

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CLIMA ESPACIAL DURANTE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS  
ASOCIADAS A PRESIÓN ARTERIAL HUMANA EN INVESTIGACIONES  
PREVIAS DE ACTIVIDAD SOLAR ALTA Y BAJA

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
M A E S T R A E N C I E N C I A S  
P R E S E N T A :  
JULIA LÉNICA MARTÍNEZ BRETÓN

TUTORA: DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA

CIUDAD UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

*No cabe duda: de niño,  
a mí me seguía el Sol.  
Andaba detrás de mí  
como perrito faldero;  
despeinado y dulce,  
claro y amarillo:  
ese Sol con sueño  
que sigue a los niños.*

Fragmento: "Sol de Monterrey" de Alfonso Reyes.



*El Sol y la vida: Frida Kalo*

## *Agradecimientos:*

A las instituciones:

- Universidad Nacional Autónoma de México UNAM
- Facultad de Ciencias, UNAM
- Instituto de Geofísica, UNAM
- Posgrado, UNAM
- CONACYT

A mi tutora y jurado:

- Doctora Blanca Emma Mendoza Ortega.
- Doctora María Dolores Meza Maravilla
- Doctor Juan Américo González Esparza
- Doctor Kotsarenko Anatoly
- Doctor Manuel Miranda Anaya
- Finado,.....doctor Salvador Sánchez De la Peña

A mis *maestros*,

mis compañeros,.... Vero, Pedro, Esmc, Julio, Ernesto, Laura, Esteban Hdz,....

personal,

y todo aquel que hace, que día a día viva la *esperanza*.....

*Gracias..... al Amor..*



*Nen*

*Juan*

y.....a quienes ya no estan.....

# Resumen

Existen ritmos biológicos que son consecuencia de la adaptación del organismo a variaciones cíclicas en el ambiente, se caracterizan porque en condiciones naturales la frecuencia del ritmo endógeno (propio de la fisiología interna), coincide con ciclos geofísicos. El presente trabajo está motivado por este hecho.

Aquí el ritmo biológico endógeno, al que haremos referencia, es el oscilación circadiana de la presión arterial humana, y el ritmo geofísico es la variación diurna y nocturna de la componente horizontal del campo magnético.

Presentamos un análisis del clima espacial en los intervalos utilizados por dos investigaciones, Dimitrova et. al. [2008] y Azcárate et. al. [2011], quienes encontraron una relación entre la presión arterial humana (PA) y las tormentas geomagnéticas (TGs).

Sabemos que cuando un ciclo biológico se altera, la respuesta del organismo es la activación de diferentes sistemas que tienen por objetivo la recuperación del equilibrio homeostático. Por lo que si se rompe la regularidad de la variación diurna-nocturna de la componente horizontal del campo magnético, al darse una TG, el sistema biológico responderá con una variación en los valores de la PA, no mayores a un 10 % dada la activación de mecanismos reguladores.

Para ello se buscaron elementos que den indicios sobre una relación entre ambos ciclos, el de la PA y el de las variaciones del índice geomagnético Dst día-noche.

Dos investigaciones, una asociada a Sol Activo realizada por Dimitrova et al. [2008] y otra a Sol quieto por Azcárate et al. [2011], reportan una variación en la presión arterial humana del orden de un 10 % a un 8 %, respectivamente, ambas estudian variaciones en la PA en intervalos de estudio, donde ocurrieron TGs de diferentes niveles de intensidad.

En ésta investigación se presenta una descripción del clima espacial, centrado en aquellos eventos en los que se reporto la máxima variación en la presión

arterial, para Sol activo por Dimitrova et al. [2008] para  $Dst \leq -150nT$  y para Sol quieto por Azcárate et al. [2011] un evento con  $Dst=-43nT$ .

El estudio de las variaciones en el campo magnético en la superficie de la Tierra aunque es amplio y sólido, no se ha conseguido todavía conocer los mecanismos mediante los que se da la relación de éste con los sistemas biológicos. Por lo que pensamos contribuir a esclarecer dichos mecanismos, aportando una descripción del clima espacial en donde ya se reportaron variaciones en la presión arterial asociadas a las tormentas geomagnéticas.

Este trabajo de tesis se compone de tres partes en la primera, desarrollada en los capítulos del 1 al 3, se hace una descripción del Sol y su actividad, el medio interplanetario y la dinámica magnetosférica. En la segunda parte, capítulo 4, se presenta un resumen de la fisiología de la presión arterial, con el objeto de poner en contexto los estudios sobre los que se analiza el clima espacial asociada. La tercera y última parte, formada por los capítulos 5 y 6, se presentan los datos, resultados y conclusiones de nuestro trabajo.

En el capítulo 5, iniciamos con una descripción de las manchas solares y del comportamiento del índice geomagnético  $Dst$  del año 2000 al 2011. Después analizamos el clima espacial asociado a las (TGs) ocurridas en periodos de Sol activo y Sol quieto. Para Sol activo nos basamos en el periodo correspondiente a la investigación de Dimitrova et al. [2008], y para Sol quieto en el periodo del trabajo de Azcárate et. al. [2011] . En ambos trabajos se reportan variaciones en la presión arterial humana asociadas a TGs hasta de un 10 % cuando éstas son severas y hasta de un 8 % cuando son débiles.

Se analizaron cuatro TGs severas para Sol activo, donde la fuente  $B_z$  sur provino en todos los casos de eyecciones de masa coronal interplanetarias. En tres de ellas, la estructura geoeffectiva fue una funda y la restante una nube magnética. Para Sol quieto la fuente de  $B_z$  sur provino del cruce terrestre de la hoja neutra de corriente heliosférica, ocasionando una TGs débil. Se buscaron elementos comunes en las TGs ocurridas durante el Sol activo y el quieto, en cuanto al origen y estructura geoeffectiva.

Finalmente en el capítulo 6 se verte las conclusiones del trabajo.

# Índice general

<b>1. El Sol</b>	<b>8</b>
1.1. Estructura interna. . . . .	9
1.2. Actividad Solar. . . . .	15
<b>2. El Medio interplanetario</b>	<b>18</b>
2.1. Viento Solar . . . . .	18
2.1.1. Tobera de De Laval . . . . .	18
2.1.2. Expansión coronal supersónica . . . . .	20
2.2. Espiral de Parker . . . . .	23
2.3. Hoja neutra de corriente heliosférica. . . . .	25
<b>3. La Magnetosfera Terrestre.</b>	<b>27</b>
3.1. Descripción de la magnetosfera terrestre . . . . .	27
3.2. Reconexión magnética . . . . .	32
3.3. Índice Geomagnético Dst. . . . .	35
3.4. Tormentas geomagnéticas . . . . .	36
3.4.1. Antecedentes y definición. . . . .	36
3.4.2. Componente $B_z$ sur en el CML. . . . .	37
3.4.3. Interacción viento solar con la magnetosfera en la dinámica de una tormenta geomagnética . . . . .	40
<b>4. Sistema cardiovascular.</b>	<b>41</b>
4.1. El sistema cardiovascular. . . . .	42
4.2. Medición de la presión arterial humana . . . . .	44



<i>ÍNDICE GENERAL</i>	7
<b>5. Datos, resultados y discusión.</b>	<b>46</b>
5.1. Breve reseña de los artículos que reportan variación en la PA asociada a TG . . . . .	49
5.1.1. Sol activo, [Dimitrova et al., 2008]: . . . . .	49
5.1.2. Sol quieto, [Azcárate et al., 2011]: . . . . .	50
5.2. Fuentes de datos y tratamiento. . . . .	53
5.3. Análisis del periodo de Sol activo. . . . .	55
5.3.1. TGs analizadas para Sol activo en la presente tesis. . . . .	55
5.3.1.1. Tormenta geomagnética A (TG_A). . . . .	55
5.3.1.2. Tormenta geomagnética B (TG_B). . . . .	57
5.3.1.3. Tormenta geomagnética C (TG_C). . . . .	59
5.3.1.4. Tormenta geomagnética D (TG_D). . . . .	60
5.4. Análisis de periodo de Sol quieto. . . . .	67
5.4.1. Antecedentes. . . . .	67
5.4.1.1. Tormenta geomagnética (TG_S): . . . . .	69
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>

# Capítulo 1

## El Sol

El Sol es una esfera de plasma que provee virtualmente toda la energía al sistema solar y consecuentemente, mantiene múltiples procesos en términos energéticos. Uno de los más sobresalientes es sin duda, coadyuvar al origen y desarrollo de la vida de nuestro planeta.

Las características orbitales existentes entre la Sol y la Tierra, determinan la duración de los días y las estaciones del año. Que regulan y dan *ritmo* a los sistemas biológicos. Llamaremos *ritmos*, a los fenómenos biológicos que se repiten a intervalos más o menos regulares, se originan y sostienen como respuesta a fenómenos ambientales cíclicos, pudiendo ser de origen exógeno, es decir externo, por ejemplo: El ciclo sueño-vigilia, para el ser humano, se encuentra determinado por la duración del día-noche. Así los ritmos biológicos asociados a fenómenos geofísicos poseen las siguientes características [Gruart et al., 2002]:

- Están determinados genéticamente.
- Son ubicuos.
- Son independientes de la temperatura.
- Muestran independencia a la retroalimentación conductual.
- La mayoría de los ritmos pueden ser sincronizados por determinados factores del entorno.

El estudio del ciclo diario de actividad-reposo permite conocer algunas propiedades de otros ritmos vinculados con procesos geofísicos. Por otra parte, el ritmo cardiaco, nos da información sobre las propiedades de otros ritmos relacionados

con procesos fisiológicos, como los de la actividad eléctrica tanto cardíaca como neuronal y secreciones pulsátiles de las hormonas.

Todo lo anterior, hasta el momento, solo considera la periodicidad con la que el Sol ilumina nuestro planeta, así como de la energía.

Por otra parte el *clima espacial* es consecuencia de la actividad solar, éste proporciona una descripción de las condiciones del medio interplanetario y de la magnetosfera terrestre.

## 1.1. Estructura interna.

En la Tabla 1.1 se encuentran los principales parámetros solares, que muestran las características del mismo. En la Figura 1.1, aparece la estructura por capas del Sol.

Interior solar. En el *núcleo* existen las condiciones de temperatura, densidad y presión suficientemente altas para que se den reacciones termonucleares las cuales consisten principalmente en la fusión de cuatro átomos de hidrógeno en uno de helio liberando energía en forma de rayos  $\gamma$  y neutrinos. El núcleo ocupa alrededor de  $1/5$  del radio solar, y contiene prácticamente la mitad de la masa del Sol. En términos de porcentajes se calcula que se compone de un 73% de hidrógeno, 25% de helio y el 2% restante de otros elementos [Zirin, 1989].

Tabla 1.1: Parámetros solares

PROPIEDAD	VALOR
Distancia promedio Sol-Tierra en (UA)	$1.49597 \times 10^{11} m$
Radio solar ( $R_{\odot}$ )	$R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ Km}$
Volumen	$1.412 \times 10^{27} m^3$
Masa ( $M_{\odot}$ )	$M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ Kg}$
Densidad media	$1409 \text{ kg} \cdot m^{-3}$
Edad	$4.566 \times 10^9 \text{ años}$
Densidad (Núcleo)	$\sim 1.513 \times 10^5 \text{ Kg/m}^3$
Presión (Núcleo)	$\sim 2.334 \times 10^{16} \text{ Pa}$
(Fotosfera)	$10 \text{ Pa}$
Temperatura (Núcleo)	$\sim 1.6 \times 10^7 \text{ K}$
(Fotosfera)	$\sim 5780 \text{ K}$
(Cromosfera)	$6 \times 10^3 - 2 \times 10^4 \text{ K}$
(Región de transición)	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6 \text{ K}$
(Corona)	$2 \times 10^6 - 3 \times 10^6 \text{ K}$
Período de rotación	
(ecuador)	26.8 días
(30° latitud)	28.2 días
(60° latitud)	30.8 días

Tomada de [Lang, 2001]

Envolviendo al núcleo se encuentra la *zona radiativa*, con un espesor de  $0.5R_{\odot}$  a donde llegan los rayos  $\gamma$  procedentes del núcleo. En esta zona la temperatura disminuye a  $2 \times 10^6 \text{ K}$  y tiene una densidad de  $1.7 \times 10^{28} \text{ part/m}^3$ . La energía es transportada por los fotones y puede tomar hasta un millón de años atravesarla. Algunos de éstos fotones son absorbidos, mientras que otros son remitidos. Cuando la radiación deja de ser un mecanismo efectivo de transferencia de energía debido al gradiente de temperatura existente, inicia la *zona convectiva*,

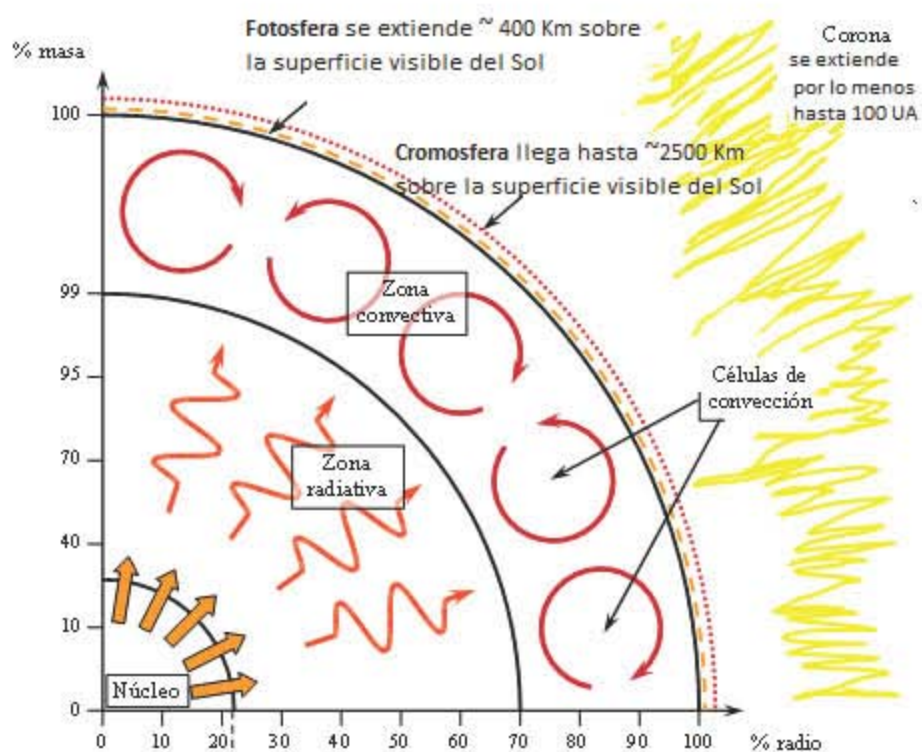


Figura 1.1: Capas del Sol

En la figura se coloca el centro del Sol en el origen. En el eje horizontal se muestra porcentualmente el radio solar y en el eje vertical están los porcentajes de la masa (<http://www.surunga.net/posts/ciencia-educacion/>).

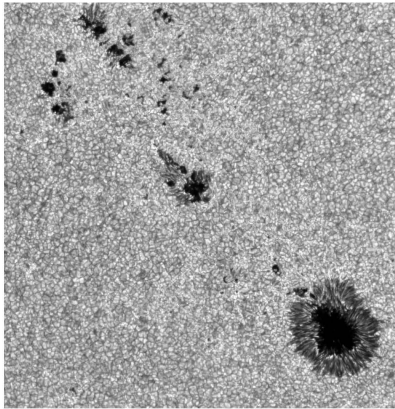


Figura 1.2: Manchas solares

Se muestra un grupo de manchas, nótese las zonas de umbra (la más oscura) y de penumbra (la que la rodea). Las granulaciones se ven en la periferia. El campo magnético en una mancha puede alcanzar miles de gauss (imagen tomada de <http://www.google.com.mx/imgres?q=Manchas+Solares>).

donde el mecanismo de transferencia de energía es por convección y está por arriba de  $0.86 R_{\odot}$ , [Suess and Tsurutani, 1998]

La atmósfera solar. Se inicia con la *fotosfera* que es la parte superior de las celdas convectivas. Sus estructuras más notables son las regiones activas compuestas, principalmente por, las manchas solares (regiones oscuras) y las fáculas (regiones brillantes). Las manchas tienen diámetros variables que van desde 700 hasta 4000 Km; su duración también es variable, pudiendo ser de semanas a meses (Figura 1.2).

Las manchas se encuentran constituidas por tubos de flujo cuyos campos magnéticos son miles de veces más intensos que los de sus alrededores, están anclados en la zona de convección y llegan hasta la atmósfera superior. Su temperatura es menor que la de los alrededores, en promedio es de 5500 K, ello explica su apariencia oscura, ya que el intenso campo magnético dificulta el intercambio de calor. Su estudio ha permitido establecer la rotación diferencial del Sol, de 27 días aproximadamente en el Ecuador, y de 30 en las zonas de los polos. El número de manchas solares varía a lo largo de un ciclo de 11 años, [Zirin, 1989]. Cuando hay más manchas toda la actividad solar se incrementa, y cuando hay un número mínimo, la actividad solar se ve muy disminuida. Así, las manchas son uno de los indicadores más evidentes de la actividad solar.

En esta capa también se observa un patrón de gránulos que son las partes

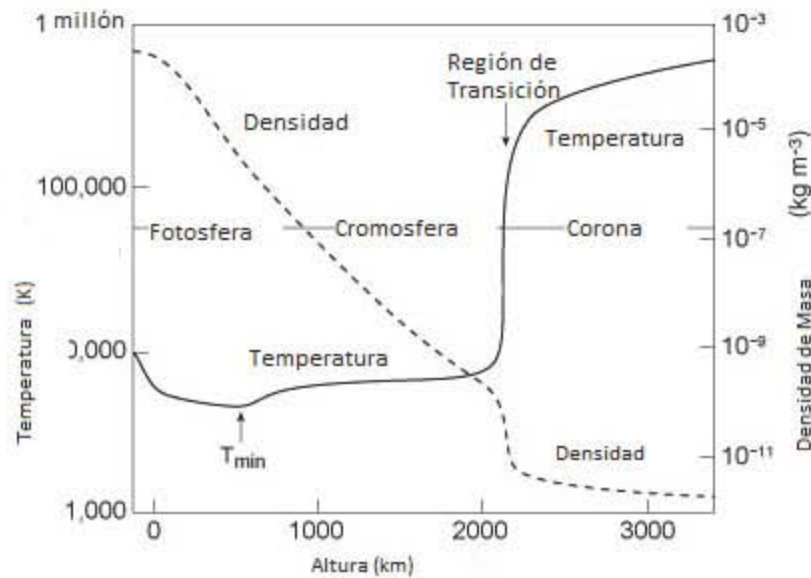


Figura 1.3: Temperatura como función de la altura en la atmósfera solar. (Imagen tomada de [http://ase.tufts.edu/cosmos/print\\_images](http://ase.tufts.edu/cosmos/print_images)).

superiores de las celdas de la zona convectiva (Figura 1.2).

Arriba de la fotosfera está la *cromosfera*, aquí la energía es transportada por radiación, extendiéndose por arriba de la fotosfera hasta unos 2000-3000 Km. Su temperatura en la base es de 4300 K incrementándose con la altura hasta  $10^4$  K (Figura 1.3). Es común en ella, la presencia de espículas que son jets verticales de plasma que se alinean con el campo magnético, [Lang, 2001].

Entre la cromosfera y la corona hay una capa delgada e irregular llamada *región* o *zona de transición*, en ella el comportamiento de la temperatura presenta grandes interrogantes, ya que la temperatura se eleva rápidamente en varios órdenes de magnitud, de  $2 \times 10^4$  K a  $1 \times 10^6$  K (Figura 1.3).

La última capa de la atmósfera solar es la *corona*, ésta tiene una temperatura de  $\sim 1 \times 10^6$  K, y para mantenerla es necesario un suministro de energía, que se sugiere pueda obtenerse a partir de fenómenos de reconexión magnética y/o de ondas Alfvén. El calentamiento de la corona por reconexión magnética se explica por la interacción de tubos con campos magnéticos de polaridad opuesta, que al reconectarse, liberan energía magnética produciendo calor.

