal y d) intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



**Figura 5.15:** Tormenta geomagn3tica del 16 de julio de 2017. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C3smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, las l3neas rojas discontinuas indican la significancia de  $\pm 3\sigma$ , respectivamente; el c3rculo color naranja se3ala el incremento significativo en el flujo de RC ( $> 3\sigma$ ), el periodo en color amarillo indica el dF. En el panel inferior se muestra el 3ndice Dst en el mismo periodo que las cuentas de RC. En esta gr3fica el c3rculo rojo indica el valor m3nimo que alcanz3 el 3ndice Dst; la l3nea turquesa marca el 3ndice Dst en valor  $0 nT$ , donde el campo magn3tico no est3 perturbado. En ambas gr3ficas se muestran las fases de la tormenta geomagn3tica, la l3nea verde muestra el comienzo de la TG, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperaci3n. El final de cada fase est3 indicado con una l3nea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.

### 5.2.6. Evento del 7 de noviembre de 2017.

El 7 de noviembre de 2017 se presentó una tormenta geomagnética de categoría moderada. Ésta fue propiciada por una RIC producida por el viento solar rápido procedente de un hoyo coronal (figura 5.16).

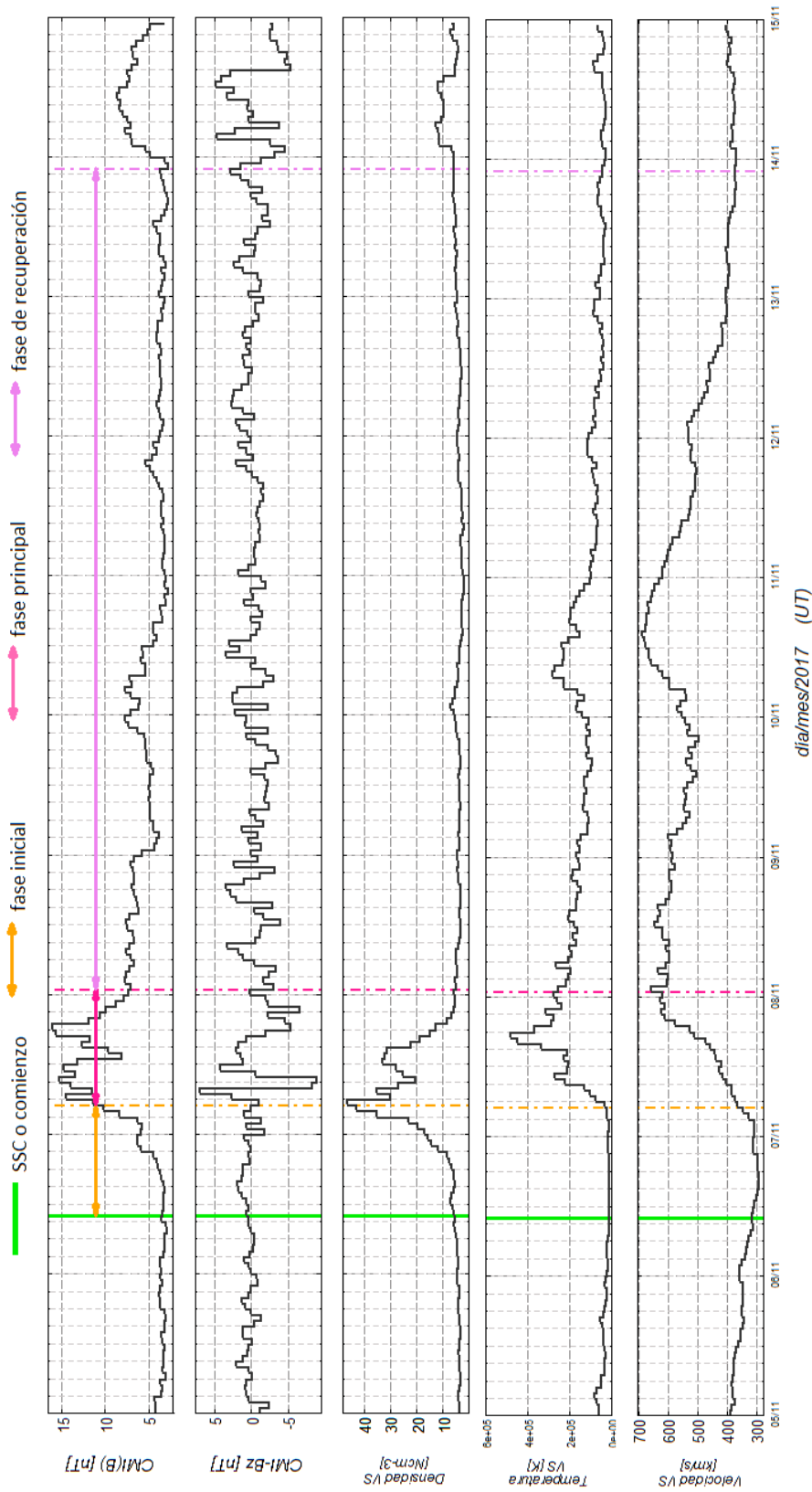


**Figura 5.16:** Hoyo Coronal presente en la TG del 7 de noviembre de 2017. Se observa en el polo norte solar. (<https://www.solarmonitor.org/>)

