

UCH-FC  
MAG-F  
P659  
C.1



# ESTUDIOS DE LA TURBULENCIA EN LA MAGNETÓSFERA TERRESTRE USANDO DATOS DE THEMIS Y SAMBA

Tesis  
entregada a la  
Universidad de Chile  
en cumplimiento parcial de los requisitos  
para optar al grado de  
Magíster en Ciencias con mención en Física  
Facultad de Ciencias

por

**Víctor Pinto Abarzúa**

Agosto, 2011

Directores de Tesis: **Dr. Juan Alejandro Valdivia**  
**Dra. Marina Stepanova**

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN  
TESIS DE MAGÍSTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Magíster presentada por el candidato

**Víctor Pinto Abarzúa**

ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la Tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias con mención en Física, en el examen de Defensa de Tesis rendido el día 29 de Agosto de 2011.

**Directores de Tesis**

Dr. Juan Alejandro Valdivia

Dra. Marina Stepanova

**Comisión de Evaluación de la Tesis**

Dr. Alberto Foppiano

Dr. Jaime Araneda

Handwritten signatures in blue ink on horizontal lines. The signatures are: 1. Juan Alejandro Valdivia, 2. Marina Stepanova, 3. Alberto Foppiano, 4. Jaime Araneda.

*A Tomás, mi hijo ...  
que me ha dado razones para luchar.*

*A Paulina, mi futura esposa...  
con quien construiré mi futuro.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero partir agradeciendo a mi familia. Mis padres, tíos, abuelos, primos y hermanos, quienes de alguna manera me dieron la educación y me entregaron los valores que rigen mi vida. Sin su apoyo, nunca habría llegado tan lejos. Quiero agradecer a mis profesores del colegio y a mis compañeros, ellos me entregaron las herramientas con que defenderme en la vida académica y social, además de la motivación para luchar por un fin personal. Quiero agradecer a mis amigos y profesores de la Universidad que me enseñaron a perseverar y no rendirme frente a las adversidades. Quiero agradecer a mis tutores, Alejandro Valdivia y Marina Stepanova, pues me tuvieron confianza a pesar de no haber demostrado gran cosa, y vieron en mi habilidades que ni yo mismo fuí capaz de ver.

Quiero agradecer especialmente a Paulina Morales, quien con su cariño, preocupación y amor me ha ayudado a superar cada obstaculo en el camino. Juntos nos espera un gran camino por delante como marido y mujer. De igual manera quiero agradecer a su familia, sus padres y hermanos quienes me han acogido en los momentos en que más lo he necesitado sobre todo este último tiempo, algo “turbulento”.

Quiero agradecer a mis amigos, Max Ramirez, Cristian Farías, Patricio L’Huissier, Denisse Pastén, Macarena Dominguez, Rodrigo López, Roberto Navarro, Sebastián Godoy, Macarena Muñoz, Roberto Hauyón, Ignacio Escobar, Rodrigo Arata, Emilio Troncoso, Sebastián Fernandez-Niño, Christopher Carvajal, Ursula Carvajal, Paula Carvajal, pues todos me abrieron las puertas durante algún periodo de mi vida, en especial, a Pablo Moya y Pía Vallejo quienes me brindaron un espacio en donde poder dedicarle a la tesis la gran cantidad de horas nocturnas que fueron necesarias para su término.

Mis agradecimientos también para mis ex-colegas Verónica Rozas, Aquiles Yañez



# Índice

Resumen	ix
Abstract	ix
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. La Magnetósfera Terrestre</b>	<b>5</b>
2.1. La Magnetósfera . . . . .	7
2.2. Estructura de la Magnetosfera Terrestre . . . . .	9
2.2.1. El Arco de Choque . . . . .	9
2.2.2. La Cubierta de la Magnetósfera . . . . .	9
2.2.3. La Magnetopausa . . . . .	10
2.2.4. Las Cúspides Polares . . . . .	10
2.2.5. La Cola . . . . .	10
2.3. La Lámina de Plasma . . . . .	11
2.4. Subtormentas geomagnéticas . . . . .	12
<b>3. Turbulencia en la Magnetósfera Terrestre</b>	<b>16</b>
3.1. Turbulencia en la magnetósfera terrestre . . . . .	19
3.2. Turbulencia en la lámina de plasma . . . . .	20