Asimismo el segundo mecanismo de calentamiento es explicado por resonancia de ondas Alfvén [Aschwanden, 2005]. Otra característica de la corona es que el

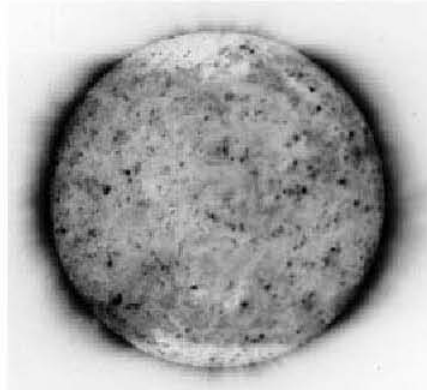


Figura 1.4: Hoyo Coronal

Los hoyos coronales son regiones donde las líneas de campo magnético cerca del Sol son abiertas, y además son fuente de viento solar rápido. Imagen en EUV de Sol quieto, tomada por SOHO. El color negro indica procesos de emisión, los hoyos coronales en esta imagen se encuentran en los polos [Aschwanden, 2005].

plasma que la forma está totalmente ionizado; por lo tanto emite en el extremo ultravioleta y parte del espectro en rayos X para  $\lambda \leq 110nm$ .

El campo magnético coronal es consecuencia de la dinámica del campo magnético que se gesta en la zona convectiva. Se distinguen dos zonas magnéticas topológicamente diferentes en la corona, *regiones abiertas (hoyos coronales)* y regiones con líneas de campo cerradas. Las primeras son fuentes de viento solar rápido ( $> 500$  Km/seg) y las segundas del lento ( $\leq 500$  Km/seg).

Los *hoyos coronales* (Figura 1.4) son regiones con líneas de campo magnético que se cierran en la frontera del dominio del Sol, la Heliosfera; por ello cerca del Sol se ven como si estuvieran abiertas. Durante el mínimo de actividad solar se encuentran en los polos, pueden durar varios años y ocupar una área muy grande. Conforme el ciclo solar avanza, se localizan en regiones de más baja latitud y disminuyen de tamaño y duración. Los hoyos coronales pueden interpretarse como una conexión entre el Sol y el medio interplanetario. La medición de la dispersión por electrones libres de luz visible (dispersión Thomson) es una medida de la densidad electrónica en la corona. Al realizarla en los hoyos coronales se observa que éstos tienen menores densidades que los alrededores así mismo sus temperaturas también son menores, y por ello, estas estructuras se observan oscuras en comparación con el entorno.

*Las ráfagas* son eventos explosivos en la corona solar, donde se aceleran elec-



trones, protones y iones pesados a velocidades cercanas a las de la luz, así, el plasma se calienta hasta  $\sim 10^7$  K y tiene energías del orden de  $10^{30}$  a  $10^{32}$  ergs, [Gosling, 1993]. Las ráfagas emiten radiación electromagnética en un amplio rango de longitudes de onda desde rayos  $\gamma$  hasta ondas de radio, como resultado de la conversión de la energía magnética en energía cinética de las partículas del medio, y se observan como un abrillantamiento en  $H_{\alpha}$ . Las ráfagas se clasifican en tres formas, la primera por su importancia óptica o abrillantamiento con numeración progresiva conforme aumenta su brillo. A las más débiles empezando con el número 1 se les asigna una S que se refiere a subráfaga. La segunda clasificación se refiere a su luminosidad: F es débil, N normal y B altamente luminosa. La tercera y más común clasificación tiene que ver con el flujo de energía en  $\frac{W}{m^2}$ , hay cinco tipos:  $A \geq 10^{-8}$ ,  $B \geq 10^{-7}$ ,  $C \geq 10^{-6}$ ,  $M \geq 10^{-5}$  y finalmente  $X \geq 10^{-4}$ . Para cada clase se utiliza una escala lineal del 1 al 9, así X2 es dos veces mayor que X1.

*Las prominencias* son estructuras magnéticas grandes y luminosas que permanecen ancladas a la superficie solar y son fuente de plasma frío. Algunas duran varias semanas, mientras que otras son de carácter eruptivo. Éstas últimas están asociadas a las Eyecciones de Masa Coronal (EMC).

Una EMC es una burbuja de plasma que es eyectada de la corona solar y viaja por el medio interplanetario, perturbando al viento solar. La masa de las mismas es del orden de  $10^{13} Kg$ , las rápidas generan ondas de choque en el medio interplanetario, así como eventos de partículas solares energéticas. Las velocidades de las EMC van de 100 hasta 2000 Km/seg y son los eventos explosivos solares de mayor escala.

La ocurrencia de ráfagas, prominencias y EMC sigue al ciclo de manchas solares, [Suess and Tsurutani, 1998].

## 1.2. Actividad Solar.

Como ya se mencionó, el número de manchas solares presenta un comportamiento periódico, al que se le llama Ciclo Solar, que tiene una duración promedio de 11 años.

En la Figura 1.5 se muestran los ciclos solares del 19 al 23. Los ciclos solares se inician por convención en un mínimo de manchas y terminan alrededor de 11 años después en el siguiente mínimo. Debido a que a partir de 1755 se tienen

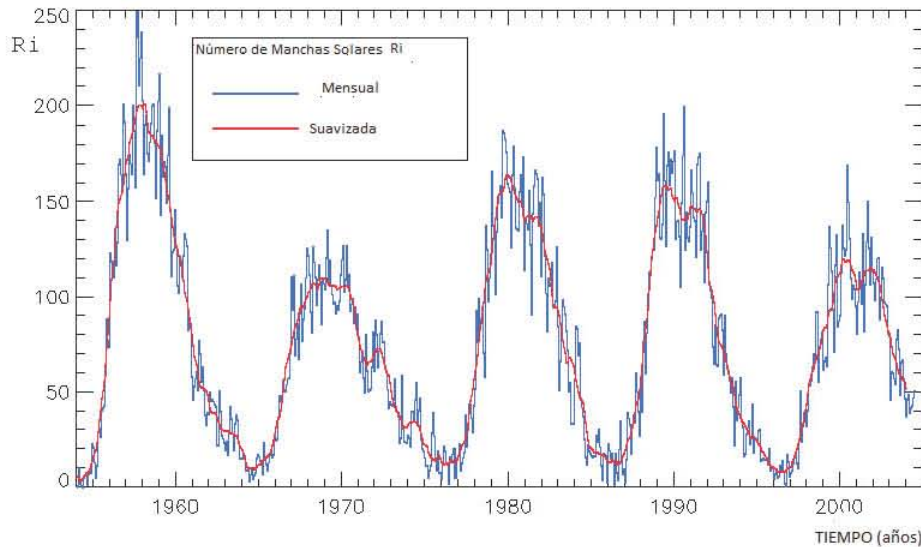


Figura 1.5: Ciclo de Manchas solares.

La fase ascendente del ciclo tiene mayor pendiente, que la fase descendente, la línea continua es el promedio anual (tomada de <http://sidc.oma.be>).

datos más confiables del número de manchas, el ciclo solar 1 comenzó a partir de éste año

Podemos distinguir cuatro fases del ciclo solar en el número de manchas: la ascendente, el máximo, la descendente y, finalmente, el mínimo (Figura 1.5).

El estudio de las manchas solares ha dado información crucial a la Física Solar; para entender su comportamiento se propone el *modelo del dinamo solar*, (Figura 1.6) que describe los cambios que sufre el campo magnético solar, [Cravens, 1997].

La existencia de la zona convectiva da lugar a la generación de un campo magnético dipolar (Figura 1.6(a)). El modelo presupone que se cumple el Teorema de Alfvén, por lo tanto, las líneas de campo magnético poloidal sufren los efectos de la rotación diferencial del plasma en la superficie solar más rápidamente en el Ecuador que en los polos, esto es lo que se conoce como efecto  $\omega$  (Figura 1.6(b)). Conforme avanza el ciclo solar, las líneas de campo magnético se enroscan cada vez más, hasta que se vuelven boyantes y aparecen en la fotosfera como arcos magnéticos; una vez allí, son afectadas por la fuerza de Coriolis, para convertirse en pequeñas componentes poloidales que restituyen el campo

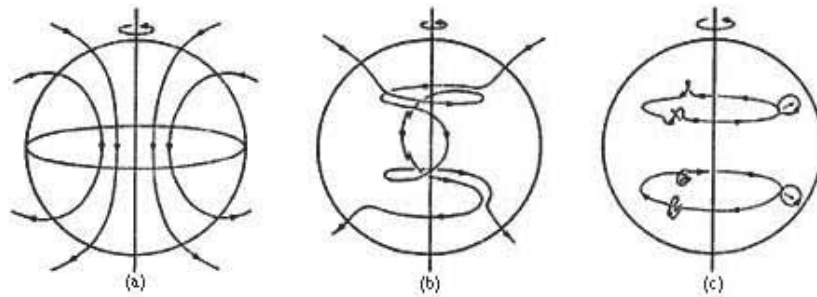


Figura 1.6: Modelo del Dinamo solar

(a) Inicio del ciclo solar con una configuración dipolar. (b) La rotación diferencial convierte al campo dipolar en toroidal (efecto  $\omega$ ). (c) La emergencia de arcos en las latitudes de  $\sim \pm 45^\circ$  regeneran al campo poloidal pero con polaridad opuesta (efecto  $\alpha$ ). (tomado de <http://www.vega00.com/2011/07/la-dinamo-solar/>).

dipolar conformado el efecto  $\alpha$  (Figura 1.6(c)). Al pasar de una configuración dipolar a la siguiente, transcurren alrededor de 11 años y se invierte la polaridad magnética del dipolo. La inversión ocurre durante la fase del máximo solar. Dado que la orientación del dipolo se reestablece cada 22 años a este período se le conoce como el ciclo magnético solar.

Podemos concluir entonces que la actividad solar se debe a dos características de nuestra estrella: la existencia de la zona convectiva donde se genera el campo dipolar del Sol, y la rotación diferencial que motiva los efectos  $\alpha - \omega$ .

## Capítulo 2

# El Medio interplanetario

### 2.1. Viento Solar

El Sol tiene una atmósfera en equilibrio termodinámico que expulsa un plasma altamente ionizado, propuesto por Parker en 1958, y al que en lo sucesivo se le llamó *viento solar*.

El viento solar es una extensión de la corona solar, que al estar a temperaturas de pocos millones de grados K no puede ser retenida por la fuerza gravitacional del Sol y se expande a velocidad supermagnetosónica, así permea todo el medio interplanetario formando la Heliosfera, es decir una región donde los procesos físicos del Sol rigen su entorno.

Las características y composición del viento solar son consecuencia directa de la actividad de la corona solar. Debido a su alta conductividad, el plasma arrastra consigo al campo magnético solar (teorema de Alfvén), conformando al campo magnético interplanetario (CMI).

#### 2.1.1. Tobera de De Laval

Las ecuaciones hidrodinámicas que describen la expansión de la corona solar son similares a las ecuaciones que describen la expansión de un gas en la tobera de De Laval. Para un gas que fluye a través de un tubo con área de sección transversal (Figura 2.1) que disminuye continuamente, el flujo de masa en estado estacionario es constante, por lo que se cumple:

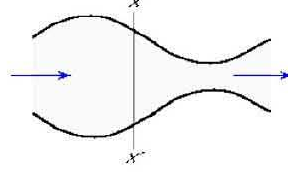


Figura 2.1: Tobera de De Laval

Tobera de De Laval ([http://gravity.wikia.com/wiki/De\\_Laval\\_nozzle](http://gravity.wikia.com/wiki/De_Laval_nozzle)).

$$s\rho\bar{V} = \text{constante} \quad (2.1)$$

Donde  $s$  es el área de la sección transversal,  $\rho$  es la densidad de masa y  $\bar{V}$  es la velocidad del flujo. La ecuación de movimiento del fluido en este caso es la ecuación de Euler:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V\nabla)V = F - \frac{1}{\rho}\nabla p \quad (2.2)$$

En esta ecuación  $p$  es la presión y  $F$  es la fuerza. Considerando un flujo estacionario en una dimensión, se obtiene

$$dp = -\rho V dV \quad (2.3)$$

O bien:

$$\frac{dp}{d\rho} \frac{d\rho}{dV} = -V dV \quad (2.4)$$

Si consideramos un proceso adiabático, la velocidad del sonido  $C_s$  se puede calcular mediante la relación  $C_s^2 = \frac{dp}{d\rho}$ , aplicándola a (2.4) queda:

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{V}{C_s^2} dV \quad (2.5)$$

No es crítico el considerar un proceso adiabático, ya que en un proceso isotérmico, los resultados obtenidos no cambian. Al tomar el logaritmo de (2.1) y derivar (derivada logarítmica):

$$\frac{ds}{s} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (2.6)$$

Sustituyendo (2.5) en (2.6) la expresión que resulta es

$$\frac{ds}{s} = \left[ \frac{V^2}{C_s^2} - 1 \right] \frac{dV}{V} \quad (2.7)$$

En tanto la tobera converja ( $ds < 0$ ) y la velocidad aumente ( $dV > 0$ ),  $V$  deberá ser menor que  $C_s$  (la velocidad del flujo es subsónica). Cuando la tobera deja de converger,  $V = C_s$ , implicando  $ds = 0$ , entonces la velocidad del flujo es la velocidad del sonido en el cuello. Después de este punto, la tobera diverge ( $ds > 0$ ) y la velocidad del flujo puede ser supersónica (si  $V$  continúa aumentando). El tubo convergente-divergente se comportará como un tubo de Venturi o como una tobera de De Laval, dependiendo del cociente de la presión río arriba y la presión río abajo. Después de que el flujo ha alcanzado una velocidad sónica en el cuello, puede incrementar su velocidad (velocidad supersónica), dejando que se expanda y enfríe y luego calentándose. Este es el principio del “afterburner” o posterior a la combustión de las máquinas jet. Si el flujo no alcanza la velocidad del sonido en el cuello o en un punto posterior, la velocidad disminuye conforme el flujo avanza en el tubo divergente.

### 2.1.2. Expansión coronal supersónica

Ahora se aplicará el tratamiento anterior al problema de la corona solar en expansión. Las suposiciones respecto a la corona son las siguientes:

1. La corona se comporta como un gas ideal.
2. Las colisiones entre las partículas del plasma son lo suficientemente frecuentes, de manera que prevalece el equilibrio termodinámico local, en cuanto a la distribución de velocidad.
3. Las únicas fuerzas que actúan sobre el gas coronal son las fuerzas inerciales y gravitacionales.
4. El flujo que surge de la corona solar sólo tiene una dependencia radial y diverge monótonamente como el cuadrado de la distancia al centro del Sol.

Al incluir la fuerza gravitacional en (2.3), se obtiene

$$dp = -\rho V dV - \rho \frac{M_{\odot} G}{r^2} dr \quad (2.8)$$

donde  $r$  es la distancia heliocéntrica,  $M_{\odot}$  es la masa solar y  $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{Kg}^{-2}$  es la constante gravitacional. Sustituyendo (2.8) en (2.6):

$$\frac{ds}{s} = \left[ \frac{V^2}{C_s^2} - 1 \right] \frac{dV}{V} + \frac{M_\odot G}{C_s^2 r} \frac{dr}{r} \quad (2.9)$$

para una expansión con simetría esférica

$$\frac{ds}{s} = \frac{2}{r} dr \quad (2.10)$$

al sustituir (2.9) en (2.10) se obtiene

$$\left[ 2 - \frac{M_\odot G}{C_s^2 r} \right] \frac{dr}{r} = \left[ \frac{V^2}{C_s^2} - 1 \right] \frac{dV}{V} \quad (2.11)$$

la distancia heliosférica a la cual el flujo se hace sónico es

$$r_c = \frac{M_\odot G}{2C_s^2} \quad (2.12)$$

Si la distancia heliosférica es menor que  $r_c$ , la velocidad de flujo coronal es subsónica, si la distancia heliosférica es mayor que  $r_c$ , la velocidad de flujo coronal es supersónica (siempre que la velocidad esté aumentando monótonamente). Pero la velocidad del sonido depende de la temperatura,  $C_s = (2\gamma kT/m)^{\frac{1}{2}}$ , así que  $r_c$  disminuye al aumentar la temperatura. Cuando la temperatura es tal que  $r_c$  es menor que el radio del Sol, el flujo coronal será siempre subsónico. Esta situación es equivalente a que, en la tobera de De Laval, el flujo se haga sónico antes del cuello de la tobera y entonces el flujo será siempre subsónico a partir de ese punto. La temperatura máxima  $T_m$  a la que puede ocurrir una expansión supersónica se puede obtener igualando  $r_c$  con el radio del Sol:

$$T_m = \frac{mM_\odot G}{4\gamma kR_\odot} \quad (2.13)$$

Las soluciones de (2.11) se ven en la Figura 2.2. El viento solar puede caracterizarse en términos de la velocidad. Se dice que el viento solar es lento cuando sus velocidades son  $\leq 500$  Km/seg, y esta asociado a regiones magnéticamente cerradas, los cascos coronales y a los bordes de los hoyos coronales. El viento solar rápido está caracterizado por tener velocidades  $>500$  Km/seg, y procede de los hoyos coronales.

En la Tabla 2.1 se presentan las propiedades principales del viento solar lento y rápido, Morales and Caballero [2010].

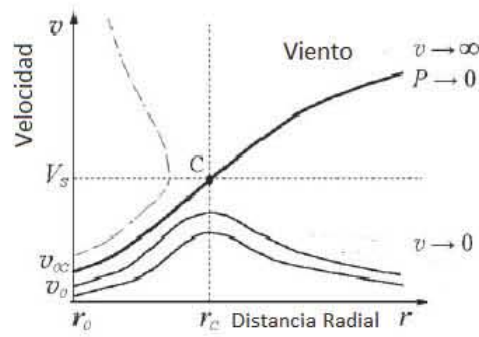


Figura 2.2: Soluciones de la ecuación 2.11 para la velocidad.

Tabla 2.1: Propiedades del viento solar rápido y lento a 1 UA

Propiedades	Viento lento	Viento rápido
Velocidad (V)	$\leq 500 \text{ km/s}$	$> 500 \text{ km/s}$
Densidad (n)	$\sim 10 \text{ cm}^{-3}$	$\sim 3 \text{ cm}^{-3}$
Flujo (nV)	$\sim 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Temperatura ( $T_p$ )	$\sim 4 \times 10^4 \text{ K}$	$\sim 2 \times 10^5 \text{ K}$
Temperatura ( $T_e$ )	$\sim 1,3 \times 10^5 \text{ K}$	$\sim 1 \times 10^5 \text{ K}$
Magnitud de $B_r$	$\sim 3 \text{ nT}$	$\sim 3 \text{ nT}$
Composición (He/H)	$\sim 1 - 3 \%$	$\sim 5 \%$

1 UA  $1.495 \times 10^8 \text{ km}$



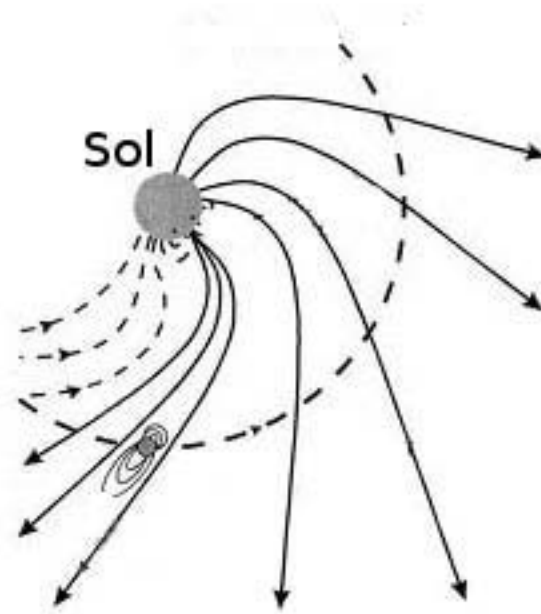


Figura 2.3: Espiral de Parker. Tomado de Vallée [1988]

## 2.2. Espiral de Parker

El plasma de la corona solar se aleja del Sol, llevándolo consigo el campo magnético, dada su alta conductividad, sin embargo el campo magnético arraigado permanece anclado al Sol, creándose una estructura similar a una espiral denominada espiral de Parker (Figura 2.3).

El plasma del viento solar se encuentra bajo la acción de dos campos eléctricos, el que se produce por el movimiento del plasma dentro de un campo magnético denotado como campo eléctrico convectivo ( $\vec{\omega} \times \vec{B}$ ), y el existente en el medio  $\vec{E}$ . [Crawford, 1997].