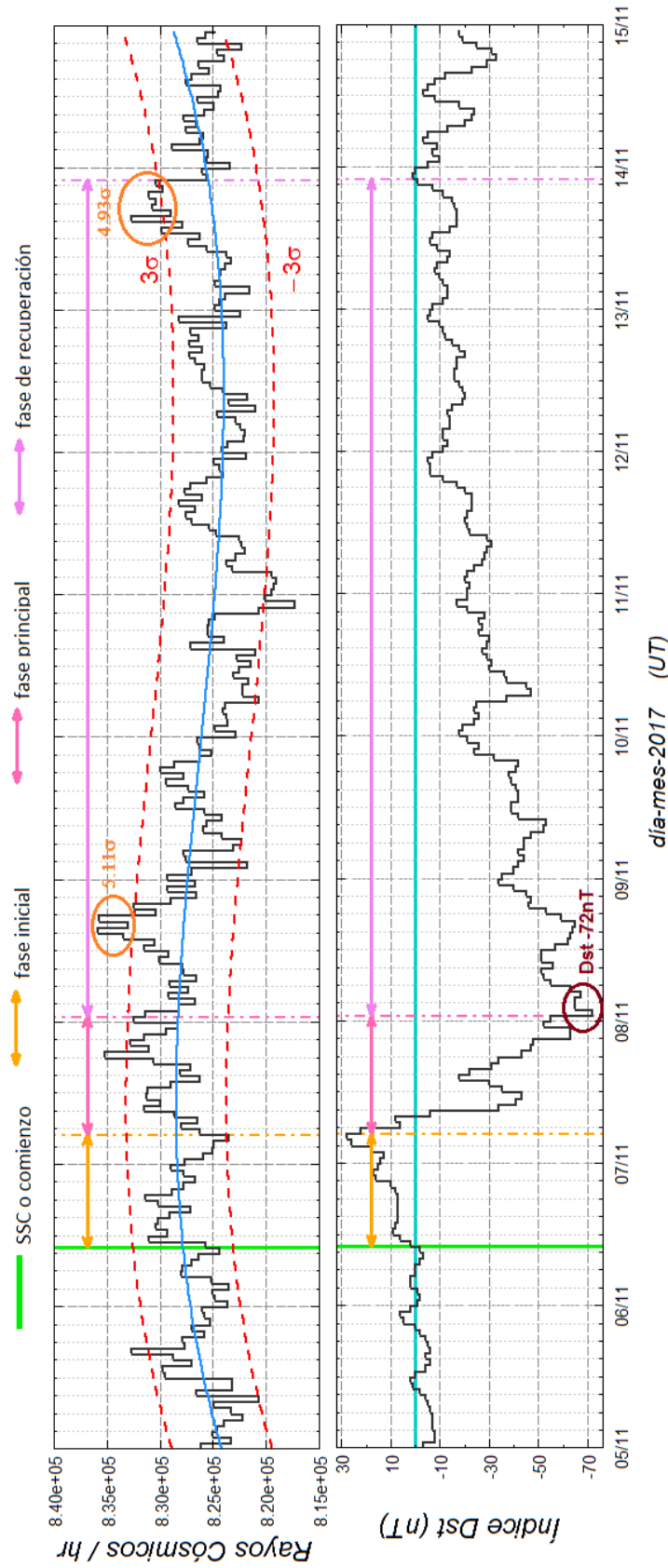
De acuerdo con el perfil de la figura 5.1 y con los parámetros del CMI y del VS descritos en la figura 5.17, podemos observar que:

1. La intensidad del CMI sobrepasa los  $10 nT$  durante la fase principal de la TG. Posteriormente disminuye y se mantiene fluctuando entre 0 y  $10 nT$ .
2. La componente horizontal ( $B_z$ ) del CMI se mantiene hacia el sur durante todo el evento, alcanzando su valor mínimo durante la fase principal de la TG.
3. La densidad del VS comienza a aumentar durante la fase inicial de la TG, alcanzando valores máximos durante la fase principal y se mantiene en su mínimo durante toda la fase de recuperación.
4. La temperatura del VS sufrió un incremento durante la fase principal de la TG y posteriormente disminuye lentamente durante la fase de recuperación.
5. Cuando la temperatura aumenta, la densidad disminuye y viceversa.
6. La velocidad del viento solar se incrementa a partir de la fase inicial desde  $300 km/s$ , alcanzando valores que corresponden a un viento solar rápido ( $700 km/s$ ). Se mantuvo el viento solar rápido durante toda la TG.

