

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
“MAT. LUIS MANUEL RIVERA GUTIÉRREZ”

ESTUDIO DE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS INTENSAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

P R E S E N T A

ELSA SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR
DR. ERNESTO AGUILAR RODRIGUEZ

Morelia, Michoacán. diciembre de 2010

Agradecimientos

- Agradezco principalmente a Dios por todo cuando me ha dado y permitido vivir.
- Muy especialmente a toda mi familia desde el más pequeño (gomis) hasta la más grande (welis), pues han sido, son y serán parte fundamental en mi vida.
- A todos los amigos y amigas: las chicas del coro de Nichi y Capuchinas, a los de la danza, a los de la pastigel... ya que siempre encontré donde recargar los ánimos y comer unos buenos panes (y con fritos).
- A los maestros y demás personal de las diferentes escuelas donde estudié, puesto que fueron indispensables durante mi formación. De manera especial a los revisores de este trabajo pues gracias a sus comentarios y observaciones se mejoró la calidad de la tesis.
- A los compañeros y amigos de la primaria,..., hasta los de la UMB.
- A los del IGF-UNAM unidad Morelia por permitirme entrar a su mundo y explorar juntos parte de nuestro Universo.
- Al **Dr. Aguilar** por abrir un espacio de su valioso tiempo y dedicarlo a mi durante la investigación.
- A la **Dirección de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** por la beca (proyecto **PAPIIT-IN110309**) otorgada durante algunos meses del desarrollo de este trabajo.
- También a aquellos que me brindaron empleo, que me orientaron o me apoyaron en algún momento; a los que apoyaron a mi familia física, económica y moralmente durante el periodo octubre - agosto pues gracias a eso pude terminar mi tesis.
- A los que ya no están y que esperaban esto ... pero aún siguen aquí.
- Claro, no podía discriminar a los libros y la computadora, cada día había algo nuevo que aprender de ellos.
- Ah! y también a aquellos que van a decir . . . ¡ x fin!.

¡ A todos G R A C I A S !

Índice General

Índice General	III
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VII
Introducción	IX
1. El Sol y la Tierra	1
1.1. El Sol	1
1.1.1. Estructura	1
1.1.2. Ciclo de Actividad	3
1.1.3. Manifestaciones de la Actividad Solar	5
1.2. Viento Solar	10
1.2.1. La Heliosfera	12
1.3. Campo Magnético Terrestre	12
1.3.1. Magnetósfera	15
1.4. Influencia de la Actividad Solar en el Entorno Geomagnético	21
1.4.1. Tormentas Geomagnéticas	21
1.4.2. Índice Dst	22
1.4.3. Auroras	23
1.5. Clima Espacial	24
1.6. Motivación del Estudio	25
2. Tormentas Geomagnéticas Intensas	27
2.1. Introducción	27
2.2. Selección de Datos	28
2.3. Análisis Estadístico de Eventos	32
3. Resultados y Conclusiones	45
3.1. Resultados	45
3.2. Conclusiones	46
3.3. Trabajo a futuro	46

A. Conceptos Básicos	47
A.1. Plasmas	47
A.2. Índices	49
A.3. Naves Espaciales	51
Bibliografía	53

Índice de Figuras

1.1. Estructura del Sol [Tomada de Astro-Observer].	3
1.2. Evolución del campo magnético del Sol [Tomada de Astronomy & Geophysics]. . .	4
1.3. Mancha solar [Tomada de Astroengine].	5
1.4. Fácúlas sobre la superficie solar [Tomada de Encyclopedia of Science].	6
1.5. Granulación en la superficie solar [Tomada de SOHO].	6
1.6. Supergranulación en la superficie solar.	7
1.7. Espículas solares [Tomada de Solar Physics, NASA].	7
1.8. Playas solares [Tomada de edu, NAU].	8
1.9. Fulguración solar [Tomada de Solar Power].	8
1.10. Protuberancia solar del 04 de junio de 1946 [Tomada de Multimedia, NASA]. . . .	9
1.11. Secuencia de imágenes de la erupción de una eyección de masa coronal [Tomada de High Altitude Observatory].	10
1.12. Viento Solar y choque de proa formado por la interacción del viento solar con un obstáculo [Cortesía de R. Lundin et al. 2004 Science 305 1933].	12
1.13. Campo magnético terrestre: se muestra la ubicación de los polos magnéticos. El eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de aproximadamente 11° con el eje magnético. Además podemos apreciar las capas internas de la Tierra [Tomada de NTD Resource Center].	14
1.14. Intensidad del campo magnético B, sus coordenadas rectangulares X, Y, Z y los elementos magnéticos H, D e I.	15
1.15. Principales regiones de la magnetósfera terrestre [Tomada de Cosmicopia, NASA].	16
1.16. La imagen muestra un corte meridional de los cinturones de radiación, observemos que tales regiones no cubren los polos y son más anchas en el ecuador [Tomada de Space and Plasma Physics, UMD].	18
1.17. <i>a)</i> Movimientos de las partículas alrededor de las líneas de campo magnético: rotación, balanceo y deriva [Tomada de Encyclopedia Britannica]. <i>(b)</i> Movimiento de deriva de una partícula, al rededor de la Tierra, vista desde uno de los polos [Tomada de Education, ISTP, GSFC, NASA].	20
1.18. Fases de una TG: A es la fase inicial, B la fase principal y C la fase de recuperación.	23
1.19. Aurora boreal en Alaska (4-01-2001).	24
1.20. Efectos del clima espacial en nuestra tecnología [Tomada de HINODE, NASA]. . .	25
2.1. Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma de la EMCI en su arribo a la magnetósfera en la super tormenta menos intensa (TG 07 en la Tabla 2.2), además se anexa la gráfica correspondiente al Dst.	33

2.2.	Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma de la EMCI en su arribo a la magnetósfera en la super tormenta número 04, que es de rango medio, también se anexa la gráfica correspondiente al Dst.	34
2.3.	Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma en su arribo a la magnetósfera en la TG más intensa (TG 14 en la Tabla 2.2), también se anexa la gráfica correspondiente al Dst.	35
2.4.	a)Histograma de la velocidad de las EMCs observadas por LASCO. b)Histograma de la velocidad de las EMCIs al paso frente a ACE o WIND.	36
2.5.	a)Intensidad de las fulguraciones asociadas con las EMCs. b)Posición de la fulguración en el disco del Sol.	37
2.6.	a)Distribución de las TGs en el índice Dst. b)Clasificación de las TGs en el índice Kp.	38
2.7.	a)Distribución de las TGs en el índice ap. b)Histograma de las TGs en el índice Ap.	38
2.8.	a)Histograma de las TGs en el índice Ap*. b)Histograma de las TGs en el índice aa.	39
2.9.	a)Distribución de las TGs en el índice Aa. b)Histograma de los eventos en el índice aa*.	40
2.10.	a)Histograma de las TGs en el índice am. b)Histograma de los eventos de acuerdo al índice Am	40
2.11.	a)Distribución de los eventos en el índice AE. b) Clasificación de las TGs en el índice Q.	41
2.12.	Histograma de las TGs en el índice PC.	42
2.13.	Velocidad vs Dst.	42
2.14.	a)Intensidad de la fulguración vs Dst. b)Intensidad de la fulguración vs velocidad de la EMC	43

Índice de Tablas

1.1.	Características básicas del Sol.	2
1.2.	Clasificación de las fulguraciones de acuerdo a su intensidad [GOES, NOAA]. . . .	9
1.3.	Características del viento solar rápido y lento.	11
1.4.	Algunas características del planeta Tierra.	13
1.5.	Tiempo que les lleva a las partículas realizar un movimiento.	20
1.6.	Clasificación de las tormentas geomagnéticas de acuerdo a su nivel de actividad. .	23
2.1.	Lista de las 73 tormentas geomagnéticas más intensas de los años 1957 a 2010. Las abreviaciones de la fase solar son: ma (máximo), mi (mínimo), a (ascendente), d (descendente).	29
2.2.	Lista de los eventos que precedieron a una TG y además se incluye el valor respecto al índice indicado.	31
2.3.	Resumen de datos de las gráficas.	44
2.4.	Valores de las correlaciones entre algunos parámetros.	44

Introducción

Cuando hablamos de tormentas nos imaginamos que va haber lluvia, viento, granizo, relámpagos o nieve; pero existen otras que ocurren en el espacio que no se pueden observar a simple vista las cuales afectan a nuestro entorno terrestre o magnético. A este tipo de tormentas se les conoce como tormentas geomagnéticas que se refieren a la perturbación temporal del campo magnético terrestre.

Cuando ocurre una tormenta geomagnética y es muy intensa afecta a nuestros sistemas tecnológicos como son las redes eléctricas, los oleoductos, los satélites que se encuentran en órbita, a las señales a través de ondas de radio, a la naturaleza, etc. Actualmente somos muy dependientes de la tecnología la cual funciona a través de alguno de estos medios, es por ello que es de vital importancia el estudio de las tormentas geomagnéticas.

Este trabajo de tesis se centra principalmente en el análisis de las tormentas geomagnéticas con índice $Dst \leq -200$ nT debido a que son las más intensas. La finalidad de este estudio es conocer cuales han sido las características de los eventos solares que las precedieron para que cuando ocurra un fenómeno similar podamos dar un diagnóstico de cómo será la tormenta que le sigue. También analizamos cual es el valor del campo magnético terrestre a distintas latitudes cuando ocurre una tormenta geomagnética.

Esta tesis se divide en tres capítulos. En el capítulo 1 se describen las propiedades generales del Sol y la Tierra, así como los eventos que en ellos ocurren y la relación que existe entre ambos. Aquí se detallan las características de una tormenta geomagnética, cómo se genera y cómo se identifica. En el capítulo 2 se muestran los datos de las tormentas con $Dst \leq -200$ nT que se han registrado (esta información se obtuvo de los observatorios magnéticos dedicados a estos estudios), de todas ellas se dedujo un subconjunto para presentar las características de los eventos solares que las precedieron y además conocer la correlación que existe entre ellos, esto nos ayudará para dar el diagnóstico. También se muestra el valor del campo magnético en distintos índices magnéticos los cuales se clasifican de acuerdo a diferentes latitudes. La descripción de tales índices se muestra en el Apéndice.

Los resultados obtenidos, las conclusiones y trabajo a futuro se resumen en el capítulo 3. También se incluye un Apéndice en el que se dan algunas ecuaciones matemáticas que justifican los procesos físicos que se llevan a cabo en el Sol y la Tierra; en éste mismo, se da la descripción de los diferentes índices magnéticos y las referencias de algunas naves espaciales que se encuentran en órbita observando al Sol y la Tierra, de las cuales se obtuvieron los datos utilizados en este estudio. Por último se da la bibliografía y referencias que se usaron en esta investigación.

Los datos de los índices se obtuvieron de la información que ofrecen los distintos observatorios dedicados a su análisis, la información acerca de los eventos solares se obtuvo de los reportes de los satélites y las gráficas respectivas se realizaron con el lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language).

Capítulo 1

El Sol y la Tierra

1.1. El Sol

Desde la antigüedad el Sol se identificó como fuente de vida sobre la Tierra e incluso, en algunas culturas se le consideró como un Dios; actualmente ha dejado de ser motivo de adoración divina para convertirse en objeto de estudio científico y por supuesto para nosotros es de particular importancia analizar los efectos que tiene sobre la Tierra. Desde el punto de vista astrofísico, el Sol es una estrella entre tantas miles, pero es la única que nos permite estudiar algunas de sus propiedades a simple vista. El desarrollo de la ciencia ha favorecido para conocer sus características físicas tales como: su tamaño, temperatura media, masa, sus componentes, etc.

El Sol se formó hace aproximadamente 4500 millones de años a partir de nubes de gas y polvo que contenían residuos de estrellas de generaciones anteriores. Sus principales características se muestran en la Tabla 1.1.

1.1.1. Estructura

El Sol posee una forma esférica y a causa de su lento movimiento de rotación tiene un leve achatamiento polar. La materia que lo compone es atraída hacia el centro por su propia fuerza de gravedad. Su estructura presenta capas esféricas (como si fueran capas de una cebolla). La frontera y la densidad entre las distintas capas son difíciles de establecer. El Sol está formado por las siguientes capas a partir del centro (ver Figura 1.1) [Schrijver, Zwaan, 2000]:

1. **Núcleo:** Región donde se lleva a cabo el proceso de fusión nuclear, el hidrógeno se convierte en helio. Su temperatura media es de 1.5×10^7 K; tiene una densidad de 158 gr/cm^3 y un radio aproximado de $0.25 R_S$. A cada segundo 564×10^6 Ton. de helio se convierten en 560×10^6 Ton. de hidrógeno y 4×10^6 Ton. de masa se transforma en energía (de acuerdo a $E = mc^2$), por lo que toda la producción de energía solar (o luminosidad solar) se genera en esta zona.
2. **Zona Radiativa:** Aquí la energía es transportada al exterior por mecanismos de radiación. Esta zona está compuesta de plasma³, la cual se extiende sobre el núcleo hasta $0.75 R_S$,

³Plasma: Cierta estado de la materia, altamente ionizado, eléctricamente neutro (la carga total es cero), donde los iones y electrones pueden moverse en forma independiente. Por arriba de los 10000 K cualquier sustancia se encuentra en estado de plasma.

Distancia a la Tierra	1.5×10^8 km
Radio (R_S)	6.96×10^5 km
Masa	1.99×10^{30} kg
Temperatura promedio superficial	5700 K
Periodo de rotación	25 días en el ecuador 29.3 días a una latitud de 60°
Dirección de giro	De izquierda a derecha, visto desde la superficie de la Tierra
Luminosidad	3.86×10^{23} W
Composición	90 % de hidrógeno 9 % de helio 1 % de otros elementos
Distancia a la estrella más cercana	2.72×10^5 UA ¹ $\sim$ 4.3 años luz ²

¹UA = 1 UA (unidad astronómica) es la distancia promedio de la Tierra al Sol ($\sim 1.5 \times 10^8$ km).

²Un año luz = 9.46×10^{15} segundos.

Tabla 1.1: Características básicas del Sol.

donde la temperatura disminuye conforme aumenta la distancia radial; en la base es de 8×10^6 K y en la superficies es de 5×10^5 K. De forma similar para la densidad: en la base es de 20 gr/cm^3 , mientras que en la superficie es de 10^{-2} gr/cm^3 . Se calcula que los fotones tardan un millón de años en llegar a la superficie para manifestarse como luz visible.

3. **Zona Convectiva:** A causa de la baja temperatura, los átomos son parcialmente ionizados lo cual da lugar a movimientos de convección. La temperatura en la superficie es de 6.6×10^3 K y la densidad es de $4 \times 10^{-7} \text{ gr/cm}^3$. El transporte de energía se realiza por convección, por lo que se forman corrientes ascendentes de material desde la zona más caliente hasta la zona superior que es más fría y simultáneamente se producen movimientos descendentes de materia desde la zona más fría.
4. **Fotosfera:** Su nombre quiere decir “esfera de luz”, tiene un espesor aproximado de 300 km, donde más del 90 % de la radiación solar se emite en luz visible. La temperatura en la base es de 8000 K y en la superficie es de 4500 K, por lo que la temperatura promedio es de 5700 K y la densidad es de $8 \times 10^{-8} \text{ gr/cm}^3$. Si observamos detenidamente esta región, podemos identificar que presenta un aspecto granuloso; en ocasiones presenta manchas solares, etc., de esto hablaremos más a detalle, posteriormente.

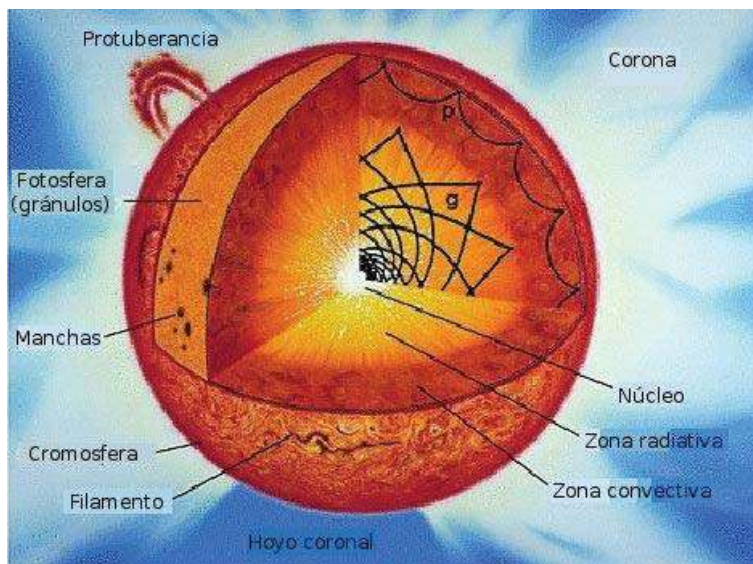


Figura 1.1: Estructura del Sol [Tomada de Astro-Observer].

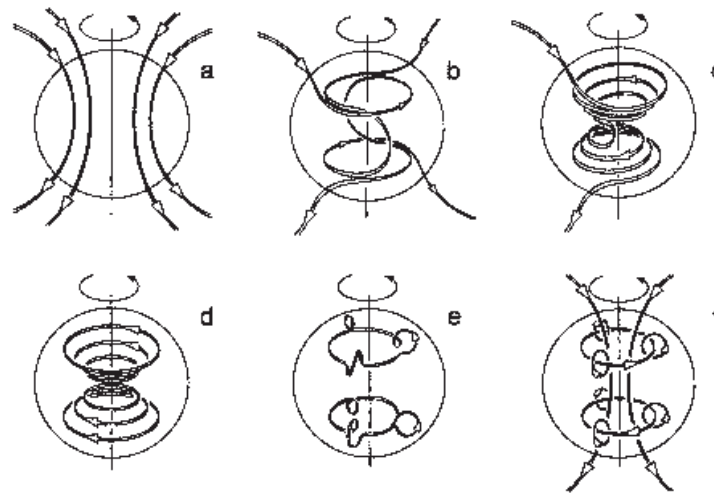
5. **Cromosfera:** Vista sobre el limbo solar (orilla del disco), se puede observar como una llamante pradera; tiene un espesor variable entre 1000 y 8000 km; su densidad es de 10^{-14} gr/cm³. Cerca de los 3000 km de altura la temperatura empieza a subir rápidamente alcanzando un valor de 10^6 K. A esta región se le conoce como *región de transición*, que también abarca parte de la Corona, hasta la superficie. En la *región de transición* todo el material se encuentra ionizado y la densidad ha bajado a 10^9 partículas/cm³. En la cromosfera emergen pequeños chorros de material llamados *espículas*, las cuales dan la apariencia rosada de la superficie, que sólo es visible a simple vista cuando ocurre un eclipse solar.
6. **Corona:** Es la última capa del Sol y la más extensa, se extiende hacia el medio interplanetario y su expansión rebasa la órbita de los planetas. En la Corona baja, la densidad es del orden de 10^8 partículas/cm³, mientras que la temperatura aumenta con la distancia al Sol, alcanzando un valor promedio de 2×10^6 K a una distancia de $2 R_S$. El material de esta zona está ionizado y continuamente es expulsado por la fuerte radiación solar, dando lugar al *viento solar*. La luz de la corona es apenas tan intensa como la luz de la Luna llena por lo que sólo es visible en eclipses solares o por medio de un coronógrafo⁴.

1.1.2. Ciclo de Actividad

La energía producida en el interior del Sol es constante, sin embargo la que escapa al medio interplanetario varía con el tiempo. Se cree que esta variación se debe a la evolución del campo magnético solar.

El nivel de actividad solar no es uniforme sino que varía con un periodo promedio de 11 años llamado *ciclo solar*, el cual se mide por el número de manchas solares. Durante el curso de un ciclo solar la localización de las manchas se mueve hacia el ecuador.

⁴Un coronógrafo es un instrumento que produce un eclipse artificial del Sol, mediante la colocación de un disco de ocultación sobre la imagen del Sol.



Love, J. J., 1999. *Astronomy & Geophysics*, 40, 6.14-6.19.

Figura 1.2: Evolución del campo magnético del Sol [Tomada de *Astronomy & Geophysics*].

Para el estudio de las manchas examinemos la estructura del campo magnético del Sol. El campo magnético global se idealiza dipolar [Aguilar, 2001], debido a la rotación diferencial de la superficie solar, la región ecuatorial se mueve más rápido y disminuye hacia los polos (el periodo de giro en el ecuador es de 25 días y de 29.3 días a latitudes mayores a 60° , aproximadamente) esto causa que las líneas de campo sean estiradas, retorcidas y entrelazadas, aumentando la intensidad del campo magnético y volviéndose más turbulento (ver Figura 1.2). Debido a esto, surgen regiones magnéticas dipolares que eruptan hacia el exterior de la fotosfera.

Las fases del ciclo solar que se pueden identificar son cuatro: mínimo solar, fase ascendente, máximo solar y la fase descendente. Durante el *mínimo* solar el campo se idealiza dipolar y las manchas aparecen a altas latitudes ($\sim \pm 45^\circ$); conforme avanza el ciclo de actividad el campo magnético se vuelve cada vez más complejo y el número de manchas aumenta y su posición avanza hacia el ecuador, es lo que se conoce como *fase ascendente*. En el *máximo*, la estructura del campo es aproximadamente toroidal, hay un mayor número de manchas, las cuales están más concentradas en el ecuador ($\sim \pm 5^\circ$). Después el campo magnético sufre una reestructuración para volver a su forma dipolar por lo que el número de manchas decrece y ahora son más visibles en el polo sur, hasta llegar casi a desaparecer por completo; esto se conoce como *fase descendente*, y posteriormente empieza un nuevo ciclo. El tiempo promedio para pasar de un mínimo a un máximo es de 5.5 años aproximadamente y viceversa, completando un ciclo solar. Cuando ha terminado un ciclo de 11 años el campo es dipolar, pero con polaridad opuesta que al inicio del mismo y al término del ciclo siguiente la polaridad del campo será la original. A este proceso se le conoce como *ciclo magnético solar o ciclo de 22 años*.

Actualmente nos encontramos en la fase ascendente del ciclo solar número 24 y esperamos tener un máximo en el año 2012.