Podemos escribir la ley de Ohm como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}_T \quad (2.14)$$

donde  $\vec{J}$  es la densidad de corriente,  $\sigma$  la conductividad eléctrica, y  $\vec{E}_T$  el campo eléctrico total, que para este caso es la suma del campo eléctrico convectivo, y el campo eléctrico existente  $\vec{E}$ .

Sustituyendo en (2.14) :

$$\bar{J} = \sigma [(\bar{v} \times \bar{B}) + \bar{E}] \quad (2.15)$$

la cual puede escribirse como:

$$\frac{\bar{J}}{\sigma} = [(\bar{v} \times \bar{B}) + \bar{E}] \quad (2.16)$$

como es un plasma con conductividad infinita  $\sigma \rightarrow \infty$ ,  $\bar{J}$  debe ser finita, ello implica que

$$[(\bar{v} \times \bar{B}) + \bar{E}] = 0 \quad (2.17)$$

$$-(\bar{v} \times \bar{B}) = \bar{E} \quad (2.18)$$

Este campo eléctrico se relaciona con el campo magnético a partir de la ley de Faraday:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.19)$$

Sustituyendo la ecuación (2.18) en (2.19) obtenemos:

$$\nabla \times (-\bar{v} \times \bar{B}) = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.20)$$

Si consideramos el caso estacionario, es decir  $\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0$ :

$$\nabla \times (\bar{v} \times \bar{B}) = 0 \quad (2.21)$$

Entonces, las componentes del CMI son en coordenadas esféricas:

$$B_r = B_{r_0} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (2.22)$$

$$B_\theta = 0 \quad (2.23)$$

$$B_\varphi = -\frac{r_0}{r} \tan \psi B_{r_0} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right] \quad (2.24)$$

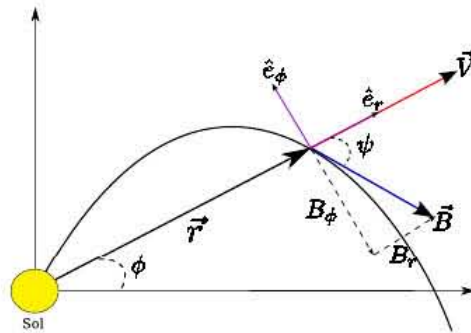


Figura 2.4:  
Diagrama tomado de Morales y Caballero, [2010] .

El valor para  $r_0$  es para la superficie potencial suficientemente cercana a la superficie solar y se pueden apreciar en la Figura 2.4, Kivelson and Russell [1995].

### 2.3. Hoja neutra de corriente heliosférica.

La Hoja Neutra de Corriente (HNC) es una estructura del CMI. Como el hemisferio norte del Sol tiene una polaridad y el sur la opuesta, entre ambos hemisferios se forma una hoja de corriente, la HNC. (Figura 2.5)

Si el eje magnético del Sol coincidiera con su eje de rotación, la HNC sería plana y se localizaría en el plano de la eclíptica. Sin embargo, el ecuador magnético forma un ángulo con respecto al ecuador heliosférico, y la rotación del Sol produce que la HNC tenga una forma ondulada. Adicionalmente es deformada por la evolución que las estructuras solares que son fuente sufren a lo largo del ciclo solar.

La forma de espiral de las líneas de CMI significa que hay una componente radial importante de la corriente eléctrica en la HNC junto con la componente azimutal. El cruce de la Tierra por la HNC se identifica por los cambios de polaridad del CMI que se observan en los registros de campo magnético.

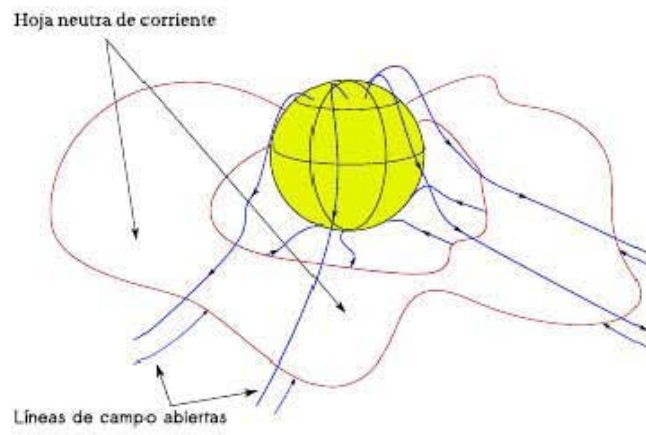


Figura 2.5: Hoja Neutra de Corriente Heliosférica HNC/H (Diagrama tomado de Morales y Caballero, [2010]).

## Capítulo 3

# La Magnetosfera Terrestre.

### 3.1. Descripción de la magnetosfera terrestre

El plasma del viento solar impacta con la envoltura magnética terrestre sin penetrarla, desviándose a sus costados, y formando una región en el medio interplanetario llamada magnetosfera. Esto se debe a que el CMI, así como el geomagnético se encuentran congelados en el plasma debido a su alta conductividad (Teorema de Alfvén).

El viento solar ejerce una presión cinética que distorsiona la parte día o frontal de la magnetosfera. Por otra parte, el lado noche se expande formando una larga cola magnética que va más allá de la órbita lunar (Figura 3.1).

El plasma de la magnetosfera se alimenta del viento solar así como del plasma que proviene de la ionosfera terrestre, así el plasma de la magnetosfera esta formado principalmente de protones, electrones, y algunas trazas de iones de  $O^{+}$  y  $He^{+}$ .

Las parte interna de la magnetosfera está lejos de ser uniforme y simple. Se distinguen en ella diferentes regiones con propiedades que las caracterizan según los procesos físicos imperantes, variando la densidad, temperatura, topología,  $\beta$  de plasma, definida como el cociente de la presión dinámica ( $p_d$ ) entre la presión magnética ( $p_m$ ) ( $\beta = \frac{p_d}{p_m} = \frac{nk_B T}{(B^2/2\mu_0)}$ ), etc.

La forma y tamaño de la magnetosfera será consecuencia de la interacción del viento solar (la energía y características que éste lleve) con el campo geomagnético y en sus "ajustes" se crearán sistemas de corriente que tenderán a esta-

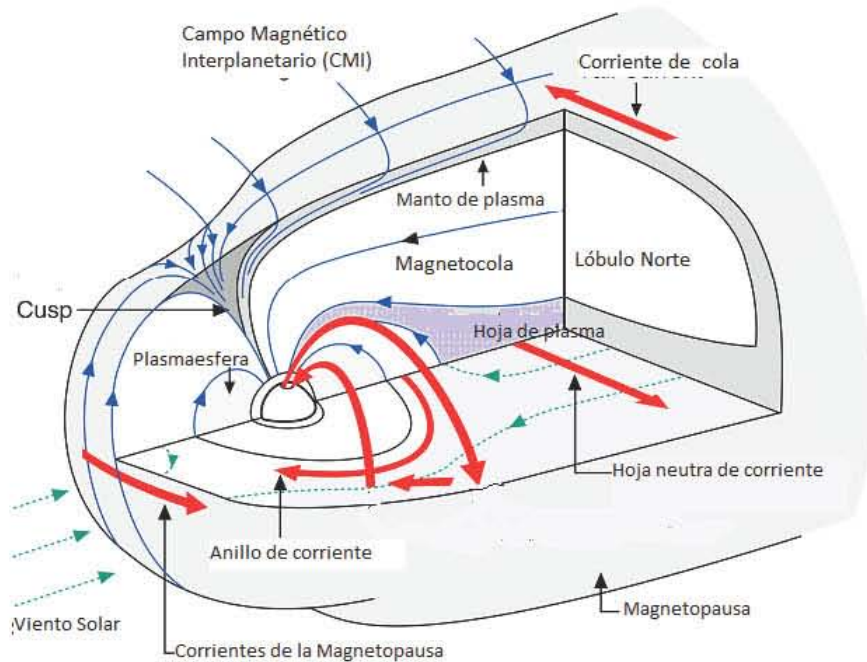


Figura 3.1: Magnetosfera Terrestre.

En la magnetosfera terrestre, esquematizada en este diagrama, las flechas gruesas muestran el sistema de corrientes (tomado de (<http://solyespacio.wordpress.com/inicio/>)).

bilizarla.

El CMI contenido en el Viento Solar fluctúa entre 3 y 10 nT y se incrementa en la magnetofunda, ya que se condensa, pero aún es pequeño comparado con el campo magnético de la magnetopausa, ocasionando una disminución del valor de  $\beta$ . Es aquí donde se llevan a cabo los procesos de reconexión (lado día) para configuraciones  $B_z$  sur del CMI, así como los procesos de acarreamiento de plasma.

El ángulo entre la magnetofunda y el campo magnético magnetosférico define el esfuerzo de corte magnético a través de la magnetopausa. Cuando el esfuerzo de corte es menor a  $30^\circ$ , se forma una capa de transición justo afuera de la magnetofunda también llamada capa de depleción del plasma.

A continuación se presenta en las Tablas 3.1, 3.1 las regiones principales de la magnetosfera, mismas que se observan en la Figura 3.1.

Las corrientes generadas en la magnetosfera terrestre son muy importantes para

Tabla 3.1: *Regiones de la magnetósfera terrestre.*

Región de la Magnetosfera Terrestre	Para referencia ver Figura 3.1
MAGNETOFUNDA	Zona de transición entre el viento solar y la magnetósfera formada por plasma del viento solar chocado, que al comprimirse aumenta su densidad y turbulencia, calentándose y disminuyendo su velocidad. En ella se equilibran la presiones de la magnetosfera y el viento solar . La $\beta$ del plasma se incrementa.
MAGNETOPAUSA	Las corrientes de Chapman-Ferraro o corrientes de la magnetopausa separan el plasma de la magnetofunda (Figura 3.2)
PLASMAESFERA	Se extiende hasta las últimas líneas del campo geomagnético que son cerradas de campo geomagnético, tanto del lado día como del lado noche. Aquí el campo magnético es semejante a un campo dipolar y se mueve a la vez que la atmósfera terrestre. La densidad en ella es de $500\text{cm}^{-3}$ , sin embargo, fuera de la misma ésta decrece rápidamente y sus protones ya no tienen que ver con la rotación terrestre. A latitudes magnéticas más altas, cerca de los polos, las líneas de campo se encuentran estiradas hacia la cola (lado noche) y por ellas fluye el plasma que escapa de la ionosfera y que sigue estas líneas hasta las profundidades de la cola magnetosférica. A este movimiento de salida del plasma de altas latitudes se le llama viento polar.
CINTURONES DE RADIACIÓN	Prácticamente dentro de la plasmaesfera se encuentran dos cinturones de radiación, uno de ellos descubierto por Van Allen con la nave Explorer I. Uno está constituido principalmente por protones y el otro por electrones, ambos son relativamente estables. El cinturón interior, está constituido principalmente por protones a $0.5 R_T$ y el cinturón exterior puede llegar hasta la magnetopausa y esta constituido principalmente por electrones (densidad $n_e = 1\text{cm}^{-3}$ y temperatura $T_e = 5 \times 10^7 K$ ).

Tabla 3.2: *Regiones de la magnetósfera terrestre, continuación.*

Región de la magnetósfera	Para referencia ver Figura 3.1
ANILLOS DE CORRIENTE	Se enriquecen del viento solar incidente en la magnetosfera haciendo variar su grosor y densidad. Las energías asociadas van de 20KeV a 300 KeV . Se encuentran localizados entre 2 y 7 $R_E$ [Gonzalez et al., 1994], y generan un campo magnético opuesto al geomagnético.
CUÑA	Las cuñas magnéticas son regiones estrechas de líneas de campo abiertas, las cuales se extienden en dirección al polo inmediatamente después de la última línea de campo geomagnético cerrada del lado día. Las líneas de campo abiertas de la cuña se conectan a las líneas de campo interplanetario, lo que permite que el plasma río abajo del choque entre en la magnetósfera pudiendo penetrar hasta la ionósfera. En la cuña las partículas se aceleran hacia abajo extrayendo material inclusive de la ionosfera. Los iones tienen energías de 8eV a 5KeV y los electrones de 70 eV a 0.1KeV.
MAGNETOCOLA,	En la magnetocola habitan diferentes estructuras entre las que se encuentra la hoja de plasma. Es propia del lado noche y se extiende más allá de la órbita lunar.
HOJA DE PLASMA	Es una estructura de plasma caliente en la región ecuatorial de la magnetocola. Su densidad es menor que $1 \times 10^6 \text{m}^{-3}$ , su energía asociada es del orden de 3keV, extendiéndose por el lado noche hasta 120 $R_E$ . Esta hoja de plasma se encuentra contenida en líneas de campo cerradas que la delimitan.
MANTO	Es la región formada por las líneas del campo magnético interplanetario reconectadas con las líneas del campo geomagnético y que posteriormente son arrastradas por el viento solar. La densidad del plasma en el manto es aproximadamente de $1 \times 10^4 \text{m}^{-3}$ . Los iones tienen una energía de 300 eV y los electrones tienen una energía de 50 eV. La fuente principal de partículas en el manto es el viento solar. El flujo dominante tiene dirección anti-solar. Las partículas del manto se mueven hacia la región ecuatorial por flujos convectivos en los lóbulos.
LÓBULOS	Están formados por líneas de campo geomagnético que son clongadas del lado noche. La densidad del plasma en los lóbulos es aproximadamente de $1 \times 10^4$ a $1 \times 10^5 \text{m}^{-3}$ . Los iones tienen una energía de 0.3 a 1 KeV.



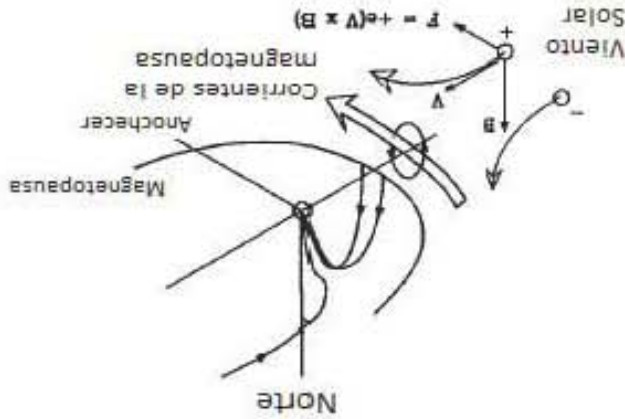


Figura 3.2: Corrientes de la magnetopausa o de Chapman-Ferraro. El sistema de corrientes de la magnetopausa se encuentra esquematizado aquí. Se muestra la acción de la fuerza de Lorentz sobre las electrones e iones positivos. Tomado de [Tsvetsov and Kiselev, 1993].

su estructura, ya que transportan carga, masa y energía. Por otra parte, las corrientes crean campos magnéticos que pueden distorsionar en forma importante a la magnetosfera. Russell (2003) (Figura 3.1).

La composición del campo geomagnético en el lado diurno, asociada con el flujo de corriente a través de la superficie de la magnetopausa, forma las corrientes de la magnetopausa, en la cual se da la cuenta de las partículas que son atraídas por la fuerza de Lorentz; esto es, los electrones circulan hacia el amanecer y los iones positivos hacia el atardecer (Figura 3.2).

Las corrientes de anillo tienen significativamente en la configuración de la magnetosfera interior. Los flujos que rodean la tierra a latitudes cercanas en dirección oeste a una distancia radial de varios radios terrestres ( $R_E$ ), transportan partículas que provienen de los cinturones de radiación, siendo atraídas por varias órbitas, expresadas como movimientos de resaca alrededor de la tierra. Este sistema de corrientes es alimentado por varios procesos. El que es más importante para los flujos de este trabajo, mas no el único, es aquel en el que ingresan partículas debido a la reconexión en el lado día, alimentando los flujos de radiación. Al derivar por diferentes procesos intermedios la variabilidad de los anillos de corriente.

Los iones que fluyen hacia el amanecer estando más significativamente entre  $\pm 40^\circ$  de latitud y localizados entre los  $5$  y  $6 R_E$ , generan un campo magnético

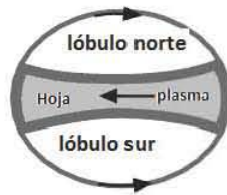


Figura 3.3: Sistema de corrientes de la magnetocola.

Las flechas negras indican las corrientes que se dan en la magnetocola terrestre. Nótese los dos lóbulos, uno superior o norte y otro en el sur. ([http://stargazers.gsfc.nasa.gov/resources/earth\\_magnetosphere\\_sp.htm](http://stargazers.gsfc.nasa.gov/resources/earth_magnetosphere_sp.htm)).

opuesto al geomagnético. Este proceso se refleja en el gráfico del índice geomagnético Dst en la componente horizontal del campo magnético. El Dst muestra un decremento que es la firma que tipifica el proceso denominado tormenta geomagnética (TG).

Las corrientes de la cola magnetosférica se encuentran conformando un doble circuito. En la Figura 3.3 las flechas negras marcan el sentido de estas corrientes, mientras que la zona gris alberga la hoja neutra de corriente. Los campos magnéticos en cada lóbulo van en sentidos contrarios, en el lóbulo norte salen de la página, en tanto que en el lóbulo sur, entran. Ello produce las condiciones para que se de el proceso de reconexión magnética, éste es tan sólo uno de los motivos por los que la dinámica en la hoja de plasma, parte central de la magnetocola, juega un papel vital en la actividad geomagnética de la magnetosfera.

La hoja de plasma lleva una corriente de  $\sim 10^5$  amperes, decreciendo lentamente después de  $30 R_E$ . Las energías promedio para los electrones van de 0.5 a 1 keV, en tanto que para los iones van de 2 a 5 keV, y su densidad es de  $5 \times 10^5 \text{m}^{-3}$ .

## 3.2. Reconexión magnética

La reconexión magnética es un mecanismo propuesto para explicar la conversión de energía magnética a energía cinética y es esencialmente una reestructuración topológica del campo magnético causada por cambios en la continuidad de las líneas de campo [Priest, 2000]. Por lo que el concepto de reconexión está íntimamente ligado al concepto del línea de campo. La reconexión no ocurre en el caso hipotético de perfecta conductividad cuando dos elementos de plasma ubicados en cualquier lugar a lo largo de una línea de campo, permanecen en la

misma. ¿Cuándo no se cumple lo anterior? La respuesta a esta pregunta nos dará los elementos para describir el proceso de reconexión magnética. Se da cuando se tienen campos magnéticos en sentidos contrarios, separados por una hoja de corriente. Si  $L$  (longitud característica) es pequeña, el número de Reynolds magnético ( $R_m$ ) disminuye, así las condiciones MHD ya no son válidas y el teorema de Alfvén no se cumple, es decir, la conductividad ya no es infinita:

El número de  $R_m$  se define como:

$$R_m = \mu_0 \sigma v L \quad (3.1)$$

donde :

$\mu_0$  es la permisividad magnética del espacio vacío,

$\sigma$  es la conductividad eléctrica,

$v$  es la velocidad del plasma y

$L$  es la longitud característica.

El plasma obedece a la ecuación de inducción (3.2).

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\bar{v} \times \bar{B}) + D_B \nabla^2 \bar{B} \quad (3.2)$$

$D_B = \frac{1}{\mu_0 \sigma}$  : coeficiente de difusión.

El primer término del lado derecho es el convectivo y el segundo el difusivo.

Es conveniente recordar que  $R_m$  también se define en términos de (3.2) como:

$$R_m = \frac{\nabla \times (\bar{v} \times \bar{B})}{D_B \nabla^2 \bar{B}} = \frac{\text{Término Convectivo}}{\text{Término Difusivo}} \quad (3.3)$$

En la zona de reconexión, al disminuir la velocidad la componente convectiva disminuye, siendo predominante el término difusivo; esto tiene dos implicaciones:

La primera:  $R_m \lll 1$ , dada la predominancia del término difusivo. Y la segunda, como  $R_m \lll 1$ ,  $D_B$  es grande y ello implica que  $\sigma \rightarrow \text{disminuye}$

Esto hace que las condiciones para que se cumpla el Teorema de Alfvén ya no existan, propiciando la reconexión magnética [Kivelson and Russell, 1995].