En la figura 5.18 se muestra el índice Dst y el flujo de rayos cósmicos detectados por el MN-CDMX, durante la TG que comenzó el 6 de noviembre alrededor de las 10 : 00 *TU* (línea verde). El índice Dst subió hasta  $28 nT$ . El flujo de RC registrado por el MN-CDMX sufrió 4 incrementos a lo largo de la TG, de los cuales dos son de importancia debido a que sobrepasó la significancia de  $3\sigma$  por más de 3 horas (señaladas en la figura 5.18 con círculos naranjas). El primer incremento y el más intenso sucedió el 8 de noviembre entre las 14:00 y 19:00 *TU* alcanzando una significancia máxima de  $5.11\sigma$ . El segundo incremento de  $4.93\sigma$  se presentó el 13 de noviembre al final de la TG en un periodo de 6 horas. Esto significa que RC con energías menores a  $8.23 GV$  pudieron ingresar a la Ciudad de México, ya que las líneas de campo geomagnético se encontraban perturbadas y disminuyeron su intensidad, permitiendo la entrada de partículas que normalmente no deberían ingresar.



**Figura 5.17:** Datos de las condiciones del CMI y del VS durante la tormenta geomagnética del 7 de noviembre de 2017. De arriba hacia abajo se muestra: 1) intensidad del CMI, 2) componente Bz del CMI, 3) densidad del VS, 4) temperatura del VS, 5) velocidad del VS. También se muestran las fases de la tormenta geomagnética: a) línea verde es el comienzo, b) intervalo naranja es la fase inicial, c) intervalo rosa corresponde a la fase principal y d) intervalo morado es la fase de recuperación.



**Figura 5.18:** Tormenta geomagnética del 7 de noviembre de 2017. El panel superior corresponde al flujo de Rayos C6smicos detectados por el MN-CDMX, donde la curva azul corresponde al promedio de los datos registrados, las líneas rojas discontinuas indican la significancia de  $\pm 3\sigma$ , respectivamente; en círculos color naranja se señalan los incrementos de las cuentas de RC significativos ( $> 3\sigma$ ). En el panel inferior se muestra el índice Dst en el mismo periodo que las cuentas de RC. En esta gráfica el círculo rojo indica el valor mínimo que alcanzó el índice Dst; la línea turquesa marca el índice Dst en valor  $0 nT$ , donde el campo magnético no está perturbado. En ambas gráficas se muestran las fases de la tormenta geomagnética, la línea verde muestra el comienzo de la tormenta, el intervalo en color naranja es la fase inicial, el intervalo rosa corresponde a la fase principal y el intervalo morado es la fase de recuperación. El final de cada fase está indicado con una línea discontinua con puntos del color correspondiente a la fase.



### 5.3. Análisis general

En el caso de que los RC detectados presenten un incremento, este no se encuentra ligado directamente con la intensidad de la TG. En la tabla 5.1, observamos que tanto para TG intensas como moderadas, los incrementos tienen valores que pueden ser independientes de la intensidad; por ejemplo, el evento del 6 de marzo de 2016 fue de categoría moderada y el incremento en el flujo de rayos cósmicos fue de  $10.53\sigma$ , en cambio la TG del 9 de septiembre de 2015 alcanzó el mismo valor mínimo en el índice Dst, pero el incremento de RC fue menor ( $4.36\sigma$ ). Durante las tormentas geomagnéticas intensas del 6 de octubre de 2015 y el 27 de mayo de 2017, que alcanzaron un mínimo en el índice Dst similar, los incrementos en la radiación cósmica fueron de  $7.68\sigma$  y  $4.38\sigma$ , respectivamente.

Podríamos inferir que el fenómeno solar causante de la perturbación del campo magnético define la variación en el flujo de RC. Un ejemplo claro son los decrecimientos Forbush, los cuales en su mayoría tienen lugar durante una tormenta geomagnética intensa, propiciada por una EMC. Así mismo, podemos observar en la tabla 5.1 que las tormentas geomagnéticas moderadas provocan un incremento en las cuentas de rayos cósmicos.

