



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis estadístico de
ocurrencia de posibles sitios
de reconexión magnética en
el entorno terrestre**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Guzmán Carmona Gabriel Arturo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Primož Kajdič

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicado a mi familia

“Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”.

Albert Einstein

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por alentarme durante todos estos años, por haberme inculcado buenos valores y hacer de mí, una mejor persona. A mi hermano por haber estado conmigo en todo momento y brindarme su compañía, amistad y confianza. A mis “Titos”, por todo el apoyo y cariño que me brindaron de mil maneras posibles. A José, Gustavo y Aracely por cuidarme, aconsejarme y guiarme durante mucho tiempo. A mi tío Juan y mi Abuelo “León”, por sus consejos, apoyo y disposición de ayudar en los momentos que lo necesitaba.

A toda mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y cariño que me han brindado a lo largo de vida.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido formarme en ella, tanto de manera profesional como personal. A todos los profesores que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta.

A mi director de tesis, el Dr. Primož Kajdič, por su apoyo, tiempo, dedicación, conocimiento y consejos para mejorar esta tesis. A mis sinodales: la Dra. Xóchilt Blanco Cano, el Dr. Alberto Flandes Mendoza, el Dr. Oswaldo Sánchez Zamora y el Ing. Marco Rubio Ramos, por los consejos y tiempo invertido en revisar y sugerir ideas para mejorar esta tesis.

Agradezco a todas las personas que conocí durante la universidad, algunas de ellas que por diferentes circunstancias estuvieron poco tiempo, pero que con ellas tuve grandes aprendizajes. Otras más que estuvieron hasta el final, convirtiéndose en grandes amigos: Cinthya, Jesús Pulido, Uriel, Jesús Gómez y Karen.

Resumen

Estudios de ciencias espaciales demostraron la existencia de estructuras magnéticas expulsadas del Sol que pueden desencadenar intensas perturbaciones globales del campo geomagnético llamadas tormentas y subtormentas geomagnéticas. Recientemente la comunidad científica ha puesto mucha atención a otro tipo de perturbaciones del campo geomagnético más débiles pero importantes llamados escapes de reconexión magnética.

En la actualidad existen pocos estudios estadísticos sobre la tasa de ocurrencia de los escapes de reconexión en diferentes regiones cercanas a la Tierra. El enfoque del presente trabajo se basó en el análisis comparativo de tasas de rotación del campo magnético interplanetario (CMI), debido a que son la primera condición que se debe cumplir para que ocurran los escapes de reconexión.

Se realizó una búsqueda de posibles sitios de reconexión magnética utilizando mediciones *in situ* hechas por la nave espacial C1 de la misión Cluster II. Los datos se obtuvieron en el marco de la convocatoria de la Agencia Espacial Europea (ESA) llamada “Cluster Guest Investigator Programme”. Se determinó el número de rotaciones del CMI en función del rango del ángulo θ_{CM} en cada región de estudio (viento solar pristino, antechoque y magnetofunda) y se compararon las frecuencias relativas para determinar cómo dependen de la región estudiada y de la resolución temporal de los datos. Se observó que en todas las regiones predominaron rotaciones con ángulos θ_{CM} menores a 20° . Su frecuencia relativa fue mayor en la región del viento solar (98.75% – 99.65%), seguida de la región del antechoque (93.94% - 99.39%) y finalmente por la de magnetofunda (94.64% - 98.96%). Por otro lado, se demostró que hay más rotaciones con ángulos θ_{CM} mayores en la magnetofunda, seguida por el antechoque y el viento solar. También se demostró que conforme la resolución temporal de los datos disminuye, aumenta la frecuencia relativa observada de ángulos θ_{CM} mayores a 20 grados.

Abstract

Studies in the field of space science show the existence of magnetic structures ejected from the Sun that can trigger global magnetospheric disturbances called geomagnetic storms and substorms. Recently the scientific community had focused its attention on the so called magnetic reconnection exhausts that can cause small scale perturbations of the geomagnetic field.

Until now, only a handful of studies have statistically analysed the occurrence of reconnection exhausts in different regions near the Earth. In the present study I analyse the occurrence rates of interplanetary magnetic field (IMF) rotations, because they are the first condition that must be met for the reconnection exhausts to occur.

A search of possible magnetic reconnection sites was performed by using *in situ* measurements made by the C1 spacecraft of the Cluster II mission. The data was obtained in the framework of the call of the European Space Agency (ESA) called "Cluster Guest Investigator Programme". The occurrence of IMF rotations was determined for different angle (θ_{CM}) ranges in each region of interest (pristine solar wind, foreshock and magnetosheath) and different temporal resolutions of the data. The results show that regardless of the region of interest and the data resolution, most of the IMF rotations are small with $\theta_{CM} \leq 20^\circ$. Their relative frequencies were highest in the solar wind (98.75% - 99.65%), followed by the foreshock region (93.94% - 99.39%) and finally by the magnetosheath (94.64% - 98.96%).

Comparing relative frequencies in different regions showed that more rotations with large θ_{CM} occur in the magnetosheath, followed by the foreshock and the solar wind. Finally, It is also shown that as the time resolution of the data decreases, the observed relative frequencies of IMF rotations with angles higher than 20° increase.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Justificación	5
1.2	Objetivos.....	6
2	Marco Teórico.....	7
2.1	Sol.....	7
2.1.1	Estructura interna del Sol	7
2.1.1.1	Núcleo solar.....	9
2.1.1.2	Zona radiactiva	10
2.1.1.3	Zona convectiva.....	11
2.2	Superficie solar	12
2.2.1	Fotósfera.....	12
2.2.1.1	Manchas solares.....	12
2.2.1.2	Gránulos solares	13
2.2.1.3	Fáculas.....	13
2.3	Atmosfera solar.....	14
2.3.1	Cromósfera	14
2.3.1.1	Espículas.....	14
2.3.1.2	Protuberancias y filamentos	15
2.3.2	Corona	15
2.4	Campo magnético solar	16
2.4.1	Hoja de corriente	17
2.5	Viento solar.....	19
2.5.1	Heliosfera	20
2.5.2	Mediciones de partículas y campos <i>in situ</i>	21
2.5.3	Eyecciones de masa coronal.....	24
2.6	Campo geomagnético	25
2.6.1	Geomagnetismo.....	25
2.6.2	Naturaleza del campo geomagnético.....	26
2.6.3	Componentes magnéticas.....	27
2.6.4	Variaciones del campo geomagnético.....	30
2.6.4.1	Variación diurna	30

2.6.4.2	Variación anual.....	30
2.6.4.3	Variación secular.....	30
2.6.5	Tormentas y subtormentas geomagnéticas.....	31
2.6.5.1	Tormentas geomagnéticas.....	31
2.6.5.2	Subtormentas geomagnéticas.....	32
2.6.5.3	Pulsaciones magnéticas.....	33
2.7	Interacción VS – campo geomagnético.....	33
2.7.1	Magnetosfera terrestre.....	33
2.7.2	Choque de proa terrestre.....	36
2.7.3	Magnetofunda.....	37
2.7.4	Magnetopausa.....	38
2.7.5	Magnetocola.....	39
2.8	Misión Cluster II.....	42
2.8.1	Instrumentación.....	42
2.8.2	Misión Cluster II en el entorno terrestre.....	44
2.9	Reconexión magnética.....	46
3	Desarrollo.....	54
4	Resultados.....	58
4.1	Identificación de posibles sitios de RM.....	58
4.1.1	Región de VS.....	58
4.1.2	Región de ANT.....	59
4.1.3	Región de MGTF.....	59
4.2	Resultados estadísticos.....	63
4.2.1	Ángulos θ_{CM} en función de la región.....	65
4.2.2	Ángulo θ_{CM} en función de la resolución temporal.....	69
5	Conclusiones.....	71
6	Referencias.....	73
7	Anexos.....	76

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura interna del Sol	10
Figura 2. Manchas solares.....	13
Figura 3. Fácúlas solares.....	14
Figura 4. Corona vista en la línea del Fe XII	16
Figura 5. Campo magnético solar	17
Figura 6. Espiral de Arquímedes.....	19
Figura 7. Modelo de la heliósfera	22
Figura 8. Eyección de masa coronal	24
Figura 9. Elementos geomagnéticos	28
Figura 10. Representación esquemática de una tormenta geomagnética.....	32
Figura 11. La magnetosfera terrestre	35
Figura 12. Modelo de gas dinámico para la magnetofunda	38
Figura 13. Representación esquemática de la magnetofunda	41
Figura 14. Misión Cluster II con la configuración del 14 de febrero de 2003.....	45
Figura 15. Esquema del modelo de reconexión magnética de Petschek.....	47
Figura 16. Esquema idealizado 2D de un sitio de reconexión	49
Figura 17. Ejemplo de un sitio de RM	51
Figura 18. Escape de RM del 10 de abril de 2002	52
Figura 19. Escape de RM del 11 de agosto de 1995	53
Figura 20. Sistema eclíptico solar geocéntrico (GSE)	55
Figura 21. Posible sitio de RM del 02/04/2016	60
Figura 22. Posible sitio de RM del 08/03/2016	61
Figura 23. Posible sitio de RM del 03/04/2016	62
Figura 24. Ángulos θ_{CM} correspondientes a los 3 primeros días del mes de marzo	64
Figura 25. Frecuencia relativa del ángulo θ_{CM} durante marzo – abril.....	67
Figura 26. Comparación del ángulo θ_{CM} en función de cada región	68
Figura 27. Comparación del ángulo θ_{CM} en función de la resolución temporal	70

Índice de Tablas

Tabla 1. Ramas principales de las ciencias geofísicas	1
Tabla 2. Datos generales del Sol	8
Tabla 3. Parámetros del VS a 1 u.a	23
Tabla 4. Unidades equivalentes del campo magnético	29
Tabla 5. Instrumentos científicos a bordo de las naves espaciales misión Cluster II.	43
Tabla 6. Intervalos de tiempo de mediciones tomadas por la nave espacial Cluster C1.....	56
Tabla 7. Separación de ángulos θ_{CM} obtenidos en 9 intervalos.....	57

Índice de Anexos

Anexo A. Relación matemática entre elementos del vector de campo geomagnético (B).	76
Anexo B. Ecuaciones de transformación entre cada sistema de coordenadas	77
Anexo C. Intervalos de medición nave Cluster C1 - marzo	78
Anexo D. Intervalos de medición nave Cluster C1 - abril.....	83

Abreviaturas

ANT Antechoque

\bar{B} Campo magnético

CMI Campo magnético interplanetario

C1 Nave Cluster C1

D_{\oplus} Diámetro terrestre

MGTF Magnetofunda

M_{\oplus} Masa terrestre

R_{\odot} Radio solar

R_{\oplus} Radio terrestre

RM Reconexión magnética

VS Viento solar

θ_{CM} Ángulo de corte magnético

1 INTRODUCCIÓN

La geofísica se puede definir como el estudio de la Tierra a partir de los fenómenos físicos asociados a nuestro planeta, permitiendo con base en observaciones establecer las condiciones internas y externas de la Tierra (Del Valle, 2012).

La diversidad de características y manifestaciones de los fenómenos físicos terrestres, y posiblemente presentes en otros cuerpos del sistema solar, como el vulcanismo, campos magnéticos y variaciones climáticas y atmosféricas, amplían los criterios y parámetros utilizados en el campo de estudio de la Geofísica. Por tal motivo fue necesario recategorizar y subdividir a las “Ciencias Geofísicas” de acuerdo a objetivos particulares.

La Unión Geofísica Americana (American Geophysical Union, AGU) agrupa a las ciencias geofísicas en dos ramas principales: la geofísica interna que analiza los fenómenos físicos y las manifestaciones que ocurren en el interior de la Tierra y la geofísica externa que estudia los procesos físicos en la superficie y exterior del planeta como también en el entorno terrestre (Tabla 1) (Del Valle, 2012).

Tabla 1. Ramas principales de las ciencias geofísicas. Modificada de Del Valle (2012).

Geofísica interna	Geofísica externa
Sismología	Hidrología
Vulcanismo	Oceanografía
Geomagnetismo	Meteorología
Geodesia	Aeronomía
Tectonofísica	Ciencias Planetarias

Cada una de las ciencias geofísicas tiene estructura propia y procedimientos específicos para obtener o interpretar resultados. La adquisición y calidad de datos son importantes para entender adecuadamente ciertas manifestaciones y comportamientos de la naturaleza, siendo necesario establecer especialidades con objetivos particulares y características que no muestran relaciones con el tronco original de las ciencias involucradas. Esto se hace particularmente evidente en las ciencias espaciales que estudian, entre otras cosas, el entorno terrestre (p. ej. Planetas Terrestres o sólidos).

Las ciencias espaciales se pueden definir como el estudio de la naturaleza del espacio, en particular hacia el exterior de la ionósfera y la magnetósfera y sus efectos sobre la Tierra. Los estudios de otros cuerpos del Sistema Solar por medio de sondas o naves espaciales tienen como objetivo determinar las diversas etapas de evolución de la materia y campos potenciales, para la reconstrucción de procesos que han tenido y tienen lugar en el Universo y la Tierra (Del Valle, 2012).

Con relación a la Tierra, las ciencias espaciales estudian los fenómenos que ocurren en el espacio interplanetario y como estos afectan al entorno terrestre, esto es el campo geomagnético y la ionósfera de nuestro planeta. El término con el que se describen las condiciones variables en el espacio interplanetario cercano a la Tierra es el denominado “clima espacial”.

La fuente del clima espacial es el Sol, que es la estrella más cercana a la Tierra y es reservorio de la energía que mantiene la vida y los ciclos elementales operativos de nuestro planeta (p. ej. Ciclo de carbono, H_2O , azufre, etc.). La distancia que nos separa del Sol es $\approx 15 \times 10^7 \text{ km}$ (se denomina unidad astronómica, u.a.) y equivale a poco más de ocho minutos luz. El material que llena gran parte del espacio en nuestro sistema solar es llamado medio interplanetario o viento solar, el cual principalmente consiste de un gas ionizado continuamente emitido por el Sol y que

fluye por el espacio interplanetario con velocidades de algunos cientos de kilómetros por segundo. El viento solar forma una coraza cuando interactúa con el medio interestelar alrededor de él llamada heliósfera y ésta abarca todo el sistema solar. La forma de la heliósfera es achatada en el frente (en dirección del desplazamiento del Sol y la Galaxia) y alargada por detrás (similar a la estela de los cometas).

Al propagarse por el medio interplanetario, el viento solar interacciona con diferentes cuerpos celestes y sus respectivos campos magnéticos (planetas, satélites, cometas y asteroides). El viento solar confina al campo geomagnético en una cavidad conocida como la magnetósfera, la cual se define como la región de un cuerpo planetario dominado por su campo magnético. Debido a esta interacción se pueden distinguir diversas regiones en el espacio cercano a la Tierra: choque de proa terrestre, antechoque, magnetofunda y magnetopausa.

En el choque de proa el viento solar se desacelera y se desvía para fluir alrededor de la magnetósfera. La región a lo largo del choque donde parte del material del viento solar (iones) puede reflejarse se conoce como antechoque. La magnetopausa es el borde de la capa límite de la magnetosfera, mientras que la región entre el choque de proa y la magnetopausa es llamada magnetofunda.

La magnetosfera terrestre es sensible a las variaciones en el viento solar. Bajo circunstancias adecuadas, la interacción del viento solar y los fenómenos transitorios intrínsecos con el campo geomagnético puede dar lugar a las más grandes perturbaciones del campo, llamadas tormentas y subtormentas geomagnéticas. Durante estos eventos, debido a la reconexión magnética entre el campo geomagnético y campo magnético interplanetario, se permite la entrada de las partículas del viento solar (iones y electrones) de forma directa en la magnetosfera e incluso en la ionosfera terrestre. La reconexión magnética es un proceso en donde ocurre un reordenamiento en la

configuración de las líneas de campo magnético, transformando la energía magnética en energía cinética mediante la aceleración de las partículas cargadas. La misión Cluster II ha brindado las primeras pruebas de reconexión magnética cercana a la Tierra.

Con el objetivo de estudiar pequeñas estructuras en la magnetosfera y su entorno, la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) en colaboración con la NASA lanzó la misión Cluster II conformada por cuatro naves espaciales idénticas que atraviesan los bordes internos y externos a la magnetosfera terrestre, lo que ha sido clave para comprender cambios en el entorno espacial que pudieran afectarla.

Existen otros fenómenos en el viento solar que también perturban el campo geomagnético y aunque estas perturbaciones tienen magnitudes mucho menores que las (sub)tormentas, han sido detectadas incluso en la superficie de nuestro planeta. Un fenómeno de este tipo son los “escapes” de reconexión magnética. Estos han sido observados en el viento solar pristino. Son lugares donde se modifica la topología del campo magnético interplanetario y donde la energía magnética es convertida en la energía térmica y cinética del viento solar. Así, entre sus firmas observacionales más emblemáticas están: a) disminución de la magnitud del campo magnético, b) rotación repentina del mismo, c) un aumento en temperatura del plasma y d) un incremento de la velocidad del viento solar.

En este trabajo fueron utilizados los datos del campo magnético de la misión Cluster II con el fin de caracterizar estadísticamente las rotaciones del campo en el viento solar, en las regiones donde esto sucede la reconexión magnética es posible y por tanto los “escapes” de reconexión.

1.1 Justificación

La existencia del viento solar fue propuesta por primera vez hace poco más de 50 años (Priest et. al., 2000). En él se han observado muchos fenómenos que pueden perturbar el campo geomagnético incluso a nivel de superficie. Entre los fenómenos estudiados por la geofísica, destacan las eyecciones de masa coronal interplanetarias y regiones de interacción de corrientes que perturban a la magnetosfera terrestre globalmente dando lugar a tormentas y subtormentas geomagnéticas, causantes de alteraciones en satélites de comunicaciones, sistemas de posicionamiento global (GPS) y sondas espaciales, por mencionar algunas.

Eventos a escalas mucho más pequeñas, como son los escapes de reconexión magnética pueden perturbar la magnetosfera de manera local, sin embargo, se sabe poco sobre sus efectos en el entorno terrestre y pocos estudios han realizado un análisis estadístico sobre dichos fenómenos. Hasta la fecha no se ha estimado la tasa de ocurrencia de los escapes de reconexión en diferentes regiones cercanas a la Tierra, como son el viento solar, el antechoque y la magnetofunda. Tampoco se han realizado estudios comparativos de ocurrencias de estos eventos en el viento solar, antechoque y la magnetofunda.

Este trabajo fue enfocado al estudio comparativo de tasas de rotación del campo magnético interplanetario a escalas temporales $t \leq 1$ segundo. Estas rotaciones son la primera condición que se debe cumplir para que ocurran los escapes de reconexión. El estudio comparativo de los escapes de reconexión no se ha podido realizar, debido a la baja resolución de datos (velocidad, densidad y temperatura) con los que se contaban.

1.2 Objetivos

El objetivo principal consiste en identificar, a partir de las componentes magnéticas del campo magnético interplanetario, posibles sitios de reconexión magnética en regiones cercanas a la magnetosfera terrestre.

Objetivos específicos:

1. Calcular ángulos de corte magnético (θ_{CM}) utilizando vectores promedio de las componentes del campo magnético interplanetario promediados sobre intervalos de tiempo de 0.25 segundos, 0.5 segundos y 1 segundo y cuantificar los ángulos θ_{CM} en las regiones de viento solar, antechoque y magnetofunda.
2. Comparar la ocurrencia de ángulos θ_{CM} en las regiones de viento solar, antechoque y magnetofunda sobre intervalos de tiempo de 0.25 segundos, 0.5 segundos y 1 segundo.
3. Comparar el comportamiento de las tasas observadas de ángulos θ_{CM} en función de la resolución usada para promediar los datos del campo magnético.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sol

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y es la fuente de energía que mantiene la vida en nuestro planeta. Se formó hace 4.6 mil millones de años de una enorme nube interestelar de gas y polvo. El Sol está compuesto principalmente de hidrogeno y helio en un 74.9% y 23.8% respectivamente de su masa total. En menor proporción, el oxígeno contribuye con el 1%, el carbono con 0.3% y el neón y el hierro con el 0.2% (Blanco-Cano & Kajdič, 2009). El material en el Sol se encuentra en estado plasma, un estado de la materia conformado por iones y electrones a muy altas temperaturas que varían entre $\approx 5.7 \times 10^6 K$ en su núcleo y $\approx 5.8 \times 10^3 K$ en la superficie (Tabla 2).

La distancia que nos separa del Sol equivale a poco más de ocho minutos luz, es decir, que la luz viajando a una velocidad de $300,000 km/s$, tardaría en recorrer ocho minutos la distancia que nos separa del Sol. Esta distancia es conocida como unidad astronómica (u.a.) y es equivalente ≈ 150 millones de kilómetros.

2.1.1 Estructura interna del Sol

A partir de características físicas como temperatura, presión, densidad y composición química, es posible dividir estructuralmente al Sol en 3 capas interiores: núcleo, zona radiactiva y zona convectiva (Figura 1).

Tabla 2. Datos generales del Sol. Tabla modificada de Mendoza (2009).

Datos generales del Sol	
Galaxia a la que pertenece	Vía Láctea
Distancia a la Tierra	$1 u. a. \approx 150$ millones de km $\approx 215 R_{\odot}$
Radio	$\approx 696 \times 10^3$ km ($\approx 109 D_{\oplus}$)
Masa	$\approx 3.3 \times 10^5 M_{\oplus}$
Densidad	1.4 gr
Temperatura superficial	$\approx 5,800$ K
Temperatura del núcleo	$\approx 15,700,000$ K
Periodo de rotación	Tarda aproximadamente 25 días en rotar en su ecuador. Debido a que se trata de un cuerpo gaseoso, no rota de manera uniforme.
Edad estimada	4.6×10^9 años, se encuentra a la mitad de su vida
Luminosidad	10^{33} Watts
Pérdida de masa	Por viento solar, $\approx 10^{-14} M_{\odot}$

2.1.1.1 Núcleo solar

El núcleo representa el 1.5% del volumen del Sol, es la parte más caliente con una temperatura de ≈ 15.7 millones de grados Kelvin (K). Es aquí donde se produce la mayor parte de energía solar a través de potentes reacciones termonucleares, que transforman elementos químicos ligeros en elementos pesados. La reacción más común es la transformación de hidrógeno (H) en helio (He).

Debido a la alta temperatura en el núcleo solar, el gas en esta zona está compuesto de los núcleos atómicos y electrones sueltos que se mueven a muy altas velocidades. Considerando la alta densidad numérica de los núcleos de hidrogeno (protones), la probabilidad de colisión entre ellos es alta produciendo así un núcleo de helio (He). Se requieren cuatro protones de hidrogeno (H) para producir un núcleo de helio, neutrinos y fotones gamma. Los neutrinos son partículas que salen directamente del núcleo hacia el exterior, cruzando rápidamente las capas internas y la atmosfera solar hasta llegar al medio interplanetario. En el proceso se convierte 0.8 % de la masa de los protones en energía electromagnética, a estos procesos se les llama reacciones protón - protón.

La energía producida en el núcleo no sale de inmediato del Sol, es absorbida y reemitida en el interior solar por diferentes partículas, tardando hasta un millón de años para alcanzar la superficie del Sol. Debido a las reacciones termonucleares la composición química del núcleo cambia con el tiempo, y es diferente que el promedio de capas exteriores del Sol.

