



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

NUBES MAGNÉTICAS EN EL MEDIO INTERPLANETARIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A :

CYNTHIA LÓPEZ PORTELA



DIRECTORA DE TESIS:

DRA. XOCHITL GUILLERMINA BLANCO CANO



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

2006



FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Cynthia López Portela

FECHA: 16 de mayo 2006

FIRMA: [Firma manuscrita]

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
Nubes Magnéticas en el Medio Interplanetario

realizado por Cynthia López Portela

con número de cuenta 09624263-0 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario Dra. Xochitl Guillermina Blanco Cano

Propietario Dr. José Julio Emilio Herrera Velázquez

Propietario Dr. Alfredo Santillán González

Suplente Dr. Román Pérez Enríquez

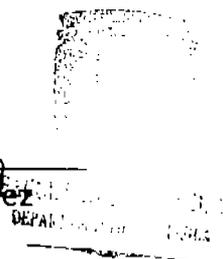
Suplente Dr. Enrique López Moreno

[Firma manuscrita]
[Firma manuscrita]
[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]
[Firma manuscrita]

Consejo Departamental de Física

Alicia Zarzosa Pérez
M. en C. Alicia Zarzosa Pérez



A mis padres y hermanas por su apoyo y cariño,
a mis familiares y amigos

Agradecimientos

A la Dra. Xochitl Blanco Cano por su atención y constancia.

A los sinodales Dr. Julio Herrera Velázquez, Dr. Alfredo Santillán González, Dr. Román Pérez Enríquez y al Dr. Enrique López Moreno, por sus correcciones y sugerencias al presente trabajo.

A mis compañeros e investigadores del Departamento de Física Espacial, por su apoyo y amistad.

A la Facultad de Ciencias.

Índice general

Capítulo 1

Introducción

1.1 El Sol	1
1.2 El viento solar	4
1.3 Eventos solares	
1.3.1 Eyecciones de masa coronal	6
1.3.2 Eyecciones de masa coronal en el medio interplanetario	8
1.3.3 Nubes magnéticas	11
1.3.4 Eyectas complejas	14
1.4 Perturbaciones geomagnéticas	18
1.5 Misiones espaciales	20
1.6 Descripción y motivación de la tesis	21

Capítulo 2

2.1 Características de nubes magnéticas observadas a 1 UA por la nave WIND	23
2.1.1 Características de nubes magnéticas lentas y rápidas	26
2.1.2 Nubes magnéticas lentas con y sin helio	28
2.1.3 Nubes magnéticas rápidas con y sin helio	29
2.2 Eyectas complejas	30
2.2.1 Eyectas complejas lentas y rápidas	32
2.2.2 Eyectas complejas lentas	33
2.2.3 Eyectas complejas rápidas	33
2.3 Asociación de nubes magnéticas de 1996 al 2002 con eventos solares	34
2.4 Conclusiones	40

Capítulo 3

3.1 Las eyecciones de masa coronal interplanetarias y su impacto terrestre	41
3.2 Eventos geomagnéticos debidos a eventos de nubes magnéticas y fundas de 1996 a 2002	44
3.2.1 Eventos geomagnéticos debidos a nubes magnéticas	49
3.2.2 Eventos geomagnéticos debidos a nubes magnéticas con fundas	49
3.2.3 Tormentas de dos pasos	52
3.3 Casos particulares	55
3.4 Tormentas de tres pasos	62
3.5 Conclusiones	64

Capítulo 4

4.1 Cuantificación de la geoeffectividad	65
4.1.1 Nubes magnéticas que causaron la caída en el índice Dst	70
4.1.2 Fundas que causaron la única o la primera caída en el índice Dst	72
4.1.3 Nubes magnéticas y fundas que provocaron la caída en el índice Dst	74
4.1.4 Correlación entre $(-VBz)_{max}$ y el índice Dst	76
4.2 Relación de los datos con el ciclo solar 23	78
4.3 Conclusiones	81

Capítulo 5

5.1 Conclusiones y trabajo futuro	82
---	----

Capítulo 1

Introducción

1.1 El Sol

Los puntos brillantes que vemos en la bóveda celeste pueden ser planetas, estrellas, galaxias, entre otros cuerpos celestes, y han sido observados por el humano desde hace ya muchos años. La ventana con la que observamos a esos puntos brillantes directamente con los ojos está en el rango espectral del visible el cual es muy pequeño, sin embargo a partir de 1945 la astronomía abrió este rango para observar al espacio tanto en emisión radio como en rayos X y rayos gamma. Con estas frecuencias tan altas y con la ayuda de instrumentos, se ha podido monitorear al medio interplanetario, al Sol y al Universo en general.

Actualmente para estudiar tanto al Universo como al medio interplanetario (MI) contamos con las misiones espaciales, las cuales se han convertido en una herramienta principal en la exploración del espacio.

Estas misiones espaciales trabajan con observatorios o laboratorios en la Tierra, en donde se procesa y se analiza la información que mandan las naves que se encuentran en el espacio. Los instrumentos con los que se equipan a las naves espaciales son de gran utilidad ya que son capaces de elaborar mediciones en el lugar de observación; a este tipo de mediciones se les llaman mediciones *in situ*; y debido a que las naves se pueden mover en diferentes direcciones del espacio, y a que existen varios tipos de instrumentos de observación, porque dependiendo de los objetivos de la misión se eligen los instrumentos, las misiones espaciales tienen diversas alternativas para explorar al espacio.

Uno de los resultados más importantes que han aportado las mediciones *in situ*, es el abandono a la idea que consideraba al medio interplanetario vacío, ya que las mediciones mostraron que el MI está permeado por un plasma, el cual delimita el territorio de nuestro sistema solar formando una cavidad conocida como *heliosfera*. Extendiendo así esta misma idea para todo el Universo, en el sentido que la mayoría de las estrellas también delimitan sus territorios con la emisión de un "viento" semejante al que emite el Sol (*viento solar*), tenemos como consecuencia que el Universo se encuentre parcelado.

La idea de la existencia del viento solar fue propuesta teóricamente por Eugene N. Parker en 1958 (*Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields*, *Astrophys. J.*, 1958) y fue corroborada en 1959 por las naves espaciales rusas Lunik 2 y 3. La teoría de Parker consiste en tener un flujo de plasma proveniente del Sol que barre continuamente a todo el MI propagándose a velocidades supermagnetosónicas (mayores a 300 km/s). Parker nombró a este flujo de plasma solar como *viento solar*.

Como el viento solar se encuentra en estado de plasma veamos de una manera muy concisa a qué nos referimos cuando hablamos de un material que se encuentra en este estado.

Al estado de plasma se le ha llamado también el cuarto estado de la materia; en él la materia se encuentra ionizada y en un estado de cuasi-neutralidad, es decir, contiene la misma cantidad de iones como de electrones libres, con lo que el material se vuelve muy sensible tanto a campos magnéticos como a campos eléctricos externos.

En general un plasma es un gas ionizado y no necesariamente debe encontrarse 100% ionizado, de hecho existen plasmas con un 1% de gas ionizado (*Boyd et al.*, 2003). Pero lo que si es característico en un plasma es la temperatura, ya que un gas al estar a altas temperaturas se ioniza.

Los plasmas de alta conductividad están confinados por sus propios campos magnéticos, los cuales no permiten que se mezclen unos con otros. El hecho de que no se mezclen, se debe a que los plasmas mantienen las líneas de su campo magnético con ellos todo el tiempo, es decir, si un plasma se mueve arrastra con él sus líneas magnéticas, no permitiendo así que otros plasmas interactúen con su interior.

El conocimiento de que el 99% del Universo está en estado de plasma hace que éste se encuentre magnetizado en todo su largo y en todo su ancho, ya que existen campos magnéticos en todas las direcciones del espacio.

Con el tiempo los avances tecnológicos, como las misiones espaciales, han ayudado a observar al medio interplanetario más de cerca, descubriendo que éste se encuentra parcelado debido a que existe una interacción permanente entre los plasmas, los cuales defienden sus territorios por fronteras muy dinámicas.

Las estrellas son la fuente del plasma en el espacio, ya que en el núcleo de ellas la presión térmica es muy alta, las densidades son de cientos de veces la presión del agua, y la temperatura es de cerca de 16 millones de grados Kelvin (K). Con estas condiciones existen reacciones termonucleares de fusión en las que los núcleos de los átomos de hidrógeno se funden para formar núcleos de helio. En este proceso hay pérdida de masa que se convierte en energía; la cual se produce continuamente en el núcleo de las estrellas e impide que estas se colapsen manteniéndolas en estado de plasma.

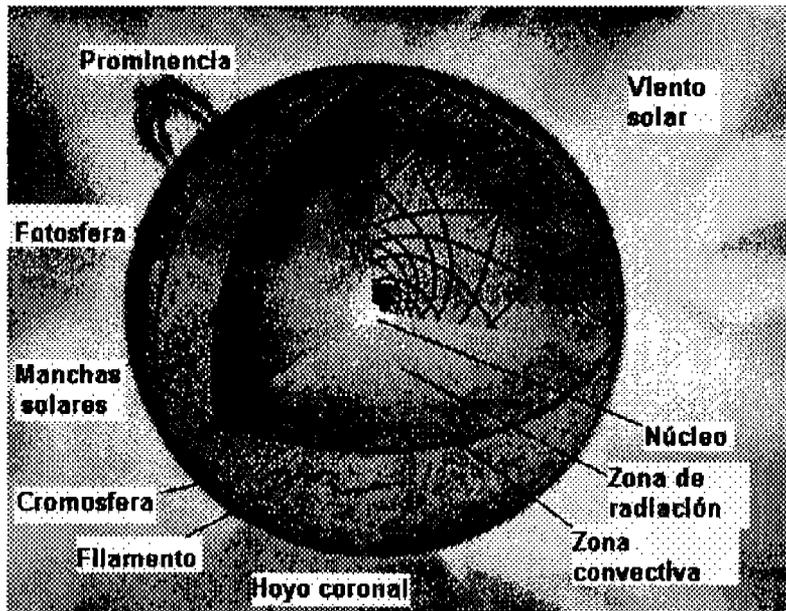


Figura 1.1 Estructura solar. El núcleo, la zona de radiación, la zona convectiva, la fotosfera, la cromosfera, y la corona solar.

<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry//workbook/page5.html>

En el caso de nuestro Sol los fotones se propagan hacia afuera del Sol a través de una zona de radiación en donde la temperatura desciende de 10^7 K a 5×10^5 K en los límites de la zona convectiva, ver figura 1.1, y justo encima de esta zona está la fotosfera, que es la superficie visible del Sol, en el sentido de que los fotones en el espectro visible escapan de ella.

En esta capa aparecen regiones oscuras que pueden llegar a cubrir hasta una cuarta parte de su superficie. Estas regiones tienen extensiones diversas ya que pueden ser de tamaño grande o reunirse en grupos para formar regiones aún más extensas que se pueden observar desde la Tierra. Estas regiones oscuras reciben el nombre de *manchas solares* y tienen un ciclo de once años, el cual está asociado con la actividad solar.

Cuando hay un máximo de actividad solar el número de manchas es máximo y por el contrario, cuando existen pocas manchas solares el Sol se encuentra en un mínimo de actividad. La figura 1.2 muestra el registro de los ciclos solares 22 y 23.

En la fotosfera solar la temperatura decrece a aproximadamente 4300 K y después inesperadamente empieza a aumentar hasta llegar a la cromosfera, ver figura 1.1, en donde la temperatura alcanza alrededor de 20 000 K. Al seguirse calentando surge dramáticamente la corona solar, en donde la temperatura alcanza más de un millón de grados kelvin. En esta última capa el plasma se sigue calentado hasta llegar a varios millones de grados, lo que provoca que la fuerza gravitacional del Sol ya no sea suficientemente fuerte para contener al material, así el plasma escapa constantemente del Sol expandiéndose por todo el medio interplanetario, de hecho todos los planetas de nuestro sistema solar se encuentran inmersos en él. A este flujo continuo de plasma originado en el Sol como mencionamos antes se le llama *viento solar*.

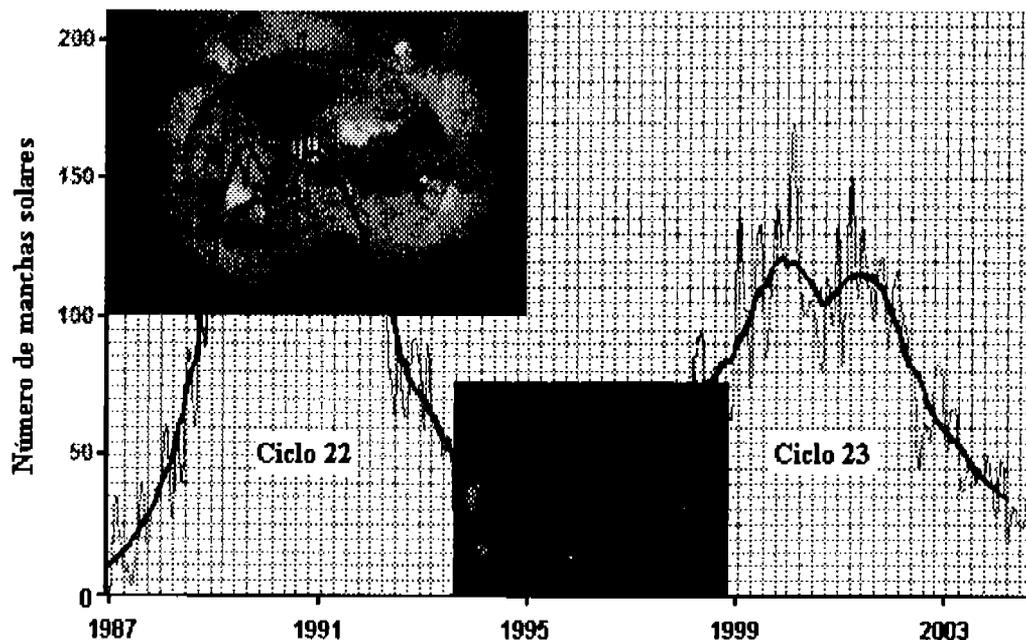


Figura 1.2 Ciclo de actividad solar 22 y 23. El número de manchas solares varía cada 11 años. Las imágenes del Sol se obtuvieron con un telescopio en rayos X abordo de la nave YOHKOH (http://solar.physics.montana.edu/YPOP/Classroom/Lessons/Cycles/Images/the_changing_sun.gif). Las imágenes muestran la atmósfera solar en el máximo de actividad y en el mínimo de actividad. La gráfica se obtuvo con el número de manchas solares y el tiempo en años (<http://www.dxlc.com/solar/solcycle.html>).

1.2 El viento solar

La idea de la existencia de un flujo en el medio interplanetario fue sugerida por primera vez en 1951 por Biermann, quién propuso que el hecho de que las colas de los cometas apuntaran hacia afuera del Sol, era por causa de un flujo continuo que se originaba en el Sol inyectándose hacia el MI. Pero no fue hasta que se enviaron sondas espaciales que se detectó la existencia de este flujo.

Como hemos mencionado, la existencia del viento solar fue propuesta teóricamente por Parker en 1958 y fue corroborada un año después por las misiones espaciales Lunik 2 y 3, mencionadas en la sección anterior.

Las mediciones de los instrumentos abordo de estas naves mostraron que el viento solar está en estado de plasma, el cual es un material ionizado y tiene una característica muy importante: tiene temperaturas muy elevadas; de hecho por encima de 1×10^4 K toda la materia está en estado de plasma (*Bravo* 1997 y 1998); con lo que al considerar que la temperatura de la corona solar es del orden de 1×10^6 K, podemos decir que el material en esta capa se encuentra en estado de plasma.

Al estar ionizado el material, este se vuelve muy sensible a los campos magnéticos y ocurre algo poco usual, el plasma se une con el campo magnético solar y no se separan, dando como resultado una interacción competente entre la presión térmica y la presión magnética.

Esta interacción es interesante porque cuando domina la presión térmica el plasma se comporta como un fluido, debido a que la temperatura es tan alta el gradiente de presión térmica supera a la fuerza gravitacional del Sol; por lo que este no puede contener al flujo, y escapa de la superficie solar arrastrando al campo magnético por todo el medio interplanetario. A este campo magnético arrastrado por el viento solar se le conoce como el campo magnético interplanetario (CMI).

Por otro lado, cuando domina la fuerza magnética el flujo de plasma sigue a las líneas del campo magnético solar. Esta interacción competente entre la presión magnética y la presión térmica, provoca que la corona tenga regiones distintas.

Una de estas regiones son los cascos coronales, ver figura 1.3, en donde la fuerza magnética es la que domina al sistema, y las líneas del campo magnético solar se encuentran "cerradas". La segunda región corresponde a los hoyos coronales, en donde la presión térmica es la que domina, y se dice de manera coloquial que en estas regiones las líneas del campo magnético solar se encuentran "abiertas". Es de estas regiones "abiertas" por donde escapa el material ionizado dando origen al viento solar que se expande por todo el medio interplanetario.

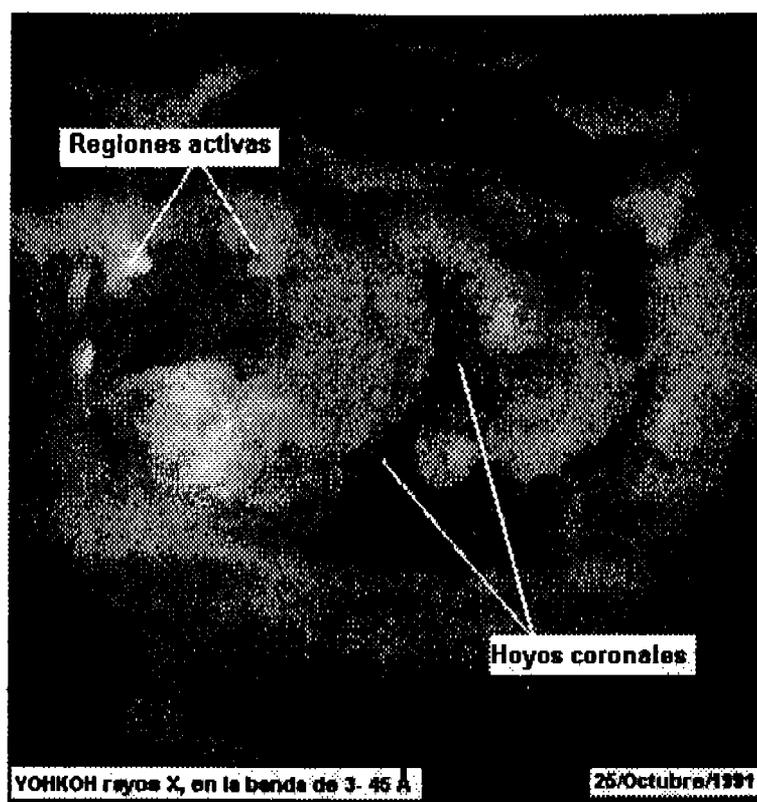


Figura 1.3 Regiones activas y hoyos coronales. Los cascocs están relacionados con las regiones activas en donde el plasma es más denso que en los hoyos coronales.

http://space-science.com/newhome/headlines/ast14oct99_1.htm

En la siguiente tabla se muestran las características generales del viento solar detectadas por naves que se encuentran localizadas cerca de la Tierra.

Tabla 1. Características del viento solar a 1 UA¹

Viento solar lento	Viento solar rápido
Velocidad (V) \approx 250-400 km/s	Velocidad (V) \approx 400-800 km/s
Densidad de partículas (N) \approx 10 p/cm ³	Densidad de partículas (N) \approx 3 p/cm ³
Temperatura protónica (T) \approx 2x10 ⁴ -10 ⁵ K	Temperatura protónica (T) \approx 2x10 ⁵ K
Flujo \approx 3.7x10 ⁸ 1/cm ² s	Flujo \approx 2x10 ⁸ 1/cm ² s

Cuando la velocidad del viento solar está entre 400 y 800 km/s se considera *viento rápido*. Para este viento la temperatura es alta y la densidad es baja.

Por otro lado se considera un *viento lento* cuando la velocidad está entre 250 y 400 km/s, este viento, a diferencia del viento solar rápido, es más denso y más frío.

Finalmente ahora podemos decir que el medio interplanetario se encuentra permeado por el viento solar, el cual es la expansión continua de la capa más externa del Sol, llamada corona solar.

¹ 1 UA= unidad astronómica \approx 150x10⁶ km, la distancia media del Sol a la Tierra

1.3 Eventos solares

1.3.1 Eyecciones de masa coronal

La corona solar es una región muy dinámica en donde el ciclo de actividad solar se manifiesta. Uno de los eventos solares más conocidos son las eyecciones de masa coronal (EMC), las cuales son la salida de enormes cantidades de masa de plasma y se pueden observar al eclipsar al Sol.

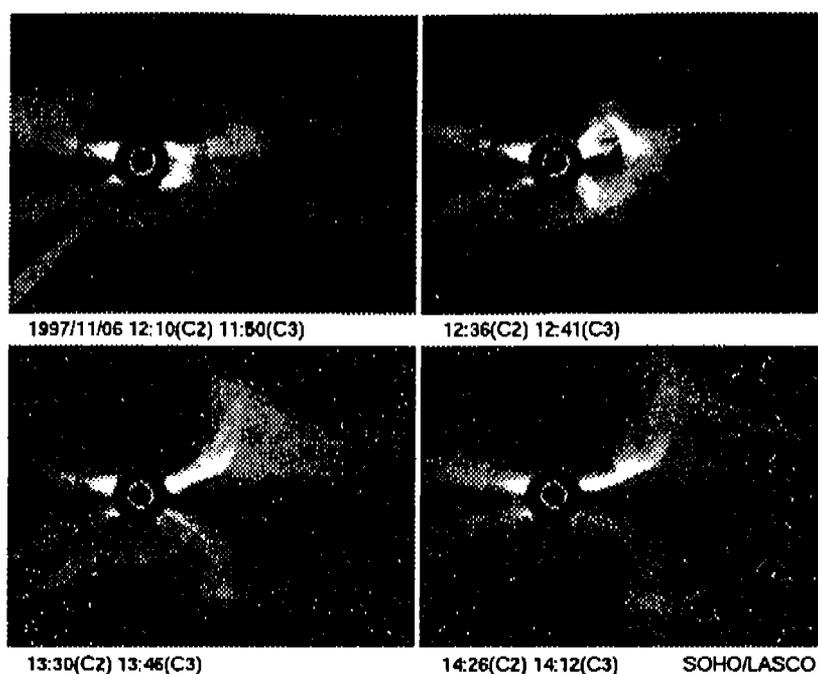
Actualmente la nave espacial SOHO lleva a bordo tres coronógrafos, de los cuales dos funcionan óptimamente (C2 y C3). Estos instrumentos tienen el objetivo de eclipsar artificialmente al Sol de manera continua y las imágenes que se obtienen de EMC son similares a las de la figura 1.4.

Como las eyecciones de masa coronal evolucionan conforme se propagan en el espacio, la actividad solar se refleja en todo el medio interplanetario. Y si ahora tomamos en cuenta que la distancia entre el Sol y la Tierra es de 1 UA, la cual es relativamente corta en comparación con la de otros planetas y el Sol, entonces debemos esperar que la actividad solar se manifieste de manera importante en nuestro planeta.

Hoy en día se han catalogado la forma de salida de las EMC del Sol. Los dos grupos más importantes son:

- 1) las EMC tipo halo, las cuales llegan a cubrir 360° del disco del coronógrafo, y
- 2) las EMC tipo halo parcial que llegan a cubrir por poco menos de 360° del disco del coronógrafo.

La división entre los eventos tipo halo y halo parcial son una referencia de la dirección en la que se propagan las eyecciones, ya que si las naves espaciales cerca de la Tierra están orientadas hacia el Sol (lado día), una EMC tipo halo nos sugiere que la perturbación interplanetaria estará dirigida aproximadamente en la línea Sol-Tierra, provocando alteraciones a nivel terrestre.



<http://lasco-www.nrl.navy.mil/>

Figura 1.4 Esta figura muestra observaciones de los coronógrafos de LASCO² C2 y C3 a bordo de la nave espacial SOHO, en una secuencia de cuatro fotografías indicada por las horas registradas por los coronógrafos en tiempo universal el día 06 de noviembre de 1997. En esta secuencia se observa una burbuja de plasma de una eyección de masa coronal (EMC), que se expande y crece cada vez más hasta que escapa de la fuerza magnética y de la fuerza gravitacional del Sol.

A principios del siglo XIX la relación entre la actividad solar y las fallas en las telecomunicaciones se hizo evidente. En particular en 1901 las fallas en la transmisión de las señales se relacionaron con las manchas solares, las cuales se han observado ya desde hace unos cuantos siglos atrás.

Años más tarde Marconi en 1928 observó que existía una relación entre las auroras boreales y las tormentas geomagnéticas³, las cuales se relacionan con alteraciones en las telecomunicaciones.

Así entonces a partir de que los científicos contaron con instrumentos más sofisticados para observar al Sol, en 1934 Chapman y Ferraro propusieron que las tormentas geomagnéticas, eran provocadas por partículas muy energéticas provenientes del Sol. En ese entonces se creía que el viento solar, al que llamaban plasma solar, se propagaba en el MI debido a explosiones repentinas en la superficie solar, que se observan como grandes arcadas de plasma en la corona, y que por esta razón el fenómeno de las tormentas geomagnéticas era esporádico.

Ahora el avance tecnológico ha permitido mandar instrumentos a bordo de las sondas espaciales con los que se ha obtenido información relacionada con la actividad solar, y con la que actualmente sabemos que existe una interacción muy marcada entre fenómenos solares y fenómenos planetarios.

² LASCO eclipsa al Sol artificialmente permitiendo así observar a la corona solar

³ Alteraciones en el campo geomagnético

1.3.2 Eyecciones de masa coronal en el medio interplanetario

Las EMC son expulsadas del Sol y viajan hacia el medio interplanetario con velocidades de 200 a 1200 km/s.

Cuando estos eventos se propagan en el viento solar reciben el nombre de eyecciones de masa coronal interplanetarias (EMCI), a las cuales también con frecuencia se les llaman eyectas, y recorren distancias de varias UA perturbando al medio interplanetario conforme se expanden, y se les considera como perturbaciones de gran escala, debido a que llegan a medir en promedio 0.25 UA a la altura de la órbita terrestre (1 UA). El estudio de estas perturbaciones es interesante ya que representan la conexión entre la actividad solar y la terrestre.

Para identificar a las eyectas en los registros se han tomado diversos criterios, ya que la variación en un sólo parámetro en el registro, resulta ser poco eficiente para indicar la presencia de una eyecta. Por lo que es recomendable considerar más de dos parámetros que muestren características diferentes a las del viento solar ambiente.

Entre las firmas más comunes que se identifican en los registros, y que indican la presencia de una eyecta al compararlos con los valores del viento solar ambiente, tenemos:

- 1) temperaturas protónicas y electrónicas más bajas que la del viento solar ambiente
- 2) incrementos en la intensidad y una rotación del campo magnético
- 3) una β baja comparada con la del viento solar ambiente⁴ ($\beta = 0.5-0.8$)
- 4) flujos bidireccionales de electrones y protones
- 5) decrementos de flujos de rayos cósmicos de baja energía
- 6) estados de ionización diferentes al del viento solar ambiente
- 7) abundancia de helio

En la figura 1.5 se muestra el registro de una perturbación en el MI provocada por una eyecta.

⁴ β es la razón entre la presión térmica y la presión magnética del viento solar

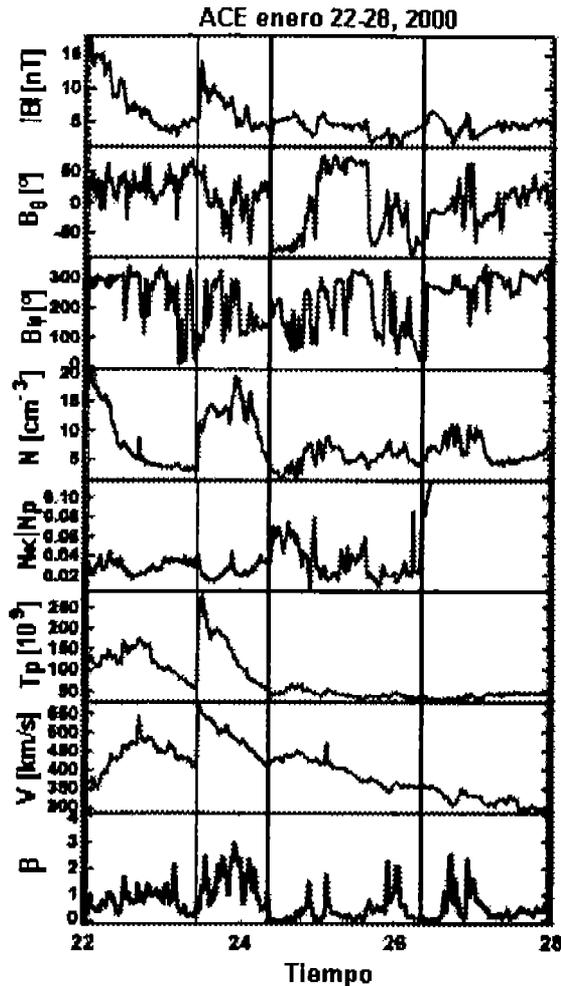


Figura 1.5 Ejemplo de una eyecta registrada del 24 al 26 de enero del 2000 por la nave ACE⁵. Del panel superior hacia abajo se muestran los parámetros: magnitud del campo magnético B (nT), ángulo de elevación del campo magnético B_θ , ángulo azimutal ϕ , densidad protónica N (cm^{-3}), la razón entre las densidades de partículas α con respecto a la de protones (N_α/N_p), temperatura protónica T_p (10^9 K), la velocidad V (km/s), y el coeficiente β del plasma. El tiempo transcurre de izquierda a derecha, iniciando así desde el día 22 hasta el día 28. La eyecta se encuentra delimitada por las dos últimas líneas, (Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2005).

La eyecta tiene un choque indicado por la primera línea vertical, en donde se observa un incremento en la magnitud del campo magnético, en la densidad, en la temperatura, y en la velocidad del plasma.

En el panel superior del registro de esta figura se observa que el campo magnético B de la eyecta no está enriquecido significativamente con respecto al valor del viento solar ambiente, en el siguiente panel no se observa una rotación suave del campo magnético B_θ ; así también la densidad (N) en el cuarto panel muestra fluctuaciones en sus valores; lo que nos sugiere que los primeros cuatro paneles, no nos muestran comportamientos suficientes para sugerirnos la presencia de una eyecta. Sin embargo en el sexto panel podemos observar una disminución significativa en la temperatura (T_p) adentro de la eyecta, lo que nos indica que se trata de una estructura distinta a la del viento solar.

La figura 1.5 muestra que las EMCI o eyectas son eventos transitorios que pueden propagarse con velocidades mayores a las del viento solar generando choques en el MI delante de ellas. Los choques se detectan en las observaciones *in situ* como incrementos en la magnitud del campo magnético, en la densidad, en la temperatura, y en la velocidad del plasma. Esto porque el viento que genera el choque comprime al viento que se encuentra adelante, reflejando esta compresión en incrementos en los parámetros anteriores en la parte delantera de la eyecta.

⁵ La nave espacial ACE se encuentra afuera de la Tierra a 1 UA del Sol

Por otro lado el estudio de la composición química adentro de las eyectas es otro criterio para su identificación, ya que nos muestra información muy interesante.

En general el material proveniente del Sol y que se propaga en el MI está en estado de plasma y por lo tanto está ionizado. Sin embargo las eyectas en ocasiones presentan un material con estado de ionización mayor al del viento solar ambiente.

Por ejemplo, ocasionalmente la densidad del O^{7+} en las eyectas es mayor que la densidad del O^{6+} , lo que implica que el cociente $O^{7+}/O^{6+} > 1$; en donde los superíndices (+) indican el número de veces que el material está ionizado. Este resultado nos sugiere que la eyecta viene de regiones muy calientes, de hecho un valor $O^{7+}/O^{6+} \approx 1$ corresponde a una temperatura coronal de 2×10^6 K, de acuerdo con *Burlaga et al.* [2001].

Otro estudio de la composición química es una firma con enriquecimiento en la densidad de partículas α , ya que el resultado de que la eyecta contenga una concentración alta en partículas α respecto a la de protones ($\alpha/p > 8-10\%$), sugiere que la eyecta contiene material proveniente de regiones de la corona baja. En donde las partículas α son átomos de helio ionizados.

Existen otras firmas que frecuentemente se observan acompañando a las eyectas ya sea antes, adentro de las eyectas o después de ellas. Una de estas firmas, son los flujos de electrones bidireccionales y de protones bidireccionales. Con energías del orden de KeV (*Gosling et al.*, 1987) para los electrones bidireccionales y de MeV (*Rodríguez et al.*, 2005) para los protones bidireccionales. Y hasta ahora existen dos explicaciones para que se formen estos flujos.

La figura 1.6 ilustra la primera explicación, la cual sugiere que al propagarse la EMCI por el MI, al menos a 1 UA, mantiene sus líneas magnéticas ancladas al Sol, debido a que las partículas siguen fluyendo a través de las líneas del campo magnético que se encuentran conectadas al Sol.

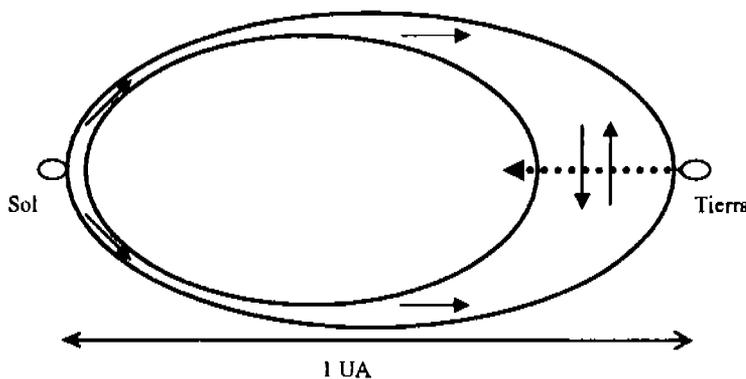


Figura 1.6
Esquema de una eyecta que mantiene las líneas de su campo magnético ancladas al Sol. Las flechas sólidas indican el sentido del flujo de las partículas. La flecha punteada indica la posición de una nave espacial a 1 UA.

La otra alternativa para explicar la formación de los flujos bidireccionales consiste en un plasmóide, que es un plasma aislado que viaja en el medio interplanetario con las líneas del campo magnético cerradas, y se ha representado por medio de un esquema muy sencillo como el que se muestra en la figura 1.7.

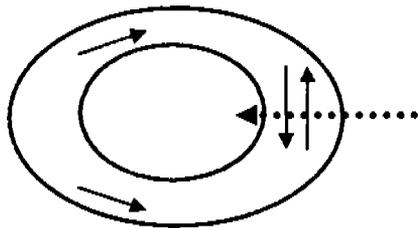


Figura 1.7 Esquema de un plasmóide. Un plasmóide consiste en una estructura de plasma cerrada y aislada. En la figura se puede observar el sentido de los flujos de las partículas ya sean de electrones o de protones adentro del plasmóide (flechas sólidas). La flecha punteada indica la posición de una nave espacial, la cual registra lo mismo que la nave de la figura 1.6.

1.3.3 Nubes magnéticas

Algunas eyecciones de masa coronal interplanetarias o eyectas, son nubes magnéticas (NM), las cuales son estructuras que perturban al medio interplanetario y cumplen con las siguientes tres características mencionadas por *Burlaga* [1991]:

- 1) incremento en la magnitud del campo magnético
- 2) una rotación suave del campo magnético sobre un plano, y
- 3) un decremento en la temperatura protónica

La figura 1.8 muestra el registro de una nube magnética. El incremento en la magnitud del campo magnético se encuentra en el primer panel, la rotación del campo magnético en el segundo panel, y el decremento en la temperatura en el tercer panel.