Por otro lado y de acuerdo con este trabajo, las Regiones de Interacción Corrotante suelen generar tormentas geomagnéticas moderadas, a su vez, éstas un incremento en el flujo de radiación cósmica; sin embargo, no se ve una proporcionalidad entre el valor mínimo del índice Dst y el flujo de rayos cósmicos.

Con los eventos analizados anteriormente también podemos concluir que los incrementos no suceden durante una fase específica de la TG. Por lo que es importante entender bajo que circunstancias suceden estos incrementos. Ya se ha mencionado que se dan cuando las líneas de campo magnético terrestre reducen su intensidad, por lo tanto, la rigidez magnética también disminuye; sin embargo, tampoco sabemos que factor propicia esa disminución.

# Conclusiones

---

Como se observa en la tabla 5.1 del capítulo 5, logramos identificar 33 tormentas geomagnéticas durante la fase descendente del Ciclo Solar 24, de las cuales, 7 son intensas y 26 moderadas.

Debido a que observamos que las variaciones en el flujo de rayos cósmicos son distintas según el fenómeno solar que propició la tormenta geomagnética, decidimos analizar 6 eventos para ejemplificar todas las variaciones posibles.

Al analizar las tormentas geomagnéticas y su influencia en el flujo de rayos cósmicos, se encontró que 71 % de las tormentas geomagnéticas más intensas generaron decrecimientos Forbush. Sin embargo, las tormentas geomagnéticas intensas pueden llegar a generar incrementos en el flujo de rayos cósmicos mayores a  $3\sigma$ .

Se encontró que durante las tormentas geomagnéticas TG moderadas ( $-50 \geq Dst \geq -100$ ) las Regiones de Interacción Corrotante fueron los fenómenos que provocaron incrementos significativos ( $> 3\sigma$ ) en el flujo de rayos cósmicos detectados por el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México.

El mayor incremento en el flujo de rayos cósmicos fue de  $10.53\sigma$  durante la tormenta geomagnética de categoría moderada del 6 de marzo de 2016, propiciada por una RIC.

La única tormenta intensa generada por una Región de Interacción Corrotante generó un incremento en la cuenta de RC de  $7.68\sigma$ . De acuerdo con la literatura una tormenta geomagnética intensa generada por una RIC's marca una disminución en el flujo de RC.

El 48.5 % de las tormentas geomagnéticas fueron ocasionadas por Regiones de Interacción Corrotante.

Durante el mínimo solar, la presencia de hoyos coronales y con ello de RIC es más recurrente que durante el máximo solar, donde la actividad del Sol está dominada por fulguraciones y las eyecciones de masa coronal. Debido a que analizamos la fase descendente, es decir, la transición del máximo hacia el mínimo, ambos fenómenos influyen en el medio interplanetario por lo que las tormentas geomagnéticas analizadas en este trabajo fueron propiciadas por uno o ambos fenómenos (EMC, RIC, EMC/RIC).

Al acercarnos al mínimo de la actividad solar, es comprensible que la mayoría de las tormentas geomagnéticas se produjeran por RICs.

El flujo de rayos cósmicos detectado por el MN-CDMX se incrementa cuando el campo magnético terrestre se encuentra perturbado porque la rigidez umbral de la Ciudad de México (8.23 GV) disminuye, permitiendo que partículas con menores energías penetren las líneas de campo geomagnético a nivel de la CDMX.

En este trabajo observamos que las tormentas geomagnéticas pueden incrementar significativamente el flujo de rayos cósmicos detectados por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México.

Para tener un panorama general de la modulación de los rayos cósmicos por tormentas geomagnéticas, es necesario analizar el Ciclo Solar 24 completo.

También es importante conocer si en todos los monitores de neutrones se perciben los incrementos en el flujo de rayos cósmicos detectados, como ocurre con los decrecimientos Forbush. Se esperaría que en latitudes polares no se registran dichos incrementos, porque a estas latitudes la rigidez magnética es muy pequeña y el flujo de partículas se da desde energías cercanas a 300 MeV, lo que opaca cualquier variación atribuida a una tormenta geomagnética; a diferencia de latitudes ecuatoriales, donde la rigidez umbral es mayor (8.23 GV para México) y las variaciones pueden permitir que ingresen un mayor número de partículas de energías menores a las que normalmente entran.

Aunque en algunos casos coincide que la disminución de la intensidad del campo magnético terrestre permite el ingreso de mayor número de partículas, el fenómeno que realmente permite el ingreso de estas es la disminución de la rigidez magnética, por lo que en trabajos posteriores se buscará calcular cuál es la disminución de este valor para la CDMX.

El poder indenticar en que circunstancias el registro de rayos cósmicos se incrementa, puede ser de gran ayuda para comprender y estudiar las posibles afectaciones en los sistemas de telecomunicaciones como los son los satélites, GPS, la señal de radio, así como en gasoductos, con el fin de evitar, en cierta medida, afectaciones tecnológicas y económicas.