3.3. Estabilidad de la lámina de plasma . . . . .	21
<b>4. Estudio del transporte turbulento en la cola de la Magnetósfera</b>	<b>26</b>
4.1. Tiempo de autocorrelación de los iones . . . . .	27
4.2. Coeficiente de Difusión . . . . .	28
4.3. Caso particular: 22 de Febrero de 2008 . . . . .	29
4.4. Otros casos . . . . .	33
<b>5. Distribución Espacial del Coeficiente de Difusión</b>	<b>38</b>
5.1. Parámetros de selección . . . . .	38
5.2. Análisis estadístico . . . . .	41
<b>6. Validación del método de determinación de la densidad de plasma en la magnetósfera interna usando datos de SAMBA y THEMIS</b>	<b>46</b>
6.1. Resonancia de las líneas de campo . . . . .	47
6.2. Comparación con datos espaciales de THEMIS . . . . .	49
6.3. Caso: 16 de Junio de 2007 . . . . .	50
6.4. Análisis . . . . .	54
<b>7. Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>A. Instrumentos</b>	<b>62</b>
A.1. El proyecto THEMIS . . . . .	63
A.1.1. Analizador Electroestático (ESA) . . . . .	64
A.1.2. Telescopio de Estado Sólido (SST) . . . . .	65
A.1.3. Magnetómetro de Flujo (FGM) . . . . .	65
A.2. El proyecto SAMBA . . . . .	65

Referencias

# Resumen

Utilizando los datos satelitales de la misión THEMIS y los datos obtenidos en la superficie terrestre por la red de magnetómetros SAMBA, se estudiaron las características del transporte turbulento en la lámina de plasma de la cola de la magnetósfera, en casos puntuales y de manera estadística, y se analizó la relación entre las resonancias de líneas de campo magnético (FLR) y la densidad de masa de los iones del plasma a nivel ecuatorial en la magnetósfera interna. Se ha determinado que el transporte turbulento está fuertemente influenciado por las condiciones geomagnéticas (subtormentas), y que en general se cumple que el coeficiente de difusión de tipo eddy aumenta su valor en la dirección de la cola de la magnetósfera, entre los 8 y 30 radios terrestres. También se ha determinado que es posible realizar estudios conjugados en los satélites espaciales similares a los que se realizan en la superficie terrestre y se ha encontrado una correlación razonable al calcular las frecuencias de las resonancias de líneas del campo magnético en algunos intervalos de tiempo. Se propone realizar a futuro un análisis de tipo orbital para determinar la fortaleza del método.

# Abstract

THEMIS satellites space data, were used to study the turbulent transport along the plasma sheet located in the central tail of the Earth magnetosphere for a particular case and with a statistical analysis. Also, using the data from the SAMBA magnetometer array, the relationship between magnetic field line resonances (FLR) and the equatorial ion mass density in the inner dayside magnetosphere was analyzed. It was found that in general the eddy diffusion coefficients increase along the plasma sheet between 8 and 30 earth radii that and the turbulent transport is strongly affected by the geomagnetic conditions (substorms). It was also determined it is possible to realize conjugate studies using both space and ground data from Chilean Antarctic stations. This studies showed a reasonable correlation between field line resonance frequency estimated usign both space and ground data for certain time intervals when satellites are in magnetic conjunction with ground stations.

# Capítulo 1

## Introducción

El plasma constituye parte importante de la materia en el Universo, ya que alrededor del 99 % de la materia visible se presenta en forma de plasma. El estudio de los plasmas en la naturaleza por parte del ser humano es relativamente nuevo, tanto así que el mismo concepto de plasma no fue introducido sino hasta el siglo XX [1].

Se define un plasma como un gas en estado cuasi-neutral formado por partículas cargadas y neutras que exhiben comportamiento colectivo [2,3]. En un plasma, son las fuerzas de largo alcance, como la eléctrica, magnética y gravitatoria las que determinan las propiedades estadísticas del sistema.

Desde sus inicios, la física de plasmas ha sido fundamental para el estudio y entendimiento de diversos fenómenos tanto macroscópicos como microscópicos, incluyendo una diversidad enorme de sistemas astrofísicos y espaciales, en parte gracias a que el rango en el que se pueden encontrar los plasmas en la naturaleza en tamaño, densidad y temperatura sobrepasa los treinta órdenes de magnitud en algunos casos. En los últimos años se ha aportado bastante evidencia de que los plasmas pueden demostrar comportamientos complejos como lo son la multifractalidad, auto-organización, transiciones de fase, turbulencia, caos espaciotemporal, etc. [4–20].