Los datos del registro son de la nave espacial WIND que se encuentra localizada a 1 UA del Sol, y están asociados a las observaciones del 17 al 21 de octubre de 1995.

Este evento fue analizado por *Burlaga et al.* [1996] y *Lepping et al.* [1997], en donde la NM inicia el 18 de octubre a las 19 hrs con 48 minutos y termina a principios del día 20 de octubre (1hrs con 18 minutos) de 1995.

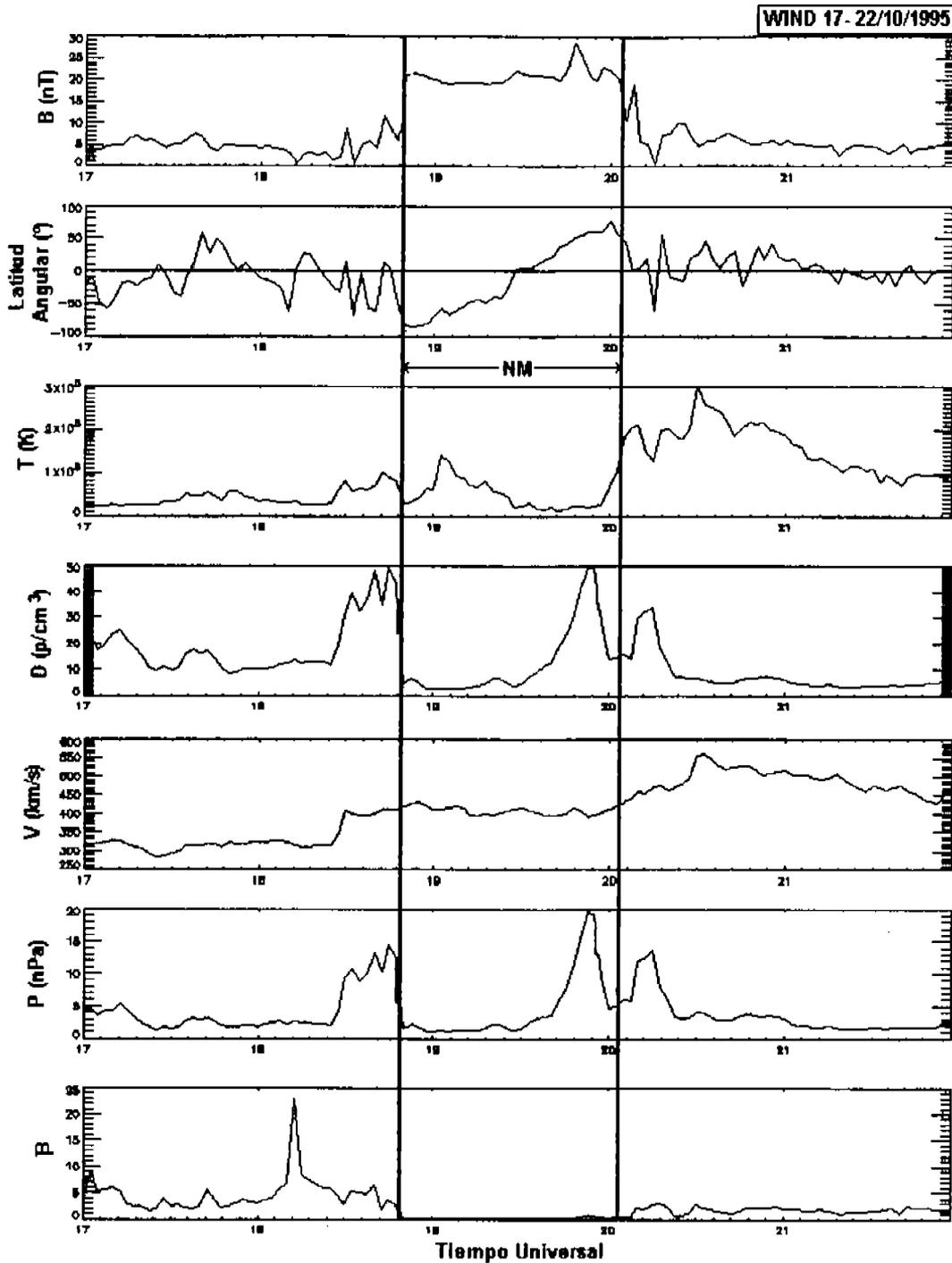


Figura 1.8 Esta figura es un registro que muestra las características de una NM, realizado con los datos de la nave WIND del 17 al 21 de octubre de 1995.

Del panel superior al panel inferior se observan los siguientes parámetros: la magnitud del campo magnético B en nano-Teslas (nT), el ángulo azimutal θ [0-180°], la temperatura protónica T (K), la densidad de protones D (cm^{-3}), la velocidad de flujo V (km/s), la presión P en nano-Pascals (nPa) y la β del plasma (la razón entre la presión térmica y la presión magnética).

La estructura de la NM se encuentra delimitada por las líneas verticales. Las características que debe cumplir la estructura para ser una NM están en los primeros tres paneles.

Dado que la expansión continua de la capa más externa del Sol cubre al medio interplanetario, como lo hemos mencionado, surge la motivación y la importancia de estudiar a las nubes magnéticas, ya que podemos entender más a la corona solar así como a las perturbaciones que existen a nivel geomagnético provocadas por estas estructuras.

Para estudiar a las nubes magnéticas, estas se han modelado como estructuras con un campo magnético libre de fuerza (Goldstein H. 1983): $\nabla \times \mathbf{B} = 0$, por lo que se expanden conforme se propagan formando así una estructura de cuerdas magnéticas como la que se muestra en la figura 1.9.

En el 2001 Burlaga reportó la nube magnética más lejana que se ha observado con datos de la nave espacial Voyager 2, que se encontraba a 63 UA, la identificación de una estructura de NM, por lo que si ahora consideramos como ejemplo a una nube magnética que se propaga con una velocidad promedio de 400 km/s hasta 11 UA, como resultado obtenemos que es una estructura estable durante 35 días, por lo que las NM se pueden considerar muy estables a 1 UA y esto facilita el estudio de las perturbaciones en las cercanías de la Tierra debidas a estas estructuras.

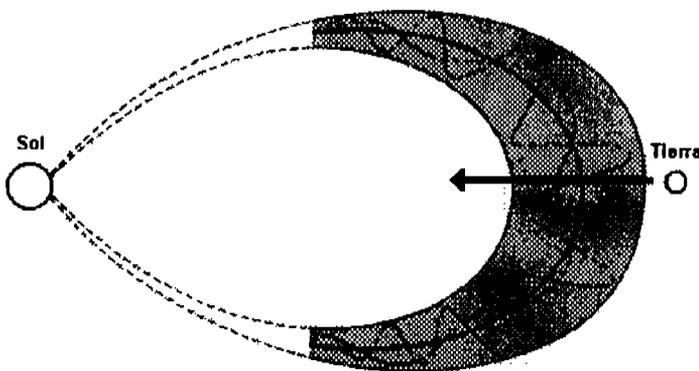


Figura 1.9 Las líneas del campo magnético en una configuración de campo magnético libre de fuerza forman una familia de hélices. La configuración global de la NM cerca de 1 UA es similar a la que se muestra aquí. Así cuando una nave cruza esta estructura, siguiendo una trayectoria como la que indica la flecha, la nave registra una rotación sobre un plano, como se indicó en el segundo panel de la figura 1.8. Las líneas punteadas cerca del Sol indican que no se sabe si estas estructuras están conectadas o no a este.

Las nubes magnéticas son un subconjunto de las eyecciones de masa coronal interplanetarias y en términos generales pueden presentar estados de ionización diferentes al del viento solar ambiente, por ejemplo: He^{++} , O^+ , Fe^+ , o presentar flujos de electrones y de protones bidireccionales, entre otras firmas.

Los estudios de la composición química adentro de las nubes magnéticas sugieren que éstas vienen de regiones específicas de la corona. Por ejemplo, Henke et al. [2001], obtuvieron con datos de los aparatos SWICS (Solar Wind Ion Composition Experiment) y VHM (Vector Helium Magnetometer) de la misión ULYSSES, que los estados de ionización del Fe^+ y del O^+ adentro de las nubes magnéticas son distintos a los del viento solar ambiente, sugiriendo así que las nubes magnéticas vienen de regiones en donde el material fue más ionizado, y que las eyecciones que no son nubes magnéticas no presentan tan sistemáticamente este comportamiento.

Adicionalmente *Agullar-Rodríguez et al.* [2005] trabajaron con nubes magnéticas y también con eventos diferentes a estas estructuras, con los datos de las naves espaciales WIND y ACE; encontrando que las nubes magnéticas tienen incrementos en el estado de ionización tanto para el O^{7+} como para el Mg^{10+} con respecto al O^{6+} , al compararlos con los valores del viento solar ambiente. Lo que no observaron para los eventos que no son nubes magnéticas.

Hasta ahora se sabe que las eyecciones de masa coronal se asocian con las nubes magnéticas, sin embargo no se sabe que es lo que determina su formación.

1.3.4 Eyectas complejas

Las eyecciones de masa coronal propagándose ya en el medio interplanetario (EMCI), se manifiestan como diferentes estructuras en los registros detectados por las naves espaciales y están asociadas con la actividad solar. En particular en la etapa de máxima actividad se observan muchos eventos en la superficie solar y en la corona, que al propagarse en el MI pueden presentarse como la interacción entre dos o más eyectas semejantes, o diferentes entre ellas. A este tipo de eventos se les ha llamado *eyectas complejas* (EC), pero como representan la interacción de varias estructuras se han definido de diversas maneras.

Por ejemplo, *Burlaga et al.* [2001] analizaron nueve eyectas complejas observadas a 1 UA por la nave ACE durante el periodo de la fase ascendente del ciclo solar 23, del 5 de febrero de 1998 al 29 de noviembre de 1999. Todas las eyectas complejas analizadas por *Burlaga et al.* a 1 UA son rápidas, ya que tienen velocidades de 600 km/s en adelante, y fueron divididas en dos grupos: el primer grupo contiene una estructura local que cumple con la de una nube magnética, como la que se presentó en la figura 1.8; adicionalmente las eyectas complejas de este grupo presentan un valor para β de 0.06 ± 0.04 , y contienen una concentración alta de partículas α , ($\alpha/p > 8-10\%$); de este tipo analizaron cuatro eventos.

El segundo grupo consiste en eyectas complejas que no contienen nubes magnéticas, sino son estructuras que tienen campos magnéticos débiles y temperaturas protónicas más altas que las que presentan las NM. El valor promedio para β en estas estructuras es de 0.25 ± 0.09 , más alta que la correspondiente para las eyectas complejas con NM; de este segundo tipo analizaron cinco eventos.

Para ambos grupos de eyectas complejas analizadas por *Burlaga et al.* [2001], existen dos características importantes: todas las eyectas complejas no presentan flujos corrotantes y tienen duraciones de más de un día al pasar cerca de la Tierra. Los flujos corrotantes los explicaremos más adelante.

La figura 1.10 muestra el registro de una eyecta compleja con NM (primer grupo). En ella se observa la estructura de una NM con un choque enfrente y una composición química de $O^{7+}/O^{6+} > 1$ y de $O^{7+}/O^{6+} > 0.7$, en el intervalo indicado por la barra horizontal sólida y por la barra horizontal punteada, respectivamente, en el último panel.

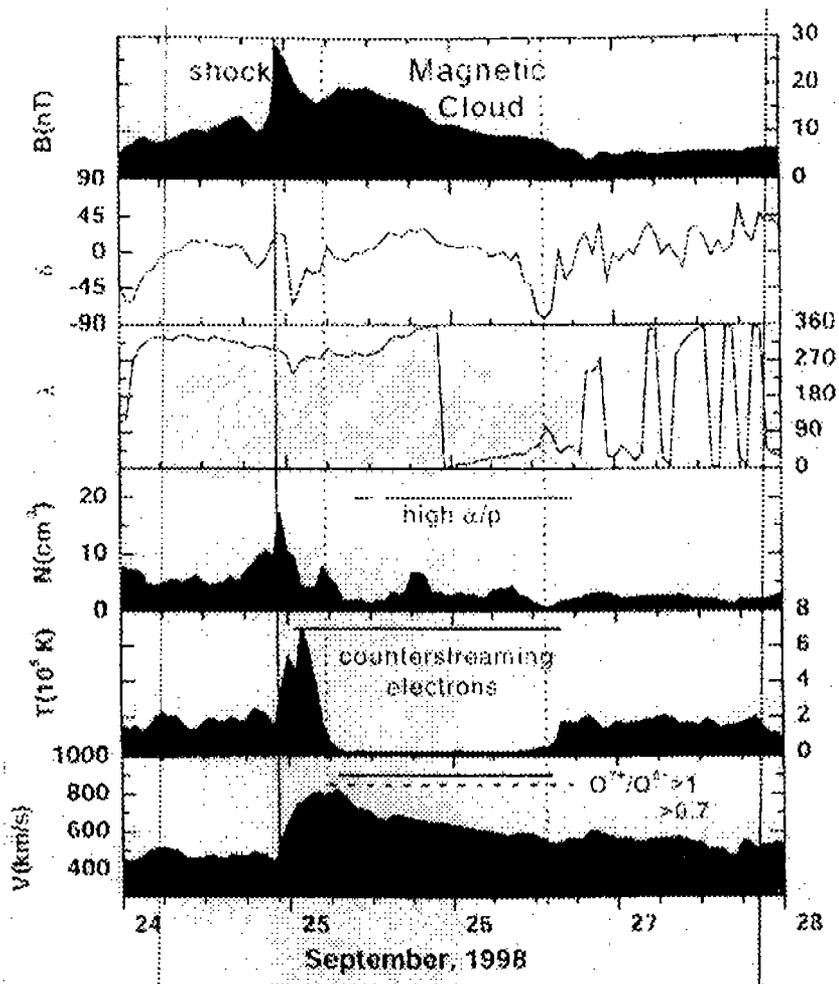


Figura 1.10 Ejemplo de una eyecta compleja con NM observada por la nave ACE del 24-28 de septiembre de 1998. La nube magnética tiene una velocidad máxima de más de 600 km/s. Del panel superior hacia abajo se muestra: la magnitud del campo magnético B (nT), el ángulo de elevación magnético δ , ángulo azimutal magnético λ , la densidad protónica N (cm^{-3}), temperatura protónica T (10^5 K) y la velocidad V (km/s). La estructura cumple con las características de una NM. La identificación de la concentración $\alpha/p > 8-10\%$ se muestra en el cuarto panel indicada por la línea horizontal. En el panel siguiente la barra horizontal sólida representa los flujos de electrones bidireccionales (counterstreaming electrons), que se encuentran localizados adentro de la NM, (Burlaga et al., 2001).

La figura 1.11 es el registro de una eyecta compleja sin NM (segundo grupo). La eyecta compleja en este registro tiene una onda de presión delantera (FPW, Forward Pressure Wave) indicada por la primera línea vertical punteada; también muestra un campo magnético B que varía, y tiene fluctuaciones tanto en el ángulo de elevación del campo magnético δ como en ángulo azimutal λ . Una característica de este grupo de eyectas complejas, es que presentan una concentración alta en partículas α , indicada en el cuarto panel por la barra continua horizontal. En el siguiente panel se muestra que en particular esta eyecta compleja presenta flujos de electrones bidireccionales, lo cual está indicado por las líneas horizontales continuas en el quinto panel. Finalmente en el último panel se observa una concentración alta en O^{7+} indicada por las barras horizontales punteadas.

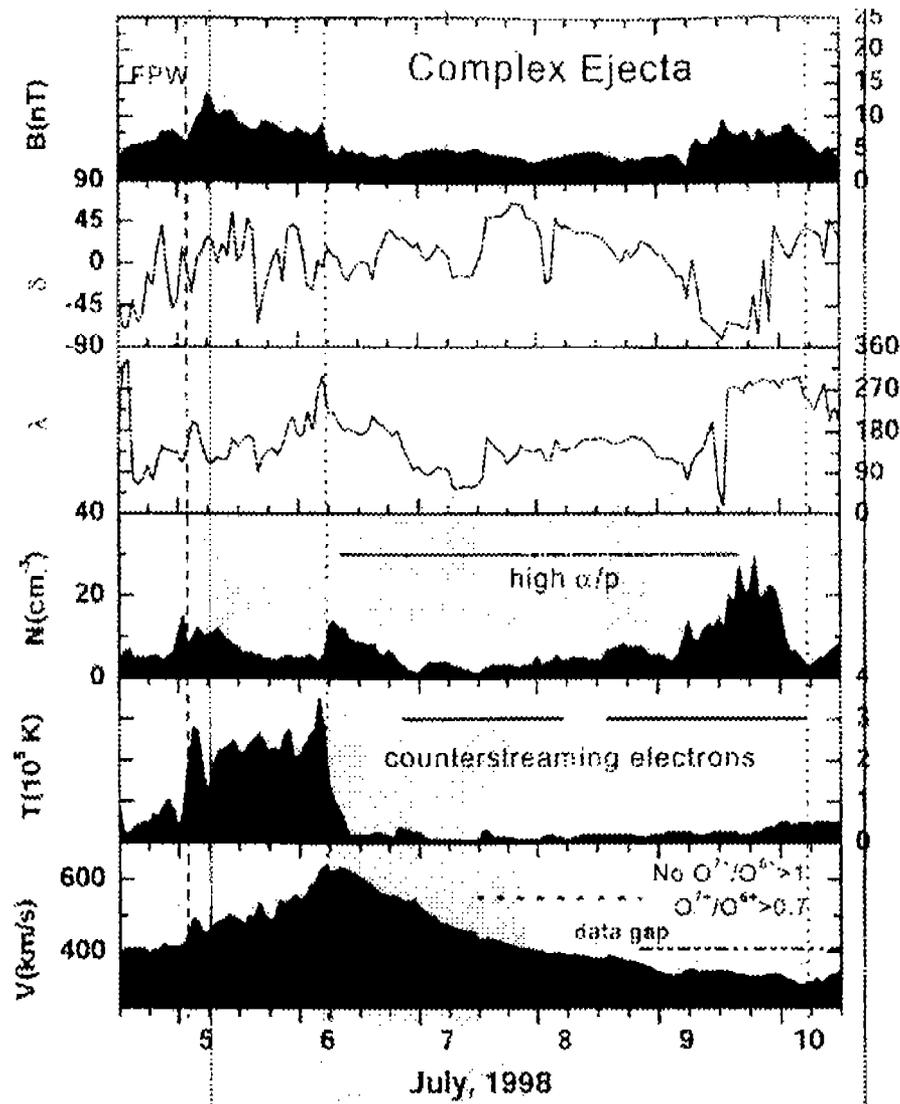


Figura 1.11 Ejemplo de una eyecta compleja sin NM registrada el 5 de julio de 1998 por la nave ACE. Del panel superior hacia abajo se muestran los parámetros: magnitud del campo magnético B (nT), ángulo de elevación del campo magnético δ , ángulo azimutal λ , densidad protónica N (cm^{-3}), temperatura protónica T (10^5 K), y la velocidad V (km/s). La eyecta compleja se encuentra delimitada por el segundo par de líneas punteadas. La identificación de concentración $\alpha/p > 8-10\%$ se muestra en el cuarto panel indicada por la línea horizontal. En el panel siguiente la barra horizontal sólida representa los flujos de electrones bidireccionales que se encuentran localizados adentro de la eyecta compleja, (Burlaga et al., 2001).

Por otro lado Wang et al. [2003] definen como eyecta compleja a los eventos que presentan nubes magnéticas múltiples (Multi-MC). En donde estas estructuras cumplen las siguientes 4 características:

- 1) consisten en varias nubes magnéticas y regiones de interacción entre ellas
- 2) cada "sub-nube" adentro de las nubes magnéticas múltiples satisfacen las propiedades de nube magnética, excepto que la temperatura no es tan baja, debido a la existencia de una compresión entre ellas
- 3) en los registros se observan incrementos en las velocidades, y
- 4) β se incrementa mucho en la región de interacción entre las "sub-nubes"

La figura 1.12 muestra el registro de uno de los eventos reportados por Wang et al. [2003], del 3 al 5 de marzo del 2001, el cual tuvo una duración de 20.5 hrs.

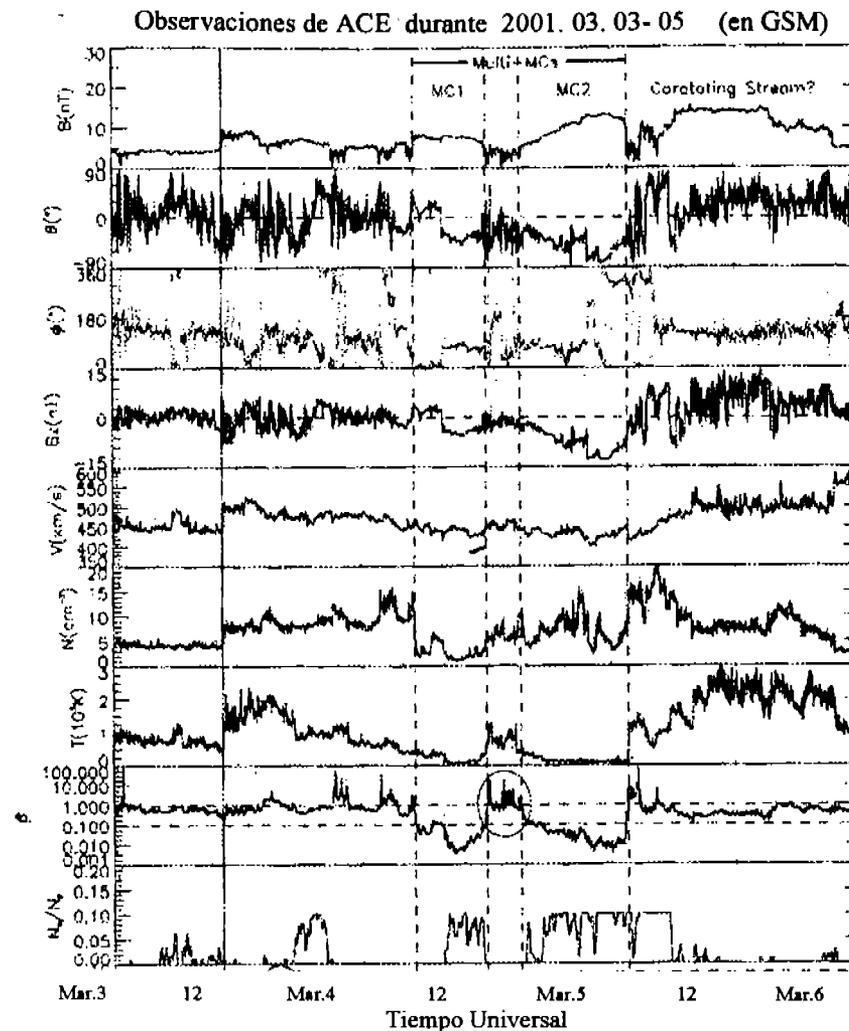


Figura 1.12 Observaciones de la nave espacial ACE del 3 al 5 de marzo de 2001. De arriba hacia abajo están graficados: la intensidad del campo magnético B (nT), el ángulo de elevación θ ($^{\circ}$) y el ángulo azimutal ϕ ($^{\circ}$), la componente z del campo magnético B_z (nT), la velocidad del viento solar V (km/s), la densidad protónica N (cm^{-3}), la temperatura de los protones T (10^5 K), la razón de la presión térmica entre la presión magnética (β), y la razón de la densidad de He^{++} entre la densidad de los protones (N_{α}/N_p), (Wang *et al.*, 2003).

Las eyectas complejas son en general los tipos de eventos en donde se tiene la interacción entre dos o más estructuras, semejantes o diferentes entre si. Y debido a que estas estructuras pueden formarse de diversas combinaciones; diferentes autores las han definido de maneras distintas.

Como vimos en los ejemplos anteriores ambos tipos de eventos de eyecta compleja definidas por Burlaga *et al.* [2001] y el evento de eyecta compleja de nubes magnéticas múltiples definida por Wang *et al.* [2003]; pertenecen a la familia de las eyectas complejas, en donde los tipos de eventos complejos resultan ser en general la combinación de varias firmas.

Otro evento de gran escala que con frecuencia se presenta en el medio interplanetario son los flujos corrotantes, los cuales se forman por la interacción entre dos flujos de viento solar con diferentes velocidades, es decir, un viento solar rápido alcanza a otro que tiene una velocidad menor formando así una zona de interacción con discontinuidades, ya que cuando la interacción ocurre se forma una región de compresión en el viento solar lento, la cual se caracteriza por tener un fuerte incremento en la densidad. Adicionalmente, como el viento solar rápido se caracteriza físicamente por tener una temperatura mayor, cuando interacciona éste con el viento solar lento se observa en la zona de interacción un notable incremento en la temperatura.

Actualmente los flujos corrotantes son un fenómeno de estudio debido a que conforme se alejan del Sol causan perturbaciones de gran escala en el MI, modificando así los valores del viento solar ambiente.

Sin embargo a diferencia de otras firmas que modifican los valores del viento solar ambiente, los flujos corrotantes no pertenecen al grupo de las eyectas.

1.4 Perturbaciones geomagnéticas

Como las eyectas fueron inicialmente postuladas para explicar las tormentas geomagnéticas, no es de sorprenderse que exista una literatura extensa en donde se explica la correlación entre las observaciones *in situ* de las eyectas y las tormentas geomagnéticas⁶, i.e., *Gonzalez et al.* [1987]; *Gosling et al.* [1991]; *Chen et al.* [1997]; *Webb et al.* [2000].

Las tormentas geomagnéticas son los mayores disturbios que puede sufrir la magnetosfera terrestre y ocurren cuando la orientación del campo magnético interplanetario tiene una dirección sur y se mantiene en esta dirección durante un largo tiempo. Esta interacción geoeffectiva se debe a una reconexión magnética en la nariz de la magnetosfera, la cual resulta del encuentro entre las líneas del campo magnético de la eyecta con una orientación sur y las líneas del campo magnético de la nariz de la magnetosfera, las cuales tienen una orientación norte. Como las orientaciones de las líneas son opuestas estas se reconectan y permiten que partículas provenientes del MI entren a la magnetosfera terrestre, provocando así un incremento de energía en la magnetosfera del planeta.

Durante la fase principal de una tormenta geomagnética, la cual puede durar entre dos o dos días y medio en el caso de tormentas severas, las partículas cargadas que están en la hoja de plasma (ver figura 1.13) se energizan y se mueven hacia regiones más profundas de la magnetosfera llegando así a los cinturones de radiación, ver figura 1.13. La llegada de estas partículas genera una corriente de anillo la cual contrarresta la intensidad del campo magnético terrestre, manifestándose como caídas en la intensidad del campo magnético terrestre (valores negativos). Esta fase está caracterizada porque en ella pueden ocurrir tormentas intensas produciendo efectos geomagnéticos.

Cuando el campo magnético interplanetario regresa a una dirección norte o positiva, el plasma en los cinturones de radiación se restablece para entrar en un estado quieto.

En el caso de tormentas extremas, como la que ocurrió el 6 de febrero de 1986, los cinturones de radiación y por lo tanto la corriente de anillo, pueden llevarse casi un mes para regresar por completo a su estado quieto.

⁶ Perturbaciones en el campo magnético terrestre

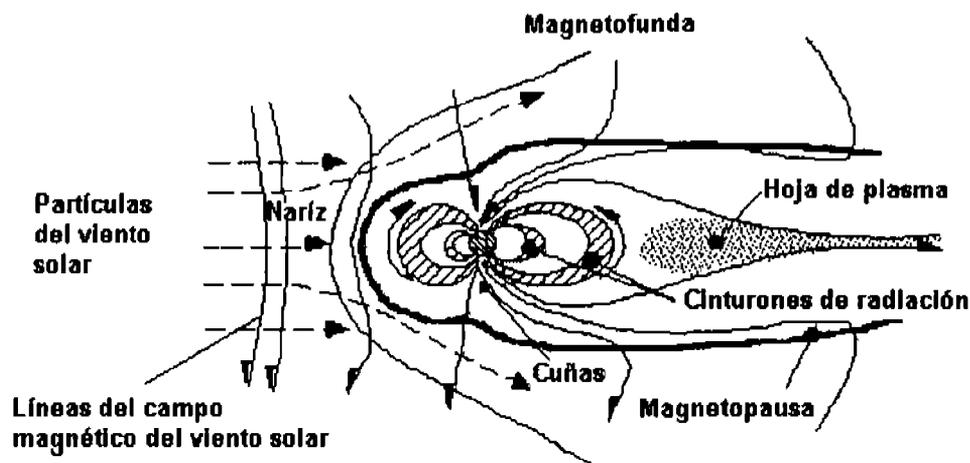


Figura 1.13 La magnetosfera terrestre. Como muestra esta figura, la magnetosfera tiene varias regiones las cuales pueden tener dinámicas muy complicadas.

El incremento en la actividad de la magnetosfera durante la fase principal de la tormenta geomagnética, es usualmente precedida por un breve incremento en la intensidad del campo magnético de la magnetosfera, el cual se observa en los registros de las naves que se encuentran en las cercanías de la Tierra. Este incremento en la magnitud del campo magnético es provocado por una intensificación de la presión que ejerce el viento solar sobre la magnetopausa⁷, esta compresión llega a medir hasta cuatro radios terrestres de la nariz de la magnetopausa (ver figura 1.13) hacia adentro, y marca el comienzo de la fase inicial de la tormenta geomagnética.

Uno de los índices más utilizado para determinar la intensidad de las tormentas geomagnéticas es el índice Dst, i.e., *Burton et al.* [1975], *Wu et al.* [2002], *Wang et al.* [2003]. Este índice mide las variaciones de la componente H del campo geomagnético a nivel global la cual se reporta cada hora y se calcula con los datos de las estaciones terrestres que se encuentran en latitudes medias y bajas.

La tabla 2 muestra la geoelectividad correspondiente a los intervalos de actividad geomagnética del índice Dst.

La intensidad de la perturbación geomagnética provocada por una eyecta, depende de cómo ésta colapsa a la magnetosfera terrestre. Por ejemplo *Dungey* [1961] y *Watari et al.* [2004], mostraron que la presencia de un viento solar rápido y una componente fuerte en la dirección sur del campo magnético (B_z) de la eyecta, son particularmente efectivos para producir una actividad geomagnética significativa.

Es importante notar que cada nube magnética que contenga una componente B_z sur fuerte en su estructura magnética, causa decrementos en el Dst mayores que los choques

⁷ Frontera entre el viento solar y la magnetosfera

u otras eyectas que no sean nubes magnéticas; dependiendo también de su velocidad y de la duración de interacción con el entorno geomagnético (*Burlaga et al.*, 1987, *Zhang y Burlaga* 1988, *Webb et al.*, 2000).

Tabla 2. Tormenta geomagnética

Índice Dst (nT)	Perturbación geomagnética
Dst > -20	baja intensidad
-20 > Dst > -50	media intensidad
-50 > Dst > -100	alta intensidad
Dst < -100	extrema intensidad

1.5 Misiones espaciales

Antes de mencionar con que nave espacial hemos realizado el estudio de este trabajo, queremos hacer una breve descripción de las misiones que actualmente se encuentran operando, principalmente porque esto nos da una idea de las aplicaciones que se les han encomendado a las diferentes misiones.

CLUSTER⁸ es una misión constituida por una red de satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA), dedicada al estudio de la magnetosfera terrestre y a la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre.

ULYSSES⁹ es una sonda también de la ESA y estudia la componente de la velocidad del viento solar en un sistema de coordenadas heliocéntricas. Las coordenadas heliocéntricas consideran al Sol como el origen de las coordenadas las cuales quedan fuera del plano de la eclíptica.

Dentro de las colaboraciones internacionales existe un programa dedicado al estudio de la física de la interacción Sol-Tierra, llamado ISTP¹⁰ (International Solar Terrestrial Physics). En este programa existe el proyecto POLAR¹¹ el cual está dedicado al monitoreo de las cuñas magnéticas terrestres y a la interacción de la atmósfera terrestre con el viento solar.

Actualmente existen diversos programas dedicados al estudio del conocimiento del sistema Sol-Tierra, en particular el programa LWS¹² (Living With a Star) de la NASA está dedicado a conocer y a entender cuales son las actividades solares que influyen en la vida terrestre como en la actividad humana en el espacio.

⁸ <http://sci.esa.int/home/cluster>

⁹ <http://sci.esa.int/home/ulysses>

¹⁰ <http://istp.gsfc.nasa.gov>

¹¹ <http://istp.gsfc.nasa.gov/istp/polar/>

¹² <http://lws.gsfc.nasa.gov/>

Por otro lado podemos observar a la superficie solar en diferentes longitudes de onda gracias a que los instrumentos abordo de las naves espaciales se han diseñado con este fin.

Por ejemplo SOHO¹³ (Solar and Heliospheric Observatory) la cual es una de las misiones más conocidas y utilizadas por los científicos que investigan actualmente al Sol, proporciona información en diferentes longitudes de onda como en radio, ultravioleta, extremo ultravioleta, rayos X, etc., con las cuales podemos investigar sobre la estructura interna del Sol, la atmósfera solar, y el origen del viento solar.

De manera adicional a las misiones que observan al medio interplanetario existen dos misiones espaciales de suma importancia llamadas WIND y ACE¹⁴, ubicadas en las cercanías de la Tierra.

Dentro del programa ISTP, la nave WIND¹⁵ realiza mediciones del plasma, de las partículas provenientes del Sol, y del campo magnético interplanetario. También la misión espacial ACE (Advanced Composition Explorer) está dentro del programa ISTP y se encarga de monitorear el ambiente espacial en la cercanías de la Tierra, en particular estudia la composición química de los elementos provenientes del Sol.

En general ambas misiones proporcionan información sobre las características del viento solar a 1 UA. La información registrada por las naves está relacionada con el viento solar que se encuentra en el lado día de la Tierra. Esto es interesante porque al estar monitoreando continuamente al MI estas naves nos dan información de las características promedio del viento solar y de la llegada de una eyección de masa coronal cerca de la magnetosfera terrestre, para así posteriormente relacionarlas con las perturbaciones que existen a nivel geomagnético.

1.6 Descripción y motivación de la tesis

En este trabajo la nave espacial con la que trabajamos es WIND, la cual está ubicada prácticamente a 1 UA del Sol, a 1.5×10^6 km, es decir, muy cerca de la Tierra; y su orientación de observación está dirigida hacia al Sol.

La ubicación de la nave WIND es prácticamente fija ya que se encuentra en un punto en donde la fuerza de atracción entre el Sol, la Tierra y la Luna se anula; este punto se llama punto de Lagrange 1 o simplemente L1.

Con los datos de la nave WIND estudiamos las características de 53 nubes magnéticas con o sin helio observadas durante los años 1996 a 2002 y analizamos su asociación con eventos solares tales como eyecciones de masa coronal y ráfagas solares.

Una de las características importantes de las NM es que algunas de ellas al llegar a la Tierra alteran al entorno geomagnético, ya que se caracterizan por tener un campo magnético incrementado y bien ordenado; por lo que se convierten en buenas candidatas para estudiar su geoefectividad.

¹³ <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

¹⁴ <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>

¹⁵ <http://istp.gsfc.nasa.gov/istp/wind/>

Algunas NM se propagan en el MI muy lentamente y no forman un choque, sin embargo pueden interactuar con la magnetosfera terrestre causando tormentas geomagnéticas ($Dst < -20$ nT).

Por el contrario algunas NM viajan más rápido que el viento solar ambiente y forman un choque enfrente de ellas. Entre el choque y la parte delantera de la NM se forma una *funda*.

En la mayoría de los casos las tormentas geomagnéticas son provocadas por la interacción de eyectas con un largo tiempo en la configuración Bz sur, como sería el caso de las NM, sin embargo no siempre estos eventos causan un decremento significativo en el índice Dst, el cual puede ser generado por regiones más cortas que se forman alrededor de las eyectas, como las regiones de las *fundas* que estudiamos en este trabajo. Por lo que estudiamos las variaciones en el índice Dst provocadas por la región de las *fundas*.