---

# Sistemas de corrientes magnetosféricas y ionosféricas

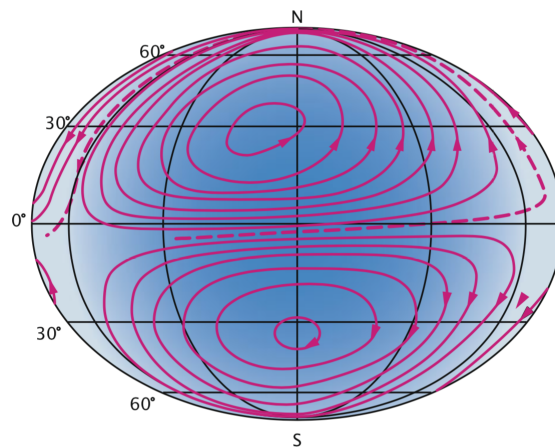
---

Dentro de la magnetosfera terrestre existe un conjunto de corrientes eléctricas generadas por el desplazamiento de partículas cargadas en el campo geomagnético y en los campos magnéticos creados por el mismo desplazamiento de estas partículas.

Los índices geomagnéticos de los que se habla en el capítulo 3, miden las perturbaciones al campo magnético por estas corrientes.

## Corriente Sq

El movimiento de las mareas lunares genera una corriente en la ionosfera terrestre conocida como la corriente silenciosa o Sq. Este sistema crea variaciones magnéticas diarias. La corriente Sq forma dos vórtices, uno en el hemisferio norte y otro en el hemisferio sur que se tocan en el ecuador geomagnético (ver figura A.1). De acuerdo a la diferencia de la conductividad ionosférica entre el día y la noche, la corriente Sq se concentra del lado diurno [48].

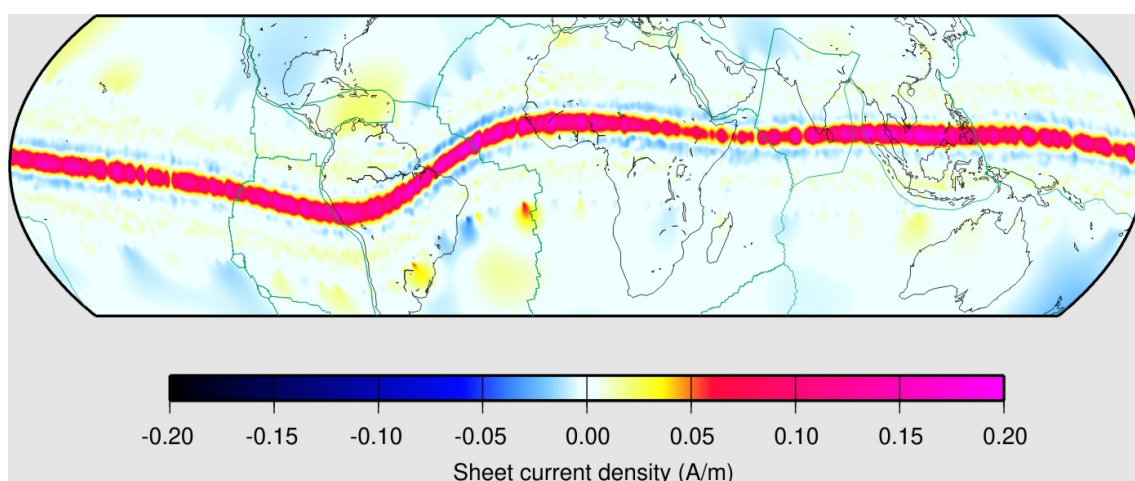


**Figura A.1:** Corriente Sq visto de lado día [48].

### Electrojet ecuatorial

Cuando los vórtices de la corriente Sq se tocan en el ecuador geomagnético, se forma una corriente extendida similar a un chorro en la ionosfera, conocido como electrojet ecuatorial. Sin embargo, esta corriente no sería tan fuerte si estuviera formada sólo por la concentración de la corriente Sq. La geometría del campo magnético terrestre en el ecuador junto con la incidencia casi perpendicular de la radiación solar produce una intensificación de la conductividad efectiva que conduce a una amplificación de la corriente del electrojet, ver figura A.2 [48] [9].

La intensa corriente horizontal del electrojet produce una perturbación del campo geomagnético, la cual debilita su componente H en la superficie de la Tierra sobre una distancia de 600 km a través del ecuador. El campo de perturbación típico en su cercanía es de 50 a 100 nT. Esta es la perturbación que registra el índice Dst.