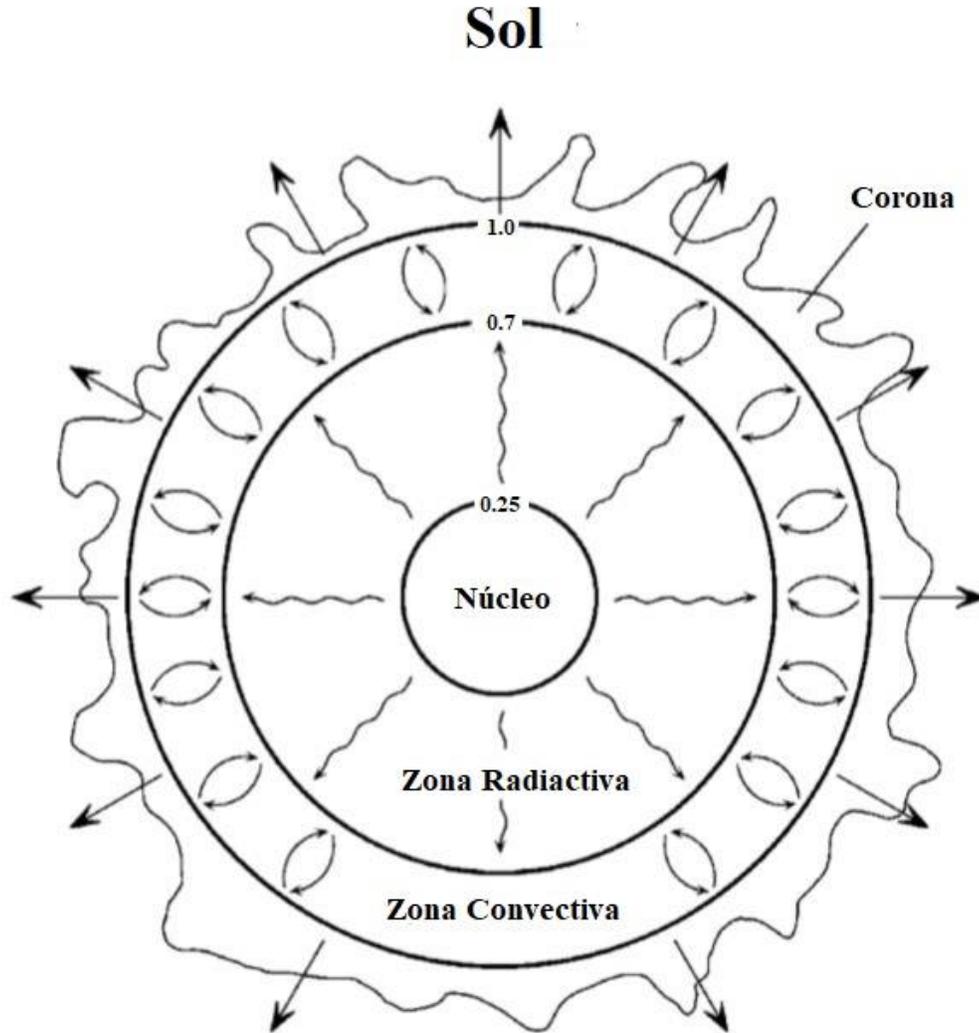


Figura 1. Estructura interna del Sol. En el núcleo ($\approx 0.25 R_{\odot}$), se produce la mayor parte de la energía del Sol mediante reacciones termonucleares, el transporte de esta energía se realiza por un flujo de fotones (zona radiativa) hasta $\approx 0.7 R_{\odot}$; a partir del fin de este intervalo (zona convectiva) el transporte de energía se realiza mediante el ascenso (hacia la superficie) y descenso (interior del Sol) de gas frío y caliente. Modificada de Faure et al., (2007).

2.1.1.2 Zona radiactiva

El nombre de esta región se debe a que la energía se transmite completamente por radiación¹ (no hay convección de gas). La zona radiactiva se extiende de 0.25 a $0.7 R_{\odot}$ y en ella la temperatura decrece rápidamente hacia afuera de 7×10^6 K a tan solo 2×10^6 K y la densidad de 20 a 2 g/cm^3 .

¹ Radicación: transferencia de calor que no requiere presencia de materia, se transfiere mediante ondas electromagnéticas, como las provenientes del Sol (Giancoli, 2006).

Debido al gradiente de temperaturas en el interior del Sol, los fotones que se mueven hacia el exterior tienen en promedio una energía ligeramente mayor que los fotones que se mueven hacia el interior. De este modo existe un flujo neto de radiación hacia el exterior. Este flujo es el agente principal del transporte de energía en la mayor parte del interior solar (Meyer-Vernet, 2007).

2.1.1.3 Zona convectiva

A diferencia de la zona radiactiva, en la zona convectiva el transporte de energía se lleva a cabo en mayor proporción mediante convección. Esta región se extiende desde $0.7 R_{\odot}$ hasta la superficie de Sol, en donde se forman grandes columnas de gas moviéndose hacia la superficie y regresando hacia el interior. Una manifestación de este hecho es la granulación que se manifiesta en la fotosfera. La densidad que se presenta en la parte más externa de la zona convectiva es de 0.2 g/cm^3 , lo que equivale a una 1/10,000 parte de la densidad del aire al nivel del mar (Blanco-Cano & Kajdič, 2009).

La convección² es común en fluidos calentados en niveles profundos, donde materia fría se encuentra sobre materia caliente. Como los fluidos más fríos tienden a ser más pesados y, por lo tanto, a hundirse, estas estructuras pueden ser inestables a movimientos opuestos, produciendo convección. A pesar de que la región de convección contiene solo un pequeño porcentaje de la masa solar, la convección juega un papel importante, al estructurar las capas superiores, producir un campo magnético y finalmente calentar la atmósfera solar (Meyer-Vernet, 2007).

² Convección: es la transferencia de energía mediante el movimiento en masa de las moléculas a través de distancias considerables (Giancoli, 2006).

2.2 Superficie solar

2.2.1 Fotósfera

La fotosfera es la capa que se observa a simple vista cuando se mira directo al Sol y es mejor conocida como superficie solar. Sin embargo, la fotósfera no es sólida, es una capa de gas de 500 km de grosor, con una temperatura aproximadamente de 5,800 K. Es la capa más fría del Sol debido a que las capas atmosféricas exteriores (cromosfera, corona) tienen temperaturas mucho más altas y parte de la energía que llega desde las capas inferiores es radiada en longitudes de onda que corresponden a la parte visible del espectro electromagnético. Ocurren muchos fenómenos solares en la fotósfera, como manchas solares, gránulos solares y fáculas (Mendoza, 2013).

2.2.1.1 Manchas solares

Mendoza (2013) menciona: “Las manchas solares son la manifestación visible de enormes tubos de flujo magnético que cruzan la fotósfera desde la zona de convección hacia la atmósfera superior”. Las manchas solares son por tanto una de las manifestaciones del campo magnético solar (sección 2.3). El número de manchas solares no es constante, sino que varía con un periodo aproximado de 11 años, y que es conocido como ciclo de actividad solar. Cuando la actividad solar es alta aparece un gran número de manchas solares, mientras que durante una actividad solar baja el número de manchas decrece o incluso no se observa ninguna. Las manchas solares pueden alcanzar un tamaño de varias decenas de miles de kilómetros, es por ello que pueden ser mucho más grandes que la Tierra (Figura 2).

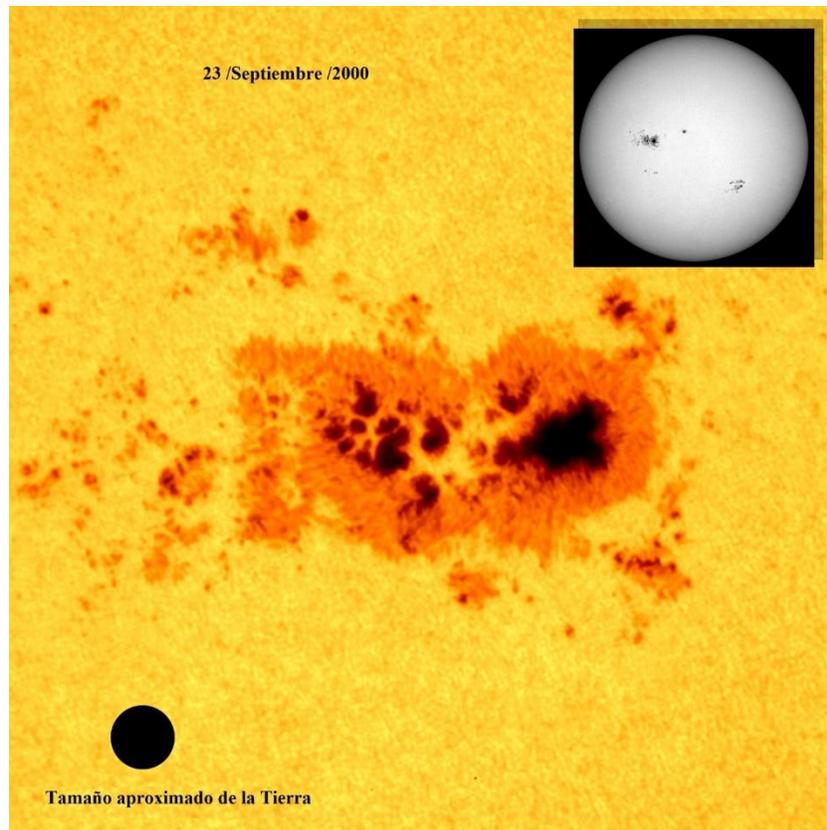


Figura 2. Comparación entre el tamaño de una mancha solar captada el 23 de septiembre del 2000 con el tamaño del planeta Tierra. Modificada de <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>.

2.2.1.2 Gránulos solares

Los gránulos solares son consecuencia de la dinámica de la zona convectiva. Estos se forman en la superficie solar debido al plasma proveniente de la zona convectiva, que asciende a la superficie solar, se enfría y luego regresa al interior del Sol. El tamaño típico de los gránulos es alrededor de 1,000 km y su tiempo de vida estimada es entre 8 y 20 minutos.

2.2.1.3 Fácúlas

Las fécúlas son regiones brillantes que se forman entre los gránulos solares debido a concentraciones del campo magnético.

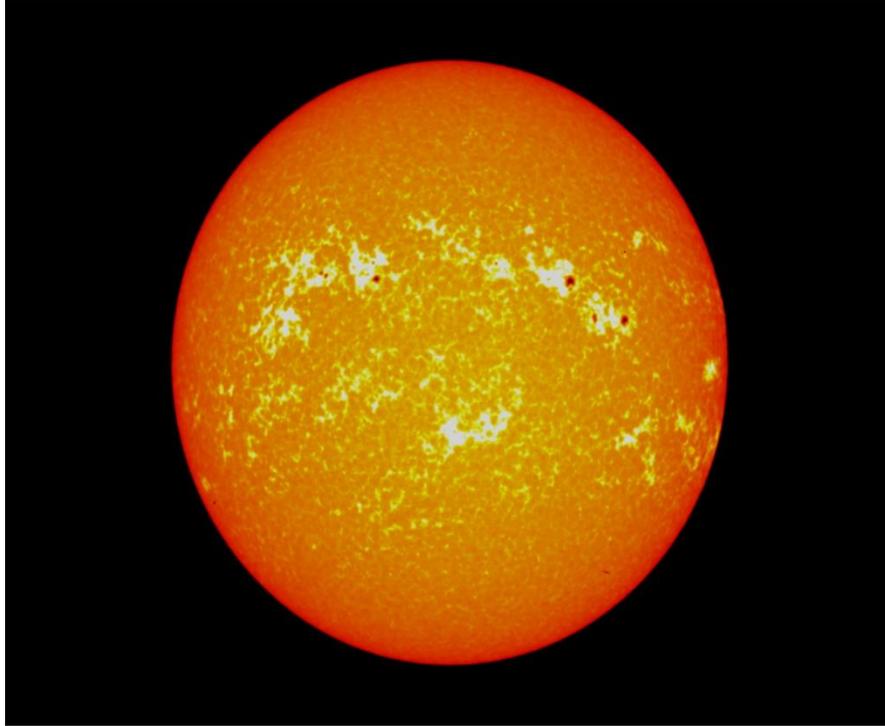


Figura 3. Las fáculas solares son regiones brillantes que se forman entre los gránulos. Modificada de <https://svs.gsfc.nasa.gov/2656/>.

2.3 Atmosfera solar

2.3.1 Cromósfera

Esta región es la capa inferior de la atmosfera solar. En ella la temperatura aumenta progresivamente hasta alcanzar 20,000 K aproximadamente a una altura de 1,000 – 2,000 km. Esta región se logra apreciar como un anillo de color rojo que rodea a la fotosfera durante un eclipse solar (Mendoza, 2013). Esta capa es extremadamente activa, pudiéndose observar fenómenos como espículas, protuberancias y filamentos.

2.3.1.1 Espículas

La cromósfera solar está cubierta de espículas. Estas son estructuras en forma de pico que asemejan las llamas de una hoguera con un tamaño de 10,000 km de largo y 1,000 km de ancho, con una velocidad aproximada de 20 km/s con una duración de 5 a 10 minutos.

2.3.1.2 Protuberancias y filamentos

Las protuberancias y los filamentos son enormes estructuras que se extienden desde la fotosfera hasta la corona. Se utilizan diferentes términos para describir el mismo fenómeno, pero observado de diferente ángulo. El término de protuberancia se usa cuando las estructuras se observan en el borde del Sol (forma de arco) y el término de filamento se utiliza al observar estructuras largas y delgadas sobre la superficie solar.

2.3.2 Corona

La corona es la capa externa de la atmósfera solar. No es posible observarla a simple vista debido a que la luz de la fotosfera es demasiado intensa. La corona se puede observar desde la Tierra solo durante los eclipses solares totales como un brillo blanco rodeando al Sol. En la actualidad existen instrumentos llamados coronógrafos. Estos dispositivos tapan el disco solar produciendo un eclipse artificial permitiendo observar la corona en el visible.

La temperatura de la corona llega a ser del orden de $10^6 K$ en unos pocos R_{\odot} y en la actualidad no se ha podido encontrar una respuesta satisfactoria del porque es tan elevada. Se piensa que las ondas magneto sónicas (con variaciones de la magnitud del campo magnético y densidad del plasma) originadas en las capas internas a la corona se disipan en ella cediéndole su energía. Otra hipótesis propone que las explosiones como ráfagas y micro-ráfagas calientan la corona (Blanco-Cano & Kajdič, 2009).

La actividad solar juega un papel importante en la forma, tamaño e intensidad de la corona; durante un mínimo solar gran parte de la corona se extiende en las regiones ecuatoriales del Sol (forma de dipolo) y en un máximo solar se distribuye en todas las latitudes solares (muchos dipolos pequeños).

La corona emite luz ultravioleta extrema (UVE) y rayos X, sin embargo, es necesario estar fuera de la Tierra para observarla en estas longitudes de onda, pues la atmosfera terrestre no permite el ingreso de la mayoría de esta radiación (Figura 4). Blanco-Cano & Kajdič, (2009) mencionan: “Observaciones de la corona en rayos X durante un mínimo muestran que las regiones cercanas a los polos no emiten. Estas regiones son conocidas como hoyos coronales polares”. Los hoyos coronales son regiones de campo magnético “abierto” en donde el material coronal puede escapar con facilidad, expandiéndose hacia el medio interplanetario y formando lo que se conoce como el viento solar (Mendoza, 2013).

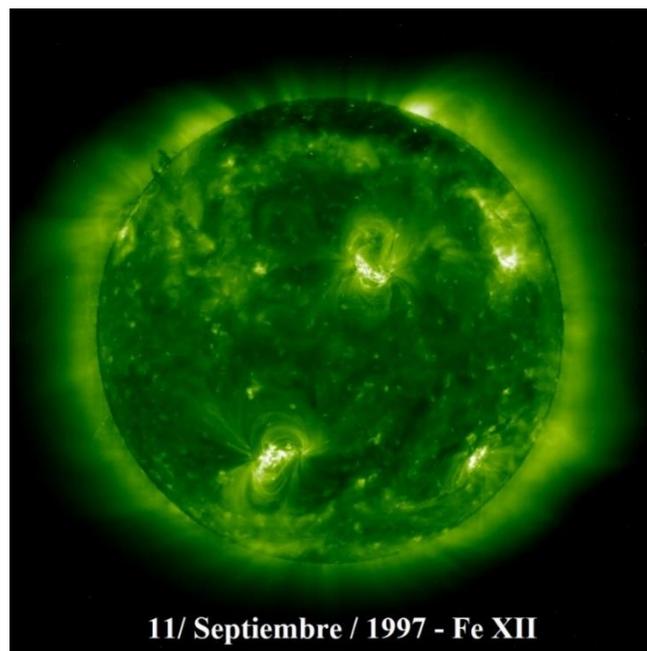


Figura 4. Vista de la corona en la línea del Fe XII en ultravioleta extrema, captada el 11 de septiembre de 1997. Se percibe en la región del polo poca manifestación de actividad magnética. Modificada de <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>.

2.4 Campo magnético solar

El campo magnético del Sol se genera probablemente en una capa de aproximadamente 20,000 km de espesor entre la zona radiactiva y convectiva. Es inducido por corrientes eléctricas que se activan cuando el plasma caliente fluye en el interior del Sol.

La geometría del campo magnético durante un mínimo solar (Figura 5) refleja que el Sol tiene polos magnéticos de polaridad opuesta cercanos al eje de rotación en promedio.

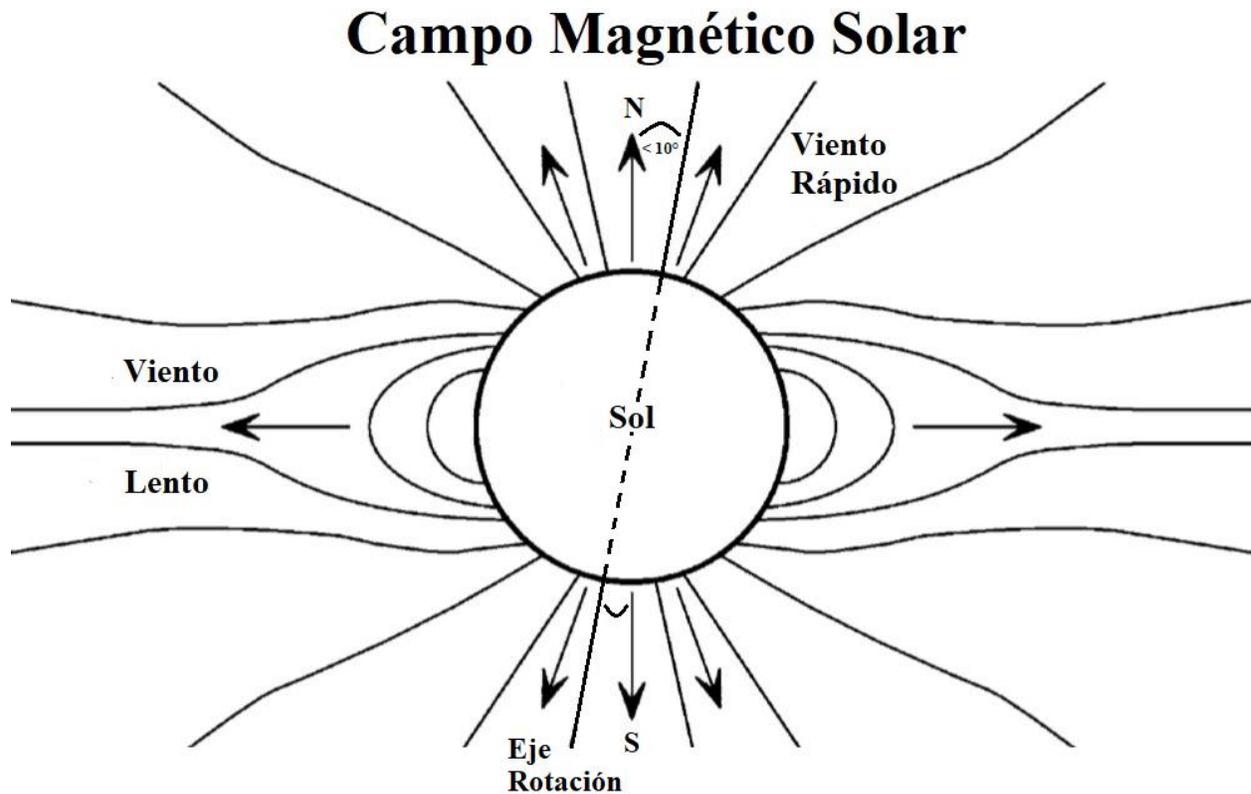


Figura 5. Campo magnético solar durante un mínimo solar. Partículas escapan a una mayor velocidad en la zona de los polos (700 km/s), mientras que en la zona ecuatorial es menor la velocidad (350 km/s). Modificada de Faure et al., (2007).

2.4.1 Hoja de corriente

Suponiendo que el campo magnético solar se puede representar con el campo de un dipolo más o menos alineado con el eje de rotación del Sol, las líneas de campo magnético cercanas al ecuador y a bajas latitudes se cierran completamente, saliendo por un hemisferio (norte o sur) y entrando por el otro. Sin embargo, a una altura aproximadamente de $2 R_{\odot}$ las líneas de campo no se cierran y parecen extenderse infinitamente al medio interplanetario.

Para alturas menores a $2 R_{\odot}$ (aproximadamente), la presión magnética en la región ecuatorial es más grande que la presión cinética, por lo tanto, el campo no permite que el plasma escape y se

tiene una configuración magnética cerrada. La magnitud del campo decrece con la altura, y llega un momento en el cual el plasma arrastra al campo magnético, con ello, el material sale disparado hacia el medio interplanetario para formar el viento solar (Mendoza, 2013).

La polaridad del campo se conserva a grandes alturas, desde el polo hasta llegar al ecuador en cada hemisferio. En el caso del ecuador, la polaridad cambia repentinamente y origina una discontinuidad. A esta región donde la dirección del campo magnético cambia de polaridad se le conoce como hoja neutra u hoja de corriente (Mendoza, 2013). Continuando con la idea que el dipolo magnético es paralelo al eje de rotación solar, la hoja de corriente se extendería de manera uniforme por el ecuador solar formando un plano ecuatorial. Sin embargo, el eje magnético no es paralelo al eje de rotación debido a que cambia su dirección con el tiempo. En este caso, se formará un ángulo pequeño ($< 10^\circ$) con el eje de rotación (durante tiempo de mínima actividad). Durante este periodo, la combinación de los efectos de rotación y las diferencias entre el eje de rotación y el eje magnético darán como resultado una forma peculiar de la hoja de corriente parecida a la falda de las bailarinas (Figura 6) (Mendoza, 2013).