Finalmente en este trabajo al estudiar la interacción de las NM y las *fundas* con la magnetosfera terrestre queremos cuantificar los decrementos del índice Dst provocados por estas regiones.

Capítulo 2

2.1 Características de nubes magnéticas observadas a 1 UA por la nave WIND

El poder identificar y estudiar a las eyectas con los avances aeroespaciales nos da la oportunidad de comprender más al espacio que nos rodea y entender más a los fenómenos físicos que ocurren en él. Por ello en este capítulo mostramos el análisis que llevamos a cabo para conocer las características de las nubes magnéticas a 1 UA.

Uno de los fenómenos a nivel terrestre que se relaciona con la interacción entre los plasmas espaciales y la magnetosfera son las tormentas geomagnéticas.

Estas tormentas resultan de una interacción muy interesante, ya que diversos procesos físicos y químicos ocurren en ella.

Por otro lado esta interacción juega un papel importante en la vida humana, debido a que actualmente dependemos tecnológicamente de las telecomunicaciones y las tormentas geomagnéticas alteran al entorno magnético terrestre, del cual las telecomunicaciones dependen fuertemente. Así en este trabajo también estudiamos la interacción geomagnética de las NM.

Como mencionamos anteriormente, los niveles de ionización del material en el viento solar nos permiten separar a las eyectas del viento solar ambiente y conocer sus características. En este trabajo incluimos un análisis relacionado con la composición del plasma $\text{He}^{++}/\text{H}^+$. El viento solar ambiente tiene concentraciones de $\text{He}^{++}/\text{H}^+ < 0.08$ por lo que consideramos valores de $\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08$ para las NM.

La tabla 3 muestra los valores del viento solar para las 53 NM que analizamos en este trabajo. Las cuatro primeras columnas muestran: el # de evento, el inicio y el final de las NM, y la duración de las NM. En la quinta y sexta columna se muestra el valor de la velocidad máxima ($V_{\text{máxNM}}$) y la velocidad total de las NM (V_{totalNM}). En la séptima columna está la magnitud del campo magnético de las NM (B). En las dos columnas siguientes el número uno indica si las NM presentaron concentraciones de $\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08$ adentro de ellas, o si el viento solar afuera de las NM presenta una concentración $\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08$. Finalmente en la última columna tenemos el valor del índice Dst.

Los valores de la magnitud del campo magnético y el del índice Dst son los reportados por *Cane y Richardson* [2003].

Tabla 3. Nubes magnéticas observadas a 1 UA por la nave WIND de 1996 al 2002.

# Evento	Inicio NM día/mes/hora	Final NM día/mes/hora	Δt_{NM} (horas)	$V_{\text{máxNM}}$ (km/s)	V_{totalNM} (km/s)	B^c (nT)	He^a adentro de la NM	He^b afuera de la NM	Dst^c (nT)
1996									
1	27 05 1500	29 05 0000	33 hrs	415	370	9	0	0	-33
2	01 07 1800	02 07 1100	21:40min	365	360	10	0	0	-20
3	07 08 1300	08 08 1000	21 hrs	360	350	7	0	0	-23
4	23 12 1700	25 12 1000	41 hrs	430	360	10	1	0	-18
1997									
5	10 01 0400	11 01 0200	22 hrs	480	450	14	0	0	-78

Tabla 3 (continuación)

# Evento	Inicio NM día/mes/hora	Final NM día/mes/hora	Δt_{NM}	$V_{máxNM}$ (km/s)	$V_{totalNM}$ (km/s)	B^b (nT)	He ^a adentro de la NM	He ^a afuera de la NM	Dst ^b (nT)
6	10 02 0200	11 02 0245	24:45min	575	510	8	0	0	-68
7	21 04 1000	23 04 0300	41 hrs	425	370	12	1	0	-107
8	15 05 0900	16 05 1200	27 hrs	520	460	23	1	0	-115
9	08 06 1800	10 06 0000	30 hrs	395	370	12	0	0	-84
10	19 06 0700	20 06 2300	40 hrs	375	340	8	0	0	-36
11	15 07 0800	16 07 1100	27 hrs	375	360	12	0	0	-45
12	03 08 1300	04 08 0300	14 hrs	480	450	16	0	0	-48
13	17 09 1600	18 09 2300	31 hrs	365	350	8	0	1	-45
14	21 09 2100	22 09 1600	19 hrs	480	430	20	1	1	-36
15	01 10 1600	02 10 2300	31 hrs	475	460	10	0	0	-98
16	10 10 2200	12 10 0000	42 hrs	430	400	12	0	0	-130
17	07 11 0400	09 11 0000	44 hrs	460	420	15	1	0	-110
18	22 11 1500	23 11 1400	28:11min	520	500	17	1	0	-108
1998									
19	07 01 0100	08 01 2200	45 hrs	410	395	16	1	0	-83
20	04 02 0400	05 02 2300	43 hrs	375	340	11	1	0	-50
21	04 03 1300	06 03 0900	44 hrs	390	350	12	1	1	-56
22	02 05 0500	03 05 1700	36 hrs	650	600	10	1	1	-100
23	02 06 1000	02 06 2100	11 hrs	410	400	11	0	0	-14
24	24 06 1300	25 06 2100	32 hrs	530	470	13	1	0	-33
25	20 08 0600	21 08 2000	38 hrs	340	310	14	0	0	-86
26	25 09 0600	26 09 1600	34 hrs	850	600	20	1	1	-234
27	19 10 0400	20 10 0700	27 hrs	420	390	18	0	0	-139
28	08 11 1900	10 11 0600	35 hrs	530	480	12	1	0	-148
1999									
29	18 02 1600	20 02 1200	44 hrs	670	570	8	1	0	-134
30	16 04 1800	17 04 1900	25 hrs	455	425	20	1	0	-105
31	09 08 0930	10 08 1430	29 hrs	380	350	9	1	0	-62
2000									
32	21 02 0500	22 02 1400	33 hrs	450	410	16	1	1	-20
33	15 07 1900	17 07 0800	37 hrs	1025	850	20	1	1	-300
34	28 07 1200	29 07 1400	26 hrs	480	470	10	1	1	-74
35	12 08 0500	13 08 2200	41 hrs	670	600	16	1	1	-237
36	03 10 1000	05 10 0300	41 hrs	440	410	14	1	1	-146
37	13 10 0800	14 10 1700	33 hrs	470	420	13	1	0	-110
38	28 10 2100	29 10 2200	25 hrs	415	390	14	0	1	-113
39	06 11 2200	08 11 0300	29 hrs	590	520	20	0	0	-159
2001									
40	19 03 1930	21 03 0330	32 hrs	460	410	17	1	0	-165
41	11 04 2200	13 04 0700	33 hrs	720	680	14	1	0	-257
42	21 04 2300	23 04 0800	33 hrs	380	360	11	0	0	-104
43	28 04 1400	01 05 0200	36 hrs	700	560	8	1	1	-33
44	28 05 0300	29 05 2100	42 hrs	560	430	8	1	1	-39
45	31 10 1800	02 11 1200	42 hrs	385	346	11	1	0	-97
46	24 11 1400	26 11 1100	45 hrs	1020	660	12	1	1	-213
2002									
47	19 03 0500	20 03 1600	35 hrs	570	440	15	1	0	-41
48	23 03 2100	25 03 2000	47 hrs	500	460	15	1	0	-101
49	20 04 000	21 04 1800	42 hrs	650	550	8	1	0	-152
50	23 05 2000	25 05 1800	46 hrs	840	630	11	0	0	-108
51	01 08 0900	01 08 2300	14 hrs	460	450	12	1	1	-46
52	03 10 0100	04 10 1800	41 hrs	500	460	11	1	1	-13
53	17 11 1000	19 11 0100	39 hrs	460	420	8	0	1	-24

^a He⁺⁺/H⁺ ≥ 0.08 adentro de la NM y/o afuera de la NM, ^bB (nT) y Dst (nT) reportados por Cane y Richardson [2003].

La figura 2.1 es el registro del evento correspondiente al #16 de la tabla anterior. La cual es una NM observada por la nave WIND, y en ella se muestra del panel superior hacia abajo: la intensidad del campo magnético total B , la latitud angular (que nos indica la rotación), la temperatura protónica T , la densidad de protones D , la velocidad V , la razón $\text{He}^{++}/\text{H}^+$, la presión P , y la β del plasma (presión térmica entre presión magnética).

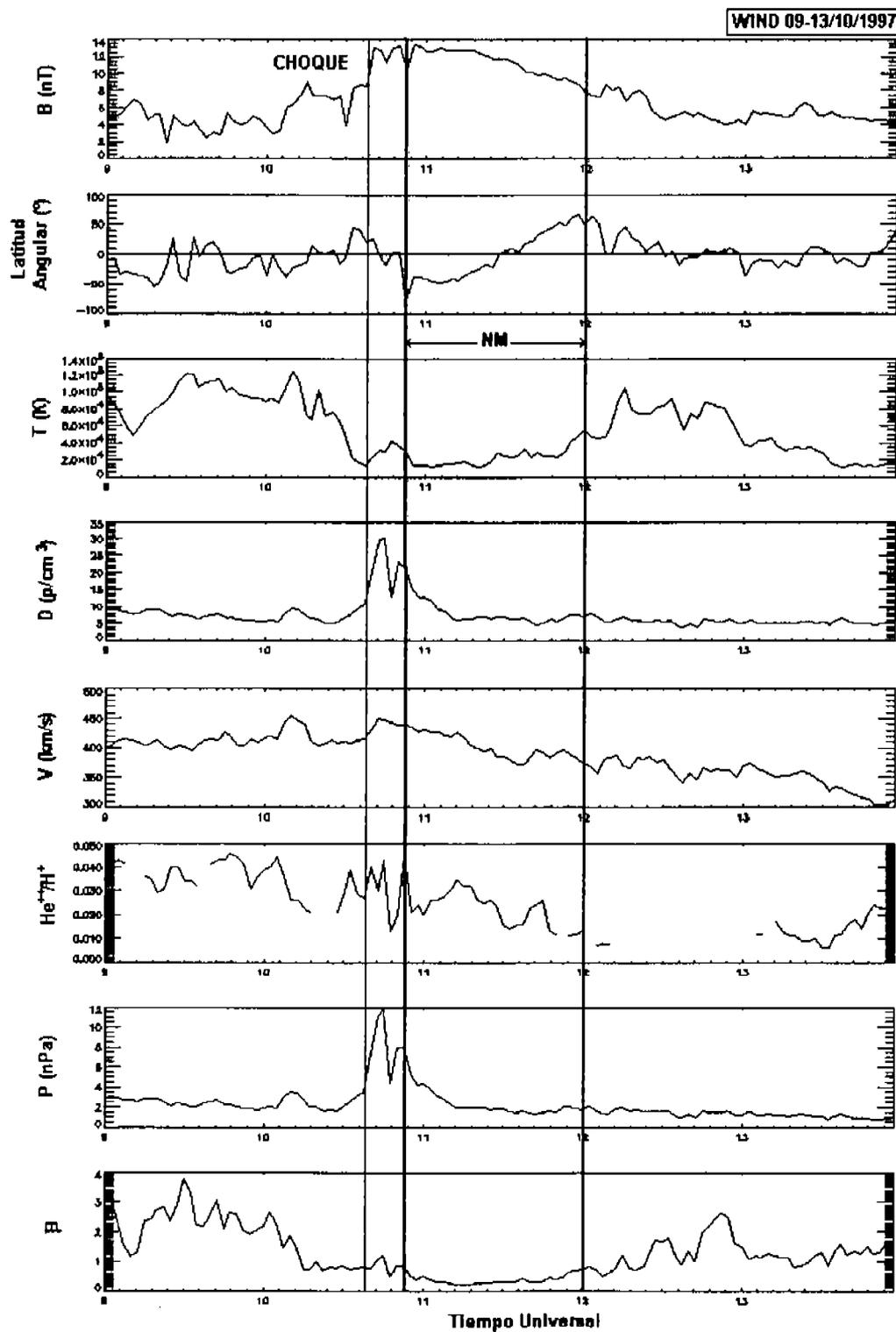


Figura 2.1 Registro elaborado de la información¹⁶ obtenida de la nave WIND del 9 al 13 de octubre de 1997. Del panel superior hacia abajo se muestra: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad (km/s), la razón de densidad de partículas α entre la protónica (He^{++}/H^+), la presión (nPa), y la β del plasma (presión térmica entre presión magnética). La estructura de la NM se observa en los tres primeros paneles, la cual está delimitada por las barras verticales gruesas. La NM tiene un choque en la parte delantera representado en la figura por la primera línea vertical.

Los criterios para considerar los límites de las NM fueron:

- 1) una magnitud del campo magnético B (nT) mayor al del viento solar ambiente
- 2) una rotación suave del campo magnético, y
- 3) un decremento en la temperatura

Con los datos de la nave espacial WIND encontramos 36 nubes magnéticas en el periodo de 1996 al 2002. Para estos eventos no consideramos la concentración de helio $He^{++}/H^+ \geq 0.08$ afuera de las NM, ya que esto lo consideraremos en la sección 2.2 para las eyecciones complejas.

Para estudiar las características de las 36 NM en función de su velocidad, las analizamos como nubes magnéticas lentas ($V_{máxNM} < 600$ km/s) y rápidas ($V_{máxNM} \geq 600$ km/s), sin tomar en cuenta la concentración de helio.

Posteriormente analizamos a las NM lentas y rápidas considerando la abundancia de helio ($He^{++}/H^+ \geq 0.08$) adentro de ellas, en los siguientes dos grupos:

- 1) nubes magnéticas lentas con y sin helio adentro de la NM (32 eventos)
- 2) nubes magnéticas rápidas con y sin helio adentro de la NM (4 eventos)

2.1.1 Características de nubes magnéticas lentas y rápidas

La figura 2.2 muestra el histograma de la magnitud del campo magnético B (nT) y el de la duración para las NM lentas y rápidas. Al comparar a las NM lentas (32 eventos) con las rápidas (4 eventos) encontramos que el valor para la magnitud del campo magnético no excede el valor de 15 nT para las NM rápidas, sin embargo, el número de NM rápidas es muy pequeño.

En la duración el 100% de las NM rápidas resultan tener duraciones mayores a 30 horas; mientras que 13 de las NM lentas (41% de los 32), resultan tener duraciones menores a 30 horas.

¹⁶ La información se encuentra de forma accesible en la página: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb>

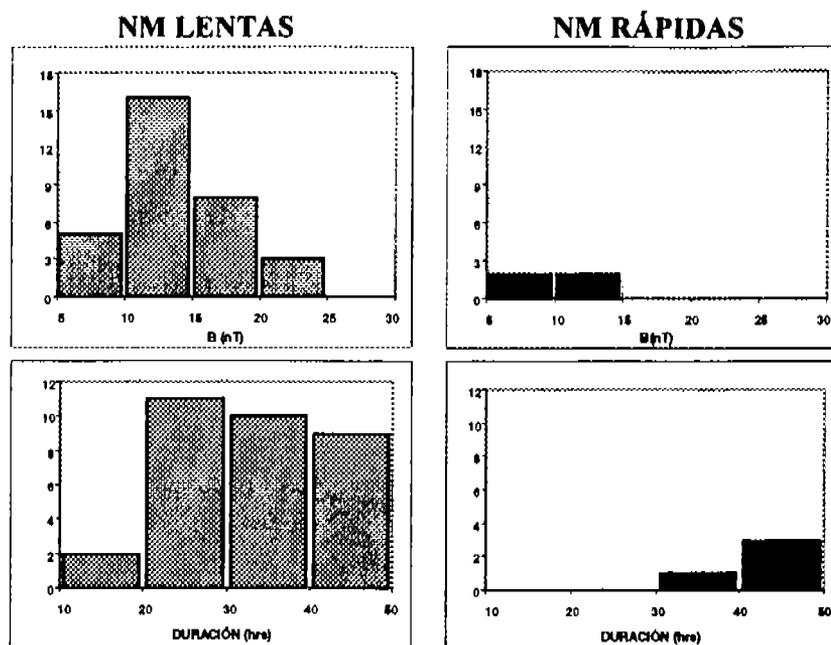


Figura 2.2 Histogramas del campo magnético B (nT) y de la duración de las eyecciones al pasar por la nave espacial WIND Vs # eventos. Las figuras del lado izquierdo corresponden a las NM lentas y las del lado derecho a las NM rápidas

La actividad geomagnética está muy relacionada con cambios en el MI, sobre todo con el campo magnético de este (CMI) y con la velocidad del viento solar (*Wu et al.*, 2002) ya que el campo magnético terrestre se ve alterado cuando el CMI tiene una dirección sur en la componente z (B_z), en coordenadas GSM¹⁷ (ver figura 2.3). Si además la velocidad del viento solar es alta, esto favorecerá más aún la perturbación, ya que ayuda a comprimir a la magnetosfera terrestre.

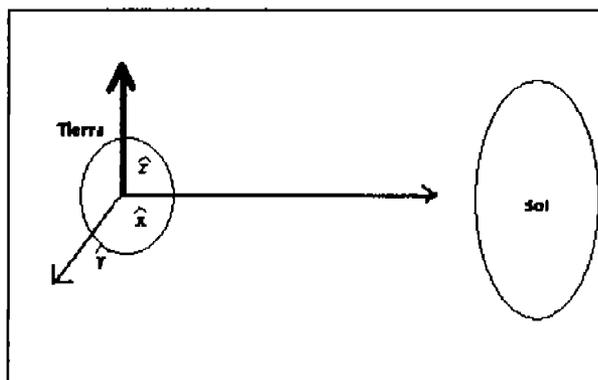


Figura 2.3 Esquema de las coordenadas GSM. El origen del sistema coordenado tridimensional está en la Tierra. La dirección x está en la dirección Tierra-Sol, la dirección z es un eje paralelo al eje bipolar terrestre, y y completa el sistema.

¹⁷ Coordenadas GSM (Geocentric Solar Magnetospheric)

En particular las NM pueden alterar al entorno geomagnético debido a que su campo magnético puede tener una componente Bz sur, favoreciendo así una perturbación geomagnética. Además, hay que considerar que la combinación de una componente Bz sur y una velocidad alta en la NM, está asociada muy frecuentemente con tormentas geomagnéticas (Burlaga et al., 1987, Zhang y Burlaga., 1988, y Webb et al., 2000).

En este trabajo el índice que utilizamos para medir la perturbación geomagnética es el Dst, el cual es representativo de las perturbaciones que sufre el entorno magnético terrestre (Burton et al., 1975 y Wang et al., 2003).

La figura 2.4 muestra los histogramas del índice Dst asociado al paso de las NM lentas y rápidas, y al analizar la geoeffectividad de las 36 NM encontramos que las NM rápidas son más geoefectivas que las NM lentas, este último resultado está de acuerdo con trabajos anteriores (Farrugia et al., 2002).

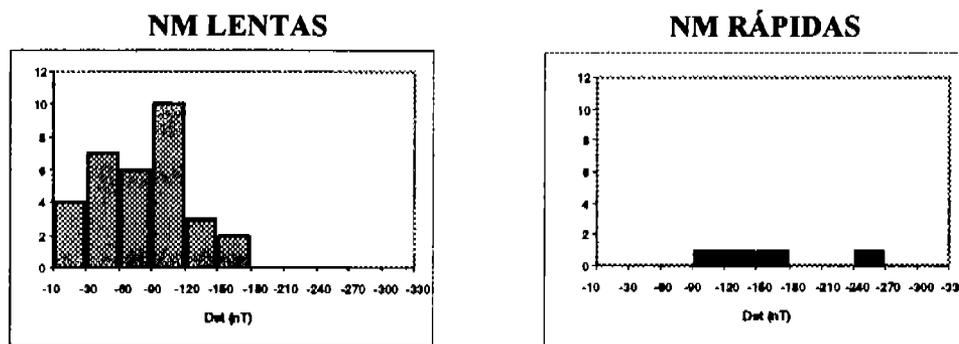


Figura 2.4 Histograma del índice Dst de las NM lentas (izquierda) y de las NM rápidas (derecha), Vs # eventos. Los histogramas muestran que las NM rápidas son más geoeffectivas que las NM lentas, ver tabla 2.

Como mencionamos anteriormente en ocasiones las eyectas presentan material con diferente composición a la del viento solar ambiente, en particular en este trabajo analizamos las concentraciones de $\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08 = 8\%$ adentro de las nubes magnéticas. Cabe mencionar que esta concentración de helio no es en toda la NM, sino que puede presentarse en intervalos más cortos que la duración de las NM.

2.1.2 Nubes magnéticas lentas con y sin helio

Para estudiar si existen diferencias en las características de las NM con y sin helio, separamos a las NM con helio adentro de ellas, de las NM que no presentan concentraciones de helio mayores al 8% adentro de ellas. Aplicamos esta división para cada uno de los dos grupos de NM lentas y rápidas.

Al analizar los resultados de las 32 NM lentas ($V_{\text{máxNM}} < 600 \text{ km/s}$) encontramos que el 50% de ellas tienen concentraciones de helio adentro de la NM mayores al 8%, y el otro 50% de estos eventos no contienen concentraciones de helio mayores al 8%.

La figura 2.4 muestra la duración, la velocidad y la geoeffectividad (índice Dst) para NM lentas con y sin helio. En donde encontramos que la moda¹⁸ de la duración correspondiente a las NM lentas con helio adentro de la nube, es mayor que la que está asociada con las NM lentas sin helio adentro de la nube.

De manera análoga, la moda de la velocidad de las NM lentas con helio resulta ser mayor que la de las NM que no contienen helio. Como la velocidad es un parámetro que contribuye en parte para que la eyecta perturbe al entorno geomagnético de una manera efectiva; ya que es necesario tener previamente una configuración Bz sur, para que ocurra la reconexión magnética (Dungey 1961 y Watari et al., 2004); la moda del índice Dst de las NM lentas con helio, resulta ser mayor en comparación con la correspondiente a las NM lentas sin helio.

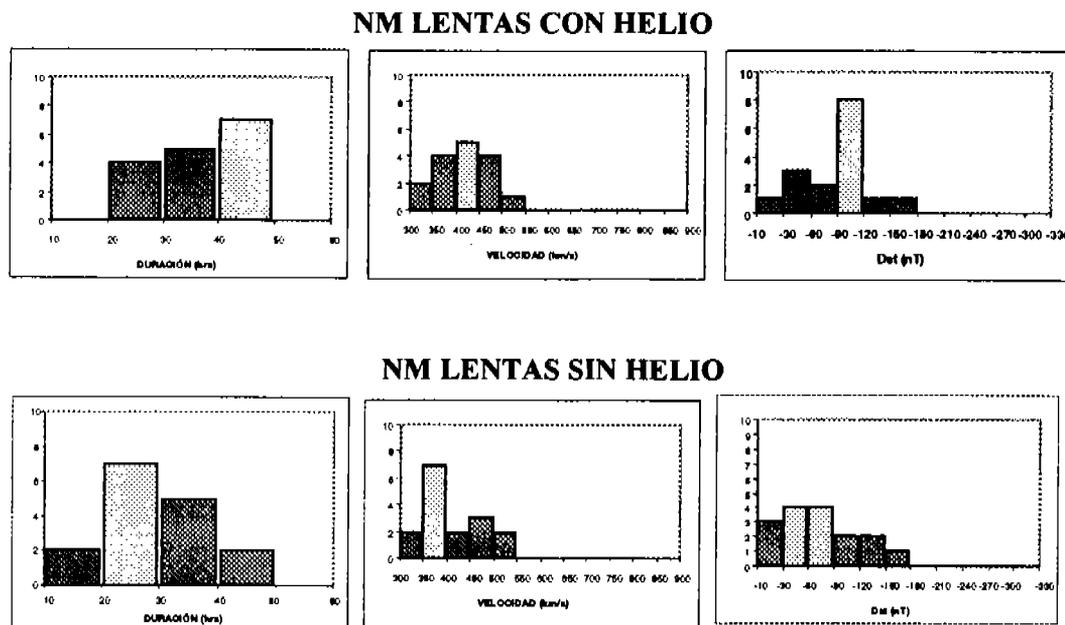


Figura 2.4 Histogramas de las NM lentas con helio (arriba) y NM lentas sin helio (abajo). De izquierda a derecha se muestra la duración en horas, la velocidad (km/s) y el índice geomagnético Dst (nT), contra el # de eventos. La moda de los diferentes parámetros está indicada por la barra más pálida.

Los histogramas muestran que las NM lentas con helio duran más, son más veloces y por lo tanto son más geoeffectivas que las NM lentas sin helio.

2.1.3 Nubes magnéticas rápidas con y sin helio

Para el análisis de las NM rápidas estudiamos 4 eventos de los cuales el 75% contienen concentraciones de helio mayores al 8% ($\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08$) adentro de la NM. Debido a que sólo contamos con un evento de NM rápida sin helio adentro de la nube magnética, no es posible hacer una comparación entre los histogramas, ver figura 2.5. Sin embargo esto nos indica que existe una tendencia de las NM rápidas a estar relacionadas con concentraciones de helio mayores al 8%; lo que nos sugiere que estas NM contienen plasma de la corona baja debido probablemente a que una EMC muy energética abrió el

¹⁸ El dato que más se repite en la muestra

campo de la corona baja en donde hay mayores concentraciones de material más pesado como es el caso del helio; y trajo consigo material de esta región saliendo con velocidades muy altas. Como consecuencia esto está de acuerdo con el resultado que en nuestra muestra las NM con helio tienden a ser más veloces que las NM sin helio.

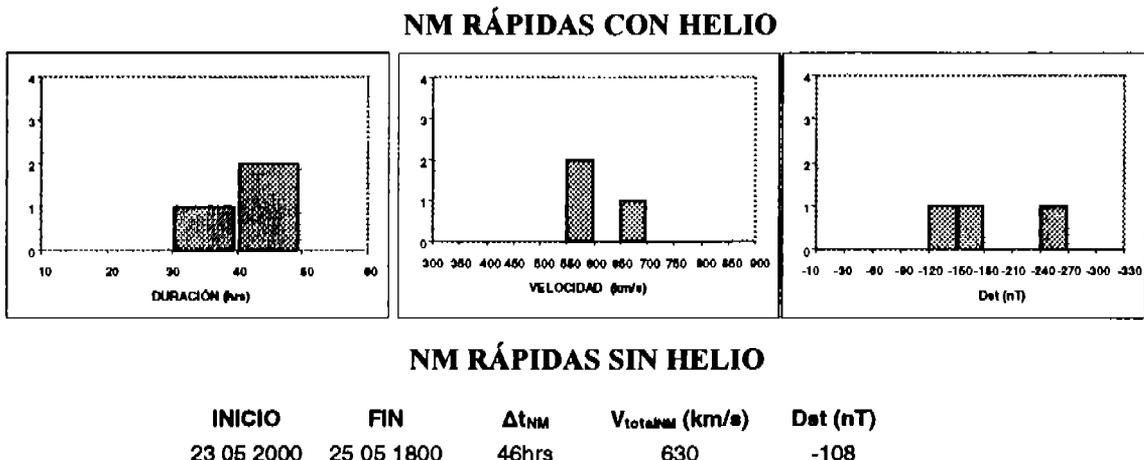


Figura 2.5 Histogramas de las NM rápidas con helio (arriba) y los valores del único evento de NM rápida sin helio (abajo). En los histogramas se muestra de izquierda a derecha la duración (hr), la velocidad (km/s) y el índice geomagnético Dst, contra el número de eventos. En las dos primeras columnas de la tabla se muestra el inicio y el final del evento (día/ mes/ año), así como la duración (hrs), la velocidad total (km/s), y el índice Dst (nT). De estos datos observamos que las NM rápidas están más relacionadas con concentraciones $He^{++}/H^+ \geq 0.08$.

Debido a que tenemos pocas nubes magnéticas rápidas, la estadística es muy pobre y por lo tanto no podemos hacer una comparación como la que hicimos para las NM lentas. Pero lo que si nos muestran las NM rápidas es que tienden a estar relacionadas con concentraciones de helio mayores al 8%, sugiriéndonos así que vienen de eventos más energéticos de la corona.

2.2 Eyectas complejas

Adicionalmente consideramos 17 eventos en el análisis, que consisten de una estructura de NM seguida de plasma con enriquecimiento de helio ($He^{++}/H^+ \geq 0.08$), en donde el 60% de ellas están separadas de las NM en un rango no mayor a 6 horas. A cada una de estas estructuras es lo que definimos como eyecta compleja (EC).

De manera análoga para facilitar el análisis, primero analizamos a los 17 eventos y posteriormente hicimos los siguientes dos grupos:

- 1) eyectas complejas lentas ($V_{máxNM} < 600$ km/s) con y sin helio adentro de la NM (11 eventos), y
- 2) eyectas complejas rápidas ($V_{máxNM} \geq 600$ km/s) con y sin helio adentro de la NM (6 eventos)

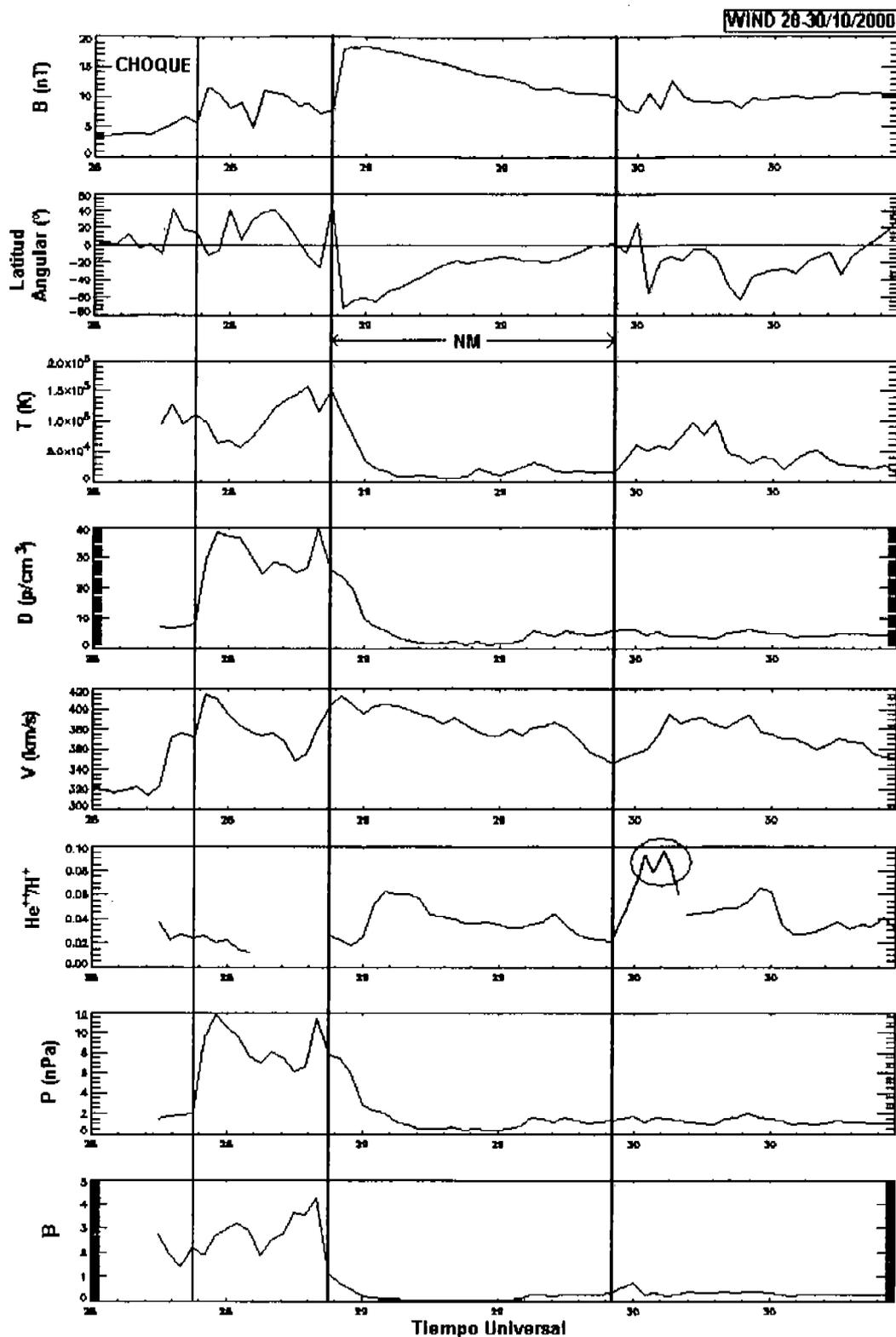


Figura 2.6 Registro de una eyecta compleja detectada por la nave WIND del 28 al 30 de octubre del 2000. La EC está definida como una NM seguida de una firma con incremento en concentración de He^{++} respecto a la concentración de H^+ ($\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 0.08$). Del panel superior hacia abajo se muestran los mismos parámetros de la figura 2.1. La NM está delimitada por las líneas verticales gruesas y la firma de plasma con enriquecimiento en helio se encuentra encerrada en un círculo en el sexto panel. Ambas estructuras pertenecen a lo que definimos como una eyecta compleja. Observa que hay un choque el cual está indicado por la primera línea vertical.

2.2.1 Eyectas complejas lentas y rápidas

La figura 2.6 muestra el registro de una EC formada por una NM seguida de un plasma con concentraciones $\text{He}^{++}/\text{H}^{+} \geq 0.08$. Esta figura es semejante a los registros que se obtuvieron para las eyectas complejas restantes, y el formato de los registros es el mismo que se mostró en la figura 2.1.

En el análisis las eyectas complejas rápidas (35% de los 17 eventos totales) resultan ser más geoefectivas que las eyectas complejas lentas (65% de los 17 eventos), y tener duraciones mayores a 30 horas, esta información se encuentra en la figura 2.7, en donde la velocidad y las duraciones son los valores de las NM y no los valores para viento solar con enriquecimiento en helio detrás de las NM.

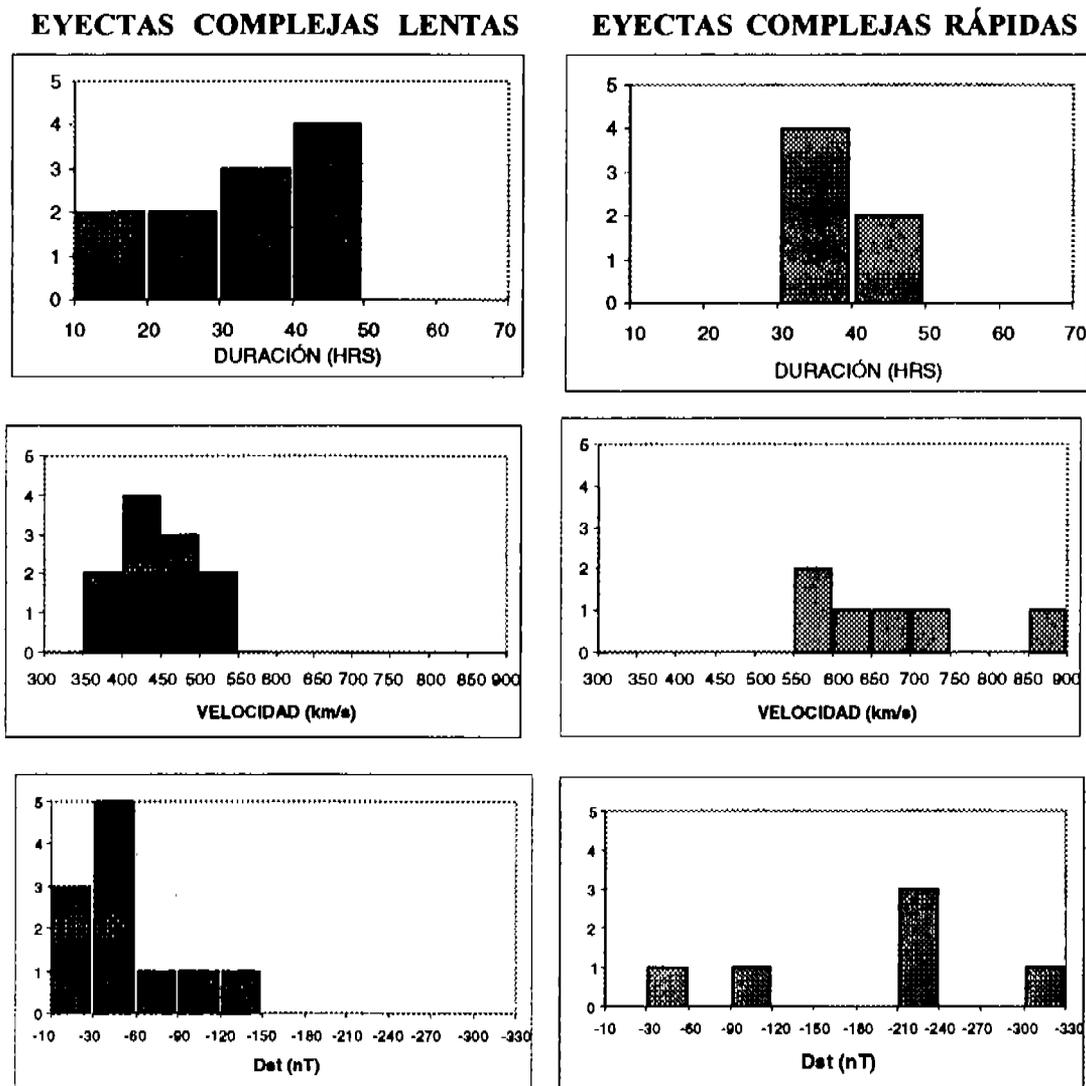


Figura 2.7 Histogramas de eyectas complejas lentas (izquierda) y eyectas complejas rápidas (derecha). Se muestra en el primer renglón la duración (hrs) Vs # de eventos, en el segundo la velocidad (km/s) Vs # de eventos, y en el tercer renglón el índice geomagnético Dst (nT) Vs # de eventos, en donde se observa que las EC rápidas son más geoefectivas y tienen duraciones mayores a 30 horas.