El estudio del entorno Tierra-Sol como rama científica tiene su inicio en los al-



bores de la carrera espacial con la confirmación de la existencia de la magnetósfera gracias a los primeros instrumentos de medición que salieron del planeta [21]. Desde el punto de vista de la observación, desde hace milenios que los diversos fenómenos atmosféricos, ionosféricos y magnetosféricos han sido estudiados por el hombre, pero no ha sido sino hasta la segunda mitad del siglo XX que se ha podido obtener información *in-situ* situando instrumentos de medición en las zonas de interés científico. Actualmente existe un creciente interés por entender los fenómenos del entorno Tierra-Sol principalmente desde que se ha hecho evidente que afectan las actividades humanas como las comunicaciones por radio y satelitales; los viajes espaciales y la radiación recibida por los humanos en dichas misiones; la transmisión eléctrica; etc., en donde en más de una ocasión han habido percances asociados a una inusual actividad geomagnética. Adicionalmente, existe alguna evidencia de que el ciclo solar puede afectar algunos procesos climáticos, como por ejemplo que el aumento de partículas cargadas que ingresan a la atmósfera facilita la condensación formándose con esto una mayor cantidad de nubes [22], entre otros.

Para aprender más acerca de todos estos fenómenos y dificultades mencionadas, el trabajo estará centrado en el estudio de la magnetósfera terrestre y de cómo responde a los cambios en el medio interplanetario. La magnetósfera está formada a partir del campo geomagnético terrestre y su interacción con el viento solar. Si el espacio estuviera completamente vacío la magnetósfera tendría una forma similar a la de un dipolo magnético, sin embargo, como resultado de la interacción Tierra-Sol, la magnetósfera adquiere su característica forma similar a la de la cola de un cometa, en donde el frente es el que apunta en dirección al Sol actuando como barrera para el viento solar. La combinación de ambos sistemas, altamente dinámicos lleva a esperar que el comportamiento de la magnetósfera sea turbulento, al menos en algunas zonas.



Debido a las condiciones naturales de asimetría en el frente y en la cola de la magnetósfera no es lo mismo trabajar a un lado o al otro del planeta, respecto de su orientación con respecto del Sol, de manera que este trabajo se ha situado tanto en el lado diurno de la magnetósfera, como en el lado nocturno por separado. Los tratamientos son diferentes, debido a que los fenómenos turbulentos en cada uno de ellos son diferentes, y han de ser estudiados mediante técnicas distintas.

En este trabajo, se estudia la dinámica del transporte turbulento en la cola de la magnetósfera terrestre, en particular de la zona de la lámina de plasma a través del uso de datos sincronizados temporalmente en diferentes posiciones espaciales de los satélites de la misión THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions During Substorms), para intentar comprender el comportamiento de la difusión turbulenta de tipo eddy —*asociada al movimiento y ruptura de remolinos de plasma*— y la estabilidad de este proceso turbulento. Adicionalmente, se estudia el comportamiento de la difusión turbulenta en las diferentes etapas de las subtormentas magnéticas, mediante un análisis estadístico para un considerable número de eventos durante los años 2007 y 2008.

Como un segundo trabajo, se trabaja en predecir la evolución dinámica de la densidad de plasma en el plano ecuatorial y la contribución relativa de los iones pesados dentro de la magnetósfera interna por el lado diurno del planeta. Para esto se utilizan los datos de los magnetómetros de la red SAMBA (South American Meridional B-Field Array) y de la misión THEMIS cuando sus satélites se encuentran alineados magnéticamente con los magnetómetros terrestres, es decir, cuando estos se encuentran en la misma línea de campo magnético. Para cumplir con los objetivos propuestos, se ha trabajado en rutinas computacionales que intentan mejorar la técnica de selección de subtormentas y de posicionamiento dentro de un determinado

lugar de la magnetósfera terrestre. Adicionalmente, se ha trabajado en mejorar la tecnología de determinación de la densidad de plasma en la magnetósfera interna utilizando la técnica de resonancia de las líneas de campo magnético (FLR).