El flujo magnético que se difunde debido al gradiente de campo hacia el plano central, donde se aniquila con el flujo en direcciones opuestas desde un lado hacia otro de la hoja, reduce el gradiente de campo, y con ello la tasa de difusión retardando el proceso.

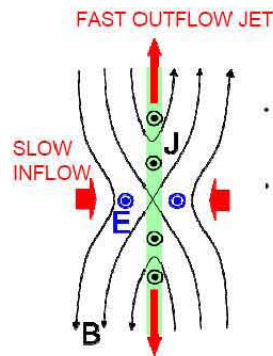


Figura 3.4: Reconexión Magnética  
Diagrama del proceso de reconexión magnética.

Sin embargo, la energía del campo magnético se ha convertido en calor por calentamiento Joule, y el consiguiente aumento de la presión es lo que se necesita para equilibrar la disminución de la presión magnética, con el fin de mantener este proceso en un estado estacionario.

La razón de aniquilamiento de los campos magnéticos debe ser igual a la de “reposición” del mismo, cumpliéndose la ley de Faraday e igualándose a cero para mantener el proceso.

$$\nabla \times \bar{E} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

El campo eléctrico que se observa en la Figura 3.4 es consecuencia de la variación en el tiempo del campo magnético que va llegando a la zona de aniquilación a la misma tasa, lo que nos permite igualarlo a cero.

Wawlbriek [1989] mostó analíticamente que la longitud macroscópica de la zona de difusión es una consecuencia de la conservación de la helicidad magnética. El punto de cruce en forma de X en la Figura 3.4 es donde se da la aniquilación de los campos magnéticos en direcciones opuestas, por lo tanto no se cumplen las condiciones del Teorema de Alfvén. Durante la reestructuración topológica de las líneas de campo se convertirán la energía magnética en cinética, impulsando a las partículas en dos Jets colimados por el campo eléctrico, creándose una baja en la densidad de existencia breve en la zona de difusión. La reconexión es más geoefectiva en la medida en que la componente  $B_{zsur}$  del CMI es más duradera en el lado día de la magnetosfera.

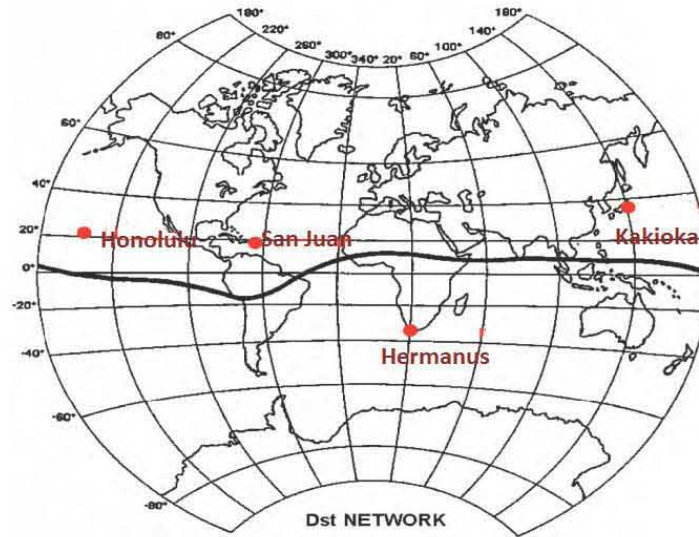


Figura 3.5: Observatorios \_Dst

Estos cuatro observatorios localizados en latitudes medias son los encargados de medir el índice geomagnético Dst. (Figura tomada de <http://swdewww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.htm>).

### 3.3. Índice Geomagnético Dst.

La variación horaria promedio, de la componente horizontal (H) del campo geomagnético en latitudes de  $\pm 40^\circ$ , medida en la superficie terrestre y debida a la corriente de anillo, conforma las mediciones del índice geomagnético Dst. Se toma de los registros de cuatro observatorios: San Juan, Kakioka, Hermanus y Honolulu (Figura 3.5).

Cuando la energía total del anillo de corriente ecuatorial se intensifica, aumenta aún más el campo magnético que se opone al campo geomagnético y el índice Dst decrece súbitamente.

Al anillo de corrientes lo constituyen partículas con energías dentro del rango de 10-300 keV, provenientes del viento solar, en su mayoría iones de  $O^+$ ,  $He^+$ ,  $H^+$  de origen ionosférico.

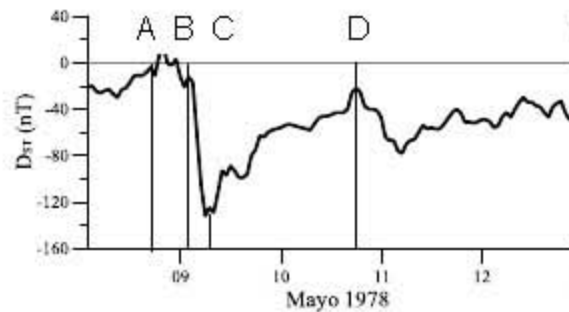


Figura 3.6: Tormenta geomagnética

Las diferentes fases de una tormenta geomagnética se encuentran delimitadas por las líneas verticales, a su vez indicadas con las letras A, B, C y D. La fase inicial o comienzo súbito inicia en A y termina en B, para dar paso a la fase principal, de B a C y finalizando con la fases de recuperación de C a D (tomado de [Dunand-Munsterola, 2010]).

### 3.4. Tormentas geomagnéticas

#### 3.4.1. Antecedentes y definición.

El viento solar al incidir en la magnetosfera terrestre promueve en ésta diversas dinámicas. Si el viento solar incide en forma prolongada y fuerte, la actividad geomagnética es intensa. Las características del CMI procedente del Sol desatarán o no mecanismos de reconexión magnética.

En el presente trabajo nos enfocaremos a la actividad geomagnética, cuando el CMI tiene componente  $B_z$  sur, que posibilita la reconexión magnética en el lado día de la magnetosfera.

Las dinámicas magnetosféricas a estudiar son las TGs, para ello partimos de las firmas que las caracterizan en la serie de tiempo horaria del índice geomagnético Dst y sus diferentes parámetros.

Una tormenta geomagnética clásica consiste de tres fases de acuerdo con la Figura 3.6:

- 1) Un incremento del campo magnético terrestre, que permanece algunas horas (fase inicial), como consecuencia de los campos magnéticos en sentido contrario generados por las corrientes de la magnetopausa. Éste corresponde a la zona comprendida entre las líneas A y B.
- 2) Un decrecimiento en  $H$  del campo geomagnético, alcanza un mínimo en aprox-

inadadamente un día (fase principal), por el enriquecimiento de los anillos de corriente. Zona entre las líneas B y C.

3) Una lenta recuperación de H que alcanza valores normales después de varios días (fase de recuperación), debido al enrarecimiento de los anillos de corriente. Zona entre las líneas C y D.

La propiedad definitoria de una TG es el incremento del Anillo de Corriente, [Gonzalez et al., 1994] localizado normalmente entre 2 y 7  $R_t$ . En los diversos modelos se considera circular, sin embargo no lo es, ya que sufre un alargamiento hacia el lado noche.

Las tormentas geomagnéticas se clasifican de acuerdo con su intensidad, [Gonzalez et al., 1994]:

- Nivel I. El índice geomagnético Dst cumple  $Dst > -20nT$ , por lo tanto, no es considerado como TG.
- Nivel II. TGs “débiles” dentro del intervalo  $-50nT < Dst \leq -20nT$
- Nivel III. TGs “moderadas” dentro del intervalo  $-100nT < Dst \leq -50nT$
- Nivel IV. TGs “mayores” dentro del intervalo  $-150nT < Dst \leq -100nT$
- Nivel V. TGs “severas” dentro del intervalo  $-150nT \leq Dst$ .

### 3.4.2. Componente $B_z$ sur en el CMI.

Las EMC tipo halo son la principal causa de las tormentas geomagnéticas de gran tamaño [Xie et al., 2004]; [Burlaga et. al., 2002]; [Zhang et al. 2003]; además la estructura más geoefectiva es la funda [Ontiveros and Gonzalez-Esparza, 2010]. Resulta más frecuentes los fenómenos transitorios (transientes) que producen actividad geomagnética cuando proceden de fuentes solares del hemisferio occidental [Xie et al., 2004]

Para nuestros propósitos nos enfocaremos en EMCI y su interacción con la magnetosfera terrestre, ya que frecuentemente son fuente de campo magnético con componente  $B_z$  sur, hecho que propicia la reconexión magnética. (Figura 3.7)

La  $B_z$  sur también aparece cuando el Sol presenta poca actividad de la HNC. En ella viajan pequeñas parcelas de plasma, pertenecientes a los bordes de los hoyos coronales polares [Suess et al., 2009].

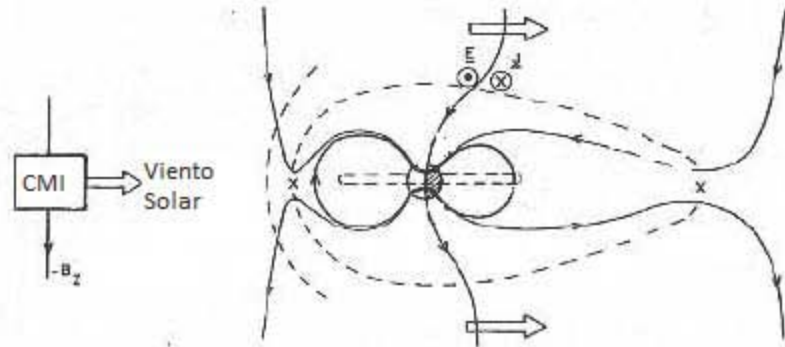


Figura 3.7: Reconexión magnética con  $B_z$  sur

Las ICs se dan cuando el CMI tiene una componente importante  $B_z$  sur, lo que permite la reconexión magnética en el lado día. En la nariz de la magnetosfera se esquematiza el aniquilamiento de las líneas de campo, punto x y reacomodamiento hacia la cola de la magnetosfera donde nuevamente se da la reconexión magnética, aumentando así la densidad de los anillos de corriente. [Suess and Tsurutani, 1998]

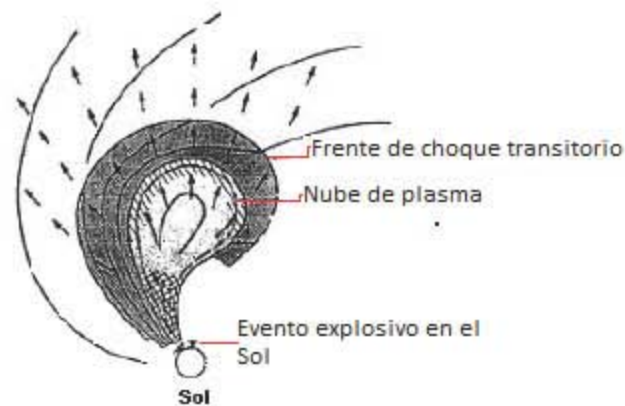


Figura 3.8: EMCI

La EMCI se expande en el medio interplanetario, generando un frente de choque, una funda y generalmente una nube de plasma (tomada de Tinoco, 2005).



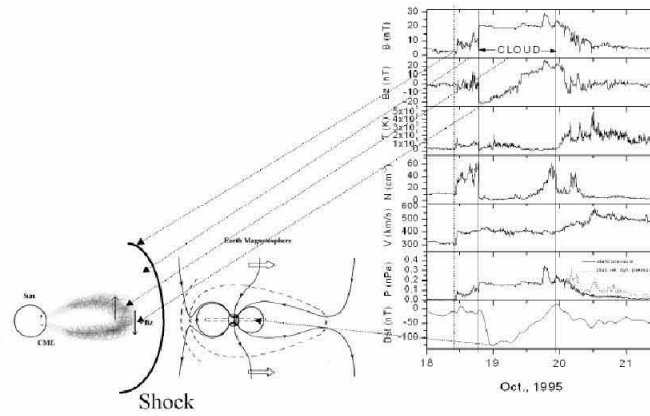


Figura 3.9: Nube magnética

Diagrama de una nube magnética observada del 18 al 20 de octubre de 1995 (tomado de [Dal Lugo et al., 2001]).

Una EMC, al ser expulsada del Sol, interacciona con el medio interplanetario. A estas estructuras que están en el medio interplanetario se les nombra Eyecciones de Masa Coronal Interplanetarias (EMCI) y esperamos firmas de su evolución en el medio interplanetario, así como de su origen en el Sol.

Como el viento solar y la EMCI son plasma con alta conductividad, no se mezclan, sin embargo interactúan. Dada la diferencia de velocidades entre las EMCI y el medio u otra EMCI, éstas se empujan o retrasan, provocando discontinuidades entre las diferentes parcelas de plasma (Figura 3.8)

Si la velocidad de la EMCI es mayor a la del viento solar ambiente, se generará una frente de choque y, detrás del mismo el plasma se densificará y calentará conformando una estructura que se denomina funda. Esta región contiene viento solar caliente y comprimido, por lo que presenta alta densidad y un campo magnético desordenado y con un incremento en su magnitud, con una  $\beta$  del plasma frecuentemente  $< 1$  debida a una fuerte componente magnética. Posterior a la funda, el campo magnético puede presentar rotación *insitu* dentro de la estructura de la “nube magnética” [Burlaga et al., 1998], que se expande al viajar, disminuyendo su temperatura y su densidad.

Las EMCI frecuentemente presentan nubes magnéticas, las cuales son identi-

ficables por patrones semisinusoidales en las componentes  $B_y$  y/o  $B_z$  (Figura 3.9).

### 3.4.3. Interacción viento solar con la magnetosfera en la dinámica de una tormenta geomagnética

El viento solar incide en la magnetosfera transfiriéndole momento, generando las corrientes de la magnetopausa (Figura 3.2), y esto da lugar a la fase del comienzo repentino de una tormenta, como consecuencia de la activación de las corrientes de la magnetopausa. Cuando el campo magnético del viento solar tiene una  $B_z$  sur en el lado día, el proceso de reconexión magnética en la nariz de la magnetósfera terrestre es posible. Su geoelectividad depende en gran parte del tiempo en que permanece la  $B_z$  sur. La entrada de partículas activará diferentes sistemas de corrientes, tales como:

- a) la corriente de anillo ecuatorial que se aproxima como un anillo de corriente hacia el oeste en el Ecuador geomagnético entre  $4-7 R_E$ ;
- b) dos electrochorros aurales, corrientes Hall hacia la medianoche, manifestación de subtormentas que pueden considerarse parte de un circuito totalmente ionosférico;
- c) una cuña de corriente ionosférica nocturna hacia el oeste, en la región auroral asociada a la corriente este-oeste en la hoja de plasma del ecuador de la cola magnética, a través de corrientes alineadas al campo, y
- d) un electrochorro ecuatorial ionosférico hacia el este del lado diurno.

Una vez activada toda la magnetosfera terrestre y aniquiladas las líneas de campo magnético por la reconexión. Las líneas de campo viajan hacia la magnetocola, propiciando la reconexión en la hoja neutra de corriente inmersa en la parte central de la hoja de plasma. Este proceso de reconexión genera haces de partículas que alimentarán al plasma de la plasmaesfera así como a los cinturones de radiación. La deriva de las mismas densificarán a los anillos de corriente. Y es en este punto donde se genera la baja intensa del índice Dst, denominada fase principal, ya que el campo magnético consecuente de las corrientes de anillo se opone al geomagnético, bajando los valores del Dst [Kivelson and Russell, 1995].

Las partículas que una vez habían densificado a los anillos de corriente, ahora se vaciaran poco a poco por efecto Joule bajan hacia la ionosfera, esto es observable en la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

## Capítulo 4

# Sistema cardiovascular.

El estudio de campos magnéticos y su relación con sistemas vivos, ha dado lugar a dos campos de investigación, el Biomagnetismo y la Magnetobiología [Williamson y Kaufman, 1981] .

*La Magnetobiología* se ocupa de los efectos producidos por campos magnéticos en los organismos, incluyendo la capacidad de orientación de algunas aves migratorias, como las generadas por teléfonos celulares o por redes eléctricas y el efecto de la actividad solar. Este último tipo de estudio ya se encuentra dentro de un subcampo relativamente nuevo llamado Heliogeobiología.

*El Biomagnetismo*, por su parte estudia la percepción de campos magnéticos generados por los propios seres vivos.

La relación entre el campo magnético y seres vivos, puede enfocarse en primera instancia en los magnetorreceptores, que como propone Kirschvink et al. [2001], deberían tener un mecanismo biofísico de transducción en el sistema nervioso. Que se ha desarrollado de rasgos ancestrales comunes a todos los animales y no como entidades separadas entre los grupos. Y estuvo sujeto a a las mismas fuerzas de la evolución como cualquier otro, genéticamente controlado por procesos biológicos. Este proceso, comenta Kirschvink et al. 2001, consiste en la elaboración de un sistema biológico como una herramienta de supervivencia auxiliares de las modalidades existentes, el nuevo sistema se desarrolla de forma independiente. Por lo tanto, el sentido magnético tiene aumento de su sensibilidad, a través de los procesos evolutivos, hasta el límite de “ruido” (como ha sucedido en el otros sentidos).

Por otra parte existen animales que pueden detectar campos magnéticos, y se

han propuesto tres mecanismos principales de percepción del campo magnético, el primero se le atribuye a los peces marinos que podría detectar el campo de la Tierra a través de la inducción electromagnética, pero sin evidencia directa. Los otros dos mecanismos consisten en reacciones biogénicas de magnetita y químicos que son modulados por campos magnéticos débiles. No obstante los avances recientes, sin embargo, los magnetoreceptores no han sido identificados con certeza en cualquier animal, y el modo de transducción para el sentido magnético sigue siendo desconocido, S.Johnsen and Lohmann [2005].

En el ser humano las células del sistema nervioso responden a la propagación de pulsos eléctricos a lo largo del cuerpo celular, que son generadas por variaciones en la permeabilidad de la membrana celular al paso de iones de sodio y potasio. En el corazón, la corriente es producida por el mismo mecanismo, aunque de forma sincronizada [Fanjul y Hiriart, 2008]. Siendo los campos magnéticos producidos en el cuerpo humano del orden de  $10^{-9}T$  a  $10^{-15}T$ , y se encuentran asociados a la actividad del Sistema Nervioso y Cardiovascular principalmente.

En sentido circadiano algunas enfermedades se presentan en periodos de vulnerabilidad. Como el infarto al miocardio, que suele presentarse con mayor frecuencia por las mañanas, [Gruart et al., 2002]. Debido a que por las mañanas hay una baja en la actividad fibrinolítica en la sangre, esto es, baja la destrucción de microcoágulos de formación espontánea aumentado con ello la probabilidad de obstrucción de vasos sanguíneos de pequeño diámetro. Por otra parte es por la mañana cuando la producción de adrenalina aumenta, propiciando la vasoconstricción de los vasos sanguíneos, acompañado por un aumento en la presión arterial y con ello se incrementa el trabajo cardiaco. Este conjunto de ciclicidades, hace vulnerable al sujeto propenso a un infarto cardiaco, por las mañanas.

#### 4.1. El sistema cardiovascular.

El corazón tiene cuatro cavidades, las cuales funcionan como dos bombas que transfieren energía mecánica al fluido, éstas trabajan sincronizada e independientemente. La derecha, al igual que la izquierda, consta de una aurícula y un ventrículo. El lado izquierdo del corazón maneja principalmente la presión y el lado derecho el volumen, por lo que el ventrículo izquierdo está provisto de mayor masa muscular. Las cavidades ventriculares son las que transfieren mayor cantidad de energía mecánica al sistema cardiovascular. En tanto que las

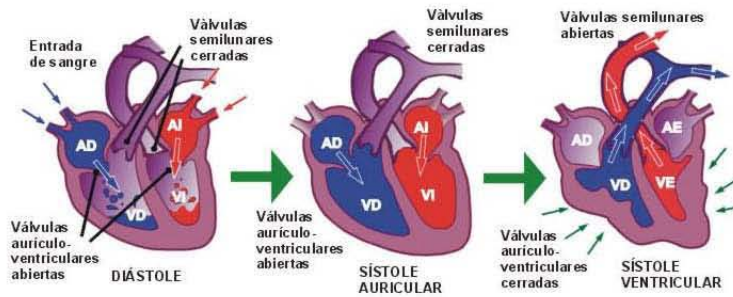


Figura 4.1: Ciclo Cardíaco

aurículas son llenadas con sangre que pasará a los ventrículos para ser expulsada al sistema vascular. La Figura 4.1 muestra un diagrama del ciclo cardíaco, éste se compone de una fase de contracción llamada sístole y una de relajación llamada diástole.