2.2.2 Eyectas complejas lentas

En el análisis del segundo grupo, en donde se considera únicamente a las eyectas complejas lentas (11 eventos), se encontró que el 73% de ellas contienen helio adentro de la NM y el 27% restante no contiene helio adentro de la NM.

La figura 2.8 muestra que las eyectas complejas lentas con helio adentro de la NM son más rápidas y que para el caso de la geoeffectividad no podemos distinguir de una manera clara si unas son más geoeffectivas que las otras, esto debido a que el número de eventos de EC lentas sin helio dentro de la NM es muy escaso.

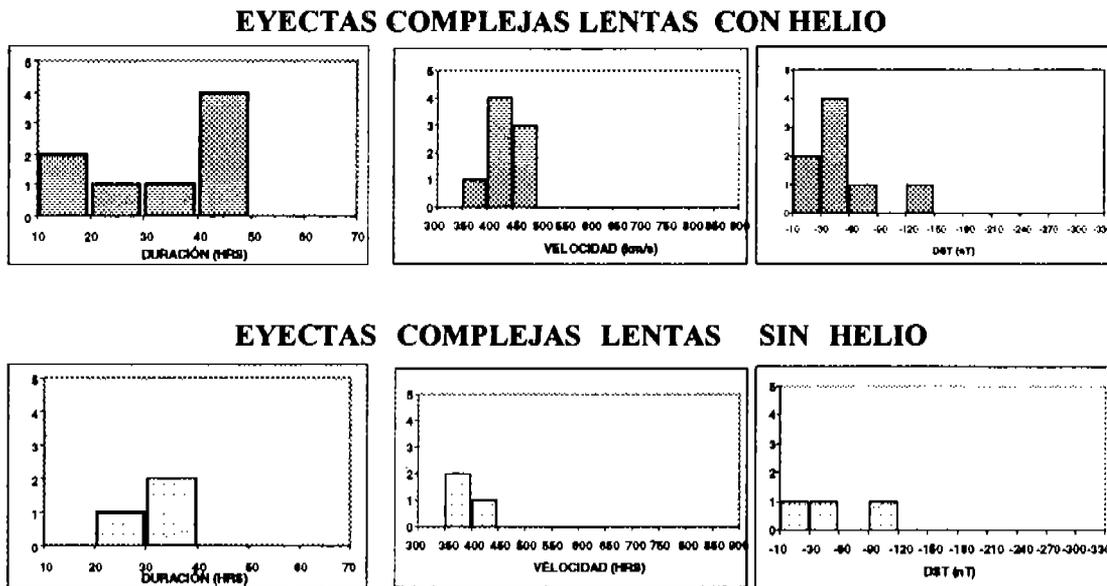


Figura 2.8 Histograma de eyectas complejas lentas con helio (arriba) y eyectas complejas lentas sin helio (abajo). En la columna izquierda está la duración (hrs) Vs # de eventos, en la columna central la velocidad (km/s) Vs # de eventos, y en la columna del lado derecho el índice geomagnético Dst Vs # de eventos.

Se observa que las EC lentas con helio duran más, son un poco más rápidas y son más geoeffectivas que las EC sin helio.

2.2.3 Eyectas complejas rápidas

En el caso del tercer grupo se observó que el 100% de las eyectas complejas rápidas contienen helio adentro de la nube magnética, por lo que no se puede hacer una comparación entre las eyectas complejas rápidas con y sin helio adentro de la nube magnética, sin embargo esto nos sugiere que estas estructuras contienen plasma de la corona baja y está de acuerdo con el resultado obtenido en la sección 2.1.3, en donde sugerimos que las NM más veloces provienen de eventos solares más energéticos que abren las líneas del campo magnético de la corona baja, trayendo consigo material más pesado (i.e. helio).

Por otro lado, en el grupo de eyectas complejas también trabajamos con las duraciones del plasma con enriquecimiento en helio ($\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 8\%$) que siguen a las nubes magnéticas lentas y rápidas.

La figura 2.9 muestra los histogramas de la duración del plasma con $\text{He}^{++}/\text{H}^+ \geq 8\%$, de donde al comparar estas duraciones obtuvimos que no existe una diferencia entre ellas, es decir, las duraciones del plasma que siguen a las NM lentas no son menores ni mayores que las del plasma que sigue a las NM rápidas.

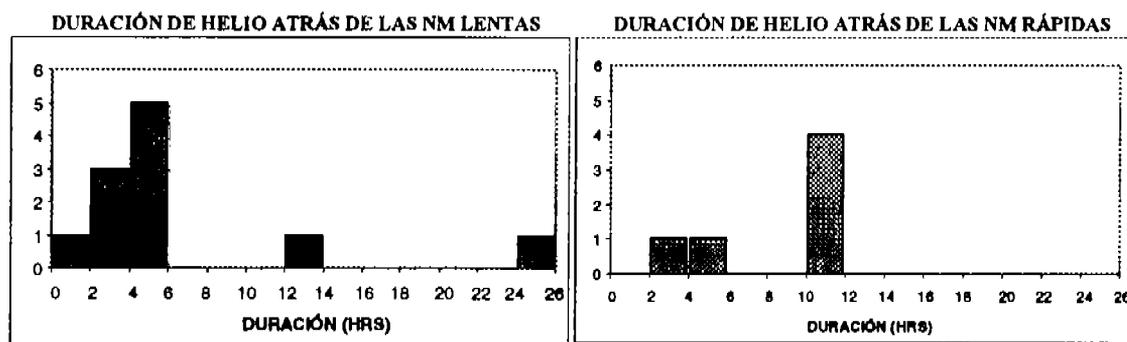


Figura 2.9 Estos histogramas muestran la duración del plasma con enriquecimiento de helio que sigue a las NM lentas y rápidas (eyectas complejas).

El histograma del lado izquierdo corresponde a la duración del plasma que sigue a las NM lentas Vs # de eventos, y el de la derecha pertenece a la duración del plasma que sigue a las NM rápidas Vs # de eventos. La figura en general muestra que hay duraciones de todo tipo.

2.3 Asociación de nubes magnéticas de 1996 al 2002 con eventos solares

Estudiamos también la asociación solar para las nubes magnéticas y para las eyectas complejas mencionadas en las secciones anteriores. Esto para estudiar el tipo de eventos solares relacionados con estas eyectas.

Para la asociación solar se relacionaron las eyecciones de masa coronal (EMC) detectadas por el coronógrafo LASCO abordo de la nave SOHO, con las fechas correspondientes para las nubes magnéticas de 1996 al 2002 detectados por la nave WIND a 1 UA.

Al observar las imágenes de LASCO, semejantes a las que se observan en la figura 1.3 del capítulo anterior, las EMC en ocasiones cubren a todo el coronógrafo, es decir, se aprecia un objeto luminoso con una apertura angular de 360° ; a estas EMC se les conoce como eyecciones tipo halo.

La nave SOHO se encuentra en frente de la Tierra y del lado día (apuntando en dirección hacia el Sol) y las EMC tipo halo, que es capaz de detectar, son muy importantes para la Tierra, ya que nos indican que la EMC viene directamente hacia nosotros.

Por otro lado no siempre las EMC cubren el 360° del disco del coronógrafo, así que cuando la EMC lo cubre por poco menos de 360° se les nombra halos parciales; sin

dejar de lado que este tipo de EMC interaccionan también de manera importante con la Tierra.

En particular en este trabajo consideramos halos parciales cuando las EMC cubren al menos 120° al disco del coronógrafo.

La forma en como asociamos las EMC con las nubes magnéticas y con las eyectas complejas fue tomando en cuenta la velocidad de arribo de las NM y de las EC a 1 UA. De este modo se puede tener una idea de cuanto tiempo tardó en propagarse la EMC desde el Sol hasta 1 UA. Al tener esta información recurrimos a las listas¹⁹ de los datos de las EMC detectadas por el coronógrafo LASCO. En estas listas hay la información sobre las fechas y las horas de salida de las EMC, su velocidad de salida, la aceleración de las mismas, la localidad de salida sobre el disco solar, y si las EMC fueron tipo halo o halos parciales.

Con la información de las listas excluimos a las EMC que no se asociaran con las NM o con las EC, por causa de velocidad de salida o de aceleración que no permitieran una asociación con la velocidad de las NM o de las EC y el tiempo de arribo a 1 UA, o simplemente aquellas que no cumplieran con ser halos o halos parciales.

La tabla 4 muestra los resultados de la asociación de las EMC con las eyectas.

Tabla 4. Asociación Sol-eyecta

	Halo	Halo parcial
Nubes magnéticas lentas	84%	16%
Nubes magnéticas rápidas	67%	33%
Eyectas complejas lentas	50%	50%
Eyectas complejas rápidas	100%	0%

El porcentaje de estos resultados corresponden al 64% total de los 53 eventos estudiados. Esto porque no siempre es posible relacionar una EMC con las nubes magnéticas o con las eyectas complejas.

De la tabla 4 observamos que existe una relación favorable de todos los eventos con las eyecciones de masa coronal tipo halo.

Uno de los eventos solares que aparecen frecuentemente asociados con las EMC son las ráfagas solares y ambos eventos son síntomas de la reconfiguración magnética coronal. Así, otra asociación solar que se realizó para los 53 eventos interplanetarios (NM y EC), fue con ráfagas; las cuales son uno de los eventos explosivos más importantes de la actividad solar.

¹⁹ Los datos se obtuvieron de la página http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

Las ráfagas solares son en esencia una concentración de alta energía en la atmósfera solar que se pueden observar en el rango del visible ($H\alpha$) y en rayos X como brillantamientos muy intensos que se expanden cubriendo áreas muy extensas (2×10^5 km) en cuestión de minutos, y decaen paulatinamente hasta desaparecer de 1/3 de hora a 3 horas.

Por otro lado, las ráfagas solares en ocasiones desaparecen repentinamente en minutos arrojando grandes cantidades de energía hacia el medio interplanetario. Frecuentemente estos eventos explosivos están asociados con las eyecciones de masa coronal.

Los científicos tienen ya algunos años observando a las ráfagas solares y tienen el conocimiento de que la asociación de las ráfagas con las EMC no es uno a uno, es decir, no siempre que hay una ráfaga se le puede asociar una EMC y no siempre que hay una EMC le podemos asociar una ráfaga solar. Sin embargo, la asociación entre ambos eventos es alta, por ejemplo en un trabajo reciente, *Vrsnak et al.* [2005] analizaron 649 ráfagas de las cuales el 84% se asoció con EMC y el 16% no fue posible relacionarlas con una EMC.

En este trabajo buscamos a las ráfagas solares que pueden asociarse con las EMC, relacionadas éstas a su vez con los eventos interplanetarios de nuestra muestra (NM y EC); con el fin de encontrar una relación entre ellas.

Para hacer la asociación entre ráfagas y las EMC, trabajamos con los datos de las naves espaciales GOES²⁰, que se encuentran a 1 UA.

En la búsqueda de incrementos de intensidades significativas de los rayos X producidos por el Sol, los científicos han creado con los datos de los satélites GOES, un sistema para catalogar la actividad de los rayos X. Este consiste en cinco niveles: A, B, C, M y X. El primer nivel es A y corresponde al nivel más bajo de intensidades, el cual recorre de 1.0×10^{-8} Watts/m² a 9.9×10^{-8} Watts/m². Cada nivel está dividido de esta forma, es decir, de 1.0 a 9.9, pero los órdenes de magnitud cambian, ya que 10^{-7} corresponde al nivel B, 10^{-6} al nivel C, 10^{-5} al M, y finalmente 10^{-4} al nivel X. Con lo que una ráfaga B7.9 produce 7.9×10^{-7} Watts/m², (http://son.nasa.gov/tass/radiowaves/sat_goes5_e.htm).

Lo que hicimos para relacionar a las EMC con las ráfagas en este trabajo fue buscar los eventos más próximos entre ellos, tanto en tiempo como en localización.

Como mencionamos anteriormente podemos tener acceso a la información sobre las fechas y las horas de salida de las EMC como de su localización. Con esta información recurrimos a las listas de las naves GOES, las cuales proporcionan información sobre la localidad de la región de donde se localizaron las ráfagas, el tiempo de la explosión, y la intensidad de las mismas.

Así la asociación de las ráfagas con las EMC dependió de la localidad de ambos eventos y de la hora de manifestación de las mismas.

Al asociar la localidad entre ambos eventos no hubo mucha dificultad, ya que a una EMC se le puede relacionar con más de una ráfaga, las cuales se encuentran muy cerca

²⁰ http://www.lmsal.com/SXT/plot_goes.html
http://solar.nro.nao.ac.jp/norih/html/goes_event/
ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/XRAY_FLARES

de la locación de las EMC. Lo que es interesante es asociar el tiempo de la explosión de las ráfagas con las salidas de las EMC, ya que la explosión puede ocurrir unos minutos antes de la salida, durante la salida, o unos minutos después de la salida de la EMC.

Por ejemplo *Reinard* [2005] consideró un rango para la ráfaga de una hora antes o después de la salida de las EMC, en donde encontró que, para su muestra, en promedio la explosión de las ráfagas ocurrieron en un rango de 21.6 minutos antes o después de la EMC.

En nuestra muestra tomamos en cuenta los tiempos más próximos entre la EMC y las ráfagas solares. Como en ocasiones teníamos más de dos ráfagas con diferencia de segundos o minutos entre ellas, y en la misma locación; para estos casos elegimos a las ráfagas más intensas para asociarlas con las EMC.

La tabla 5 muestra los tiempos del arribo de las NM, el tiempo de salida de las EMC, y el tiempo e intensidades (tipo) de las ráfagas solares asociadas con las EMC. En particular hubo tres eventos en donde la ráfaga explotó (máximo de emisión en rayos X) unos cuantos minutos después del tiempo de salida de la EMC (# eventos 36, 47, y 48).

Tabla 5. Inicio de las nubes magnéticas a 1 UA, EMC y ráfagas solares

# Evento	Inicio NM a 1 UA día/mes/hora	EMC día/mes/hora	Ráfaga día/mes/hora	Máximo de emisión	Tipo de ráfaga
1996					
1	27 05 1500	NO EMC	NO RÁFAGA		
2	01 07 1800	NO EMC	NO RÁFAGA		
3	07 08 1300	NO EMC	NO RÁFAGA		
4	23 12 1700	19 12 1630	19 12 1521-1618	15:50	C 2.3
1997					
5	10 01 0400	06 01 1510	NO RÁFAGA		
6	10 02 0200	07 02 0030	NO RÁFAGA		
7	21 04 1000	NO EMC			
8	15 05 0900	12 05 0530	12 05 0442-0526	04:46	C 1.3
9	08 06 1800	NO EMC			
10	19 06 0700	NO EMC			
11	15 07 0800	NO EMC			
12	03 08 1300	30 07 0445	NO RÁFAGA		
13	17 09 1600	NO EMC			
14	21 09 2100	17 09 2028	17 09 1745-1827	18:03	M 1.1
15	01 10 1600	28 10 0108	NO RÁFAGA		
16	10 10 2030	06 10 1528	NO RÁFAGA		
17	07 11 0400	04 11 0610	04 11 0552-0602	05:58	X 2.1
18	22 11 1500	NO EMC			
1998					
19	07 01 0100	02 01 2328	02 01 2010-2024	20:14	B 2.5
20	04 02 0400	NO EMC			
21	04 03 1300	28 02 1248	28 02 1138-1149	11:43	B 1.1
22	02 05 0500	29 04 1658	29 04 1606-1659	16:37	M 6.8
23	02 06 1000	NO EMC			
24	24 06 1300	20 06 1820	20 06 1422-1444	14:30	C 4.0
25	20 08 0600	NO EMC			
26	25 09 0600	NO EMC			
27	19 10 0400	15 10 1004	NO RÁFAGA		
28	08 11 1900	05 11 0202	05 11 0121-0128	01:24	C 7.1
1999					
29	18 02 1600	NO EMC			

Tabla 5 (continuación)

# Evento	Inicio NM a l UA día/mes/hora	EMC día/mes/hora	Ráfaga día/mes/hora	Máximo de emisión	Tipo de ráfaga
30	16 04 1800	NO EMC			
31	09 08 0930	04 08 0626	04 08 0545-0614		M 6.0
	2000				
32	21 02 0500	17 02 2130	17 02 2017-2107	20:35	M 1.3
33	15 07 1900	14 07 1054	14 07 1003-1043	10:24	X 5.7
34	28 07 1200	25 07 0330	25 07 0243-0254	02:49	M 8.0
35	12 08 0500	09 08 1630	09 08 1519-1700	16:22	C 2.3
36	03 10 1000	30 09 1806	30 09 1738-1905	18:27	M 1.0
37	13 10 0800	09 10 2350	09 10 2319-0021	23:43	C 6.7
38	28 10 2100	25 10 0826	25 10 0546-0609	05:56	C 5.3
39	06 11 2200	03 11 1826	03 11 1532-1559	15:52	C 1.9
	2001				
40	19 03 1930	15 03 2306	15 03 2213-2221	22:17	C 2.1
41	11 04 2200	09 04 0006	NO RÁFAGA		
42	21 04 2300	NO EMC			
43	28 04 1400	26 04 1230	NO RÁFAGA		
44	28 05 0300	24 05 2026	24 05 1930-2004	19:44	M 1.2
45	31 10 1800	25 10 1526	25 10 1442-1528	15:02	X 1.3
46	24 11 1400	22 11 2330	22 11 2232-0006	23:30	M 9.9
	2002				
47	19 03 0500	15 03 2306	15 03 2209-0042	23:10	M 2.2
48	23 03 2100	20 03 1754	20 03 1544-1919	18:08	C 4.0
49	20 04 0000	17 04 0826	17 04 0746-0957	08:24	M 2.6
50	23 05 2000	22 05 0350	22 05 2314-0128		C 9.7
51	01 08 0900	29 07 1207	29 07 1027-1113	10:44	M 4.7
52	03 10 0100	NO EMC			
53	17 11 1000	NO EMC			

Para nuestra muestra fue posible relacionar el 79% de las EMC con ráfagas. De este porcentaje obtuvimos que las NM lentas y las EC lentas se relacionan con ráfagas de intensidades mayores o iguales al tipo B (1.0×10^{-7} a 9.9×10^{-7} Watts/m²). Por otro lado las NM rápidas y las EC rápidas tienden a relacionarse con ráfagas solares mayores o iguales al tipo C (1.0×10^{-6} – 9.9×10^{-6} Watts/m²), ver figura 2.10.

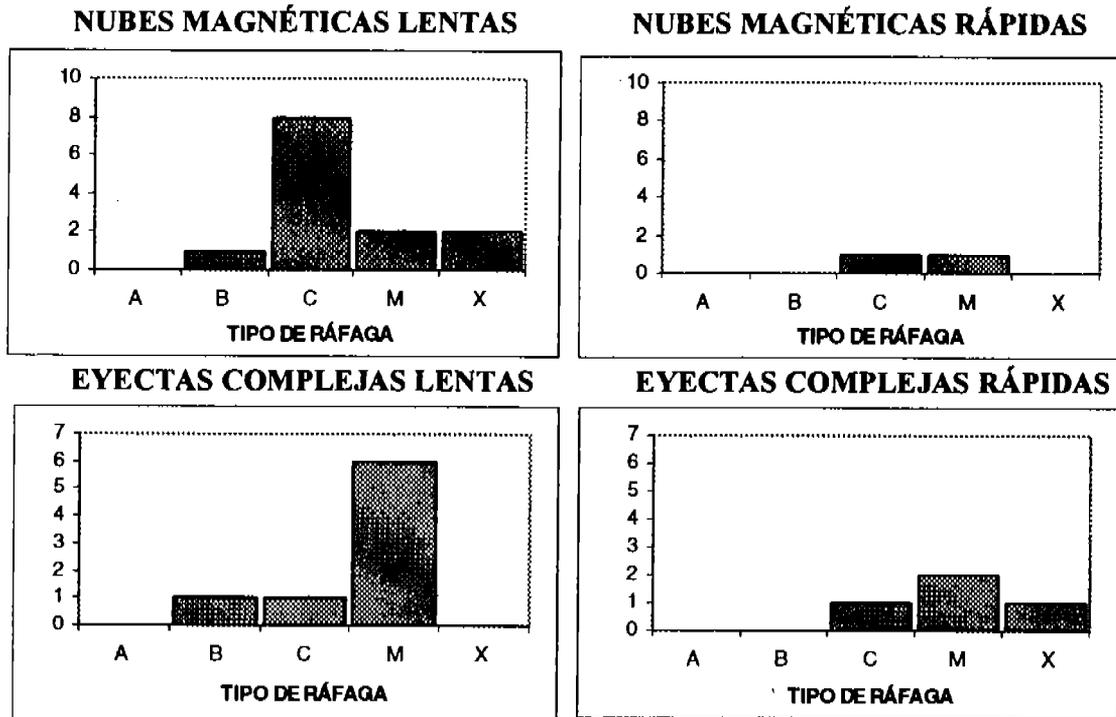


Figura 2.10 Histogramas del tipo de ráfagas para las NM lentas, NM rápidas, EC lentas y para las EC rápidas. En los histogramas se muestra la intensidad de las ráfagas solares (Watts/m²) Vs # de eventos. De los histogramas se observa los eventos de NM lentas y EC lentas se asocian con eventos mayores o iguales a tipo B. Las NM y EC rápidas muestran una tendencia a estar relacionadas con ráfagas de intensidades mayores o iguales a tipo C.

2.4 Conclusiones

1.- Las nubes magnéticas rápidas son más geoeffectivas que las lentas, esto está de acuerdo con resultados anteriores (*Burlaga et al.*, 1987, *Zhang y Burlaga* 1988, y *Webb et al.*, 2000).

2.- Las nubes magnéticas con helio fueron más veloces y más geoeffectivas, lo que sugiere que tienen procesos de origen más energéticos que otras estructuras que son expulsadas hacia el MI desde el Sol.

3.- Las eyectas complejas rápidas son más geoeffectivas que las lentas.

4.- Las eyectas complejas con helio fueron más veloces y más geoeffectivas que las eyectas complejas sin helio, lo que nos sugiere que las nubes magnéticas, que forman parte de estas eyectas, provienen de eventos más energéticos en la corona solar; los cuales son capaces de inyectar material de capas bajas de la corona hacia el MI.

5.- Para la asociación solar de eyecciones de masa coronal con las nubes magnéticas y las eyectas complejas, observamos que existe una relación favorable de todos los eventos con las eyecciones de masa coronal tipo halo.

6.- Para la asociación de las ráfagas solares con las nubes magnéticas y eyectas complejas, obtuvimos que las nubes magnéticas lentas y las eyectas complejas lentas se relacionan con ráfagas de intensidades mayores o iguales a 1.0×10^{-7} - 9.9×10^{-7} Watts/m² (tipo B). Y las nubes magnéticas y las eyectas complejas rápidas tienden a relacionarse con ráfagas solares con energías de 1.0×10^{-6} a 9.9×10^{-6} Watts/m² (ráfagas tipo C).

Capítulo 3

3.1 Las eyecciones de masa coronal interplanetarias y su impacto terrestre

El poder asociar las perturbaciones que se propagan en el medio interplanetario (MI) con alteraciones a nivel geomagnético es actualmente un objeto de estudio muy importante, ya que existen diversos fenómenos que se encuentran relacionados con la vida cotidiana de nuestro planeta.

Las NM son un subconjunto de la eyectas y se caracterizan por tener un campo magnético enriquecido y bien ordenado; y precisamente por esto las NM se vuelven buenas candidatas para estudiar su geoefectividad ya que pueden tener una Bz sur por un largo periodo.

Algunas NM viajan lentamente en el medio interplanetario y no forman un choque en la parte delantera, sin embargo, aún así pueden interactuar con la magnetosfera terrestre causando actividad geoefectiva ($Dst < -20$ nT).

Por otro lado, algunas NM viajan más rápido que la velocidad de propagación del viento solar y forman un choque en la parte delantera. Entre el *choque* y la parte delantera de la NM se forma una región llamada *funda*.

En esta región como el plasma está comprimido, notamos que hay aumentos en la temperatura, la densidad, y en la intensidad del campo magnético así como en la velocidad.

En este capítulo queremos estudiar cómo la geoefectividad depende de la configuración del campo magnético adentro de la NM, principalmente porque algunas tienen una componente Bz sur durante toda su duración y otras tienen una componente Bz sur-norte. Así también queremos investigar cómo la región de la funda con una configuración Bz sur podría incrementar la interacción que tendría lugar tiempo después de su paso, entre la NM y la magnetosfera terrestre.

Adicionalmente queremos ver si existen casos en donde únicamente la región de la funda interactúa geoefectivamente con la magnetosfera terrestre.

El viento solar ambiente rodea a la magnetosfera terrestre y la moldea como se muestra en la figura 3.1; y cuando una eyección de masa coronal interplanetaria (EMCI) viaja a velocidades mayores a las del viento solar ambiente existe una compresión intensa en la nariz de la magnetosfera, ver figura 3.1, independientemente de la configuración del campo magnético Bz de la EMCI. Pero si el campo magnético de la EMCI tiene una orientación sur en la componente z (Bz), esto traerá como consecuencia que las líneas del campo magnético terrestre se reconecten con las líneas de la EMCI, ya que la orientación de las líneas magnéticas de la Tierra en la nariz están orientadas hacia el norte en la componente z, ver figura 3.2.

La reconexión magnética permite que las partículas pertenecientes inicialmente a la EMCI viajen a través de la magnetosfera.

Una de las regiones de la magnetosfera es la magnetocola, la cual se expande en el lado noche de la Tierra, ver figura 3.1. En ella las partículas viajan hasta acercarse cada vez más hacia la Tierra.

Las partículas, tanto electrones como iones, quedan atrapadas en esta región llenando los cinturones de radiación los cuales están indicados en la figura 3.1.

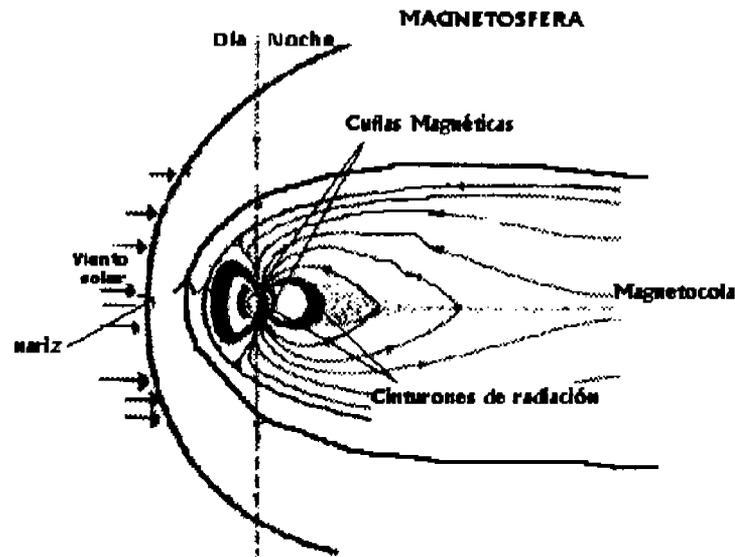


Figura 3.1 La Magnetosfera terrestre. La figura muestra las diferentes regiones de la magnetosfera, como la nariz en la cual las líneas del campo magnético están orientadas hacia el norte, las cúspides magnéticas, localizadas en los polos terrestres, la magnetocola la cual se expande por el lado noche de la Tierra, y finalmente, los cinturones de radiación representados por las regiones oscuras cercanas a la Tierra.

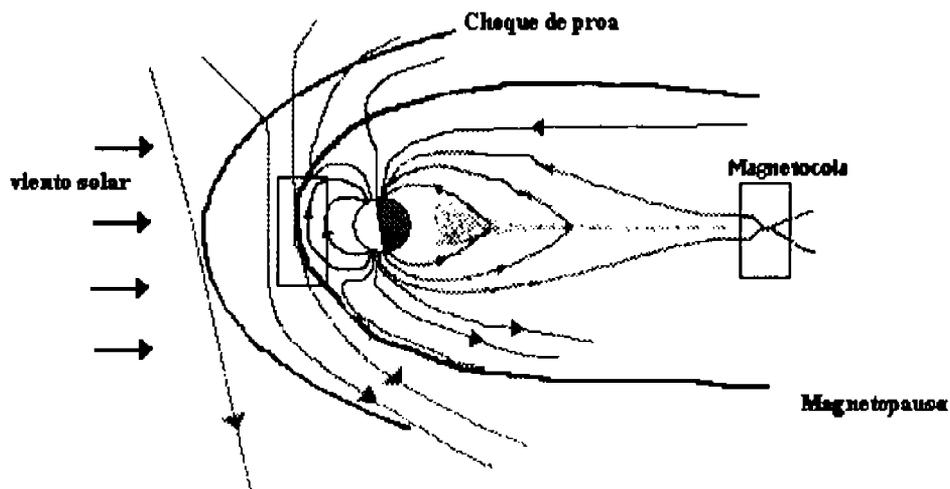


Figura 3.2 Reconexión magnética. La figura muestra las líneas del CMI antes de la reconexión, con una configuración B_z sur, las cuales interaccionarían con la parte frontal de la magnetosfera, debido a que en esa región la dirección de líneas magnéticas tiene una orientación norte. La reconexión magnética está representada por los recuadros.

Algunas partículas siguen las líneas del campo magnético terrestre que están dirigidas hacia las cuñas magnéticas que se encuentran localizadas en los polos terrestres (ver figura 3.1).

En las zonas polares una de las manifestaciones de esta interacción se hace visible ante nuestros ojos iluminando el cielo con espectaculares cortinas de luces de diferentes colores; estas son las auroras boreales en el polo norte y las auroras australes en el polo sur.

En ocasiones la interacción de las partículas con la atmósfera alta de nuestro planeta es tan intensa que podemos leer un libro bajo la luz de las auroras polares.

Las perturbaciones en los polos terrestres, o a altas latitudes, también se manifiestan provocando alteraciones en el control de los satélites artificiales que se encuentran en órbitas bajas, ya que las partículas que provienen del MI generan potentes corrientes eléctricas.

Por otro lado, las partículas que llenan los cinturones de radiación inducen una corriente de anillo que contrarresta la intensidad del campo magnético terrestre y provocan perturbaciones geomagnéticas.

El campo magnético terrestre es monitoreado continuamente por diversos observatorios alrededor del planeta. Cuando una perturbación ocurre en la magnetosfera esta se refleja en el campo magnético terrestre que se mide en Tierra.

A latitudes medias y bajas existe una red conformada por algunos observatorios que reportan sus datos cada determinado tiempo, y conjuntamente dan un registro del campo magnético terrestre promedio.

El índice Dst es un indicador que funciona para identificar, y así estudiar a las tormentas geomagnéticas a latitudes medias y bajas.

Una tormenta geomagnética tiene tres fases, las cuales se encuentran representadas en la figura 3.3. En la primera fase se observa un comienzo repentino en la componente perpendicular a las líneas del campo magnético terrestre alrededor del ecuador, esta componente se llama H . El impulso repentino se debe a que la magnetosfera sufre una compresión debida a un viento solar que trae velocidades más grandes que las del viento solar ambiente (como los choques). Esta es la fase inicial de la tormenta geomagnética.

La segunda fase, o fase principal de la tormenta es de suma importancia ya que el campo magnético terrestre cae, debido a que la corriente de anillo genera un campo opuesto que le resta intensidad. En ocasiones la caída puede ser muy abrupta y generar tormentas muy intensas. En la tabla 2 del primer capítulo mostramos la intensidad de las tormentas determinadas por los valores del índice Dst.

La última fase recibe el nombre de fase de recuperación. En esta el campo magnético se recupera hasta llegar a un valor cercano a $Dst = 0$ nT; el cual representa el valor del estado quieto del campo magnético terrestre.

La magnetosfera terrestre es un sistema complejo conformado por regiones de plasma, partículas y corrientes eléctricas que hacen que el sistema fluctúe, por lo que es muy difícil determinar las fronteras de las diferentes zonas de la magnetosfera, así como comprender los procesos físicos que suceden en ella. Sin embargo, sabemos que existe una interacción muy marcada entre la actividad solar y la geomagnética, ya que la magnetosfera de la Tierra responde a manifestaciones iniciadas en el Sol que se propagan en el medio interplanetario.

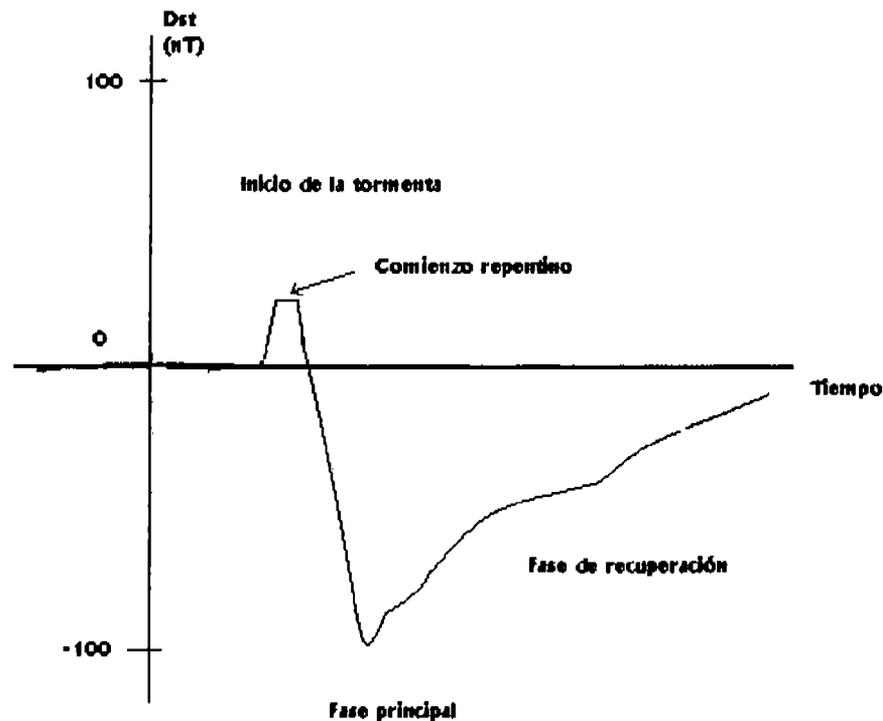


Figura 3.3 La figura muestra el registro de una tormenta geomagnética y sus tres fases. En el eje horizontal está el tiempo, y no hemos indicado la escala ya que una tormenta puede durar de menos de 24 hrs hasta varios días. En el eje vertical está el índice Dst. El inicio de la tormenta está caracterizado por un comienzo repentino, después viene la fase principal la cual está caracterizada por una caída del campo magnético terrestre. En la figura hemos supuesto un valor mínimo para esa caída de -100 nT, la cual es una tormenta extrema. Finalmente tenemos la fase de recuperación en donde el campo magnético se aproxima a valores cercanos a un $Dst = 0$.