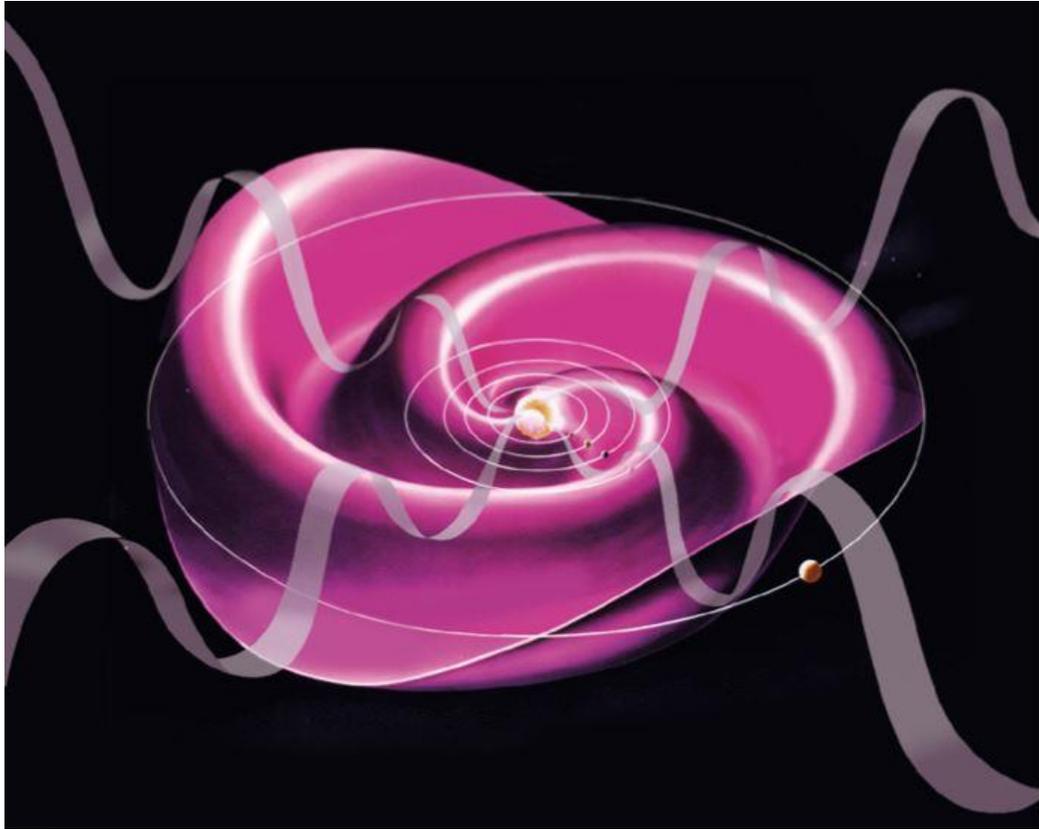


Figura 6. Representación de la hoja de corriente del campo magnético interplanetario y la espiral de Arquímedes, formada por la combinación de efectos de rotación y diferencias entre el eje de rotación y el eje magnético. Tomada de Mendoza (2013).

2.5 Viento solar

En la década de 1950 L. Biermann presentó argumentos convincentes de un flujo continuo de plasma en su estudio sobre las estelas gaseosas de los cometas. El modelo de la corona solar de S. Chapman en 1957 fue determinante al mostrar que la alta conductividad térmica del plasma caliente podría dar como resultado temperaturas relativamente altas y densidades apreciables alejadas de la fotosfera (distancia de 1 u.a.). Evidencias presentadas por Biermann y el modelo de Chapman llevó a Eugene N. Parker en 1958 a presentar el modelo hidrodinámico de una corona en expansión continua o viento solar, que ha sido más influyente en el pensamiento en los últimos 40 años.

Mediciones de naves espaciales en los últimos 60 años han demostrado que un flujo de partículas cargadas fluye del Sol hacia el espacio interplanetario. Lunik 1 confirmó la existencia del VS en 1959. Estudios sistemáticos con las misiones Mariner 2 y Venera en la década de 1960, han confirmado las características básicas del VS de acuerdo con las predicciones de Parker. Misiones espaciales cercanas al Sol (aproximadamente a 0.3 u.a.; misión Helios) como también muy lejanas como las Voyager o Ulises han ayudado a mejorar el conocimiento de la estructura tridimensional de la heliósfera, a definir una estructura básica de campos magnéticos heliosféricos, al entendimiento de la generación de perturbaciones en el campo geomagnético en los agujeros coronales y sobre las propiedades de los rayos cósmicos (Foukal, 2004). Las propiedades típicas del VS a 1 u.a. están resumidas en la Tabla 3.

2.5.1 Heliosfera

Al propagarse por el medio interplanetario, el viento solar forma una coraza interna cuando interactúa con el medio interestelar alrededor del Sol y los planetas del sistema solar llamada heliósfera. La forma de la heliósfera es achatada en el frente y alargada por detrás (similar a la estela de un cometa), debido a la resistencia que ejerce el medio interestelar en contra del movimiento del Sol (hacia adelante) sobre su órbita (Figura 7). La región donde termina la heliósfera se le llama heliopausa y es la superficie en la que la presión del viento solar es igual a la del medio interestelar. Las estimaciones actuales de la distancia entre el Sol y la nariz de la heliopausa varían entre 153 y 158 u.a.

El límite de la heliósfera fue cruzado por las naves Voyager 1 en 2012 y Voyager 2 en 2018.

2.5.2 Mediciones de partículas y campos *in situ*

Blanco-Cano & Kajdič, (2009) mencionan: “El viento solar (VS) está formado en su mayoría por protones y electrones con una pequeña componente de núcleos de helio (4%) y algunos elementos más pesados (1%): carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, silicio y hierro”.

Una característica importante del VS es que posee una alta conductividad eléctrica permitiéndole arrastrar consigo al campo magnético de la corona solar. Debido a esto, el espacio interplanetario está permeado por plasma y campo magnético interplanetario (CMI) de origen solar. La mayor parte de la información que ayuda a comprender al VS es recabada de mediciones *in situ* por naves espaciales (p.ej. de la misión Cluster II).

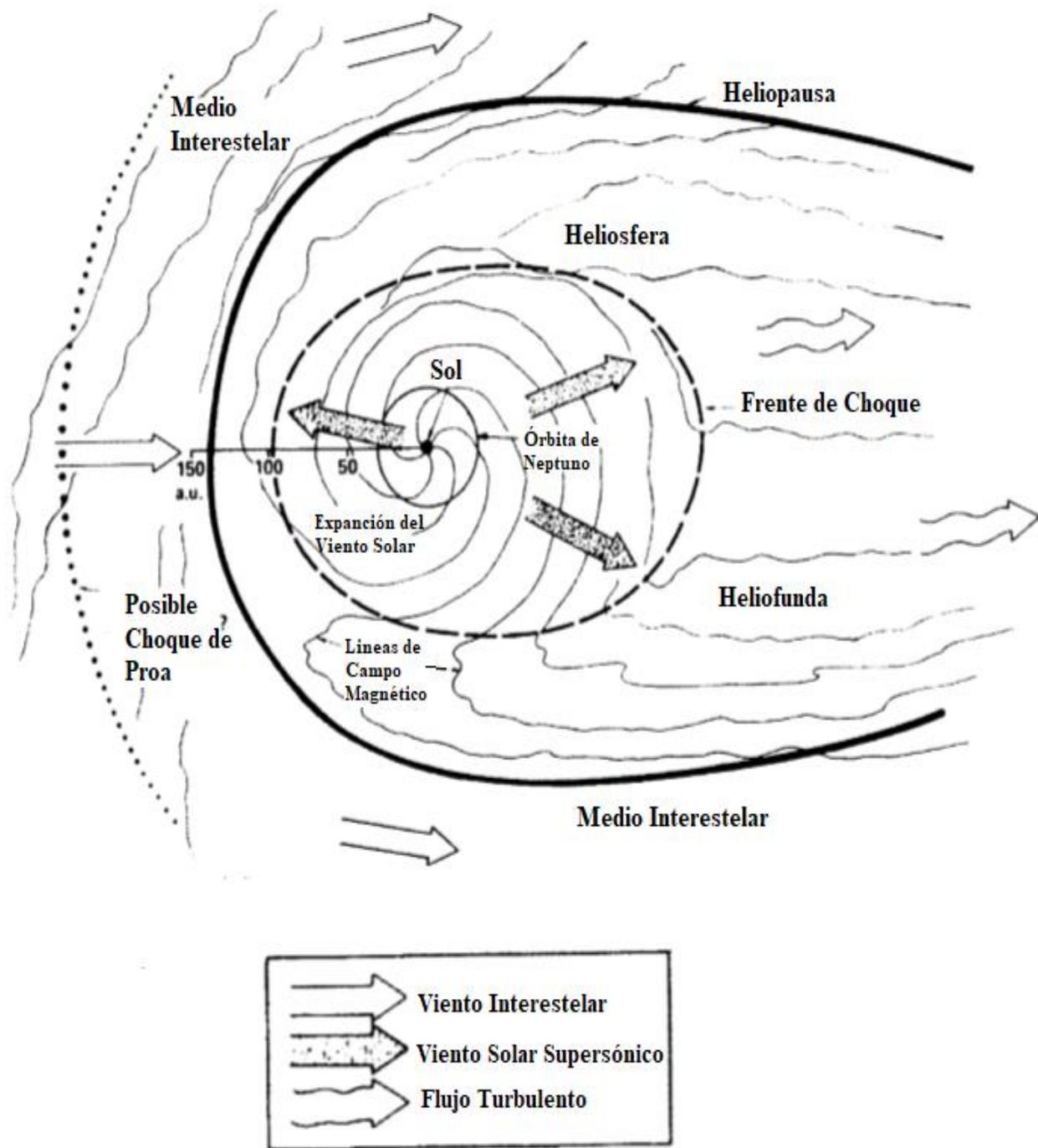


Figura 7. Modelo de la heliósfera. La propagación del VS por el medio interplanetario forma una coraza alrededor del Sol cuando interacciona con el medio interestelar. En la heliopausa las presiones del medio interestelar con el VS se igualan. El plano de la figura coincide con el plano del ecuador del Sol, el cual es aproximadamente el plano general de las orbitas planetarias. Modificada de Foukal (2004).

En su mayoría la densidad del plasma total a 1 u.a., el 90% del tiempo se encuentra entre 3 y 20 cm^{-3} , con un promedio de alrededor de 10 cm^{-3} (Tabla 3). La dispersión de la temperatura se encuentra a partir de la velocidad de las partículas en el marco de referencia del plasma. Los valores de temperatura medidos a partir de las componentes de electrones y protones están entre 100,000 - 150,000 K. La intensidad del campo magnético se encuentra en el rango de 2 y 10γ ($1 \gamma = 10^{-5} \text{ G}$). La velocidad del VS varía entre los 300 - 1,200 km/s , estas velocidades son más altas que la velocidad del sonido local, es por ello que se dice que el VS es supersónico. La velocidad del VS aumenta conforme se aleja del Sol hasta alcanzar una velocidad terminal durante todo el viaje por la heliósfera. La velocidad terminal dependerá de la temperatura de la corona, es decir, a mayor temperatura mayor será la velocidad. Por el contrario, la temperatura y la densidad del VS disminuyen a mayor distancia heliocéntrica.

Tabla 3. Parámetros del VS a 1 u.a. Modificada de Mendoza (2013).

Parámetros del VS	
Densidad (protones)	6.6 cm^{-3}
Densidad (electrones)	7.1 cm^{-3}
Velocidad	300 – 1,200 km/s
Temperatura (protones)	$1.2 \times 10^5 \text{ K}$
Temperatura (electrones)	$1.4 \times 10^5 \text{ K}$
Campo magnético	2 – 10γ

2.5.3 Eyecciones de masa coronal

Existe una gran cantidad de perturbaciones que viajan a través del VS. Entre ellas, las eyecciones de masa coronal (EMC) son las más grandes (Figura 8).

La mayoría de estas perturbaciones provienen de las regiones activas en el Sol con campos magnéticos cerrados. Su morfología es variada, en forma de lazos, como burbujas y algunos de geometría irregular. Presentan masas en el rango de 10^{15} - 10^{16} kg y velocidades de propagación entre 200 - 500 *km/s*. Durante un máximo solar se pueden observar hasta 6 EMC's por día mientras que durante un mínimo solar en promedio son unas cuantas por año. Las EMC's hacen una contribución aproximada del 10% del flujo total de masa del VS (Foukal, 2004). La llegada de estas perturbaciones a la Tierra pueden causar fenómenos electromagnéticos como auroras boreales intensas, tormentas geomagnéticas, el mal funcionamiento de satélites e incluso interferencias en instalaciones eléctricas y ruido magnético.

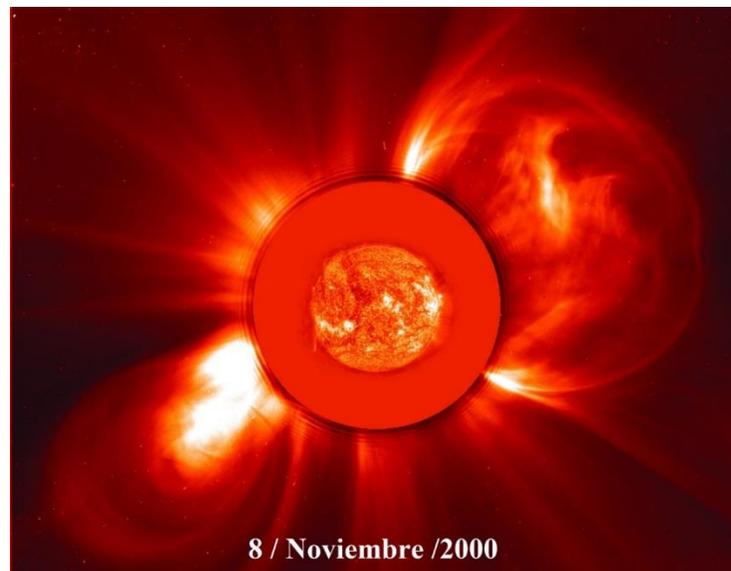


Figura 8. Ejemplo de eyección de masa coronal (EMC) con rumbo simétrico, tomada con el coronógrafo LASCO C2. Modificada de <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>.

2.6 Campo geomagnético

2.6.1 Geomagnetismo

El interés por el magnetismo comenzó por las propiedades “curiosas” del mineral magnetita (o piedra imán), cuyo nombre proviene del latín *magnes*, derivado del nombre de la ciudad Magnesia, en Macedonia, donde antiguamente se obtenía y que alude a sus propiedades magnéticas. Las primeras fuentes que mencionan el magnetismo provienen de la antigua Grecia, alrededor del año 800 a.C.

Las primeras brújulas se producían en China entre los años 300 y 200 a.C. a partir de la “piedra imán” y para el año 1000 d.C., ya habían desarrollado brújulas con agujas suspendidas. La capacidad de apuntar siempre en la misma dirección llevó al uso de brújulas para la navegación mucho antes de poder comprender el origen de las fuerzas de alineación. En Europa y durante el siglo XII todavía se suponía que la aguja de la brújula estaba atraída por la estrella polar. Después se demostró que la alineación de la brújula es producida por una propiedad intrínseca de la Tierra (Lowrie, 2007).

En 1269 Pierre Pélerin de Maricourt escribió el primer tratado conocido de la Física experimental (*Epístola de Magnete*). Maricourt experimentó con un imán esférico (hecho de “piedra imán”), colocándolo en una losa de hierro donde trazaba las líneas de la dirección que asumía. Pierre Pélerin describió la polaridad de los imanes y explicó cómo identificar los polos de las brújulas.

En 1544 Georg Hartmann descubrió que la dirección del campo geomagnético con el plano horizontal forma un ángulo que llamamos inclinación magnética. En 1600 William Gilbert publicó “*De Magnete*”, un tratado histórico en el cual resumía todo lo que se conocía sobre el magnetismo. Gilbert fue el primero en distinguir entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Reconoció que

la Tierra misma se comportaba como un gran imán, lo cual fue el primer reconocimiento de una propiedad geofísica que precedió incluso a las leyes de la gravedad de Newton.

El matemático, físico e ingeniero francés, Charles Augustin de Coulomb estableció en 1785 la Ley de atracción y repulsión inversa entre pequeñas esferas cargadas eléctricamente. Para el año de 1820, el físico danés Hans Christian Oersted descubrió la relación entre las corrientes eléctricas y magnéticas. En 1831 el científico inglés Michael Faraday demostró la inducción magnetoeléctrica. El científico y matemático alemán Carl Friedrich Gauss demostró en 1832 que los polos magnéticos siempre se producen como pares con signo opuesto (Lowrie, 2007).

En 1872 el físico escocés James Clerk Maxwell formuló un conjunto de ecuaciones que cuantificaban las relaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos, además sus estudios predijeron la propagación de las ondas eléctricas en el espacio, concluyendo que la luz es un fenómeno electromagnético (Lowrie, 2007).

2.6.2 Naturaleza del campo geomagnético

En lo que se refiere a la geofísica interna, según (Telford, 1990) el campo geomagnético de la Tierra se compone de tres partes:

- 1.-El campo principal, varía relativamente lento y es de origen interno, es causado por corrientes de convección originadas por el ascenso y descenso de material que circula en el núcleo externo líquido. Se considera que la composición del núcleo de la Tierra es una mezcla de hierro y níquel, ambos son buenos conductores eléctricos. Por esta razón, se cree que la fuente del campo

geomagnético es un dínamo³ auto sustentado, en donde el fluido altamente conductor se mueve de manera compleja causado por la convección.

2.- Un campo pequeño (comparado respecto al campo principal), que varía con bastante rapidez y se origina fuera de la Tierra. Está asociado con corrientes eléctricas en las capas de la ionosfera superior.

3.- Las variaciones espaciales del campo, que generalmente son más pequeñas que el campo principal, son casi constantes en el tiempo y son causadas por anomalías magnéticas locales en la corteza de la Tierra cercana a la superficie (debido al contenido mineral magnético de las rocas).

2.6.3 Componentes magnéticas

El campo magnético, denotado por “B” tiene carácter vectorial y puede ser georreferenciado en un sistema de coordenadas (Figura 9). En cada punto de la superficie el campo geomagnético puede identificarse por su dirección y su magnitud, las cuales pueden especificarse a la vez por una magnitud, dos ángulos o tres componentes perpendiculares (Mendoza, 2013).

³ Dínamo: abreviación de maquina dinamoeléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, o viceversa, por inducción electromagnética.

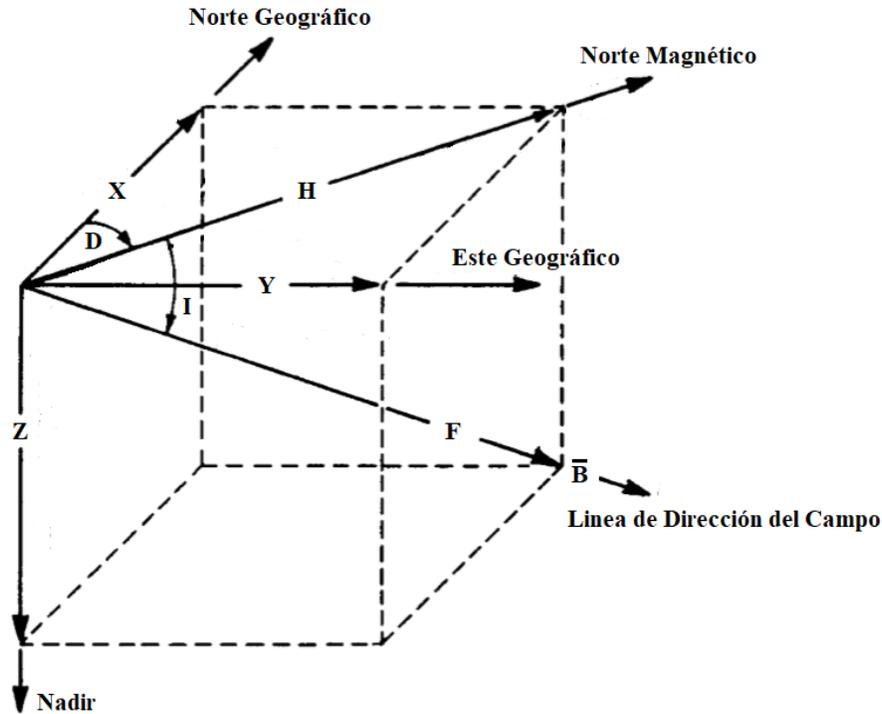


Figura 9. Elementos geomagnéticos. El vector de campo geomagnético \vec{B} puede ser descrito como componentes cartesianas paralelas a los tres ejes ortogonales: Norte geográfico (X), Este geográfico (Y) y el Nadir (Z). La componente "H" es la proyección de \vec{B} al plano horizontal (XY), un ángulo de inclinación "I" entre la componente "H" y \vec{B} y un ángulo de declinación "D" entre las componentes X y "H". Modificada de Campbell, (1997).

Los elementos del vector de campo geomagnético \vec{B} son:

1. Componente horizontal (X), con dirección y sentido al Norte geográfico.
2. Componente horizontal (Y), con dirección y sentido al Este geográfico.
3. Componente vertical (Z), con dirección y sentido al nadir.
4. Componente horizontal (H), que es la proyección del vector \vec{B} sobre un plano horizontal, mismo que aloja las componentes ortogonales X y Y.
5. Declinación (D), que es la diferencia angular entre el Norte verdadero o geográfico (X) y el norte magnético (H); se considera positiva hacia el Este y negativa al Oeste.
6. Intensidad total (F). Es el módulo del vector \vec{B} .
7. Inclinación (I). Es el ángulo formado por la componente H y el vector \vec{B} .

Para describir el campo geomagnético en cualquier punto, es necesario conocer al menos tres de sus componentes no coplanares. Es decir, para describir al vector \vec{B} respecto al sistema de coordenadas cartesianas, las componentes necesarias serán x, y, z; si se desea referir respecto al sistema de coordenadas cilíndricas, las componentes que se utilizaran son H, D, Z; y finalmente, para referir respecto al sistema de coordenadas esférico se utilizara D, F, I.

Los anexos A y B contienen la relación matemática entre los elementos del vector de campo geomagnético \vec{B} y las ecuaciones de transformación entre cada sistema de coordenadas, respectivamente.

La magnitud del campo magnético y sus componentes pueden expresarse en distintas unidades. El sistema internacional (SI) de unidades, especificado por un acuerdo de científicos del mundo, recomienda el uso de unidades Tesla o T (nombrada así en honor al inventor e ingeniero Nikola Tesla). Un nanotesla ($10^{-9}T$) equivale a un gamma (γ), mientras que en unidades gaussianas equivale a $10^{-5}T$ (Tabla 4).

Tabla 4. Unidades equivalentes del campo magnético. Tomada de Campbell, (1997).

$$B = 10^4 \text{ Gauss}$$

$$B = 1 \frac{\text{Weber}}{m^2}$$

$$B = 10^9 \text{ gamma}$$

$$B = 1 \text{ Tesla}$$

2.6.4 Variaciones del campo geomagnético

El campo geomagnético sufre variaciones en tiempo y espacio, dichas variaciones se producen por distintos factores internos y externos. Las variaciones que se producen por fuentes externas son el producto de la interacción del campo geomagnético y el campo magnético asociado con el viento solar. Por ejemplo, tales variaciones periódicas terrestres se conocen como variación diurna, variación anual y variación secular, según sea el caso.

A continuación se explican brevemente estas variaciones periódicas.

2.6.4.1 Variación diurna

Estas variaciones ocurren durante días cuando las perturbaciones (p.ej. protuberancias, filamentos, fáculas, ráfagas) en el entorno terrestre son ausentes. Se llaman perturbaciones durante el Sol quieto (Solar quiet, Sq), y son causadas por las corrientes eléctricas en la ionósfera, a una altura entre 90 y 150 km.

2.6.4.2 Variación anual

La variación semianual ocurre debido a la variación del ángulo entre el campo magnético interplanetario y el eje del dipolo magnético terrestre. Esta variación es mayor entre los meses de abril y octubre.

2.6.4.3 Variación secular

La variación secular se refiere a los cambios no periódicos del campo geomagnético en escalas de tiempo entre años y siglos.

2.6.5 Tormentas y subtormentas geomagnéticas

Estas perturbaciones ocurren debido a la interacción del viento solar con el campo geomagnético. La mayoría de las tormentas ocurren cuando grandes estructuras en el viento solar alcanzan a la Tierra.