Las paredes del músculo cardíaco están formadas por varios tipos de tejido. El primero es el miocardio, también llamado músculo cardíaco que posee un potencial de reposo de  $-90$  mV y su función es similar al del músculo liso, es decir, visceral e involuntario en su función sincito (la funcionalidad individual de la células se subordina a la funcionalidad de todo el tejido) y es el encargado de la contracción muscular del corazón.

El segundo tejido es el fibroso, éste forma una placa transversal que tiene como función separar al corazón en dos partes: las aurículas (arriba), y los ventrículos (abajo). La placa sirve como aislante y posee cuatro orificios o discontinuidades, donde se albergaran las válvulas aórtica, pulmonar, mitral y tricúspide.

Por último, el tejido especializado en el proceso de excitación-conducción, sólo se excita, no se contrac. Las estructuras características del mismo son el nodo sino-auricular, haces internodales, nodo A-V, haz de Hizz (derecho e izquierdo) y fibras de Purkinje. La pared arterial es más gruesa que la venosa, ya que va a estar sometida a mayor presión.

La fuerza de empuje la provee la contracción ventricular y debe ser suficiente para que recorra todo el circuito vascular y retorne al corazón. Los valores de la presión arterial dependen del volumen de sangre que contiene el sistema arterial y las propiedades de las arterias. Si varía cualquiera de los dos parámetros, la presión se verá modificada. El volumen sistólico sale de las arterias durante el periodo de sístole, y el volumen restante distiende las arterias incrementando

la presión arterial. Al terminar la contracción ventricular, las paredes arteriales distendidas vuelven de forma pasiva a su posición de partida, y la presión arterial empuja la sangre a las arteriolas que son ramificaciones de las arterias que liberan sangre hacia los capilares.

La forma en la cual se propaga una señal se basa en el paso de iones de uno a otro lado de la membrana celular, variando la diferencia de potencial. Este proceso recibe el nombre de *Potencial de Acción*; su velocidad de propagación es en promedio de 30 cm/seg y se da por la entrada de iones sodio  $\text{Na}^{++}$  y  $\text{Ca}^{++}$  por los canales iónicos asociados a células que tienen comportamiento eléctrico rítmico.

El tejido cardíaco especializado en la excitación no requiere un umbral para dispararse, esto es propio de los ventrículos y de las aurículas.

## 4.2. Medición de la presión arterial humana

La presión arterial humana es la presión ejercida sobre las paredes arteriales y varía cíclicamente, conforme se desarrolla el ciclo cardíaco. El valor máximo recibe el nombre de *presión sistólica*, y el mínimo de *presión diastólica*. Se reporta en mmHg donde 1mmHg = 0.133 kPa. La Figura 4.2 muestra el comportamiento de la misma durante un ciclo cardíaco.

Cuando el corazón inyecta rápidamente sangre al sistema arterial como consecuencia de la compresión que ejercen las aurículas, se crea una presión en todo el sistema arterial que recibe el nombre de presión sistólica. En esta fase del ciclo cardíaco la presión es mayor. La presión mínima se mide en el momento final de la diástole; es decir cuando el corazón se encuentra relajado, previo a la contracción ventricular, y se denomina presión diastólica.

En la Figura 4.2 la presión sistólica correspondería a 120 mm Hg y la diastólica a 80 mm Hg. Estas medidas utilizan algunas convenciones; la primera es que la presión atmosférica se usa como referencia cero, los valores están dados por encima de los 760 mm Hg ambientales, y la segunda es que todas las presiones utilizadas en el aparato circulatorio se refieren a nivel del corazón.

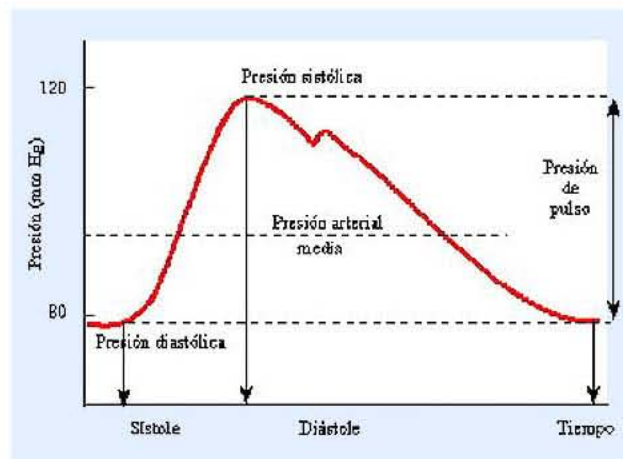


Figura 4.2: Comportamiento de la Presión Arterial Humana

La gráfica muestra el comportamiento de la presión arterial humana durante el ciclo cardíaco (<http://www.geolibros.com/verarea.asp?idarea=220&idsubcat=108&idcat=15>).

## Capítulo 5

# Datos, resultados y discusión.

Como es nuestro objetivo indagar sobre variación en la presión arterial humana, ante la presencia de TGs, iniciaremos este capítulo con un panorama de la actividad solar. Para posteriormente centrarnos en las TGs, en las que se reportó variación en la PA.

Del año 2000 al 2011 el Sol pasó del máximo a su mínimo y fase ascendente del ciclo 24, como se puede ver en el comportamiento de las manchas solares (ver Figura 5.1). Las investigaciones que nos atañen, centraron su atención en dos momentos de actividad solar muy diferentes. Uno, en eventos que sucedieron en 2001, donde encontramos del orden de 100 manchas, en Sol activo. Y el otro, en 2008, en donde no hay prácticamente manchas solares.

Así a mayor número de manchas, mayor actividad solar y aumento de descensos del índice geomagnético  $Dst$  asociadas a TG, (ver Figuras 5.2). También se presenta el comportamiento anual del  $Dst$ , del año 2000 al 2010, (ver Figura 5.3), con datos promediados cada 24 horas.

En la Figura 5.2 se puede observar que el año 2001, ocurre el mayor número de TGs con  $Dst \leq -150nT$ , este año ocupa el segundo lugar en términos de intensidad de la TGs. Elementos que hicieron de este año una buena elección para Sol activo. Por otra parte el 2008, es una año de muy baja actividad solar (ver Figuras 5.1, 5.2, 5.3).

Las TGs asociadas a Sol activo en el año 2001, no son las más intensas, pero si las más cercanas entre sí, dentro del intervalo intensidades del  $Dst \leq -150nT$ , en el año 2001. Ocurriendo tres de ellas en el mes de octubre y la cuarta a principios de noviembre. Aparecen en la gráfica con menor intensidad dado que



se tomaron datos promediados cada 24 horas

La TG asociada a Sol quieto en el año 2008, es una de las cuatro débiles TG ocurridas desde el inicio de año, con una periodicidad de 27 días.

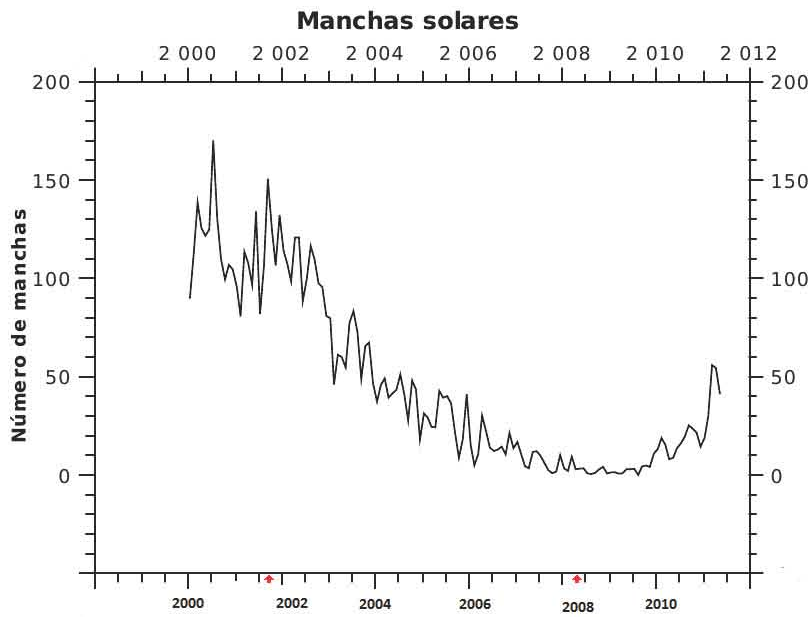


Figura 5.1: Comportamiento del número de manchas solares

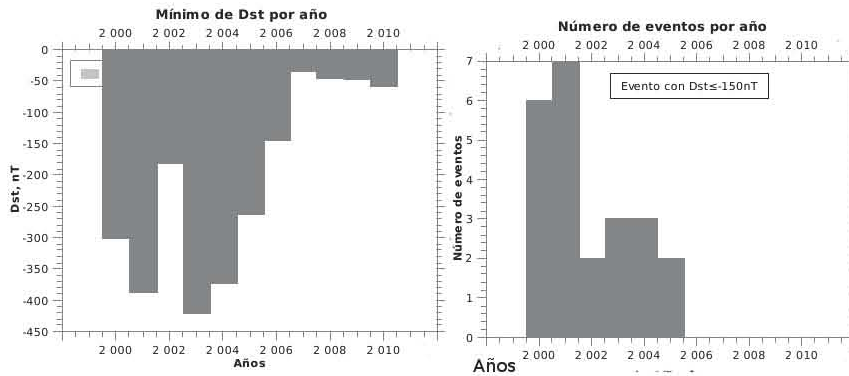


Figura 5.2:

En los años 2001 y 2003 fue donde ocurrieron las TG más intensas y en el 2001 el mayor número de éstas.

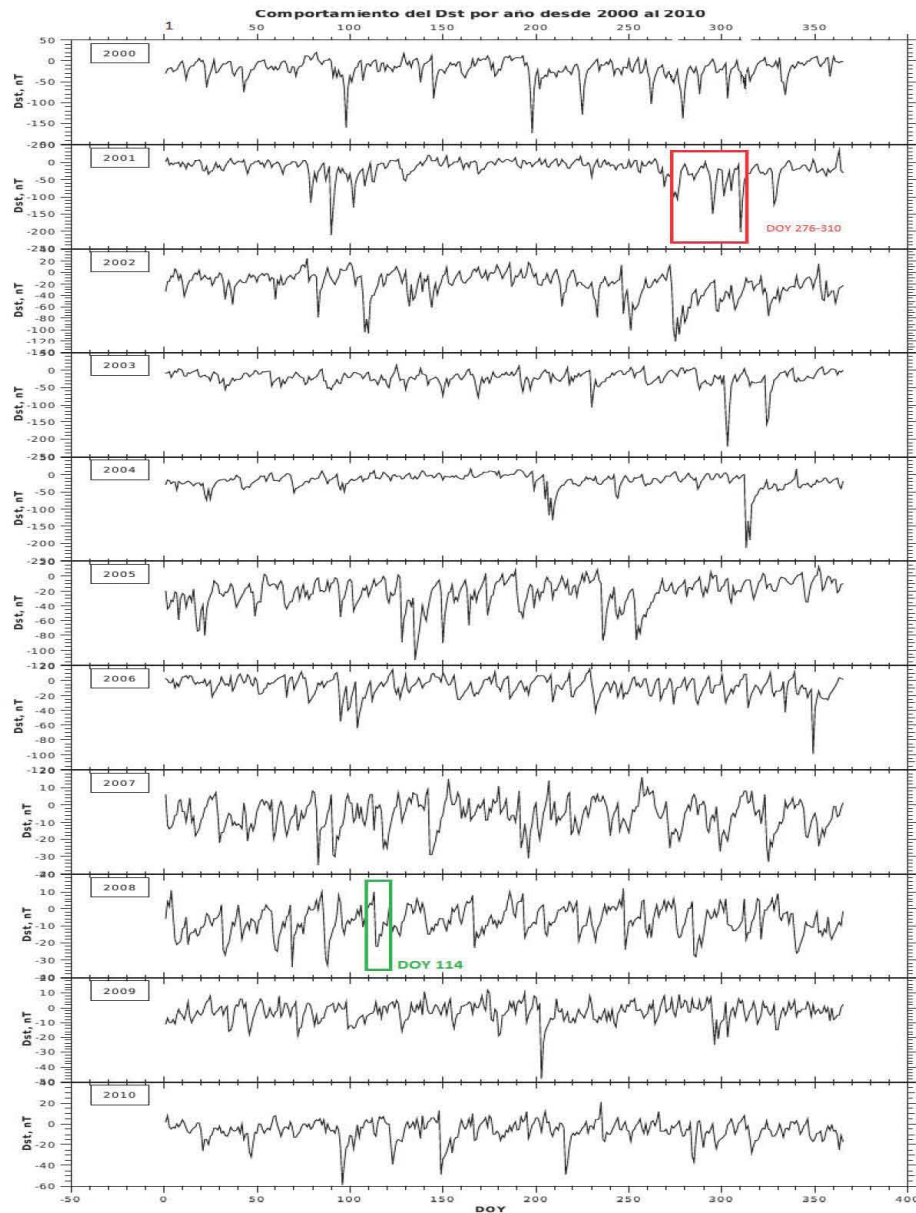


Figura 5.3: Dst, anual del 2000 al 2010

La gráfica presenta el comportamiento anual del índice geomagnético Dst, con datos promediados cada 24 horas, por lo que varían los mínimos graficados aquí. Las TGs analizadas se enmarcan con; recuadro rojo, las asociadas a Sol activo, y en recuadro verde a Sol quieto. En el eje horizontal se encuentran los días del año en forma consecutiva (Day Of Year (DOY))

Al analizar todo el ciclo solar 23, del año 1996 al 2010, respecto al índice Dst vemos que hay:

- 90 TGs con  $Dst \leq -100nT$ , (última el 15/12/2006, 08:00UT (Kyoto),  $Dst = -146$  nT).
  - De ellas 27 (30 %) tuvieron  $Dst \leq -150nT$ .

### 5.1. Breve reseña de los artículos que reportan variación en la PA asociada a TG

La elección de los trabajos se llevo acabo bajo los siguientes criterios:

- Los resultados expuestos deberían tener significancia estadística.
- Estar asociados a diferentes estados de actividad solar.
- Reportar variaciones en la PA.
- Los lugares de estudio estar en latitudes medias, ya que en estas latitudes hay pocos estudios.
- Protocolos de investigación debidamente descritos y cuidadosos.
- Descripción clara de los parámetros geofísicos, en particular índice Dst.

Se eligieron dos investigaciones: durante Sol activo Dimitrova et al. [2008], y durante Sol quieto Azcárate et al. [2011], ambas dentro del ciclo solar 23.

#### 5.1.1. Sol activo, [Dimitrova et al., 2008]:

Esta investigación tiene las siguientes características:

- a) Se utilizaron datos de dos ciudades:
  - Sofía, Bulgaria con latitud  $42^{\circ}43' N$ ; longitud  $23^{\circ}20' E$ .
  - Baku, Azerbaijan con latitud  $40^{\circ}23' N$ ; longitud  $49^{\circ}51' E$ .
- b) La muestra corresponde a individuos clínicamente sanos, con las siguientes rasgos para cada ciudad:

- Sofia: 2799 registros de 86 voluntarios, con edad promedio de 47.8 años. Se tomaron datos de lunes a viernes.
  - Baku: 1532 registros de 7 voluntarios, con edad promedio de 31.6 años. Se tomaron datos de lunes a viernes y, ocasionalmente en sábados.
- c) Se usaron los siguientes intervalos:
- Del 1 de octubre al 9 de noviembre del 2001, en la ciudad de Sofía.
  - Del 8 de abril al 28 de mayo del 2002 en la ciudad de Sofía.
  - Del 15 de junio del 2006 al 13 de noviembre del 2007, en la ciudad de Baku.
- d) Organiza las diferentes TGs en términos de su intensidad, caracterizadas por los valores del índice Dst en varios niveles: Nivel I:  $Dst > -20$ . Nivel II:  $-50 < Dst \leq -20$ . Nivel III:  $-100 < Dst \leq -50$ . Nivel IV:  $-150 < Dst \leq -100$ . Nivel V:  $Dst \leq -150$ . Reporta Dimitrova et al., 2008 que analizó un total de 22799 días en la ciudad de Sofía. De los cuales el 43% estuvieron relacionados a TG de nivel I; 37% para el nivel II; 11.4% nivel III; 5.2% para nivel IV; y por último 2.4% para nivel V.
- e) Se reportó variación en la presión arterial humana tanto sistólica como diastólica del orden de un 10% para TGs nivel V ( $Dst \leq -150nT$ ) (ver Figuras 5.4, 5.5).

**Comentarios:** En este trabajo se utiliza el intervalo que va del 1 de octubre al 9 de noviembre del 2001, ya que en él se presentan las TGs con  $Dst \leq -150nT$ , que reportan una máxima variación.

Los protocolos de toma de PA son cuidadosos, previa a la medición de ésta se aplicó un cuestionario que permitió descartar otras influencias que podrían variar la PA.

### 5.1.2. Sol quieto, [Azcárate et al., 2011]:

La investigación de Azcárate et al. [2011] tiene las siguientes características:

- a) Se realizó con datos proporcionados la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía (ENMH) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

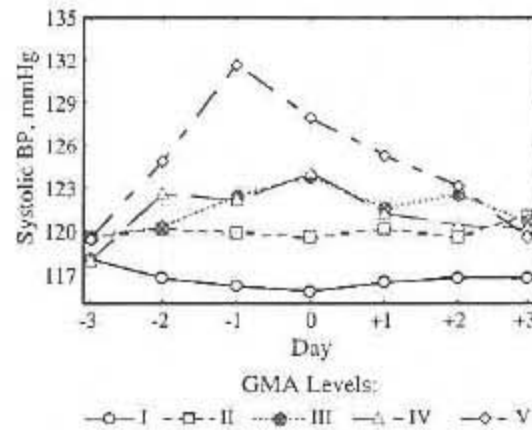


Figura 5.4: Variación de presión sistólica, reportado por Dimitrova et al. [2008]. En el eje vertical se muestra la variación de la presión arterial sistólica, medida en mmHg, y en el eje horizontal los días. El 0, es el día de la TC, los negativos indican días previos a la tormenta, y los positivos los días posteriores. Los niveles que asigna Dimitrova et al. 2008 a las TGs están dados por: Nivel I:  $Dst > -20$ , Nivel II:  $-80 < Dst \leq -20$ , Nivel III:  $-100 < Dst \leq -80$ , Nivel IV:  $-180 < Dst \leq -100$ , Nivel V:  $Dst \leq -180$ . Las TG de nivel V, reportan un nivel de variación de un orden de un 10 %, y son los que trabajamos aquí.

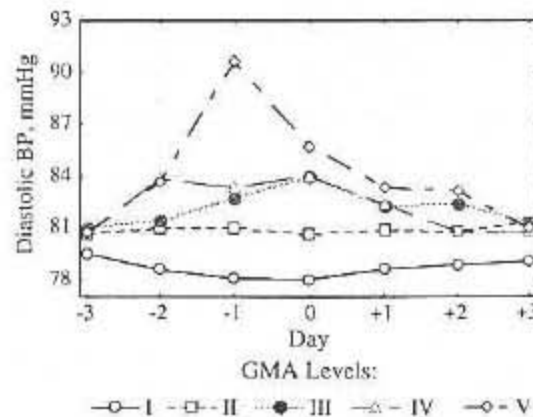


Figura 5.5: Variación de presión diastólica, reportado por Dimitrova et al. [2008]. En el eje vertical se muestra la variación de la presión arterial diastólica, medida en mmHg, y en el eje horizontal los días. El 0, es el día de la TC, los negativos indican días previos a la tormenta, y los positivos los días posteriores. Los niveles que asigna Dimitrova et al. 2008 a las TGs están dados por: Nivel I:  $Dst > -20$ , Nivel II:  $-80 < Dst \leq -20$ , Nivel III:  $-100 < Dst \leq -80$ , Nivel IV:  $-180 < Dst \leq -100$ , Nivel V:  $Dst \leq -180$ . Las TG de nivel V, reportan un nivel de variación de un orden de un 10 %, y son los que trabajamos aquí.