3.2 Eventos geomagnéticos debidos a eventos de nubes magnéticas y fundas de 1996 a 2002

En el capítulo anterior mostramos el análisis de las perturbaciones a nivel geomagnético provocadas por las nubes magnéticas (NM) observadas por la nave espacial WIND durante los años de 1996 a 2002.

El índice que se utilizó para ese análisis fue el Dst, el cual es un reporte promedio que se forma a partir de la información que reportan algunos observatorios internacionales, que se encuentran a latitudes medias y bajas.

En este capítulo estudiamos la geoeffectividad causada por el mismo conjunto de nubes magnéticas a través de 1996 al 2002 observadas a 1 UA por la nave WIND, pero haciendo ahora una revisión de los perfiles del índice Dst para identificar que regiones fueron las que interactuaron geoeffectivamente.

La tabla 6 muestra los datos de las NM independientemente de si pertenecen al grupo de las eyectas complejas o no, ya que ahora nos interesa conocer las regiones que interactúan geoeffectivamente. En la tabla 6 también mostramos los valores del índice Dst que medimos directamente de los registros.

De los 53 eventos que presentamos en el capítulo anterior ahora tenemos 50 debido a que anulamos tres ya que no tienen suficientes datos (ND).

Tabla 6. Geoefectividad de nubes magnéticas y fundas de 1996 al 2002

# Evento	Inicio NM día/mes/hora	Final NM día/mes/hora	Δt_{NM} (horas)	Configuración Bz funda	Configuración Bz NM	Dst (nT) funda	Dst (nT) NM
1996							
1	27 05 1500	29 05 0000	33 hrs		S-N		-33
2	01 07 1800	02 07 1100	21:40 min	N	S-N		-20
3	07 08 1300	08 08 1000	21 hrs		S		-23
4	23 12 1700	25 12 1000	41 hrs	N	S-N		-34
1997							
5	10 01 0400	11 01 0200	22 hrs	S	S-N		-78
6	10 02 0200	11 02 0245	24:45 min	S	S	-55	-68
7	21 04 1000	23 04 0300	41 hrs	S	S-N		-107
8	15 05 0900	16 05 1200	27 hrs	S	S-N		-115
9	08 06 1800	10 06 0000	30 hrs		S-N		-84
10	19 06 0700	20 06 2300	40 hrs	S	S		-36
11	15 07 0800	16 07 1100	27 hrs	N	S-N		-45
12	03 08 1300	04 08 0300	14 hrs	N	S-N		-48
13	17 09 1600	18 09 2300	31 hrs	S	S		-54
14	21 09 2100	22 09 1600	19 hrs	S	N	-36	
15	01 10 1600	02 10 2300	31 hrs	S	N	-98	
16	10 10 2200	12 10 0000	42 hrs	S	S-N		-130
17	07 11 0400	09 11 0000	44 hrs	S	(S-N)*	-110	
18	22 11 1500	23 11 1400	28:11 min	N	S-N	-75	-108
1998							
19	07 01 0100	08 01 2200	45 hrs	S	S-N	-30	-83
20	04 02 0400	05 02 2300	43 hrs	N	S-N		-32
21	04 03 1300	06 03 0900	44 hrs	S	S-N		-35
22	02 05 0500	03 05 1700	36 hrs	N	S		-85
ANULADO	02 06 1000	02 06 2100	11 hrs	ND	ND		-100
23	24 06 1300	25 06 2100	32 hrs		S-N		-25
24	20 08 0600	21 08 2000	38 hrs	S	S-N	-43	-68
25	25 09 0600	26 09 1600	34 hrs	S	N	-205	
26	19 10 0400	20 10 0700	27 hrs	S	S-N		-113
27	08 11 1900	10 11 0600	35 hrs	N	S		-148
1999							
28	18 02 1600	20 02 1200	44 hrs	S	(S-N)*	-120	
29	16 04 1800	17 04 1900	25 hrs	N	S-N		-90
30	09 08 0930	10 08 1430	29 hrs	S	S-N		-47
2000							
31	21 02 0500	22 02 1400	33 hrs	S	N		-25
ANULADO	15 07 1900	17 07 0800	37 hrs	ND	N		-300
32	28 07 1200	29 07 1400	26 hrs	N	S		-74
33	12 08 0500	13 08 2200	41 hrs	S	S-N		-237
34	03 10 1000	05 10 0300	41 hrs	S	S-N		-146
35	13 10 0800	14 10 1700	33 hrs	S	S-N	-70	-105
36	28 10 2100	29 10 2200	25 hrs	N	S		-125
37	06 11 2200	08 11 0300	29 hrs	S	(S-N)*	-159	
2001							
38	19 03 1930	21 03 0330	32 hrs	S	S	-105	-150
39	11 04 2200	13 04 0700	33 hrs	S	N	-270	
40	21 04 2300	23 04 0800	33 hrs	N	S		-104
41	28 04 1400	01 05 0200	36 hrs	N	S-N		-47
42	28 05 0300	29 05 2100	42 hrs	N	S		-41

Tabla 6 (continuación)

# Evento	Inicio NM día/mes/hora	Final NM día/mes/hora	Δt_{NM} (horas)	Configuración Bz funda	Configuración Bz NM	Dst (nT) funda	Dst (nT) NM
43	31 10 1800	02 11 1200	42 hrs	S	S		-105
ANULADO	24 11 1400	26 11 1100	45 hrs	ND	S-N		-213
2002							
44	19 03 0500	20 03 1600	35 hrs	S	N	-41	
45	23 03 2100	25 03 2000	47 hrs	N	S-N		-101
46	20 04 0000	21 04 1800	42 hrs	S	S	-120	-152
47	23 05 2000	25 05 1800	46 hrs	S	N	-108	
48	01 08 0900	01 08 2300	14 hrs	S	S-N		-50
49	03 10 0100	04 10 1800	41 hrs	S	S		-142
50	17 11 1000	19 11 0100	39 hrs	N	S		-42

Como se mencionó en capítulos anteriores, las NM son un subconjunto de las EMCI caracterizadas por un campo magnético incrementado con rotación y con periodos de Bz sur largos. Estas características son muy importantes porque hacen que las NM se conviertan en buenas candidatas para estudiar su geoelectividad.

Algunas NM se propagan en el medio interplanetario muy lentamente sin formar un *choque*, sin embargo, mostraremos que pueden interactuar con la magnetosfera terrestre causando actividad geomagnética, considerando esta actividad a partir de valores Dst < -20 nT.

La figura 3.4 es el registro del 3 al 7 de marzo de 1998. En la figura la NM está delimitada por las líneas verticales y las características para cumplir con ser una NM se encuentran en los tres primeros paneles. El evento no tiene choque y provocó una caída en el índice Dst de -35 nT, la cual equivale a una tormenta de intensidad media.

Por otro lado, algunas NM viajan más rápido que el viento solar ambiente y forman un *choque* en la parte de enfrente de la NM. Esta región se observa en los registros como incrementos en la temperatura, en la densidad protónica, en la velocidad y en la presión dinámica.

La figura 3.5 es un registro del 20 al 23 de abril del 2001, en ella se muestra una NM delimitada por las líneas gruesas. Este evento presenta un choque el cual está indicado por la primera barra vertical.

Entre el choque y la parte delantera de una NM se forma una *funda*. En esta región el plasma es más caliente que el plasma del viento solar ambiente, la intensidad del campo magnético aumenta, la densidad protónica es mayor, y la presión dinámica se incrementa también en comparación con la del viento solar ambiente. Esta región en especial juega un papel importante en este trabajo como veremos más adelante, además el 92% (46 eventos) de las 50 NM que estudiamos tienen funda en la parte delantera.

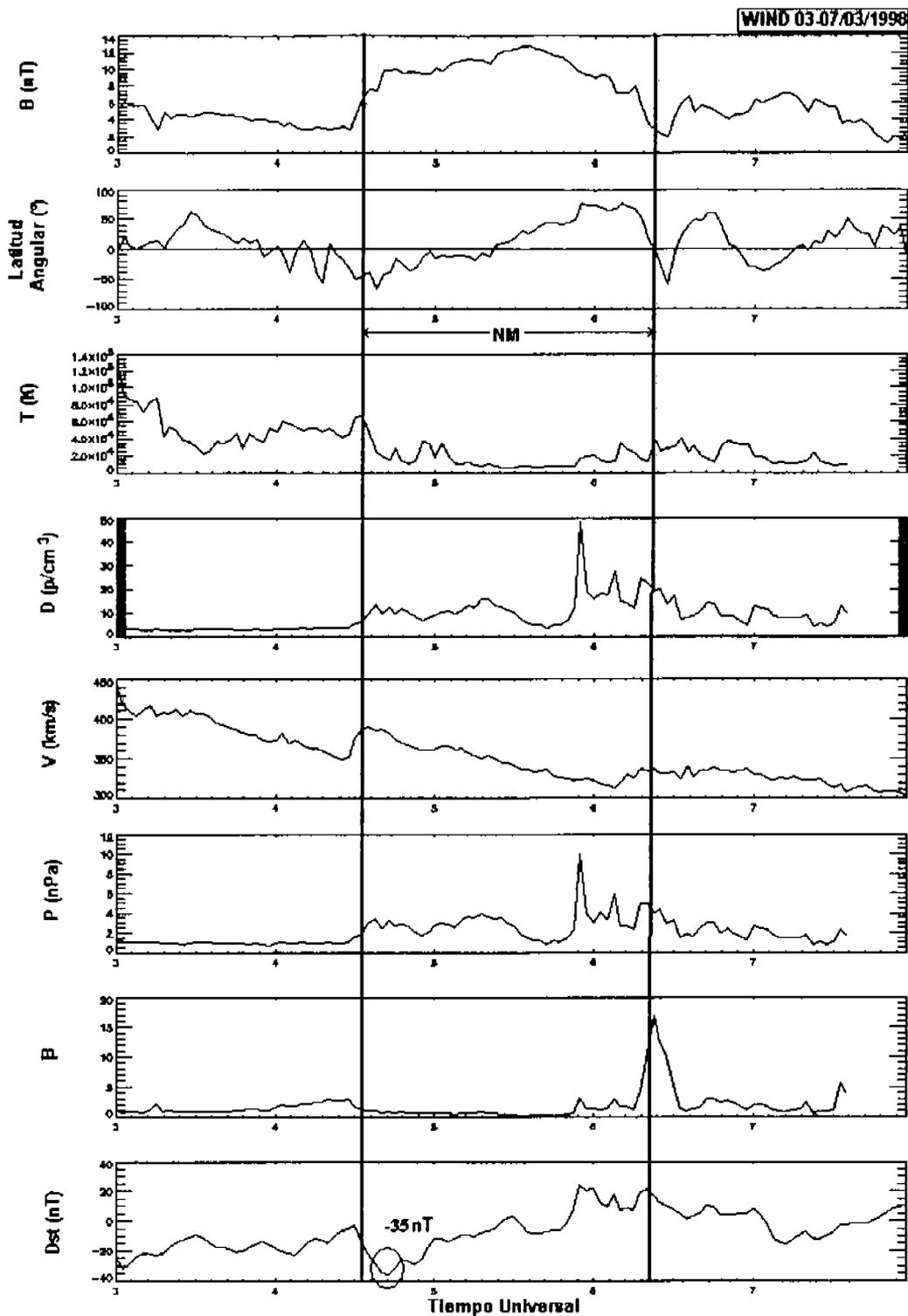


Figura 3.4 Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 03 al 07 de marzo de 1998. La NM está delimitada por las líneas verticales y no presenta un choque. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular (°), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma (presión térmica entre presión magnética), y el índice Dst (nT). En este registro la NM provocó una caída en el Dst de -35 nT, lo que nos indica una tormenta geomagnética de intensidad media. Se observa en el segundo panel que la configuración magnética Bz es inicialmente sur y norte en la parte final de la NM.

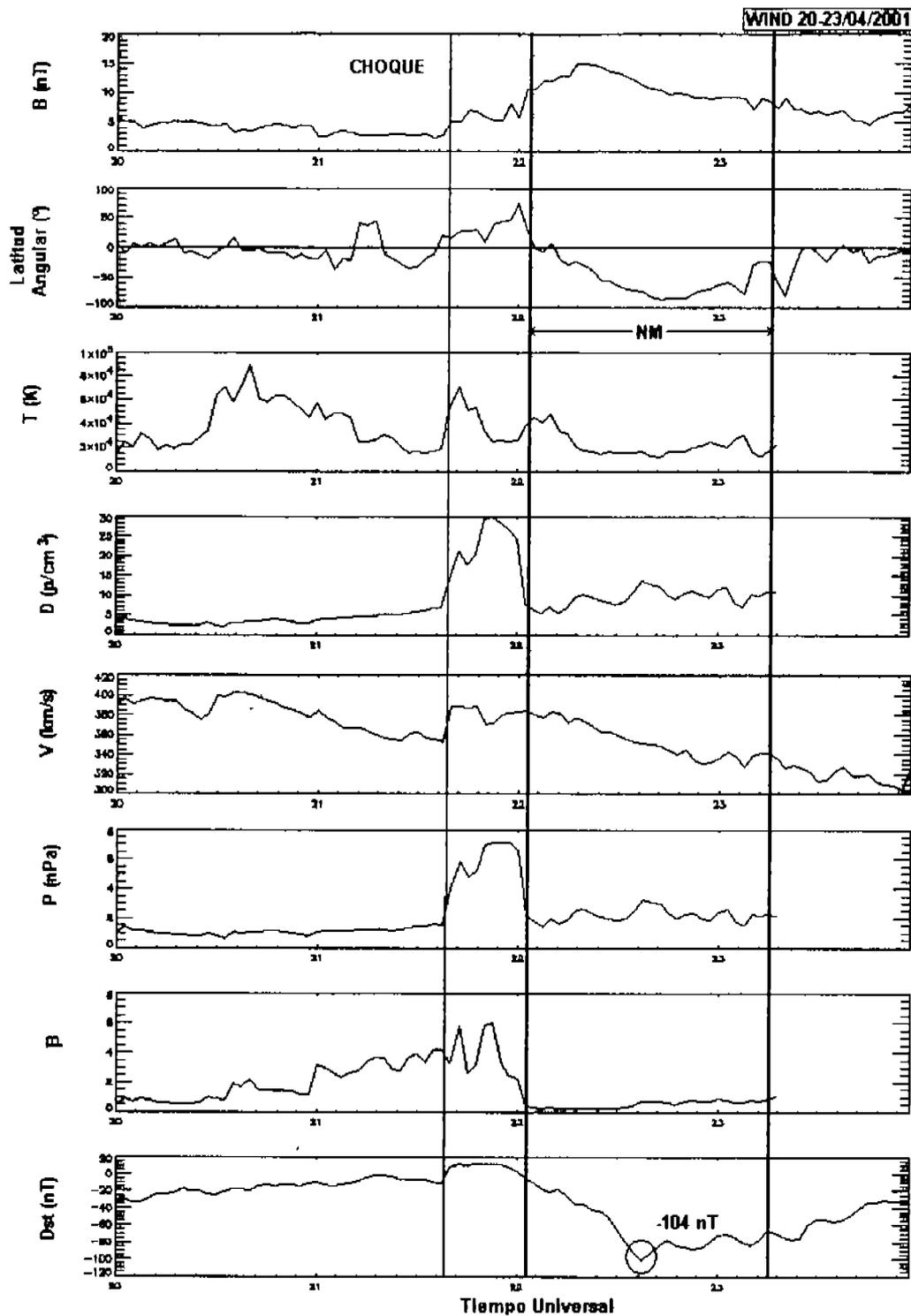


Figura 3.5 Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 20 al 23 de abril del 2001. La NM está delimitada por las líneas verticales gruesas, este evento presenta choque, el cual está indicado por la primera línea vertical. Entre el choque y el inicio de la NM (primera línea gruesa), está la región de la funda. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma (presión térmica entre presión magnética), y el índice Dst (nT). En este registro la NM provocó una caída en el Dst de -104 nT, lo que nos indica una tormenta geomagnética extrema.

3.2.1 Eventos geomagnéticos debidos a nubes magnéticas

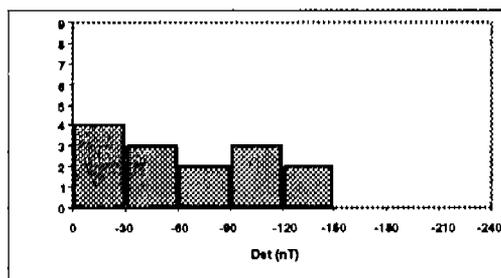
Al estudiar la geoeffectividad de los 50 eventos presentados en la tabla 6, en esta sección sólo analizamos 39 NM, debido a que 8 NM tienen una configuración Bz norte y 3 a pesar de que las NM tienen una configuración Bz sur-norte, la región que interactuó geoeffectivamente fue la funda, estos eventos están indicados en la tabla 6 por (S-N)*.

Las 39 NM que estudiamos en esta sección las separamos en aquellas que tuvieron una configuración magnética Bz sur (15 eventos) de aquellas NM con una configuración Bz sur-norte (24 eventos). Sin tomar en cuenta si presentan funda, pero sí el que la tormenta haya sido causada por la NM.

En los eventos de las NM con una configuración sur-norte no consideramos si la polaridad fue primero sur o norte, es decir, en este trabajo la configuración sur-norte del campo magnético adentro de la NM no distingue entre polaridades sur-norte o norte-sur.

La figura 3.6 presenta la información de los valores mínimos del índice Dst para las NM con una configuración Bz sur y para las NM con Bz sur-norte. Si tomamos en cuenta el valor promedio del índice Dst para ambos histogramas, tenemos que el valor promedio para las NM con una configuración Bz sur es de -90 nT y para las NM con una configuración Bz sur-norte es de -81 nT. Es decir, las NM con una configuración Bz sur son ligeramente más geoeffectivas que las NM con una configuración Bz sur-norte.

NUBES MAGNÉTICAS CON Bz SUR



NUBES MAGNÉTICAS CON Bz SUR-NORTE

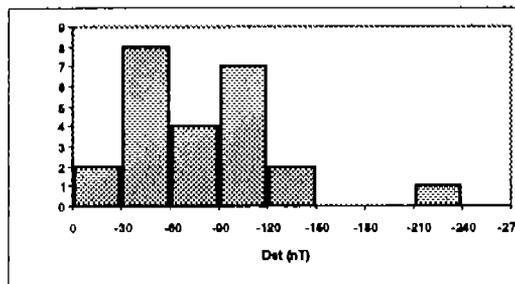


Figura 3.6 Histogramas de NM con configuración magnética sur (izquierda) y su geoeffectividad, y NM con configuración magnética Bz sur-norte (derecha) y su geoeffectividad. En los histogramas se muestra el índice Dst (nT) y el número de eventos para cada grupo. El valor promedio para las NM con Bz sur es -90 nT y para las NM con una configuración Bz sur-norte es -81 nT.

3.2.2 Eventos geomagnéticos debidos a nubes magnéticas con fundas

Al incorporar en el estudio la región de las fundas con una configuración Bz sur a las NM anteriores, observamos que estas regiones incrementan la interacción entre las NM y la magnetosfera terrestre; debido a que la magnetosfera terrestre interactúa geoeffectivamente cuando el CMI tiene una componente Bz sur, y al tener la funda y la NM una componente Bz sur, esto hace que ambas regiones generen perturbaciones a nivel geomagnético.

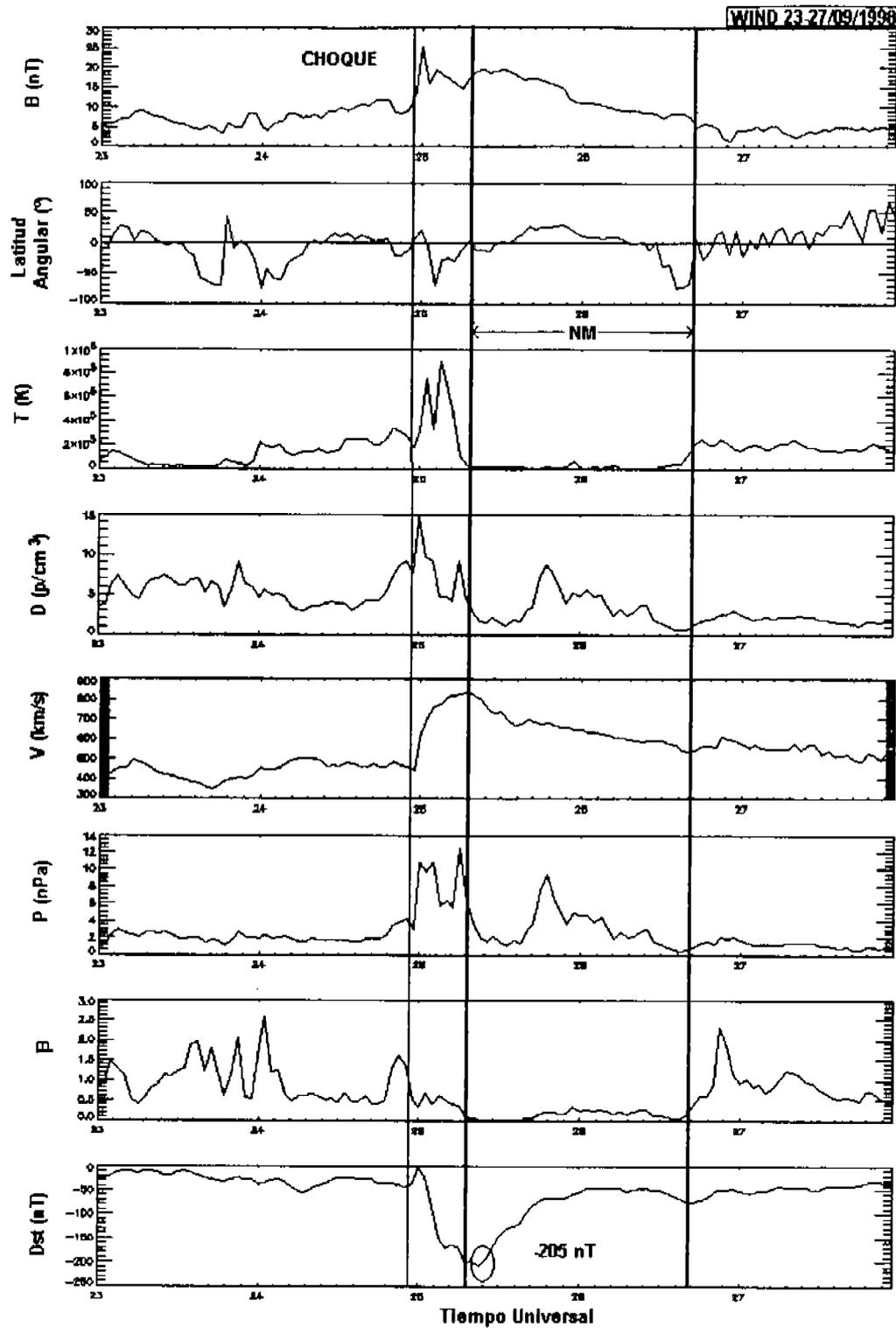


Figura 3.7 Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 23 al 27 de septiembre de 1998. La NM está delimitada por las líneas verticales gruesas, este evento presenta choque, el cual está indicado por la primera línea vertical. Entre el choque y el inicio de la NM está la región de la funda. El registro muestra los mismos parámetros que las figuras 3.4 y 3.5. En este caso el valor mínimo del Dst = -205 nT (tormenta extrema).

La figura 3.7 es un ejemplo de esta interacción geoelectiva. Se observa en el primer panel que la intensidad del campo magnético adentro de la funda es inclusive más alta que la de la NM y tiene una componente Bz sur durante casi toda su duración. Esto hace que la interacción entre la magnetosfera y el evento inicie con la funda y posteriormente con la región inicial de la NM, en donde Bz es sur.

En la mayoría de los casos las tormentas geomagnéticas son inducidas por la interacción de una EMCI con un campo magnético con orientación sur en la componente z (Bz) bien ordenado, y de larga duración (alrededor de 24 horas). Sin embargo, no siempre estos eventos causan caídas importantes en el índice Dst. Las caídas en el índice Dst pueden ser también ocasionadas por regiones más pequeñas que se encuentran alrededor de las EMCI, como la región de las fundas.

Así cuando consideramos a los eventos que están formados de una NM con choque, y por lo tanto con funda, estudiamos su geoelectividad dividiéndolos en los siguientes cuatro grupos:

- 1) NM con una configuración Bz sur más una funda con Bz norte (7 eventos)
- 2) NM con una configuración Bz sur más una funda con Bz sur (7 eventos)
- 3) NM con una configuración Bz sur-norte más una funda con Bz norte (9 eventos)
- 4) NM con una configuración Bz sur-norte más una funda con Bz sur (12 eventos)

Al comparar los eventos del primer grupo con los eventos del segundo grupo, ver figura 3.8, encontramos que las NM con Bz sur más una funda con Bz sur fueron más geoelectivas (Dst promedio = -101 nT) que las NM con Bz sur pero con una funda Bz norte (Dst promedio = -84.4 nT).

Para el caso de las NM con una configuración sur-norte y con funda Bz sur, vemos que estas son más geoelectivas (Dst promedio = -106.2 nT) que las NM con Bz sur-norte pero con una funda Bz norte (Dst promedio = -58.3 nT).

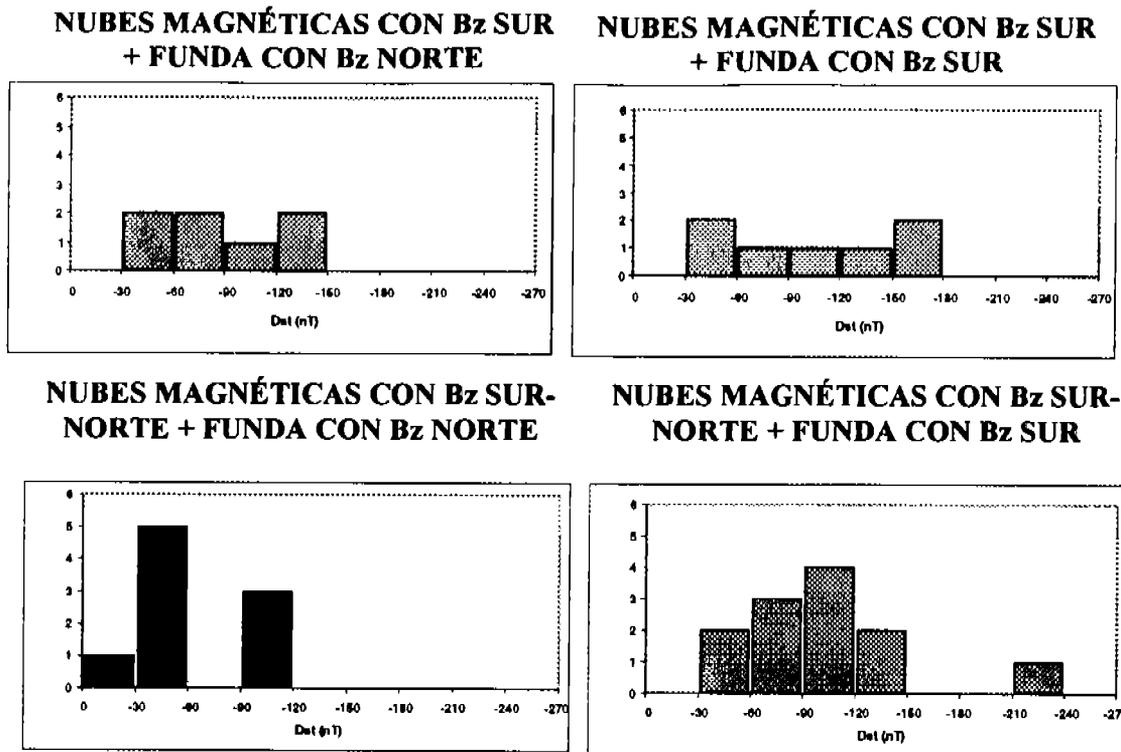


Figura 3.8 Histogramas de NM con configuración magnética sur más funda con Bz norte (superior izquierdo) y su geoeffectividad. Y NM con configuración magnética Bz sur con funda sur (superior derecha). E histogramas de NM con configuración magnética Bz sur-norte con funda norte (inferior izquierda) y NM con configuración Bz sur-norte más funda con Bz sur. En los histogramas se muestra el índice Dst (nT) y el número de eventos para cada grupo. De los histogramas superiores se observa que las NM con Bz sur más una funda Bz sur son más geoefectivas que las NM con Bz sur pero con funda Bz norte. De los histogramas inferiores se observa que las NM con Bz sur-norte y con funda Bz sur son más geoefectivas que las NM con Bz sur-norte pero con una funda Bz norte.

3.2.3 Tormentas de dos pasos

Algunos eventos geomagnéticos generados por una NM más una funda con una configuración Bz sur, tienen un comportamiento muy particular en los registros asociados con el índice Dst; dos decrementos se observan en los datos del índice Dst. A este tipo de evento se le conoce como “tormentas de dos pasos” (*Kamide et al. [1998]*). En nuestra muestra tenemos 6 eventos de tormentas de dos pasos, lo que equivale al 13% de todas las NM que tienen funda.

Un evento de tormenta de dos pasos cumple con las siguientes tres condiciones (*Kamide et al. [1998]*):

- 1) el primer decremento debe ser menor a -30 nT y estar separado del segundo decremento por más de tres horas
- 2) la segunda caída debe ser mayor que la primera, y
- 3) no deben existir comienzos repentinos entre ambas caídas en el Dst

Las tormentas de dos pasos fueron estudiadas inicialmente por *Kamide et al.* [1998]. En ese trabajo no estudiaron la interacción de NM con la magnetosfera terrestre, sino trabajaron con la interacción de la magnetosfera con EMCI en general. Posteriormente *Wu et al.* [2002] estudiaron la interacción de NM con la magnetosfera terrestre y observaron que algunas NM que presentan funda provocan tormentas de dos pasos.

Al revisar los registros de las NM y los registros del índice Dst de 1996 al 2002, encontramos 6 eventos que presentaron tormentas geomagnéticas de dos pasos, como la que mostramos en la figura 3.9, debidas a una funda seguida de una NM.

De la configuración magnética para los eventos de tormentas de dos pasos, encontramos que este tipo de tormentas no tienen una preferencia relacionada con la distribución del campo magnético adentro de las NM, ya que la primera caída es ocasionada por las fundas con Bz sur, y la segunda resulta de una configuración Bz sur en la NM, ya sea adelante o atrás de ésta.

En la tabla 7 se muestra la distribución del campo magnético adentro de las NM y de las fundas. La primera letra indica la orientación del campo magnético en la componente z de la funda, la segunda letra indica la distribución del campo magnético en la parte delantera de la NM y la última letra indica la distribución del campo magnético en la parte trasera de la NM.

Se observa que las tormentas de dos pasos requieren que la distribución del campo magnético de la funda sea sur.

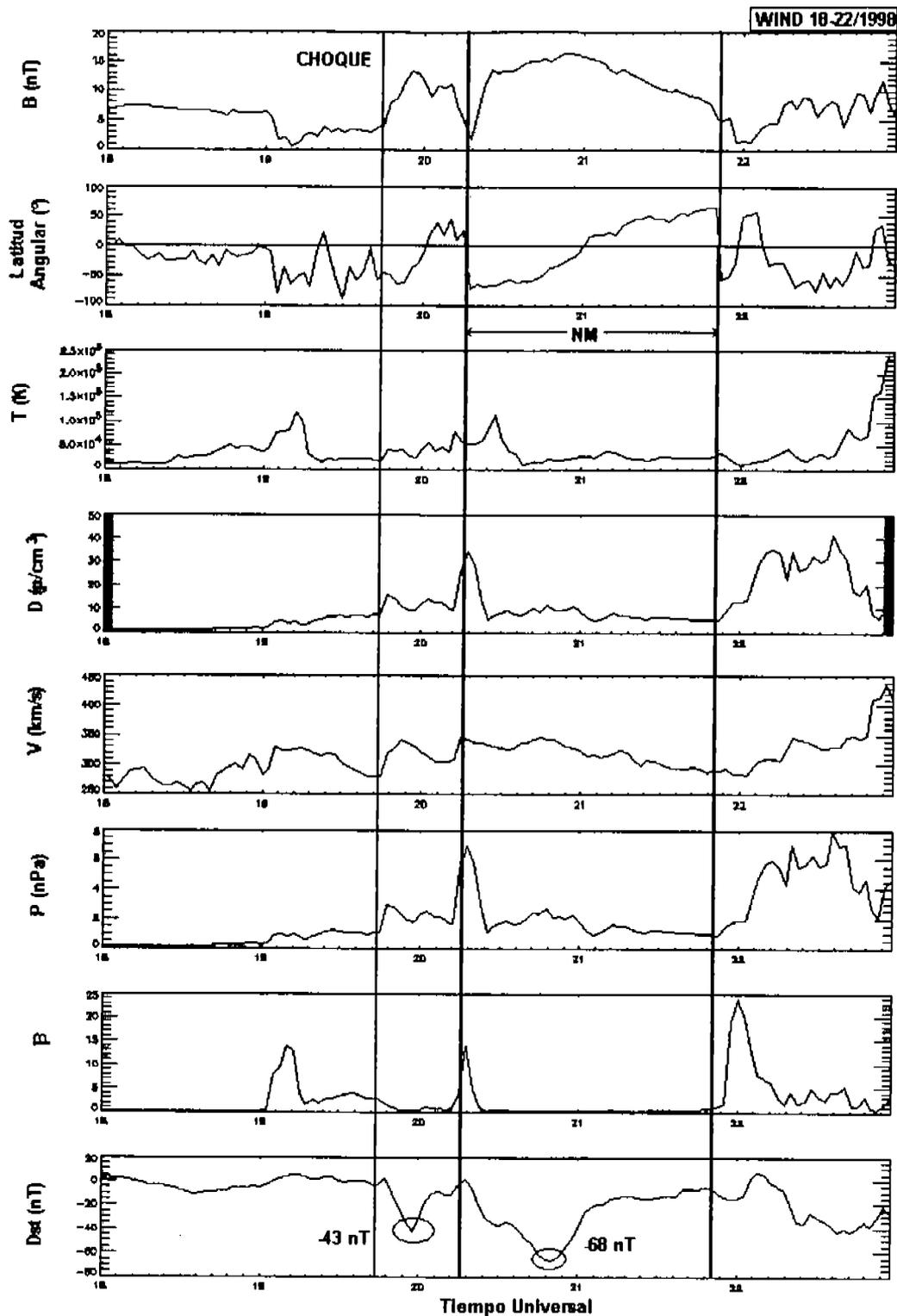


Figura 3.9 Tormenta de dos pasos. Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 18 al 22 de agosto de 1998. La NM está delimitada por las líneas gruesas, este evento presenta choque, el cual está indicado por la primera línea. Entre el choque y el inicio de la NM (primera línea gruesa), está la región de la funda. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^3 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma (presión térmica entre presión magnética), y el índice Dst (nT). En este registro la NM provocó una caída en el Dst de -68 nT, la cual es mayor a la primera caída provocada por la funda ($Dst = -43$ nT).