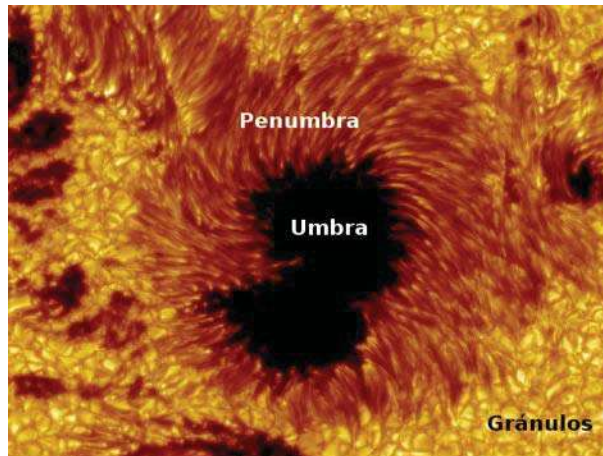


Figura 1.3: Mancha solar [Tomada de Astroengine].

1.1.3. Manifestaciones de la Actividad Solar

Además de la deformación del campo magnético, los movimientos en los plasmas son capaces de aumentar el campo magnético lo cual provoca la acumulación de energía magnética. Esta energía se libera en distintas formas: manchas, fáculas, gránulos y supergránulos, fulguraciones, protuberancias, espículas, eyecciones de masa coronal o viento solar [Vázquez, 2006], que a continuación describiremos brevemente.

1. **Manchas:** Es una región oscura de la fotosfera donde el campo magnético es muy intenso (puede llegar a los $0.4 \text{ T} = 4000 \text{ G}$, [Otaola, 1993]) y la temperatura es menor que sus alrededores (ver Figura 1.3). Consta de una zona más oscura llamada umbra y la zona exterior llamada penumbra; la temperatura de la umbra es de 3800 K , mientras que la penumbra alcanza los 5200 K , aproximadamente [Baker, 2006].

El campo magnético de la umbra es más intenso y vertical, pero disminuye hacia el extremo de la penumbra y se va inclinando hasta volverse horizontal. Las manchas más grandes pueden llegar a medir hasta $40\,000 \text{ km}$ (tres veces el diámetro de la Tierra) y las más pequeñas tienen de 1000 a 2000 km de diámetro.

Algunas manchas aparecen individualmente o en grupos. Cuando aparecen en grupos, son asociadas a una zona de la fotosfera activa. Una mancha individual pequeña puede durar un día o menos y las manchas grandes o grupos de manchas permanecen tres o cuatro meses.

Las manchas son la principal manifestación de la actividad solar. Dado que el campo magnético es muy intenso en una mancha, éste controla el movimiento convectivo debajo de esta zona, razón por la cual se detiene el movimiento de ebullición, por lo que la temperatura del fluido es menor que la temperatura que se encuentra a su alrededor, el cual está en movimiento convectivo constante.

El campo magnético fuerte asociado con las manchas y grupos de manchas en la fotosfera se extiende hacia la cromosfera, manifestándose en regiones activas. Las regiones activas son más comunes y extensas durante el máximo solar que durante el mínimo.

El campo en la periferia de la mancha no es intenso y su influencia en la convección produce un flujo de calor que sale a la capa alta de la fotosfera y sube la temperatura del gas, por eso se observan áreas brillantes llamadas playas y arriba de ellas en la cromosfera las fáculas.

2. **Fáculas:** Son zonas más brillantes y calientes que el resto de la superficie fotosférica (ver Figura 1.4). Las fáculas están asociadas a las manchas; se originan en los puntos de penetración de las líneas de campo magnético distorsionado. La temperatura excede a lo más 250 K al resto. Con frecuencia las fáculas constituyen los pies de las protuberancias.

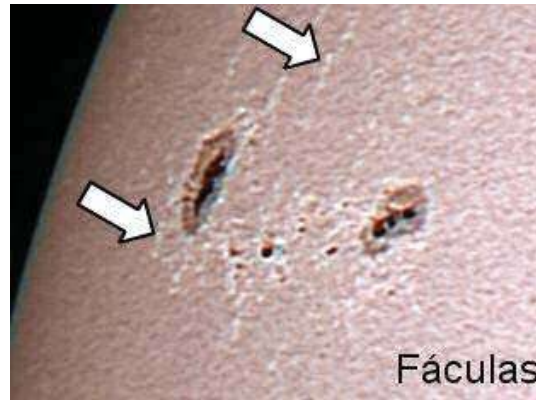


Figura 1.4: Fáculas sobre la superficie solar [Tomada de Encyclopedia of Science].

3. **Gránulos:** Son celdas brillantes separadas por pequeñas líneas oscuras (ver Figura 1.5) que se elevan desde la zona convectiva, manifestándose visiblemente en la fotosfera. La circulación del material se debe a que en la zona convectiva la temperatura es mayor, por lo que el gas se expande, se vuelve menos denso y se eleva por el centro de la celda; conforme se eleva, se va enfriando y se hace más denso hasta que vuelve a hundirse en la orilla, por ello la superficie solar cambia continuamente. El diámetro de un gránulo en la superficie va de 250 a 2000 km y tienen una duración de 5 a 10 minutos.

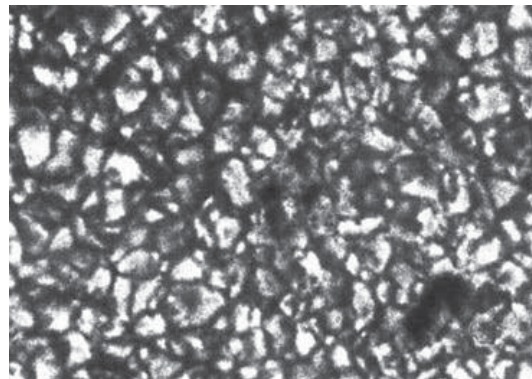


Figura 1.5: Granulación en la superficie solar [Tomada de SOHO].

4. **Supergránulos:** Son gránulos con una dimensión de hasta 30 000 km (ver Figura 1.6); su tiempo de duración es de un día. El material que circula en los supergránulos va a profundidades mayores que el de los gránulos, hasta de unos 8000 o 10 000 km bajo la superficie.

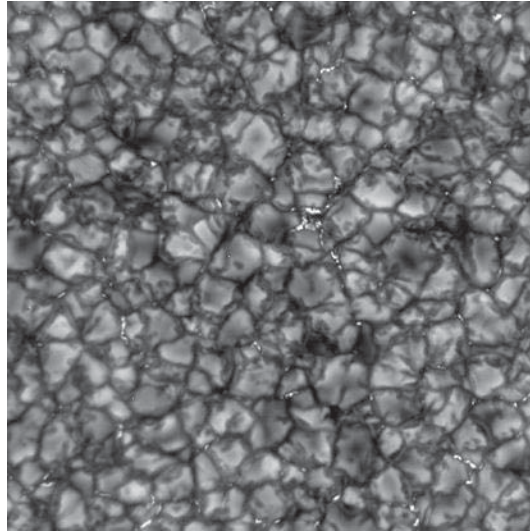


Figura 1.6: Supergranulación en la superficie solar.

5. **Espículas:** Son pequeños chorros de material que se levantan y se desvanecen entre 5 y 10 minutos (ver Figura 1.7). Aparecen como pequeñas y brillantes oleadas, algunas son delgadas y otras pueden alcanzar hasta 500 km de grueso con una altura de 8000 km, aunque algunas exceden los 15 000 km sobre la fotosfera. La velocidad del material es de 20 a 30 km/seg. Las espículas aparecen en grupos semejando arbustos y tienen el aspecto de una llameante pradera, característica de la cromosfera vista sobre el limbo solar.

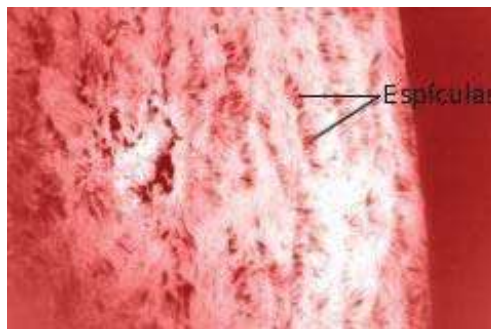


Figura 1.7: Espículas solares [Tomada de Solar Physics, NASA].

6. **Playas:** Constituyen la extensión cromosférica de las fáculas (ver Figura 1.8), con frecuencia se encuentran en la base de las espículas y cerca de las manchas. También se les llama regiones activas, ya que en ellas suelen ocurrir las fulguraciones.

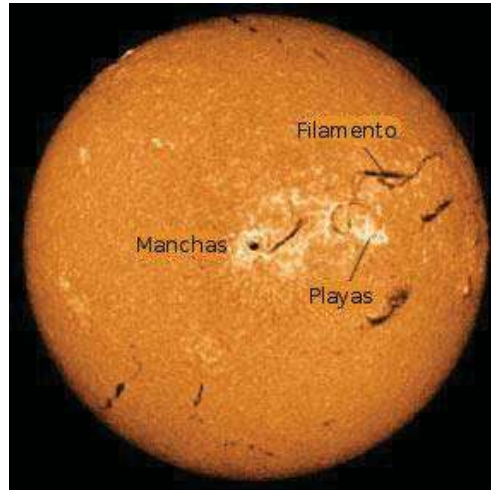


Figura 1.8: Playas solares [Tomada de edu, NAU].

7. **Fulguraciones o ráfagas:** Se pueden definir como una súbita, rápida e intensa variación en brillantez (ver Figura 1.9). Consisten en la liberación de una gran cantidad de energía, la emisión puede llegar a los 10^{32} ergs [Aguilar, 2001]; la energía liberada se compara con la explosión de 3000 millones de bombas de hidrógeno. La explosión ocurre en la cromosfera, abarcando un área de 10^{15} m²; la temperatura en su interior llega a alcanzar 10^7 K, una temperatura mayor que en el propio núcleo, por lo que es posible que aquí también ocurran reacciones de fusión nuclear. La densidad va de 5×10^{14} a 5×10^{15} partículas/m³. El tiempo de duración de dicho fenómeno es de algunos minutos hasta una hora o más; es considerada una de las más violentas manifestaciones de la actividad solar. La clasificación de las fulguraciones de acuerdo a su Intensidad se muestra en la Tabla 1.2.

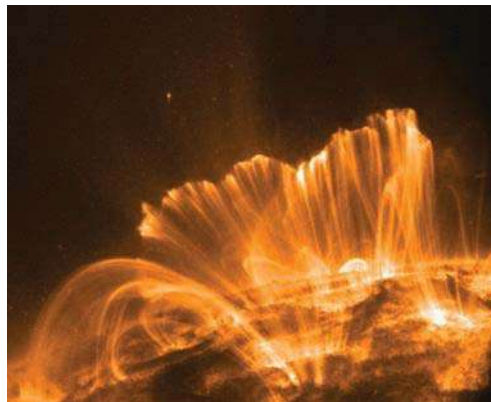


Figura 1.9: Fulguración solar [Tomada de Solar Power].

8. **Protuberancias:** Son grandes chorros de material que se presentan en forma de arco (ver Figura 1.10). Se estiran desde la fotosfera hacia la corona siguiendo las líneas de campo magnético, alcanzan miles de kilómetros, permaneciendo erguidas durante días o meses. El

<i>Clase</i>	<i>Intensidad [W/m²]</i>
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$10^{-4} \leq I$

Tabla 1.2: Clasificación de las fulguraciones de acuerdo a su intensidad [GOES, NOAA].

material que constituye la protuberancia presenta menor temperatura y mayor densidad que el resto del material que le rodea. Existen dos tipos de protuberancias:

- a) **Protuberancias estáticas:** Se alcanzan hasta unos 50 000 km o más sobre la superficie solar; pueden durar semanas o hasta tres meses sin desvanecerse; tienen temperaturas entre 8000 y 10 000 K. Están formadas por materia atrapada en los campos magnéticos.
- b) **Protuberancias activas:** Muestran oleadas y chicoteos, alcanzan en pocas horas miles de kilómetros; tienen temperaturas de hasta 100 000 K.

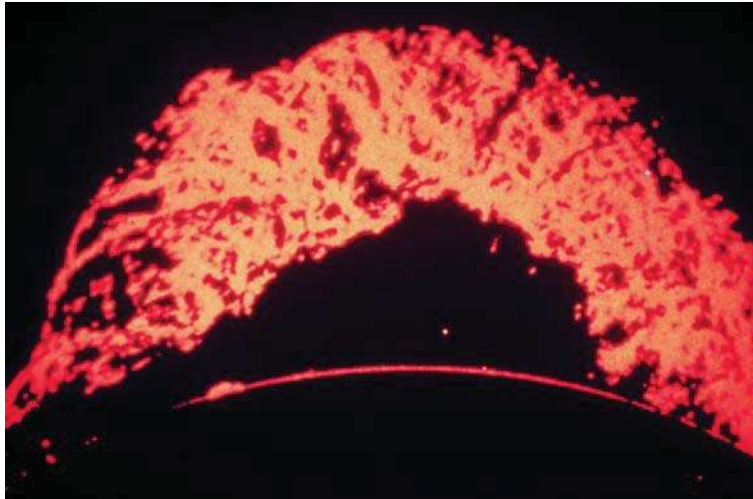


Figura 1.10: Protuberancia solar del 04 de junio de 1946 [Tomada de Multimedia, NASA].

9. **Eyecciones de masa coronal (EMCs):** Es la expulsión repentina de una nube de plasma magnetizado desde la corona solar hacia el medio interplanetario (ver Figura 1.11). El plasma expulsado consiste principalmente de protones y electrones, además de pequeñas cantidades de materiales más pesados como helio, oxígeno, hierro, etc. Las EMCs también llevan consigo líneas de campo magnético. Sus tiempos característicos de erupción varían desde minutos hasta horas, dependiendo de sus propiedades como son: temperatura, velocidad, masa o energía. De acuerdo al nivel de actividad del Sol la frecuencia de ocurrencia de las EMCs es de una o dos veces por semana en tiempos de mínima actividad y varias veces al día en máxima actividad. Normalmente, el tiempo que les toma en llegar a la Tierra es de uno a cuatro días después de ser expulsadas, según sea su velocidad. La estructura común de

una EMC presenta tres componentes: un arco delantero brillante, seguido por una cavidad oscura de baja densidad y un núcleo brillante de material más denso.

El origen de las EMCs aún no es muy claro, usualmente se asocian con el rompimiento de protuberancias. En otros casos, una fulguración precede a una EMC, aunque no todas las fulguraciones solares están asociadas a las EMCs. Las EMCs presentan formas distintas, sin embargo se pueden dividir en dos grupos:

- a) **Tipo halo:** Se observan en forma de emisión en todo el disco de ocultación y representan material que se propaga hacia el observador o se alejan de él. El 20 % de las EMCs observadas pueden incluirse en este tipo.
- b) **Tipo bucle:** Son eyecciones cuya proyección en el plano del cielo presentan una estructura curvada con dos pies y cuyos bordes interior y exterior están bien definidos [Cid, 1999]. Del total de las observadas, aproximadamente el 80 % son de tipo bucle.

Cuando una EMC es muy intensa puede afectar de manera importante a la magnetósfera de nuestra Tierra, lo cual se analizará posteriormente.

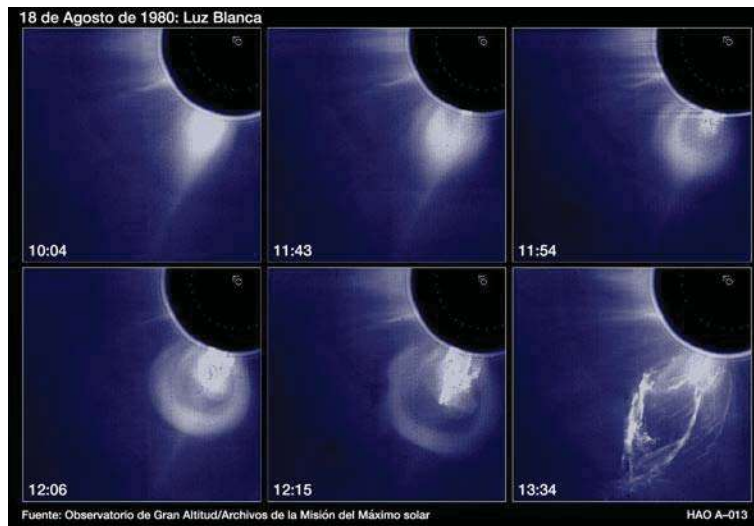


Figura 1.11: Secuencia de imágenes de la erupción de una eyección de masa coronal [Tomada de High Altitude Observatory].

1.2. Viento Solar

El viento solar es un fluido en estado de plasma, supersónico y magnético que transmite ondas, discontinuidades y perturbaciones de enormes dimensiones. Es la expansión de la corona solar hacia el medio interplanetario (ver Figura 1.12). Debido a que la temperatura de la corona va ascendiendo a una cierta distancia, la gravedad y el campo magnético del Sol ya no pueden retener al plasma, entonces escapa radialmente; dicho plasma está compuesto principalmente por protones, electrones

<i>Parámetro</i>	<i>Viento rápido</i>	<i>Viento lento</i>
velocidad	500 - 800 km/s	200 - 400 km/s
densidad	4 protones/cm ³	10 protones/cm ³
temperatura	2×10^5 K	4×10^4 K
tiempo en cruzar 1 UA	2.5 días	4 días
origen	hoyos coronales	aún no es claro

Tabla 1.3: Características del viento solar rápido y lento.

y un pequeño porcentaje de iones más pesados. Cuando el plasma se desprende de la corona lleva consigo campo magnético, debido a que el plasma y el campo magnético no se disocian cuando su conductividad eléctrica es muy alta. La velocidad inicial es muy lenta y aumenta conforme se aleja hasta alcanzar una velocidad que conserva por el resto de su viaje; en cambio la temperatura y la densidad⁵ disminuyen al ir alejándose del Sol.

Observaciones *in situ* han demostrado que existen dos tipos de viento solar: viento rápido y viento lento; sus principales características se describen en la Tabla 1.3. Cuando una corriente de viento rápido alcanza a una corriente de viento lento comienza a empujarlo, pero a la vez el viento lento frena al viento rápido, formando una región de compresión llamada *región corrotante de interacción* [González, 2000].

Un *hoyo coronal* visto mediante un coronógrafo se intuye como la falta de brillo en la corona, debido a que en esta zona la densidad del material es menor a la del gas circundante. Durante el mínimo de actividad la corona se caracteriza por tener dos enormes hoyos coronales. También se observan los *cascos coronales*, que son regiones de alta densidad en la corona.

Al campo magnético arrastrado por el viento solar se le conoce como *campo magnético interplanetario*. El campo magnético fluye radialmente, sin embargo como el Sol esta rotando, arrastra consigo las líneas de campo magnético que aún estan conectadas a él, formando una espiral, conocida con el nombre de *espiral de Parker*. La torsión depende de la latitud con respecto al Sol: las líneas que salen de los polos son prácticamente radiales y para las que salen del ecuador la torsión es máxima. A 1 UA el ángulo formado por la dirección radial y el campo magnético es de 45° y cerca de la órbita de Júpiter (aprox 5.2 UA) el ángulo es cercano a los 90°.

En el medio interplanetario el viento solar fluye con una velocidad mayor que la de las ondas magnetosónicas (ondas magnéticas y supersónicas) que se propagan en él y decimos que es un fluido supermagnetosónico. Cuando el viento solar magnetosónico se encuentra con un obstáculo en su camino se generan ondas que tienden a propagarse en todas direcciones, sin embargo como el viento solar se mueve más rápidamente que todas las ondas, las que quisieran regresarse al Sol no pueden hacerlo pues son transportadas hacia delante del fluido mismo y se genera una región de transición conocida con el nombre de *choque de proa*. La Figura 1.12 nos da una noción de tal escenario. Desde un marco de referencia montado en el viento solar, cualquier objeto en el medio interplanetario viaja a una velocidad supersónica, por lo que se forma una onda de choque al frente del obstáculo. Es el mismo fenómeno que ocurre al frente de un barco o lancha que se desplazan en el agua a una velocidad mayor a la velocidad de las ondas en la superficie del agua.

Las propiedades del viento solar cambian al cruzar un *choque de proa*, el efecto principal

⁵la densidad del viento solar se mide generalmente por el número de protones/cm³

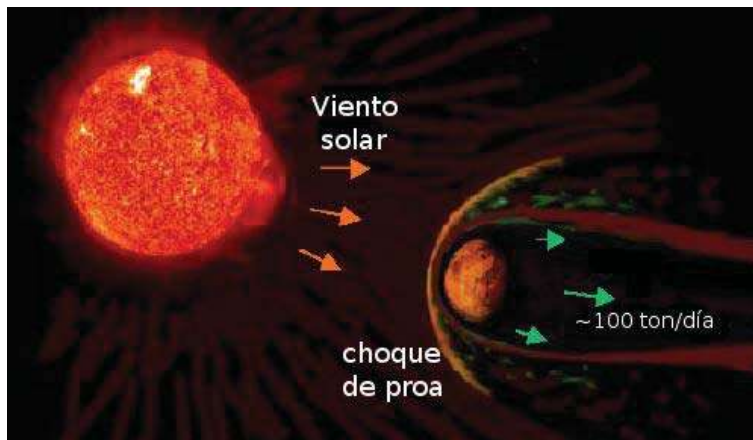


Figura 1.12: Viento Solar y choque de proa formado por la interacción del viento solar con un obstáculo [Cortesía de R. Lundin et al. 2004 Science 305 1933)].

del choque sobre el viento es que disminuye su velocidad supersónica a un valor subsónico pero aumenta su densidad y temperatura. En el estado subsónico el viento solar rodea al obstáculo. La onda de choque transforma irreversiblemente las características del medio; mientras mayor sea la velocidad de propagación del fluido más intenso será el choque y más aumenta la temperatura. La velocidad del flujo que se aleja del frente del choque es siempre subsónica.

1.2.1. La Heliosfera

Es la región ocupada por el viento solar y está limitada por la *heliopausa*, que es la frontera que divide al plasma solar y al plasma interestelar [Boletín Skaylab (4)]. La forma y tamaño de la heliosfera dependen del equilibrio de presiones entre el viento solar y el viento interestelar; aún no se sabe con exactitud cual es la dimensión de ésta, pero probablemente se extienda a 100 UA. En la interacción del viento solar con el medio interestelar también se forma una onda de choque, llamado *choque de terminal*.