- En la ciudad de México con coordenadas geográficas (19°26 N, 99° 08 W).

b) La muestra corresponde a individuos clínicamente sanos, con los siguientes rasgos:

- 51 estudiantes de los cuales 18 fueron hombres y 33 mujeres con edad promedio de 19 años, clínicamente sanos y normotensos; se utilizaron 11,356 registros
- La toma de la presión arterial se realizó con el instrumento de carácter ambulatorio TM-2421, con una incertidumbre asociada de 0.05 mmHg.
- Se utilizó una bitácora que permitió al equipo del Doctor Sánchez de la Peña, una depuración de datos, descartando aquellos en los que pudiesen estar interviniendo factores que son conocidos por alterar la presión arterial.
- Los voluntarios fueron alumnos de la Facultad de Medicina debidamente entrenados para la utilización del instrumento y apegados a un estilo de vida y alimentación que no afectaran los datos.

c) Se trabajó en el intervalo con centro en la TG débil del 24 de abril del 2008, que en los sucesivos denominaremos TG\_S

d) Azcárate et al. [2011] reportaron variaciones en la presión arterial humana del orden de un 8%, Figura 5.6.

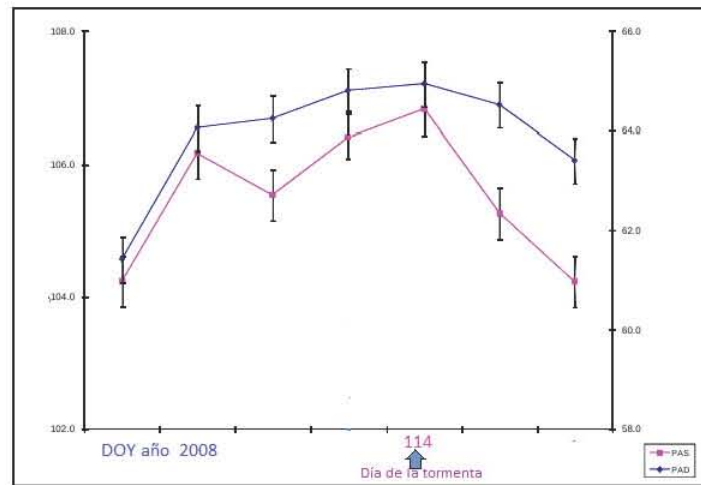


Figura 5.6: Variación de PA, reportado por Azcárate et al. [2011]  
Se observa una mayor variación en la presión sistólica, de existir, una alteración sería a nivel de tejido cardíaco.

**Comentarios:** En este trabajo, la forma de medir la PA no aísla al sujeto, sino que lo integra a una su dinámica diaria. Resultando afectado por los campos magnéticos cotidianos. Reportando aún así, una variación máxima del 8% en la presión sistólica. Lo anterior es consecuencia por el carácter ambulatorio de la toma de PA.

Debería coincidir con el nivel II reportado por Dimitrova et al. [2008], y no lo hace. Sin embargo su comportamiento es similar al de nivel III de la misma autora. Pensamos se debe a la forma en que se tomó la PA, (ver Figuras ??, 5.5).

## 5.2. Fuentes de datos y tratamiento.

Los datos con los que se realizará el análisis del clima espacial se obtuvieron de observatorios virtuales, enlistados en la Tabla 5.1.

El sistema de coordenadas utilizado fue el Geocentric Solar Magnetospheric System (GSM), el cual toma al eje X como la línea directa entre la Tierra y el Sol y el eje Z como la proyección del dipolo magnético terrestre (norte positivo) en el plano perpendicular al eje X.

Tabla 5.1: Datos del Clima Espacial

Observatorios Virtuales	Datos extraídos
<a href="http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html">http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html</a>	Dst
<a href="http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html">http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html</a>	Kp
<a href="http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi">http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi</a>	$B, B_z, \beta$ , Dst, velocidad del plasma, presión del fluido y densidad iónica
<a href="http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2001_09/univ2001_09.html">http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2001_09/univ2001_09.html</a>	Catálogo de EMC, SOHO
<a href="http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/polarity/polarity_v.html">http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/polarity/polarity_v.html</a> <a href="http://wso.stanford.edu/synsourcel.html">http://wso.stanford.edu/synsourcel.html</a>	Hoja Neutra de Corriente Heliosférica (HNCH)

En el lado izquierdo de la tabla se muestran las direcciones electrónicas de los observatorios virtuales utilizados; los parámetros extraídos están en el lado derecho. El índice Dst, que proviene de Kyoto, está una hora después del que reporta Omni-Web. Este tiempo de retardo se debe al sitio donde se toman las lecturas: Kyoto en la superficie terrestre, y Omni-Web in situ.

Los eventos que causaron las TGs estudiadas se clasificaron según lo hace Zhang et al. [2007]: Cuando la estructura identificada como geoeffective está bien definida y aislada, se le denomina *evento singular*. En caso de que la TG haya sido causada por la acción conjunta de varias estructuras y haya aumentando su complejidad se le denomina *evento múltiple*.

Las TGs se clasificaron, según Gonzalez et al. [1994]:

- Nivel I,  $Dst > -20nT$ , no es considerada como TG.
- Nivel II, TGs “débiles”  $-50nT < Dst \leq -20nT$
- Nivel III, TGs “moderadas”  $-100nT < Dst \leq -50nT$
- Nivel IV, TGs “mayores”  $-150nT < Dst \leq -100nT$
- Nivel V, TGs “severas”  $-150nT \leq Dst$

Los parámetros del plasma con los cuales se trabajó son:

- La magnitud del CMI al que nos referiremos como B.
- La componente  $z$  del campo magnético interplanetario,  $B_z$  en GSM.



Tabla 5.2: Eventos seleccionados

Ciudad	Sofia				Sofia	Baku
	<i>1/10/2001 al 6/11/2001</i>				<i>8/04/2002 al 28/05/2002</i>	<i>15/06/2006 al 13/11/2007</i>
<b>TG</b> Nivel V	<i>3/10/01</i>	<i>15:00UT</i>	<i>Dst</i>	<i>A</i>	<i>no hubo</i>	<i>no hubo</i>
		<i>(Kyoto)</i>	<i>-166nT</i>			
	<i>21/10/01</i>	<i>22:00UT</i>	<i>Dst</i>	<i>B</i>		
		<i>(Kyoto)</i>	<i>-187nT</i>			
	<i>28/10/01</i>	<i>12:00UT</i>	<i>Dst</i>	<i>C</i>		
		<i>(Kyoto)</i>	<i>-157nT</i>			
	<i>6/11/01</i>	<i>07:00UT</i>	<i>Dst</i>	<i>D</i>		
		<i>(Kyoto)</i>	<i>-297nT</i>			

- La temperatura del viento solar incidente.
- La densidad de protones asociada al viento solar.
- La magnitud de la velocidad del viento solar.
- El índice Geomagnético Dst
- La  $\beta$  del plasma.

Se identificó la procedencia del transiente solar causal de la tormenta, auxiliándonos con el catálogo de SOHO de EMC y cotejando los resultados con diferentes fuentes a especificar en su momento. Se identificó la estructura geoeffective, y finalmente se determinaron las fases de la TGs y su duración. Se localizaron y caracterizaron las TGs a partir del comportamiento del Dst.

### 5.3. Análisis del periodo de Sol activo.

#### 5.3.1. TGs analizadas para Sol activo en la presente tesis.

El máximo de variación en la presión arterial humana reportada por Dimitrova et al. [2008], ocurrió durante, TGs nivel V ( $Dst \leq -150nT$ ), que son los eventos que se enlistan en la Tabla 5.2. Son 4 TGs durante en Sol activo.

##### 5.3.1.1. Tormenta geomagnética A (TG\_A).

**Caracterización de la TG\_A:**

- Sucedió el 3 de octubre del 2001, Day Of Year (DOY) 276 a las 15:00UT, Dst=-166nT (Tabla 5.2).
- Provino de una EMC, tipo halo parcial, que ocurrió el 29 de septiembre a las 11:54 UT con una velocidad de 509 Km/seg.
- Ocurrió también una fulguración clase M1.8.
- Una nube magnética fue la fuente de Bz sur, evento singular.

El comienzo súbito de la TG\_A se identifica a partir del inicio del incremento en el Dst en el DOY 276, a consecuencia de los picos tanto en densidad como en presión del viento solar, que se dan en las primeras horas del día 276 (3/10/2001) (Figura 5.7).

En la Figura 5.7 se muestra el comportamiento del CMI, en términos de su magnitud B, así como sus componentes By y Bz y el índice geomagnético Dst, identificando lo siguiente:

- La magnitud del CMI B, presenta un incremento sustancial y lento durante el DOY 276 (3/10/2001), esto anuncia la presencia de una nube magnética.
- Las componentes By y Bz del CMI presentan una semisenoidal propia de una nube magnética [Zhang et al., 2007].
- Entre el DOY 276 y el DOY 277 se observa una Bz negativa con un mínimo de -20.9nT, durante 7 horas con un valor medio de -16.42nT, lo que indica la existencia de reconexión magnética en el lado día de la magnetosfera.

A partir del comportamiento de la  $\beta$  de plasma, tenemos más elementos que nos hablan de la presencia de una nube magnética. En la Figura 5.7 se puede ver que la  $\beta$  es cercana a cero, durante el día de la TG\_A. Como el CMI tiene una Bz negativa de larga duración y la B es sustancial, se concluye que la presión magnética es muy grande comparada con la presión del plasma.

La velocidad de la EMC del 29/09/2001- 11:54 UT cercana al Sol fue de 509Km/seg y estuvo reportada por SOHO en su catálogo asociada a la EMCI donde se encuentra la nube magnética. A ésta le antecede una EMC, tipo halo, con perfil asimétrico, ocurrida el 28 de septiembre a las 08:54 UT que fue expulsada con una velocidad de 840 Km/seg, seguida de una serie de eventos pobres, hasta que llega el causal de la TG\_A, impactando a la magnetosfera con velocidades del orden de 400 a 500Km/seg (Figura 5.7).

A partir del comportamiento del Dst entre los DOY 276 y 277 se pueden distinguir los tiempos de duración de las diferentes fases de la TG\_A, con ello se construye la Tabla 5.3. La fase de recuperación es larga (13 horas) debido al enriquecimiento de los anillos de corriente como consecuencia de los eventos previos ya mencionados, observables en el hecho de que el Dst permanece con un valor aproximado de -80nT.

Tabla 5.3: Duración de las fases de la TG\_A

TG_A		Evento singular causado por una nube magnética		
Fenómeno asociado	Dst,[nT]	Fecha.	Hora	Duración de la fase de la TG_A
Máximo del Dst, asociado con el comienzo repentino	-46	3 de octubre, 2001.	07:00UT	0
Mínimo de Dst asociado a la TG	-166	3 de octubre, 2001.	15:00UT	9 horas Fase principal
Fin de la fase de recuperación	-80 *	4 de octubre, 2001	03:00UT	13 horas Fase de recuperación

\* Se tomó como fin de la fase de recuperación una Dst=-80 nT, ya que es el valor con el que se inició la TG\_A. Sin embargo, como la siguiente TG sucede 8 días después, los anillos continúan descargándose por efecto Joule, hasta alcanzar un Dst=-4nT , 50 horas más tarde.

### 5.3.1.2. Tormenta geomagnética B (TG\_B).

#### Caracterización, de la TG\_B:

- Sucede el 21 de octubre del 2001, DOY 294 a las 22:00UT, Dst -187nT.
- Provino de una EMC, tipo halo, con brillo asimétrico sucedida el 19 de octubre a las 16:50 UT, con una velocidad de 901 Km/seg.
- Ocurrió también una fulguración clase X1.6.
- La fuente de Bz fue una funda de EMCI, evento singular.

El comienzo súbito de la TG\_B se identifica a partir del comportamiento de la presión y densidad de protones del viento solar, que activan las corrientes de la

magnetopausa. En la Figura 5.8 se pueden ver, en los paneles superior y medio, la densidad y la presión respectivamente, y en el inferior el comportamiento del Dst. En DOY 294/16UT se identifica un máximo del  $Dst = -9nT$  simultáneamente se encuentran dos picos en densidad y presión, respectivamente que nos permite identificar el comienzo súbito para la TG\_B.

El comportamiento del CMI asociado a la TG\_B, se puede observar en la Figura 5.8, se encuentra la magnitud del CMI B, la componente Bz y el índice Dst. Se distingue un incremento repentino de la magnitud de B durante DOY 294 con una Bz sur tal que por medio de la reconexión magnética ocasiona la fase principal de la TG\_B. Le sigue una pequeña nube magnética identificable por el incremento paulatino de la magnitud del CMI, B durante DOY 295 durante la fase de recuperación de la TG\_B, realimentando los anillos de corriente y consecuentemente incrementando la duración de la fase de recuperación; ya que también esta acompañada de una Bz sur robusta.

El comportamiento de la  $\beta$  de plasma, muestra dos picos; el primero durante DOY 294 alineado al inicio de la fase principal (DOY 294/16UT) de la TG\_B, y el segundo justo al final de la nube magnética en las primeras horas de DOY 295. La temperatura, muestra un pico al inicio de la fase principal que nos habla de un incremento de la presión dinámica ya que ocurre justo en el pico de la  $\beta$ . La velocidad de la EMC asociada a la EMCI, que contenía las estructuras geoeffectivas reportada por SOHO, fue de 901 Km/seg y en la Figura 5.8 se puede ver el comportamiento de la velocidad del plasma al arribar a la magnetosfera terrestre, con el escalón propio de un choque delantero. El comportamiento de la temperatura del plasma, que justo en el choque presenta el pico característico, alineado al comienzo repentino observable en el panel del Dst.

En la Tabla 5.4 se muestran los tiempos asociados a las fases de la TG.

Esta TG\_B fue ocasionada por la funda de una EMCI. La duración de la fase de recuperación, suponemos se debe a la presencia sostenida hasta el día siguiente, de la componente Bz del CMI, inmersa en la funda y en la nube magnética.

Tabla 5.4: Duración de las fases de la TG\_B

TG_B	Evento singular ocasionado por la funda de una EMCI			
Fenómeno asociado	Dst, [nT]	Fecha	Hora	Duración de la fase de la TG_B
Inicio del descenso del Dst	-9	21 de octubre, 2001	18:00UT	
Dst=-187nT Mínimo del Dst, día de la TG	-187	21 de octubre, 2001	22:00UT	5 horas Fase principal
	Fin de la fase de recuperación	25 de octubre, 2001.	10:00UT	86 horas Fase de recuperación

### 5.3.1.3. Tormenta geomagnética C (TG\_C).

- Sucedió el 28 de octubre del 2001, DOY 301 a las 12:00UT, Dst=-157nT.
- Provino de una EMC tipo halo con perfil asimétrico con una velocidad de 1092 Km/seg del 25 de octubre a 15:26 UT, que alcanza a una EMC tipo Halo parcial que sale con una velocidad de 597 Km/seg del 24 de octubre a las 6:26 UT, por lo que se le cataloga como evento múltiple.
- Hubo una fulguración clase X1.3 para la EMC del 25 de octubre, y otra de C 2.6 para la EMC del 24 de octubre.
- La fuente de Bz sur provino de la funda.

Para la TG\_C, el comienzo repentino se identifica, al igual que las anteriores, a partir del comportamiento de la presión del viento solar, así como a la densidad de protones (Figura 5.9). En la figura se puede observar la densidad, la presión y el comportamiento del Dst. El inicio y el final de esta TG\_C está marcado por incrementos tanto en la densidad como en la presión; el primero sucedió en las primeras horas del 28 de octubre, y el segundo, que trunca la fase de recuperación, a media tarde del 31 de octubre, marcando la duración de la TG\_C.

El comportamiento de la magnitud del CMI B, componente Bz sur y Dst son observables en la Figura 5.9, la magnitud del CMI B, se incrementa repentinamente en DOY 301, asociado a una Bz sur robusta ocasionando la fase principal

de TG\_C. Por otra parte el parámetro  $\beta$  nos muestra que el plasma que incide está gobernado por el CMI. Los picos en DOY 303 hablan de una predominancia cinética durante la fase de recuperación TG\_C, por la activación del sistema de corrientes de la magnetopausa.

La velocidad del viento solar (Figura 5.9) presenta claramente el escalón del choque, aunado a un incremento en la temperatura, por lo que proponemos que la estructura geofectica es la funda.

Según Zhang et al. [2007], la tormenta estudiada es consecuencia de dos EMC sucesivas, la primera el 24 de octubre a las 06:26 UT y la segunda, el 25 de octubre a las 15:26 UT, lo cual da a esta tormenta, la categoría de evento múltiple, con una fuerte componente magnética que gobierna su evolución.

La EMC que sucedió el 24 de octubre, lleva una velocidad de 597 Km/seg, es lenta en comparación a la segunda de 1092 Km/seg, por lo que es alcanzada y rebasada, siendo la funda altamente geofectiva Ontiveros and Gonzalez-Esparza [2010].

En la Tabla 5.5 se muestran los tiempos de las diferentes fases de la TG\_C, con una la fase de recuperación larga asociada a la combinación de dos EMCI que interaccionaron en el medio interplanetario, formando un frente de choque y una funda altamente energética.

Tabla 5.5: Duración de las fases de la TG\_C

TG_C	Evento múltiple ocasionado por una funda.			
Fenómeno asociado	Dst, [nT]	Fecha	Hora	Duración de las fases de la TG
Dst=-15nT Comienzo Súbito, máximo de Dst	Dst=-15nT	28 de octubre, 2001 DOY 301	02:00UT	
Dst=-157nT Mínimo de Dst día de la TG	Dst=-157nT	28 de octubre, 2001 DOY 301	012:00UT	11 horas Fase principal
	Fin de la fase de recuperación	31 de Octubre,2001 DOY 304	15:00UT	74 horas Fase de recuperación

#### 5.3.1.4. Tormenta geomagnética D (TG\_D).

- Sucede el 6 de noviembre del 2001, DOY 310 a las 07:00UT, Dst=-292nT

- Es un evento múltiple, que proviene de dos EMCs, la primera se dio el 3 de noviembre a las 19:20:05, tipo halo con brillo asimétrico con una velocidad de 457 Km/seg, que es alcanzada por una EMC del 4 de noviembre a las 16:35:06 UT a una velocidad de 1810 Km/seg.
- Se observó también la fulguración clase X1.0 asociada a la EMC más rápida.

Los dos EMCs interactúan dando un evento altamente complejo. El incremento en la densidad de protones y la presión tangencial del viento solar, es muy intensa, en la Figura 5.10 se puede ver su comportamiento; de la densidad, la presión y el Dst.

El comportamiento del CMI se ve en la Figura 5.10, donde encontramos la magnitud del CMI B, su componente  $B_y$ ,  $B_z$  y Dst, se muestra la componente magnética causal de la TG\_D, la magnitud del campo magnético alcanza valores superiores a los 60nT, la  $B_z$  sur es aguda y profunda llegando hasta más de -60nT y permanecido varias horas. La  $\beta \geq 1$  (lamentablemente no tenemos más datos) pero nos indica una fuerte presión dinámica.

La gráfica de la velocidad del plasma del viento solar, esta incompleta.

Este evento es el mayor del periodo seleccionado por Dimitrova et al. [2008] para su estudio; alcanzó una baja de Dst -292nT. Es un evento múltiple, de una EMC del día 3 de noviembre a las 16:35:06 UT, tipo halo, a una velocidad de 457 Km/seg que es alcanzado por otra EMC del 4 de noviembre también tipo halo a las 19:20:05 con una velocidad de 1810Km/seg, por lo que es también catalogado por Zhang et al. [2007] como un evento múltiple y altamente complejo.

Los tiempos asociados a las diferentes fases de la tormenta se encuentran en la Tabla 5.6. Es interesante notar que pasa de un Dst=5nT a un Dst=-292nT en 12 horas.