2.6.5.1 Tormentas geomagnéticas

El término tormenta geomagnética se refiere a las perturbaciones del campo magnético terrestre que pueden durar varios días (Mendoza, 2013). Las tormentas geomagnéticas son observadas y registradas por los llamados magnetogramas. Estos registran una gran variabilidad temporal en la intensidad del campo geomagnético. Las tormentas geomagnéticas ocurren cuando la componente vertical del CMI tiene valores negativos (en dirección hacia el sur) durante periodos de tiempo extendidos. Es entonces cuando sucede la reconexión magnética entre el CMI y el campo geomagnético, lo que permite que las partículas del VS ingresen a la magnetosfera.

Una tormenta clásica consta de dos partes energéticas y una de recuperación. La primera de ellas consta de un comienzo repentino (CR), producido por la compresión de la magnetosfera del lado día y se debe al paso de una onda de choque interplanetaria. Este fenómeno es observado en todo el planeta y típicamente la fase inicial dura de dos a ocho horas, durante la cual el campo permanece comprimido por el incremento de la presión del viento solar seguido de la discontinuidad.

La segunda parte es la parte principal, producida por la entrada del viento solar a la magnetósfera que genera el anillo de corriente ecuatorial, cuyo campo magnético se opone al campo terrestre. Durante la fase principal la componente H del campo geomagnético disminuye a

nivel de superficie en la zona ecuatorial y obtiene valores negativos. A partir de esta componente se deriva el índice D_{st} ⁴ que durante esta fase obtiene valores negativos.

La fase final (o fase de recuperación) es detectada como un incremento en la intensidad de la componente H hasta el valor que tenía antes de la tormenta, en un tiempo característico que regularmente es de un día (Figura 10).

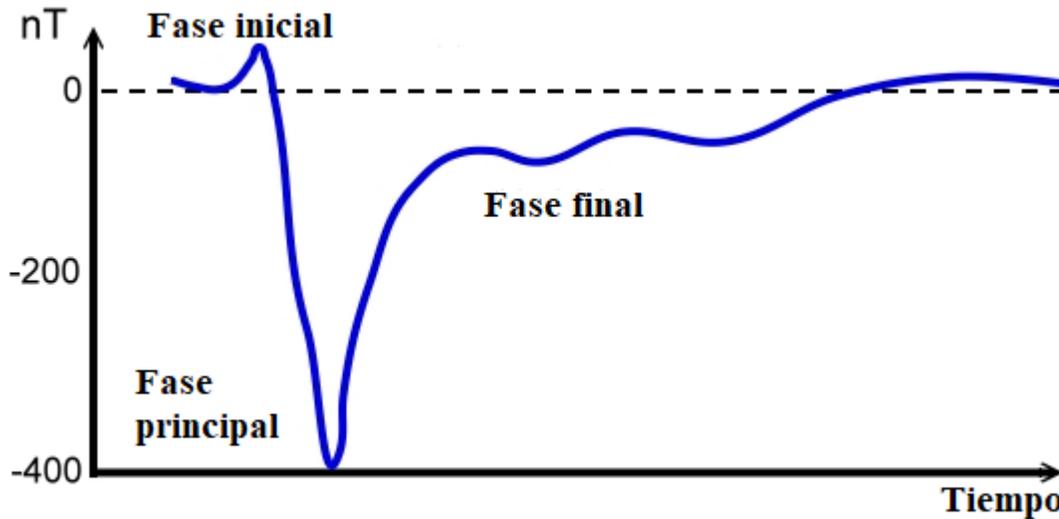


Figura 10. Representación esquemática de las tres fases de una tormenta geomagnética. La fase inicial representada como un comienzo repentino y un ligero aumento del campo geomagnético, en la fase principal disminuye la componente H del campo geomagnético hasta obtener valores negativos (D_{st}) y la fase final se muestra un incremento del campo geomagnético. Modificada de <http://eric6188.pixnet.net>.

2.6.5.2 Subtormentas geomagnéticas

Son perturbaciones más frecuentes que las tormentas magnéticas (en promedio 4 por día) y están definidas por el comportamiento de las auroras polares y son más intensas en latitudes altas. El fenómeno se produce cuando el campo magnético interplanetario apunta hacia el sur durante

⁴ D_{st} : medida de la actividad geomagnética para evaluar intensidad de las tormentas magnéticas, se expresa en [nT] y se basa en el valor promedio de la componente horizontal del campo geomagnético.

unas cuantas horas y se incrementan las corrientes ionosféricas en altas altitudes, provocando que el ovalo auroral se expanda y la hoja de plasma se haga más delgada.

2.6.5.3 Pulsaciones magnéticas

Conocidas como micropulsaciones o pulsaciones magnéticas, son variaciones del campo magnético con periodos de menos de uno a cientos de segundos, que son observadas sobre la superficie terrestre y en la magnetosfera. Son ondas de ultrabaja frecuencia (ULF por sus siglas en inglés) aproximadamente en el rango de 1 [mHz] a 10 [Hz]. Se clasifican en pulsaciones P_c , que son señales de periodo largo (forma senoidal) y pulsaciones P_i , como señales de periodos cortos.

2.7 Interacción VS – campo geomagnético

El VS al propagarse por el medio interplanetario interactúa con una gama de cuerpos celestes: planetas, satélites, cometas y asteroides, cada uno con diferentes propiedades (p. ej. densidad, radio, atmósfera, etc). La naturaleza de la interacción entre el VS y estos cuerpos depende predominantemente del tamaño y sus propiedades físicas. Si se tratara de un cuerpo no conductor, entonces simplemente absorbe las partículas que inciden sobre él, como es el caso de la Luna. En caso contrario, si el cuerpo tiene con su propio campo magnético entonces la interacción origina la formación de una cavidad conocida como magnetosfera (Rojas-Castillo, 2015).

2.7.1 Magnetosfera terrestre

Este término fue introducido por T. Gold en 1959. Del lado día el VS comprime al campo geomagnético. Del lado noche, las líneas de campo planetario se estiran formando una cola como la de los cometas (Blanco-Cano, 2006).

De esta manera, la forma de la magnetosfera es asimétrica debido al balance que hay entre la presión del campo geomagnético y la suma de la presión dinámica y térmica del VS (Figura 11).

El punto subsolar de la magnetosfera se encuentra a una distancia aproximada de $10 R_{\oplus}$, mientras que del lado noche la magnetosfera forma la región conocida como magnetocola. La magnetosfera protege a la Tierra de la llegada directa del VS y partículas altamente energéticas.

Sin la presencia del VS, el campo magnético de la Tierra se extendería infinitamente hasta difuminarse en el espacio interplanetario.

Debido a la interacción del campo geomagnético con el VS podemos distinguir diversas regiones en el espacio cercano a la Tierra: choque de proa terrestre, antechoque, magnetofunda y magnetopausa.

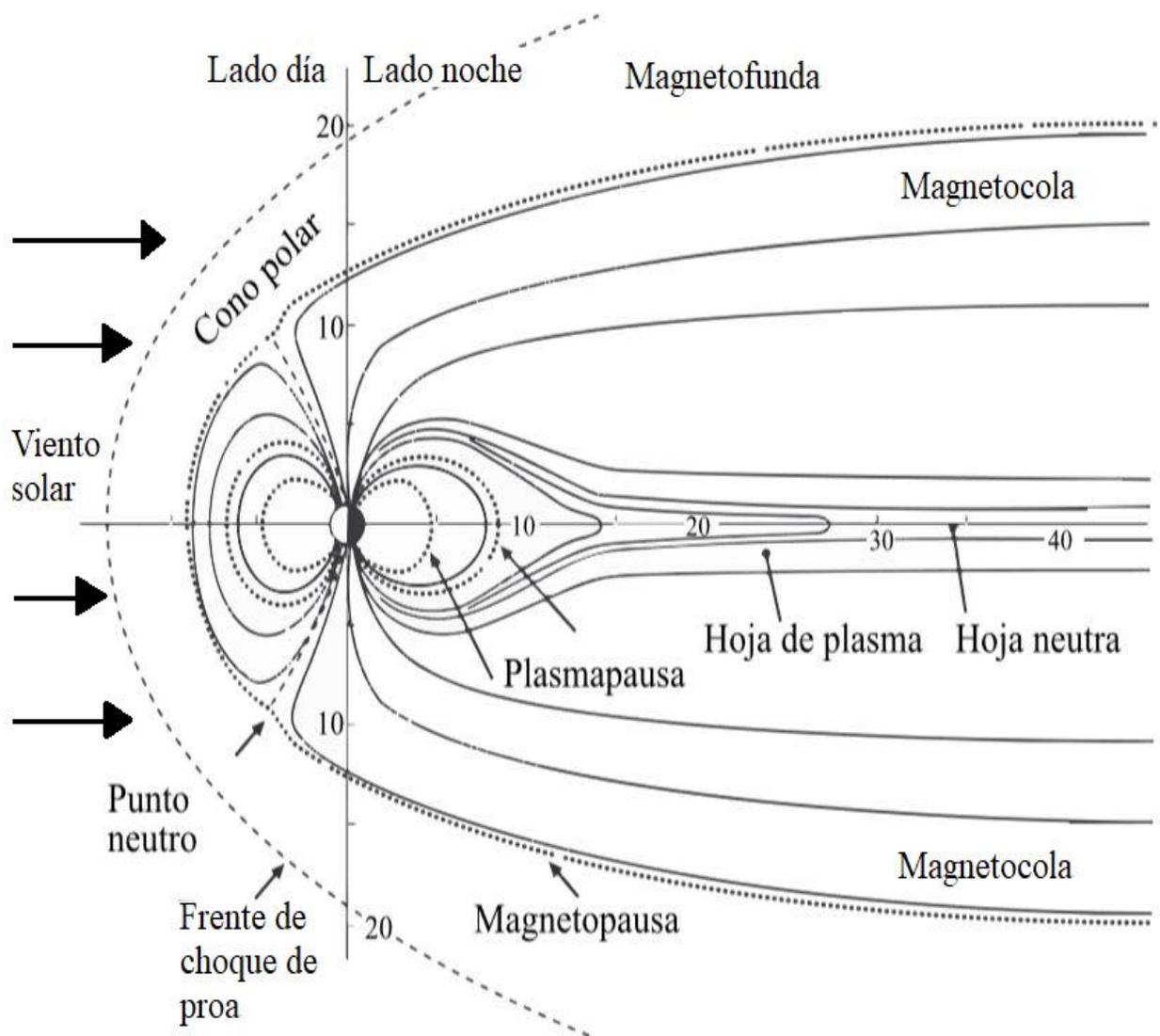


Figura 11. La magnetosfera terrestre está dividida en varias regiones: frente de choque, magnetopausa, conos polares, plasmapausa, hoja de plasma y dentro de ella, la hoja neutra. Del lado día el VS comprime al campo geomagnético, del lado noche las líneas del campo se estiran hasta formar una cola. Modificada de Mendoza (2013).

2.7.2 Choque de proa terrestre

Rojas-Castillo, (2015) menciona: “La onda de choque se forma cuando un fluido viaja más rápido que la velocidad con la que se transmite la información en el medio al encontrar un obstáculo”. A un flujo así se le llama supermagnetosónico.

Los choques son fenómenos comunes y el ejemplo más estudiado es el choque de proa terrestre. Se ubica enfrente del planeta a una distancia de aproximadamente $13 R_{\oplus}$ en el punto subsolar, con un grosor de aproximadamente 100 km. El choque de proa terrestre convierte una gran parte de la energía cinética del VS incidente en energía térmica. Su nombre lo recibe debido a que su forma se asemeja a la curva generada en el agua frente a la proa de un barco en movimiento.

Para que una onda de choque se forme en un plasma es necesario que el número de Mach magnetosónico⁵ (M_{ms}) del plasma sea mayor a 1. En cualquier parte donde se cumpla esta condición y que el flujo de plasma sea modificado debido a la presencia de un obstáculo, se formará un frente de choque. Debido a que M_{ms} depende de la componente normal de la velocidad del VS a la superficie local del obstáculo, la condición $M_{ms} > 1$ se cumple solo en la región donde se satisface $\theta_{Vn} < \cos^{-1} M_{ms}^{-1}$; donde θ_{Vn} es el ángulo entre el vector de velocidad del VS y la normal al choque. Dado que para la Tierra $M_{ms} \approx 8$, el choque existe solo para la porción espacial donde $\theta_{Vn} < 80^{\circ}$.

Además del número de Mach, el comportamiento de una onda de choque estará definido por el ángulo θ_{Bn} entre el vector de campo magnético y la normal al choque. Cuando $\theta_{Bn} \leq 45^{\circ}$ al choque se le denomina como choque cuasi-paralelo, mientras que cuando $\theta_{Bn} \geq 45^{\circ}$ se tiene un choque cuasi-perpendicular. En el caso del choque cuasi-paralelo los iones pueden “rebotar” en el

⁵ Número de Mach magnetosónico: se define como la relación entre la velocidad del fluido y la velocidad magnetosónica.

choque y alejarse del choque en dirección río-arriba (hacia el Sol), generando así la región conocida como antechoque (Rojas-Castillo, 2015).

2.7.3 Magnetofunda

Esta región está delimitada por la magnetopausa y el choque de proa. En esta región se encuentran el VS y el CMI procesados por el choque de proa. Esto significa que la temperatura, la densidad del plasma y la magnitud del campo magnético son mayores que en el VS pristino (es decir, el VS que no ha sido sometido a ningún cambio). La forma, extensión y compresión del campo depende directamente de las propiedades del choque y las condiciones del VS (Rojas-Castillo, 2015).

La dinámica de la magnetofunda puede describirse bien utilizando modelos hidrodinámicos. En el modelo de Spreiter et al., (1966), el VS fluye en dirección Sol-Tierra, alcanzando el punto subsolar de la magnetopausa y luego se desvía desde este punto. El modelo también predice la disminución de la velocidad de flujo desde el choque hasta la magnetopausa, mientras que la densidad y temperatura aumentan alrededor de la región donde se juntan las líneas de flujo (Figura 12).

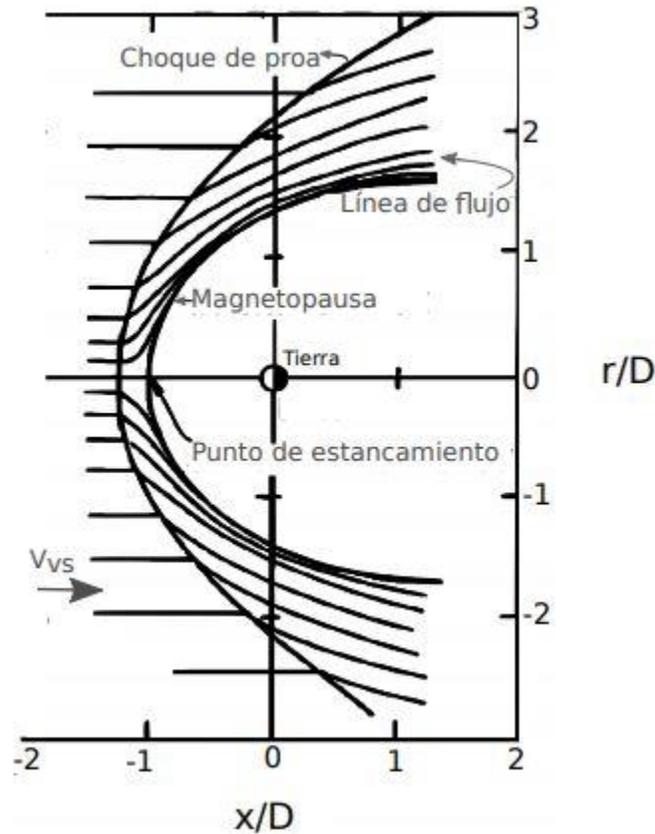


Figura 12. Modelo de gas dinámico para la magnetofunda terrestre. El VS fluye en dirección Sol-Tierra y desviándose en el punto subsolar de la magnetopausa. Tomada de Spreiter et al. (1966).

2.7.4 Magnetopausa

La magnetopausa marca el límite entre la magnetosfera y la magnetofunda. Su punto subsolar se encuentra aproximadamente a $10 R_{\oplus}$ y en ella la presión del VS equilibra la presión del campo geomagnético. Su espesor es de entre 100 - 200 km. La intensidad del campo geomagnético en la magnetopausa varía entre $5 - 20 \gamma$.

La magnetopausa controla el transporte de masa, de momento, de energía y de flujo magnético hacia la magnetosfera. El transporte se puede dar mediante tres procesos: reconexión magnética (para la masa), interacción viscosa (para el momento) y pulsos de presión (para la energía).

Cuando la componente vertical del CMI apunta hacia el sur puede suceder la reconexión magnética entre las líneas del CMI y el campo geomagnético en la magnetopausa, debido a que la componente vertical del campo geomagnético apunta al norte. Si logran acoplarse las líneas del CMI con el campo geomagnético, el VS arrastra estas nuevas líneas hacia el lado noche donde forman la magnetocola y al suceder esto, se pueden presentar los fenómenos más fuertes que forman parte del clima espacial: tormentas y subtormentas geomagnéticas.

Las líneas del campo abiertas se reconectan de nuevo en la magnetocola y se regresan al lado día, con la configuración de líneas de campo dipolar, provocando la liberación de energía que se encontraba almacenada en la magnetocola y transfiriéndose en forma de energía cinética al plasma ionosférico (proceso asociado a la subtormentas polares y las auroras boreales y australes).

2.7.5 Magnetocola

Esta región puede extenderse más allá de $200 R_{\oplus}$ del lado noche. A la distancia de $30 R_{\oplus}$ donde la magnitud del campo geomagnético oscila entre $10 - 20 \gamma$, la dirección del campo sobre el plano de la eclíptica⁶ es antisolar y por debajo del plano tiene dirección hacia el Sol. La forma depende en gran medida de la actividad geomagnética, sobre todo durante periodos de tormentas magnéticas.

La figura 13 se muestran cortes transversales a lo largo del meridiano de medianoche, se enumeraron las líneas del campo para poder seguir los procesos que sufren. El panel 1 muestra aproximadamente una hora antes de que ocurra una subtormenta magnética. El panel 2 corresponde a la hora siguiente, donde se produce una fase de crecimiento en la cual líneas del campo se destensan y se reconectan, marcando el inicio de la fase expansiva. La reconexión que

⁶ Eclíptica: es llamado así el plano que contiene la órbita de la tierra, que sirve como referencia para as orbitas de los otros planetas del sistema solar (Faure, 2007).

se produce en la línea neutra causa una rápida eyección de plasma tanto hacia la Tierra como hacia la cola. En los paneles 3 y 4 continua la reconexión creando una estructura de plasma en forma de “rosca” con bucles magnéticos cerrados. En el panel 5, la última línea de campo (línea 5) se separa mediante la reconexión. Los paneles 6, 7 y 8 muestran la hoja de plasma separada denominada como “plasmoide”, acelerando la protección de la cola influenciado por gradientes de presión de plasmas preexistentes. En el panel 9 el plasmoide se ha separado por completo, pero continua la reconexión en la ubicación original.

Finalmente, en el panel 10 se muestra la línea neutra de la subtormenta alejándose de la cola lanzando plasma a la Tierra causando una restauración progresiva de la hoja de plasma a una configuración previa a la tormenta (Hones Jr., 1985).

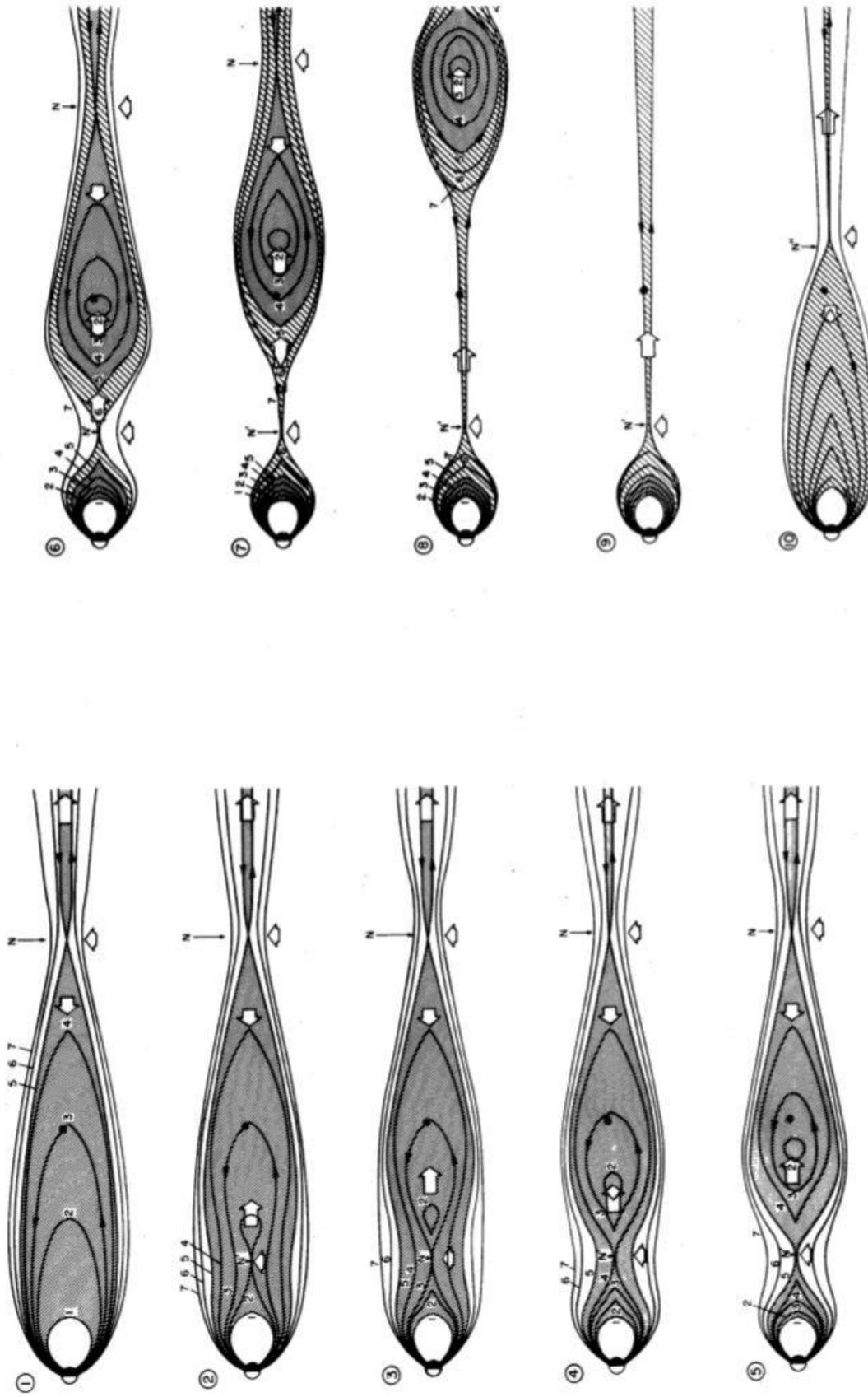


Figura 13. Representación esquemática de los cambios de la hoja de plasma en la magnetofunda, que se cree que ocurren durante las subtormentas. Se muestran cortes a lo largo del meridiano de medianoche, donde las curvas sólidas son líneas de campo magnético y las flechas abiertas indican el flujo de plasma. Una línea neutral (N) distante se muestra en $\approx 60R_{\oplus}$. Tomada de Hones Jr. (1985).

2.8 Misión Cluster II

Cluster es una misión de exploración conjunta de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) y la NASA. La misión se propuso por primera vez en noviembre de 1982 en respuesta a una convocatoria de la ESA para las próximas series de misiones científicas, la cual ya estaba lista para su lanzamiento en 1996. Desafortunadamente, los primeros cuatro satélites se perdieron al fallar el lanzamiento del Ariane 5, el 4 de junio de 1996. La segunda misión (Cluster II) se lanzó en dos grupos de dos satélites, las dos primeras naves se lanzaron el 16 de Julio de 2000 y las dos naves siguientes el 9 de agosto de 2000.