1.3. Campo Magnético Terrestre

La Tierra se formó al mismo tiempo que el Sol, es el único planeta del que se conoce la existencia de vida. Algunas de sus características se muestran en la Tabla 1.4. La Tierra vista desde el espacio tiene un aspecto azulado, por tal motivo también se le conoce como el planeta azul. Este color se debe a que la mayor parte de la superficie esta cubierta por agua y es el único planeta en el que el agua se encuentra en estado líquido.

La sismología es la encargada de estudiar el comportamiento interior de la Tierra. De acuerdo a los estudios realizados podemos mencionar las capas internas de nuestro planeta, a partir de la superficie hacia el centro. La Figura 1.13, nos muestra su ubicación.

1. **Corteza:** Es la capa más superficial de la Tierra, está compuesta de basalto en las cuencas oceánicas y de granito en los continentes, su espesor varía: 6 km bajo los océanos y de 30 a 50 km en los continentes.

Distancia a la Luna	384 400 km $\sim 60 R_E$
Radio (R_E)	6370 km en el ecuador
Masa	5.9736×10^{24} kg
Temperatura media superficial	288 K
Periodo de rotación	23 horas 56 minutos 41 segundos
Velocidad de rotación	1600 km/h en el ecuador 1073 km/h a 45° de latitud
Periodo de traslación	365 días, 6 horas, 9 minutos y 9.54 segundos
Velocidad de traslación	106 000 km/h o 29.5 km/s
Gravedad	9.78 m/s^2

Tabla 1.4: Algunas características del planeta Tierra.

2. **Manto:** Consiste de roca sólida donde predomina el silicato; tiene un espesor de 2 900 km. La temperatura en el límite con la corteza varía de 773 K a 1173 K y de 4273 K en el límite con el núcleo.
3. **Núcleo:** Es la capa más interna, tiene un espesor de aproximadamente 3400 km. Está compuesto de hierro y níquel, con otras pequeñas porciones de cobre, oxígeno y azufre; es en esta parte donde se genera el campo magnético terrestre. El núcleo a su vez se divide en dos partes:
 - a) **núcleo interno:** Tiene un radio de 1200 km, se cree que es sólido donde la temperatura varía entre 4273 y 5273 K. Su energía calorífica influye en el manto, principalmente en los movimientos de convección.
 - b) **núcleo externo:** Tiene un espesor de 2200 km y es líquido. El líquido es caliente y buen conductor, donde se generan corrientes convectivas, combinadas con el movimiento rotacional de la Tierra generan corrientes, éstas a su vez dan origen al campo magnético.

De acuerdo a la teoría del dínamo, el núcleo exterior de la Tierra está rotando lentamente alrededor del núcleo sólido, generando de esta manera corrientes eléctricas que rodean al núcleo, las cuales a su vez dan origen al campo magnético terrestre, del cual una parte sale a la superficie de la Tierra y la otra parte interacciona con el núcleo líquido que está en movimiento, sosteniendo de esta manera la acción del dínamo. Si la Tierra girara más rápido o bien, si tuviera un núcleo más grande, el campo magnético sería más fuerte.

El campo magnético terrestre es generado por varias fuentes, el 98 % se genera en el núcleo interior, el resto se genera por la magnetización de las rocas en la corteza terrestre, otra parte en la ionosfera y la magnetósfera. Dicho campo se comporta como si en el interior de nuestra Tierra existiera una barra magnética, donde el norte magnético se encuentra en el sur geográfico y el sur magnético se localiza en el norte geográfico (ver Figura 1.13). El eje magnético tiene una declinación de 11.5° aproximadamente con respecto al eje geográfico [Goodman, 2005]. La intensidad del campo magnético terrestre en el ecuador es de 30 000 nT (0.3 G) y de 60 000 nT (0.6 G) en los polos, esto se debe a que la fuerza magnética es mayor cerca de los polos y es más débil a distancias más alejadas. El análisis matemático se describe en el Apéndice.

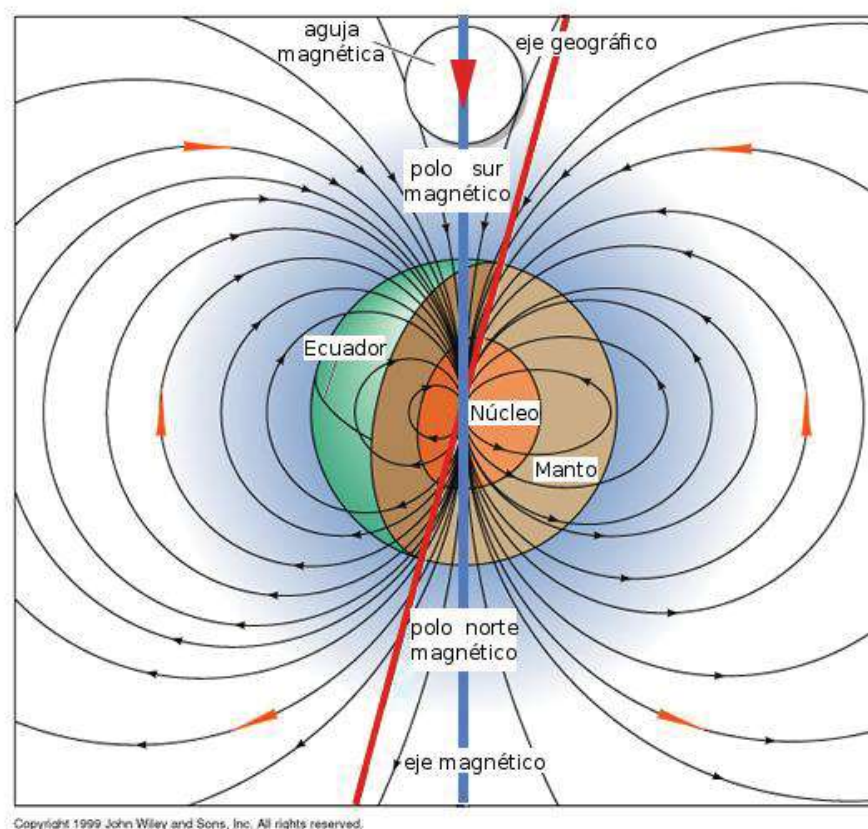


Figura 1.13: Campo magnético terrestre: se muestra la ubicación de los polos magnéticos. El eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de aproximadamente 11° con el eje magnético. Además podemos apreciar las capas internas de la Tierra [Tomada de NTD Resource Center].

La ubicación de los polos magnéticos varía cada año, actualmente el polo norte se sitúa en el extremo del continente Antártico, mientras que el polo sur está situado al noroeste en Canadá.

La intensidad del campo magnético o su fuerza en cualquier superficie de la Tierra se acostumbra especificarla por medio de las componentes rectangulares X, Y, Z de la intensidad del campo magnético total B. La relación entre ellas se muestran en la Figura 1.14. X es la componente horizontal en la dirección del norte geográfico, Y es la componente horizontal en la dirección del este geográfico, Z es la componente vertical (positiva hacia abajo y negativa hacia arriba). Otra forma de especificar la intensidad del campo magnético es por medio de los elementos magnéticos: H es la magnitud del campo proyectado en el plano horizontal (de la componente horizontal), considerada como positiva cualquiera que sea su dirección y a la cual llamamos *intensidad horizontal*; D es el ángulo entre el norte geográfico y el vector del campo magnético en el plano horizontal; D es llamada *declinación magnética*, es positiva del norte geográfico hacia el este; I es ángulo formado por el vector del campo magnético total con el plano horizontal, positiva cuando la dirección de la intensidad se inclina hacia abajo y se denomina *inclinación magnética*. B, H y Z se miden en Gauss o Teslas; mientras que D e I se miden en grados.

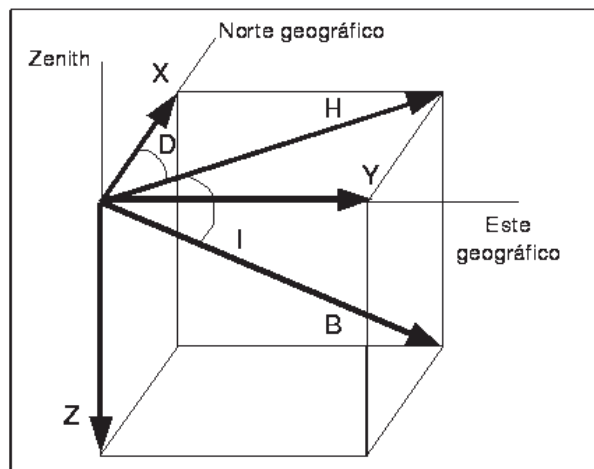


Figura 1.14: Intensidad del campo magnético B , sus coordenadas rectangulares X , Y , Z y los elementos magnéticos H , D e I .

1.3.1. Magnetósfera

Las líneas de campo magnético terrestre forman una envoltura alrededor de nuestro planeta la cual nos separa del plasma del medio interplanetario, además funciona como un escudo protector contra las partículas cargadas eléctricamente provenientes del Sol, dicho escudo se le denomina *magnetósfera*. Estas líneas de campo magnético son deformadas y arrastradas por el flujo del viento solar hacia el lado opuesto del Sol dándole la forma de cometa; en el lado diurno de la Tierra se extiende a una distancia de $10 R_E$ de nosotros y durante eventos de gran incremento en la presión del viento solar (por ejemplo cuando la velocidad del viento solar o una EMC es mayor a 500 km/seg) la distancia puede llegar a valores menores de $7 R_E$. Debido a que el Sol se encuentra en la fase ascendente del ciclo solar número 24, podemos conjeturar que tenemos una gran magnetósfera.

La magnetósfera logra que el viento solar no arrastre consigo al aire de la atmósfera, desnudando al planeta tal como se supone que sucedió con el planeta Marte y la Luna. El movimiento del plasma y los procesos físicos que ocurren dentro de la magnetósfera están dominados por el campo geomagnético.

La magnetósfera terrestre fue descubierta en 1958 por el satélite estadounidense Explorer I.

Las principales regiones de la magnetósfera se describen a continuación y en la Figura 1.15 se muestra la ubicación de algunas de ellas:

1. **Choque de proa:** Esta región también se le conoce como ante-choque terrestre y la compresión en ella es muy intensa. Este ante-choque es una discontinuidad que frena, calienta y desvía el flujo del viento solar, impidiendo que impacte directamente a la Tierra. Cuando el viento solar ha pasado este frente también pierde algunas de sus propiedades, por ejemplo: se desacelera y parte de su energía se convierte en calor. Si se monta un marco de referencia en el viento solar, para éste, la Tierra se propaga a una velocidad entre 400 y 700 km/s, por lo cual se genera una onda de choque al frente de la magnetósfera terrestre. Aproximadamente a los $2 R_E$ por delante de la magnetopausa y a $14 R_E$ de nosotros se encuentra el ante-choque.

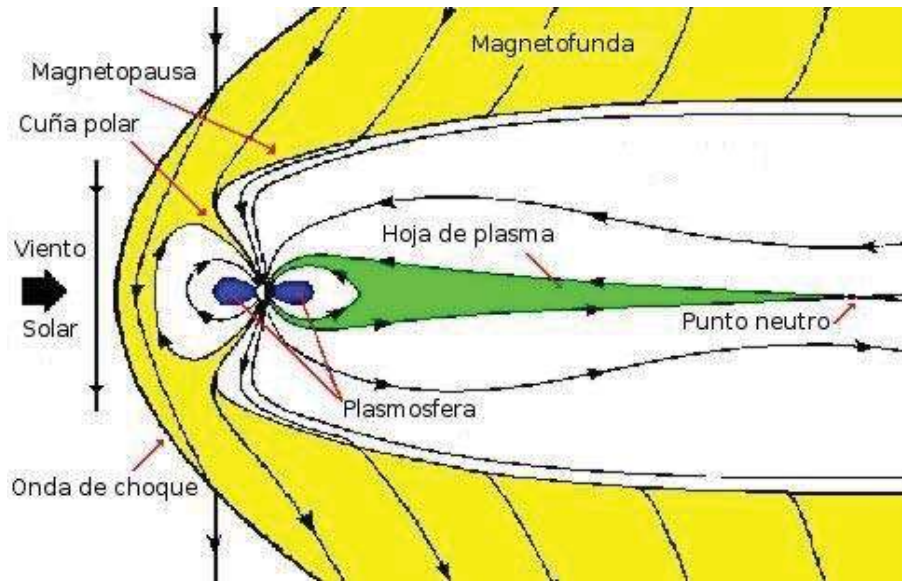


Figura 1.15: Principales regiones de la magnetósfera terrestre [Tomada de Cosmicopia, NASA].

2. **Magnetopausa:** Es la frontera magnética entre el campo magnético terrestre y el viento solar. Este límite se forma donde la presión dinámica del viento solar se equilibra con la presión interna del campo magnético terrestre. Separa la magnetofunda y la magnetósfera.
La magnetósfera se expande o se comprime dependiendo de las condiciones del viento solar y del equilibrio de presiones, por lo que la localización de la magnetopausa es variable. Para una presión típica del viento solar de 1.7 nPa , la magnetopausa se encuentra a unos $10 R_E$ hacia el lado diurno y se extiende a unos $100 R_E$ hacia el lado nocturno.
3. **Magnetofunda:** Al pasar el viento solar la onda de choque, se forma una capa turbulenta de plasma entre el choque de proa y la magnetopausa, esta capa es conocida como magnetofunda, aunque no es parte de la magnetósfera.
El plasma solar que fluye antes de alcanzar el choque de proa, no está perturbado, pero el flujo de plasma posterior a esta onda ya es muy diferente; se vuelve turbulento y más desorganizado (es más caliente) y el campo magnético que ha transportado desde el Sol se vuelve muy irregular.
4. **Cuña polar:** Son dos zonas con forma de embudo las cuales marcan la separación entre las líneas que van hacia el lado día y las que van hacia la cola de la magnetósfera. Cuando las partículas provenientes del viento solar entran por una de estas zonas, éstas siguen a las líneas de campo magnético en dirección a la Tierra, las cuales bombardean la parte más alta de nuestra atmósfera. Algunos satélites como HEOS 1, HEOS 2 y Hawkeye, observaron en esta región un campo magnético desordenado y débil.
5. **Magnetocola:** Es la extensión de la magnetósfera hacia el lado opuesto al Sol (el lado nocturno de la Tierra) y se extiende a una distancia mayor a $100 R_E$. Esto se debe a que el viento solar alarga las líneas de campo magnético. Esta parte de la magnetósfera es

muy dinámica, en ella ocurren grandes cambios y a menudo los iones y electrones están energizados. Aquí es donde se originan las auroras.

6. **Hoja de plasma:** Zona de plasma caliente, de espesor y densidad variable donde penetran las partículas cargadas, quizá por alguna interacción de los campos magnéticos terrestres e interplanetarios. Está centrada en la cola magnetosférica, presentando un grosor de 3 a 7 R_E , una densidad de 0.3 a 0.5 iones/cm³, una energía de iones de 2 a 5 keV, una temperatura de 5 keV, una velocidad térmica de iones de 600 km/s y un campo magnético de 2 nT, aproximadamente. En esta región el campo magnético es muy débil, pero si hay perturbaciones en ella produce una mayor actividad auroral ya que aquí es donde se originan las partículas, las cuales son empujadas hacia la Tierra y se crean las brillantes auroras; esto significa que en esta zona el plasma está menos controlado que cerca de la Tierra.
7. **Hoja neutra:** Es una región magnéticamente neutra debido a que las líneas de campo que fluyen en dirección antisolar cambian de sentido para fluir en dirección solar, por lo que se cancelan entre ellas. Esto sucede en la cola magnetosférica a unos 16 R_E , aproximadamente.
8. **Lóbulos de la cola:** Son dos regiones que se encuentran al norte y al sur de la hoja de plasma. Las líneas de campo de esta región son lisas y mantienen casi la misma dirección hasta que convergen en los polos. Apuntan hacia la Tierra en el norte geográfico y se alejan de ella en el sur geográfico.

Esta región está casi libre de plasma, con una densidad típica de 0.01 iones/cm³, aunque el campo es relativamente fuerte y como rellena un gran volumen, puede almacenar una energía magnética apreciable.

9. **Plasmoide:** Región de flujo cerrado ubicado en la magnetocola.
10. **Plasmopausa:** Es un límite del plasma de la Tierra que consiste de un gas frío.
11. **Ovalo auroral:** Zona circular sobre la región polar donde los electrones procedentes del Sol inciden y alcanzan los gases atmosféricos produciendo el fenómeno luminoso de las auroras: boreal (luces del norte) y austral (luces del sur). Del lado día, esta región es la proyección de la cuña polar y se ubica a 72° en el norte y sur magnético de nuestra atmósfera. Del lado noche, es la proyección del límite de la hoja de plasma. A una latitud magnética de 67° sobre el norte y sur de la atmósfera se ubica esta región.
12. **Ionosfera:** Se encuentra justo encima de nuestra atmósfera, ionizada por la luz solar de alta frecuencia. Es una región de plasma de altura variable. El comportamiento de la ionosfera se ve también alterado por las perturbaciones que se originan en el Sol. La ionosfera no se considera parte de la magnetósfera, pero es importante en nuestro estudio.
13. **Exosfera:** Por encima de la ionosfera donde las partículas ionizadas de la atmósfera interaccionan con mayor intensidad con el campo magnético terrestre se ubica la exosfera que es la parte más amplia y extensa de nuestra magnetósfera, probablemente se extiende hasta la magnetofunda. En esta zona la temperatura varía muy poco con la altura por lo que se considera una isoterma.

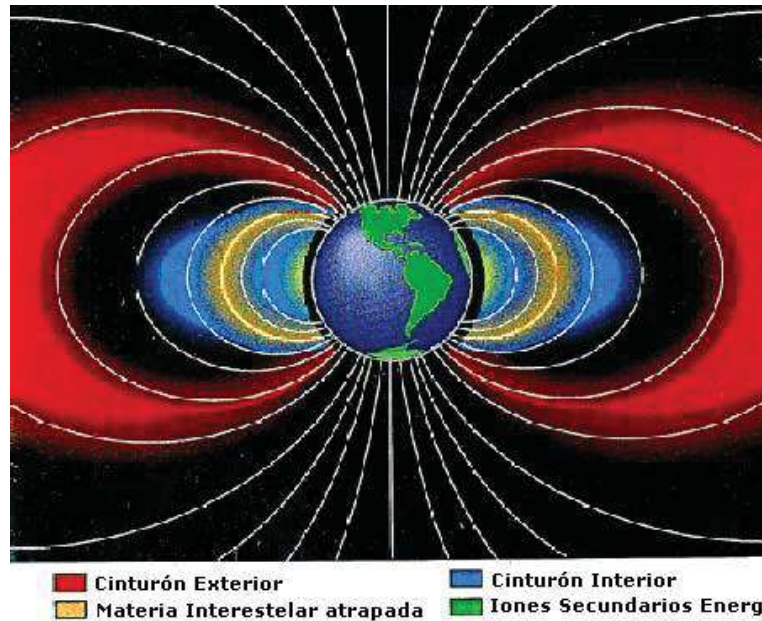


Figura 1.16: La imagen muestra un corte meridional de los cinturones de radiación, observemos que tales regiones no cubren los polos y son más anchas en el ecuador [Tomada de Space and Plasma Physics, UMD].

14. **Plasmosfera:** Zona densa y fría de plasma de baja energía donde las líneas de campo son cerradas. Esta región de plasma rota con la Tierra y se extiende a una distancia entre 3 y 6 R_E de altura, dependiendo del estado de perturbación de la magnetósfera. Algunos de los electrones e iones de la región fría de la ionosfera se evaporan para caer dentro de esta área.

Dentro de la plasmosfera se encuentran dos regiones en forma de dona donde se haya una población densa de partículas (electrones y protones) moviéndose sobre las líneas de campo magnético. Tales zonas se describen a continuación y un corte meridional de ellas se pueden apreciar en la Figura 1.16.

- a) **Cinturón de radiación interior o de Van Allen:** Está poblado principalmente por protones con una energía de 10 a 100 MeV [Education, ISTEP, GSF, NASA](también se hallan electrones con energía que oscila entre los cientos de keV y pequeñas cantidades de otros núcleos como partículas alfa). Algunas partículas se crean *in situ* por el choque de los *rayos cósmicos*⁶ y los neutrones de la atmósfera que se encuentran en los puntos espejo. Otras provienen del viento solar y logran penetrar hasta esta región cuando hay reconexión magnética entre el viento solar y el campo magnético terrestre (de esto hablaremos más adelante). Este cinturón se encuentra a unos 1000 km por encima de la superficie terrestre y se extiende por encima de los 10 000 km. Este pequeño pero muy intenso cinturón fue descubierto en 1958 por James Van Allen.
- b) **Cinturón de radiación exterior:** Esta región está poblada principalmente por elec-

⁶Rayos cósmicos: Partículas atómicas con muy altas energías las cuales provienen del espacio exterior (protones, partículas alfa, por mencionar algunas).

trones de energía que va de 0.1 a 1 MeV (también abundan partículas alfa y iones de oxígeno); es la encargada de transportar la corriente del anillo; se extiende aproximadamente desde los 3 a 10 R_E por encima de la superficie de la Tierra y su mayor intensidad se encuentra entre 4 y 5 R_E . El cinturón de radiación externo es más difuso que el interno y está rodeado por una región de baja intensidad conocida como el *anillo de corriente*.

Anillo de Corriente: Es una corriente transmitida por partículas cargadas que se encuentran en la magnetósfera de un planeta. Visto desde el sur magnético, la corriente circula en sentido de las manecillas del reloj, sobre el plano ecuatorial a una distancia aproximada de entre 3 y 5 R_E . Las partículas que se encuentran en este anillo crean un campo magnético opuesto al campo magnético terrestre. Cuando el número de partículas se incrementa, el campo originado en dicha región se intensifica dando origen a las llamadas *tormentas geomagnéticas* [Sugiuria M., 1991]. Durante los días quietos abundan partículas de H^+ , y durante las tormentas también abundan partículas de O^+ .

A latitudes más bajas este anillo protege a la Tierra de los campos eléctricos de la magnetósfera, por lo que tiene un gran efecto sobre la electrodinámica de las tormentas geomagnéticas. La energía de las partículas en el anillo oscila entre 0.05 MeV y 1 MeV.