Tabla 7. Tormentas de dos pasos

Caídas del índice Dst causados por la funda (nT)	Caídas del índice Dst causados por NM (nT)	Distribución del campo magnético
-55	-68	SSS
-105	-150	SSS
-30	-83	SNS
-70	-105	SNS
-43	-68	SSN
-120	-152	SSN

La tabla presenta los valores mínimos de la caída del índice Dst en la fase principal de la tormenta. La primera columna muestra los decrementos del índice Dst provocados por la funda. La segunda columna son los valores de la caída del índice Dst causados por las NM, y la última columna muestra la distribución del campo magnético de los eventos. En esta columna la primera letra S indica la orientación del campo en la funda, la segunda indica la orientación del campo magnético en la parte delantera de la NM, y finalmente la última letra indica la orientación del campo magnético en la parte trasera de la NM. Las tormentas geomagnéticas de dos pasos no presentan una preferencia por la distribución del campo magnético adentro de la NM, es decir, la primera caída se da porque la funda tiene un campo magnético orientado hacia el sur, pero la segunda caída no depende de si la orientación del campo se presenta en la parte delantera o trasera de la NM.

3.3 Casos particulares

Al revisar los registros de las nubes magnéticas y ver su geoelectividad observamos que no siempre la caída en el índice Dst es causado por la NM, en ocasiones la tormenta es provocada únicamente por la funda, como el registro que mostramos en la figura 3.10. En donde el campo magnético adentro de la NM tiene una componente Bz sur al inicio por un corto tiempo y norte durante prácticamente toda su duración, por otro lado, la funda tiene una componente Bz sur a lo largo de toda su región, siendo así esta la que interactúa geoelectivamente.

Dentro de las 50 nubes magnéticas estudiadas en este capítulo encontramos 9 eventos en donde solamente la funda provocó la tormenta geomagnética. El valor mínimo del Dst promedio para estos eventos es de -127 nT, lo cual está en el conjunto de las tormentas de intensidad extremas.

Esto resalta la importancia de estudiar la geoelectividad haciendo un análisis de los eventos que incluyen un choque, una funda y una EMCI, que en nuestro caso dentro de las EMCI sería el subconjunto de NM, y muestra que las perturbaciones geomagnéticas no sólo son provocadas por las EMCI, sino que pueden ser generadas por regiones cercanas a estas, como las fundas que estudiamos en este trabajo.

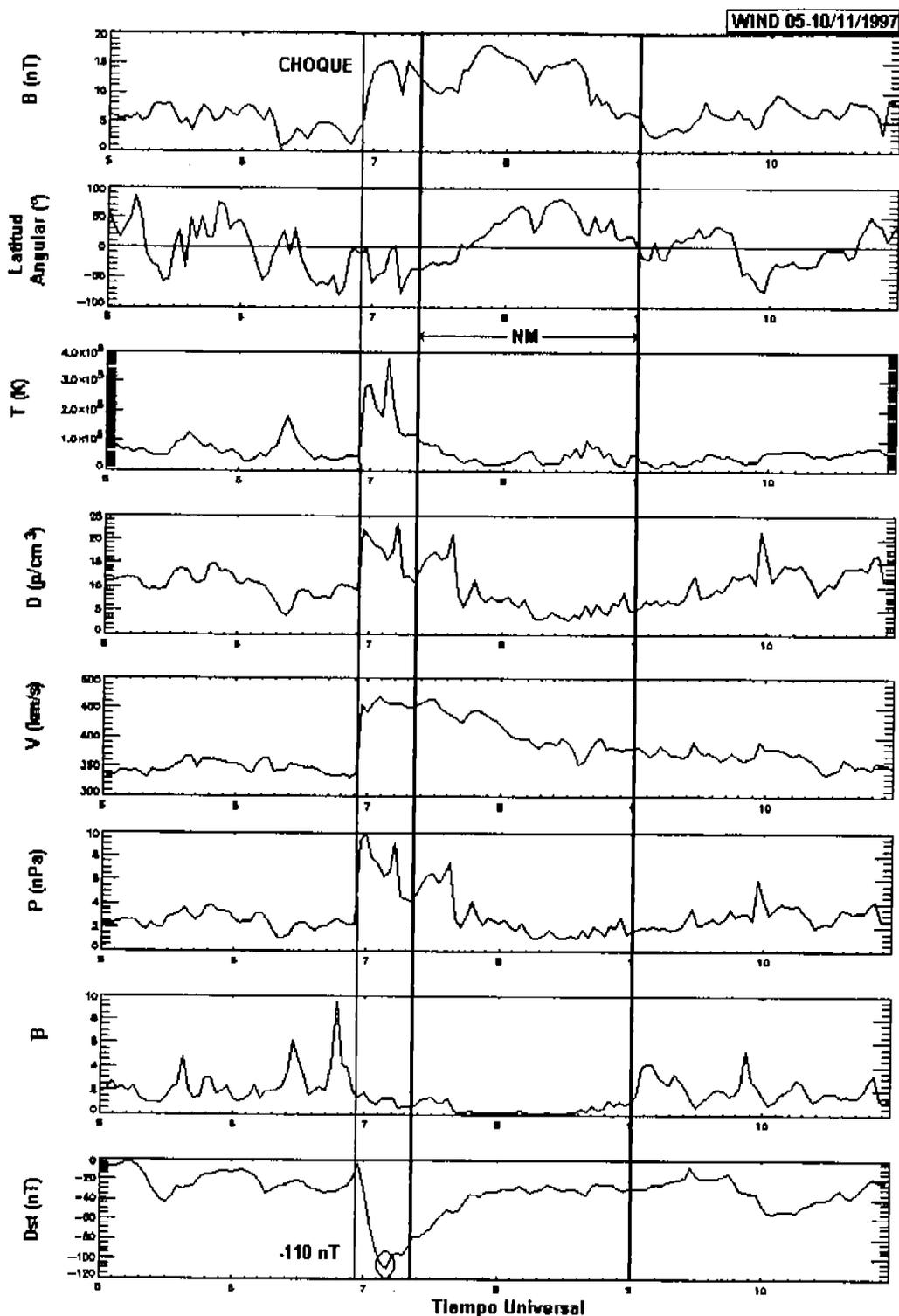


Figura 3.10 Tormenta causada únicamente por la región de la funda. Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 05 al 10 de noviembre de 1997. La NM está delimitada por las líneas gruesas, este evento presenta choque, el cual está indicado por la primera línea. Entre el choque y el inicio de la NM (primera línea gruesa), está la región de la funda. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma (presión térmica entre presión magnética), y el índice Dst (nT). En este registro la funda provocó una caída en el Dst de -110 nT.

Actualmente las naves espaciales nos permiten conocer más sobre el espacio que rodea a nuestro planeta. En general el trabajar con los datos de las naves espaciales nos da la oportunidad de identificar a las eyectas que se propagan en el MI hacia la Tierra, y así analizarlas y clasificarlas.

Uno de los fines de esta clasificación es asociar a las eyectas con perturbaciones que se manifiestan a nivel geomagnético.

En este trabajo hemos mostrado que una interacción será geoefectiva si la eyecta tiene una componente Bz sur, ya que las líneas de la magnetosfera que se encuentran en la nariz tiene una orientación norte y por lo tanto una reconexión magnética ocurre entre las líneas de la eyecta y las líneas de la magnetosfera en esta región. La reconexión magnética permite la entrada de material de la eyecta hacia la magnetosfera terrestre provocando perturbaciones a nivel geomagnético.

Al estudiar la orientación del campo magnético de los eventos, pudimos asociar la interacción de la componente Bz sur de las eyectas con un decremento en el índice Dst. Sin embargo, es importante señalar que al observar los registros de la orientación del campo magnético de las eyectas encontramos algunos eventos en particular, como el que mostramos en la figura 3.10 y en la figura siguiente (3.11).

Por ejemplo, al evento de la figura 3.11 se le pueden asociar dos decrementos en el índice Dst, o lo que sería una tormenta de dos pasos de acuerdo con los requisitos que deben cumplir las caídas, mencionados en la sección 3.2.3.

En la figura 3.11 la primera caída está relacionada en tiempo con la región de la funda la cual está delimitada por la primera línea y la primera línea gruesa. La segunda caída está relacionada con la NM delimitada por las líneas gruesas.

A pesar de que toda la región de la funda tiene una componente Bz norte, ésta registra una interacción geoefectiva ($Dst = -75$ nT); lo cual nos hace pensar que la orientación del campo magnético de la funda al pasar por la nave fue registrada como norte en ese momento, pero debido a que las estructuras de las eyectas y regiones asociadas (funda y choque) son muy grandes y tridimensionales, y a que la nave sólo observa en una dirección; consideramos que en alguna parte de la funda la componente del campo magnético Bz fue sur y fue esta la región que interaccionó geoefectivamente.

Si recordamos que el índice Dst mide la perturbación geomagnética global a bajas latitudes, en la asociación que queramos hacer entre las componentes de las eyectas observadas por las naves y el índice Dst, tendremos en algunos casos una alta incertidumbre, debido principalmente a que las observaciones de las naves son generalmente en un sólo corte, es decir, observan únicamente una parte de la eyecta, y por otro lado la perturbación terrestre considera el efecto global de toda la eyecta a nivel geomagnético.

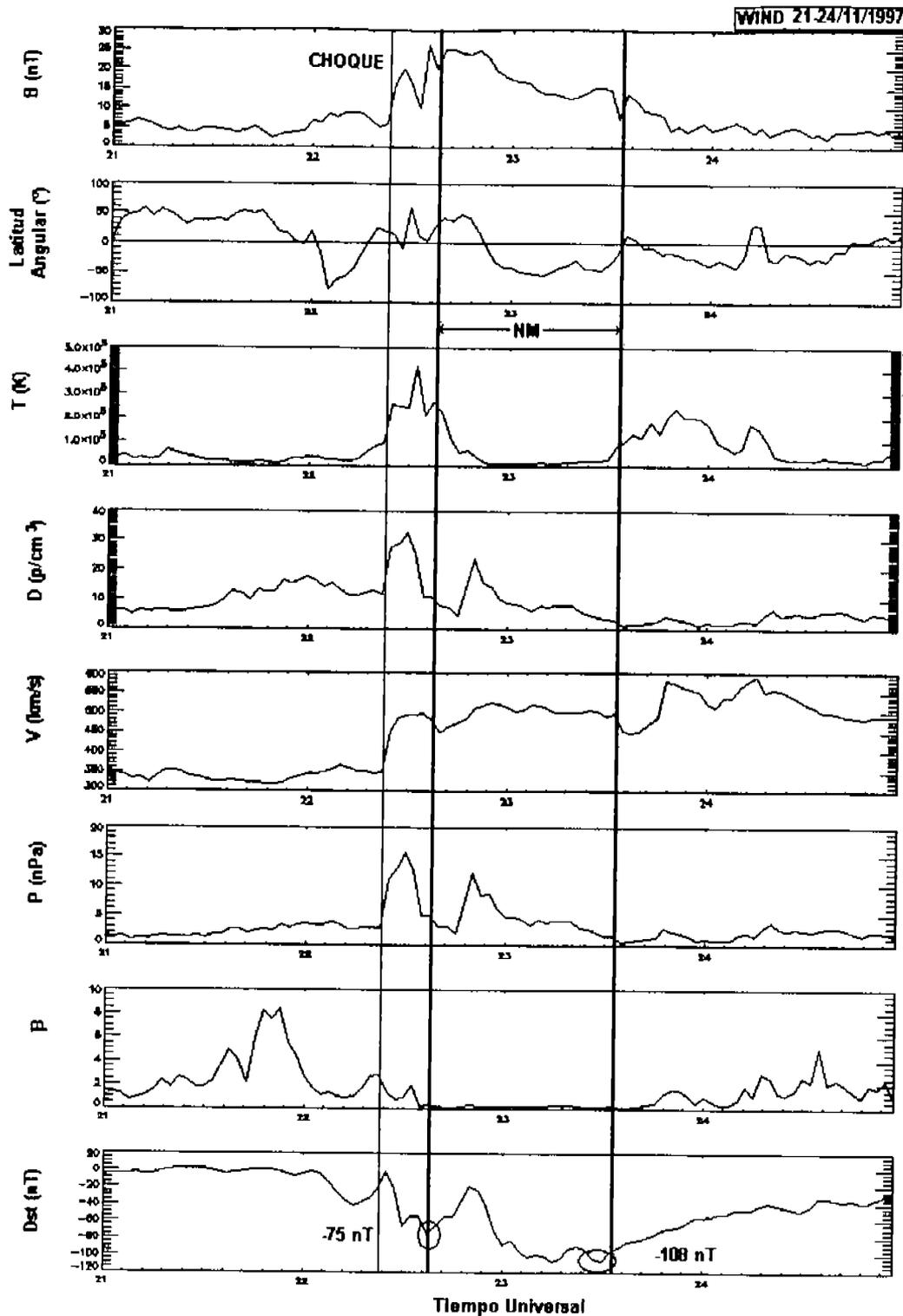


Figura 3.11 Registro de una tormenta de dos pasos causada por la funda y por la nube magnética. Los datos fueron detectados por la nave WIND del 21 al 24 de noviembre de 1997. La NM está delimitada por las líneas gruesas, este evento presenta choque, el cual está indicado por la primera línea. Entre el choque y el inicio de la NM está la región de la funda. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma (presión térmica entre presión magnética), y el índice Dst (nT). En este registro la funda tiene una componente B_z norte y sin embargo provocó una caída en el Dst de -75 nT. La segunda caída en el índice es de -108 nT y es provocada por la NM con una componente B_z sur.

En la sección 3.2.3 describimos los eventos de tormentas de dos pasos, mencionamos sus características y las ejemplificamos con el evento de la figura 3.9. En esa figura la tormenta de dos pasos fue provocada por la componente Bz sur en la funda y la componente Bz sur en la NM.

Para los demás casos de tormentas de dos pasos (6 eventos), las regiones que provocaron las dos caídas en el índice Dst fueron siempre la funda y la NM.

En esta sección queremos mostrar que cuando observamos los registros encontramos otros 2 casos; en donde la tormenta de dos pasos fue provocada por la región de la NM con una componente Bz sur, más la presencia de un plasma que viene atrás de la NM con una configuración también Bz sur.

La primera figura (3.12) de estos 2 casos muestra un evento compuesto de tres regiones: una funda, la cual tiene una configuración Bz norte, una NM con una configuración Bz sur a lo largo de toda su duración, y un plasma que viene después de la NM con una configuración Bz sur.

Al observar el registro del índice Dst para esta figura las dos caídas que se presentan, y que cumplen con los requisitos para ser una tormenta de dos pasos, fueron causadas por la componente Bz sur de la NM y por la región de plasma contiguo a la NM, también con una componente Bz sur.

El plasma que se encuentra después de la NM está entre dos regiones, entre la NM y una corriente que inicia alrededor de 11 horas y media después de la NM; en donde una corriente es simplemente un viento solar que se propaga más rápido que el plasma del viento solar ambiente.

En esta figura el inicio de la corriente está indicado por la fecha en el quinto panel en donde la velocidad es de 850 km/s, la cual es más rápida que la velocidad del viento solar ambiente que se encuentra antes del choque.

En este primer caso particular lo que hace la corriente es mantener "atrapado" o confinado al plasma que está atrás de la NM. El plasma atrapado tiene una componente Bz sur al igual que el plasma en la parte inicial de la corriente. Así tanto el plasma atrapado como la parte inicial de la corriente interaccionan geoeffectivamente al igual que la NM.

En el registro la primera caída del índice Dst es de -85 nT y fue provocada por la NM. La segunda caída del índice es de -210 nT, y fue causada por la región del plasma atrapado y por la corriente en donde Bz es sur.

En la figura 3.13 tenemos un registro muy parecido al de la figura 3.12. El evento consta también de tres regiones: una funda, en donde el campo magnético rota de una configuración Bz sur a una Bz norte (sur-norte), una NM con una rotación sur-norte al igual que la funda, más una región con un plasma comprimido entre la NM y la corriente, en donde la corriente inicia alrededor de 6 horas después de la NM.

El inicio de la corriente está indicado por la flecha del quinto panel en donde la velocidad es de 520 km/s. La corriente comprime al plasma de adelante debido a que éste viaja más lento. La configuración del campo magnético del plasma comprimido es Bz sur a lo largo de toda su duración.

Así las dos interacciones geoeffectivas son causadas por la NM, la cual provoca una caída en el índice Dst de -50 nT y por el plasma comprimido, el cual provoca la segunda caída de -98 nT en el índice Dst.

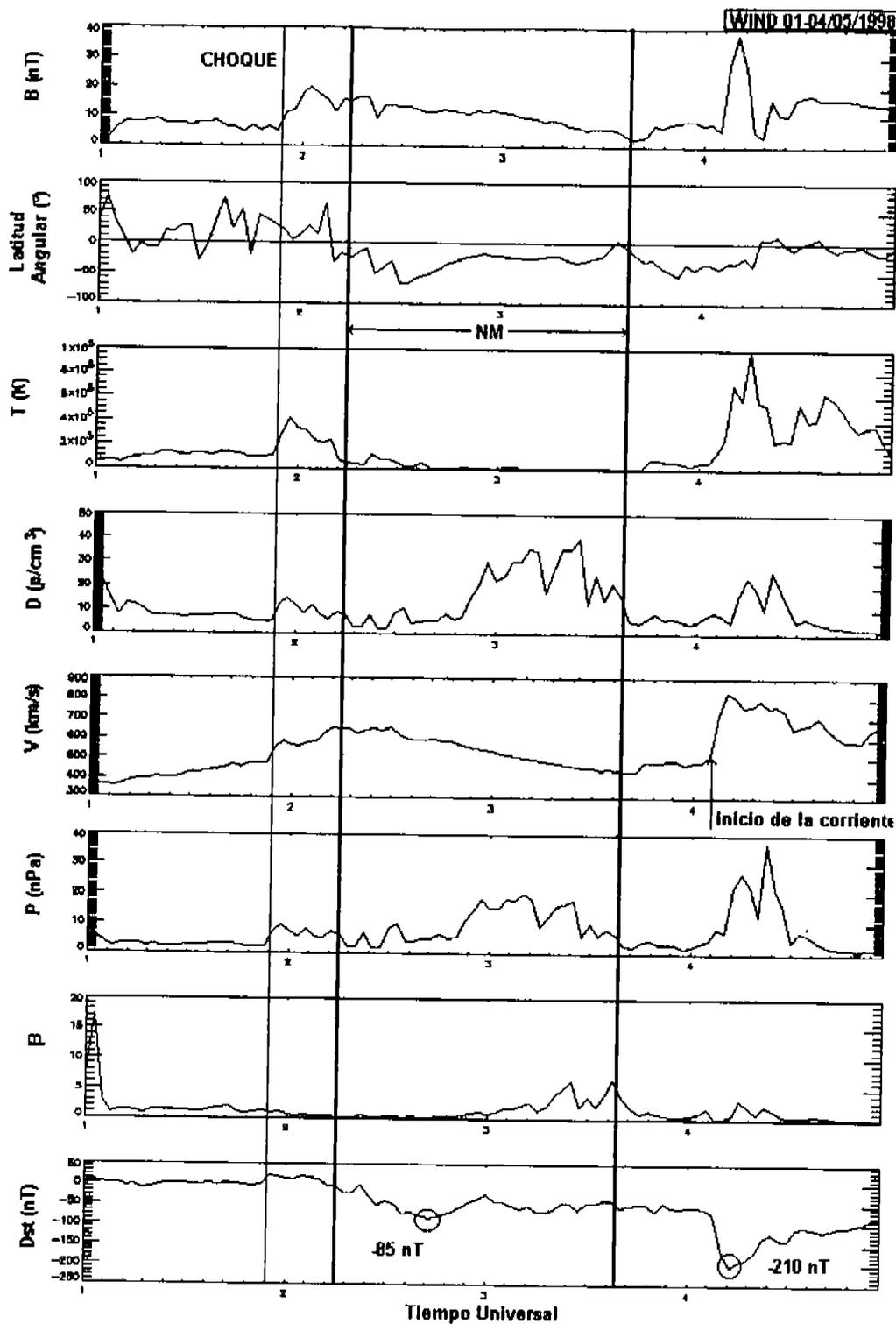


Figura 3.12 Registro de una tormenta de dos pasos causada por la NM y la corriente después de la misma. Los datos fueron detectados por la nave WIND del 1 al 4 de mayo de 1998. La NM está delimitada por las líneas gruesas y la corriente inicia 10:46 minutos después de la NM. El inicio de la corriente está indicado por la flecha. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma, y el índice Dst (nT). En este registro la primera caída en el índice Dst fue causada por la NM ($Dst = -85$ nT), y la segunda ($Dst = -210$ nT) por el plasma "atrapado" y por la parte delantera de la corriente en donde hay una configuración B_z sur.

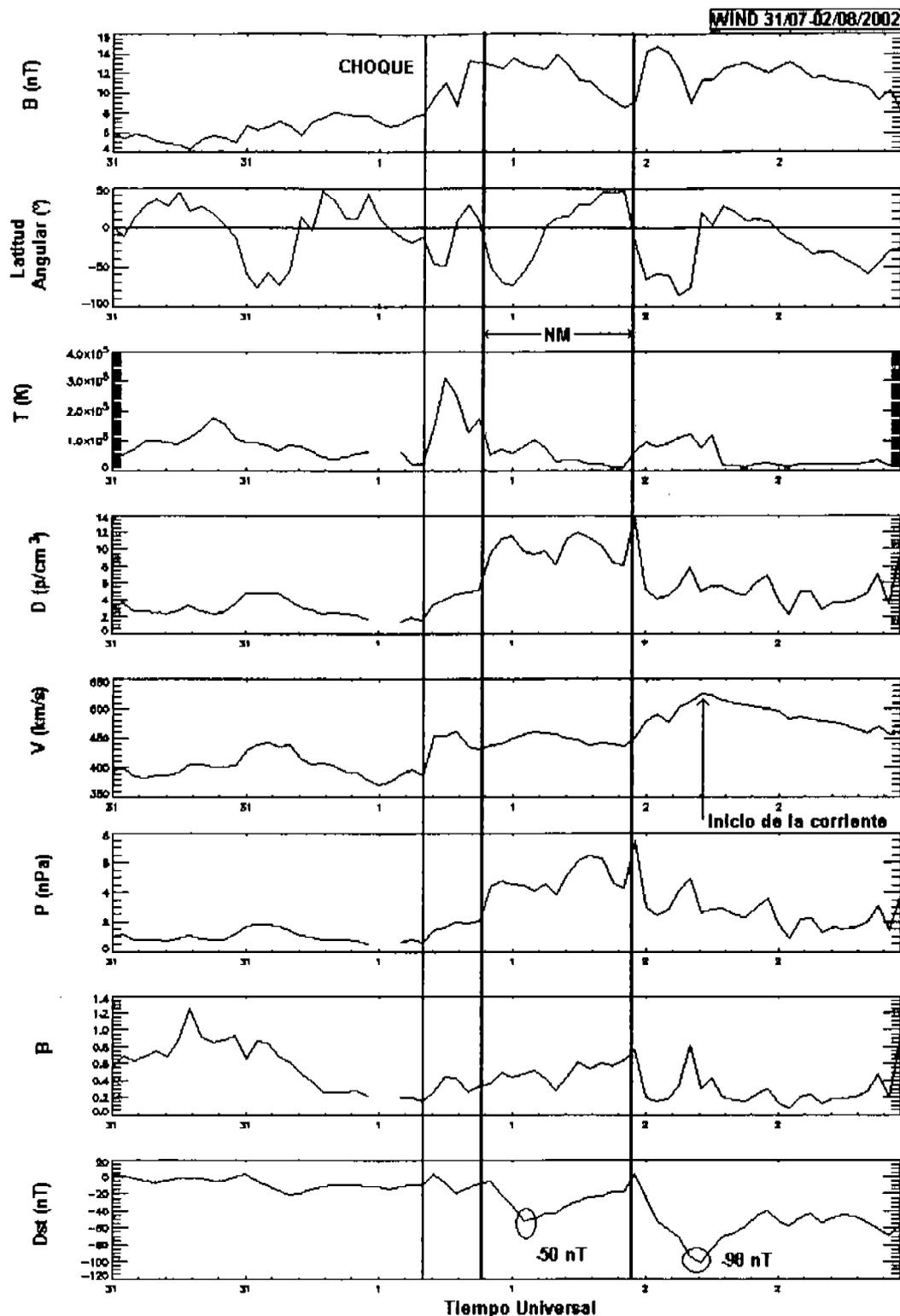


Figura 3.13 Registro de una tormenta de dos pasos causada por la NM y el plasma comprimido. Los datos fueron detectados por la nave WIND del 31 de julio al 2 de agosto del 2002. La NM está delimitada por las líneas gruesas, y la corriente inicia alrededor de 5:53 minutos después de la NM. El inicio de la corriente está indicado por la flecha del 5° panel. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma, y el índice Dst (nT). En este registro la primera caída en el índice Dst fue causada por la NM ($Dst = -50$ nT), y la segunda ($Dst = -98$ nT) por el plasma comprimido que se encuentra después de la NM, en donde el campo magnético tiene una configuración B_z sur.

3.4 Tormentas de tres pasos

En la figura 3.14 mostramos un evento que proponemos como una tormenta de tres pasos, los cuales cumplen con los tres requisitos que debe cumplir una tormenta de dos pasos, sólo que ahora no tenemos dos decrementos en el índice Dst sino tres.

El evento está formado de: una funda con una configuración muy cercana a un $B_z = 0$, es decir, no muestra una rotación apreciable sobre el eje z ; una NM con una configuración norte-sur, y una corriente que inicia justo en donde termina la NM, en donde el inicio de esta región tiene una configuración B_z sur.

La primera caída en el índice $Dst = -146$ nT es causada por la NM en donde el campo magnético tiene una componente B_z sur. La segunda caída en el índice $Dst = -170$ nT es causada por la configuración del campo magnético al inicio de la corriente.

Al continuar observando la configuración del campo magnético de la corriente, después de la configuración B_z sur en su inicio, la configuración del campo magnético es B_z norte y después es otra vez B_z sur.

En este registro lo que hace la región de la corriente en donde B_z es norte es separar dos regiones que interactúan geoefectivamente. Esta separación se refleja al observar el registro del índice Dst, ver último panel, en donde la segunda configuración B_z sur de la corriente interacciona geoefectivamente, provocando un decremento en el índice Dst de -180 nT, el cual está separado por 6 horas de la segunda caída.

Se observa que en el registro las caídas son cada vez más geoefectivas, están separadas por más de tres horas y no existen impulsos repentinos entre ellas (-146 nT > -170 nT > -180 nT). Al igual que las tormentas de dos pasos, estas tres características son requisitos que deben cumplir las caídas del índice Dst.

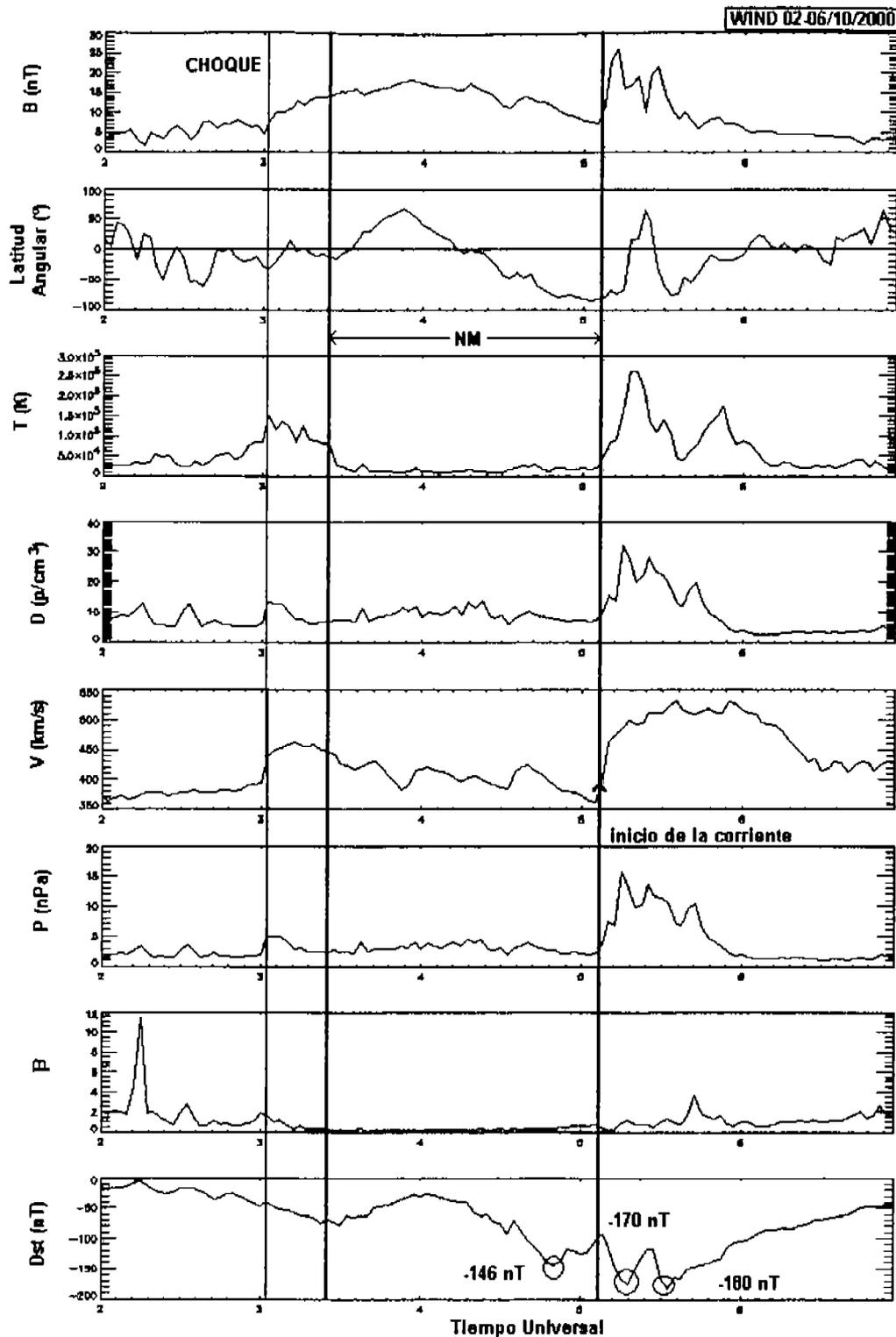


Figura 3.14 Registro de una tormenta de tres pasos causada por la NM y por la corriente contigua a la misma. Los datos fueron detectados por la nave WIND del 2 al 6 de octubre del 2000. La NM está delimitada por las líneas gruesas y la corriente inicia justo después de la NM. El inicio de la corriente está indicado por la flecha en el 5º panel. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^{\circ}$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma, y el índice Dst (nT). En este registro la primera caída en el índice Dst fue causada por la NM (-146 nT), la segunda (Dst = -170 nT) por la primera configuración B_z sur de la corriente, y la tercera caída (Dst = -180 nT) por la segunda configuración B_z sur de la corriente.

3.5 Conclusiones

1.- Las nubes magnéticas con una configuración Bz sur resultaron no ser significativamente más geoefectivas que las nubes magnéticas con una configuración Bz sur-norte.

2.- Las fundas con una configuración Bz sur incrementan la interacción entre las NM y la magnetosfera terrestre. Este comportamiento se hace más evidente cuando estudiamos a las NM con una configuración Bz sur-norte.

3.- Las tormentas de dos pasos se presentan en la fase principal de la tormenta, y son generadas por las fundas que tienen una configuración Bz sur seguidas de una NM con una configuración Bz sur en algún lugar adentro de ella.

Los resultados nos muestran que la funda y las NM en conjunto pueden provocar caídas fuertes en los registros del índice Dst.

4.- No siempre las tormentas son causadas por las NM. En algunas ocasiones las fundas son las únicas regiones que interactúan geoefectivamente con la magnetosfera terrestre.

5.- Al estudiar la orientación del campo magnético de los eventos observamos que existen casos en donde:

a) no siempre de las mediciones *in situ* podemos observar la parte del plasma en el medio interplanetario que interactúa geoefectivamente. Principalmente porque la nave sólo observa en una dirección de estas estructuras de gran escala, y los índices que miden la perturbación terrestre consideran los efectos globales de toda la eyecta a nivel geomagnético.

b) las tormentas de dos pasos no son siempre causadas por la región de la funda y de la nube magnética, sino en ocasiones existe una interacción geoefectiva debida al plasma que viene atrás de la nube magnética, relacionada con un viento solar que se propaga a velocidades más grandes que las del viento solar ambiente, llamada corriente.

Sin embargo, para tener una interacción geoefectiva relacionada con dos o más decrementos en el índice Dst, en los registros que estudiamos en este trabajo, está siempre presente una NM con una configuración Bz sur en alguna parte de su región.

6.- El conjunto de una funda, una NM y una corriente atrás de la NM, puede interactuar geoefectivamente, produciendo tormentas de tres pasos.

Capítulo 4

4.1. Cuantificación de la geoeffectividad

El hecho de que la nave WIND este ubicada en L1²¹ y observe de manera prácticamente continua en la misma dirección, hace que los datos de los registros de la nave estén en general relacionados con las observaciones del medio interplanetario que se encuentra aproximadamente a $4 R_T$ enfrente de la magnetopausa. Esto nos permite estudiar a las perturbaciones en el MI y asociarlas con la interacción que puede existir entre la eyecta y la magnetosfera terrestre.

En particular las eyectas que hemos venido analizando a lo largo del trabajo son las nubes magnéticas (NM), y el interés de estudiar a estas estructuras es principalmente porque tienen un campo magnético incrementado y en algunos casos tienen una componente Bz sur por un largo tiempo. Esta polaridad hace que las líneas de la NM interaccionen con las líneas de la magnetosfera terrestre por medio de una reconexión entre las líneas magnéticas de la NM y las de la magnetosfera, lo que permite que la NM interaccione con la magnetosfera geoeffectivamente.

En general cuando ocurre la reconexión magnética entre el campo magnético de la eyecta y la magnetosfera, se libera mucha energía, más de un millón de Watts (<http://www.antarctica.ac.uk>), la cual se transfiere a través de la magnetosfera terrestre. Mucha de esta energía es depositada en la atmósfera de los polos terrestres a varios cientos de kilómetros de altitud, causando las auroras polares. Por otro lado esta energía perturba al entorno geomagnético provocando tormentas geomagnéticas que tienen efectos a diferentes latitudes.

En este trabajo utilizamos el índice de actividad geomagnética Dst, el cual es reportado por las estaciones alrededor del mundo que están ubicadas en latitudes bajas, y mide el promedio de la componente horizontal del campo geomagnético (H).

En este estudio relacionamos las NM de nuestra muestra con los valores del índice Dst, para encontrar un cuantificador que a través de las observaciones *in situ* de la nave WIND se relacione con la geoeffectividad reportada por el índice Dst durante el periodo de 1996 al 2002.

El cuantificar la geoeffectividad a partir de los datos de las naves espaciales no es un trabajo simple, de hecho actualmente representa un reto para los científicos. Sin embargo, como es un problema que lleva latente ya unas décadas existen trabajos publicados desde hace ya tiempo.

En particular en 1975 R. K. Burton y colegas de la Universidad de California publicaron uno de los primeros artículos en donde a partir de datos de mediciones *in situ* proponen una relación entre las condiciones del medio interplanetario y el índice Dst.

Los valores del viento solar que utilizaron fueron la velocidad, la densidad, y la componente del campo magnético Bz en la dirección norte-sur. Con estos valores hicieron un algoritmo para calcular la presión dinámica y predecir así las firmas del índice Dst correspondientes a siete tormentas geomagnéticas de 1967 a 1968.

²¹ L1 está a $235.18 R_T$ de la Tierra, en donde $1 R_T = 6378.14$ km

Uno de los artículos más recientes que muestra una manera sencilla para cuantificar la geoelectividad y que incluye las ideas interesantes de otros autores²², es el de *Wang et al.* [2003]. Nuestro interés en este artículo es también porque trabajan con los datos de las naves espaciales WIND y ACE, las cuales se encuentran operando actualmente y una de ellas es la nave con la que hemos desarrollado este trabajo.