Esta tesis se distribuye de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se describe la magnetósfera terrestre, su estructura y principales fenómenos asociados, principalmente la lámina de plasma, que será parte importante de este trabajo. En el Capítulo 3 se explica la turbulencia en la magnetósfera terrestre, sus implicancias y su descripción tanto teórica como fenomenológica, lo que sienta las bases para parte importante del trabajo desarrollado. El primer trabajo de esta tesis se describe en el Capítulo 4 en donde, considerando la cola de la magnetósfera terrestre como un ambiente intrínsecamente turbulento, se ha estimado el valor del coeficiente de difusión de tipo eddy en un par de casos específicos seleccionados por ser altamente adecuados en cuanto a la configuración satelital de THEMIS. En el Capítulo 5 se ha realizado un trabajo estadístico para comprobar que el comportamiento de los casos estudiados en el capítulo anterior es generalizado para grandes periodos de tiempo. Adicionalmente al estudio temporal, la estadística se realiza sobre una grilla espacial para entender más en profundidad el fenómeno de la difusión en las distintas zonas de la lámina de plasma. En Capítulo 6 se muestra el estudio de la magnetósfera interna en la parte diurna del planeta. En un primer momento, se han utilizado y mejorado las técnicas de detección ya existentes para el estudio de la dinámica de la magnetósfera a partir de datos obtenidos en la superficie terrestre. Se han utilizado los datos del proyecto SAMBA y de la misión THEMIS para la búsqueda de la frecuencia de resonancia de las líneas de campo magnético. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de los trabajos realizados, una discusión acerca de los resultados obtenidos y posibles proyecciones futuras de este trabajo.

## Capítulo 2

# La Magnetósfera Terrestre

Se sabe que una fracción importante del Universo está formado de plasmas. Da la curiosidad de que en el planeta Tierra vivimos en esos escasos lugares en donde el plasma no es el estado predominante de la materia, y por lo tanto nos es menos familiar su comportamiento. En general, en cualquier lugar en donde se den condiciones de temperatura y densidad para ionizar los átomos, tendremos un plasma. Debido a la cantidad de parámetros que se pueden variar para obtener un plasma, es que estos están esparcidos en escalas que pueden ser de más de 30 órdenes de magnitud en densidad de partículas y de más de 10 órdenes de magnitud en temperatura, como se muestra en la figura 2.1.

La principal característica de un plasma es su capacidad de apantallar un potencial introducido. Con el desarrollo apropiado es posible encontrar la distancia característica de apantallamiento de un potencial  $\varphi$ . Se define la longitud de Debye de un plasma como

$$\lambda_D = \left( \frac{k_b T}{4\pi n e^2} \right)^{1/2}, \quad (2.1)$$

en donde  $T$  es la temperatura del plasma y  $n$  la densidad del mismo. Si formamos una esfera de radio  $\lambda_D$  y contamos las partículas que se encuentran en su interior,

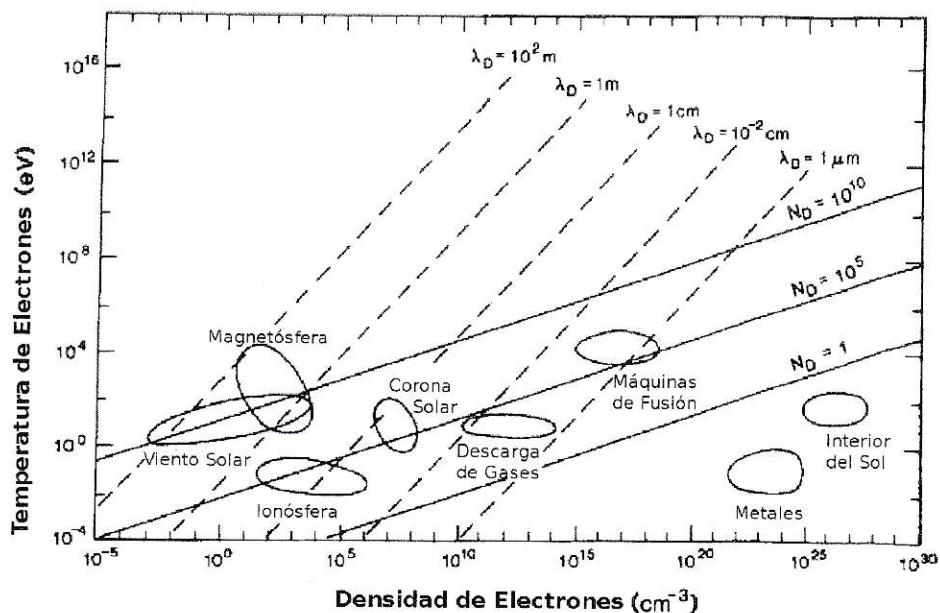


Figura 2.1: Rango de existencia de varios plasmas graficados en función de la temperatura y densidad de estos. Los valores de la longitud de Debye y del parámetro de plasma también son incluidos (Fuente: Kivelson [23])

podemos definir el parámetro del plasma

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3. \quad (2.2)$$

Cuando se cumple que  $N_D \gg 1$  hablamos de un plasma en donde se observan fenómenos colectivos, y en esos casos podemos hacer trabajos estadísticos sobre el plasma. La tabla 2.1 muestra algunos ejemplos de plasmas en la naturaleza y sus valores característicos de temperatura y densidad.