Los cinturones de Van Allen se refieren específicamente a los cinturones de radiación alrededor de la Tierra y son el resultado de varios procesos. La energía de las partículas que se encuentran en los cinturones es mucho mayor que la energía de las partículas del anillo de corriente. Algunas naves y satélites mantienen sus sensores apagados al pasar por los cinturones para no ser afectados por la intensa radiación que se genera en esta zona.

15. **Geocorona:** Es una nube de hidrógeno neutro que rodea a la Tierra.

Como la fuerza magnética es más débil donde las líneas están más distantes de la Tierra, algunas partículas de la magnetósfera, como los iones y electrones, son atrapadas en este débil campo magnético donde el movimiento de las partículas es una mezcla de tres movimientos simultáneos [Education, ISTP, GSFC, NASA]:

1. **Rotación:** Las partículas se mueven alrededor de las líneas de campo magnético (el movimiento circular de una partícula se describe en el tema de plasmas). Los iones positivos giran en sentido contrario a las manecillas del reloj y los iones negativos a favor (esto respecto a la regla de la mano derecha).
2. **Balanceo:** Las partículas se desplazan a lo largo de las líneas de campo creando una forma de espiral. Debido a que la fuerza magnética es mayor en los polos, la partícula conforme se va acercando es repelida, esto causa una desaceleración en su movimiento, su velocidad cae a cero y se invierte su dirección de desplazamiento. Esta inversión se conoce como reflexión y se da en los polos magnéticos; también conocidos como *puntos espejo*.
3. **Deriva:** Dado que los iones positivos giran a la izquierda y los iones negativos a la derecha, éstos experimentan una lenta deriva por lo que saltan de una línea a otra; así que tales partículas también giran alrededor de la Tierra.

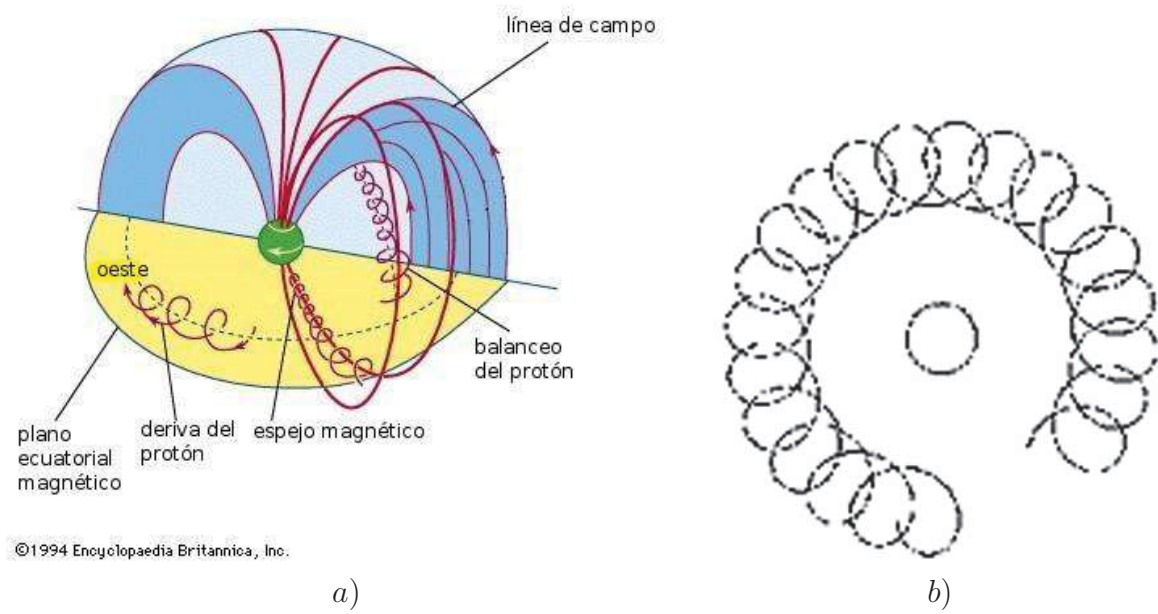


Figura 1.17: *a)* Movimientos de las partículas alrededor de las líneas de campo magnético: rotación, balanceo y deriva [Tomada de Encyclopedia Britannica]. *(b)* Movimiento de deriva de una partícula, al rededor de la Tierra, vista desde uno de los polos [Tomada de Education, ISTP, GSFC, NASA].

<i>Tipo de movimiento</i>	<i>Tiempo</i>
Girar en una línea de campo	millonésima de segundo
Ir y venir entre dos puntos espejo	un segundo
Dar vuelta a la Tierra	algunas decenas de minutos

Tabla 1.5: Tiempo que les lleva a las partículas realizar un movimiento.

En la Figura 1.17 (a) apreciamos los movimientos de dichas partículas; en la Figura 1.17 (b), podemos ver el movimiento de deriva de estas partículas; y en la Tabla 1.5 se muestran los tiempos que les lleva en realizar tales movimientos.

La combinación de los tres movimientos de las partículas permite que se genere una corriente eléctrica que va en dirección al oeste llamada *corriente anular*, la cual persiste mientras esten atrapadas las partículas en el campo magnético. Aunque dentro de la magnetósfera se generan varias corrientes éstas no alcanzan el suelo pues a alturas bajas el aire es un buen aislante eléctrico.

Cabe resaltar que, debido a los procesos que ocurren en cada una de las zonas mencionadas, su forma y estructura no están fijas, por lo que las dimensiones varían.

1.4. Influencia de la Actividad Solar en el Entorno Geomagnético

Como lo hemos mencionado anteriormente, debido a la actividad que tiene el Sol, puede afectar el espacio interplanetario, así como nuestra magnetósfera y desde luego la Tierra. En el espacio interplanetario, cuando el viento solar se encuentra con algún obstáculo causa una onda de choque. Si choca con los planetas, además de generar una onda de choque, puede desnudarlos de su campo magnético. Los satélites que se encuentran fuera de la Tierra, al ser alcanzados por una nube de plasma, pueden salirse de su órbita.

Cuando el viento solar o una EMC interacciona con nuestra magnetósfera también causa ciertos efectos, los cuales varían de acuerdo a la intensidad del choque. Si el choque es leve, sólo comprime la magnetósfera (esto sucede la mayor parte del tiempo), si el choque es muy intenso, además de comprimirla a una área mas pequeña, se genera un aumento en la densidad de partículas dentro de la magnetósfera y después de varios procesos dan lugar a fenómenos que se detectan en la superficie de la Tierra; algunos de ellos son las auroras, las perturbaciones ionosféricas o bien, las **Tormentas Geomagnéticas**, que son nuestro tema principal.

1.4.1. Tormentas Geomagnéticas

Cuando el viento solar fluye frente a la magnetósfera y sus líneas de campo tienen una dirección antiparalela a ésta y si ambos campos se dirigen hacia un mismo punto, entonces al encontrarse en un **punto neutro** (lugar donde la fuerza magnética es cero), esto permite una reconexión de líneas de campo de fuentes diferentes [Education, ISTP, GSFC, NASA]. Posteriormente, las nuevas líneas se dividen en dos grupos, uno fluye hacia el sur magnético y el otro fluye hacia el norte magnético. Después de la fusión, las nuevas líneas de campo son arrastradas hacia el lado nocturno de la Tierra, reconectándose nuevamente en la cola magnética y arrastradas de regreso al lado día, creando un flujo en la corriente de plasma central.

El proceso de reconexión permite la entrada de partículas provenientes del viento solar hacia el interior de la magnetósfera, además que transfiere energía a las partículas circundantes a un punto neutro (el campo eléctrico cerca de un punto neutro puede acelerar partículas y conducir corrientes). Algunas partículas logran entrar a través de las regiones de la cuña polar.

Un factor importante en la generación de tormentas geomagnéticas es la dirección del campo magnético interplanetario (MI) a lo largo del eje dipolar de la Tierra. Cuando el campo MI está dirigido hacia el norte magnético, la corriente de plasma es alterada conduciendo ionización hacia las regiones polares.

La energía magnética entrante en la reconexión es convertida en energía cinética y la otra mitad en energía térmica (calor). Es decir, el efecto importante de la reconexión es crear un rápido torrente de plasma caliente.

Cuando el índice del lado noche excede al índice del lado día, la energía magnética es almacenada en la cola y se hace más estrecha durante la fase de crecimiento. El tamaño de la hoja de corriente también disminuye. Durante la fase de expansión, la energía almacenada se libera y produce varios efectos en la magnetósfera y en la ionosfera: aumenta el flujo de corriente en la magnetósfera, hay una precipitación auroral intensa y flujo de las auroras hacia el ecuador.

Existen dos regiones importantes a considerar durante la fase de expansión: Una es la región interna de la cola donde el campo alineado forma pares de corrientes, iniciando la desintegración

auroral de la ionosfera. La otra región es la mitad de la cola donde toma lugar la reconexión, creando una circulación de plasma dirigida hacia la Tierra y hacia la cola.

Se generan varios procesos importantes cuando hay reconexión magnética [Sosa, 2007]:

1. Cambios en la topología global y conectividad de las líneas de campo.
2. Conversión de la energía del campo magnético a energía térmica (calor), energía cinética y energía de partículas rápidas.
3. Creación de corrientes eléctricas grandes, campos eléctricos grandes y ondas de choque, las cuales pueden ayudar a cancelar partículas rápidas.

La reconexión magnética ocurre en cualquier parte del espacio que se encuentre impregnada de campos magnéticos. En el Sol, una reconexión produce fulguraciones solares y en la magnetósfera alimenta a las tormentas y a las auroras.

Una **Tormenta Geomagnética** (TG) se refiere a la perturbación temporal del campo magnético terrestre, generada por los cambios en el anillo de corriente.

Una tormenta consta de tres fases [Gonzalez, 1994] que a continuación se describen (para una mejor comprensión de ellas ver Figura 1.18):

1. **Fase inicial positiva:** Asociada con el incremento en la componente horizontal del campo magnético (se debe a la inyección de iones al anillo de corriente) que es seguida brevemente por el despliegue auroral debido a el aumento en la concentración de electrones en la alta ionosfera.
2. **Fase principal negativa:** Es la disminución de la intensidad de la componente horizontal que puede durar varias horas, asociada con la disminución a gran escala en la concentración de electrones. Ésta fase se caracteriza por la disminución repentina en el índice Dst.
3. **Fase de recuperación:** La pérdida de iones en el anillo permite la recuperación, la cual puede durar días o hasta meses. Ésta pérdida de partículas se debe al cambio de carga con los átomos neutros de hidrógeno de la geocorona, la colisión de Coulomb con el plasma térmico de la magnetósfera y la interacción onda-partícula.

1.4.2. Índice Dst

La actividad del anillo de corriente está indicada por los cambios en el *índice Dst* [Sugiura M., 1991].

El índice Dst (*Disturbance storm time*) es usado para evaluar la severidad de una tormenta, basado en el valor promedio de la componente horizontal del campo magnético de la Tierra. La fuerza del campo magnético (la componente horizontal) a latitudes bajas es inversamente proporcional al contenido de energía en el anillo de corriente, el cual se incrementa durante una TG, por lo que este índice mide la corriente del anillo en la magnetósfera (es decir la región sobre el ecuador magnético $\sim 5.6 R_E$). Cuatro observatorios geomagnéticos a latitudes medias (cerca del ecuador) colaboran en la construcción del *índice Dst*.

El valor cero del índice Dst se calcula con el promedio de los días quietos; por lo que este índice toma valores tanto positivos como negativos. Cuando la magnetósfera se comprime hay un

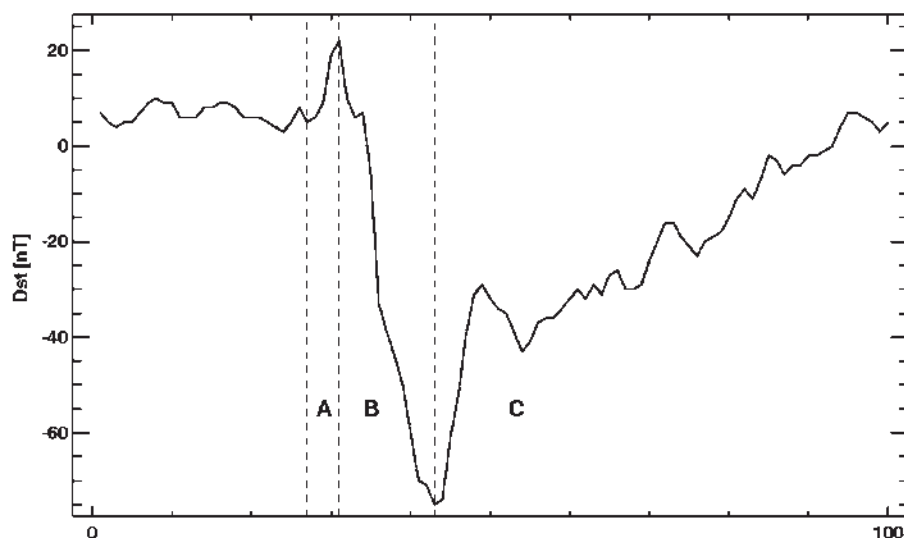


Figura 1.18: Fases de una TG: A es la fase inicial, B la fase principal y C la fase de recuperación.

<i>Nivel de actividad geomagnética</i>	<i>Valor del índice Dst [nT]</i>
Quieto	$-30 < Dst$
Débil	$-50 < Dst \leq -30$
Moderado	$-100 < Dst \leq -50$
Intenso	$-200 < Dst \leq -100$
Super tormenta	$Dst \leq -200$

Tabla 1.6: Clasificación de las tormentas geomagnéticas de acuerdo a su nivel de actividad.

mayor número de líneas de campo magnético así que el Dst toma valores positivos, en otro caso, si la densidad del anillo de corriente aumenta el valor del Dst será negativo. Las tormentas son más intensas mientras menor sea el valor del índice Dst. El nivel de actividad magnética se puede clasificar, de acuerdo al valor alcanzado, en quieto, débil, moderado, intenso o super. Los rangos se muestran en la Tabla 1.6.

Una característica visible de una TG es la expansión del óvalo auroral hacia el ecuador. Como resultado de la actividad auroral hay una disminución de electrones a altas latitudes.

1.4.3. Auroras

Son producidas por los electrones que transportan la corriente del anillo. Cuando se mueven en dirección a la Tierra ganan velocidad del voltaje conductor, después alcanzan la atmósfera, chocan con las partículas que en ella abundan y se destruyen en átomos de oxígeno o nitrógeno, causando la emisión de luz. En la Figura 1.19 podemos apreciar una aurora.



Figura 1.19: Aurora boreal en Alaska (4-01-2001).

Las auroras son visibles a partir de los 80° de latitud y, conforme se intensifica la tormenta, se extienden hacia el ecuador. Estos eventos son una señal visible de los cambios que están ocurriendo en la atmósfera, pero a la vez son responsables de grandes pérdidas en los sistemas tecnológicos.

1.5. Clima Espacial

El clima espacial describe las condiciones en el espacio que afectan la Tierra y sus sistemas tecnológicos. Nuestro clima espacial es consecuencia del comportamiento del Sol, de la naturaleza del campo magnético y la atmósfera terrestre y de el lugar que ocupamos en el sistema solar.

La radiación electromagnética no interacciona con el campo geomagnético pero los rayos X de las fulguraciones pueden introducir fotoionización de especies atmosféricas, esto permite la absorción de las ondas de radio en la ionosfera baja del lado día de la Tierra.

Las partículas provenientes del espacio producen numerosos efectos que pueden ser peligrosos para la tecnología moderna. Hace más de un siglo, algunas perturbaciones solares dañaron los sistemas telegráficos. Durante la segunda Guerra Mundial hubo perturbaciones en las señales a través de radares debido a las emisiones de ondas de radio provenientes del Sol (los radares utilizan la ionosfera como reflector de sus señales). Otros sistemas de comunicación que utilizan la ionosfera como reflector de sus señales a través de ondas de radio también son alterados, entre ellos: los de las naves espaciales, los sistemas militares, barcos, aviones y GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

Las corrientes inducidas en la Tierra y en la ionosfera durante una TG, afecta los sistemas tecnológicos como transformadores y oleoductos. Cuando se daña un transformador de los sistemas de distribución de corriente eléctrica, se afecta el suministro de agua, los aparatos eléctricos, el servicio de teléfono, el suministro de combustible, etc.

Los circuitos electrónicos en los satélites son muy sensibles a las partículas energéticas, por

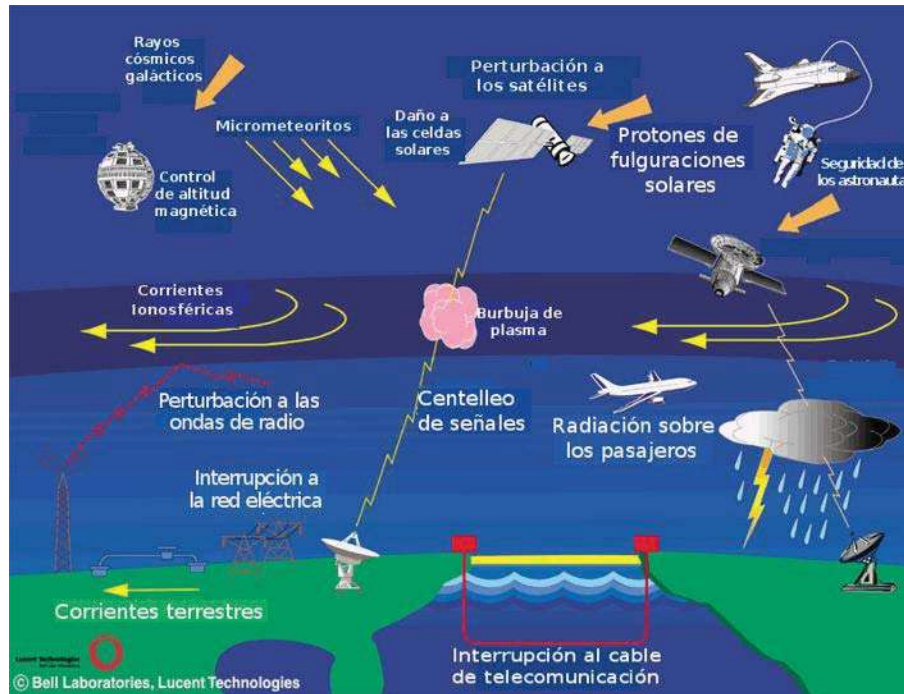


Figura 1.20: Efectos del clima espacial en nuestra tecnología [Tomada de HINODE, NASA].

lo que grandes cantidades de éstas son perjudiciales a tales circuitos. Durante una tormenta geomagnética, la alta atmósfera se calienta y se expande; el aire caliente tiende a subir, aumentando la densidad de la región donde se encuentran los satélites, esto genera un incremento en la fricción, una disminución en la velocidad de los satélites y un ligero cambio en su órbita. En la Figura 1.20 se muestra un esquema de la relación entre el clima espacial y nuestros sistemas tecnológicos que son afectados.

La perturbación del campo magnético, además de perjudicar a los sistemas tecnológicos ya mencionados, daña a nuestra naturaleza, por ejemplo, algunos animales utilizan el campo magnético para orientarse.

No todo es de lamentarse, durante una tormenta existen fenómenos naturales hermosos que son visibles durante una tormenta llamados auroras, de las que ya hemos hablado anteriormente.

1.6. Motivación del Estudio

Debido a que las tormentas geomagnéticas afectan a los sistemas tecnológicos y en ocasiones a nuestra naturaleza, resulta importante estudiar el comportamiento de los eventos más intensos que se han registrado. Esto con la finalidad de conocer sus características, las causas que hacen que sean más intensas, sus tiempos característicos de evolución y las propiedades de los fenómenos solares que las precedieron.

Sería ideal poder predecir cuando va a ocurrir un evento de este tipo y estar preparados para las consecuencias, e incluso evitar algunas de ellas; aunque esto todavía está muy lejos de nuestra realidad, cada vez estamos más cerca.

En este trabajo de tesis se estudian las tormentas con índice $Dst \leq -200$ nT debido a que son las más intensas y han causado los daños más severos, claro que no podemos menospreciar las que oscilan entre 0 y -200 nT, pues gracias a ellas se pueden apreciar las coreografías de las luces danzarinas, mejor conocidas como auroras.

Capítulo 2

Tormentas Geomagnéticas Intensas

2.1. Introducción

En el Capítulo 1 hemos visto que, en ocasiones, cuando ocurre una fulguración minutos después se genera una EMC que, de acuerdo a la ubicación de su origen, alcanza la magnetósfera terrestre en cuestión de días, dependiendo de su velocidad. Cuando las EMCs se alejan del campo de visión de los coronógrafos LASCO¹ se les llama EMCs interplanetarias (EMCIs). Después de la interacción de la EMCI y la magnetósfera, habrá una reconexión de campos si las condiciones son óptimas para que esto suceda y posteriormente una TG. La categoría de la tormenta podrá ser: quieta, débil, moderada, intensa o super, dependiendo del grado de intensidad que alcance en el índice Dst.

Este capítulo se centra principalmente en analizar las características (intensidad, fecha y periodo del ciclo en el que ocurrió) de las TGs con índice $Dst \leq -200$ nT y de los eventos solares que las precedieron (fulguraciones, EMCs y EMCIs); así como también estudiamos el comportamiento de las tormentas a distintas latitudes magnéticas. Además de ello se eligieron tres tormentas para las cuales se muestran las propiedades del campo magnético y plasma, minutos antes de que interaccione con la magnetósfera (esto se muestra en la sección 2.2). El análisis estadístico de los diferentes eventos se describe en la sección 2.3.

Desde años atrás, se han reportado tormentas que causaron severos daños, desgraciadamente, los datos de todas ellas no están a nuestro alcance, pero la información disponible nos es de mucha utilidad para los fines de nuestra investigación.

La información referente a las TGs se obtuvo del observatorio *World Data Center (WDC) for Geomagnetism, Universidad de Kyoto, Japon* (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), los datos de las EMCs se adquirieron de el observatorio *NOAA's² National Geophysical Data Center (NGDC)*, (<http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>). Para las fulguraciones nos apoyamos de la información que se ofrece en la página de *CDAW Data Center Solar Physics Laboratory (Code 671) Heliophysics Science Division NASA / Goddard Space Flight Center Greenbelt Maryland USA*, (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>) y los datos de las EMCIs se obtuvieron del catálogo *Near-*

¹LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph): coronógrafo espectrométrico y de ángulo grande a bordo de SOHO (Observatorio Solar y Heliosférico). LASCO tiene tres telescopios C1, C2 y C3, sin embargo C1 esta desactivado desde junio de 1998

²NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): Agencia dedicada a la exploración de la atmósfera espacial y terrestre.

Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties (Solar Phys (2010) 264: 189-237, DOI 10.1007/s11207-010-9568-6). Los datos de los diferentes índices se adquirieron de: *Service International des Indices Geomagnetiques (SIIG)*, (<http://isgi.cetp.ipsl.fr/lesdonne.htm>) y del observatorio *Sodankylä Geophysical Observatory*, (<http://www.sgo.fi/index.php>). Las gráficas de las Figuras 2.1, 2.2, 2.3 se elaboraron con los datos obtenidos de *Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb)*, *NASA's Goddard Space Flight Center (GSFC)*, (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>), en particular de la nave WIND. Gracias a todos ellos nuestro estudio se hace más sencillo.

2.2. Selección de Datos

Inspeccionando los datos que ofrece el WDC se encuentra que constantemente hay tormentas pero no todas llegan al valor requerido en esta investigación. En la Tabla 2.1 se muestran algunos datos de las tormentas con $Dst \leq -200$ nT. La clasificación se hace con respecto al índice Dst ya que es el promedio de variación sobre todas las longitudes. Los datos comienzan a partir del año 1957 debido a que la información de este índice está disponible a partir del 1 de enero de 1957.

La información que ofrece la Tabla 2.1 es la hora y fecha en que se alcanza el mínimo Dst, donde: *dd-mm-yyyy* indica día, mes y año; TU es el tiempo universal, el número indica si el mínimo se alcanzó en la primera hora del día (00-01), en la segunda hora (01-02), ..., o en la hora 24 (23-24). El valor del Dst se expresa en nanoteslas (nT); se menciona el número del ciclo solar al que corresponde el evento y la fase del ciclo en que ocurrió: *mi-a* indica que sucedió durante la primera mitad de la fase ascendente, *ma-a* si se registró la tormenta en el transcurso de la segunda mitad de la fase ascendente, *ma* si sucedió durante el máximo, *ma-d* si ocurrió durante la primera mitad de la fase descendente del ciclo y *mi-d* si el evento aconteció durante la segunda mitad de la fase descendente (poco antes de llegar al mínimo).

Observemos que a partir del año 1957, 73 eventos son los que se clasifican en super tormentas, de esta cantidad se ha elegido un subconjunto de 18 (que corresponden al ciclo solar número 23) de los cuales se examinaron los fenómenos solares asociadas a éstas, como son las fulguraciones, EMCs y EMCIs; además analizamos el valor de la tormenta en otros índices (para más información sobre los índices ver el Apéndice). Los datos que valoramos en los eventos solares son: la hora y fecha en que ocurrió el evento, importancia y localización en el Sol donde se observó la fulguración. Para las EMCs consideramos la velocidad, ancho angular, ángulo de posición en el disco del Sol y aceleración. En las EMCIs se investigó cual fue su velocidad al paso por nuestra magnetósfera. Toda esta información la encontramos en la Tabla 2.2.

El motivo de elegir este subconjunto de TGs es que los catálogos que ofrecen información de las EMCs están disponibles a partir de enero de 1996 y para el resto no tenemos datos.

Nuestra Tabla 2.2 consta de 32 columnas, la columna 1 indica el número de evento, el resto se divide en 4 partes:

1. Las columnas 2-7 son algunas características de las EMCs; las columnas 2 y 3 indican la fecha y hora de la primera aparición en el campo de visión de LASCO, donde *dd-mm-yyyy* indica día, mes y año; *hhmm* es la hora con minutos, en la columna 4 escribimos APC que es el ángulo de posición central en el disco del Sol indicado en grados. El APC se mide en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir del punto norte. La columna 5 indica el ancho (identificado con la letra W) de la eyección, que también se mide en grados. Si el

No.	Fecha	Hora	Dst	Ciclo	Fase	No.	Fecha	Hora	Dst	Ciclo	Fase
Evento	dd-mm-yyyy	[TU]	[nT]			Evento	dd-mm-yyyy	[TU]	[nT]		
01	21-01-1957	23	-250	19	ma	38	14-07-1982	02	-325	21	ma-d
02	02-03-1957	08	-255	19	ma	39	06-09-1982	12	-289	21	ma-d
03	30-06-1957	24	-218	19	ma	40	22-09-1982	08	-210	21	ma-d
04	05-09-1957	04	-324	19	ma	41	10-01-1983	10	-213	21	ma-d
05	13-09-1957	11	-427	19	ma	42	09-02-1986	09	-307	21	mi-d
06	23-09-1957	08	-303	19	ma	43	14-03-1989	02	-589	22	ma
07	29-09-1957	23	-246	19	ma	44	19-09-1989	05	-255	22	ma
08	11-02-1958	12	-426	19	ma	45	20-10-1989	16	-202	22	ma
09	08-07-1958	23	-330	19	ma	46	21-10-1989	17	-268	22	ma
10	04-09-1958	23	-302	19	ma	47	17-11-1989	23	-266	22	ma
11	27-03-1959	08	-234	19	ma-d	48	10-04-1990	19	-281	22	ma
12	15-07-1959	20	-429	19	ma-d	49	25-03-1991	01	-298	22	ma
13	01-04-1960	19	-327	19	mi-d	50	05-06-1991	20	-223	22	ma
14	30-04-1960	19	-325	19	mi-d	51	29-10-1991	08	-254	22	ma
15	05-09-1960	10	-220	19	mi-d	52	09-11-1991	02	-354	22	ma
16	07-10-1960	01	-287	19	mi-d	53	09-02-1992	09	-201	22	ma-d
17	13-11-1960	10	-339	19	mi-d	54	10-05-1992	15	-288	22	ma-d
18	16-11-1960	04	-207	19	mi-d	55	17-04-1994	08	-201	22	mi-d
19	28-10-1961	19	-272	19	mi-d	56	04-05-1998	06	-205	23	mi-a
20	23-09-1963	02	-236	19	mi-d	57	25-09-1998	10	-207	23	mi-a
21	26-05-1967	05	-387	20	mi-a	58	22-10-1999	07	-237	23	mi-a
22	31-10-1968	19	-224	20	ma-a	59	07-04-2000	01	-288	23	ma-a
23	01-11-1968	23	-216	20	ma-a	60	16-07-2000	01	-301	23	ma-a
24	24-03-1969	02	-228	20	ma	61	12-08-2000	10	-235	23	ma-a
25	08-03-1970	23	-284	20	ma	62	17-09-2000	24	-201	23	ma-a
26	01-04-1973	23	-211	20	mi-d	63	31-03-2001	09	-387	23	ma-a
27	06-07-1974	17	-204	20	mi-d	64	11-04-2001	24	-271	23	ma-a
28	26-03-1976	09	-226	21	mi-a	65	06-11-2001	07	-292	23	ma-a
29	01-04-1976	09	-218	21	mi-a	66	24-11-2001	17	-221	23	ma-a
30	28-08-1978	10	-226	21	mi-a	67	30-10-2003	01	-353	23	ma
31	29-09-1978	11	-224	21	mi-a	68	30-10-2003	23	-383	23	ma
32	04-04-1979	04	-202	21	ma-a	69	20-11-2003	21	-422	23	ma
33	19-12-1980	19	-240	21	ma	70	08-11-2004	07	-373	23	ma-d
34	05-03-1981	18	-215	21	ma	71	10-11-2004	10	-289	23	ma-d
35	13-04-1981	07	-311	21	ma	72	15-05-2005	09	-263	23	ma-d
36	25-07-1981	21	-226	21	ma	73	24-08-2005	12	-216	23	ma-d
37	02-03-1982	06	-211	21	ma-d						

Tabla 2.1: Lista de las 73 tormentas geomagnéticas más intensas de los años 1957 a 2010. Las abreviaciones de la fase solar son: ma (máximo), mi (mínimo), a (ascendente), d (descendente).

ancho es de 360° se indica como Halo en APC. En la columna 6 se da la velocidad lineal obtenida por el ajuste de una línea recta (también se le conoce como ajuste polinómico lineal o de primer orden) en la medición altura-tiempo (la velocidad lineal sirve como velocidad media en el campo de visión de LASCO). En la columna 7 encontramos la aceleración que puede ser positiva, negativa o cercana a cero dependiendo como se mueva en el campo de visión de LASCO. Se requieren un mínimo de tres mediciones altura-tiempo para estimar la aceleración; la precisión aumenta si hay más medidas, aceleraciones con sólo 3 medidas son poco fiables y se indican con un asterisco (*).

2. Las columnas 8-12 son las características de las fulguraciones: las columnas 8 y 9 son la fecha y hora de máximo brillo, dd-mm indica día y mes en que ocurrió el evento, el año ya no se escribe pues el mismo que en la columna 2, hhmm para mencionar la hora con minutos en que se observa el evento; en la columna 10 se registra el lugar de localización en el Sol, N o S para la latitud norte o sur; E o W (este u oeste) para la distancia al meridiano central (en el Sol E y W están invertidos con respecto a nosotros) si es que se conoce la ubicación. Además de la ubicación, se dan los datos de la importancia óptica basada en el área de la fulguración que puede ser S, 1, 2, 3 o 4 (4 indica que es muy importante y S para mencionar que es una área menor a 1 o subfulguración); el brillo óptico se indica con la letra F= débil, N= normal o B= brillante. En algunos casos no se muestra el brillo e importancia óptica pero se indica el instrumento con el que se observó (SXI, Solar X-ray Imager). La columna 11 muestra la importancia de la fulguración: la clase en rayos X puede ser C, M, X (intensa, muy intensa, extremadamente intensa) y el valor de la intensidad también en rayos X, es un número entre 1.0 y 9.9 (hay casos en los que se puede superar este intervalo, como en los eventos 12 y 13), en la columna 12 se registra el número de la región activa en el Sol en la que ocurrió el fenómeno.
3. Las columnas 13-19 son los datos de las EMCIs. En la columna 13 se escribe la fecha en que la EMCI perturba nuestra magnetósfera; dd-mm se refiere al día y mes (el año es el mismo que en la columna 2). La columna 14 muestra la hora en que se registra el comienzo repentino de la tormenta; donde hhmm es la hora con minutos. Si no se reporta un comienzo repentino, se da el tiempo de paso del choque en ACE y se indica el dato con A; si no hay datos en ACE o no reportó un choque, se anota el tiempo de choque que registra WIND indicado por W (información sobre ACE y WIND ver el Apéndice). Las columnas 15 y 16 dan la fecha y hora en que se observa el inicio de la EMCI; las columnas 17 y 18 son la fecha y hora de finalización de la EMCI, dd-mm y hhmm son como en las columnas 8 y 9. La columna 19 es la velocidad máxima a la que viajaba la EMCI segundos antes del paso por la magnetósfera.
4. Las columnas 20-32 son el máximo o mínimo valor alcanzado por la tormenta de acuerdo a el índice indicado y las unidades en las que se mide dicho índice.

Nota: En ausencia de datos se indica con una raya discontinua. En el índice PC el dato registrado es el que reporta el Observatorio PCN de Thule.

La fecha y la hora no coincide para todos los índices, la diferencia es de minutos o hasta horas (no más de 26), pero para nuestro estudio se consideraron los valores extremos, es decir los valores más altos o los valores más bajos. Esto se debe a que aunque hay un tiempo universal (TU), por la

#	EMC			FULGURACION				EMCI				INDICES DE TG																	
	Fecha dd-mm-yyyy	Hora hhmm	W o	Vel km/s	acel km/s ²	Fecha dd-mm-hhmm	Hora hhmm	Loc	imp W/m ²	#RA	F pert dd-mm-hhmm	hora dd-mm-hhmm	F in dd-mm-hhmm	hora dd-mm-hhmm	F fin dd-mm-hhmm	hora mmhhmm	vel km/s	Dst nT	Kp ap	2nT	2nT	aa	Aaaa*	Am	AE	Q	P		
001	02-05-1998	1406	Halo360	938	-28.8	02-05	1342	S15W15	3B	X 1.1	8210	04-05	0215	04-05	1000	07-05	2300	780-2059-	300	101	120284	106136445	15130239	9.34					
002	23-09-1998	0700	- - -	1020	- - -	23-09	0713	N18E09	3B	M 7.1	8340	24-09	2345	25-09	0600	26-09	1600	770-2078+	236	117	126228	130145332	1533019T	12.42					
003	18-10-1999	0006	206	240	144	3.5*	17-10	2325	- - - -	C 1.2	- - -	21-10	0225	21-10	0800	22-10	0700	550-2378	207	91	931711	106107331	13616989	10.06					
004	04-04-2000	1632	Halo360	1188	12.8	04-04	1541	N16W66	2F	C 9.7	8933	06-04	1639	07-04	0600	08-04	0600	620-2889-	300	74	137363	118171353	9124818	7.30					
005	14-07-2000	1054	Halo360	1674	-96.1*	14-07	1024	N22W07	3B	X 5.7	9077	15-07	1437	15-07	1900	17-07	0800	1040-3019	400	164	192440	207221449	19033309	12.63					
006	09-08-2000	1630	Halo360	702	2.8	09-08	1622	N11W11	SF	C 2.3	9114	11-08	1845	12-08	0500	13-08	2200	670-2358-	179	123	128228	138144278	14531799	10.02					
007	16-09-2000	0518	Halo360	1215	-12.3	16-09	0426	N14W07	2B	M 5.9	9165	17-09	1657	17-09	2100	21-09	0000	840-2018+	236	56	103363	96135400	94199899	13.74					
008	28-03-2001	1250	Halo360	519	4.4	28-03	1240	N18E02	SF	M 4.3	9393	31-03	0052	31-03	0500	31-03	2200	710-3879-	300	192	191284	216216434	26224079	18.62					
009	10-04-2001	0530	Halo360	2411	211.6*	10-04	0526	S23W09	3B	X 2.3	9415	11-04	1343	11-04	2200	13-04	0700	740-2718+	236	85	124284	100130293	11633029	11.15					
010	04-11-2001	1635	Halo360	1810	-63.4	04-11	1620	N06W18	3B	X 1.0	9684	06-11	0152	06-11	1200	09-11	0300	750-2929-	300	142	141306	152152422	2023296E	34.76					
011	22-11-2001	2330	Halo360	1437	-12.9	22-11	2330	S17W38		M 9.9	9704	24-11	0656	24-11	1400	25-11	2000	1040-2218+	236	104	103445	145145402	1753525T	32.72					
012	28-10-2003	1130	Halo360	2459-105.2*		28-10	1110	S16E08	4B	X 17.2	10486	29-10	0611	29-10	1100	30-10	0300	1900-3539	400	204	252715	2983832551	2984056E	22.21					
013	29-10-2003	2054	Halo360	2029	-146.5	29-10	2049	S15W02	2B	X 10.0	10486	30-10	1619A	31-10	0200	02-11	0000	1700-3839	400	191	252578	230332592	2683282E	23.15					
014	18-11-2003	0850	Halo360	1660	-3.3	18-11	0831	- - - -		M 3.9	10501	20-11	0803	20-11	1000	21-11	0800	700-4229-	300	150	170578	228250499	24641929	14.14					
015	04-11-2004	2330	338	293	1055	-1.9	04-11	2309	N08E18	SXI	M 5.4	10696	07-11	1827	07-11	2200	09-11	1000	720-3739-	300	140	206363	1622344682	16333609	921.99				
016	07-11-2004	1654	Halo360	1759	-19.7	07-11	1606	N09W17	SXI	X 2.0	10696	09-11	1825W	09-11	2000	11-11	2300	810-2899-	300	161	206363	18323437620	13534916	9.92					
017	13-05-2005	1712	Halo360	1689	- - -	13-05	1657	N12E11	SXI	M 8.0	10759	15-05	0238	15-05	0600	19-05	0000	950-2638+	236	87	873651	118118499	14820519	12.65					
018	22-08-2005	0131	Halo360	1194	-17.8	22-08	0133	S11W54	SXI	M 2.6	10798	24-08	0613	24-08	1400	24-08	2300	710-2169-	300	102	105363	137141458	14437088	12.59					

Tabla 2.2: Lista de los eventos que precedieron a una TG y además se incluye el valor respecto al índice indicado.

ubicación de los observatorios, cada uno detecta la alteración a distinta hora y en distinta forma, pues existen ocasiones en que para un índice el dato registrado es máximo, para otro puede ser menor al máximo.

De nuestro conjunto de 18 eventos se eligieron tres de ellos, que corresponden a la TG 07 que es la más débil del resto, la TG 04 de rango medio y la TG 14 de mayor intensidad (esto en nuestra clasificación y de la lista que se muestra en la Tabla 2.1 se encuentra entre las 5 más intensas), para examinar las condiciones de la EMCI en su paso frente WIND, esto es, minutos antes de que impacte la magnetósfera. En las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3 vemos que hay un cambio brusco en los parámetros, esto se debe a que la EMCI esta en curso. Notemos que hay una variación muy grande entre la cantidad de protones del VS común y de la EMCI, esto significa que un mayor número de partículas impactarán la magnetósfera. Como la velocidad de la EMCI es mayor que la del VS normal, también aumenta el valor de la velocidad de flujo de las partículas, hay alteración en el campo, es decir se vuelve más intenso; del mismo modo la temperatura se incrementa y por lógica la presión sobre la magnetósfera debido a la EMCI es mayor que cuando incide un VS lento.

La región delimitada por las líneas discontinuas exhibe el momento en el que se dan todas estas modificaciones, en cada gráfica se indica el valor máximo del parámetro. También se muestra el desarrollo de la tormenta correspondiente al mismo intervalo de tiempo en el que sucedieron los cambios.

Para la TG más débil, en 20 horas aproximadamente, es cuando suceden todas estas alteraciones. El tiempo entre el Dst máximo y mínimo es de 4 horas y la recuperación total fue seis días después.

En la TG de rango medio, la diferencia de tiempo en que se da el máximo y mínimo, correspondiente al Dst, es de 8 horas, la fase de recuperación abarcó 5 días con 19 horas llegando a Dst=2 nT. El tiempo en que ocurren los cambios en el campo y plasma es de casi 17 horas, para luego empezar a normalizarse algunos parámetros, pues como podemos observar en la Figura 2.2 la velocidad de flujo sigue alterada pasado este tiempo.

En el evento 14 la distorsión en los parámetros del campo y plasma inicia el 20-11-2003 después de las 8:00; transcurridas 22 horas todo vuelve a estabilizarse. A las 8:30 del mismo día el Dst=-17 nT, 13 horas más tarde se registra el valor mínimo Dst=-422 nT y 7 días después el Dst=-1 nT, es decir se encuentra ya en su estado normal. En comparación con las tormentas anteriores, a esta tormenta le llevó más tiempo en recuperarse.

En cada caso los datos varían, podríamos decir que por ser más intensa la TG 14 las estimaciones máximas de las características del campo y plasma de la EMCI también lo serían en relación con lo datos de las otras dos TGs pero no es así, para TG 07 los valores máximos son mayores que los máximos de las TGs 04 y 14, salvo el de $|B|$. El tiempo en que se registra el alcance más grande en cada parámetro no coincide, difieren en minutos u horas.

2.3. Análisis Estadístico de Eventos

En esta sección presentamos un análisis estadístico de las principales características de los eventos registrados en la Tabla 2.2. Dicho análisis muestra los histogramas de frecuencia de las propiedades elegidas; en cada histograma se indican los valores extremos, el valor promedio y la desviación estándar. Además de ello se exhibe la correlación que existe entre ciertos parámetros, el cual nos ayuda a determinar como es la relación entre las variables. La finalidad de esto es

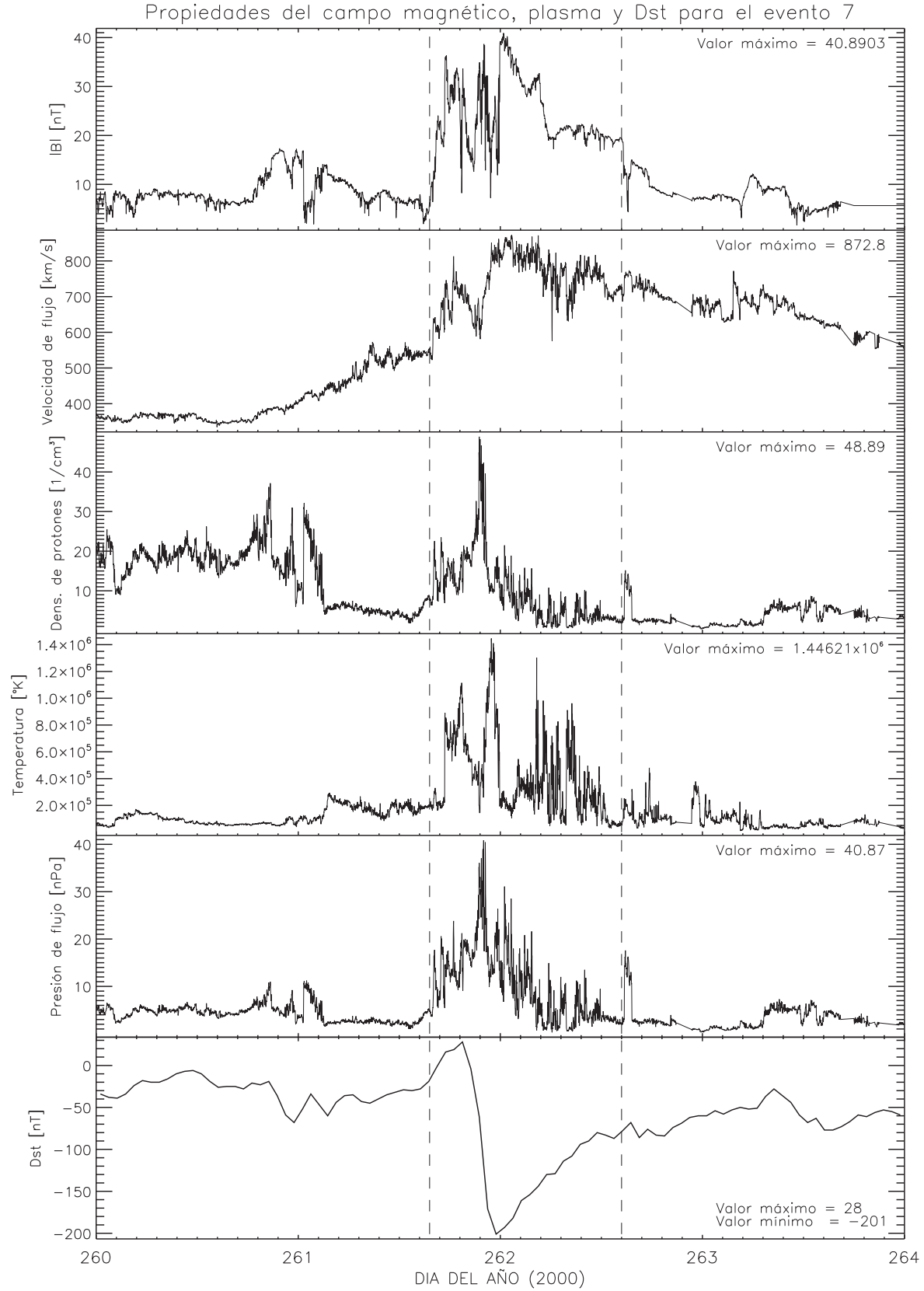


Figura 2.1: Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma de la EMCI en su arribo a la magnetósfera en la super tormenta menos intensa (TG 07 en la Tabla 2.2), además se anexa la gráfica correspondiente al Dst.