El objetivo de la misión Cluster II es idéntico al de la misión Cluster original, se busca estudiar estructuras a pequeña escala de la magnetosfera y su entorno en tres dimensiones. Para lograr esto, las cuatro naves espaciales vuelan en una configuración tetraédrica a unas distancias de separación entre las naves que varían entre 40 km y 20,000 km, según las regiones científicas a explorar. Las cuatro naves son numeradas de C1 a C4 y son llamadas Rumba, Salsa, Samba y Tango, respectivamente.

2.8.1 Instrumentación

Las cuatro naves espaciales Cluster II llevan un conjunto de 11 instrumentos científicos, diseñados para estudiar el clima espacial dentro y fuera de la magnetosfera (Tabla 5). Al utilizar los mismos instrumentos en la magnetósfera terrestre, se obtienen mediciones tridimensionales detalladas de lo que sucede dentro en las diferentes regiones que la constituye.

Cada uno de los instrumentos científicos son necesarios para estudiar las estructuras de plasma en regiones clave: VS, choque de proa terrestre, cúspides polares, magnetopausa, magnetocola, plasmapausa y regiones sobre el casquete polar.

Tabla 5. Instrumentos científicos a bordo de las naves espaciales misión Cluster II.

Instrumento	Función
Fluxgate Magnetometer (FGM)	Mide los campos magnéticos a lo largo de la órbita, con una alta resolución hasta de 67 muestras por segundo.
Electron Drift Instrument (EDI)	Mediante los tiempos de viaje de emisión y recepción de haces de electrones, se determina la fuerza del campo eléctrico.
Active Spacecraft Potential Control (ASPOC)	Neutraliza la nave espacial de una acumulación positiva de carga eléctrica, evitando el mal rendimiento de los instrumentos a bordo.
Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation (STAFF)	Procesamiento de componentes eléctricos y magnéticos de alta frecuencia.
Electric Field and Wave (EFW)	Medición del campo eléctrico y estudio de las ondas del plasma. Puede medir hasta 36,000 muestras por segundo.
Digital Wave Processing (DWP)	Permite que los instrumentos hagan un uso efectivo de los recursos de la nave espacial. Proporciona sincronización permitiendo estudios de correlación entre las cuatro naves.
Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron Density (WHISPER)	Medición de la densidad de partículas cargadas mediante resonancia (radar). Monitoreo de ondas naturales en el rango de 2 a 80 kHz.

Wide Band Data (WBD)	Proporcionan mediciones de alta resolución de campos eléctricos y magnéticos en bandas de frecuencia seleccionada.
Plasma Electron and Current Experiment (PEACE)	Observación y medición de electrones de baja energía a media, obteniendo dirección de desplazamiento y velocidad.
Cluster Ion Spectrometry (CIS)	Analiza la composición, la masa y funciones de distribución de los iones en el plasma espacial de la magnetósfera y VS durante 4 segundos de giro de la nave.
Research with Adaptive Particle Imaging Detectors (RAPID)	Mediante análisis de velocidades, se registran iones y electrones de mayor energía, permitiendo construir una representación de su procedencia.

2.8.2 Misión Cluster II en el entorno terrestre

Cuando se lanzó Cluster II, los científicos tenían poca comprensión de la forma y estructura de cualquier evento en el espacio. Durante los últimos 15 años ha mejorado mucho el conocimiento sobre la magnetosfera terrestre y que ha sido clave para entender el lugar que ocupamos en el sistema solar y los cambios en el entorno espacial que pudieran afectar a la magnetósfera.

La figura 14 muestra la configuración que tenía la misión Cluster II el 14 de febrero de 2003 para el estudiar las propiedades de las partículas de alta energía en la cúspide polar norte. Las cúspides polares (en color purpura) son regiones sobre los polos magnéticos de la Tierra, donde el campo geomagnético penetra la atmosfera, permitiendo el acceso de partículas de VS a la ionósfera.

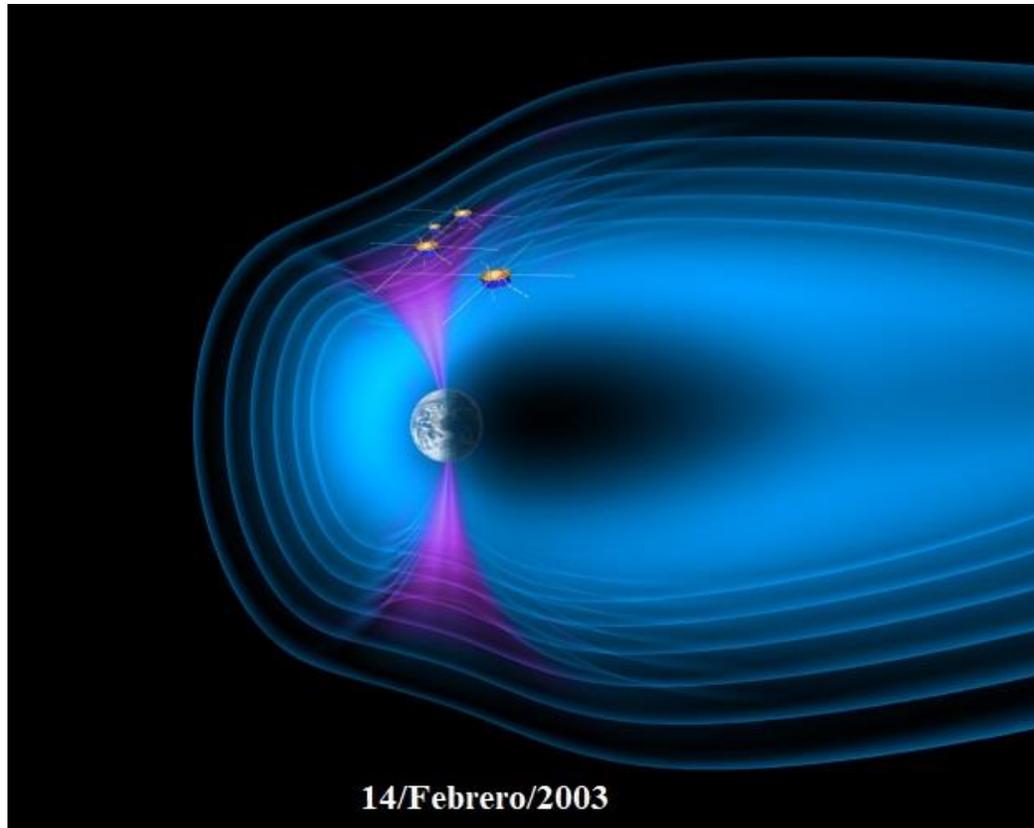


Figura 14. Misión Cluster II volando desde la magnetosfera a la cúspide norte, con la configuración que tenían el 14 de febrero de 2003. Modificada de <http://sci.esa.int/cluster/>.

En la actualidad, las cuatro naves espaciales han viajado por los bordes internos y externos de la magnetósfera y han brindado la primera información sobre los procesos que favorecen a la reconexión magnética, un proceso que cambia la topología de las líneas del campo magnético transformando una parte de la energía magnética tanto en energía cinética como térmica de las partículas. Los científicos al observar la reconexión magnética cerca de la Tierra, pueden aprender más sobre como ocurre tal fenómeno en todo el universo, especialmente en el Sol, una de las tantas estrellas de la Vía Láctea y nuestra fuente de energía radiante.

2.9 Reconexión magnética

Desde los años 40 del siglo XX se han observado iones con energías muy altas (10 GeV) provenientes del Sol. Para explicar el origen de estas partículas, Giovanelli (1946) propuso un mecanismo de aceleración en el que parte del campo magnético muy intenso en las manchas solares se aniquila y parte de la energía magnética de este campo se convierte en la energía cinética de las partículas. Para que esto pudiera suceder, se tiene que violar el teorema de Alfvén⁷ que dice que el campo magnético está congelado en el plasma.

La reconexión magnética (RM) sucede en las regiones donde el campo magnético cambia de orientación en escalas espaciales pequeñas (mucho menores del radio de Larmor de los iones y electrones). Estas condiciones se pueden cumplir cuando colisionan dos flujos de plasma con sus campos magnéticos respectivos o cuando un plasma magnetizado encuentra a un obstáculo con su propio campo magnético. Un ejemplo planetario de este tipo es el VS interactuando con la magnetosfera terrestre. El proceso de la RM se facilita cuando los ángulos entre los dos vectores del campo magnético son grandes (idealmente de 180°) y la inercia de los flujos hace que se comprima la región en la que los dos campos interactúan.

En esta región el gradiente de \vec{B} ocurre a escalas muy pequeñas, menores al radio de Larmor de electrones. La figura 15 muestra lo que sucede durante la RM.

Si en un principio tenemos dos flujos de plasma convergentes con sus respectivos campos magnéticos cumpliendo el teorema de Alfvén, las parcelas del plasma en cada uno de los flujos no se pueden encontrar, ya que cada una de estas está ancladas a su respectivo campo magnético.

⁷ Ver (Mendoza, 2013), capítulo 1, página 28 para una mayor explicación.

En la región de RM se viola este teorema porque las partículas del campo magnético se desacoplan y cambia la topología del mismo, de tal forma que parcelas del plasma de diferentes flujos de origen se pueden conectar. Cuando sucede esto, las parcelas del plasma que originalmente no se podían encontrar ahora sí lo hacen y se mezclan.

En la figura 15 los campos de los dos flujos lejos de la región de RM son aproximadamente horizontales. Los campos reconectados tienen una importante componente vertical cerca de la región de RM. Debido a que el ángulo entre los campos iniciales suele ser grande, hace que las nuevas líneas del campo magnético sean muy curvas, y tiendan a enderezarse. La manera de lograrlo, es que las secciones curvas de las nuevas líneas del campo empiecen a propagarse en dirección ortogonal a la del flujo (observando la figura 15).

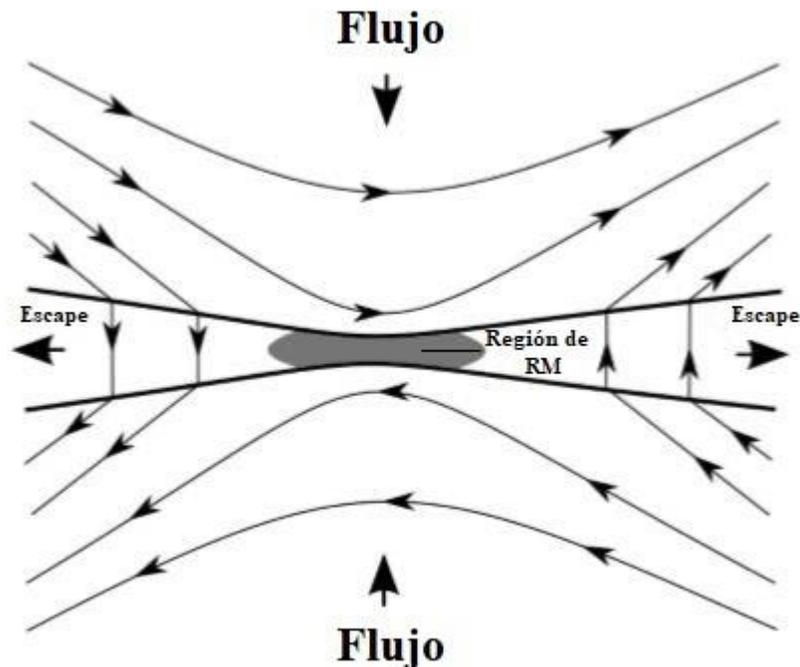


Figura 15. Esquema del modelo de reconexión magnética de Petschek. Se observan dos flujos de diferente origen casi horizontales lejos de la región de RM, las nuevas líneas tienen una componente vertical “saliendo” del escape de RM. Modificada de Enžl et al. (2013).

Concluido el proceso anterior, el teorema de Alfvén aplica de nuevo, por lo que el plasma que está anclado a estas nuevas líneas se propaga junto con ellas. Es entonces que el plasma es acelerado hacia los lados y la energía magnética guardada en las partes curvas de las líneas del campo magnético se transforman en la energía cinética del plasma. A los flujos del plasma acelerado detectados en el VS se les denomina “escapes de reconexión” (“reconnection exhausts” en inglés).

En la figura 16 se muestra un esquema de un escape de reconexión. Las flechas gruesas sobre las líneas muestran la orientación del campo magnético, mientras que las flechas delgadas muestran la dirección de propagación del plasma de escape. La línea punteada representa la trayectoria de una nave espacial hipotética. Las firmas en los datos observacionales de la nave serían:

1. Cambio abrupto en la dirección del CMI en los puntos A1 y A2
2. Cambio abrupto en la dirección del VS en los puntos A1 y A2.
3. Una disminución en la magnitud del CMI entre los puntos A1 y A2.
4. Un aumento en la velocidad del VS entre los puntos A1 y A2.
5. Un aumento en la densidad del VS entre los puntos A1 y A2.

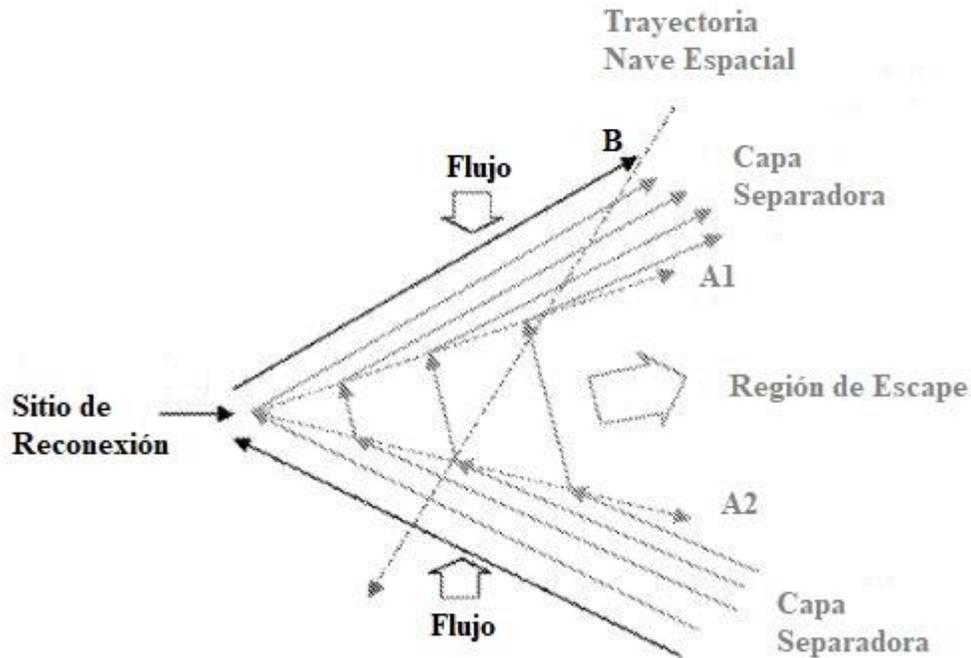


Figura 16. Esquema idealizado 2D de un sitio de reconexión en dirección anti-solar a través de la trayectoria de una nave espacial. La línea punteada representa una hipotética trayectoria de una nave espacial, las flechas gruesas representan flujos de diferente origen y las flechas delgadas muestran la trayectoria de propagación del escape. Modificada de Gosling (2005).

Se ha observado que los ángulos de corte magnético θ_{CM} a través de los escapes varían aproximadamente de 70° a 180° , con el valor más frecuente de 135° . Los eventos de reconexión observados en el VS pristino a menudo ocurren en ángulos θ_{CM} inferiores (Enžl et al., 2013).

La figura 17 muestra un ejemplo de observación del escape de reconexión reportado por Enžl et al., (2013). La región etiquetada como “dentro”, representa el escape de RM. En esta región la densidad y la temperatura de protones suben y disminuye la magnitud del campo magnético. El campo magnético gira a medida que la nave espacial se desplaza a través del escape. Para este ejemplo, la rotación del campo magnético no es suave, sino ocurre repentinamente en los bordes del escape.

El ejemplo de la figura 18 muestra el evento del 10 de abril de 2002 reportado por Phan et al. (2010), en el cual la nave espacial WIND captó el paso de una hoja de corriente de VS con un escape de RM, durante el intervalo de tiempo de 15:49:40 a 15:50:05 UT. El ángulo de corte magnético θ_{CM} fue de 60° . El escape de RM se identificó por la presencia de un flujo acelerado dentro de la región donde giraba el campo, con los cambios en velocidad (panel c) y campo magnético (panel b) en la zona principal y la zona de salida.

Los últimos ejemplos reportados por Tian et al, (2010) se exhiben en la figura 19, donde se muestran los parámetros del campo magnético y plasma de una hoja de flujo a pequeña escala, observada por la nave espacial WIND el 11 de agosto de 1995. Las regiones sombreadas corresponden al cruce del viento de los escapes de reconexión magnética.

En el escape observado aproximadamente a las 05:55 a 06:02 correspondiente a la región sombreada 4, se observa una fuerte disminución en la magnitud del campo magnético dentro del escape como también cambios en la dirección de la velocidad del plasma y del campo magnético. Se observó una anti-correlación entre los cambios de campo magnético y la velocidad del VS. El ángulo de corte magnético θ_{CM} a través del escape es relativamente grande (133°). También se observó un aumento local de la temperatura de protón y la densidad de protones fue intermedia a la de los lados opuestos del escape.

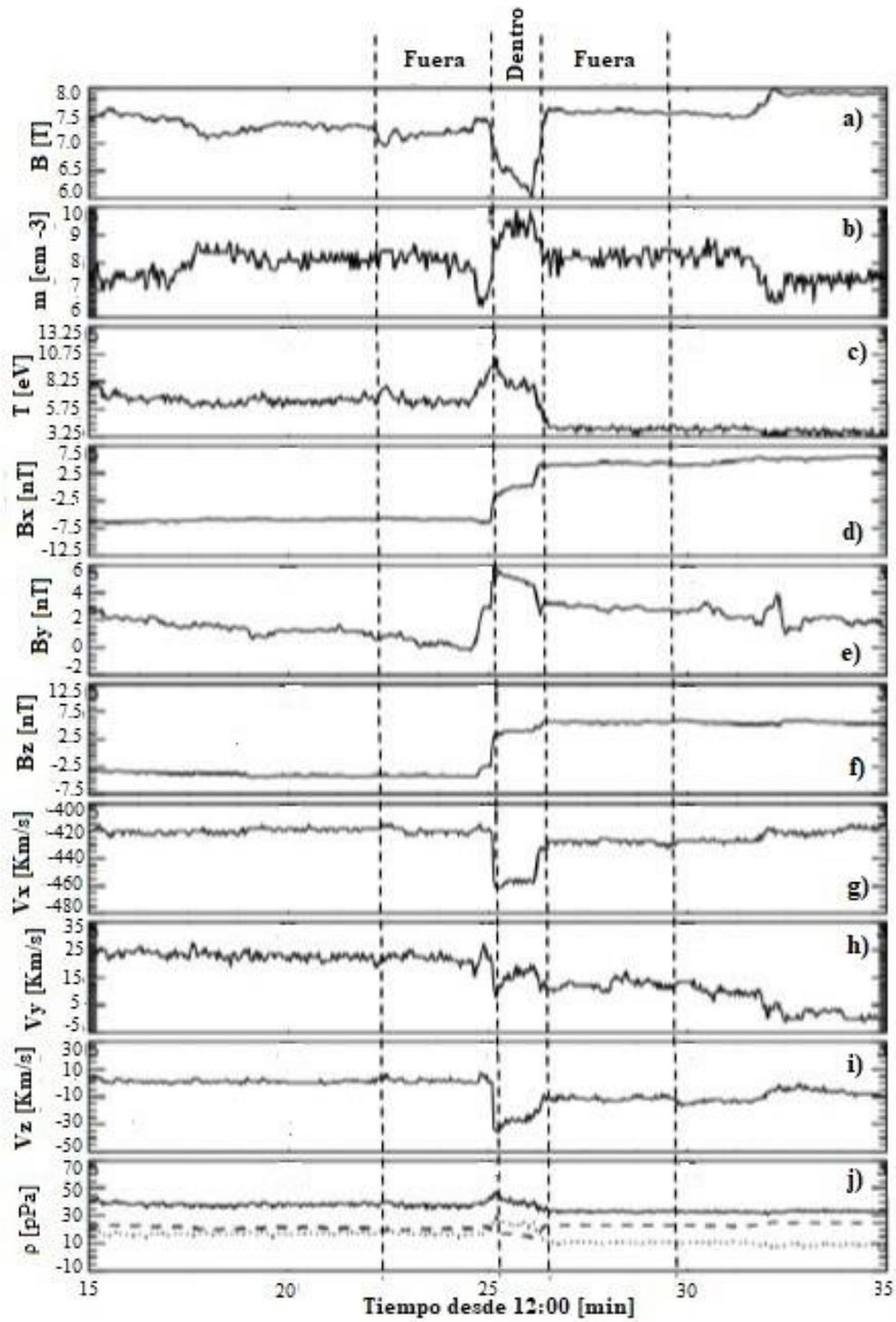


Figura 17. Ejemplo de un sitio de RM. Las líneas punteadas verticales delimitan las regiones “dentro” y “fuera” del escape de reconexión magnética. En el panel a) se muestra una disminución en la magnitud del campo, en los paneles b) y c) un aumento de densidad y temperatura, respectivamente. Modificada de Enžl et al. (2013).