Este trabajo, dirigido al área de la Física Espacial, trata del estudio de la magnetósfera terrestre, centrándose en la descripción de su formación, comportamiento y principales características. Como se puede apreciar en la figura 2.1 la magnetosfera terrestre esta formada por plasmas de relativamente baja densidad y temperatura.



Tipo de plasma	Densidad ( $\text{m}^{-3}$ )	Temperatura (eV)	$\lambda_D$ (m)	$N_D$
Medio interestelar	$10^6$	$10^{-1}$	1	$10^6$
Viento solar	$10^7$	10	10	$10^{10}$
Corona solar	$10^{12}$	$10^2$	$10^{-1}$	$10^9$
Atmósfera solar	$10^{20}$	1	$10^{-6}$	$10^2$
Magnetósfera	$10^7$	$10^3$	$10^2$	$10^{13}$
Ionósfera	$10^{12}$	$10^{-1}$	$10^{-3}$	$10^4$
Descarga de gases	$10^{20}$	1	$10^{-6}$	$10^2$
Máquina de fusión	$10^{22}$	$10^5$	$10^{-5}$	$10^7$

Tabla 2.1: Ejemplos de plasmas en la naturaleza y sus propiedades típicas

Sin embargo el parámetro  $N_D$  es de orden de  $10^{10}$  que es uno de los mas altos en la naturaleza, lo que da un perfecto ejemplo de comportamiento de un plasma.

## 2.1. La Magnetósfera

La magnetósfera terrestre se forma como resultado de la interacción entre el campo magnético terrestre y el viento solar. Si bien el campo magnético terrestre es conocido desde hace algunos milenios, de la magnetósfera no tuvimos evidencia directa hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando comenzó la carrera espacial [21, 24, 25].

Situándose cerca de la Tierra, el campo magnético tiene una configuración dipolar (o al menos se aproxima razonablemente). En los casos en que se necesita mayor precisión se deben considerar algunas componentes multipolares [26]. Si se considera sólo el término dipolar por simplicidad, es posible hacerse una idea básica de como será la estructura de la magnetósfera terrestre. Ahora bien, para tener una idea más completa, se debe considerar la presión dinámica ejercida por el viento solar, que al

interactuar con la magnetósfera tiende a comprimirla por el frente, y a expandirla por detrás dándole así su tradicional forma que nos recuerda la cola de un cometa. La figura 2.2 muestra un esquema de la magnetósfera terrestre.

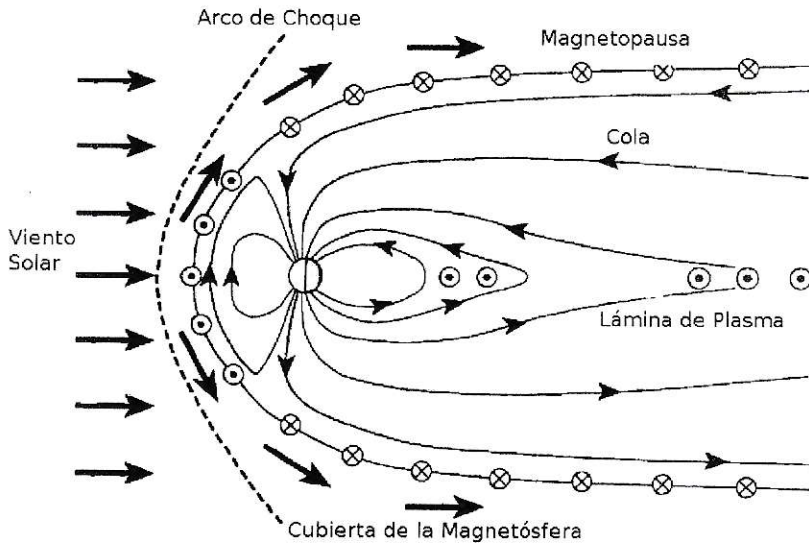


Figura 2.2: Esquema de la magnetósfera terrestre (Fuente: Kivelson [23])

Tradicionalmente, se reconocen dos grandes fuentes energéticas externas que alteran el comportamiento del plasma en la magnetósfera terrestre. Por una parte, el viento solar puede entrar en la magnetósfera mediante diversos mecanismos [27]. Por otra parte, el intercambio de partículas entre la magnetósfera y la ionósfera afecta su comportamiento, principalmente en la región interna de la magnetósfera.