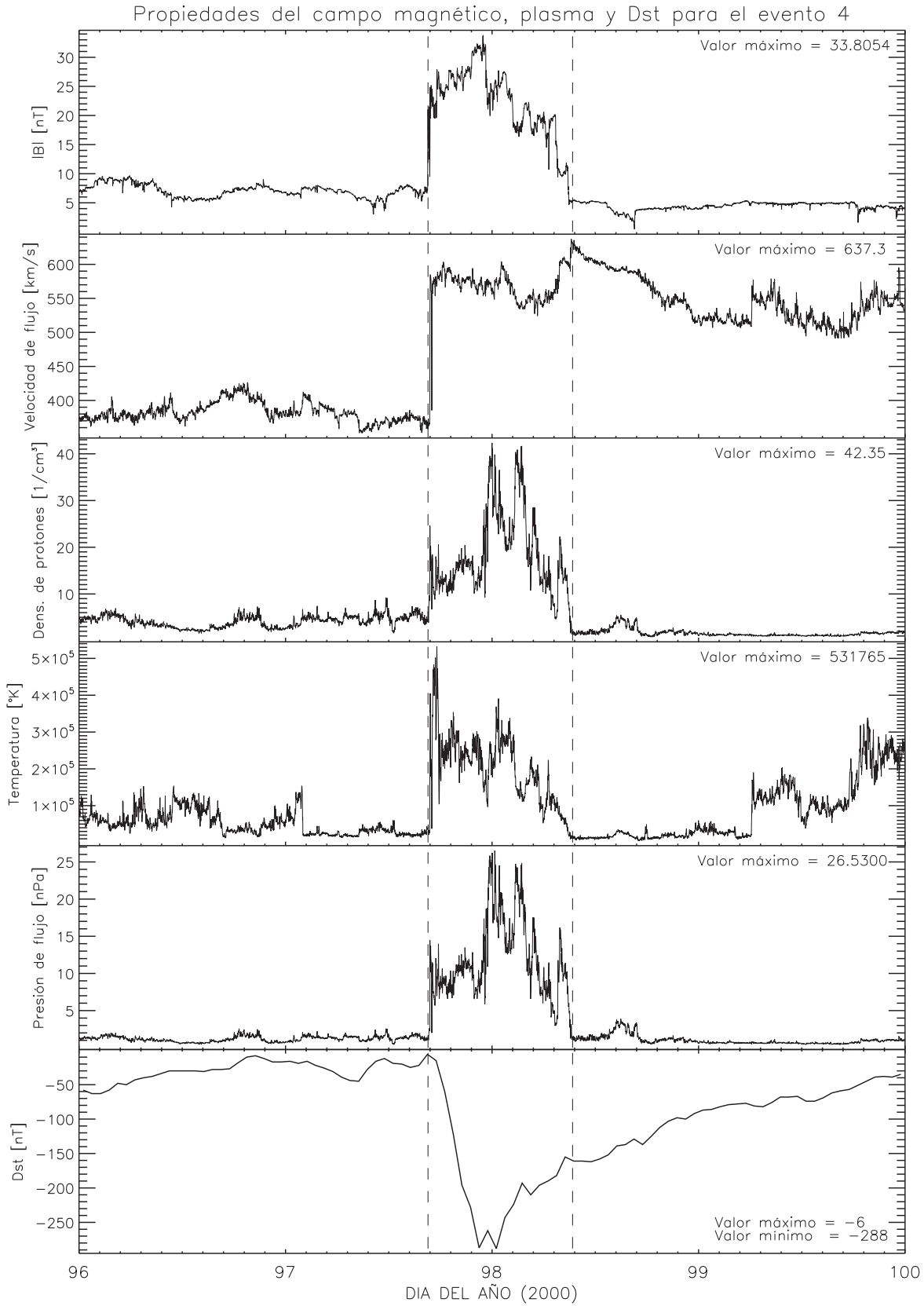


Figura 2.2: Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma de la EMCI en su arribo a la magnetósfera en la super tormenta número 04, que es de rango medio, también se anexa la gráfica correspondiente al Dst.

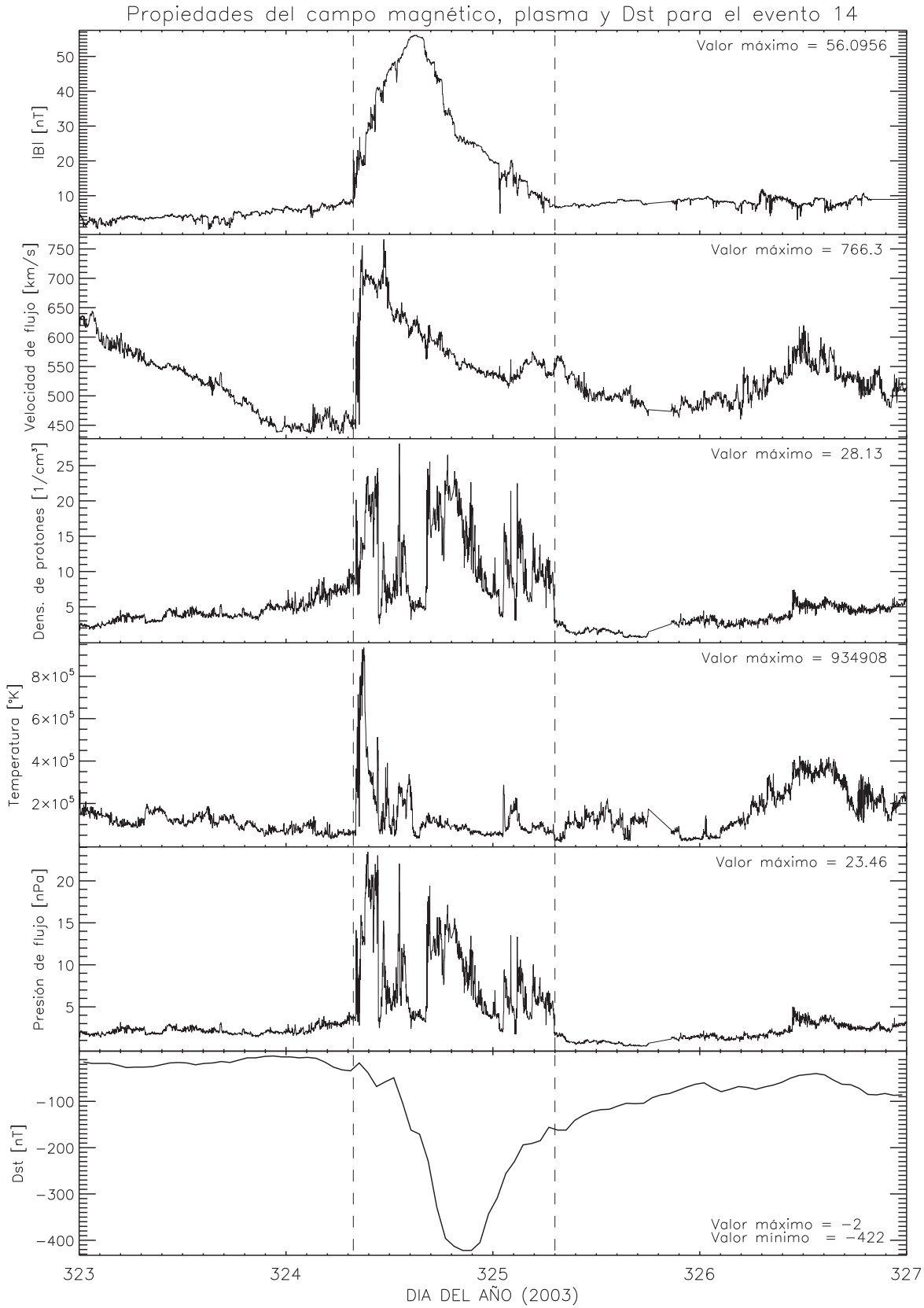


Figura 2.3: Esquema de las propiedades del campo magnético y plasma en su arribo a la magnetósfera en la TG más intensa (TG 14 en la Tabla 2.2), también se anexa la gráfica correspondiente al Dst.

conocer el comportamiento de los eventos bajo diferentes parámetros que definen su evolución desde que salen del Sol hasta llegar a nuestro entorno geomagnético. Primeramente analicemos los fenómenos solares que precedieron a las TGs:

De las EMCs tenemos que los valores extremos corresponden a los eventos 3 y 12 en la Tabla 2.2, es decir fueron las EMCs más lenta y la más veloz comparadas con el resto de nuestros eventos. La primera EMC ocurrió al inicio del ciclo y la segunda en el máximo. De acuerdo a la distribución de datos en el histograma de la velocidad de las EMCs que muestra la Figura 2.4 (a), observamos que el 61.1 % de los fenómenos su velocidad se encuentra entre 1000 y 2000 km/s. De estos mismo eventos tenemos que el 83.3 % de ellos fueron tipo halo, del resto, 11.1 % fueron tipo bucle con un ancho angular menor a 360° .

En el histograma de las EMCIs (Figura 2.4 (b)) vemos que el 61.1 % de ellas viajaban a una velocidad entre 501 y 800 km/s que es una velocidad menor al valor medio. Notemos que la velocidad de las EMCs al paso frente a ACE o WIND (ahora consideradas como EMCIs) ha cambiado, pero los eventos 3 y 12 se siguen conservando como valores extremos aunque el evento de menor velocidad experimentó una aceleración, y la de velocidad mayor sufrió una desaceleración; del resto, en su mayoría, disminuyó su velocidad.

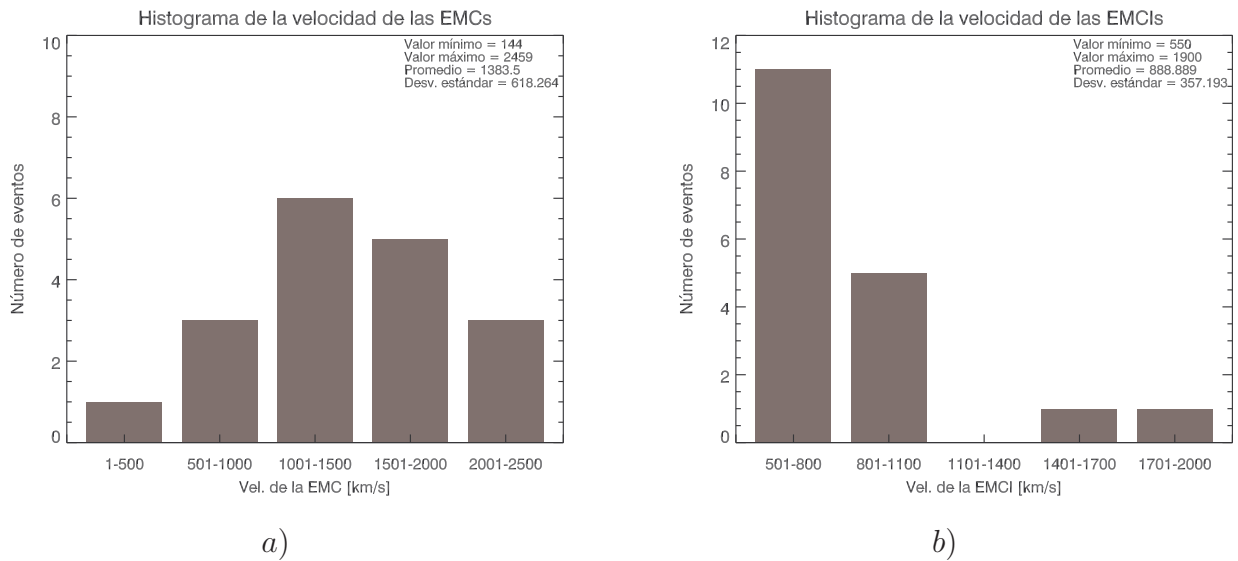


Figura 2.4: a) Histograma de la velocidad de las EMCs observadas por LASCO. b) Histograma de la velocidad de las EMCIs al paso frente a ACE o WIND.

Minutos antes de que se produjera una EMC, en el Sol ocurrió una fulguración. En el histograma de la Figura 2.5 (a) vemos que las fulguraciones de tipo M fueron las más abundantes, luego las de tipo X que son las más peligrosas, y de todos los registros, el 83.33 % fue inferior a $2.45233 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ que es el valor medio. Las fulguraciones 3 y 12 (en la Tabla 2.2) corresponden a los valores extremos es decir son la de menor y mayor intensidad (la diferencia de tiempo entre su brillo máximo y el inicio de la EMC es de minutos, no mayor a 52).

El número de región activa donde se observó la fulguración es diferente para cada fenómeno

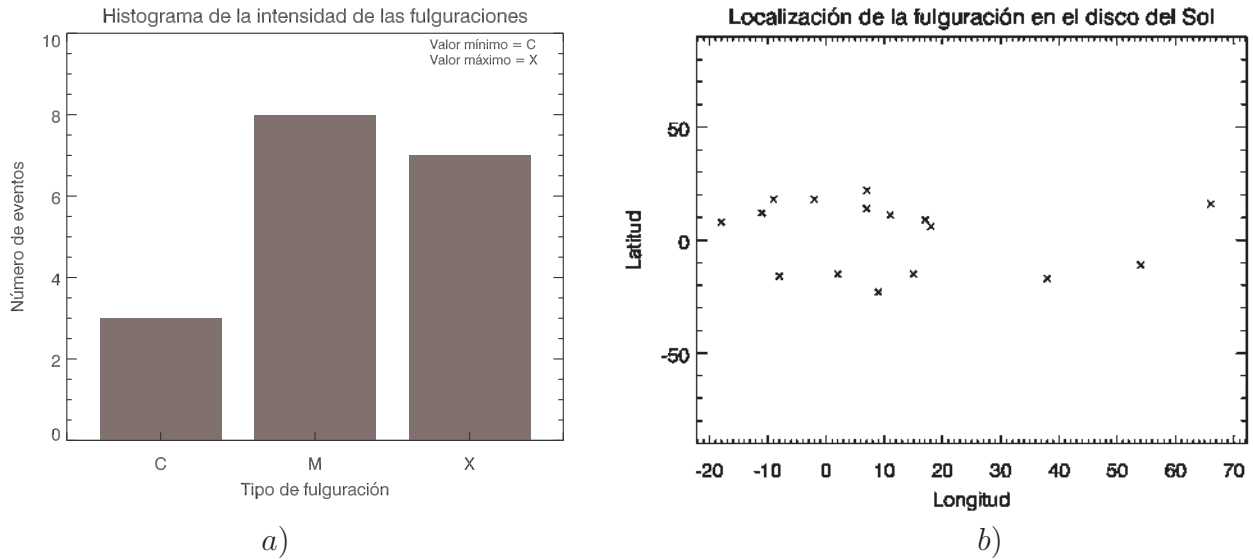


Figura 2.5: a) Intensidad de las fulguraciones asociadas con las EMCs. b) Posición de la fulguración en el disco del Sol.

excepto para dos de ellas (eventos 15 y 16 en la Tabla 2.2) aunque su localización en el disco del Sol sí es distinta. En la Figura 2.5 (b) podemos apreciar el lugar donde se originaron las fulguraciones. La ubicación de los fenómenos está entre -30 y 30° de latitud (recordemos que durante el máximo de un ciclo solar la mayor actividad se localiza a bajas latitudes); en cuanto a la longitud, la mayoría se localizaron en el lado oeste (W) del disco solar, a consecuencia de que las partículas se mueven sobre las líneas de campo magnético, las cuales adoptan una forma de espiral de W a E por la rotación del Sol. En la imagen sólo aparecen 16 eventos, ya que no tenemos información para 2 de ellos.

Ahora examinemos el comportamiento de las TGs con respecto a los diferentes índices. Como ya se mencionó anteriormente, en el índice Dst las tormentas de estimación máxima y mínima son los eventos 7 y 14. Haciendo hincapié a las EMCs y EMCIs que las precedieron, sus velocidades respectivas están próximas al valor promedio, pero no son valores extremos. De acuerdo a la distribución de los eventos en el histograma del Dst (ver Figura 2.6 (a)) tenemos que el 66.7% del total de eventos fueron de intensidad de entre -300 y -201 nT. La cantidad de tormentas con Dst mayor al valor promedio es la misma de las que se registraron con Dst menor al promedio. De ellas, la tormenta con $\text{Dst} = -288$ nT es la que está más próxima al valor medio.

Para el índice Kp, el número 9 indica que la componente horizontal del campo está muy perturbada, en este índice encontramos varios eventos extremos; el registro número 6 (en la Tabla 2.2) fue el de cuantía menor y los eventos 5, 12 y 13 son los de estimación máxima. Una vez más la tormenta 12 es valor extremo. En el histograma de la Figura 2.6 (b) se contempla que los eventos en mayor cantidad superaron el promedio, siendo las de valor 9- las más abundantes.

Debido a que el índice ap se deriva de índice Kp, su distribución en el histograma que se muestra en la Figura 2.7 (a) es análogo al de la Figura 2.6 (b).

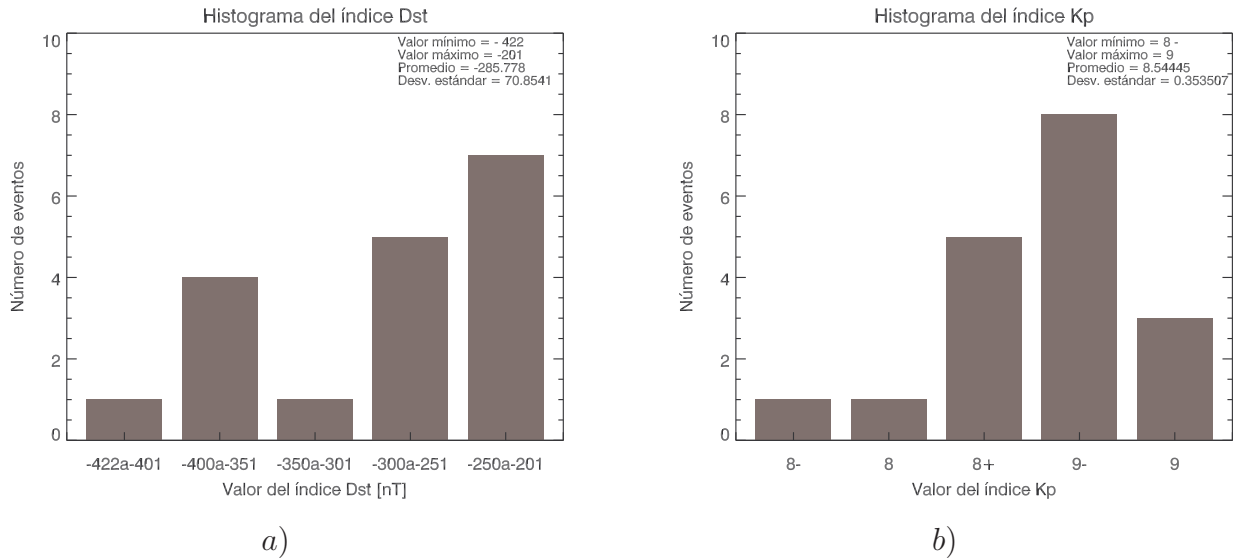


Figura 2.6: a) Distribución de las TGs en el índice Dst. b) Clasificación de las TGs en el índice Kp.

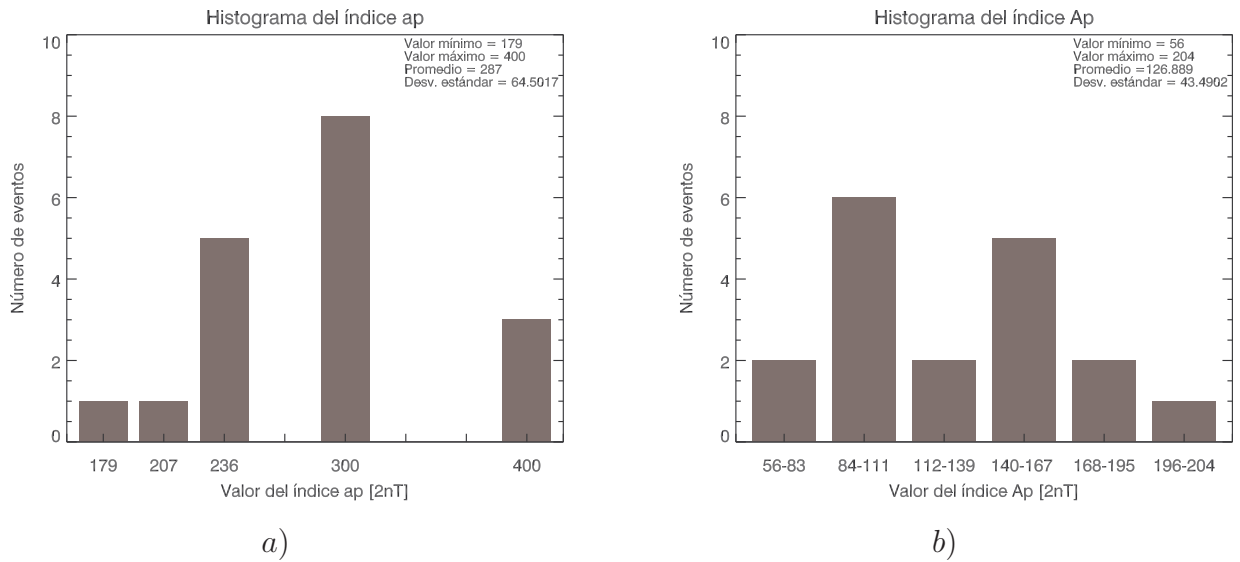


Figura 2.7: a) Distribución de las TGs en el índice ap. b) Histograma de las TGs en el índice Ap.