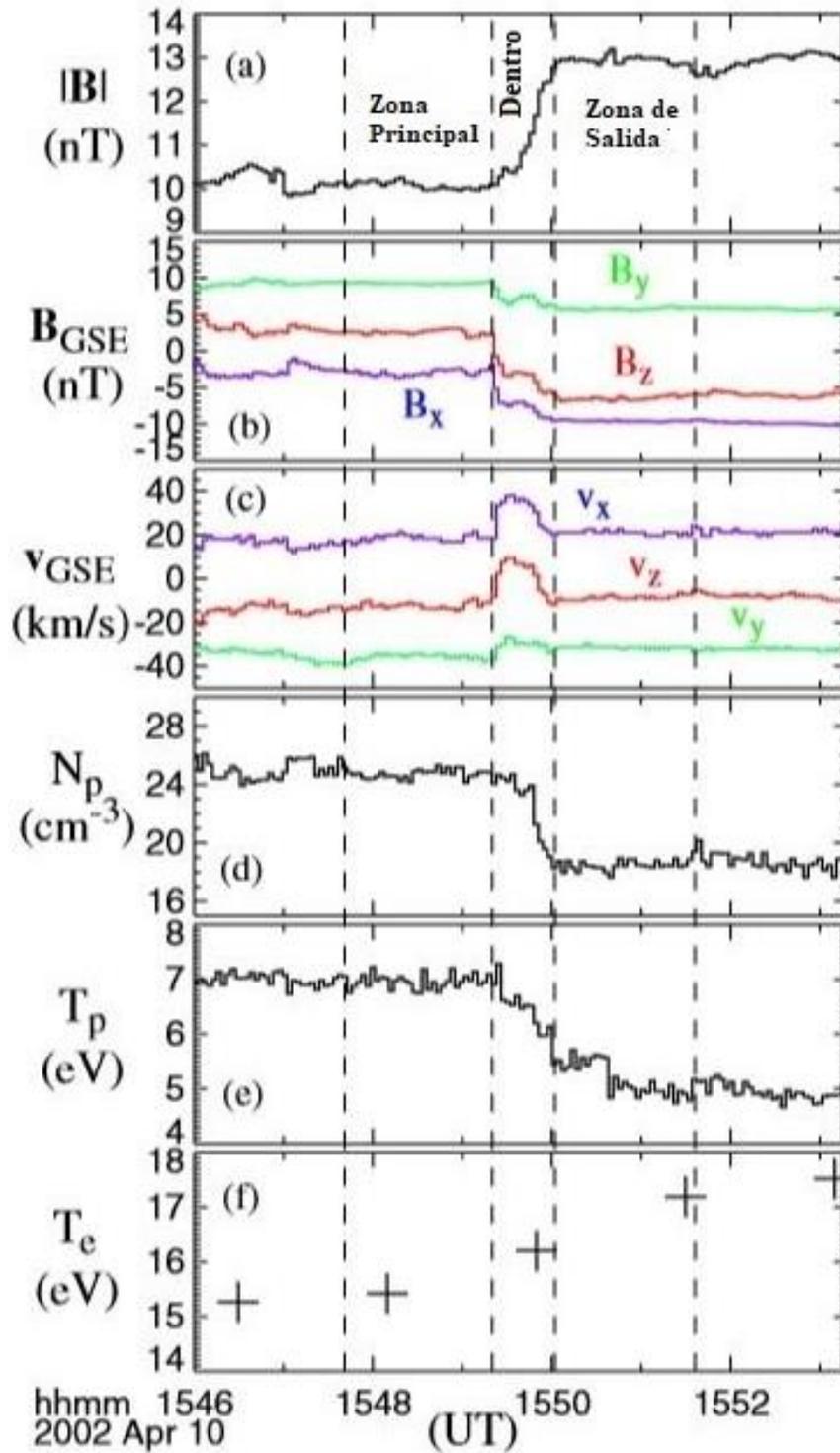


Figura 18. Detección del escape de RM del 10 de abril de 2002. En el sistema de coordenadas geocéntrico eclíptico solar (GSE): (a) Campo magnético de magnitud entre 10-13 (nT), (b) Componentes del Campo Magnético en coordenadas GSE, (c) Componentes de la velocidad de flujo de protones en coordenadas GSE, (d) Densidad del número de protones entre 17-25 (cm^{-3}), (e) Temperatura de protones y (f) Temperatura del electrón. Modificada de Phan et al. (2010).

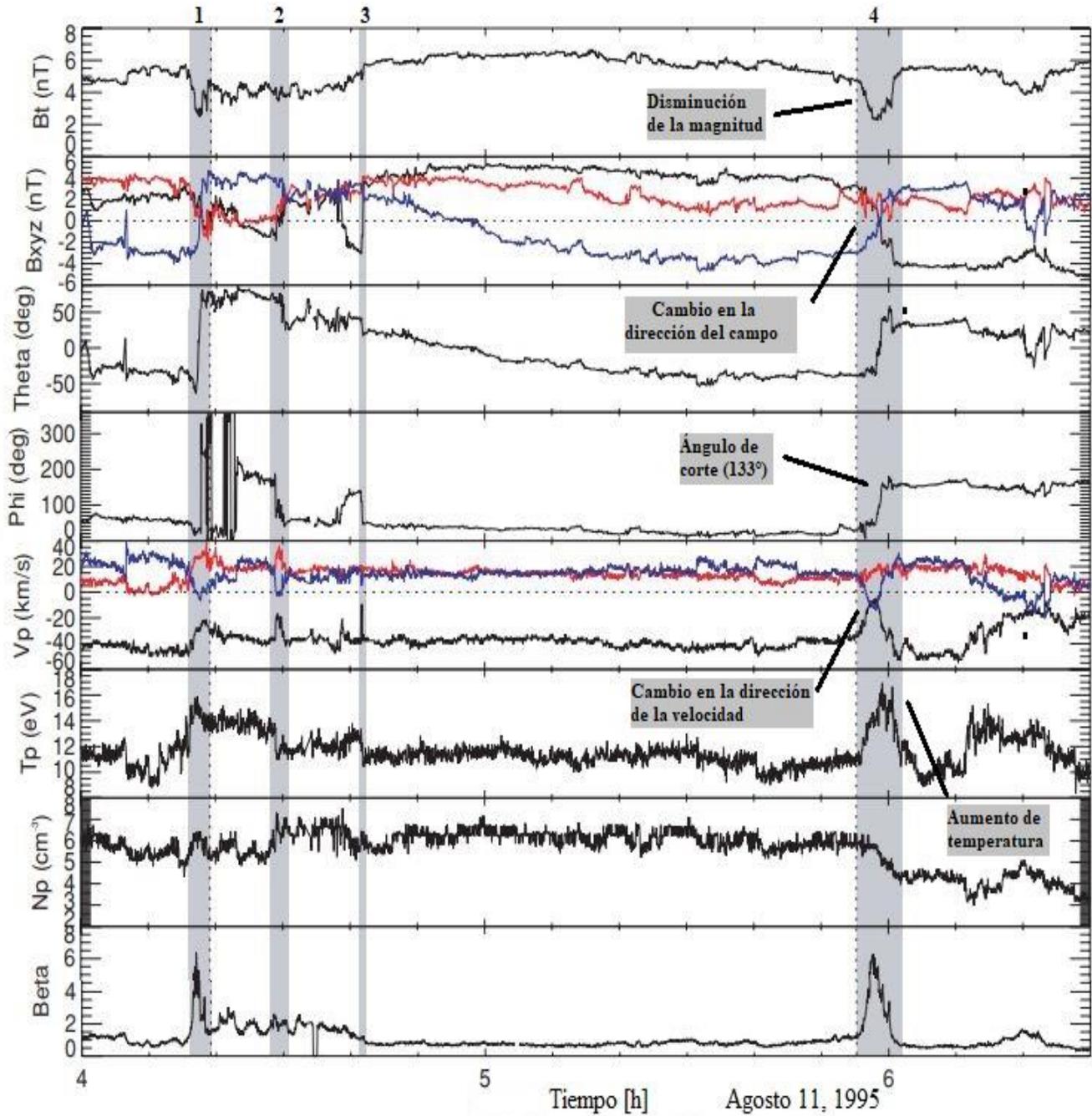


Figura 19. Parámetros de campo magnético y plasma, observados el 11 de agosto de 1995. Las zonas sombreadas indican los escapes de RM. Desde la parte superior: magnitud del campo magnético (Bt), vector del campo magnético en coordenadas GSE (Bxyz), ángulo de elevación del campo magnético (Theta), ángulo azimutal del campo magnético (Phi), vector de velocidad de protones en coordenadas GSE (Vxyz), temperatura de protones (Tp), densidad del número de protones (Np) y plasma beta (Beta). Las componentes x,y,z del campo magnético y la velocidad de protones se indican mediante las líneas negra, roja y azul, respectivamente. Modificada de Tian et al. (2010).

3 DESARROLLO

Para determinar los posibles sitios de RM en el viento solar, antechoque y la magnetofunda, se utilizaron mediciones *in situ* tomadas por la nave espacial Cluster C1 de la misión Cluster II, durante el periodo del 07 de marzo de 2016 al 08 de abril de 2016. Los datos se obtuvieron en el marco de la convocatoria de la Agencia Espacial Europea (ESA) llamada “Cluster Guest Investigator Programme” con el fin de estudiar la evolución temporal de los eventos. Se estudiaron intervalos de tiempo durante los cuales las trayectorias de las naves espaciales se encontraban en las regiones correspondientes al viento solar (VS), antechoque (ANT) y magnetofunda (MGTF). Los anexos C y D contienen las fechas e intervalos de tiempo de cada medición tomada (durante los meses de marzo y abril, respectivamente) por la nave espacial Cluster C1 en cada una de las regiones de estudio.

Las naves estuvieron en una formación llamada “collar de perlas”, lo cual significa que las cuatro naves espaciales estuvieron posicionadas a lo largo del eje X_{GSE} (a lo largo de la línea Sol-Tierra). El sistema eclíptico solar geocéntrico (GSE) es fijo con respecto a la línea Sol-Tierra. El eje X apunta en dirección al Sol, el eje Z es perpendicular al plano de la elíptica que contiene la órbita de la Tierra. El eje Y es tangente a la órbita y apunta en dirección contraria al movimiento del planeta (Figura 20). Este sistema se ha utilizado para mostrar trayectorias de satélites, observaciones de campo magnético interplanetario y datos de velocidad del viento solar. Es conveniente para especificar límites magnetosféricos. También se ha adoptado ampliamente como el sistema para representar cantidades vectoriales en bases de datos de física espacial.

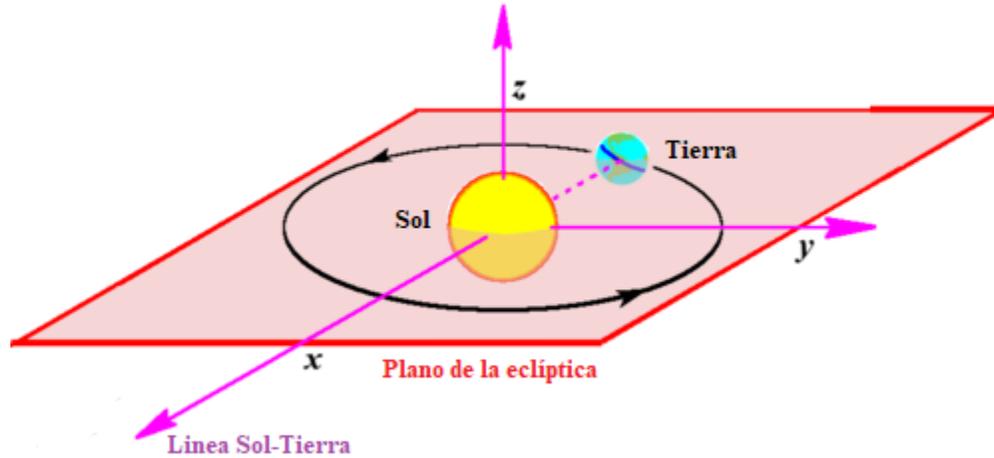


Figura 20. El sistema eclíptico solar geocéntrico (GSE) es fijo con respecto a la línea Tierra-Sol. El eje X apunta en dirección al Sol, el eje Z es perpendicular al plano de la elíptica que contiene la órbita de la Tierra y el eje Y es tangente a la órbita y apunta en dirección contraria al movimiento del planeta. Modificada de <https://www.wikiwand.com>.

Como ya se había observado en ejemplos de la sección 2.10, entre las firmas observacionales más emblemáticas de un escape de reconexión se encuentran: la disminución de la magnitud del campo magnético, rotación repentina del mismo, un aumento de temperatura del plasma y un incremento de la velocidad del VS.

Sin embargo, como únicamente se contaba con los datos del campo magnético, el análisis se enfocó en posibles sitios de reconexión magnética, buscando regiones de rotación del CMI, debido a que estas rotaciones son la primera condición que se debe cumplir para que ocurran los escapes de reconexión. Las rotaciones se presentan con ángulos de corte magnético (θ_{CM}) grandes (ideales a 180°) entre los flujos de campo magnético.

Para el cálculo de los ángulos θ_{CM} se analizaron datos del CMI tomados por la nave espacial Cluster C1 (Tabla 6), con una resolución temporal de 22 vectores de \vec{B} por segundo. Para esto, los datos del CMI se promediaron en intervalos de tiempo sucesivos de 0.25 segundos, 0.5 segundos

y 1 segundo. Se calculó el vector de \vec{B} promedio en cada intervalo. El ángulo θ_{CM} entre los intervalos i e $i + 1$ se calculó como:

$$\theta_{CM} = \text{acos} \left(\frac{B_i \cdot B_{i+1}}{|B_i||B_{i+1}|} \right) \quad (3-1)$$

Donde:

B_i representa el vector promedio del CMI durante el intervalo del tiempo i .

B_{i+1} representa el vector promedio del CMI durante el intervalo del tiempo $i + 1$.

Tabla 6. Intervalos de tiempo de mediciones tomadas por la nave espacial Cluster C1.

Nave	Mes	Intervalo de tiempo
C1	Marzo	2016-03-07 20:00:20 a 2016-03-09 16:59:50
		2016-03-10 04:00:16 a 2016-03-11 22:59:49
		2016-03-12 10:00:04 a 2016-03-14 04:59:53
		2016-03-14 18:00:11 a 2016-03-16 10:59:51
		2016-03-17 00:00:04 a 2016-03-18 18:27:15
		2016-03-18 18:27:16 a 2016-03-21 00:45:00
	Abril	2016-04-01 08:49:43 a 2016-04-03 15:14:53
		2016-04-03 15:14:54 a 2016-04-05 21:41:30
		2016-04-05 21:41:31 a 2016-04-08 04:06:50

Para fines estadísticos se agrupo el número de ángulos según su valor en intervalos de 20 grados (Tabla 7):

Tabla 7. Separación de ángulos θ_{CM} obtenidos en 9 intervalos.

Intervalo	Intervalo de ángulo
1	$0^\circ < 20^\circ$
2	$20^\circ < 40^\circ$
3	$40^\circ < 60^\circ$
4	$60^\circ < 80^\circ$
5	$80^\circ < 100^\circ$
6	$100^\circ < 120^\circ$
7	$120^\circ < 140^\circ$
8	$140^\circ < 160^\circ$
9	$160^\circ \leq 180^\circ$

Se calculó la frecuencia relativa (representada en porcentaje) del número de rotaciones con el rango de valores determinado, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FRP = \frac{\# \text{ ángulos en el rango determinado}}{\# \text{ total de ángulos}} * 100 \quad (3-2)$$

Se compararon las frecuencias relativas entre las tres regiones de estudio, así como entre las resoluciones de los datos promediados.

Debido a la alta resolución y al número elevado de datos, se desarrolló un programa en lenguaje Fortran (Metcalf et. al., 2011) para optimizar el tiempo de cómputo empleado en el cálculo del ángulo θ_{CM} . Al término de cada proceso de cálculo, se obtuvieron archivos de salida con los respectivos resultados y mediante un script en GNUplot se graficaron cada uno de ellos.

4 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados analizados a partir de las mediciones obtenidas por la nave espacial Cluster C1. También se presentan algunos casos de estudio.

4.1 Identificación de posibles sitios de RM

A continuación se presentan gráficas (figura 21, 22 y 23) de algunas de las grandes rotaciones ($\theta_{CM} > 80^\circ$) del CMI ubicadas en las regiones de estudio. Se utilizaron ejemplos con un intervalo de tiempo de 0.5 segundos.

4.1.1 Región de VS

La figura 21 muestra un posible sitio de RM ubicado en la región del VS, observado el día 2 de abril del 2016 entre el intervalo de tiempo 14:44:00 y 14:46:00 UT. En el panel A se observa una clara rotación repentina en las componentes B_y (en azul) y B_z (rosa) del campo magnético a las 14:44:42 UT. En el panel B se muestra una clara disminución en la magnitud del campo magnético, de entre 6 y 10 [nT] a valores < 2 [nT]. Esta disminución en la magnitud es característica de un sitio de reconexión magnética. Finalmente, el panel C muestra un ángulo θ_{CM} cercano a 160° en dicho sitio.

4.1.2 Región de ANT

La figura 22 muestra un posible sitio de RM el día 8 de marzo del 2016, durante el intervalo de tiempo 03:25:00 y 03:27:00 UT en la región de ANT. De la misma manera que el ejemplo anterior en el panel A se observa un cambio repentino en las componentes B_y y B_z del campo magnético aproximadamente a las 03:26:06 UT. Además, en el panel B se presenta una disminución en la magnitud del mismo por debajo de 1 [nT] indicativo de las regiones de reconexión. Estas observaciones se acompañan por un ángulo θ_{CM} mayor a 100° mostrado en el panel C.

4.1.3 Región de MGTF

La figura 23 muestra un posible sitio de RM el día 3 de abril del 2016, durante el intervalo de tiempo 01:48:00 y 01:50:00 UT ubicado en la región de MGTF. Se presentan tendencias similares a los ejemplos anteriores. Una rotación de las componentes B_y y B_z aproximadamente a las 01:48:54 UT, seguido por una disminución de la magnitud del campo por debajo de 5 [nT] y un ángulo θ_{CM} cercano a 160° .

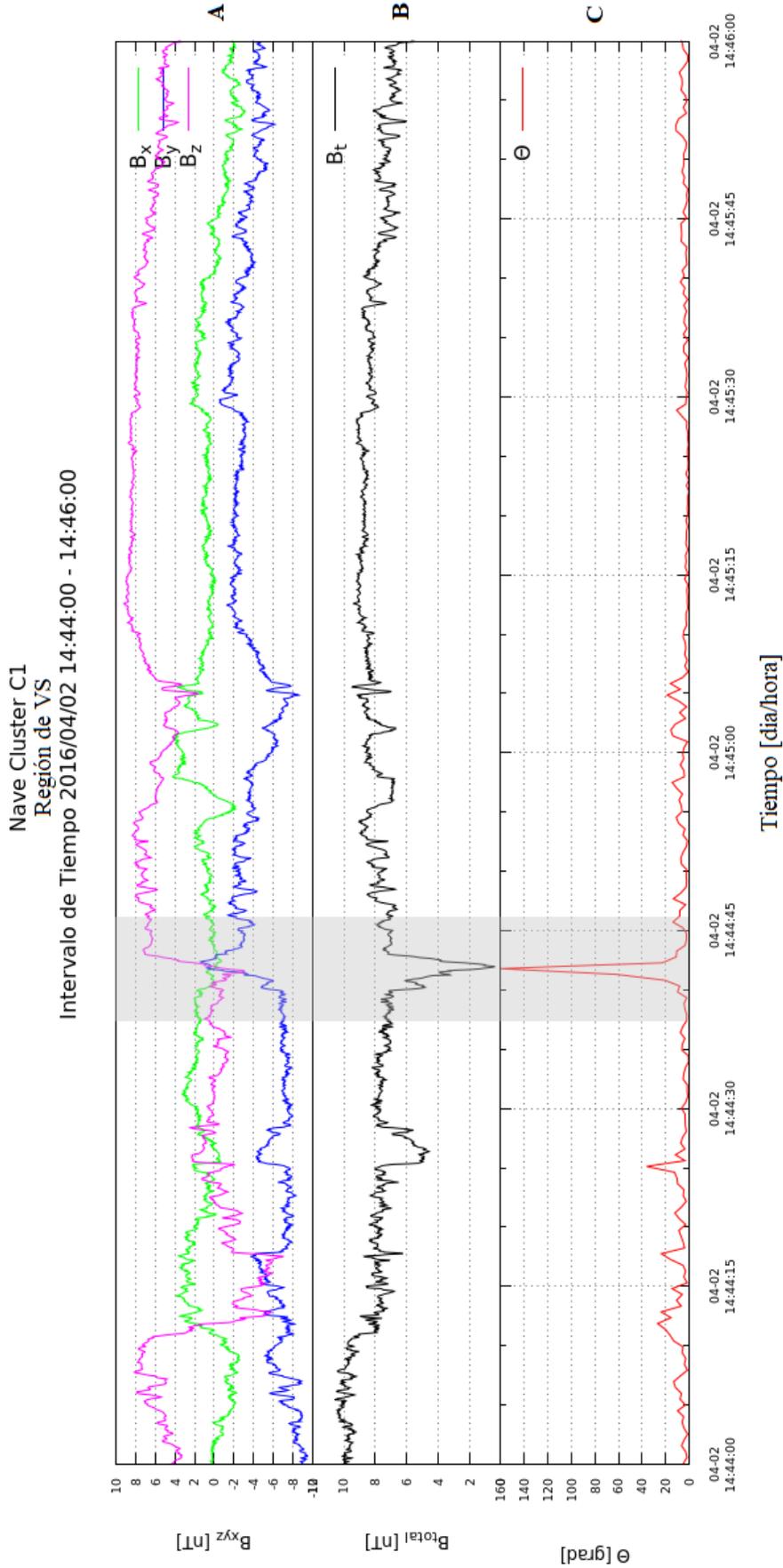


Figura 21. El área sombreada representa el posible sitio de RM ubicada en la región de VS aproximadamente a las 14:44:42 UT de 02/04/2016. El panel a contiene las componentes del CMI, mientras que el panel B la magnitud del campo magnético. En el panel C se muestra el ángulo $\theta_{CMI} > 160^\circ$ durante la RM.

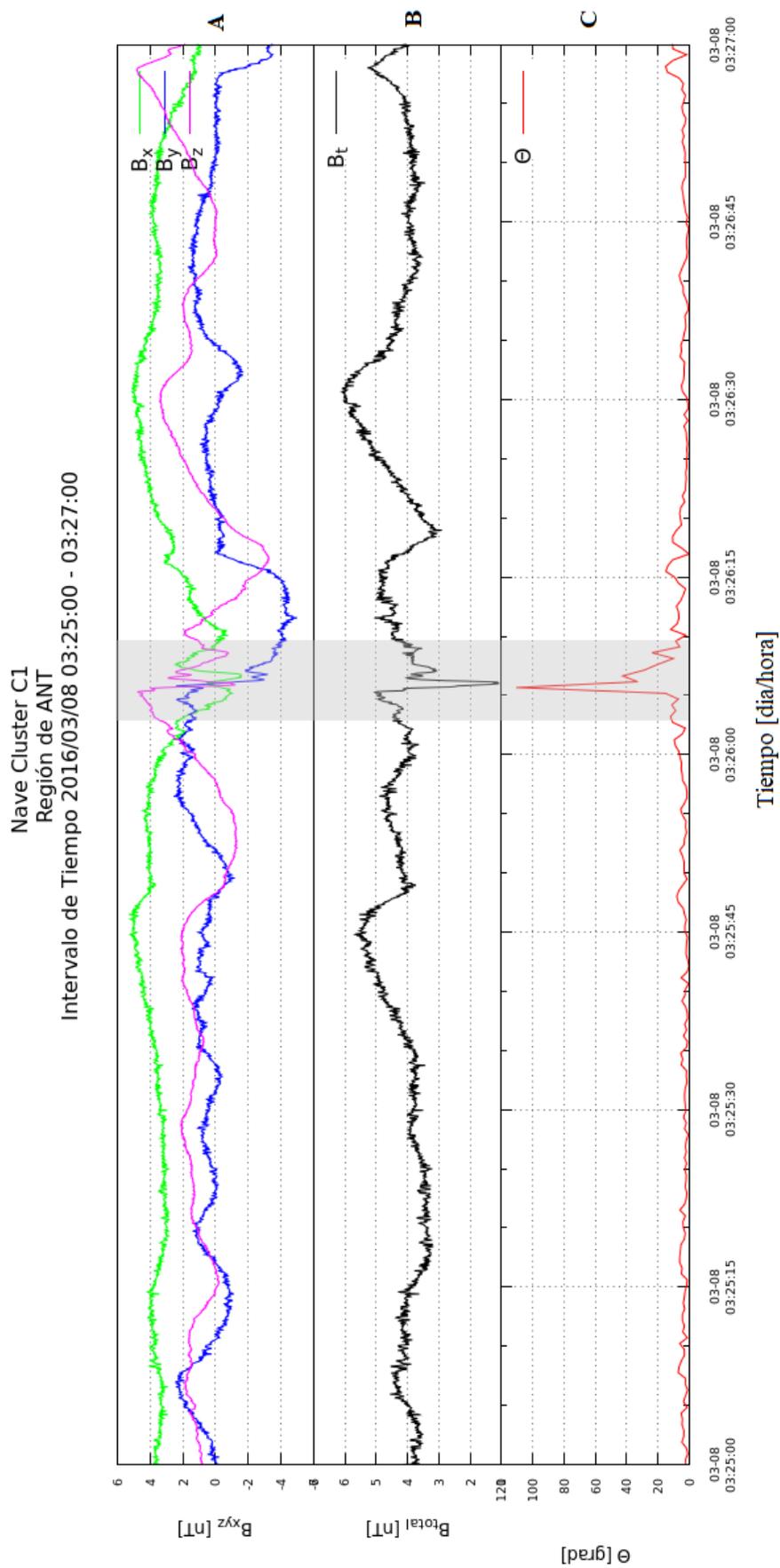


Figura 22. El área sombreada muestra una posible RM ubicada en la región ANT aproximadamente a las 03:26:06 UT de 08/03/2016. El ángulo $\theta_{CM} > 100^\circ$. Contiene el mismo formato que la figura 24.