**Figura A.2:** Densidad del electrojet ecuatorial. Tomado de [http://geomag.org/info/equatorial\\_electrojet.html](http://geomag.org/info/equatorial_electrojet.html).

### Corriente de la magnetopausa

La corriente de la magnetopausa es creada por el movimiento de iones y electrones en el viento solar. A medida que este se encuentra con el campo geomagnético, los iones y electrones en su interior son deflectados en direcciones distintas. Esto crea una hoja de corriente eléctrica que fluye en el espacio. Cuando la corriente está desarrollada por completo, la presión del viento solar normal a la superficie está exactamente equilibrada por la presión del campo geomagnético dentro de la frontera. El efecto de la corriente en el interior es un aumento en todos lados de la intensidad de campo magnético con respecto al dipolo [9]. La forma de la corriente de la magnetopausa es casi idéntica a la corriente Sq. En el hemisferio norte circula en dirección antihoraria alrededor de la cuña polar, en el hemisferio sur gira en sentido horario.

### Corriente de la cola magnetosférica

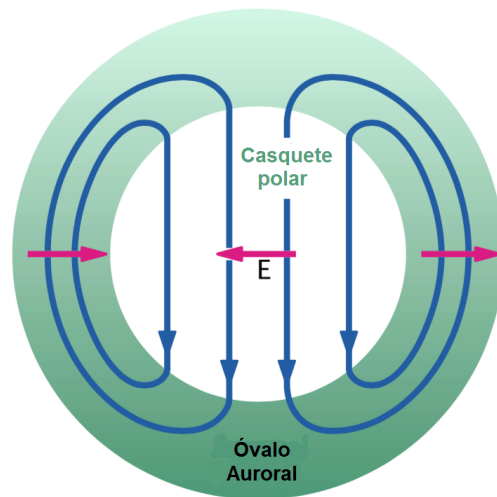
En la cola magnetosférica también se genera una corriente propiciada por el arrastre tangencial entre el viento solar y el campo geomagnético. Esta fuerza empuja las líneas de campo lejos del lado día estirandola hacia la cola detrás de la Tierra. La corriente fluye del sector del amanecer hacia el del anochecer a lo largo del centro de la cola. En la frontera de la cola, la corriente

se separa y circula en direcciones opuestas. La región de corriente más intensa es la hoja de plasma. El efecto de esta corriente en la Tierra es una perturbación dirigida hacia el sur. Sin embargo, ésta es más intensa en la medianoche que en el mediodía y crea una asimetría de la perturbación en superficie. La intensidad de corriente total es de  $10^8 A$  [9].

### Electrojet auroral

Los electrojets aurorales llevan una corriente total de algunos millones de amperes. Se generan principalmente, por la diferencia de potencial entre la magnetopausa del lado día y del lado noche, debido a esto, partículas energéticas se precipitan desde la cola magnética hacia el óvalo auroral, causando una ionización significativa. La conductividad en el óvalo auroral es mucho más alta que la del casquete polar que está enroscado en líneas de campo abierto. La corriente fluye hacia adentro y afuera del óvalo auroral a lo largo de las líneas de campo magnético. Como resultado, el flujo de corrientes de altas latitudes se concentra dentro del óvalo auroral, donde forma los electrojets aurorales, como se muestra en la figura A.3.

Los electrojets aurorales son los sistemas de corrientes más importantes en altas latitudes debido a que al fluir sólo a  $100 km$  por encima de la superficie de la Tierra, crean perturbaciones magnéticas en la superficie de todos los sistemas de corriente. Las perturbaciones tienen magnitudes entre  $100$  y  $1000 nT$ , pero pueden alcanzar hasta  $3000 nT$  [9][48].