En la Figura 2.7 (b) se muestra el histograma de los eventos en el índice Ap que es el promedio diario de ap; en el cual, 13 registros se encuentran en el rango de 84 y 167 [2nT] que son valores entre el promedio y la desviación estándar (126.889 ± 43.4902). En este índice sólo la tormenta 12 es la de mayor estimación y el evento 7 es el de menor valor como lo es en el índice Dst (ver Tabla 2.2).

En Ap* hay una mayor cantidad de eventos que no superaron el valor medio, esto lo podemos ver en el histograma de Ap* (Figura 2.8 (a)). En este índice la estimación mínima ahora se registró en el evento 17 y el de mayor importancia sigue siendo el evento 12.

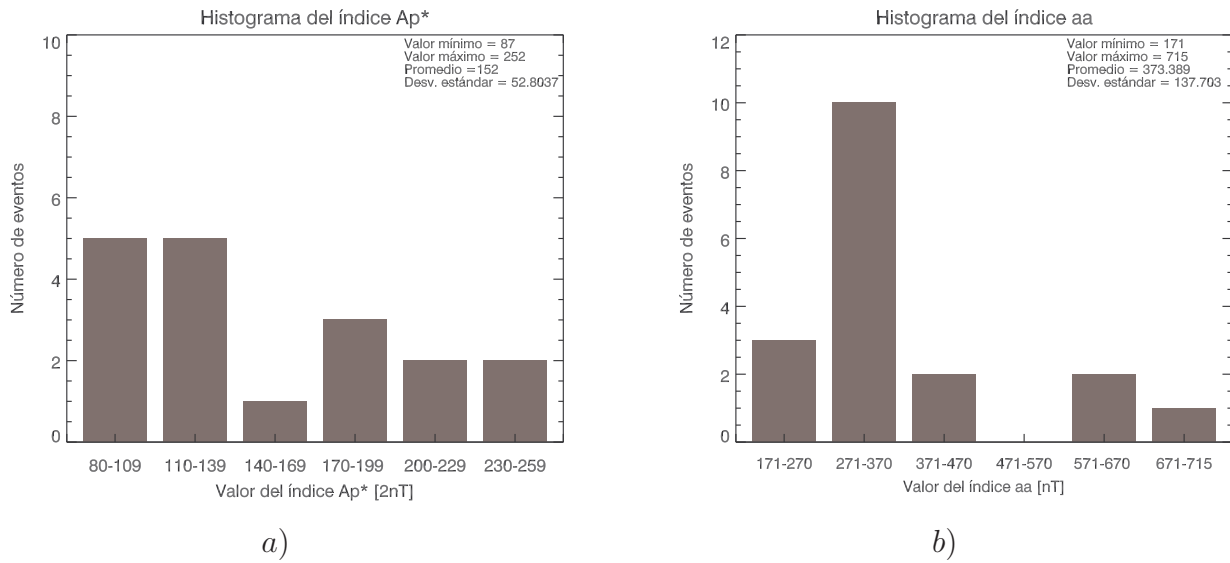


Figura 2.8: a)Histograma de las TGs en el índice Ap*. b)Histograma de las TGs en el índice aa.

Gracias a la información que ofrecen los observatorios Hartland y Canberra podemos realizar un histograma del índice aa, el cual se muestra en la Figura 2.8 (b). En el histograma notamos que del conjunto de datos la mayor parte tuvo registros menores al valor promedio. En aa los valores extremos son para los eventos 3 y 12. Si vemos en la Tabla 2.1, encontramos que la tormenta 43 es la de mayor importancia por su registro en el Dst y además por sus consecuencias en la Tierra, mientras tanto en el índice aa el valor de esta super tormenta es igual con el registro del evento 12 que su valor es de 715 nT.

En el índice Aa y aa* el evento 12 nuevamente fue el de mayor alcance, y por ser estos índices promedio diario de aa, esperaríamos que también los valores mínimos correspondieran al mismo fenómeno en ambos casos, pero no es así. En Aa, el evento 7 fue el de menor cuantía como ocurrió en los índices Dst y Ap; y en aa* la tormenta 3 es la de estimación más pequeña como en aa. En los histogramas respectivos que se muestran en las Figuras 2.9 (a) y 2.9 (b) percibimos que la distribución de los datos fue mayor para los eventos con registro menor a 159.444 y 185.722 nT, que son los promedios en Aa y aa*.

En el índice am la tormenta 13 es la de máxima cuantía y como en Kp y ap, el evento 6 es el de menor estimación. De las 18 tormentas, 12 se localizan en el intervalo de 421.222 ± 85.3095

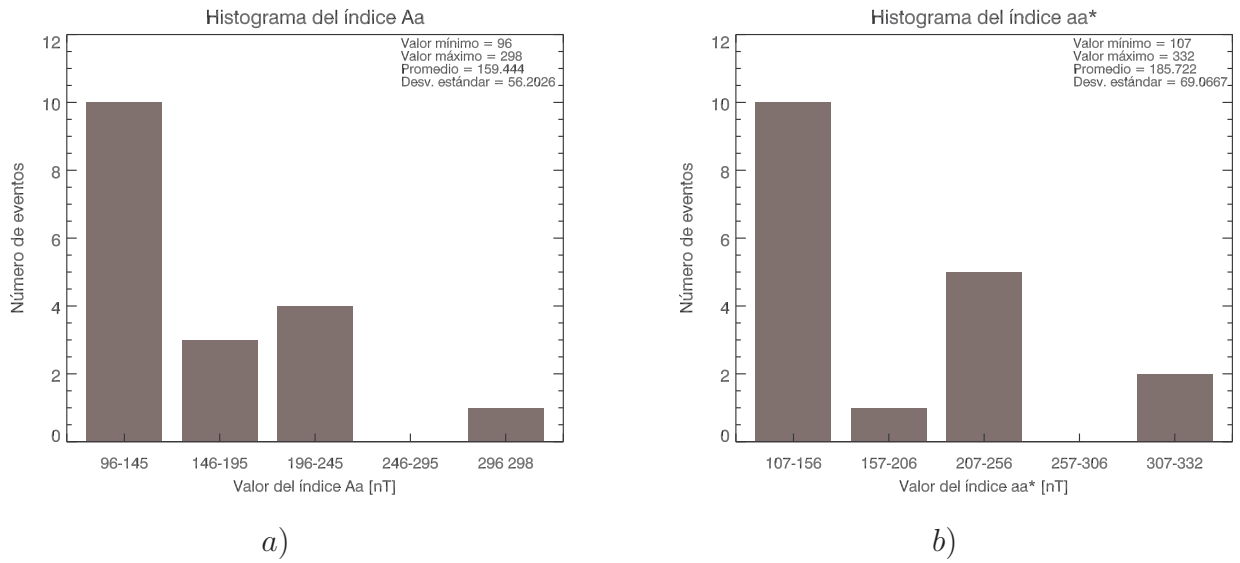


Figura 2.9: a) Distribución de las TGs en el índice Aa. b) Histograma de los eventos en el índice aa*.

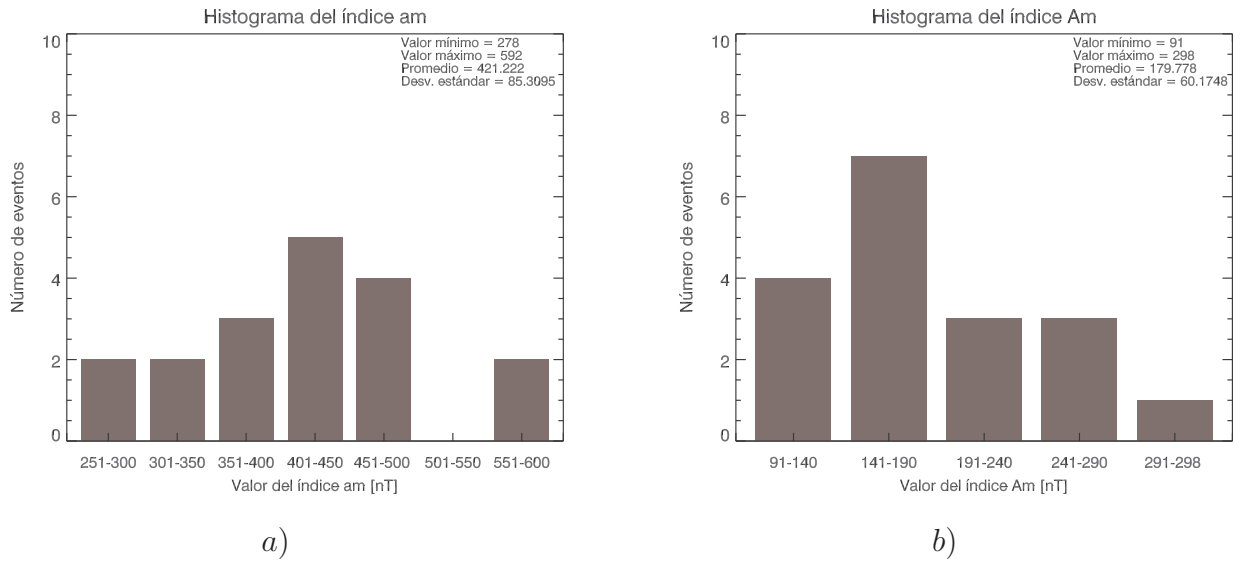


Figura 2.10: a) Histograma de las TGs en el índice am. b) Histograma de los eventos de acuerdo al índice Am.

nT. En el histograma de la Figura 2.10 (a) encontramos esta información.

En el promedio diario del índice am, una vez más el fenómeno 12 es el que tuvo el mayor alcance y el registro 4 fue el de menor estimación. En este caso el valor medio es de 179.778 nT y 8 eventos están por encima de él, tal como se percibe en la Figura 2.10 (b).

De la información que reportan los observatorios ubicados en altas latitudes se realizó un histograma (Figura 2.11 (a)) en el que el valor mínimo y máximo corresponde a los eventos 3 y 14. En AE como en Dst coinciden las tormentas con mayor estimación y el registro 3 tiene relación con los antecedentes solares de menor cuantía. Observemos en dicha figura que para 13 tormentas, su registro está entre 3001 y 4500 nT.

Dado que el índice Q toma sólo 11 valores, en mayor cantidad se reportaron eventos con estimación igual a 9 como se puede ver en el histograma en la Figura 2.11 (b). El valor mínimo corresponde al evento 4 (como también lo es el registro 18) y los eventos 10, 12 y 13 (en la Tabla 2.2) registraron el valor máximo.

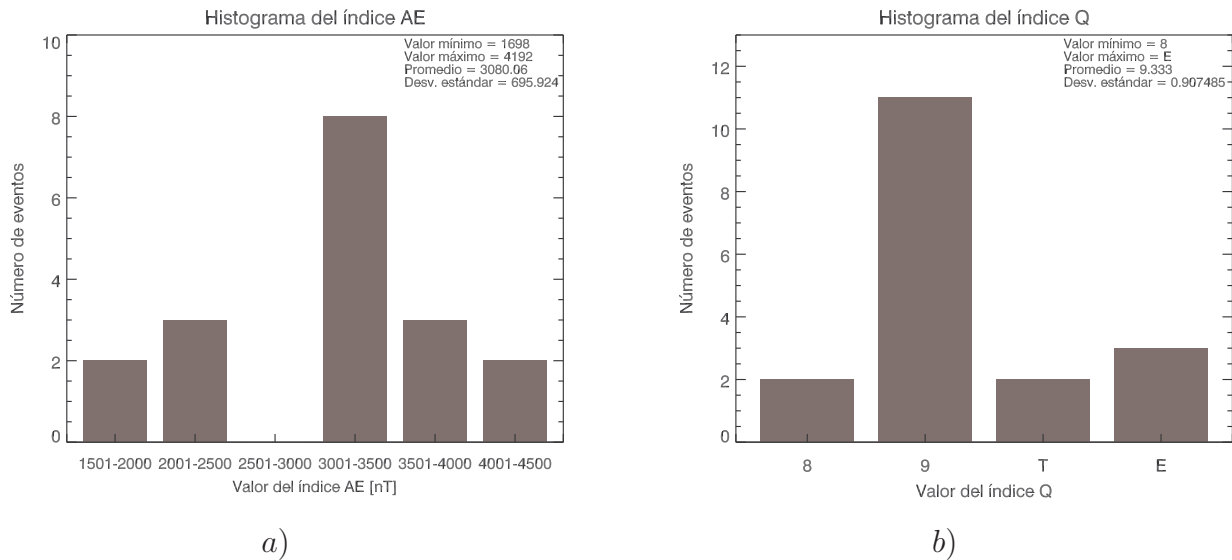


Figura 2.11: a) Distribución de los eventos en el índice AE. b) Clasificación de las TGs en el índice Q.

El índice asignado para medir la actividad magnética en las capas polares nos dice que la tormenta número 10 fue la de mayor alcance y el evento 4 es la de mínima cuantía. Analizando el histograma de la Figura 2.12 encontramos que en la mayor parte de los eventos, su registro oscila entre 10 y 15 (estimaciones menores al valor medio).

En la gráfica (a) que percibimos en la Figura 2.13 nos muestra el valor alcanzado por el Dst respecto a la velocidad de la EMC. La EMC más veloz produjo una tormenta con Dst de -353 nT que es menor a -422 nT. La gráfica (b) nos muestra el valor del Dst de acuerdo a la velocidad de la EMCI al paso por nuestra magnetósfera. En ambos casos encontramos que la correlación es inversa, un poco débil pero no cero; de esto deducimos que los fenómenos solares no influyen del todo para que se genere una super tormenta con respecto al índice Dst pero si las EMCs son muy

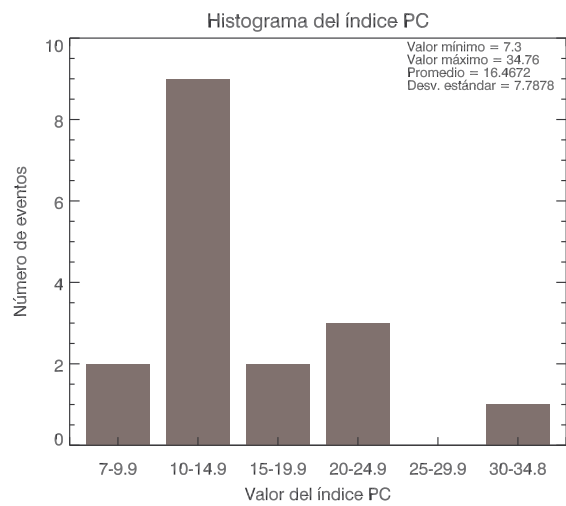


Figura 2.12: Histograma de las TGs en el índice PC.

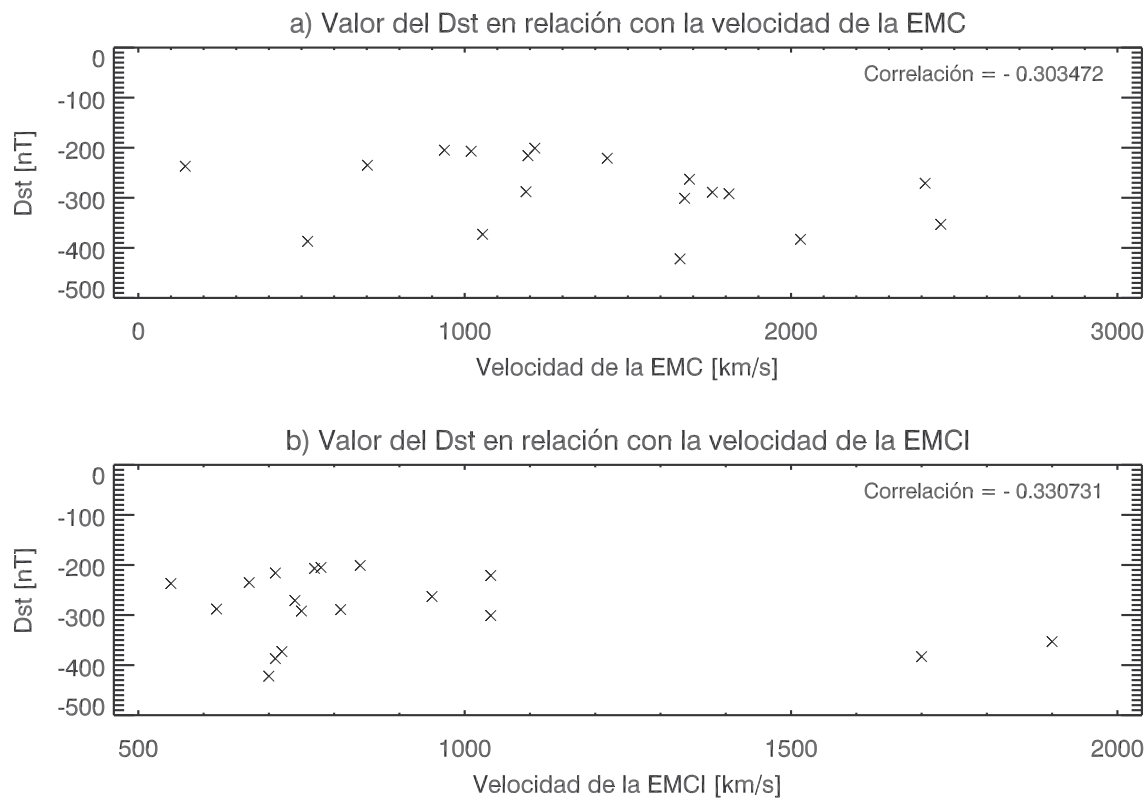


Figura 2.13: Velocidad vs Dst.

veloces la importancia de la TG en el Dst irá aumentando.

La correlación que existe entre las fulguraciones y el índice Dst también es inversa, claro menos débil que en los casos anteriores (ver Figura 2.14 (a)). Notemos que la importancia de la fulguración para la super tormenta de mayor intensidad fue de tipo M, que son peligrosas pero no tanto como las de tipo X. A diferencia de la tipo X 17.2, que es de alto peligro pero sus consecuencias no alteraron tanto al anillo de corriente. Sin discriminar a las tipo C, que a pesar de ser de poca importancia nos muestran que también causan sus alteraciones al campo magnético terrestre.

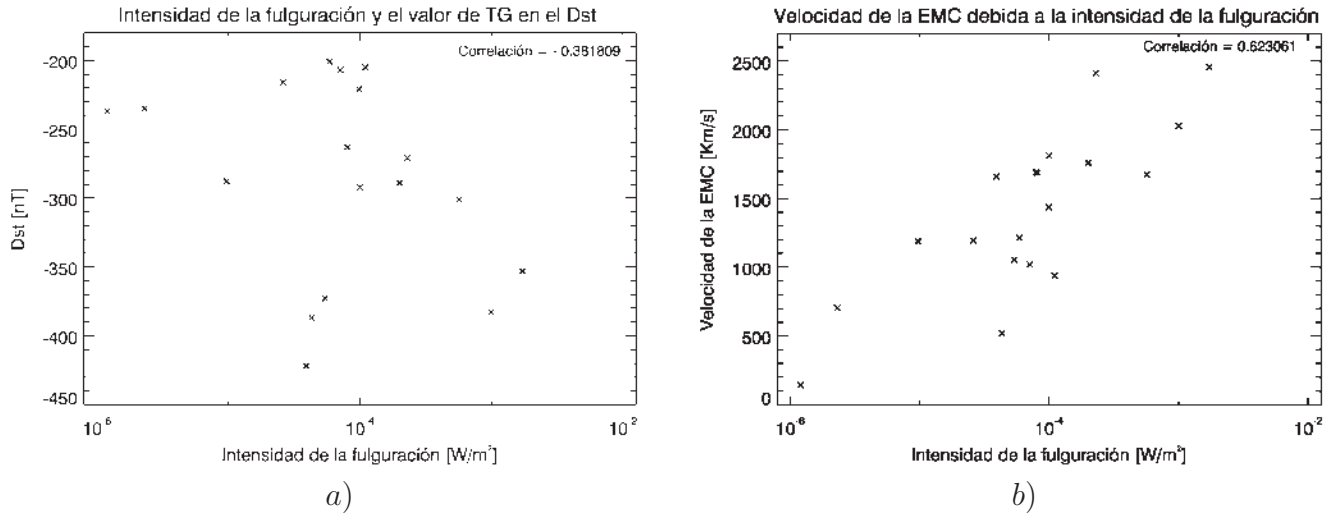


Figura 2.14: a) Intensidad de la fulguración vs Dst. b) Intensidad de la fulguración vs velocidad de la EMC

Las investigaciones realizadas nos señalan que sí hay una dependencia entre las fulguraciones y las EMC, en nuestro estudio encontramos que el grado de asociación entre ambas es de 0.623061 como se muestra en la Figura 2.14 (b); no es muy fuerte pero sí es importante, posiblemente por la cantidad de datos que estamos manejando.

Nota: en las Figuras 2.14 (a) y 2.14 (b) el eje x está en escala logarítmica con la finalidad de tener una mejor percepción de los datos.

En la Tabla 2.3 se muestra los valores extremos, promedio y desviación estándar que se están valorando en algunas características de los eventos solares y los índices. En cada caso hemos visto cómo varían o cómo están distribuidos los datos respecto a estos parámetros. En la Tabla 2.4 se dan los datos del grado de asociación que existe entre las fulguraciones, las EMCs, EMCIs y el Dst.

De toda la información recopilada y analizada nos damos cuenta que cada evento se comporta de manera distinta al resto, de igual forma sus efectos son diferentes, por ejemplo los fenómenos solares registrados con el número 12, son los de mayor importancia en 7 índices, ya que es donde se reportaron los valores máximos para el mismo evento, pero en el índice Dst tiene otra clasificación.