Tabla 5.6: Duración de las fases de la TG\_D

TG_D	Evento múltiple			
	Dst, [nT]	Fecha	Hora	Duración de la fases de la TG
Comienzo súbito, máximo de Dst	22	5 de noviembre. 2001 DOY 310	De 19:00UT	
Mínimo de Dst día de la TG	-292	6 de noviembre, 2001 DOY 311	07:00UT	12 horas Fase principal de la TG
	-57	8 de noviembre	12:00UT	52 Fase de recuperación



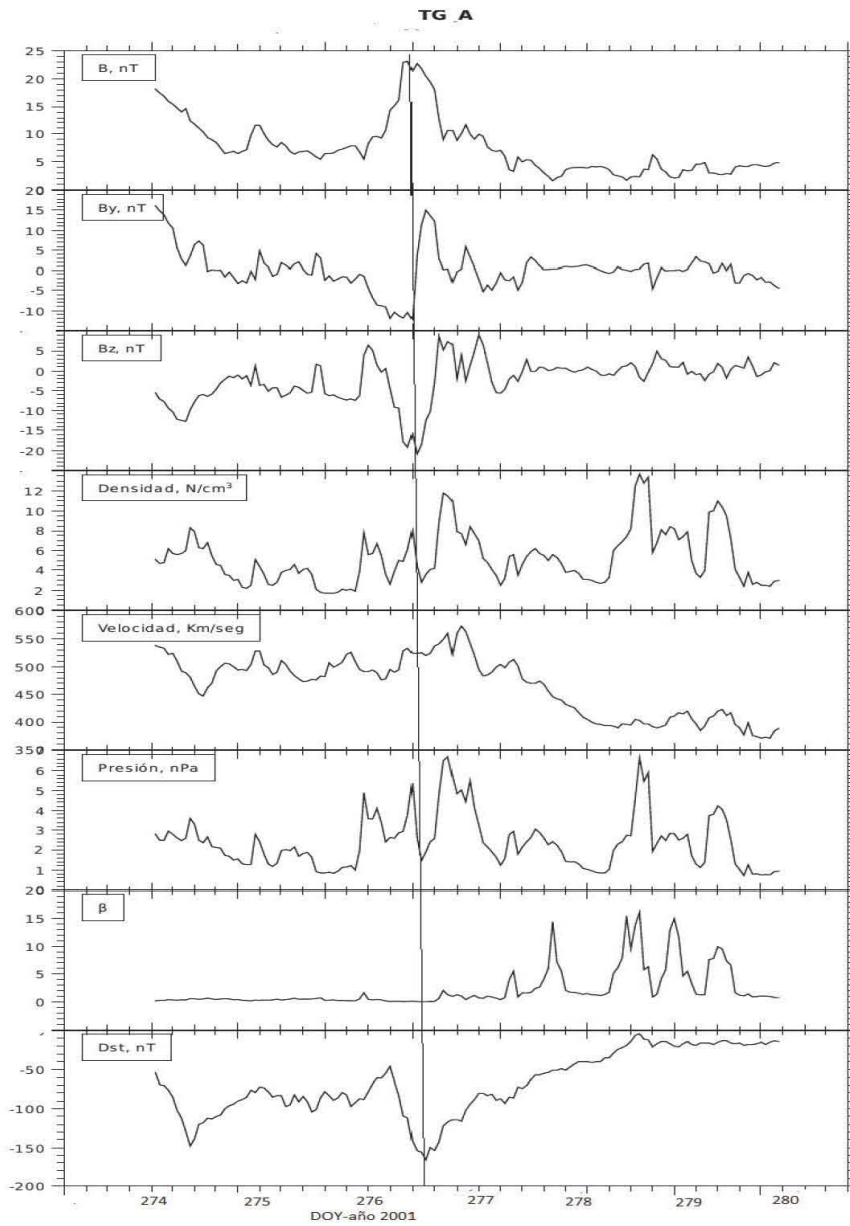


Figura 5.7: TG\_A.

Los paneles muestran, de arriba hacia abajo los siguientes parámetros: La magnitud del CMI, las componentes  $B_y$  y  $B_z$ , continuamos con la densidad iónica, la velocidad del plasma, la presión, el parámetro  $\beta$  del plasma, para finalizar con el índice geomagnético Dst.

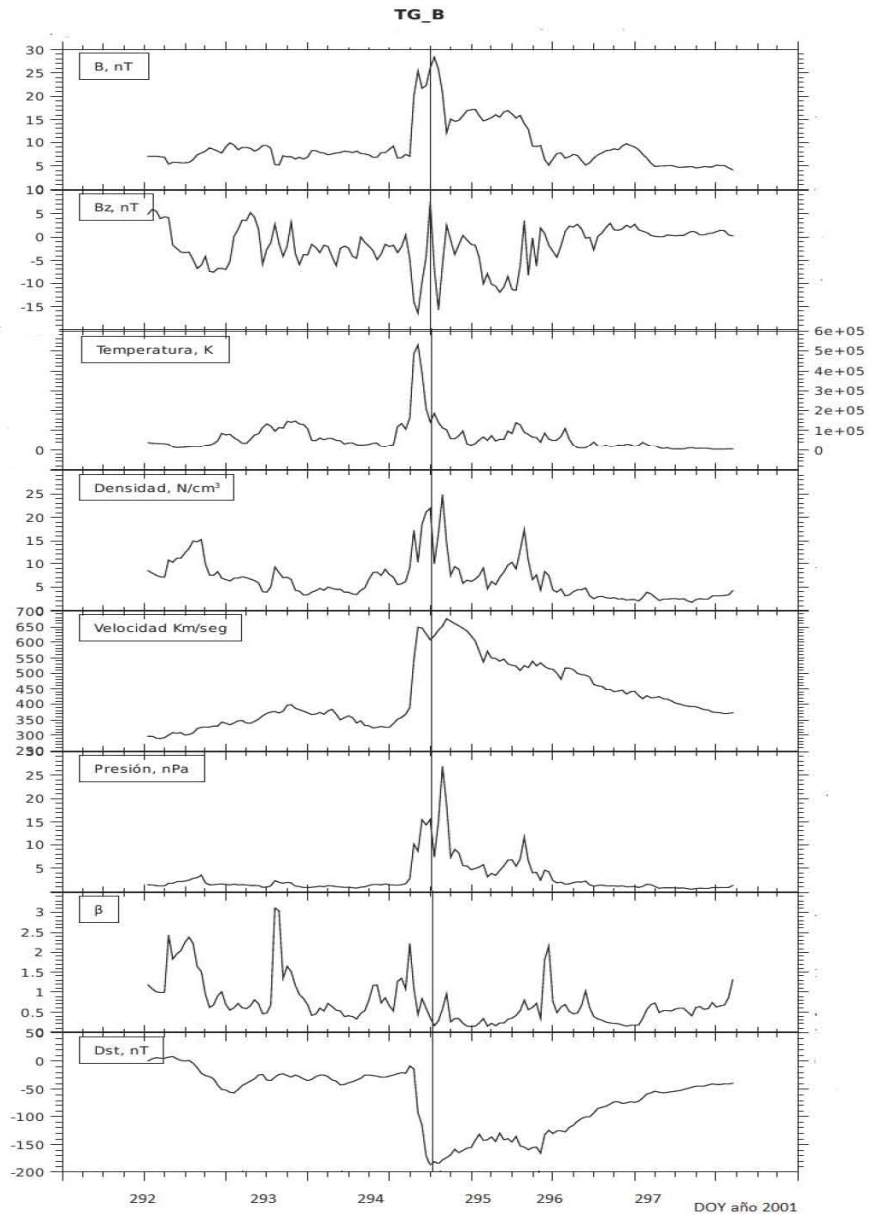


Figura 5.8: TG\_B

Los paneles muestran, de arriba hacia abajo los siguientes parámetros: La magnitud del CMI, la componente  $B_z$ , continuamos con la temperatura, la densidad iónica, la velocidad del plasma, la presión, el parámetro  $\beta$  del plasma, para finalizar con el índice geomagnético Dst.

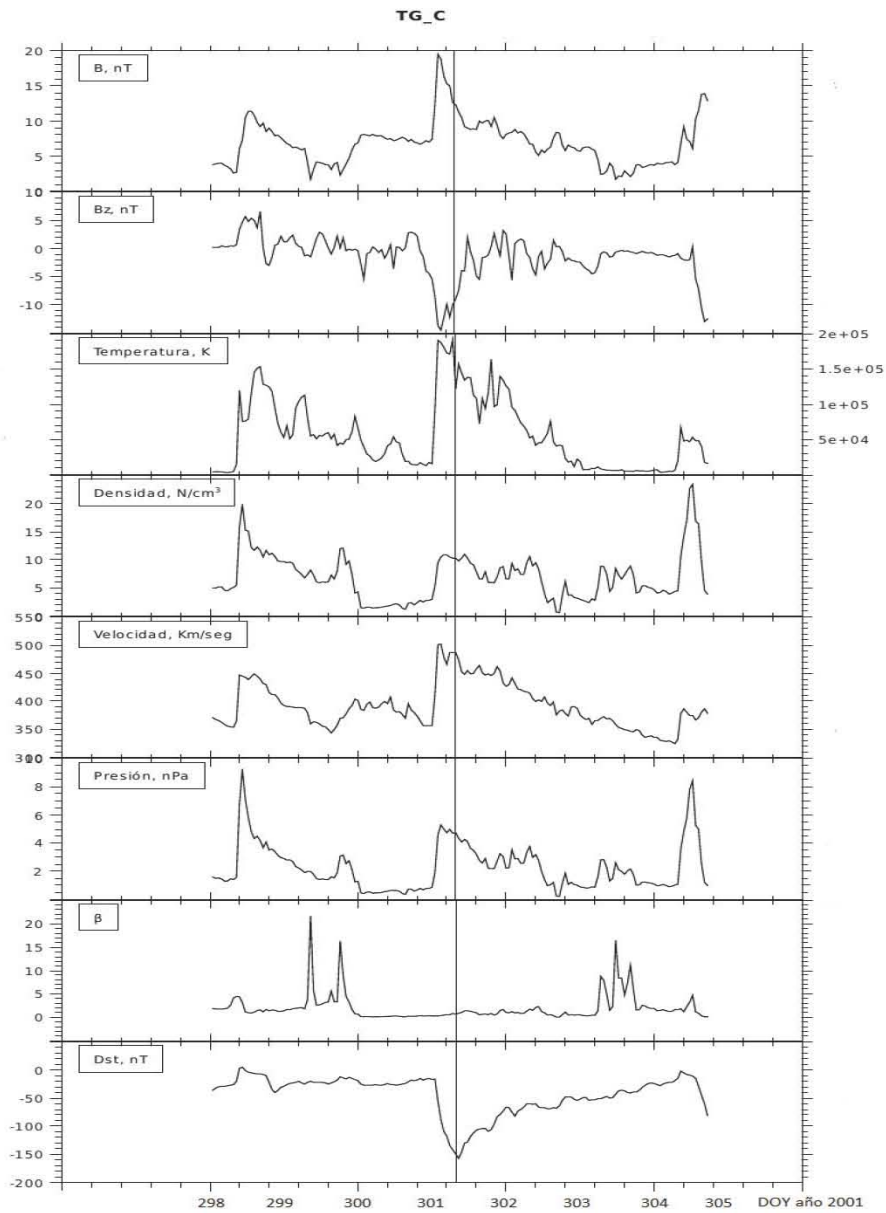


Figura 5.9: TG\_C

Los paneles muestran, de arriba hacia abajo los siguientes parámetros: La magnitud del CMI, la componente  $B_z$ , continuamos con la temperatura, la densidad iónica, la velocidad del plasma, la presión, el parámetro  $\beta$  del plasma, para finalizar con el índice geomagnético Dst.

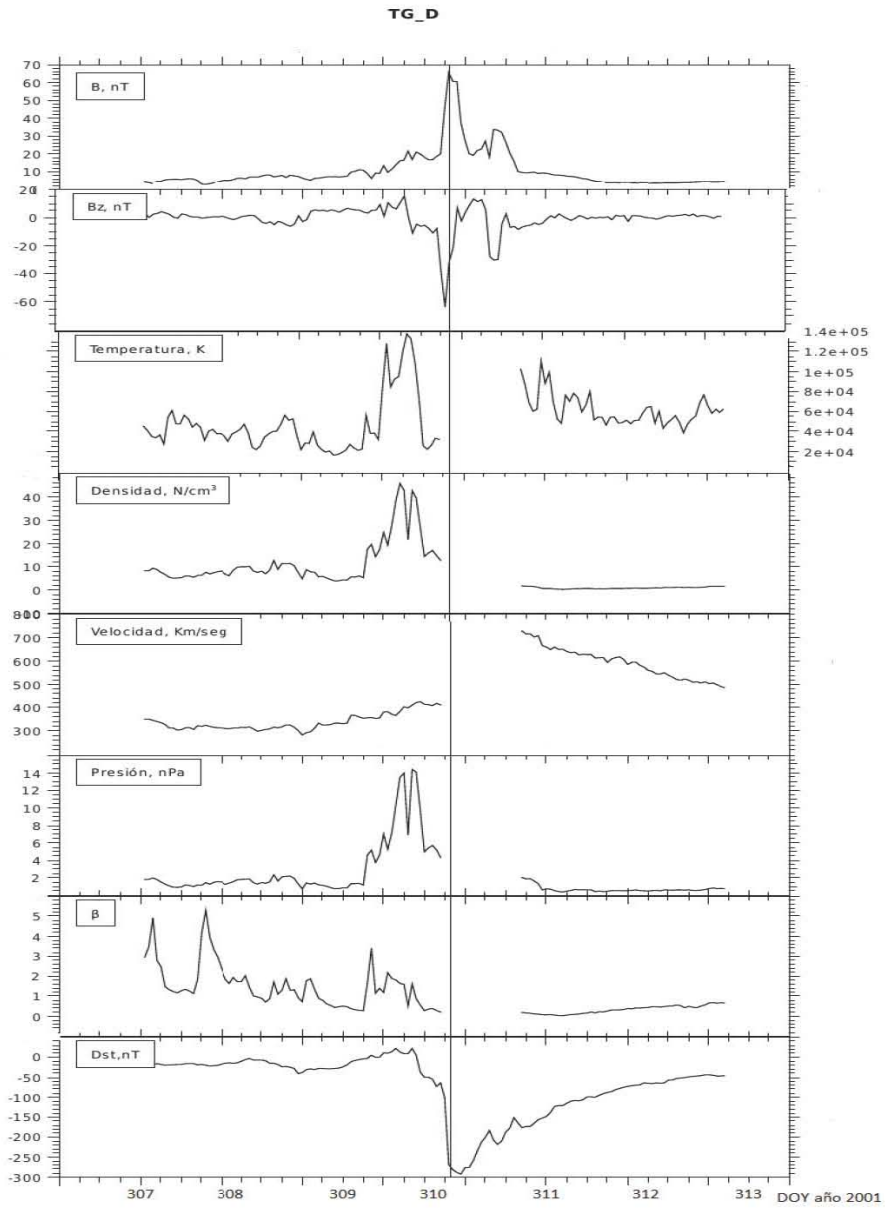


Figura 5.10: TG\_D

Los paneles muestran, de arriba hacia abajo los siguientes parámetros: La magnitud del CMI, la componente  $B_z$ , continuamos con la temperatura, la densidad iónica, la velocidad del plasma, la presión, el parámetro  $\beta$  del plasma, para finalizar con el índice geomagnético Dst.

Tabla 5.7: Tabla del comportamiento del Dst y Bz del borde el HC

Intervalo sugerido a partir del diagrama Kp anual 2008.	Dst. [nT]	Fecha del mínimo, Dst. DOY hora en UT	Componente Bz, [nT]	Número de días entre cada mínimo de Dst
I. Del 30 de enero al 3 de febrero		32 22:00	-3.6	
	-44	32 23:00	-0.1	
		33 00:00	0.4	
		33 01:00	-3.2	
II. Del 26 de febrero al 3 de marzo	-45	59 22:00	-3.2	27
III. Del 25 al 30 de marzo	-43	87 21:00	-3.1	28
IV: del 23 al 28 de abril	-43	114 18:00	-3.1	27

## 5.4. Análisis de periodo de Sol quieto.

En el año de 2008 el Sol se encuentra en mínima actividad, razón por la cual, ya no presentó TGs con  $Dst \leq -150nT$ . El campo magnético solar puede aproximarse al de un dipolo y la HNCH se puede ver como una “falda de bailarina” de cuatro sectores.

La TG débil a analizar sucedido el 24 de abril del 2008, al rededor de la misma Azcárate et al. [2011] realizan su investigación.

### 5.4.1. Antecedentes.

El clima espacial en el año 2008 se esboza utilizando el diagrama anual del índice geomagnético Kp, manifestando la baja actividad solar (Figura 5.11). Podemos ver que se encuentra organizado en renglones donde cada uno contiene 27 días correspondientes a una rotación solar. Se señalaron en él: el día de la TG\_S débil que se trabaja, entre corchetes se marcó la actividad geomagnética que llamó nuestra atención.

En la Tabla 5.7 aparecen los intervalos de las secciones marcadas en la Figura 5.11; éstos están numerados del I al IV. Para cada uno de ellos se tomó el

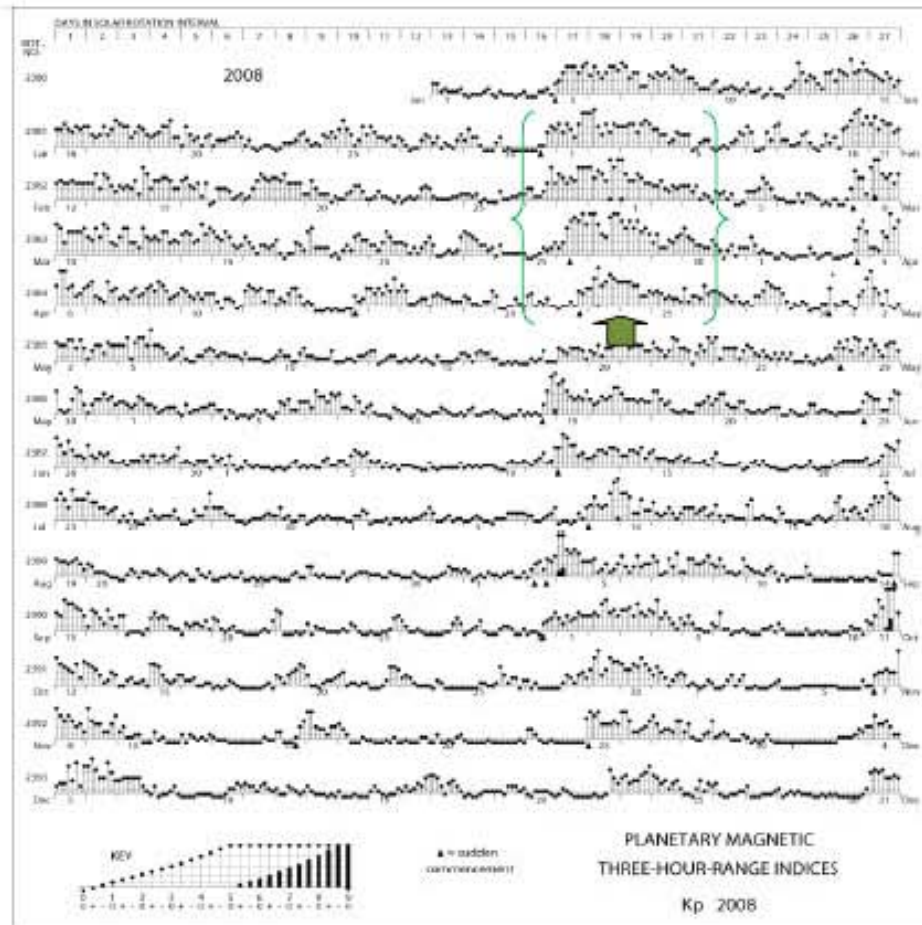


Figura 5.11: Kp 2008.

Se muestra el comportamiento del índice geomagnético  $K_p$  durante el año 2008. Entre corchetes se muestran las regularidades del índice del logaritmo natural.

mínimo del Dst que al estar asociados a una Bz sur nos permiten localizar 4 TGs débiles, una de ellas la ocurrida el DOY114 (24/04/2008), corresponde a la estudiada por Azcárate et al. [2011]. La Figura 5.4.1, muestra comparativamente el comportamiento del índice geomagnético Dst en intervalos, centrado en cada una de las TGs. Se puede observar las similitudes entre ellas.

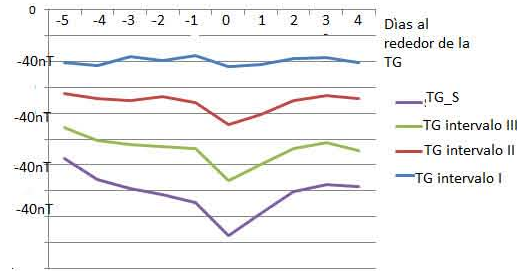


Figura 5.12: Comportamiento Dst.