**Figura A.3:** Esquema del electrojet auroral visto desde arriba [48].

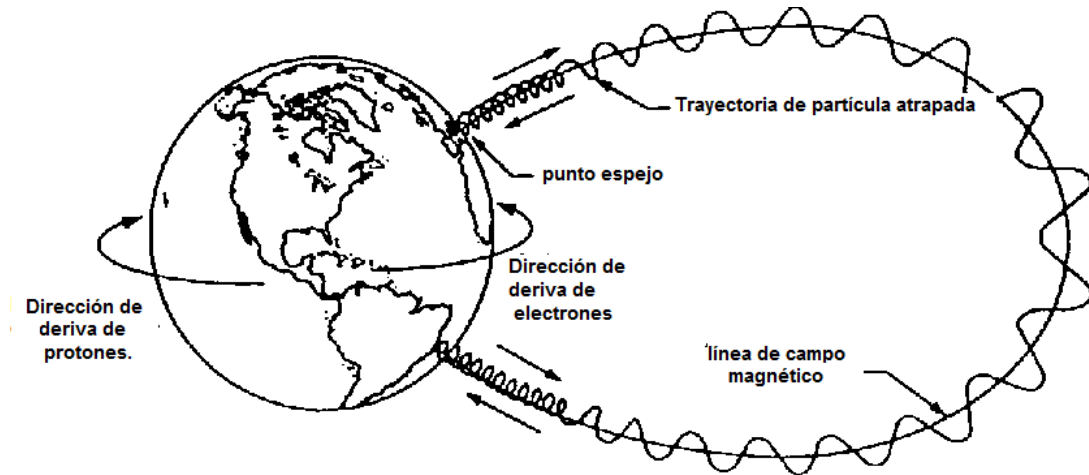
### Anillo de corriente

El anillo de corriente se desplaza hacia el oeste alrededor de la Tierra, a una distancia de cuatro radios terrestres. Su efecto en la superficie es una perturbación dirigida hacia el sur, la cual reduce la intensidad del campo principal. La corriente que circula en este anillo es de  $1$  a  $10 MA$ .

Este anillo es producido por la deriva hacia el oeste de iones y la deriva hacia el este de electrones en los cinturones de radiación. Dado que los electrones poseen menor energía, la corriente está dominada por iones, o en ocasiones muy perturbadas por oxígeno ionizado de

la ionosfera. Los iones giran alrededor del campo magnético local, viajan a lo largo de una línea de campo hacia la ionosfera, rebotan en un punto espejo en el campo magnético (véase figura A.4) que converge a altas latitudes y se desplaza de manera azimutal alrededor de la Tierra.

Debido a que los iones ocupan todas las latitudes a lo largo de una línea de campo, cubren por completo al planeta y crean un selenoide de anillos a su alrededor. El efecto en superficie es una perturbación magnética casi constante y paralela al eje dipolar terrestre. El índice geomagnético Dst se diseñó para medir esta perturbación y es una cantidad física descriptiva de lo que sucede en el espacio.



**Figura A.4:** Partículas cargadas en las líneas dipolares del campo geomagnético que forman la corriente de anillo [9].

## Referencias

---

- [1] Moldwin, M. *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press, 2008.
- [2] LANCE-IG-UNAM. <http://www.sciesmex.unam.mx/>. 2017.
- [3] Mavromichalaki, H; G Souvatzoglou; C Sarlanis; G Mariatos; C Plainaki; M Gerontidou; A Belov; E Eroshenko; V Yanke. Space weather prediction by cosmic rays. *Advances in Space Research*, 37(6):1141–1147, 2006.
- [4] Grieder, Peter. *Cosmic rays at Earth*. Gulf Professional Publishing, 2001.
- [5] Bothmer, V.; I.A. Daglis. *Space Weather: Physics and Effects*. Springer Praxis Books. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] Hanslmeier, A. *The Sun and Space Weather*. Astrophysics and Space Science Library. Springer Netherlands, 2007.
- [7] Benestad, R.E. *Solar activity and earth's climate*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [8] González-Méndez, Luis Xavier. *El telescopio de neutrones solares en Sierra Negra y aceleración de iones en la atmósfera solar*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [9] Cervantes-Villa, Juan Sebastián. Estudio del origen e influencia de las perturbaciones externas del campo geomagnético a partir de mediciones en observatorios y satélites. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [10] Herraiz-Sarachaga, Miguel; Gracia Rodríguez-Caderot; Marta Rodríguez-Bouza; Izarra Rodríguez-Bilbao; Francisco Sánchez-Dulcet; Beatriz Moreno-Monge; Iria Blanco-Cid; Benito A. de la Morena-Carretero; Joaquín Escayo-Menéndez. Estudio de las tormentas geomagnéticas y evaluación de su impacto en el ámbito de las tecnologías e infraestructuras en España y Portugal Riesgos naturales. *Seguridad y medio ambiente*, (133):18–34, 2014.
- [11] Heber, B.; T.R. Sanderson; M. Zhang. Corotating interaction regions. *Advances in Space Research*, 23(3):567–579, 1999.
- [12] Verbanac, Giuli; Bojan Vršnak; Manuela Temmer; Mioara Mandea; Monika Korte. Four decades of geomagnetic and solar activity: 1960-2001. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 2010.