Desde las primeras mediciones *in-situ* realizadas en el inicio de la carrera espacial ha quedado claro que tanto la estructura como el comportamiento del plasma en la magnetósfera son fenómenos altamente dinámicos y de una alta complejidad, por lo que su estudio representa un desafío de enormes proporciones.

## 2.2. Estructura de la Magnetosfera Terrestre

La figura 2.2 muestra un esquema de la magnetósfera con sus principales regiones. Si bien la magnetósfera en sí es altamente dinámica debido a la constante interacción con su entorno, su estructura no deja de ser bastante estable en largos periodos de tiempo, lo que permite identificar las diferentes regiones con razonable precisión y poder describirlas en detalle, con sus propias características.

Las regiones de la magnetósfera usualmente identificadas son: El arco de choque —*bow shock*—, la magnetopausa —*magnetopause*—, la cubierta de la magnetósfera —*magnetosheath*—, las cúspides polares —*polar cusp*—, los lóbulos de la cola —*tail lobes*— y la lámina de plasma —*plasma sheet*—. A continuación se describen brevemente las regiones mencionadas, con especial énfasis en la región de la lámina de plasma, pues es de especial interés en los capítulos siguientes .

### 2.2.1. El Arco de Choque

El arco de choque corresponde a la región límite de la parte frontal de la magnetósfera terrestre en donde las partículas provenientes del viento solar son desaceleradas a velocidades sub-alfvénicas producto de su acercamiento a la magnetopausa (ver sección 2.2.3). Se estima que el arco de choque tiene un espesor variable entre 100 y 1000 Km, y se encuentra ubicado en condiciones normales a unos 15 radios terrestres de la superficie del planeta [23].

### 2.2.2. La Cubierta de la Magnetósfera

Producto de la desaceleración de las partículas provenientes del viento solar, se produce un calentamiento debido a la liberación de energía cinética. La zona en donde se produce este proceso se denomina cubierta de la magnetósfera. Es rele-



vante destacar que el incremento de temperatura de los iones en la cubierta de la magnetósfera puede llegar a ser de hasta 10 veces su temperatura en el viento solar.

### **2.2.3. La Magnetopausa**

La magnetopausa es la frontera entre el viento solar y el régimen terrestre. Su ubicación está determinada por el balance de presión entre la presión del campo geomagnético y la presión dinámica del viento solar. En la medida en que la presión del viento solar aumenta o disminuye, como por ejemplo durante erupciones solares la magnetopausa se expande o se comprime variando generalmente entre 6 y 10 radios terrestres en la parte frontal del planeta.

### **2.2.4. Las Cúspides Polares**

Las cúspides polares corresponden a regiones ubicadas cerca de los polos en donde el campo magnético se torna menos intenso debido a la configuración dipolar de la magnetósfera. Producto de esto, las partículas y el plasma pueden penetrar libremente desde la cubierta de la magnetósfera hacia la ionósfera. Las cúspides polares se ubican en la región donde el campo magnético diverge, lo que ocurre en  $\pm 77^\circ$  de latitud invariante [28].

### **2.2.5. La Cola**

La cola de la magnetósfera terrestre corresponde a la parte que se encuentra en la parte nocturna del planeta, donde el viento solar ya no comprime si no que expande el campo magnético. Debido a la complejidad de esta zona, la cola misma se divide en varias subpartes: los lóbulos de la cola, el borde de la lámina de plasma y la lámina de plasma misma [29]. De estas estructuras, la lámina de plasma será parte

fundamental en nuestro trabajo de manera que le dedicaremos una descripción un tanto más completa.

### 2.3. La Lámina de Plasma

La lámina de plasma corresponde a la región de plasma situada en el centro de la cola de la magnetósfera, en donde el campo magnético cambia abruptamente de orientación. Si bien existen diferentes criterios, usualmente se considera que la extensión de la lámina de plasma abarca desde los 5 radios terrestres hasta los 100 radios terrestres por detrás de la Tierra, en la dirección de la línea que une la Tierra con el Sol, tiene un ancho variable entre 30 y 40 radios terrestres en el plano ecuatorial a la vez que un ancho de entre 5 y 6 radios terrestres en la dirección norte sur.