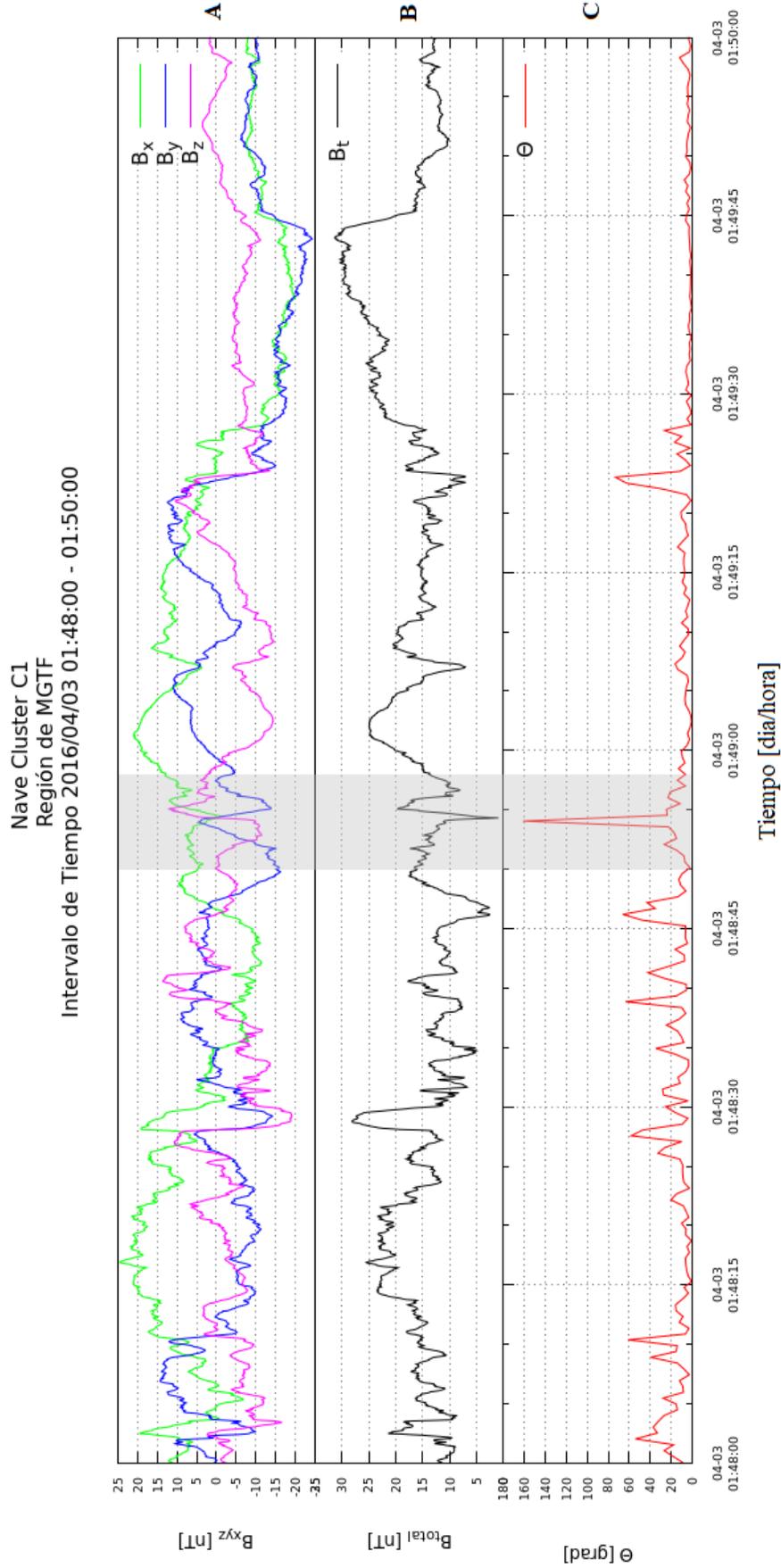


Figura 23. El área sombreada muestra una posible RM ubicada en la región MGTF aproximadamente a las 01:48:54 UT de 03/04/2016. El ángulo $\theta_{CM} > 160^\circ$. Contiene el mismo formato que la figura 24.

4.2 Resultados estadísticos

En la figura 24 se presentan datos del CMI obtenidos por la nave espacial Cluster C1 durante los tres primeros días de marzo.

En el panel A se muestran las tres componentes del CMI y en el panel B la magnitud del CMI, Bt. Los tres últimos paneles (C, D, E) contienen las gráficas del ángulo θ_{CM} obtenidas con los datos promediados sobre diferentes intervalos de tiempo (0.25 segundos, 0.5 segundos y 1 segundo).

Se puede observar que la ocurrencia del ángulo θ_{CM} no es constante a través del tiempo. La ocurrencia de valores grandes de θ_{CM} es mayor durante el 07 de marzo de 20:00 a 24:00 UT y el 09 de marzo de 02:00 a 06:00 UT. Las variaciones del campo magnético (paneles A y B) indican que, durante estos intervalos de tiempo, la nave se encontraba en la magnetofunda terrestre. Los valores grandes del ángulo θ_{CM} desaparecen a partir del 09 de marzo a aproximadamente a las 07:00 UT cuando la nave entra en la magnetosfera. Durante el resto del periodo se pueden observar intervalos de tiempo intermitentes de valores θ_{CM} grandes y pequeños, junto con una magnitud pequeña del CMI. Estos son los intervalos del ANT (mayor ocurrencia de valores grandes de θ_{CM}) y el VS (mayor ocurrencia de valores pequeños de θ_{CM}).

A continuación se presentan resultados estadísticos de la tasa de ocurrencia de θ_{CM} en función de la región en la que se encontraba la nave espacial.

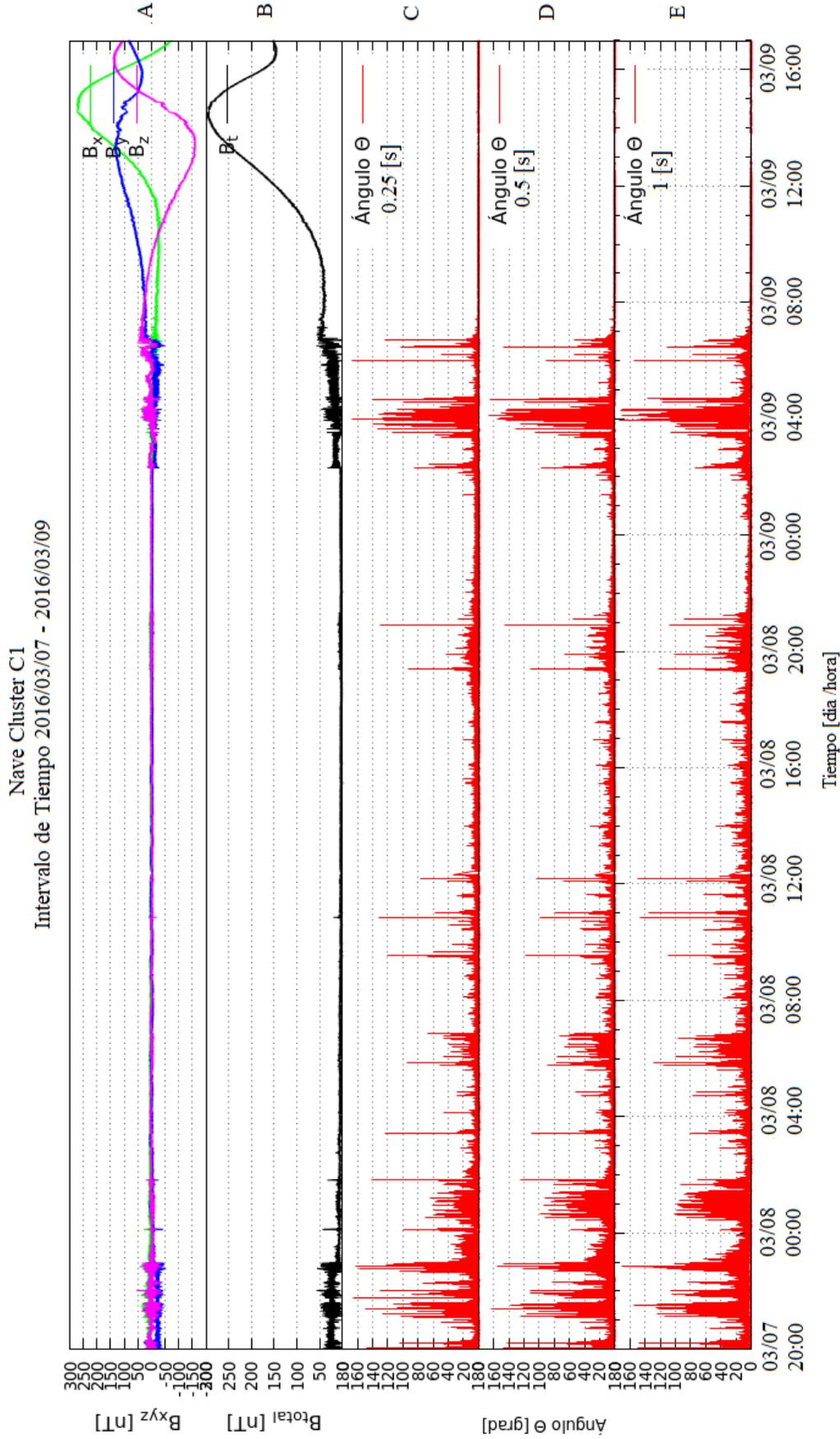


Figura 24. Vista general del comportamiento del campo magnético y del ángulo θ correspondiente a los 3 primeros días del mes de Marzo. En el panel A se presentan las 3 componentes del CMI (B_x , B_y , B_z) y el panel B presenta el modulo del CMI. Los paneles C, D y E corresponden a ángulos θ_{CM} obtenidos utilizando intervalos de tiempo de 0.25, 0.5 y 1 segundo, respectivamente.

4.2.1 Ángulos θ_{CM} en función de la región

En esta sección se presenta el análisis estadístico del ángulo θ_{CM} . Se compara la frecuencia relativa de θ_{CM} en función de la región de interés.

En la figura 25 se muestran los valores de ángulos θ_{CM} correspondientes a las tres regiones de interés. Todos los paneles A, B y C tienen el mismo formato.

Los paneles A1 y A2 muestran datos promediados con un intervalo de tiempo de 0.25 segundos. El panel A1 presenta el intervalo de tiempo completo del estudio, mostrando únicamente valores de ángulos θ_{CM} calculados en el VS (en color azul), ANT (verde) y MGTF (rosa). Se puede apreciar en el mes de marzo 9 días con ángulos por encima de los 80° y 6 días más en el mes de abril.

El panel A2 muestra los valores de la frecuencia relativa de la ocurrencia de ángulos θ_{CM} . El eje y está en escala logarítmica. En general se puede observar que la frecuencia disminuye rápidamente conforme los valores de ángulos θ_{CM} aumentan. La frecuencia de ángulos $< 20^\circ$ es mayor para la región de VS, seguido por ANT y MGTF, mientras que la frecuencia de rotaciones grandes tiene una tendencia opuesta.

Los paneles B1 y B2 corresponden a datos promediados con un intervalo de tiempo de 0.5 segundos. Se presentan tendencias similares a los paneles anteriores. En el mes de marzo se aprecia un día más con ángulos mayores a 80° . Comparando los histogramas se puede observar que disminuye la frecuencia de ángulos $< 20^\circ$ mientras que las frecuencias para ángulos mayores aumentan.

Los paneles C1 y C2 corresponden a datos promediados con un intervalo de tiempo de 1 segundo. Una vez más se aprecia una tendencia decreciente en ángulos $< 20^\circ$ en VS seguido por

ANT y MGTF. Comparando el histograma C2 con A2 y B2 la ocurrencia de ángulos pequeños nuevamente disminuye.

En la figura 26 se presenta la comparación entre las regiones de VS, ANT y MGTF. Los histogramas A1, B2, C1 se obtuvieron dividiendo las frecuencias relativas del ANT entre las del VS y los paneles A2, B2, C2 las frecuencias relativas de la MGTF entre las del VS.

Los primeros dos paneles corresponden a datos con resolución temporal de 0.25 segundos. El panel A1 muestra la comparación entre el ANT y VS. En ambas regiones se presentan frecuencias relativas similares para ángulos $< 20^\circ$. En la región de ANT aumenta la frecuencia relativa de ángulos mayores, sobre todo a partir de valores $\geq 120^\circ$.

El panel A2 muestra la comparación de MGTF y VS. De nuevo se aprecia que la frecuencia relativa de ángulos $< 20^\circ$ en ambas regiones es similar. La frecuencia relativa del ángulo θ_{CM} en la región MGTF aumenta conforme los valores de θ_{CM} incrementan.

Los paneles siguientes B1 y B2 contienen datos con resolución temporal de 0.5 segundos. Ambos presentan frecuencias relativas similares para $\theta_{CM} < 20^\circ$. En las regiones de ANT y MGTF los valores de frecuencia relativa para ángulos θ_{CM} grandes son mayores respecto a VS.

Finalmente, los paneles C1 y C2 presentan datos con resolución temporal de 1 segundo. Se presentan fracciones mayores en comparación con los paneles anteriores. Se observaron tendencias similares a los casos anteriores.

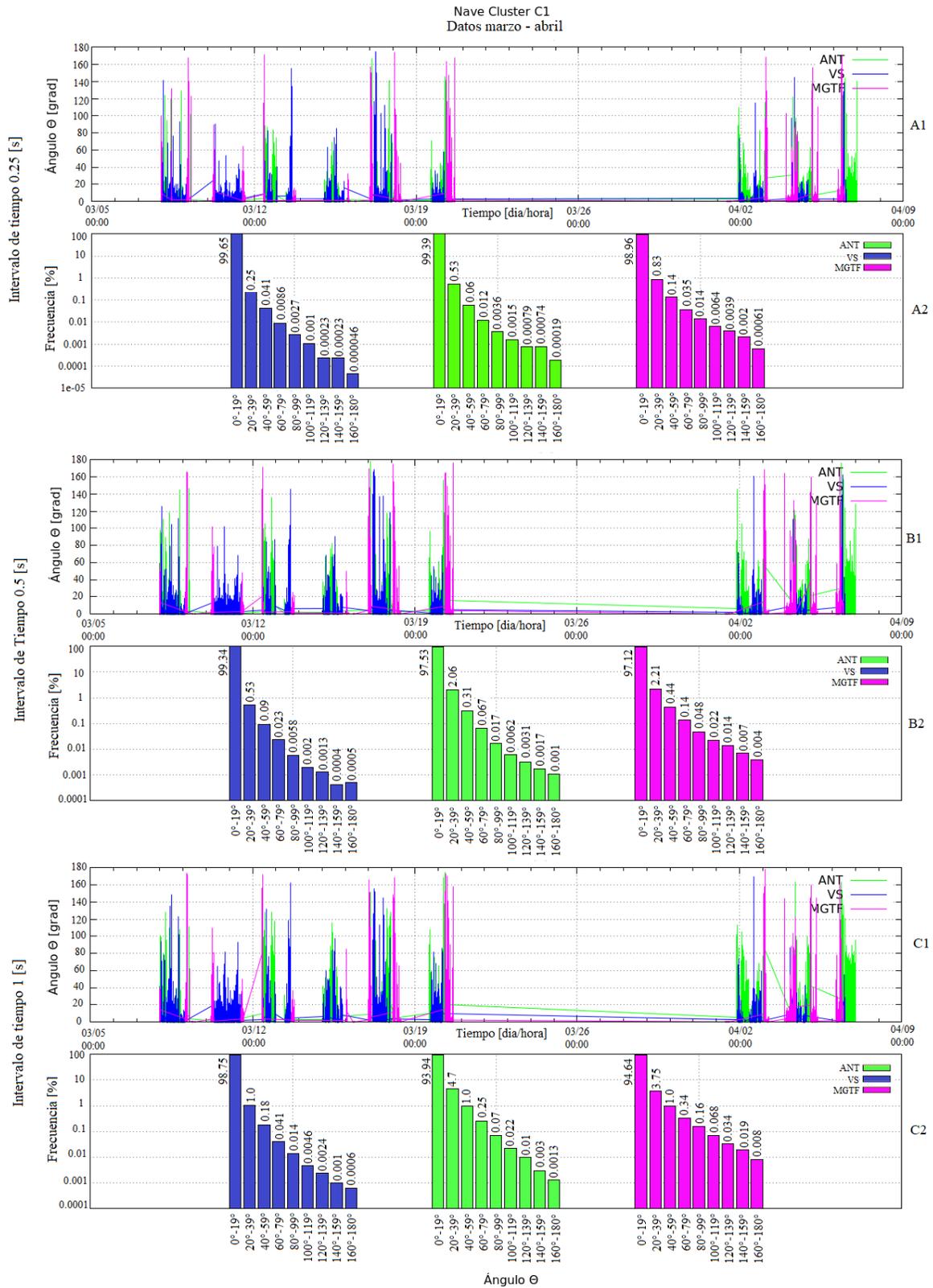


Figura 25. Ángulos θ_{CM} obtenidos durante marzo – abril con diferentes resoluciones. De color azul se representa la región de VS, de color verde a ANT y de color rosa a MGTF. En los paneles A1 y A2 se utilizaron datos promediados con un intervalo de tiempo de 0.25 segundos, los paneles B1 y B2 con un intervalo de tiempo de 0.5 segundos y finalmente C1 y C2 con un intervalo de tiempo de 1 segundo.

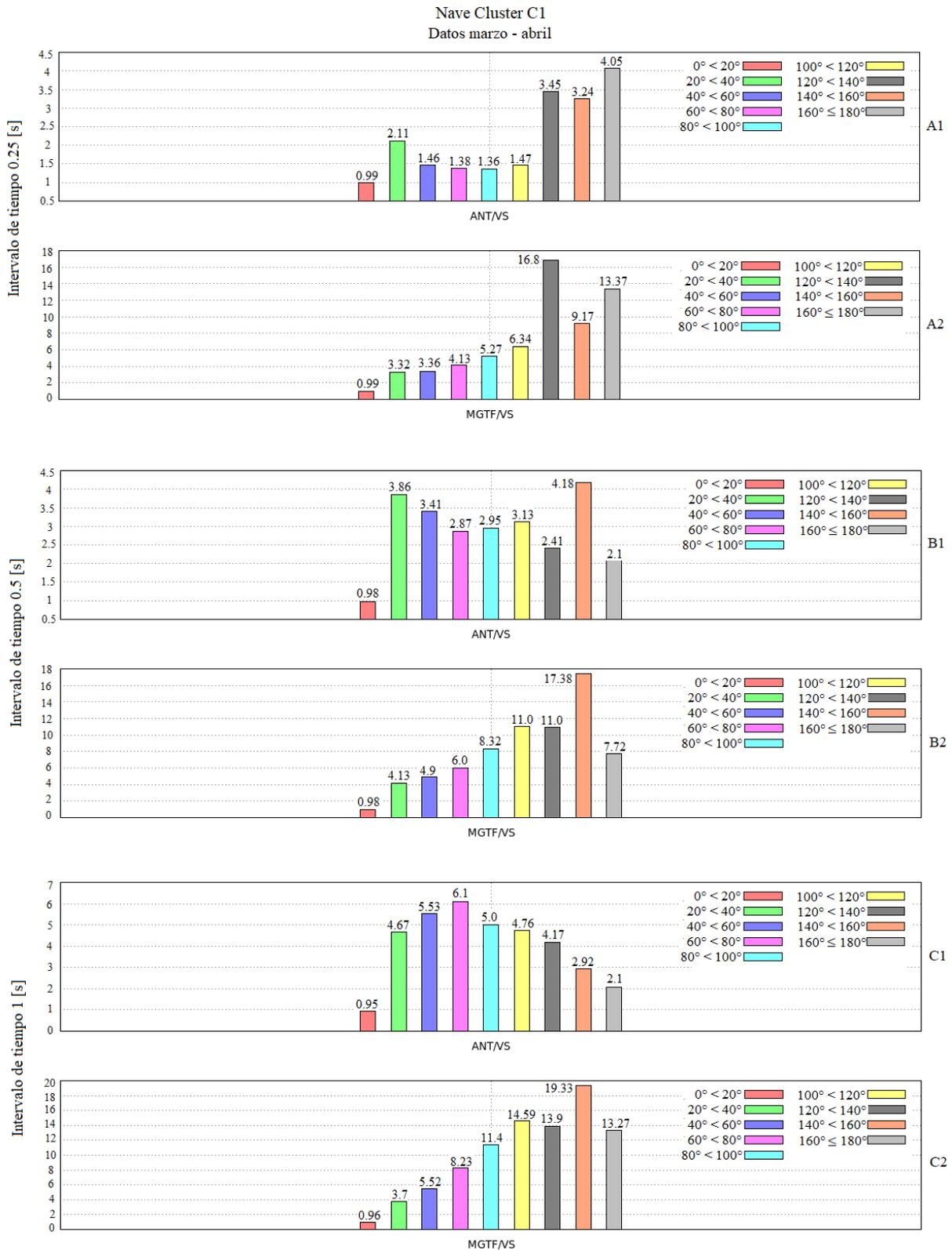


Figura 26. Comparación del ángulo θ_{CM} en función de cada región. Los paneles tienen el mismo formato, en ellos se compara a la región de VS respecto a ANT y MGTF. Los paneles A1 y A2 representan datos con resolución de 0.25 segundos. Los paneles B1, B2 y C1, C2 corresponden una resolución de 0.5 y 1 segundo, respectivamente.

4.2.2 Ángulo θ_{CM} en función de la resolución temporal

A continuación, se presenta la comparación de la frecuencia relativa en función de la resolución temporal correspondientes a las regiones de VS, ANT y MGTF.

En la figura 27 se presenta la razón de frecuencias relativas, los primeros paneles corresponden a la región del VS: el panel A1 muestra datos con resolución temporal de 0.25 segundos entre datos de 0.5 segundos, por otro lado, el panel A2 datos con resolución de 0.25 segundos entre datos de 1 segundo. Se pueden observar menos rotaciones con ángulos $< 20^\circ$ conforme la resolución temporal de los datos disminuye. A partir de ángulos $> 20^\circ$ la fracción de rotaciones con resolución temporal más pequeña (0.5 segundos y 1 segundo) es mucho mayor en comparación que la resolución de 0.25 segundos.

Los paneles B1 y B2 tienen el mismo formato que A1 y A2 pero corresponden a la región ANT. Se aprecia una tendencia similar a los resultados del VS.

Los últimos paneles C1 y C2 muestran la misma información para la región MGTF. De nuevo se puede observar la tendencia similar a las de las regiones de VS y ANT.