#	Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
01	intensidad de la fulguración	1.2×10^{-6} (C)	17.2×10^{-4} (X)	2.45233×10^{-4}	4.43752×10^{-4}
02	velocidad de la EMC	144	2459	1383.5	618.264
03	velocidad de la EMCI	550	1900	888.889	357.193
04	índice Dst	-422	-201	-285.778	70.8541
05	índice Kp	8-	9	8.54445	0.353507
06	índice ap	179	400	287	64.5017
07	índice Ap	56	204	126.889	43.4902
08	índice Ap*	87	252	152	52.8037
09	índice aa	171	715	373.389	137.703
10	índice Aa	96	298	159.444	56.2026
11	índice aa*	107	332	185.722	69.0667
12	índice am	278	592	421.222	85.3095
13	índice Am	91	298	179.778	60.1748
14	índice AE	1698	4192	3080.06	695.924
15	índice Q	8	E	9.333	0.907485
16	índice PC	7.3	34.76	16.4672	7.7878

Tabla 2.3: Resumen de datos de las gráficas.

#	Variables	Valor de la correlación
01	velocidad de la EMC vs Dst	-0.303472
02	velocidad de la EMCI vs Dst	-0.330731
03	intensidad de la fulguración vs Dst	-0.381809
04	velocidad de la EMC vs intensidad de la fulguración	0.623061

Tabla 2.4: Valores de las correlaciones entre algunos parámetros.

Capítulo 3

Resultados y Conclusiones

3.1. Resultados

En la Tabla 2.2 observamos que hay EMCs con una velocidad significativa y la fulguración que se le relaciona es de menor intensidad que otras. De acuerdo al grado de asociación entre la fulguración y la EMC obtuvimos un resultado que nos dice que la relación es directa pero no fuerte como esperabamos (dato 4 en la Tabla 2.4).

De la información que se tiene en la Tabla 2.3 vemos que la EMC con velocidad de 144 Km/s a pesar de ser tan lenta fue suficiente para generar una super tormenta y la diferencia con la EMC más veloz es 2315 km/s, que es un valor muy grande. De forma análoga para las fulguraciones que las precedieron, la diferencia entre el valor máximo y mínimo es $17.188 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ que es un valor muy relevante. En las EMCIs el intervalo entre los valores extremos es de 1350 km/s, no es muy grande en comparación con las EMCs. De los resultados que se muestran en la Tabla 2.4 encontramos que la dependencia entre las TGs y la velocidad de las EMCs es débil pero no cero.

Durante la revisión de los catálogos de las fulguraciones y EMCs nos percatamos que hay datos de eventos que superan los valores máximos pero sus registros en el índice Dst son mayores a -200 nT, es decir sus efectos no fueron suficientes para generar una super tormenta. De esto podemos decir que la dirección del campo de la EMCi no era lo suficientemente antiparalela a la del campo terrestre, por lo que hubo una ligera reconexión y pocas partículas lograron entrar al interior de la magnetósfera, debido a ello el Dst fue superior a -200 nT.

En referencia a la TG con Dst = -201 nT, la velocidad de la EMCi que la precedió es de 840 Km/s y para la TG con Dst = -422 nT, la velocidad de la EMCi relacionada a ella es de 700 km/s, una velocidad mucho menor que la anterior. La presión de flujo máxima que se reportó en el evento 7 fue 74.21 % mayor que en el evento 14 y el valor máximo en la densidad de protones fue 20.76 partículas/cm³ más que en la TG 14. Son diferencias muy significativas como lo es en el valor del Dst (la disimilitud en el Dst entre las TGs 7 y 14 es de -221 nT).

Respecto a los datos que se muestran en la Tabla 2.2 cabe destacar que hay eventos que en ciertos índices tienen un valor significativo, pero en otros incluso en el Dst son de importancia menor, como es el caso de la TG 12.

De nuestro conjunto de 18 tormentas encontramos que el 66.7 % del total alcanzó un Dst entre -201 y -300 nT, el 27.8 % oscilan entre -301 y -400 nT, sólo el 5.5 % tuvo un $-500 < \text{Dst} < -400$ nT y no hubo alguna con $\text{Dst} \leq -500$ nT que históricamente sí se han reportado eventos con este valor (evento 43 en la Tabla 2.1).

También observamos que días antes de que se alcanzara el Dst máximo para cada tormenta, el campo magnético ya se encontraba perturbado salvo para los eventos 3, 15 y 18; en casos como las TGs 13 y 16, horas antes había ocurrido una super tormenta. El tiempo de recuperación del campo varía de 5 - 9 días pues cuando ocurre esta fase puede haber leves caídas del campo lo cual retrasa aún más el tiempo.

Los valores extremos en los distintos índices no corresponden a una sola tormenta en específico, aunque en ocasiones coinciden. La hora correspondiente a cada evento en la que se registraron los valores máximos, difieren para cada índice a pesar de ser el mismo fenómeno, pues como notamos, los intervalos de medición pueden ser de 1 minuto, 15 minutos, 1 hora, 1 día o el promedio máximo de un intervalo de mediciones.

Es necesario tener un mayor número de eventos para obtener mejores resultados, lo cual nos ayudará para dar un mejor pronóstico sobre las TGs.

3.2. Conclusiones

Se estudiaron las TGs con $Dst \leq -200$ nT pertenecientes al ciclo solar número 23 de las cuales examinamos los eventos solares que las precedieron, así como su comportamiento en otros índices correspondientes a distintas latitudes y longitudes magnéticas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio concluimos que:

1. La intensidad de una super tormenta depende en un 33.07 % de la velocidad de la EMCI.
2. La variación del campo magnético durante una tormenta es distinta en cada punto latitudinal de la superficie terrestre, por lo que, la categoría de una TG de acuerdo a su intensidad varía en cada índice sin importar que sea el mismo evento.
3. De lo que ya se sabe, cabe resaltar que si la EMCI o el viento solar a 1 UA se encuentra con la magnetósfera y la dirección de su campo magnético tiene una dirección antiparalela (B, sur-norte) a la del campo magnético terrestre habrá una reconexión magnética, permitiendo la entrada de partículas cargadas eléctricamente al interior de la magnetósfera aumentando de esta manera la densidad de partículas en el anillo de corriente lo que producirá una corriente más intensa, esto dará lugar a una caída en la componente horizontal del campo magnético terrestre (B_H). Además, si el campo ya se encuentra perturbado, esto será un punto a favor para que sea más intensa la caída de la componente y el registro en el Dst será aún menor.

3.3. Trabajo a futuro

Para complementar este estudio proponemos los siguientes análisis como trabajo futuro:

- Investigar si existen otros fenómenos interplanetarios que generen una TG, de ser así, estudiar cuanto es que influyen para que la intensidad de la tormenta sea mayor.
- En caso de que existan tales fenómenos estudiar la combinación de ellos con las EMCIs.

Apéndice A

Conceptos Básicos

A.1. Plasmas

Se considera a los plasmas como el cuarto estado de la materia, de los cuales su densidad y temperatura varía ampliamente. Dado que existe una cierta relación entre el plasma y el campo magnético cualquier alteración al plasma afecta al campo magnético y viceversa.

Beta de plasmas: La razón entre la presión magnética y la presión del plasma está dada por:

$$\beta = \frac{P_{plasma}}{P_{magnética}} = \frac{\rho v^2}{B^2/2\mu_0}, \quad (\text{A.1})$$

donde v es la velocidad, ρ es la densidad y B es el campo magnético. Si $\beta \ll 1$ domina el campo magnético ($P_{plasma} < P_{magnética}$) por lo que el fluido (plasma) es forzado a confinarse en el campo; si $\beta \gg 1$ ($P_{magnética} < P_{plasma}$) el campo magnético es débil y su influencia es insignificante y cuando el plasma fluye acarrea consigo al campo magnético. En este caso se dice que el campo está congelado. En otras palabras, si la energía del campo magnético es dominante las líneas de campo mantienen su forma por lo que el movimiento de las partículas deben avenirse a ellas; en caso contrario, si el campo es débil y la densidad de partículas es mayor (la energía de las partículas es dominante) su movimiento es afectado ligeramente y las líneas de campo son obligadas a seguir ese movimiento.

Los plasmas son muy sensibles a campos electromagnéticos. Cualquier perturbación al plasma también altera al campo magnético y viceversa. Los plasmas que contienen campos magnéticos distintos no se mezclan.

Teorema de Alfvén: Cuando el plasma y el campo magnético están unidos se dice que el campo magnético está congelado en el plasma.

La **magnetohidrodinámica** se encarga de estudiar el comportamiento (movimiento) de fluidos conductores en presencia de campos electromagnéticos. Es una combinación de hidrodinámica y electromagnetismo.

Medio magnetohidrodinámico: Son plasmas altamente ionizados en los cuales el campo magnético contenido en él produce esfuerzos magnéticos que son equivalentes a una tensión a lo largo de las líneas de campo y una presión. A los fluidos perfectamente conductores o con conductividad infinita se les denomina fluido magnetohidrodinámico ideal.

Velocidad del sonido: Otro aspecto importante a considerar es la propagación del sonido en un medio. La velocidad del sonido depende de las características del medio y no de la fuente que

la produce, la relación está dada por:

$$v^2 = \gamma \frac{\text{Presión}}{\text{densidad}} = \gamma \frac{P}{\rho}, \quad (\text{A.2})$$

donde γ es el cociente entre los calores específicos, para el viento solar $\gamma = 5/3$. Como el viento solar se puede considerar un gas ideal $P \sim T/V$ y $V = \frac{m_p}{\rho}$

$$\Rightarrow v^2 \sim \gamma \frac{T}{m_p}, \quad (\text{A.3})$$

donde T es la temperatura del fluido, V el volumen, ρ la densidad, m_p la masa del protón. Así que mientras mayor sea la temperatura del viento solar más rápido se van a propagar las ondas sonoras en éste.

Campo magnético: Cuando una carga puntual se mueve con una velocidad $\vec{v}$ produce un campo magnético dado por:

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}. \quad (\text{A.4})$$

La fuerza que ejerce un campo magnético sobre una partícula en movimiento es perpendicular a la velocidad y al campo. Si el campo es uniforme y la velocidad y la fuerza son perpendiculares dos a dos entonces el movimiento se convierte en una circunferencia. Esto es la causa de el movimiento circular de las partículas alrededor de las líneas de campo magnético. Aunque en ocasiones puede romperse la unión entre las partículas y las líneas de campo, por ejemplo: cuando hay colisión entre partículas, cuando el plasma fluye por lugares donde la intensidad del campo es cero.

La fuerza magnética está dada por la fórmula: $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ donde q es la carga de la partícula (escalar), $\vec{v}$ es la velocidad, $\vec{B}$ la intensidad del campo magnético. Si $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares $\Rightarrow F = |q|vB$ es la magnitud de la fuerza magnética. La aceleración de una partícula que se mueve en forma circular está dada por:

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad (\text{A.5})$$

donde v es la velocidad y R el radio de giro de la partícula

$$\Rightarrow |q|vB = F = ma = m \frac{v^2}{R}, \quad (\text{A.6})$$

despejando

$$R = \frac{mv}{|q|B}, \quad (\text{A.7})$$

es el radio de la trayectoria a la cual se moverá la partícula.

Fuerza de Lorentz: Es la suma de las fuerzas eléctricas y magnéticas que actúan sobre una partícula en movimiento. Si la partícula está en reposo solo actúa la fuerza eléctrica. Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (\text{A.8})$$

donde q es la carga de la partícula (escalar), $\vec{v}$ es su velocidad, $\vec{E}$ es el campo eléctrico y $\vec{B}$ es el campo magnético.

Energía térmica: Es la energía que se libera en forma de calor.

Energía del electrón: $E_e = KT_e$, K es la constante de Boltzman y T_e la temperatura del electrón.

Energía del ion: $E_i = KT_i$, T_i es la temperatura del ion.

A.2. Índices

Los índices de actividad magnética están designados para describir la variación de campo magnético y se miden a distintas latitudes magnéticas [Goodman, 2005] y [NGDC, NOAA].

1. **Índice K:** Es un código relacionado a la variación de la componente horizontal del campo magnético observada mediante un magnetómetro. El intervalo de las mediciones es de tres horas, los registros son números enteros entre 0 y 9. La tabla de conversión a nT varía para cada observatorio (por su ubicación). A continuación presentamos la del observatorio Niemegk¹.

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nT	0-4	5-9	10-19	20-39	40-69	70-119	120-199	200-329	330-499	> 500

2. **Índice Kp** (índice planetario): Es el promedio de los valores del índice K proporcionados por una red de 13 observatorios entre 44 y 60 grados de latitud magnética en el norte y sur. Al igual que en el índice K los valores están entre 0 (muy quieto) y 9 (muy perturbado), pero cada unidad se divide en tres subunidades, excepto los extremos, obteniendo una escala de 28 valores. Los intervalos de medición son de cada 3 horas, TU (0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24). De este índice se derivan los índices ap y Ap.
3. **Índice ap:** Está directamente relacionado con el índice Kp, es decir, es un rango equivalente al índice Kp, el cual se expresa en unidades de 2 nT, los intervalos de medición son de cada tres horas. La escala de medición del índice ap con relación al índice Kp es la siguiente:

Kp	0	0+	1-	1	1+	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Kp	5-	5	5+	6-	6	6+	7-	7	7+	8-	8	8+	9-	9
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

donde: $8- = 8 - \frac{1}{3} = 7 + \frac{2}{3}$ y $8+ = 8 + \frac{1}{3}$.

- a) **Índice Ap:** Es un índice diario, se obtiene promediando los ocho valores del índice ap para cada día.
- b) **Índice Ap*:** Es el valor máximo de 24 horas obtenido mediante el cálculo de 8 valores consecutivos del índice ap, no considera el inicio y fin de un día. Los datos están disponibles desde 1932.

¹Observatorio Niemegk: Se localiza en Alemania a 51.9° latitud magnética y a 97.7° longitud magnética, está activo desde 1988 y su código de observatorio es: NGK

4. **Índice aa:** Índice de actividad global geomagnética, se expresa en unidades de nanoteslas, estimado de los datos de sólo dos observatorios geomagnéticos: Observatorio Hartland en Reino Unido y Observatorio Canberra en Australia. Los valores se deducen a partir de la escala del índice K y aunque se considera el más simple de los índices planetarios de tres horas, en él podemos encontrar datos desde 1868. Representa el nivel de actividad a una latitud magnética de 50° y las mediciones se realizan cada tres horas (8 mediciones al día).
 - a) **Índice Aa:** Es el valor promedio de cada día de los ocho valores del índice aa.
 - b) **Índice aa*:** Es el promedio máximo de 24 horas obtenido mediante el cálculo de 8 valores consecutivos del índice aa, como en Ap*.
5. **Índice am:** Derivado de las escalas del índice K, está basado en una red de 23 estaciones en la zona subauroral al norte y sur del hemisferio. Sus unidades son los nanoteslas.

Km	0	0+	1-	1	1+	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+
am[nT]	0	1.4	3.4	5.4	7.4	10.4	13.4	16.4	20.4	26.4	33.4	40.4	50.4	60.4
Km	5-	5	5+	6-	6	6+	7-	7	7+	8-	8	8+	9-	9
am[nT]	70.4	86.4	103.4	120.4	146.4	173.4	200.4	243.4	286.4	330.4	386.4	443.4	500.4	611.4

Km es la escala correspondiente a am.

- a) **Índice Am:** Es el valor promedio del día, de los ocho valores del índice am.
6. **Índice AE** (Auroral Electrojet): Es una medida cuantitativa de la actividad magnética en la zona auroral, producida por el aumento de las corrientes ionosféricas que fluyen bajo y en el ovalo auroral (medida del electroflujo en la zona auroral). Es el rango de variación de la componente horizontal H del campo magnético alrededor del ovalo auroral, la información se deriva de una selección de 10 - 13 observatorios a lo largo de la zona auroral en el hemisferio norte. Las mediciones se realizan en un intervalo de 1 minuto y sus unidades son los nanoteslas [nT].
7. **Índice Q:** Es la escala de desviación más grande del nivel no perturbado de la componente horizontal. Destinado a estaciones de alta latitud (aurora). El rango de Q es de 0 a 11 y los intervalos de medición son de cada 15 minutos. Este índice ofrece información desde 1957. La tabla de conversión en nanoteslas es la siguiente:

Q	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	T(10)	E(11)
nT	10	20	40	80	140	240	400	660	1000	1500	2200	ilimitado

8. **Índice PC** (Polar Cap): Este índice monitorea la actividad magnética en las Capas Polares causadas por los cambios debido al campo magnético interplanetario y al viento solar. Los intervalos de medición son de cada minuto y es un índice adimensional. Dos observatorios cerca de los polos se encargan de derivar este índice: PCN de Thule (ahora Qaanaaq) en Groenlandia a 85.4° de latitud y el PCS de Vostok en la Antártida a -83.4° de latitud.

9. **Índice Dst:** Como se explicó en el Capítulo 1, este índice mide la variación del anillo de corriente. El intervalo de medición es de cada hora. La clasificación de las tormentas se realizan de acuerdo a este índice ya que es el promedio de variación sobre todas las longitudes.

A.3. Naves Espaciales

WIND: Nave espacial lanzada el 1 de noviembre de 1994, colocada en órbita a una distancia de más de $200 R_E$. El objetivo de esta nave es investigar los procesos que ocurren en el viento solar no perturbado que está a punto de impactar a la magnetósfera de la Tierra, así como medir el plasma, campo magnético y las partículas que en él abundan. Para más información visitar la página <http://pwg.gsfc.nasa.gov/wind.shtml>.

ACE (Advanced Composition Explorer): Esta nave espacial fue lanzada el 25 de agosto 1997, proporciona datos sobre el campo magnético, el plasma y partículas energéticas. Se encuentra en órbita a una distancia de 1.5×10^6 km de la Tierra (más detalles consultar la página <http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite): Satélite que se encuentra en órbita geoestacionaria alrededor de la Tierra, tiene un sensor de partículas energéticas el cual mide la cantidad flujo de partículas. Mayor información de éste satélite visitar la página <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>.

SOHO (Solar and Heliospheric Observatory): Nave espacial lanzada el 2 de diciembre de 1995. Es un proyecto de colaboración internacional entre la ESA (European Space Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) para estudiar el Sol desde el núcleo a la corona externa y el viento solar. Para mayor información visitar la página <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>.

Las fulguraciones son observadas por GOES, las EMCs observadas por LASCO y las EMCIs observadas por ACE o WIND.

Bibliografía

- [1] Aguilar E., 2001. *Variaciones con el Ciclo Solar de Diversas Manifestaciones de la Actividad Solar*, UNAM.
- [2] Baker D.N., Klecker B., Schwartz S.J., Schwenn R., Steiger R., 2006. *Solar Dynamics and its Effects on the Heliosphere and Earth*, Springer.
- [3] Benz A.O., 2002. *Plasma Astrophysics, Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae*, Kluwer.
- [4] Bravo S., 1994. *Plasmas en Todas Partes*, Fondo de Cultura Económica.
- [5] Bravo S., 1997. *Encuentro con una Estrella*, Fondo de Cultura Económica.
- [6] Burlaga L.F., 1995. *Interplanetary Magnetohydrodynamics*, Oxford University.
- [7] Casado A., 2007. *Cromosfera Solar y Región de Transición*, Universidad de la Laguna.
- [8] Cid C., 1999. *Estudio de las Eyecciones de Masa de la Corona Solar en el Medio Interplanetario*, Universidad Complutense de Madrid.
- [9] Cravens T.E., 1995. *Physics of Solar System Plasma*, Oxford University.
- [10] Departamento de Física Espacial. *Boletín Skylab*, IGF-UNAM.
- [11] González J.A., 2000. *Introducción a la Dinámica de Gran Escala del Medio Interplanetario*, UNAM.
- [12] Gonzales W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M., 1994. *What is a geomagnetic storm?*, Journal of Geophysical Research.
- [13] Goodman J.M., 2005. *Space Weather & Telecommunications*, Springer.
- [14] Gumley L.E., 2003. *Practical IDL Programing*, Morgan Kaufmann.
- [15] Kennel C.F., 1996. *Convection and Substorms: Paradigms of Magnetospheric Phenomenology*, Oxford University.
- [16] Krishnan E., 2003. *Latex Tutorials*, Trivandrum.
- [17] Kunow H., Crooker N.U., Linker J.A., Schwenn R., Steiger R., 2006. *Coronal Mass Ejections*, Springer.

- [18] Lang. K.R., 1997. *Sun, Earth and Sky*, Springer.
- [19] Licas T., Soledad S., 1995. *Morfología y Características Físicas de las Eyecciones de Masa Coronal Solar*, UNMSM.
- [20] Meyer N., 2007. *Basics of the Solar Wind*, Cambridge University.
- [21] Ontiveros V.Z., 2005. *Estudio de Tormentas Solares y sus Efectos Geomagnéticos Durante la Fase Ascendente del Ciclo Solar 23*, UNAM.
- [22] Ontiveros V.Z., 2006. *Estructuras Geoeffectivas de Gran Escala en el Medio Interplanetario*, UNAM.
- [23] Otaola J., Mendoza B., Pérez R., 1993. *El Sol y la Tierra: una Relación Tormentosa*, Fondo de Cultura Económica.
- [24] Pérez J. 2007. *Física Solar, Física Coronal, las Relaciones Sol-Tierra*, INAOE.
- [25] Resnick R., Halliday D., Krane K.S., 2002. *Física II*, CECOSA.
- [26] Richardson I.G., Cane H.V., 2010. *Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties*, Solar Phys (2010) 264: 189-237.
- [27] Schrijver C.J., Zwaan C., 2000. *Solar and Stellar Magnetic Activity*, Cambridge University.
- [28] Sosa M.L., 2007. *La Reconexión Magnética en el Entorno Terrestre*, UNAM.
- [29] Sugiura M., 1991. *On Dst index*, IAGA.
- [30] Vázquez M., Hanslmeier A., 2006. *Ultraviolet Radiation in the Solar System*, Springer.

Páginas de consulta en internet:

<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>

<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>

<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>

<http://isgi.cetp.ipsl.fr/lesdonne.htm>

<http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>

http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/index.html

<http://www.sgo.fi/index.php>

<http://roma2.rm.ingv.it/>

<http://www.nasa.gov/>