Propiedades del plasma	Valor típico de la lámina de plasma
Densidad	$0.2 \text{ cm}^{-3}$
Temperatura de los iones	5 keV
Temperatura de los electrones	700 eV
Intensidad del campo magnético	10 nT
Parámetro $\beta$ del plasma	6
Radio ciclotrónico de los protones	700 km
Longitud de Debye de los electrones	0.4 km
Periodo de ciclotrón de los iones	7 s
Velocidad de Alfvén	500 km/s
Velocidad magnetosónica	1300 km/s

Tabla 2.2: Parámetros típicos de la lámina de plasma a  $20 R_E$  (Fuente: Borovsky [30]).

La densidad típica de la lámina de plasma varía entre  $0.1$  y  $10 \text{ cm}^{-3}$  en donde las velocidades de flujo son pequeñas comparadas con la velocidad térmica de los iones. Se considera que la lámina de plasma es una zona de plasma “caliente” en donde la temperatura de los iones es unas 7 veces mayor que la temperatura de los electrones [31]. La tabla 2.2 muestra los principales parámetros de la lámina de

plasma a una distancia de 20 radios terrestres hacia la cola de la magnetósfera. La lámina de plasma se considera una zona homogénea en densidad  $n$  y temperatura  $T$ , a pesar de que existen gradientes en la dirección de la cola. La densidad, temperatura y presión dentro de la lámina de plasma están fuertemente correlacionadas con la velocidad y características del viento solar [27].

Existen diversos trabajos que muestran que la lámina de plasma es una zona turbulenta, y que los procesos turbulentos que ocurren son necesarios para entender su dinámica [30, 32–35]. La evidencia de turbulencia en esta zona es enorme y será descrita en el Capítulo 3. La tabla 2.3 nos resume las principales propiedades turbulentas de la lámina de plasma.

Propiedades turbulentas	Valor típico de la lámina de plasma
Tiempo de autocorrelación de flujo	140 s
Velocidad RMS del flujo	75 km/s
Tamaño de Escala integral	10200 km
Número de Reynolds magnético	$10^{13}$
Número de Reynolds	$5 \times 10^{11}$
Tiempo de vida de eddy	140 s
Tiempo de cruce alfvenico	21 s
Viscosidad de eddy	$8 \times 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}$

Tabla 2.3: Propiedades turbulentas típicas de la lámina de plasma (Fuente: Borovsky [30]).

## 2.4. Subtormentas geomagnéticas

Una subtormenta es uno de los fenómenos característicos de la magnetósfera terrestre. Corresponde a una perturbación en el campo geomagnético terrestre por un periodo de tiempo “breve” que puede ir entre menos de una hora a un par de horas de duración. La aparición de subtormentas es asociada visualmente a la intensificación

y expansión de los arcos aurorales.

Si bien existe evidencia de auroras desde hace milenios, en la era moderna fue Birkeland en 1903 quien primero nombró las subtormentas describiéndolas como “tormentas polares elementales” [36]. No fue sino hasta el año 1964 en que Akasofu describió la morfología de las subtormentas a través de un modelo para explicar la actividad auroral simultánea en ambos hemisferios en la misma línea de campo magnético [37].

En los momentos en los que el campo geomagnético se encuentra estable y no se producen subtormentas, decimos que es un periodo “quieto”. Los periodos quietos corresponden a todo el intervalo de tiempo entre que se termine una subtormenta y se declare la siguiente, y su duración puede ser entre unos pocos minutos a varios días. Se distinguen tres fases dentro de una subtormenta geomagnética: crecimiento, expansión y recuperación.

La fase de crecimiento —*growth phase*— corresponde al momento en que la transferencia de energía desde el viento solar hacia la magnetósfera aumenta significativamente. Esto generalmente sucede cuando la componente norte-sur del campo magnético interplanetario se vuelve negativa, es decir el campo cambia de orientación. Durante la fase de crecimiento existe mayor probabilidad de observar activaciones localizadas de las auroras como son los pseudo-quebres [37], que se distinguen de las subtormentas por tener una corta duración ( $\sim 10$  minutos) y una moderada intensidad en las perturbaciones magnéticas (menos de 100 nT).

La fase de expansión —*expansion phase*— se inicia en el instante de tiempo en que se produce un súbito acrecentamiento de los electrojets que viajan hacia el oeste, lo que se denomina como el “inicio de la fase de expansión” de una subtormenta —*expansion phase onset*. La energía acumulada durante la fase de crecimiento es



liberada durante la expansión.