Wang et al. [2003] proponen una fórmula que relaciona la intensidad de las tormentas geomagnéticas con tres parámetros interplanetarios: velocidad (V), magnitud promedio de la componente $|-Bz|$, y el intervalo de tiempo que existe entre el valor máximo de $|-Bz|$ y el valor mínimo del índice Dst, al cual han nombrado Δt .

De estos tres parámetros se componen los dos cuantificadores propuestos por *Wang et al.*: $\langle -VBz \rangle$ y Δt .

En la fórmula del campo eléctrico convectivo $\langle -VBz \rangle$, V es el valor promedio durante el intervalo en donde la componente Bz es sur, y sólo se consideran los valores en donde $-VBz \geq 0.05$ [Volts⁻³/metro]. Este valor fue sugerido por *Burton et al.* [1975] y garantiza que a partir de ese valor existe ya una actividad geomagnética al menos de baja intensidad (-20 nT).

Wang et al. [2003] identifican tormentas geomagnéticas a partir de los datos del índice Dst y posteriormente los relacionaron con los eventos en el MI que produjeron dicha actividad y midieron los tres parámetros interplanetarios: velocidad (V), valor máximo de $|-Bz|$, y Δt .

Por otro lado, *Wu et al.* [2002] proponen el valor de $-Bz_{max}$ (el valor máximo de $|Bz|$ cuando esta componente es sur) como un cuantificador para la geoelectividad, ya que en sus resultados muestran que el valor de $-Bz_{max}$ tiene una buena correlación con el índice Dst.

En particular *Wu et al.* trabajaron con NM observadas por la nave espacial WIND, durante los primeros 4 años de su misión y obtuvieron un $CC^{23} = 0.77$ entre $-Bz_{max}$ y el índice Dst; por lo que en este trabajo hemos incluido el valor de $-Bz_{max}$ como otro cuantificador en el análisis, en donde $-Bz_{max}$ en este trabajo es la magnitud del campo $|B|$ cuando $-Bz$ es máxima.

A diferencia del trabajo de *Wang et al.* [2003] en donde consideran todo tipo de EMCI en el MI relacionado con los decrementos en el índice Dst; en nuestro análisis consideramos el conjunto de NM que hemos venido analizando en el trabajo y las relacionamos con el índice Dst.

Para buscar un cuantificador que se relacione con la actividad geomagnética separamos los eventos en tres grupos:

- 1) nubes magnéticas que provocaron la caída en el registro del índice Dst (34 eventos)
- 2) eventos en donde la funda fue la única región geoelectiva (9 eventos), y
- 3) eventos de tormentas de dos pasos en donde la funda fue la región que produjo la primera caída en el índice Dst (6 eventos).

²² Zinder et al. [1963]; Russell et al. [1974]; Burton et al. [1975]; Kamide et al. [1998]; Cane et al. [2000]

²³ CC = coeficiente de correlación

Es importante señalar que la caída en el índice Dst que consideramos para comparar con el cuantificador es únicamente la primera caída, ya que la segunda no es representativa para este análisis (*Wang et al.*, 2003).

Tomando en cuenta los resultados del capítulo anterior, ahora sabemos que la actividad geomagnética está relacionada con la región en donde existe una componente Bz sur en la NM o en la funda, por lo que en este capítulo trabajamos con los siguientes parámetros adentro de las NM o de las fundas: la magnitud total de $|B|$ cuando Bz es sur, el intervalo de tiempo que existe entre el valor máximo de -Bz y el valor mínimo del índice Dst (Δt), la velocidad (V), y la duración de la componente Bz en dirección sur, Δt_{B_s} ²⁴.

El campo eléctrico convectivo se calcula como $(-VBz)_{\max} = (V_{\max})(-Bz_{\max})$, en donde V_{\max} es la velocidad máxima relacionada con la región que interactúa geoelectivamente (en donde Bz es sur) y $-Bz_{\max}$ es el valor de la magnitud del campo magnético cuando -Bz alcanza su valor máximo, ver figura 4.1. En la figura la dirección del campo magnético en la componente z se observa en el ángulo de la latitud, el cual es un ángulo sobre el eje z.

Así para el análisis tenemos cuatro cuantificadores para relacionarlos con los valores del índice Dst: $-Bz_{\max}$, Δt , Δt_{B_s} , y $(-VBz)_{\max}$.

En todos los eventos de la muestra se cumplió que durante todo el intervalo Δt_{B_s} , $VBz \geq 0.05$ mV/m, satisfaciendo el criterio de *Burton et al.* [1975], en donde la velocidad es la promedio a lo largo del intervalo donde Bz es sur y no la máxima (V_{\max}).

Las figuras 4.1 y 4.2 ejemplifican cómo evaluamos los parámetros: $-Bz_{\max}$, Δt_{B_s} , velocidad máxima (V_{\max}), y Δt .

El evento de la figura 4.1 es una NM que no presenta choque. La NM está delimitada por las líneas sólidas verticales y la zona oscura al inicio de NM es la región en donde el campo magnético tiene una configuración -Bz.

En el evento el valor de la magnitud del campo magnético cuando -Bz es máxima es $-Bz_{\max} = 15.5$ nT, como se muestra en el primer panel.

En el segundo panel el valor de $\Delta t_{B_s} = 12$ hrs 50 min. La velocidad máxima como se muestra en el quinto panel es $V_{\max} = 480$ km/s.

En general en todos los eventos del análisis obtuvimos que $\Delta t_{B_s} > \Delta t$; en particular en este evento el valor de $\Delta t = 2$ hrs y $\Delta t_{B_s} = 12$ hrs 50 min.

²⁴ En donde -Bz se puede representar como B_s

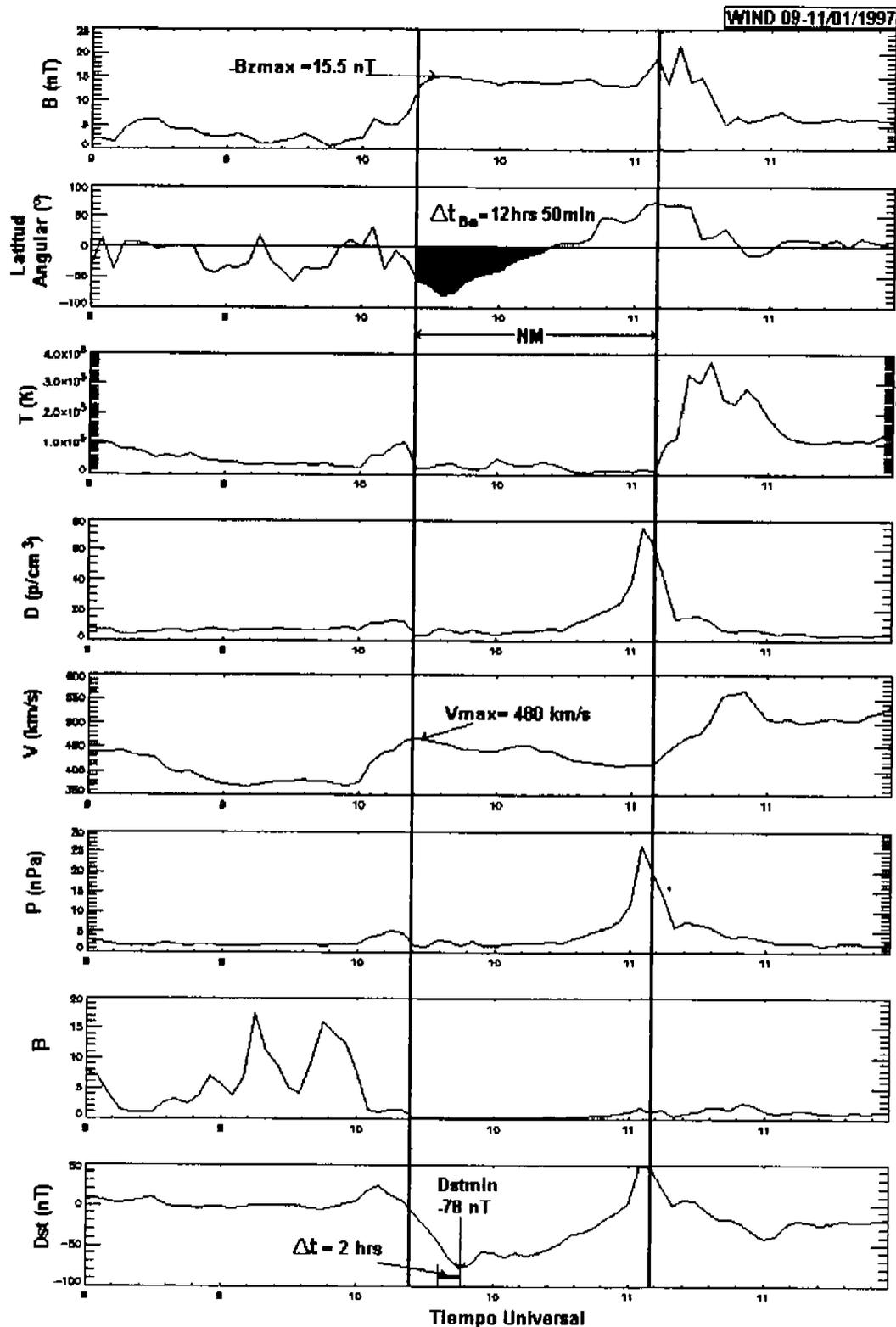


Figura 4.1 Registro de una NM detectada por la nave WIND del 09 al 11 de enero de 1997. La NM está delimitada por las líneas sólidas verticales. La zona $-B_z$ está indicada por la región oscura. Del panel superior hacia abajo se muestran los siguientes parámetros: el campo magnético total B (nT), la latitud angular ($^\circ$), la temperatura protónica T (10^5 K), la densidad de protones D (p/cm^3), la velocidad V (km/s), la presión P (nPa), la β del plasma, y el índice Dst (nT). La región de la NM en donde $-B_z$ es sur dura $\Delta t_{B_z} = 12$ hrs 50 min. La velocidad máxima es 480 km/s, y el tiempo entre el valor $-B_{zmax}$ y el valor mínimo del índice Dst (Δt) es de 2 hrs.

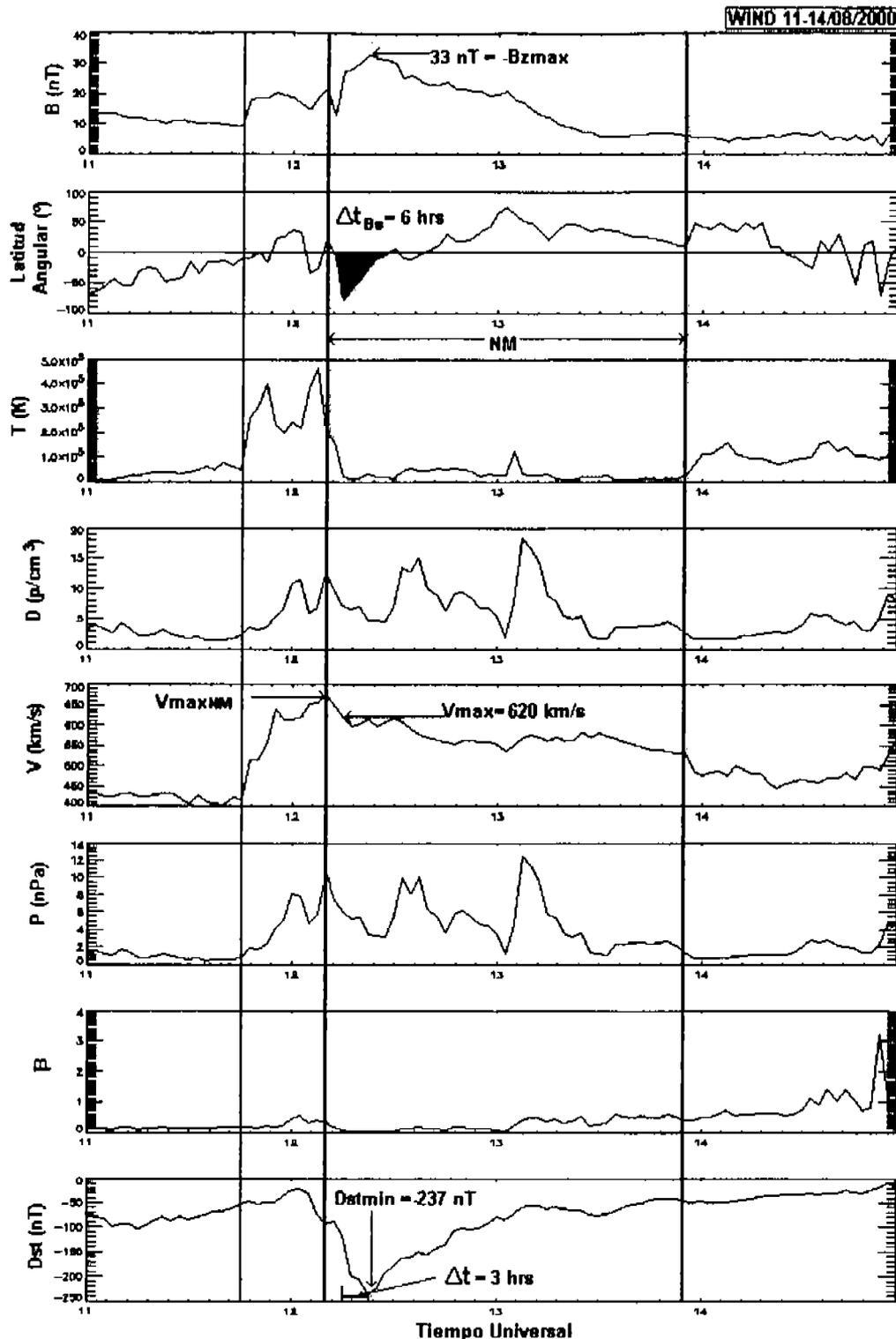


Figura 4.2 Registro de una nube magnética detectada por la nave WIND del 11 al 14 de agosto del 2000. La NM está delimitada por las líneas sólidas verticales. La primera línea vertical indica el inicio de un choque, después de este la región oscura representa la componente en donde el campo magnético es -Bz (Bs). Los parámetros del registro son los mismos que los de la figura 4.1. La región de la NM donde Bs es sur dura $\Delta t_{Bs} = 6$ hrs y el tiempo entre el valor -Bzmax y el mínimo del índice Dst (Δt) es de 3 hrs. La velocidad máxima de la NM es aproximadamente 670 km/s la cual es ligeramente mayor que la velocidad máxima en donde está la región que interacciona geoelectivamente (620 km/s).

En el evento de la figura 4.2 a diferencia de la figura 4.1, hay un choque delante de la NM, el cual está indicado en la figura por la primera línea vertical y la región de la NM está delimitada por las siguientes dos líneas verticales. Al observar el registro del índice Dst existe una primera caída provocada por la rotación de Bz con orientación sur en la funda. Esta caída resulta ser poco significativa cuando la comparamos con la caída que genera la componente Bz sur al inicio de la NM, la cual hemos indicado por medio de la zona oscura. En esta región los valores para $\Delta t_{B_s} = 6$ hrs y para $-B_{zmax} = 33$ nT. El tiempo que hay entre $-B_{zmax}$ y el valor mínimo del índice Dst es $\Delta t = 3$ hrs.

Por otro lado, esta figura muestra un ejemplo de porque hemos puesto especial cuidado en considerar en el análisis la velocidad máxima que se relaciona con la región, que hemos consideramos que interactúa geoefectivamente, y no con la velocidad máxima de la NM correspondiente a cualquier lugar de su dominio.

4.1.1 Nubes magnéticas que causaron la caída en el índice Dst

Al grupo de las NM que provocaron un decremento en el índice Dst lo dividimos en dos subgrupos: en aquellas NM que están en el intervalo de valores para el índice $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (de tormentas de baja a tormentas de alta intensidad), y las NM que provocaron una perturbación geomagnética para valores del índice $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (tormentas de extrema intensidad).

Las figuras 4.3-5 muestran los histogramas de las distribuciones de los valores de: Δt_{B_s} , Δt , $-B_{zmax}$, y $(-VB_z)_{max}$ para los dos subgrupos.

Como se muestra en la figura 4.3 tanto el cuantificador Δt_{B_s} como Δt no son buenos candidatos para el objetivo del análisis, ya que no distinguen entre perturbaciones geomagnéticas para valores del índice $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ de tormentas con valores para el índice $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$.

La figura 4.4 muestra los resultados para los valores de $-B_{zmax}$, en donde $-B_{zmax}$ no presenta valores menores a 5 nT y las distribuciones de los histogramas muestran que $-B_{zmax}$ si diferencia entre tormentas de baja a alta intensidad, de las tormentas de extrema intensidad.

Se observa que para el grupo de eventos en donde el índice es $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ existen valores que se encuentran en el intervalo $25 \text{ nT} \leq -B_{zmax} < 30 \text{ nT}$, lo que no obtuvimos para el caso de los eventos que provocaron tormentas de baja a alta intensidad ($-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$).

La figura 4.5 muestra las distribuciones de los valores para $(-VB_z)_{max}$, en donde encontramos que sus valores tienen una distribución favorable en el sentido que este parámetro distingue las diferentes intensidades de las tormentas geomagnéticas, es decir, $(-VB_z)_{max}$ distingue entre las tormentas de baja a alta intensidad, de las tormentas de extrema intensidad provocadas por las NM.

De esta figura tenemos que de los 34 eventos de NM el 35% está asociado con tormentas extremas ($\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$) y tienen un valor para $(-VB_z)_{max}$ no menor a 5 mV/m.

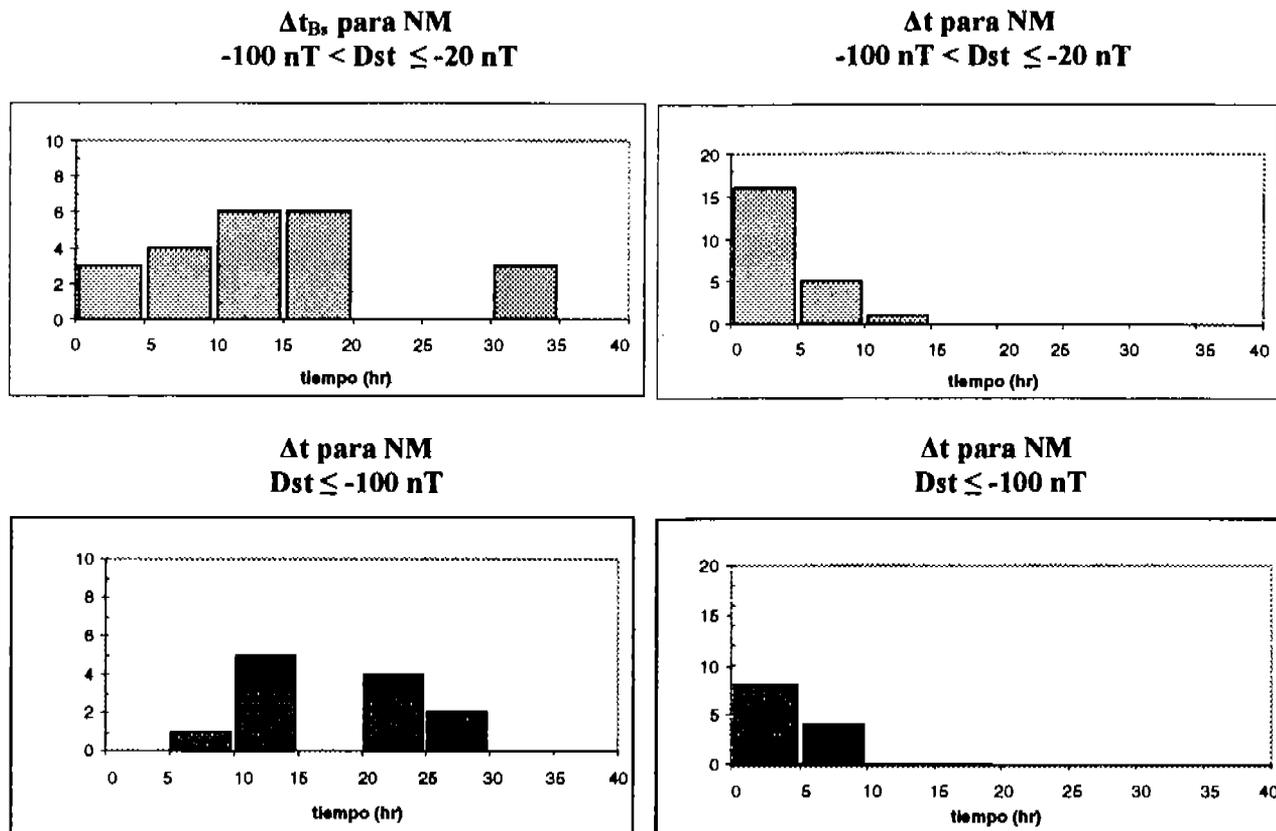


Figura 4.3 Histogramas de la actividad geomagnética reportada por el índice Dst y los cuantificadores Δt_{B_s} y Δt Vs # eventos para: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (histogramas superiores) y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (histogramas inferiores), en donde los cuantificadores resultaron no relacionarse de manera favorable con el índice Dst, ya que una NM con una configuración magnética sur durante un largo periodo Δt_{B_s} no nos garantiza una actividad geomagnética alta. El mismo resultado se aplica para el cuantificador Δt .

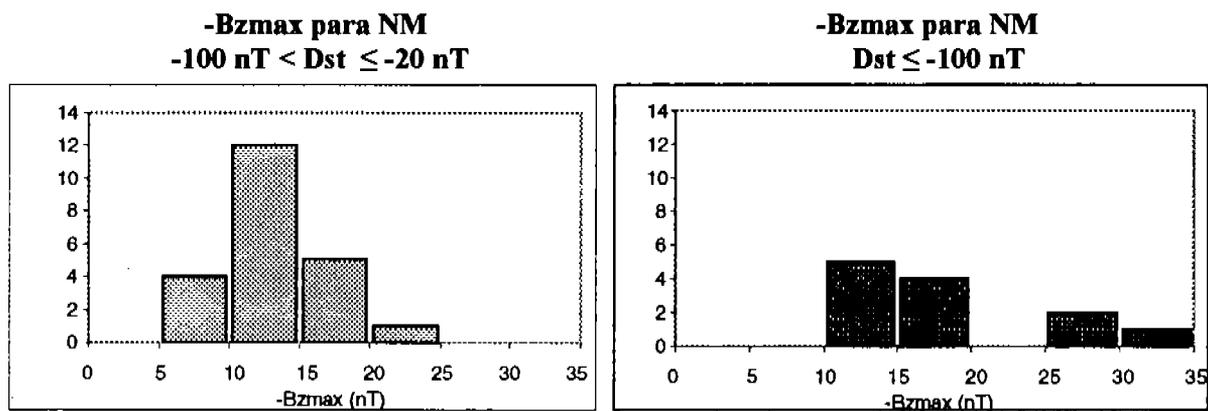


Figura 4.4 Histogramas de la actividad geomagnética reportada por el índice Dst y el cuantificador $-\text{Bzmax}$ Vs # eventos para: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$. En donde el cuantificador nos indica que cuando su valor es más alto este se relaciona con tormentas más geoeffectivas.

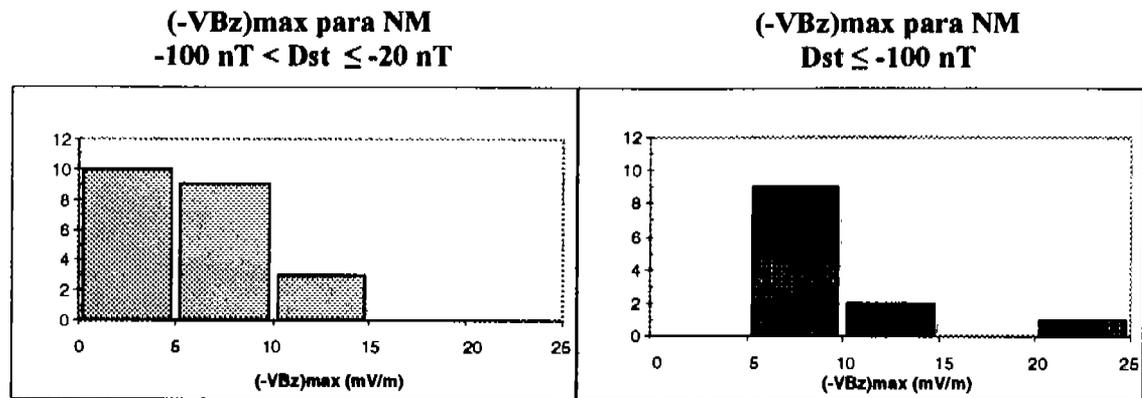


Figura 4.5 Histogramas de la geoelectividad reportadas por el índice Dst y $(-VBz)_{max}$ Vs # eventos; para los diferentes subgrupos: $-100 \text{ nT} < Dst \leq -20 \text{ nT}$ (izquierda) y $Dst \leq -100 \text{ nT}$ (derecha). En donde las distribuciones de los valores de $(-VBz)_{max}$ nos indican que cuando el valor del campo eléctrico convectivo es alto este tiende a relacionarse con tormentas extremas.

4.1.2 Fundas que causaron la única o la primera caída en el índice Dst

Como el análisis consiste en relacionar los valores de: Δt_{B_s} , Δt , $-Bz_{max}$, y $(-VBz)_{max}$, con el primer decremento en el índice Dst, hemos unido la información de las fundas que causaron la única caída en el índice Dst con las fundas que provocaron la primera caída en las tormentas de dos pasos, simplemente porque la primera caída en el Dst en todos los eventos de las tormentas de dos pasos fueron provocadas por la región de la funda, ver capítulo 3.

Este grupo a su vez lo dividimos en: eventos relacionados con tormentas de baja a alta intensidad, $-100 \text{ nT} < Dst \leq -20 \text{ nT}$, (6 eventos) y eventos relacionados con tormentas de extrema intensidad, $Dst \leq -100 \text{ nT}$, (8 eventos).

La figura 4.6 muestra las distribuciones de los valores de Δt_{B_s} y Δt para las fundas; de donde obtenemos una vez más que las distribuciones no muestran diferencia entre las tormentas de baja a alta intensidad de las tormentas extremas.

Los valores de Δt_{B_s} y Δt fueron mayores a una hora y menores a 10 horas para todas las tormentas geomagnéticas.

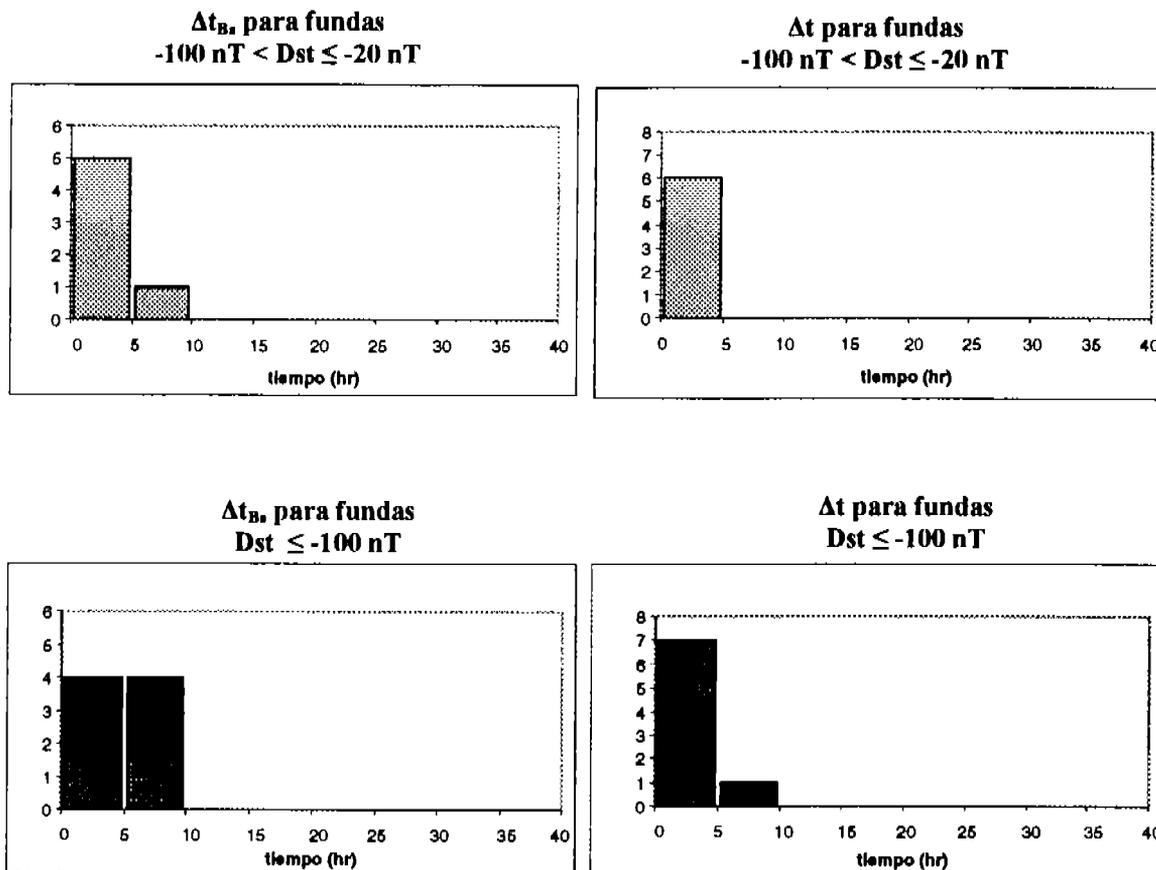


Figura 4.6 Histogramas de la geoelectividad reportada por el índice Dst y los cuantificadores Δt_{B_s} y Δt Vs # eventos para: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (histogramas superiores) y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (histogramas inferiores). En donde los cuantificadores resultaron no relacionarse de manera favorable con el índice Dst, ya que las fundas con una configuración magnética sur durante un largo periodo (Δt_{B_s}) no nos garantizan una actividad geomagnética extrema. El mismo resultado se aplica para el cuantificador Δt .

La figura 4.7 muestra las distribuciones de $-B_{z\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ para las fundas, de donde encontramos que tanto $-B_{z\text{max}}$ como $(-VBz)_{\text{max}}$ distinguen entre tormentas de baja intensidad, de tormentas extremas. En particular $(-VBz)_{\text{max}}$ hace una distinción más clara entre las intensidades de las tormentas.

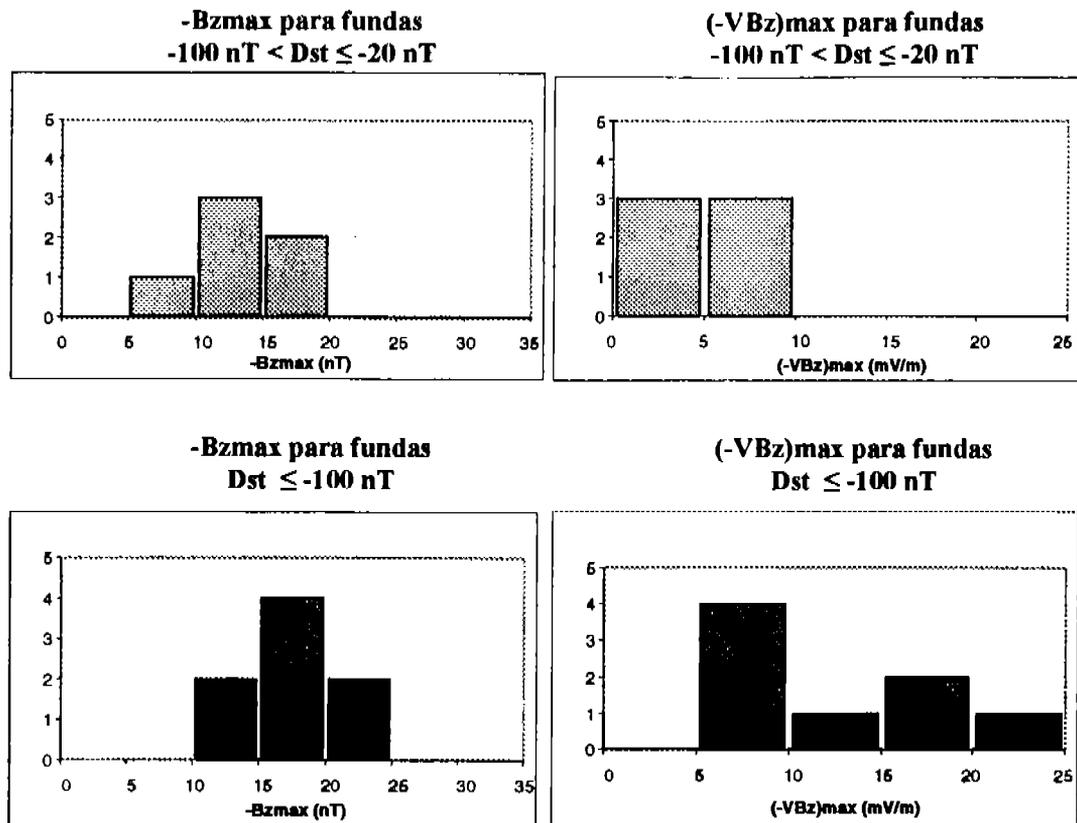


Figura 4.7 Histogramas de la actividad geomagnética reportada por el índice Dst y los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ Vs # eventos, para: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (superior) y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (inferior); en donde las distribuciones nos muestran que para valores mayores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$, estos se relacionan con tormentas más geoeffectivas.

4.1.3 Nubes magnéticas y fundas que provocaron la caída en el índice Dst

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran las distribuciones de Δt_{B_s} , Δt , $-Bz_{\text{max}}$, y $(-VBz)_{\text{max}}$ para todos los eventos, es decir, para las NM y para las fundas (49 eventos). De lo cual obtenemos los mismos resultados que cuando analizamos a las NM y a las fundas por separado.

Los valores de Δt_{B_s} y Δt no distinguen entre tormentas con valores para el índice geomagnético $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ de valores para el índice $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$. En la figura 4.9 los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ si hacen una distinción entre los diferentes valores para el índice Dst, correspondientes a tormentas de alta intensidad a baja y a tormentas de intensidad extrema.

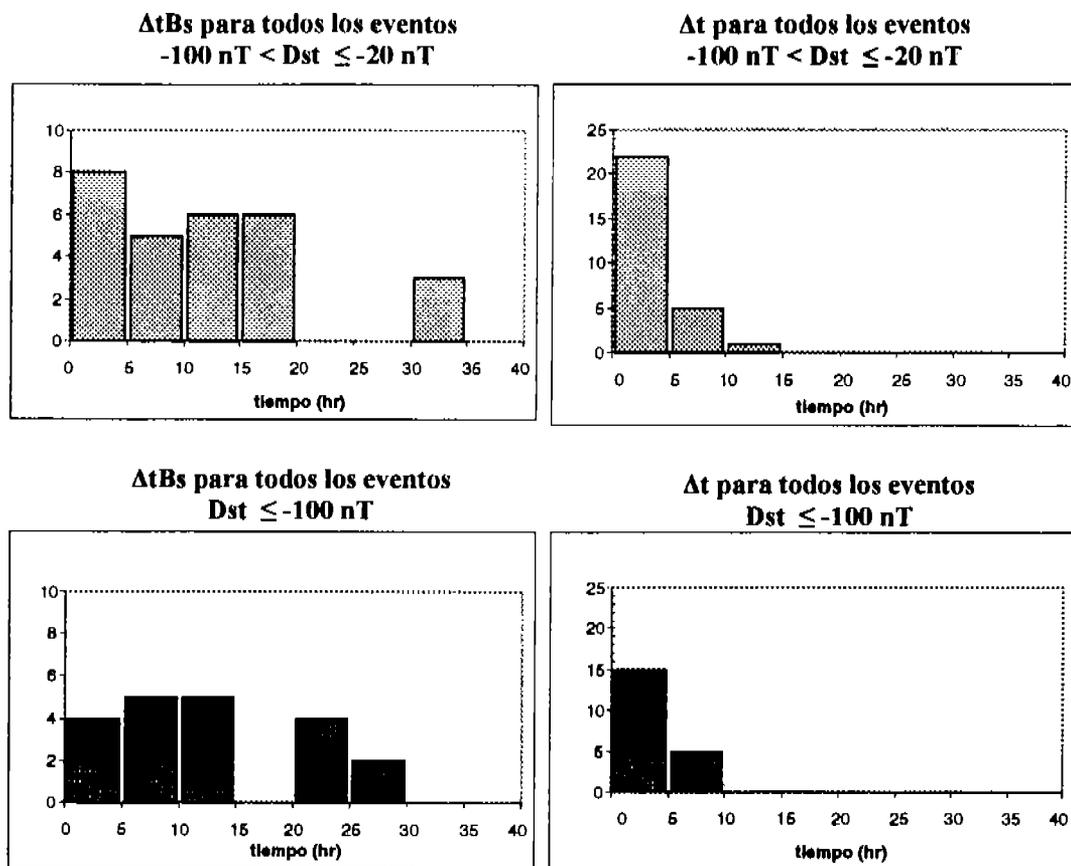


Figura 4.8 Histogramas de la geoeffectividad reportada por el índice Dst y los valores de Δt_{Bs} y Δt Vs # eventos para los diferentes valores del índice geomagnético: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (histogramas superiores) y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (histogramas inferiores), en donde los valores para Δt_{Bs} y Δt resultaron no se relacionan de manera favorable con el índice Dst, ya que todos los eventos (NM y fundas) con una configuración magnética sur durante un largo periodo (Δt_{Bs}), no nos garantizan una actividad geomagnética extrema. El mismo resultado se aplica para Δt .