Las gráficas muestran el comportamiento del índice Dst, días antes de las TGs marcadas con negativos y días después de la TG, marcada como 0.

TG, intervalo I, DOY 32/Dst  $-44$ nT

TG, intervalo II DOY 59/Dst  $-45$ nT

TG, intervalo III DOY 87/Dst  $-43$ nT

TG\_S intervalo IV DOY 114/Dst  $-43$ nT

Al analizar el comportamiento de la HNCH los eventos se encuentran localizados al iniciar el incremento de la velocidad del plasma en el cruce de ésta por la Tierra.

Por lo que concluimos que, la procedencia para las cuatro TGs débiles es la misma, es estable dado que permaneció varios meses. Pensamos que proceden del borde del HC. Ya que el borde del HC puede proveer Bz sur como propuso Tsurutani et al. [1984].

La TG\_S que analizamos ocurre el 24 de abril a las 18:00UT (DOY 114) se encuentra dentro de esta serie de eventos y alcanza el mínimo del índice geomagnético Dst  $=-43$ nT.

#### 5.4.1.1. Tormenta geomagnética (TG\_S):

- Día de la TG\_S, el 24 de abril del 2008 DOY114 a las 18:00UT, Dst $=-43$ nT

En la Figura 5.13 es posible ver que hay una correlación positiva entre los picos de la densidad, la presión y el índice Dst en las últimas horas del DOY113 y

Tabla 5.8: TG\_S cruce de la HNCH

DOY 113	$Kp_{max}$	$\beta_{max}$	Presión, $nPa$	$Bz$ , $nT$	Vel. $km/s$	Densidad $N/cm^3$	$[B]$ , $nT$
06:00 UT	5	56.05	0.99	0.1	343	4.2	0.7
07:00UT		77.7					

Se puede observar la baja y subida en el valor de la velocidad del plasma. Firma característica del cruce de la HNCH, además de la disminución del valor del campo magnético, y el incremento de la  $\beta$  de plasma que confirma el cruce.

primeras horas del DOY114 (24/04/2008), como consecuencia de la activación del sistema de corrientes de la magnetopausa. En cuanto al CMI (Figura 5.13), la magnitud del campo se incrementa en forma sostenida durante todo el DOY114, con componente Bz sur, propiciando la reconexión magnética y generando la fase principal de la TG\_S.

El comportamiento de la  $\beta$  de plasma presenta 2 picos cuando el campo magnético disminuye, incrementándose el Kp, a baja velocidad del plasma Tabla 5.7.

Otra firma que nos indica el cruce de la HNCH es el comportamiento de la velocidad del plasma, manifestado en un descenso e incremento en el cruce.

Exactamente en el cruce de HNCH no puede haber reconexión magnética entre el CMI y la magnetosfera terrestre, es justo al salir de la misma cuando se presenta, y con ello la TG\_S.

Los picos en la densidad iónica nos habla de una posible reconexión en la parte central de la HNCH Suess et al. [2009].

En cuanto a la fase de recuperación de la tormenta conlleva múltiples procesos disipativos y de deriva de los iones, descargando los anillos de corriente hacia la ionosfera, dando la baja paulatina del índice geomagnético Dst.



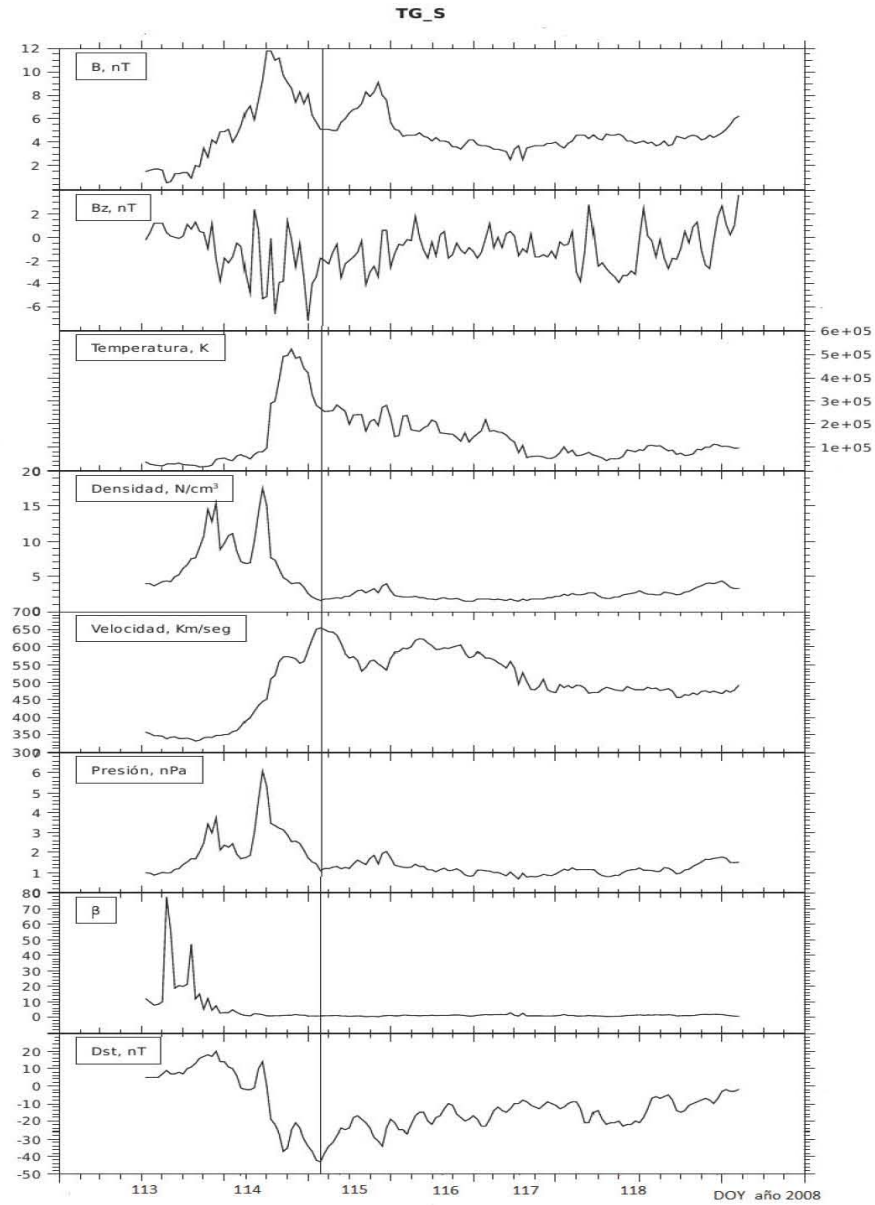


Figura 5.13: TG\_S

Se muestra la densidad iónica, presión y Dst; en los paneles del superior al inferior respectivamente.

## Capítulo 6

# CONCLUSIONES

La búsqueda de una posible asociación entre la presión arterial y la actividad geomagnética presenta una gran variedad de complicaciones. Una de las más importantes es que la actividad geomagnética es predecible en forma muy limitada, sólo con pocas horas de anticipación al impacto con nuestro planeta. Otra es que los intervalos de los estudios de (PA) relacionada con actividad geomagnética no cuentan con un análisis del clima espacial que les permita conocer puntualmente la fenomenología asociada a las tormentas geomagnéticas (TGs).

Con el fin de contribuir en este tipo de investigaciones, llevamos a cabo un análisis del clima espacial asociado a los intervalos de estudio de dos artículos que buscan una relación entre PA y TGs. El primero se realizó cuando el Sol se encontraba activo, del 2 octubre al 9 noviembre del 2001 y fue efectuado por Dimitrova et al. [2008]. El segundo en baja actividad solar del 22 al 26 abril del 2008 por Azcárate et al. [2011].

Nuestro objetivo era encontrar elementos que permitieran establecer relaciones entre ambas investigaciones, en términos de clima espacial así como desarrollar una descripción de las TGs ocurridas durante los trabajos ya citados.

El primero de los trabajos utilizados para esta tesis, se encontró que todas la TGs estudiadas con  $Dst \leq -150nT$ , -en las cuales Dimitrova et al. [2008] reporta una variación de un 10 % en la PA un día antes de la TG- fueron consecuencia de EMCI. Sin embargo la estructura geoelectiva varió, para TG\_A, nube magnética y para TG\_B, TG\_C, TG\_D funda, presentando largas fases de recuperación, mayores a 24 horas. El segundo, hecho por Azcárate et. al.[2011], registra los datos en baja actividad solar.

Tabla 6.1: Inicio de la EMCI asociada a las TGs estudiadas

TG	Hora/día/mes/año Dst	Inicio de la EMCI	$\Delta$ de horas
TG_A	15:00UT/03/10/2001 Dst=-166nT	04:00UT/02/10/2001	13 horas
TG_B	22:00UT/21/10/2001 Dst=-187nT	20:00UT/21/10/2001	2 horas
TG_C	12:00UT/28 /10/2001 Dst=-157nT	03:00UT/27/10/2001	15 horas
TG_D	07:00UT/06/11/2001 Dst -292 nT	19:00UT/05/11/2001	36 horas

La pregunta inevitable es: ¿Cómo asociar TG a una variación de la PA, antes que ocurra? En este punto no podríamos asociarla estrictamente a la TG. Pero, si proponemos asociarla al inicio de las EMCI, -siempre que cumplan con ser suficientemente intensas como son las TG de nivel V- al incidir con la magnetosfera, algunas de ellas pueden ocasionar variaciones en el Dst mayor a la diferencia diurna-nocturna ( $> 20\text{nT}$ ) y con una duración que alterará la percepción día-noche, del organismo en cuestión, y suponemos responderá con una variación en la PA.

En la Tabla 6.1, se muestra los momentos de inicio de las EMCI asociadas a las TGs estudiadas, en donde se observan que las TG\_A, TG\_C, TG\_D, cumplen con las condiciones propuestas para propiciar una variación en la PA. Esto proponemos pueda explicar los resultados obtenidos por Dimitrova et al. [2008], para TG nivel V. Por otra parte las gráficas de Dimitrova et al. [2008], Figuras 5.4, 5.5), mostraron un descenso paulatino de la PA, que duro varios días, que temporalmente coinciden con fases de recuperación largas de las TGs, estudiadas para Sol activo.

En lo referente a TG\_S ocurrida durante el Sol quieto, la recuperación a valores normales de la PA fue más rápida. TG\_S, por su parte, es consecuencia del plegamientos en el borde del HC, dado que presenta patrones similares en el campo magnético cada 27 días, con bajas de  $Dst \sim -43\text{nT}$ , lo que nos habla de un mismo origen y de una estructura estable.

La investigación de Azcárate et al. [2011] se centra en TG\_S, con un comportamiento similar a las TGs de Dimitrova et al. [2008] niveles III y IV, cuando realmente está en el nivel II. Pensamos pueda deberse al protocolo de toma de presión. Esto es, en los estudios de Dimitrova et al. [2008], la lectura de la PA se realizó únicamente por la mañana, en cambio el protocolo de toma de PA de Azcárate et al. [2011], es ambulatorio y pone atención en las variaciones circadianas de PA.

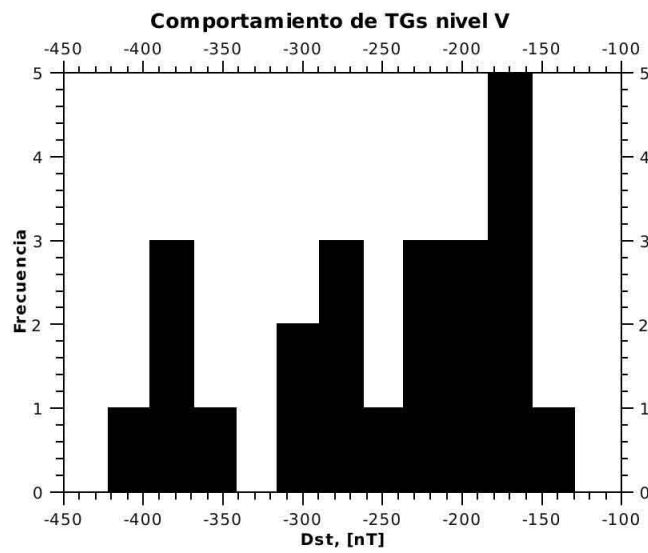


Figura 6.1:

La gráfica muestra en el eje vertical la frecuencia de TG nivel V, durante el ciclo solar 23. En el eje horizontal los valores del índice Dst de las TGs. Se puede observar que las TGs estudiadas para Sol activo son las más frecuentes, ya que se encuentran entre -150nT y 300nT.

Cabe señalar que en el ciclo solar 23, se presentaron 23 TGs de nivel V con valores en el índice geomagnético Dst que van de  $-157\text{nT}$  a  $-422\text{nT}$ , por lo que las comprendidas en el estudio para Sol activo, son representativas, considerando que el valor promedio del Dst fue de  $-256.5\text{ nT}$ .

En el año 2008, el Sol presentó baja actividad; la TG\_S se dio por pequeños bucles magnéticos Suess et al. [2009], atrapados en la HNCH.

En pocas palabras, cuando la actividad magnetosférica es tal que perturba en forma sostenida la periodicidad diurna-nocturna del campo magnético, suponemos que podemos esperar alteraciones en la presión arterial humana; provocada ya sea por TG o por comienzos repentinos.

El desarrollo de investigaciones de este tipo pensamos, es necesario ya que de encontrarse una relación entre actividad geomagnética y presión arterial podría dar pie a programas preventivos en el área medica.

Las investigaciones en las cuales nos basamos, mostraron con significancia estadística una simultaneidad entre la PA y las TGs. Nos esforzamos por brindar un estudio del clima espacial que coadyuve a la búsqueda de respuestas sobre la posible relación entre la PA y las TGs.

Los resultados obtenidos, nos marcan nuevos enfoques a futuro en este tipo de investigaciones.

Por lo que se propone incrementar la precisión (del orden de horas) en el comportamiento de la PA de los sujetos investigados. Así como ampliar los estudios a personas hospitalizadas con padecimientos no cardiovasculares cuyas convalecencias sean prolongadas y su movilidad poca, disminuyendo posibles variables que oculten las variaciones en la PA.

Con base en la reflexión de los resultados de ésta y otras investigaciones se podría plantear que más que una coincidencia se debe a que el campo magnético, en su variación diurna-nocturna existe desde que la vida en la Tierra se dio. Y si la vida inicia con la presencia de protomembranas que permitieron aislar al organismo de su exterior, y seleccionar sus insumos de sus deshechos. Lo que al paso de la evolución dará por resultado diferentes canales, cuya especialización ha aumentado conforme a la evolución del organismo vivo. Estos canales presentan corrientes eléctricas, y por ende, campos magnéticos.

Suponer que la vida desechara la ciclicidad diurno-nocturna del campo magnético, enfasada con la ciclicidad día-noche, me parece derrochadora. Siendo que los fenómenos vitales son altamente eficientes.

Si ponemos atención en procesos de la membrana celular, éstos nos pueda dar características de los campos magnéticos que puedan interaccionar con ella y de que forma. Guiando la búsqueda de este tipo de variaciones en el campo geomagnético provocadas por actividad de la magnetosfera terrestre.

Resulta necesario profundizar en el estudio de la dinámica magnetosferica en torno de las TGs.

# Bibliografía

- M. J. Aschwanden. *Physics of the solar corona: an introduction whit problems and solutions*. Springer Science & Busines, 2005.
- T. Azcárate, B. Mendoza, and Sánchez de la Peña. Variación temporal de la presión arterial en jóvenes y su relación con la actividad geomagnética a latitudes medias. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2011.
- L. Burlaga, R. Fitzenreiter, and R. Lepping. Una nube magnética que contiene material de importancia: enero de 1997. *Journal of Geophysical Research*,, 103, 1998. doi: 10.1029/97JA02768.
- T. E. Cravens. *Physics of Solar System Plasmas*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1997.
- S. Dimitrova, F. R. Mustafa, I. Stoilova, E. S. Babayev, and E. A. Kazimov. Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: Results of collaborative bulgarian-azarbaijani studies. *Advances in Space Research*, 2008. doi: 10.1016/j.asr.2008.09.006.
- H. J. Durand-Manterola. Efectos de tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera de las estaciones el cerrillo (toluca, méxico) y boulder (colorado, cua). *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(2):366–373, 2010.
- M.L. Fanjul and M.Hiriart. *Biología Funcional de los Animales*. siglo XXI editores, S. A. de C. V., 2 edition, 2008.
- W.F. Ganong. *Fisiología Médica*. Manual Moderno, 22 edition, 2006.
- W. D. Gonzalez, J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasyliunas. What is a geomagnetic storms? *Journal of Geophysical Research*, 99(A4):5771–5792, 1994.

- J.T. Gosling. The solar flare myth. *Journal of Geophysical Research*, 98:18,937–18,949, 1993. doi: 0148-0227/93/93JA-01896.
- A. Gruart, J.M. Delgado, C. Escobar, and R. Aguilar Robledo. *Los relojes que gobiernan la vida*, volume 188. SEP, CONACYT, fondo de cultura edition, 2002.
- J.L. Kirschvink, M. M. Walker, and C. E. Diebel. Magnetite-based magnetoreception. *Current Opinion in Neurobiology*, 11:462–467, 2001.
- M.G. Kivelson and C. T. Russell. *Introduction to Space Physics*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.
- A. Dal Lago, L. E. A. Vieira, E. Echer, W. D. Gonzalez, A. L. Clúa de Gonzalez, F. L. Guarnieri, L. Balmaceda, J. Santos, M. R. Silva, A. de Lucas, and N. J. Schuch. Great geomagnetic storms in the rise and maximum of solar cycle 23. *Brazilian Journal of Physics*, 34(4B), 2004.
- K. R. Lang. *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2001.
- O. G. Morales and R. A. Caballero. Estudio del gradiente de intensidad de los rayos cósmicos galácticos en el máximo solar. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2010.
- V. Ontiveros and J. A. Gonzalez-Esparza. Geomagnetic storms caused by shocks and icmes. *Journal of Geophysical Research*, 115(NewValue0), 2010. doi: 10.1029/2010JA015471.
- E.R. Priest. *Magnetic Reconnection*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2000.
- C. T. Russell. The structure of the magnetopause. *Planetary and Space Science*, 51:731–744, 2003.
- Williamson S.J. and L Kaufman. Biomagnetism. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, (22):129–201, 1981.
- S.Johnsen and K. J. Lohmann. The physics and neurobiology of magnetoreception. *Neuroscience*, 6, 2005.



- Suess and B. T. Tsurutani, editors. *From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*. American Geophysical Union, Washington, DC, 1998.
- S. T. Suess, R. von Staiger, and R. L. Moore. Quiescent current sheets in the solar wind and origins of slow wind. *Journal of Geophysical Research*, 114 (A04103), 2009. doi: 10.1029/2008JA013704.
- B. T. Tsurutani, C. T. Russell, J. H. King, R. D. Zwickl, and R. P. Lin. A kinky heliospheric current sheet: Cause of cdaw-6 substorms. *Geophysical Research Letters*, 11(4):339–342, 1984.
- J. P. Vallée. Observations of the magnetic fields inside and outside the solar system: From meteorites ( $\sim 10$  attoparsecs), asteroids, planets, stars, pulsars, masers, to protostellar cloudlets ( $< 1$  parsec). *Fundamentals of Cosmic Physics*, 19, 1998.
- H. Xie, N. Gopalsswamy, P. K. Manoharan, S. Yashiro, A. Lara, and S. Lepri. Cmes and long-lived geomagnetic storms: A case study. *International Astronomical Union*, (226), 2004. doi: 00.0000/X000000000000000X.
- J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb, N. Gopalsswamy, E. Hunttunen, J. C. Kasper, N. V. Nitta, W. Poomvises, B. J. Thompson, C. C. Wu, S. Yashiro, and A. N. Zhukov. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $\text{dst} \leq -150\text{nt}$ ) during 1996-2005. *Journal of Geophysical Research*, 112, 2007. doi: 10.1029/2007JA012321.
- H. Zirin. *Astrophysics of the Sun*. Cambridge University Press, 1989.