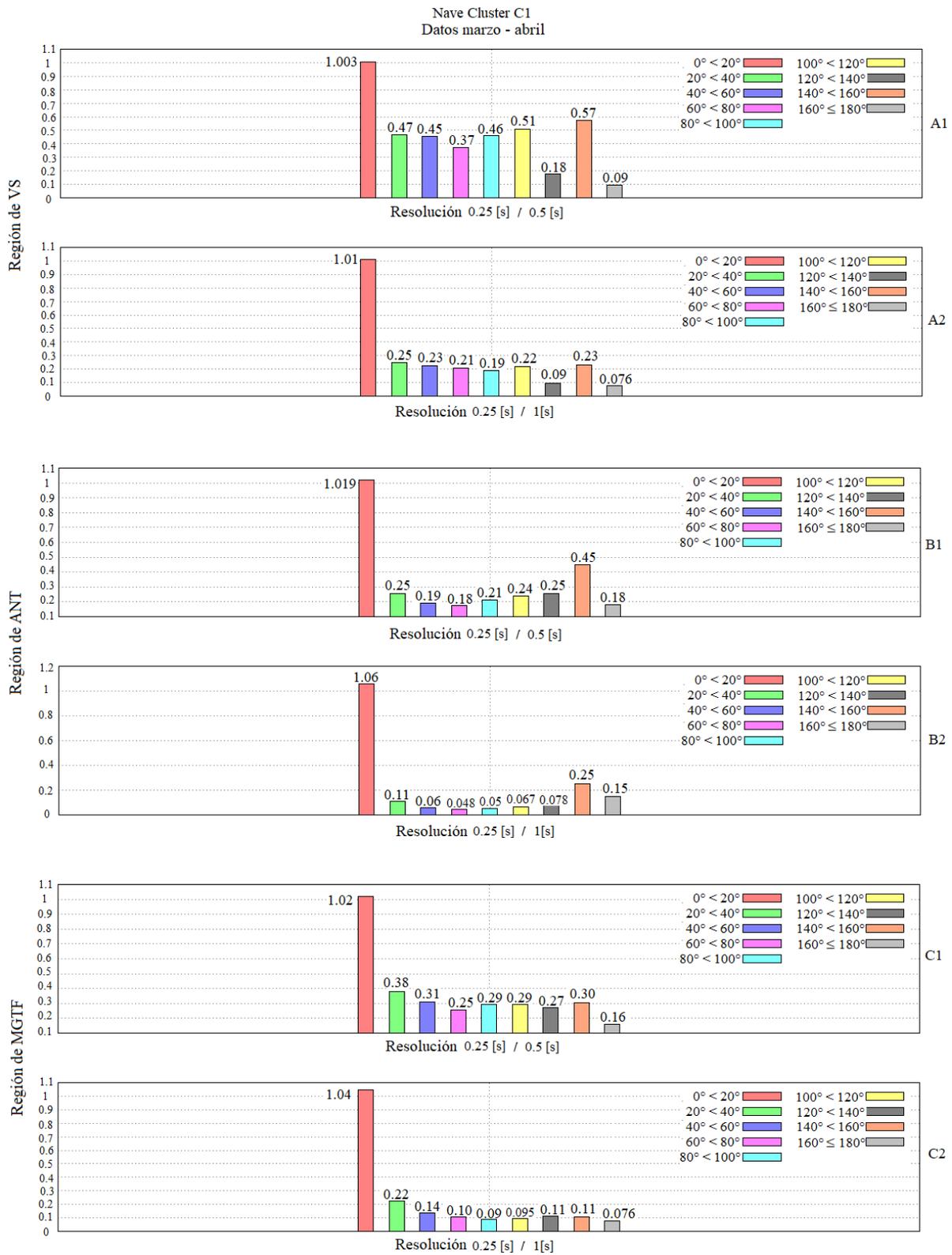


Figura 27. Paneles con la comparación del ángulo θ_{CM} en función de la resolución temporal. Contienen el mismo formato donde se comparan datos de resolución 0.25 segundos respecto a 0.5 y 1 segundo. Los paneles A1 y A2 corresponden a la región de VS, B1 y B2 con la región de ANT y C1 y C2 con la región de MGTF.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo con la American Geophysical Union (AGU), las ciencias planetarias se ubican dentro de la rama de las ciencias geofísicas externas encargadas de estudiar los fenómenos que ocurren en el espacio interplanetario y su impacto sobre el entorno terrestre. Como parte de estos fenómenos los escapes de reconexión han tomado gran importancia, ya que son lugares donde se modifica la topología del CMI y la energía magnética se convierte en energía térmica y cinética.

El análisis realizado sobre posibles sitios de reconexión magnética en la presente investigación es de gran ayuda en la ampliación del conocimiento sobre los escapes de reconexión, ya que la primera condición para que estos ocurran es un sitio de reconexión magnética.

Con base en los datos obtenidos y el análisis realizado, se concluyó lo siguiente:

- La ocurrencia de los ángulos θ_{CM} depende de la región en donde se presente (viento solar, antechoque, magnetofunda).
- Se observa que en todas las regiones predominan rotaciones con ángulos θ_{CM} menores a 20° . Estas rotaciones representan poco más del 93.94% de todas las rotaciones en todas las regiones estudiadas y para todas las resoluciones temporales utilizadas. Su frecuencia es mayor en la región del VS (98.75% – 99.65%, dependiendo de la resolución de los datos), seguida de la región del ANT (93.94% - 99.39%) y finalmente por la MGTF (94.64% - 98.96%).
- La frecuencia de ángulos $>20^\circ$ es mayor en la región de MGTF, seguida por ANT y finalmente por el VS.

- La frecuencia de ángulos θ_{CM} depende de la resolución de los datos. Conforme la resolución temporal disminuye, la frecuencia de ángulos $\theta_{CM} \geq 20^\circ$ aumenta. Por otro lado, la frecuencia relativa de ángulos θ_{CM} menores a 20° disminuye.
- Importantes indicadores de posibles sitios de RM como la disminución en la magnitud del campo magnético, rotación repentina del mismo y un valor elevado en el ángulo θ_{CM} (cercano a 180°), son bien representados en los ejemplos de las figuras 24- 26. Estos indicadores son condiciones necesarias que se deben cumplir para que ocurran los escapes de reconexión, complementado por mediciones *in situ* de velocidad, densidad y temperatura.

6 REFERENCIAS

- Blanco-Cano, X. (2006). Corazas Magnéticas. *Revista Ciencia*, 39-44.
- Blanco-Cano, X., & Kajdic, P. (10 de Octubre de 2009). El Sol, Nuestra Estrella. *Revista Digital Universitaria*, 10(10), 1-17. Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art67/art67.pdf>
- Campbell, W. H. (1997). *Introduction to Geomagnetic Fields*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Cifuentes, G. N. (2009). *Monitoreo Geomagnético del Volcán Popocatépetl*. Mexico: Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica.
- Del Valle Toledo, E. (2012). *Apuntes de Introducción a la Geofísica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Enžl, J., Přeč, L., Šafránková, J., & Němeček, Z. (2013). *Statistical Study of Magnetic Reconnection*. Obtenido de Matematicko-Fyzikální Fakulta, Univerzita Karlova: https://www.mff.cuni.cz/veda/konference/wds/proc/pdf13/WDS13_201_f2_Enzl.pdf
- Faure, G., & Mensing, T. (2007). *Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective*. Springer.
- Foukal, P. V. (2004). *Solar Astrophysics*. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Giancoli, D. C. (2006). *Física: Principios con aplicaciones*. México: Pearson.
- Giovanelli, R. (1946). A Theory of Chromospheric Flares. *Nature*, 81-82.

-
- Gosling, J. (09 de 2005). *Magnetic Reconnection In The Solar Wind: A Brief Overview*. doi:2005ESASP.592..249G
 - Hones Jr., E. (1985). Magnetic reconnection in the earth's magnetotail. *Australian Journal of Physics*, 981-997.
 - Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
 - Mendoza, B. (10 de Octubre de 2007). Calentamiento Global y Actividad Solar. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 1-8. Obtenido de http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art75/oct_art75.pdf
 - Mendoza Ortega, B. (2009). Las tormentosas relaciones entre el Sol y la Tierra. *Casa del Tiempo*, 2(22-23), 90-95. Obtenido de http://www.uam.mx/difusion/casadeltiempo/22_23_iv_ago_sep_2009/casa_del_tiempo_eIV_num22_23_90_95.pdf
 - Mendoza Ortega, B. E. (2013). *Introducción a la Física Espacial*. México: Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.
 - Metcalf, M., Reid, J., & Cohen, M. (2011). *Modern Fortran Explained*. New York: Oxford University Press.
 - Meyer-Vernet, N. (2007). *Basics of the Solar Wind*. New York: Cambridge University Press.
 - Phan, T., Gosling, J., Paschmann, G., Pasma, C., Drake, J., Øieroset, M., . . . Davis, M. (20 de Agosto de 2010). The Dependence of Magnetic Reconnection on Plasma β and

Magnetic Shear: Evidence from Solar Wind Observations. *The Astrophysical Journal Letters*, 719(2), 199-203. doi:10.1088/2041-8205/719/2/L199

- Priest, E., & Forbes, T. (2000). *Magnetic reconnection, MHD theory and applications*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Rojas-Castillo, D. I. (2015). *Estructuras Magnéticas Cercanas al Choque Terrestre*. *Tesis Doctoral*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Spreiter, J., Summers, A., & Alksne, A. (1966). Hydromagnetic flow around the magnetosphere. *Planetary and Space Science*, 2-38.
- Telford, W. M. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Tian, H., Yao, S., Zong, Q., He, J., & Qi, Y. (1 de Septiembre de 2010). Signatures of Magnetic Reconnection at Boundaries of Interplanetary Small-Scale Magnetic Flux Ropes. *The Astrophysical Journal*, 720, 454-464. doi:10.1088/0004-637X/720/1/454

Direcciones Electrónicas

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/the-cluster-mission-a-heliophysics-workhorse-exploring-our-magnetosphere>

<http://sci.esa.int/cluster/31258-summary/>

<https://www.nasa.gov/content/goddard/science-of-magnetic-reconnection>

<http://sci.esa.int/cluster/33024-instruments/?fbodylongid=1115>

7 ANEXOS

Anexo A. Relación matemática entre los elementos del vector de campo geomagnético \vec{B} .

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (7-1)$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (7-2)$$

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{H} \right) \quad (7-3)$$

$$D = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (7-4)$$

X: Componente horizontal, con dirección y sentido al Norte geográfico.

Y: Componente horizontal, con dirección y sentido al Este geográfico.

Z: Componente vertical, con dirección y sentido al nadir.

H: proyección del vector $B^{\vec{}}$ sobre el plano XY

D: Declinación, ángulo entre X y H.

F: Intensidad total, módulo del vector $B^{\vec{}}$.

I: Inclinação, ángulo entre H y el vector $B^{\vec{}}$.

Anexo B. Ecuaciones de transformación entre cada sistema de coordenadas. Tomada de Cifuentes, (2009).

Sistema de Referencia	Componentes magnéticas utilizadas	Ecuaciones de Transformación	
Coordenadas Cartesianas	XYZ	$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ $D = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$ $Z = Z$	$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ $D = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$ $I = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right)$
Coordenadas Cilíndricas	HDZ	$X = H \cdot \cos(D)$ $Y = H \cdot \sin(D)$ $Z = Z$	$F = \sqrt{H^2 + Z^2}$ $D = D$ $I = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{H}\right)$
Coordenadas Esféricas	DFI	$X = F \cdot \cos(I) \cdot \cos(D)$ $Y = F \cdot \cos(I) \cdot \sin(D)$ $Z = F \cdot \sin(I)$	$H = F \cdot \cos(I)$ $D = D$ $Z = F \cdot \sin(I)$

Anexo C. Intervalos de medición nave Cluster C1 - marzo

MARZO				
FECHA	HORA	ANT	VS	MGTF
03/08/16	00:00-00:18		x	x
03/08/16	00:00-01:25	x		
03/08/16	02:00-02:40		x	
03/08/16	02:40-03:15	x		
03/08/16	03:15-03:20		x	
03/08/16	03:20-03:35	x		
03/08/16	03:35-04:00		x	
03/08/16	04:00-04:10			
03/08/16	04:10-04:41		x	
03/08/16	04:41-05:00	x	x	
03/08/16	05:00-05:32		x	
03/08/16	05:32-06:50	x		
03/08/16	06:50-07:00		x	
03/08/16	07:00-07:10			
03/08/16	07:10-08:00	x	x	
03/08/16	08:00-08:20	x	x	
03/08/16	08:20-08:40		x	
03/08/16	08:40-09:00	x		
03/08/16	09:00-09:26	x	x	
03/08/16	09:26-09:40	x		
03/08/16	09:40-10:00		x	
03/08/16	10:00-10:50	x	x	
03/08/16	10:50-11:00			x
03/08/16	11:00-11:35	x	x	
03/08/16	11:35-12:00	x	x	
03/08/16	12:00-12:20	x	x	
03/08/16	12:20-13:00		x	
03/08/16	13:00-14:00	x	x	
03/08/16	14:00-15:00	x	x	
03/08/16	15:00-14:00	x	x	
03/08/16	16:00-17:00	x	x	
03/08/16	17:00-18:00	x		
03/08/16	18:00-19:00	x	x	
03/08/16	19:00-20:00	x	x	
03/08/16	20:00-21:00	x		

03/08/16	21:00-21:24	x		
03/08/16	21:24-24:00		x	
03/09/16	00:00-02:00		x	
03/09/16	02:00-02:18		x	x
03/09/16	03:00-03:38		x	x
03/09/16	03:38-04:00			x
03/09/16	04:00-04:45			x
03/09/16	06:27-06:35	x		
03/09/16	06:35-07:00			x
03/09/16	09:00-11:00			x
03/09/16	12:00-13:00			x
03/10/16	06:00-07:07			x
03/10/16	07:07-07:15		x	
03/10/16	07:24-08:00		x	x
03/10/16	08:00-09:00		x	
03/10/16	09:00-10:00	x	x	
03/10/16	10:00-11:00	x	x	
03/10/16	11:00-12:00	x	x	
03/10/16	12:00-13:00	x	x	
03/10/16	13:00-14:00		x	
03/10/16	14:00-15:00	x	x	
03/10/16	15:00-16:00	x	x	
03/10/16	17:00-18:00		x	
03/10/16	18:00-19:00	x	x	
03/10/16	19:00-20:00	x	x	
03/10/16	20:00-21:00	x	x	
03/10/16	21:00-24:00		x	
03/11/16	01:00-03:20		x	
03/11/16	03:33-05:00		x	
03/11/16	05:00-05:40	x	x	
03/11/16	05:40-06:00	x	x	
03/11/16	06:00-07:00	x	x	
03/11/16	07:00-12:10		x	
03/11/16	12:10-12:33			x
03/11/16	12:33-12:47		x	
03/11/16	12:47-13:00		x	x
03/11/16	13:00-13:09		x	
03/11/16	13:09-14:00			x
03/11/16	14:00-15:00			x

03/12/16	10:00-10:17			X
03/12/16	10:17-10:23	X		
03/12/16	10:23-10:33	X		X
03/12/16	10:33-11:00		X	X
03/12/16	11:00-11:30		X	
03/12/16	11:30-14:00	X		
03/12/16	15:00-16:00	X	X	
03/12/16	16:00-17:00	X	X	
03/12/16	17:00-18:00	X	X	
03/12/16	18:00-19:00	X	X	
03/12/16	19:00-22:40	X		
03/12/16	22:40-23:00		X	
03/12/16	23:00-23:11	X		
03/12/16	23:11-24:00	X	X	
03/13/16	09:00-09:35	X		
03/13/16	09:35-10:00		X	
03/13/16	10:00-10:40	X	X	
03/13/16	10:40-11:00	X		
03/13/16	11:00-11:13	X		
03/13/16	11:13-12:00		X	
03/13/16	12:00-13:00		X	
03/13/16	13:00-14:00	X	X	
03/13/16	14:00-15:00		X	
03/13/16	15:00-15:22		X	
03/13/16	16:00-19:10			X
03/15/16	01:00-01:15	X		
03/15/16	01:15-01:30		X	
03/15/16	01:30-02:00	X	X	
03/15/16	02:00-03:00	X		
03/15/16	03:00-03:30		X	
03/15/16	03:30-04:00	X		
03/15/16	04:00-05:00	X	X	
03/15/16	05:00-05:30	X	X	
03/15/16	05:30-06:24		X	
03/15/16	06:24-07:00	X	X	
03/15/16	07:00-08:00	X	X	
03/15/16	08:00-11:00	X		
03/15/16	11:00-12:00	X	X	
03/15/16	12:00-13:00	X	X	

03/15/16	13:00-14:00	x	x	
03/15/16	15:00-15:25	x		
03/15/16	15:25-16:00	x	x	
03/15/16	16:00-17:00		x	
03/15/16	18:30-19:00		x	
03/15/16	19:25-20:00		x	
03/15/16	20:41-21:10		x	
03/16/16	01:00-02:10			x
03/16/16	03:00-04:00			x
03/16/16	08:00-10:00			x
03/17/16	00:00-01:00			x
03/17/16	01:00-01:33			x
03/17/16	01:33-02:00	x		
03/17/16	02:00-02:18			x
03/17/16	02:18-02:28		x	x
03/17/16	04:00-04:23	x		
03/17/16	04:23-05:00	x	x	
03/17/16	05:00-05:15		x	
03/17/16	05:15-06:00	x	x	
03/17/16	06:00-07:00	x	x	
03/17/16	07:00-07:15	x		
03/17/16	07:15-11:00		x	
03/17/16	11:00-11:20	x	x	
03/17/16	11:20-12:00		x	
03/17/16	12:00-12:35	x		
03/17/16	12:35-13:43		x	
03/17/16	13:43-14:00	x		
03/17/16	14:00-15:25		x	
03/17/16	15:25-16:00	x	x	
03/17/16	16:00-16:25	x	x	
03/17/16	17:00-18:00	x	x	
03/17/16	18:00-16:13		x	
03/17/16	18:13-18:40	x		
03/17/16	18:40-19:00		x	
03/17/16	19:00-21:40	x		
03/17/16	21:40-22:00	x	x	
03/17/16	22:00-23:20	x		
03/18/16	01:00-02:00	x		x
03/18/16	02:00-03:30			x

03/18/16	05:18-06:00			x
03/18/16	07:00-08:00			x
03/18/16	09:00-10:00			x
03/19/16	15:00-16:35	x		
03/19/16	16:35-19:15		x	
03/19/16	19:15-20:00	x	x	
03/19/16	20:00-20:35	x		
03/19/16	20:35-24:00		x	
03/20/16	00:00-00:37		x	
03/20/16	01:00-01:10	x		
03/20/16	01:10-01:40		x	
03/20/16	01:40-02:00	x		
03/20/16	02:00-02:10	x		
03/20/16	02:10-03:00		x	
03/20/16	03:00-04:00		x	
03/20/16	04:00-05:00	x	x	
03/20/16	05:00-06:00	x		
03/20/16	06:00-06:25	x		
03/20/16	06:25-07:00	x		
03/20/16	07:00-16:00			x

Anexo D. Intervalos de medición nave Cluster C1 - abril

ABRIL				
FECHA	HORA	ANT	VS	MGTF
04/01/16	9:00 - 14:20			x
04/01/16	21:04 - 21:07	x		
04/01/16	21:29 - 21:55	x		
04/01/16	22:00 - 22:07		x	
04/01/16	22:11 - 22:20		x	
04/01/16	22:26 - 23:00		x	
04/01/16	22:00 - 22:07		x	
04/01/16	22:11 - 22:20		x	
04/01/16	22:26 - 23:00	x	x	
04/01/16	23:00 - 23:02	x		
04/01/16	23:02 - 23:15		x	
04/01/16	23:15 - 23:43	x		
04/01/16	23:43 - 24:00		x	
04/02/17	00:00 - 00:18		x	
04/02/17	00:18 - 00:24	x		
04/02/17	00:25 - 00:51		x	
04/02/17	00:51 - 01:00		x	
04/02/17	01:00 - 01:05		x	
04/02/17	01:05 - 01:35	x		
04/02/17	01:35 - 02:00		x	
04/02/17	02:00 - 02:35	x		
04/02/17	02:35 - 02:49		x	
04/02/17	02:51 - 07:00	x		
04/02/17	06:04 - 06:10		x	
04/02/17	07:00 - 10:00	x		
04/02/17	10:00 - 10:20		x	
04/02/17	10:20 - 11:00	x		
04/02/17	11:00 - 12:00		x	
04/02/17	12:00 - 12:46	x		
04/02/17	13:00 - 13:26		x	
04/02/17	13:35 - 15:00		x	
04/02/17	15:00 - 15:11	x		
04/02/17	15:00 - 16:00		x	
04/02/17	16:25 - 17:00		x	
04/02/17	17:00 - 18:00		x	
04/02/17	18:00 - 19:00	x		

04/02/17	19:00 - 19:30	x		
04/02/17	19:30 - 19:54		x	
04/02/17	19:54 - 20:26	x		
04/02/17	20:26 - 21:40		x	
04/02/17	21:46 - 22:00		x	
04/02/17	22:00 - 22:14.		x	
04/02/17	22:14 - 22:17			
04/02/17	22:17 - 22:55		x	
04/02/17	22:55 - 22:58			
04/02/17	22:58 - 23:00		x	
04/03/16	00:00 - 00:41	x		
04/03/16	00:49 - 02:49			x
04/03/16	02:51 - 03:03			x
04/03/16	03:07 - 03:11			x
04/03/16	03:15 - 03:19			x
04/03/16	03:21 - 03:29			x
04/03/16	04:00 - 04:05			x
04/03/16	04:07 - 06:24			x
04/03/16	22:30 - 23:00			x
04/04/16	00:00 - 04:03			x
04/04/16	04:03 - 04:11		x	
04/04/16	04:11 - 04:19			x
04/04/16	04:19 - 04:25		x	
04/04/16	04:25 - 04:30			x
04/04/16	04:30 - 04:40		x	
04/04/16	04:40 - 05:51			x
04/04/16	05:51 - 05:54	x		
04/04/16	05:54 - 07:20			x
04/04/16	07:20 - 07:22		x	
04/04/16	07:22 - 09:18			x
04/04/16	09:18 - 10:05	x		
04/04/16	10:05 - 10:13			x
04/04/16	10:13 - 11:36	x		
04/04/16	11:36 - 12:40		x	
04/04/16	12:40 - 13:11	x		
04/04/16	13:18 - 13:30	x		
04/04/16	14:00 - 14:39		x	
04/04/16	14:39 - 14:46	x		
04/04/16	14:46 - 15:00		x	

04/04/16	15:00 - 15:19	x		
04/04/16	15:19 - 15:42		x	
04/04/16	15:42 - 17:31	x		
04/04/16	17:31 - 17:44		x	
04/04/16	17:44 - 17:47	x		
04/04/16	17:47 - 17:50		x	
04/04/16	17:50 - 17:53	x		
04/04/16	17:53 - 19:54		x	
04/04/16	19:54 - 20:09	x		
04/04/16	20:09 - 20:16		x	
04/04/16	20:16 - 21:00	x		
04/04/16	21:00 - 21:34		x	
04/04/16	21:34 - 24:00	x		
04/05/16	00:00 - 01:12	x		
04/05/16	01:12 - 02:00			x
04/05/16	03:00 - 09:00			x
04/06/16	04:00 - 09:00			x
04/06/16	09:00 - 10:30	x		
04/06/16	10:30 - 10:34		x	
04/06/16	10:34 - 11:36			x
04/06/16	11:44 - 12:00	x		
04/06/16	12:00 - 12:06		x	
04/06/16	12:06 - 12:36			
04/06/16	12:36 - 13:00		x	
04/06/16	13:00 - 24:00	x		