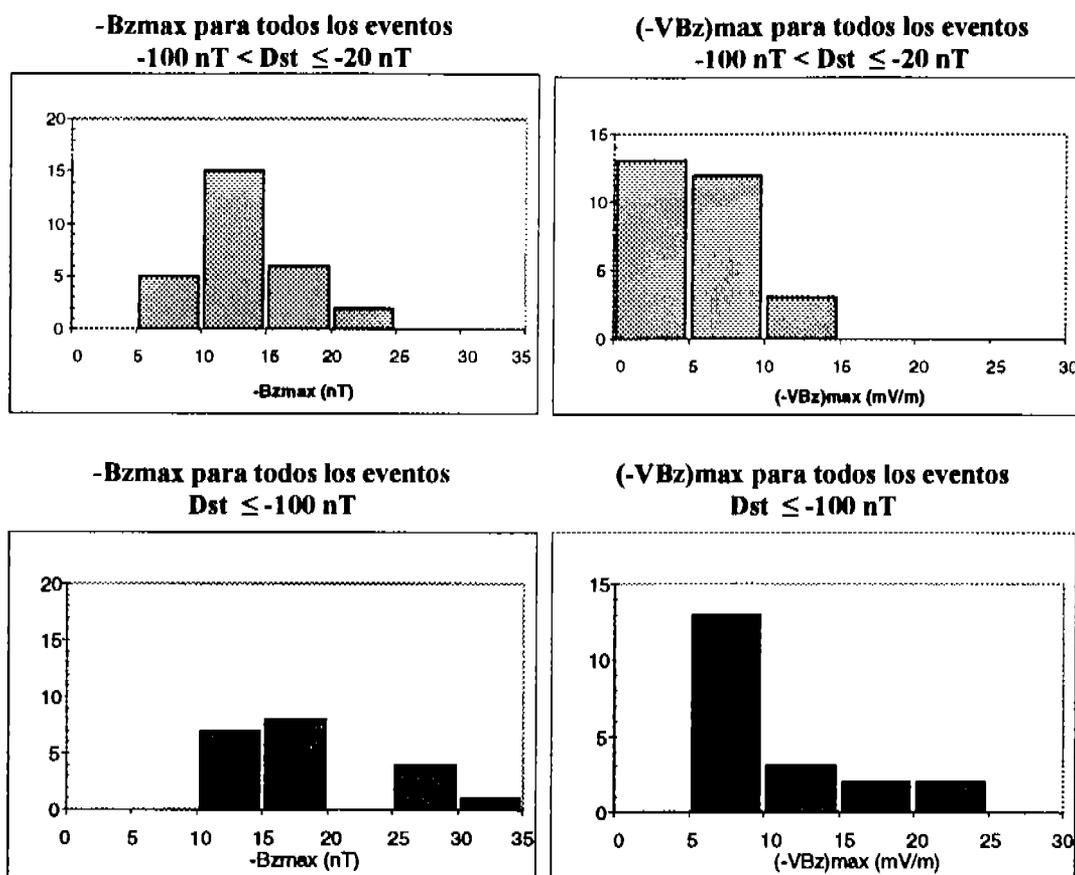


Figura 4.9 Histogramas de la geoeffectividad reportada por el índice Dst y los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ Vs # eventos para los diferentes valores del índice geomagnético: $-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$ (histogramas superiores) y $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ (histogramas inferiores), en donde los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ resultaron relacionarse de manera favorable con el índice Dst, ya que las distribuciones nos muestran que para valores mayores estos se relacionan con tormentas más geoeffectivas.

4.1.4 Correlación entre $(-VBz)_{\text{max}}$ y el índice Dst

Como el campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{\text{max}}$ distingue entre las tormentas de baja intensidad de las tormentas de extrema intensidad hemos correlacionado los valores del índice Dst con los valores de $(-VBz)_{\text{max}}$ para las NM y para las fundas (49 eventos en total).

Para la correlación hemos separado una vez más a las NM que provocaron la caída en el índice Dst de las fundas, separando estas a su vez en las fundas que fueron la única región que interaccionó geoeffectivamente de las fundas que causaron el primer decremento en las tormentas de dos pasos.

La figura 4.10 muestra los coeficiente de correlación (CC) entre los valores del índice Dst y $(-VBz)_{\text{max}}$, en donde la correlación para las NM es $\text{CC} = -0.682$, la correlación para las fundas que fueron la única interacción geoeffectiva es $\text{CC} = -0.634$, y para las fundas de las tormentas de dos pasos es $\text{CC} = -0.849$.

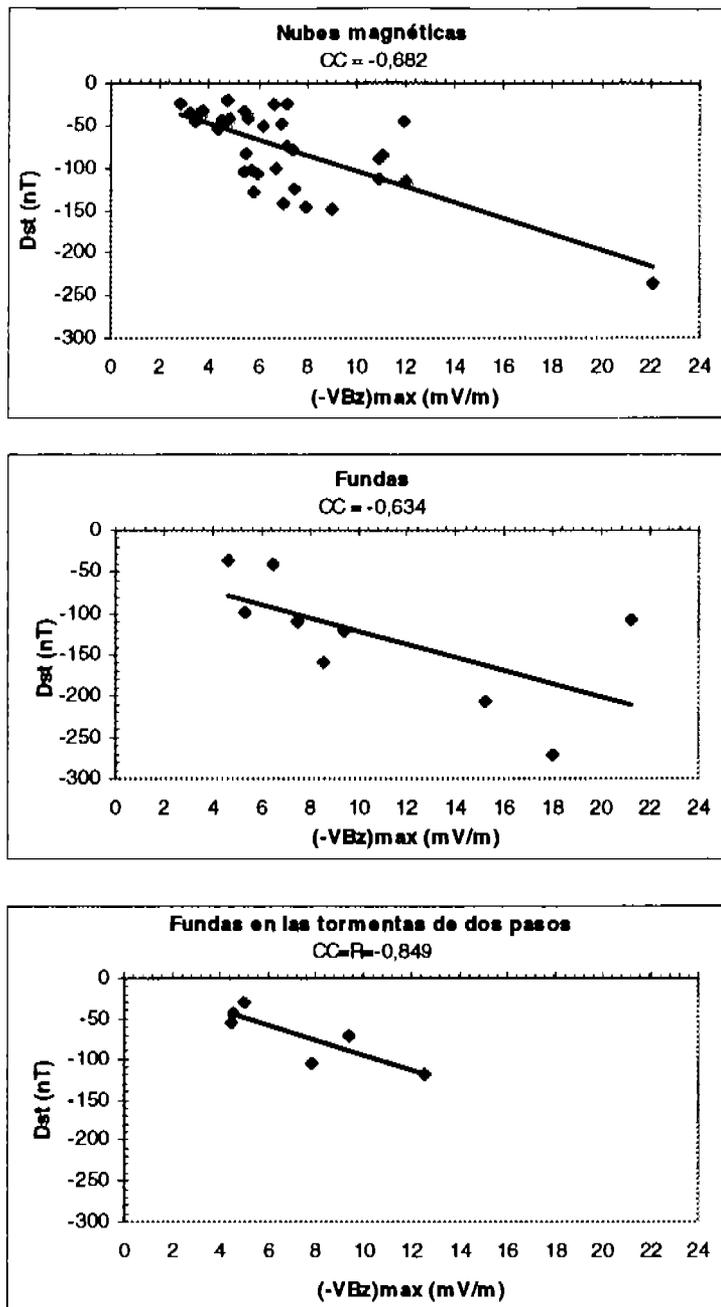


Figura 4.10 Distribución de los puntos para los valores del índice Dst y $(-VBz)_{max}$ para cada evento. La gráfica superior corresponde a los valores para las NM (34 eventos) en donde el $CC = -0,682$, la gráfica siguiente corresponde a los datos para las fundas (9 eventos) en donde el $CC = -0,634$, y la última gráfica corresponde a los datos para las fundas de las tormentas de dos pasos (6 eventos) en donde el $CC = -0,849$.

Dado que las fundas en las tormentas de dos pasos son la región que causa el primer decremento en el índice Dst y en este análisis sólo consideramos la primera caída en el índice, hemos unido estos datos con las fundas que fueron la única región que interaccionó geoelectivamente, ver figura 4.11. Esto con el objetivo de observar cómo cambia el coeficiente de correlación en comparación a cuando consideramos a las fundas por separado.

La figura 4.11 muestra el resultado de la unión de los datos de las fundas, en donde ahora el $CC = -0.707$ mejora con respecto al grupo de los eventos en donde la funda fue la única región que interaccionó geoefectivamente ($CC = -0.634$).

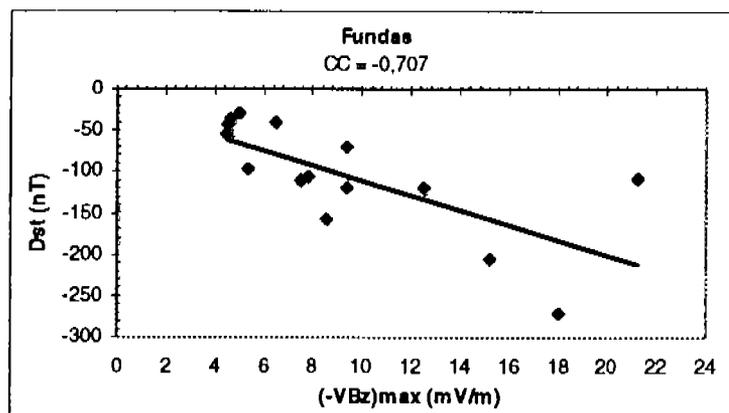


Figura 4.11 Distribución de los puntos para los valores del índice Dst y $(-VBz)_{max}$ para los eventos de todas las fundas. Observa que el coeficiente de correlación $CC = -0.707$ mejora para el caso en donde se analizan a las fundas que fueron la única interacción geoefectiva, $CC = -0.634$, (figura 4.10).

Considerando los valores de los coeficientes de correlación para los grupos de nubes magnéticas ($CC = -0.682$) y de las fundas ($CC = -0.707$) obtenemos que los valores del índice Dst y los del campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{max}$ se correlacionan aceptablemente, ya que una correlación con un valor $CC \approx 0.7$ nos indica que la relación entre los valores de los datos es buena.

Por lo que $(-VBz)_{max}$ es un buen candidato para cuantificar la geoefectividad reportada por el índice Dst para el conjunto de datos que analizamos en este trabajo.

4.2 Relación de los datos con el ciclo solar 23

Como hemos mencionado, las nubes magnéticas son estructuras que están caracterizadas por un incremento y una rotación en el campo magnético, más un decremento en la temperatura. Diversos autores han estudiado las características del campo magnético de las NM y las características del campo magnético solar, el cual está relacionado con el ciclo de actividad solar y con diferentes eventos solares. Por ejemplo *Fenrich et al.* [1998] estudiaron la polaridad de las NM y la relacionaron con filamentos, los cuales son eventos solares que se relacionan con la actividad solar.

El ciclo de actividad solar se relaciona con el número de manchas solares. Cuando tenemos el mayor número de manchas decimos que estamos en el máximo solar y por el contrario, cuando el número de manchas es menor decimos que estamos en el mínimo de actividad solar.

Una de las manifestaciones de la actividad solar son la salida de eyecciones de masa coronal (EMC), ya que el número de éstas es mayor en comparación con las que ocurren en el mínimo solar. Por lo que tenemos más eyectas en el máximo solar y menos en el mínimo solar.

En este trabajo hemos incluido una relación entre el número de manchas solares, el índice Dst y el campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{max}$, para todos los eventos, es

decir, para nubes magnéticas y fundas (49 eventos); los cuales ocurrieron en el periodo de mayo de 1996 a diciembre del 2002.

En la figura 4.15 se grafican el número de manchas solares, la actividad geomagnética, y el campo eléctrico convectivo ($-VBz$)_{max}, para las NM y para las fundas de nuestra muestra. Para distinguir a las NM de las fundas hemos representado a las NM por los diamantes oscuros y a las fundas por los diamantes vacíos.

En la figura 4.15 tenemos que la intensidad de las tormentas geomagnéticas aumenta en una sección de la fase ascendente del ciclo solar 23; las tormentas más intensas causadas por nubes magnéticas o por las fundas, ocurren un lapso después del máximo solar, y posteriormente a estas tormentas más intensas, los valores del índice Dst disminuyen.

Se observó una disminución de tormentas causadas por NM o fundas entre principios de 1999 y mediados del 2000, sin embargo esto no implica que no exista actividad geoelectiva causada por otro tipo de eyectas.

Por otro lado el campo eléctrico convectivo ($-VBz$)_{max} y el ciclo solar 23 nos dicen que los eventos que transfieren más energía a la magnetosfera ocurren poco después del máximo del ciclo solar.

El hecho de que tengamos un pequeño corrimiento de la actividad geomagnética (tormentas geomagnéticas) y del campo eléctrico convectivo, respecto al máximo solar, concuerda con resultados anteriores. *Richardson et al.* [2004] trabajaron con los datos del ciclo solar 23 y encontraron un corrimiento entre el máximo del número total de EMC y el máximo solar del ciclo 23. Otro trabajo que refleja este comportamiento es el de *Aguilar-Rodriguez* [2001], en donde encontró una variación entre diversas manifestaciones de actividad solar y el número de manchas solares del ciclo 21. Entre las manifestaciones solares que consideró en su trabajo había ráfagas, registradas como estallidos en rayos X, y EMC; de donde observó que tanto el número máximo de ráfagas como de EMC ocurren un tiempo después del máximo de manchas solares.

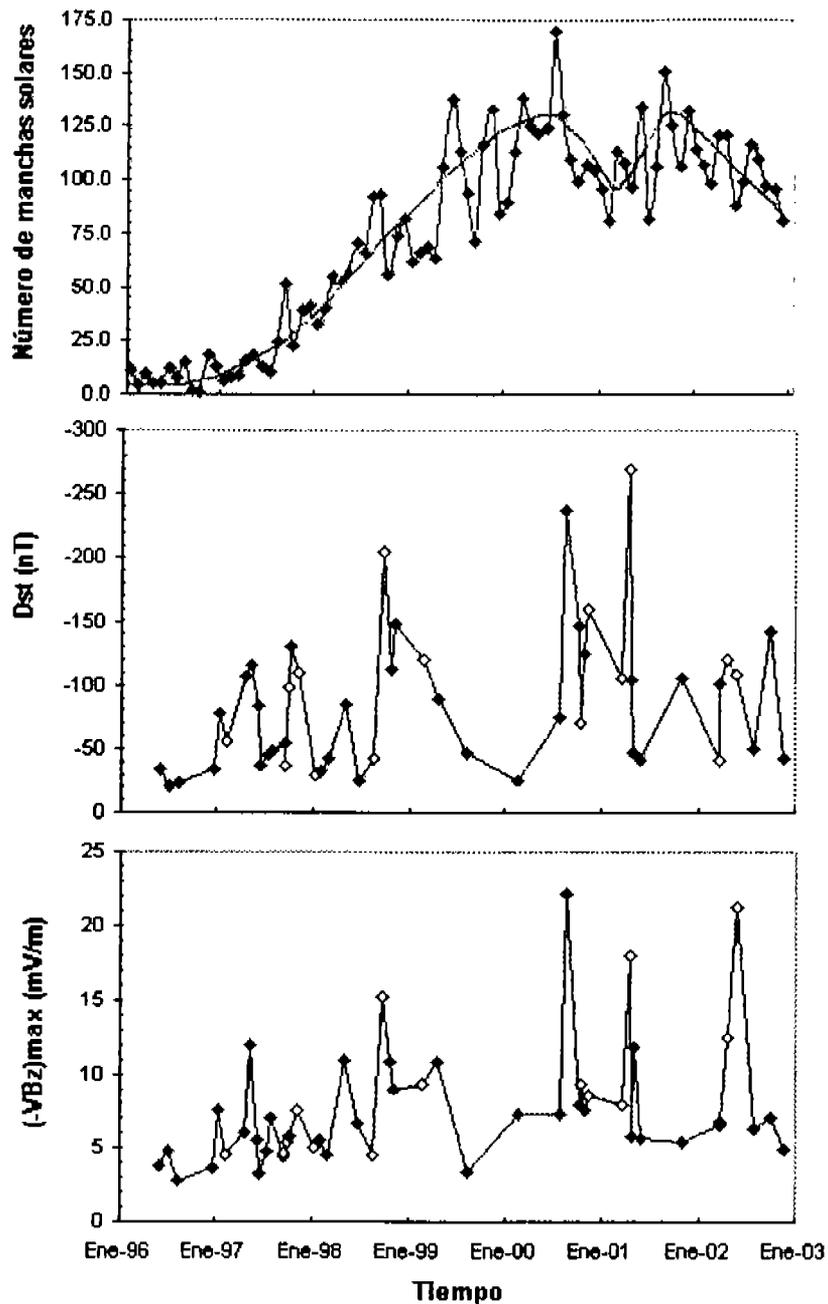


Figura 4.15 Gráficas del número de manchas solares, del índice Dst y $(-VBz)_{\max}$, contra el periodo que corresponde de enero de 1996 a diciembre del 2002. Este periodo es el que comprende a los datos de la muestra con la que trabajamos a lo largo del análisis.

En la gráfica superior están los valores promedio mensuales de manchas solares y el ajuste suave de estos valores representado por la línea sólida. La información del número de manchas solares fue tomada de los datos de la página ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/MONTHLY.

Las gráficas siguientes corresponden a los valores del índice Dst y $(-VBz)_{\max}$, los diamantes vacíos corresponden a los eventos en donde la región de la funda fue la que provocó la primera o la única caída en el índice Dst.

4.3 Conclusiones

1.- Los valores de Δt_{Bz} y Δt no son buenos candidatos para cuantificar la geoeffectividad, ya que no distinguen entre tormentas de baja a alta intensidad ($-100 \text{ nT} < Dst \leq -20 \text{ nT}$) de tormentas de intensidad extrema ($Dst \leq -100 \text{ nT}$).

2.- Los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y $(-VBz)_{\text{max}}$ son buenos cuantificadores de la geoeffectividad ya que sus valores distinguen entre las tormentas de baja a alta intensidad de las tormentas de intensidad extrema. En particular $(-VBz)_{\text{max}}$ resultó ser un mejor cuantificador.

3.- En el análisis de la correlación entre el campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{\text{max}}$ con los valores del índice Dst , obtuvimos que para las nubes magnéticas el $CC = -0.682$; y para todas las fundas (15 eventos) que interaccionaron geoeffectivamente obtuvimos un $CC = -0.707$.

4.- Al comparar la actividad solar del ciclo 23 con los valores del índice Dst obtuvimos que la intensidad de las tormentas geomagnéticas aumenta en una sección de la fase ascendente de este ciclo solar. Poco después del máximo solar ocurren las tormentas geomagnéticas más intensas de la muestra, y en la fase descendente las intensidades de las tormentas son menos intensas.

Por otro lado, la comparación entre el ciclo solar 23 y el campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{\text{max}}$ nos dice que las nubes magnéticas o las fundas que transfieren más energía a la magnetosfera terrestre, y que por lo tanto impactan más geoeffectivamente, ocurren poco después del máximo del ciclo solar.

5.- Las fundas pueden ser igual de geoeffectivas que las nubes magnéticas, lo que enfatiza la importancia de considerar a las eyectas y también a las regiones de las fundas al hacer un estudio de la geoeffectividad.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo estudiamos las *nubes magnéticas* (NM) detectadas a 1 UA por la nave espacial WIND de 1996 al 2002. Para estudiar sus características dividimos a las NM en dos grupos: NM rápidas ($V_{m\acute{a}x} \geq 600$ km/s) y NM lentas ($V_{m\acute{a}x} < 600$ km/s). Obtuvimos que las NM rápidas son más geoefectivas que las NM lentas, lo cual está de acuerdo con resultados anteriores, i.e., *Burlaga et al.* [1987]; *Zhang y Burlaga* [1988] y *Webb et al.* [2000].

Las NM rápidas con helio y las *eyectas complejas* (EC) rápidas con helio ($He^{++}/H^+ \geq 0.08$) fueron más veloces y más geoefectivas, lo que nos sugiere que estas eyectas provienen de procesos más energéticos en la corona solar los cuales son capaces de inyectar material de capas bajas de la corona hacia el MI.

En la asociación de los datos con eventos solares, las NM y las EC resultaron relacionarse favorablemente con las *eyecciones de masa coronal* (EMC) tipo halo.

En la asociación de las NM y de las EC lentas con *ráfagas solares* concluimos que existe una relación de estas eyectas con ráfagas de intensidades mayores o iguales a 1.0×10^{-7} - 9.9×10^{-7} Watts/m², tipo B.

Por otro lado, concluimos que las NM y las EC rápidas tienden a relacionarse con ráfagas solares con energías mayores o iguales a las ráfagas tipo C (1.0×10^{-6} - 9.9×10^{-6} Watts/m²).

Al estudiar la configuración del campo magnético delante de las eyectas, obtuvimos que las *fundas* con una configuración Bz sur incrementan la interacción entre las NM y la magnetosfera terrestre. En particular este comportamiento es más evidente para las NM con una configuración sur-norte. Es importante señalar que la configuración a la cual llamamos sur-norte no distingue si la polaridad del campo magnético es sur-norte o norte-sur.

El hecho de que las fundas y las NM en conjunto pueden provocar caídas fuertes en los registros del índice Dst se hace evidente en este trabajo a través de las *tormentas de dos pasos*. Estos eventos se presentan en la fase principal de la tormenta y son generadas por las fundas que tienen una configuración Bz sur seguidas de una NM con una configuración Bz sur en algún lugar adentro de ella.

Este comportamiento enfatiza la importancia de considerar las regiones que rodean a las eyectas cuando hacemos un estudio de las perturbaciones geomagnéticas, sin dejar de mencionar que en este trabajo hemos mostrado que las tormentas pueden ser causadas sólo por la región de la funda.

Una de las observaciones y puntos de discusión más interesantes de este trabajo es que en ocasiones la asociación entre las observaciones espaciales *in situ* con tormentas geomagnéticas no es clara; ya que las naves sólo observan en una dirección de estas estructuras de gran escala y los índices reportados (Dst) consideran los efectos globales de toda la eyecta a nivel geomagnético.

Otra situación que se presentó en el trabajo fue que las tormentas de dos pasos no son siempre causadas por la región de la funda y de la nube magnética, sino que en ocasiones existe una interacción geoefectiva debida al plasma que viene atrás de la nube magnética, con una configuración Bz sur, la cual está relacionada con un viento solar que se propaga a velocidades más grandes que las del viento solar ambiente, a la cual identificamos como *corriente*.

Cuando estudiamos la interacción de las NM y de las fundas, obtuvimos que tanto los valores de Δt_{Bz} , como de Δt no son buenos candidatos para cuantificar la geoefectividad, ya que no distinguen entre tormentas de baja a alta geoefectividad ($-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -20 \text{ nT}$), de tormentas de intensidad extrema ($\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$).

Por otro lado, los valores de $-Bz_{\text{max}}$ y del campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{\text{max}}$ para las NM y para las fundas, resultaron ser buenos candidatos para la cuantificación de la geoefectividad, ya que sus valores distinguen entre las tormentas de baja a alta intensidad de las tormentas de intensidad extrema.

En el análisis de la correlación entre el campo eléctrico convectivo, $(-VBz)_{\text{max}}$, con los valores del índice Dst, obtuvimos para el grupo de las nubes magnéticas un coeficiente de correlación de -0.682 ; y para el caso del grupo de las fundas un coeficiente de correlación de -0.707 ; en donde los valores de estos coeficientes son buenos.

Al hacer la relación entre el *número de manchas solares* para el ciclo 23, los valores del índice Dst y el campo eléctrico convectivo $(-VBz)_{\text{max}}$, obtuvimos que la *actividad geomagnética* (índice Dst) tiene intensidades mayores en una sección de la fase ascendente del ciclo solar. Las tormentas más intensas ocurren poco después del máximo solar, y después de este máximo de intensidades los valores del índice Dst son menores.

Por otro lado, la relación entre el *campo eléctrico convectivo* $(-VBz)_{\text{max}}$ y el número de manchas solares del ciclo 23 nos dice que los eventos interplanetarios con valores mayores para $(-VBz)_{\text{max}}$ están prácticamente relacionados con el máximo de actividad solar; o lo que es en otras palabras, las NM y las fundas que transfieren más energía a la magnetosfera terrestre ocurren un poco después del máximo del ciclo solar 23, los cuales impactan más geoefectivamente a la magnetosfera terrestre.

El corrimiento entre la actividad geomagnética y el campo eléctrico convectivo, respecto al máximo solar, que muestra este trabajo está de acuerdo con resultados previos, ya que otros trabajos han encontrado este resultado para otras manifestaciones de la actividad solar.

Por ejemplo *Richardson et al.* [2004] trabajaron también con los datos del ciclo solar 23 y encontraron un corrimiento entre el número máximo total de EMC y el máximo solar de manchas del ciclo 23. Por otro lado, *Aguilar-Rodriguez* [2001] observó un corrimiento entre las manifestaciones de actividad solar como ráfagas y EMC, con el máximo de manchas solares del ciclo 21.

La actividad geoefectiva reportada en este trabajo presenta una disminución muy apreciable entre principios de 1999 y mediados del 2000 debido a que hubo muy pocas

NM que impactaron geoefectivamente a la magnetosfera durante este periodo. Esto no implica que no exista geoeffectividad causada por otro tipo de eyecta. Lo que nos motiva a estudiar en un futuro a las eyectas que no sean NM y analizar su interacción con la magnetosfera terrestre.

Esto también enriquecerá el número de datos con respecto al presente trabajo, lo que nos traerá como consecuencia una estadística más rica.

El tema de estudio de este trabajo es interesante porque nos ayuda a entender más los fenómenos físicos que hay en el medio interplanetario, comprendiendo desde manifestaciones que inician en el Sol, las cuales se propagan posteriormente en el MI, y que interaccionan finalmente con la magnetosfera terrestre.

Así el continuar estudiando los diversos fenómenos que ocurren en el MI es muy motivante, porque además la existencia de las diversas misiones espaciales facilita el análisis y el estudio de estos fenómenos.

Dentro de los trabajos futuros para el estudio de eyecciones de masa coronal (EMC) y su relación con perturbaciones a nivel terrestre, existe una misión espacial en la cual diversos científicos tienen ya proyectos muy interesantes. La misión STEREO²⁵ está programada para despegar en abril del 2006 y es un proyecto de dos años en el espacio. STEREO tendrá dos naves espaciales las cuales estarán sincronizadas espacialmente y temporalmente para proporcionar mediciones del Sol en tercera dimensión para estudiar la naturaleza de las EMC.

Por otro lado, como hemos visto a lo largo de este trabajo, las EMC son enormes burbujas de plasma las cuales son manifestaciones de almacenamiento de mucha energía, que al propagarse en el MI pueden interaccionar con la Tierra causando disturbios a nivel geomagnético. Estos disturbios son una componente importantísima para el clima espacial, en donde éste es fundamental para entender los fenómenos que complican las operaciones de los satélites, de las telecomunicaciones, así como la actividad del ser humano en el espacio.

²⁵ STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory)

Bibliografía

Aguilar-Rodriguez E., *Variaciones con el ciclo solar de las diversas manifestaciones de actividad solar*, Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica UNAM, 2001.

Aguilar-Rodriguez E., Blanco-Cano X., and Gopalswamy, *Composition and magnetic structures of interplanetary corona lmass ejections at 1 AU*, Advances in Space Research, COSPAR 2005, in press.

Bravo S., *La estrella que llamamos Sol*, Boletín Skylab, Depto. de Física Espacial, Instituto de Geofísica, UNAM, 1997.

Bravo S., *El cuarto estado de la material*, Boletín Skylab, Depto. de Física Espacial, Instituto de Geofísica, UNAM, 1998.

Boyd T. J. M. and Sanderson, *The Physics of Plasma*, Cambridge University Press, 2003.

Burlaga L. F., Behannon K. W., and Klein L. W., *Compound streams, magnetic clouds, and major geomagnetic storms*, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, pp. 5725-5734, 1987.

Burlaga L. F., *Magnetic Clouds*, Physics and Chemistry in Space -Space and Solar Physics, Vol. 21, Physics of the Inner Heliosphere II. Editors: R. Schwenn R. E. Marsch, Berlin Heidelberg, 1991.

Burlaga, L. F., Lepping R. P., Mish W. H., Olgilvie K. W., Szabo A., Lazarus A. J., and Steinberg J. T., *A magnetic cloud observed by WIND on October 18-20, 1995*, NASA/GSFC Laboratory for Extraterrestrial Physics Internal Document, February 1996.

Burlaga L. F., Skoug R. M., Smith C. W., Webb D. F., Zurbuchen T. H., and Reinard Alysha, *Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998-1999*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 20, 957-20, 977, 2001.

Burlaga L. F., Ness N. F., Richardson J. D., Lepping R. P., *The Bastille day Shock and Merged Interaction Region at 63 AU: Voyager 2 Observations*, Solar Physics, Vol. 204, pp. 399-411, 2001.

Burton R. K., McPherron R. L., and Russell C. T., *An Empirical Relationship Between Interplanetary Conditions and Dst*, Journal of Geophysical Research, Vol. 80, pp. 4204-4214, 1975.

Cane H. V., Richardson I. G., and Cyr O. C. St., *Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms*, Geophysical Research Letters, Vol. 27, pp. 3591-3594, 2000.

Cane H. V. and Richardson I. G., *Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002*, Journal of Geophysical Research, Vol. 108, pp. SSH 6-1, 2003.

Chen J., Cargill P. J., and Palmadesso P. J., *Predicting solar wind structures and their geoeffectiveness*, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, pp. 14, 701-14, 720, 1997.

Dungey J. W., *Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones*, Physical Review Letters, Vol. 6, pp. 47-48, 1961.

Farrugia C. J., Popecki M., Möbius E., Jordanova V. K., Desai M. I., Fitzenreiter R. J., Ogilvie K. W., Matsui H., Lepri S., Zurbuchen T., Mason G. M., Lawrence G. R., Burlaga L. F., Lepping R. P., Dwyer J. R., and McComas D., *Wind and ACE observations during the great flow of 1-4 May 1998: Relation to solar activity and implications for the magnetosphere*, Journal of Geophysical Research, Vol. 107, pp. SSH 3-1, 2002.

Fenrich F. R. and Luhmann., *Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity*, Geophysical Research Letters, Vol. 25, pp. 2999-3002, 1998.

Goldstein H., *On the field configuration in magnetic clouds*, in Solar Wind Five, NASA, Conference Publ. 2280, pp. 731, 1983.

Gonzalez Walter D., Tsurutani, and Bruce T., *Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($D_{st} < -100$ nT)*, Planetary and Space Science, Vol. 35, pp. 1101-1109, 1987.

Gonzalez Walter D., Tsurutani B. T., Lepping R. P., and Schwenn R., *Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 64, pp. 173-181, 2002.

Gosling J. T., Baker D. N., Bame S. J., Feldman W. C., Zwickl R. D., and Smith E. J., *Bidirectional solar wind electron heat flux events*, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, pp. 8519-8535, 1987.

Gosling J. T., McComas D. J., Phillips J. L., and Bame S. J., *Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections*, Journal of Geophysical Research, Vol. 96, pp. 7831-7839, 1991.

Henke T., Woch J., Schwenn R., Mall U., Gloeckler G., von Steiger R., Forsyth R. J., and Balogh A., *Ionization state and magnetic topology of coronal mass ejections*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 10597-10614, 2001.

Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B. T., Daglis I. A., Brekke A., and Masuda S., *Two-step development of geomagnetic storms*, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, pp. 6917-6921, 1998.

Lepping R. P., Burlaga L. F., Szabo A., Ogilvie K. W., Mish W., Vassiliadis D., Lazarus A. J., Steinberg J. T., Farrugia C. J., Janoo J., and Mariani F., *The WIND magnetic cloud and events of October 18-20, 1995: Interplanetary properties and as*

triggers for geomagnetic activity, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 14,049, 1997.

Parker, E. N., *Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields*, *Astrophysical Journal*, Vol. 128, pp. 664-676, 1958.

Reinard A., *Comparison of Interplanetary CME Charge State Composition with CME-associated Flare Magnitude*, *The Astrophysical Journal*, Vol. 620, pp. 501-505, 2005.

Richardson J. D., Paularena K. I., Wang, C., Burlaga L. F., *The life of a CME and the development of a MIR: From the Sun to 58 AU*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, pp. SSH 1-1, 2002.

Richardson I. G. and Cane H. V., *The fraction of interplanetary coronal mass ejections that are magnetic clouds: Evidence for a solar cycle variation*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, pp. L18804, 2004.

Rodriguez L., Woch J., Krupp N., Fränz M., von Steiger R., Cid C., Forsyth R., Glaßmeier K.-H., *Bidirectional Proton Flows and Comparison of Freezing-in Temperatures in ICMEs and Magnetic Clouds*, *Astronomical Union Symposium*, edited by K. Dere, J. Wang, and Y. Yan. Cambridge: Cambridge University Press, pp.420-427, 2005.

Vrsnak B., Sudar D., and Ruzdjak D., *The CME-flare relationship: Are there really two types of CMEs?*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 435, pp.1149-1157, 2005.

Wang C. and Richardson J. D., *Interplanetary coronal mass ejections observed by Voyager 2 between 1 and 30 AU*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, 2004.

Wang Y. M., Ye P. Z., and Xue X. H., *An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 30, pp. SSH 33-1, 2003.

Wang Y., Shen C. L., Wang S., and Ye P. Z., *An empirical formula relating the geomagnetic storm's intensity to the interplanetary parameters: $\langle -VBz \rangle$ and Δt* , *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, pp. 2-1, 2-4, 2003.

Wang Y. M., Ye P. Z., and Wang S., *Multiple magnetic clouds: Several examples during March-April 2001*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, pp. SSH 6-1, 2003.

Watari S., Vandas M., and Watanabe T., *Formation of a strong southward IMF near the solar maximum of cycle 23*, *Annales Geophysicae*, Vol. 22, pp. 673-687, 2004.

Webb D. F., Cliver E. W., Crooker N. U., St. Cyr O. C., and Thompson B. J., *Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, pp. 7491-7508, 2000.

Wu Chin-Chun and Lepping R. P., *Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, pp. 1314, 2002.

Zhang G., Burlaga L. F., *Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases*, Journal of Geophysical Research, Vol. 93, pp. 2511-2518, 1988.