- [13] Corona-Romero, Pedro. *Propagación de eyecciones de masa coronal rápidas y sus ondas de choque en el medio interplanetario*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [14] Corona-Romero, Pedro. Evolución de eyecciones de masa coronal y ondas de choque interplanetarias : impulsión, desacoplamiento y decaimiento. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [15] Tarbuck, E.J.; F.K. Lutgens; D. Tasa. *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación, 2005.
- [16] Cordero-Tercero, María Guadalupe; Alejandro Lara-Sánchez; María Dolores Maravilla-Meza; Blanca Emma Mendoza-Ortega; José Francisco Valdés-Galicia. *Introducción a la física espacial*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [17] Otaola, J.; B. Mendoza; R. Pérez. *El Sol y la Tierra: Una relación tormentosa*. Fondo de Cultura Económica, 2003.
- [18] Lewis, J.S. *Physics and Chemistry of the Solar System*. International Geophysics. Elsevier Science, 2004.
- [19] Enciclopedia Británica - McElroy Michael B. <https://www.britannica.com/science/>. 2012.
- [20] Rostoker, Gordon. Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics*, 10(4):935–950, 1972.
- [21] Matsushita, Sadami; W.H. Campbell. *Physics of Geomagnetic Phenomena: International Geophysics Series*, volume 2. Elsevier, 2016.
- [22] Gonzalez, W.D.; J.A. Joselyn; Y Kamide; H.W. Kroehl; G. Rostoker; B.T. Tsurutani; V.M. Vasyliunas. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4), 1994.
- [23] Álvarez Muñoz; E Zas, J. El Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger. *Revista Española de Física*, 22(2), 2008.
- [24] García-Gínez, Rocío. Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para el Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [25] Tamashiro, Alejandro Andrés. *Espectro y composición de los rayos cósmicos en el rango de energía de la transición galáctica-extragaláctica*. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires, 2010.
- [26] Gaisser, T.K. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990.
- [27] Ortiz-Fragoso, Ernesto. Detector prototipo de rayos cósmicos secundarios para conocer la contribución relativa de cada una de sus componentes. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [28] González-Méndez, Luis Xavier. Efectos de los campos electricos atmosfericos en los rayos cosmicos detectados en la superficie terrestre. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

- [29] Modzelewska, R; Alania, MV. On the 27-day variations of cosmic ray intensity in recent solar minimum 23/24. *arXiv preprint*, 2015.
- [30] Neutron Monitor Database. <http://www.nmdb.eu/>. 2017.
- [31] Valdés-Galicia, J.F.; L.X. González-Méndez. Solar modulation of low energy galactic cosmic rays in the near-earth space environment. *Advances in Space Research*, 57(6):1294–1306, 2016.
- [32] Otaola, J.; J.F. Valdez-Galicia. *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de Cultura Económica, 1992.
- [33] IG-UNAM. <http://www.cosmicrays.unam.mx/>. 2017.
- [34] Mishev, A.L.; I.G. Usoskin; G.A. Kovaltsov. Neutron monitor yield function: New improved computations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(6):2783–2788, 2013.
- [35] García-Gínez, Rocío. Estimación del espectro de alturas de pulsos con corrección del efecto apilamiento para el monitor de neutrones 6nm-64. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [36] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>. 2017.
- [37] NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/>. 2017.
- [38] NASA. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html/>. 2018.
- [39] Solar Physics Group, Trinity College Dublin and the Dublin Institute for Advanced Studies. <https://www.solarmonitor.org/>. 2017.
- [40] CDAW Data Center by NASA and The Catholic University of America. [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). 2018.
- [41] Gonzalez, W.D.; B.T. Tsurutani; A.L. De Gonzalez-Clúa. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, 88(3-4):529–562, 1999.
- [42] Cid, Consuelo; Judith Palacios; Elena Saiz; Antonio Guerrero; Yolanda Cerrato. On extreme geomagnetic storms. *J. Space Weather Space Clim.*, 4, 2014.
- [43] Santiago-Hernández, Alberto. Modulación de Rayos Cósmicos Galácticos debido a Eyecciones de Masa Coronal, 2015.
- [44] Alves, M.V.; E. Echer; W.D. González. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by dst index. *Journal of Geophysical Research*, 2006.
- [45] Musalem-Ramírez, Omar Octavio. Análisis de los fenómenos solares e interplanetarios causantes de los decrecimientos Forbush en los rayos cósmicos. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [46] Villanueva-Pineda, Donovan Omar. Análisis de las emisiones solares causantes de decrecimientos forbush de la radiación cósmica durante el ciclo solar 24. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.

- [47] Samara, E; Smponias, A; Lytrosyngounis I; Lingri D; Mavromichalaki H; Sgouropoulos C. Unusual cosmic ray variations during the forbush decreases of june 2015. *Solar Physics*, 293, 2018.
- [48] Baumjohann, Wolfgang; Michel Blanc; Andrei Fedorov; Karl-Heinz Glassmeir. Current systems in planetary magnetospheres and ionospheres. *Space Science Reviews*, 2010.