La fase de recuperación —*recovery phase*— corresponde al momento en que la magnetósfera regresa a un estado quieto. Sin embargo, este nuevo estado quieto, o fase de recuperación se caracteriza por mantener aún un estado de perturbación geomagnética, de menor intensidad que a la que caracterizó la fase de expansión.

Pese a que se han definido las fases para una subtormenta aislada, este fenómeno es altamente complejo, y en general es difícil identificar cada una de las fases. Es más, es posible que durante el periodo de recuperación se produzca una nueva intensificación de la actividad geomagnética que puede ser interpretado como una nueva subtormenta o simplemente como parte de la subtormenta anterior.

La detección de subtormentas es un problema aún abierto. Si bien es cierto que desde hace mucho tiempo hay mecanismos bastante desarrollados para identificarlas, la falta de una teoría probada que explique con claridad el inicio de las subtormentas obliga a ir mejorando poco a poco las técnicas de detección. De todas maneras el principal mecanismo de detección de subtormentas corresponde al valor del índice auroral de electrojets [38], aunque se han desarrollado otros métodos como la búsqueda de pulsaciones Pc2.

Queda de manifiesto en lo descrito que es un gran desafío entender la magnetósfera terrestre y su dinámica. Una visión particular que ha guiado este trabajo es la que sugiere que se pueden entender algunos fenómenos magnetosféricos si los estudiamos desde el punto de vista de la turbulencia. Por ejemplo, como veremos en la sección 3.2 la lámina de plasma turbulenta no puede ser ignorada al discutir el proceso de desarrollo de una subtormenta. Determinar donde y como se inicia una subtormenta es uno de los principales objetivos de la misión THEMIS (ver apéndice A.1). Actualmente dos escenarios se presentan como posibles; el que asegura que la

subtormenta se desata en la cola y se mueve hacia la Tierra [39], en donde el inicio de la subtormenta se encuentra a unos 20 o 30 radios terrestres como resultado de una reconexión magnética y el que cree que la subtormenta se desata en las cercanías de la Tierra y se propaga hacia la cola, donde su inicio corresponde a una inestabilidad de tipo ruptura de corriente localizada entre 6 y 10 radios terrestres en dirección de la cola [40, 41]. Actualmente este problema está siendo discutido intensamente en la comunidad científica, al punto de que en algunas ocasiones el análisis del mismo evento conduce a conclusiones diferentes, [42] y [43].

Adicionalmente a las fuentes internas de turbulencia en la magnetósfera, esta constantemente interactúa con el viento solar que también presenta comportamiento turbulento y que afecta el acoplamiento entre viento solar y magnetósfera. Se ha encontrado que a mayor turbulencia en el viento solar, mayor es la actividad geomagnética [44]. El efecto de la turbulencia del viento solar está probablemente relacionado con la penetración del plasma hacia la magnetósfera interna, donde una explicación probable es la reconexión en la magnetopausa. En el capítulo 3 se hablará mas en detalle de las características turbulentas en la magnetósfera terrestre.

## Capítulo 3

# Turbulencia en la Magnetósfera Terrestre

En dinámica de fluidos, y en nuestro caso en física espacial, cuando podemos considerar al plasma como fluido, la turbulencia, o un flujo turbulento es un régimen caracterizado por un comportamiento irregular de tipo caótico y estocástico. Un flujo turbulento se caracteriza por poseer una baja difusión de momentum, una alta tasa de convección, variaciones rápidas en la presión y la velocidad tanto en temporalmente como espacialmente en diferentes escalas. Debido a la irregularidad es que se hace necesario tratar los problemas de turbulencia desde un punto de vista estadístico.

La turbulencia está muy asociada con la mezcla rápida de fluidos, esto es lo que conocemos como difusividad, es decir, un fluido turbulento tiene a homogeneizar cualquier mezcla de fluidos. Esta mezcla necesita de una cierta cantidad de energía inicial inyectada al sistema en un comienzo para poder realizarse. La difusión turbulenta, usualmente se describe mediante un coeficiente de difusión turbulenta, que depende de las condiciones del flujo, y no del fluido mismo. El concepto de difusión turbulenta supone una relación entre el flujo turbulento y el gradiente de alguna variable media en el fluido. En el caso de este trabajo, la difusión turbulenta estará caracterizada por la velocidad media de las partículas, y la difusión de estas. Es importante destacar



que un fluido no puede ser turbulento sólo presentando comportamiento caótico; es necesario que presente difusión.

Para mantener un flujo turbulento es necesario que exista una fuente externa entregando energía de manera continua al sistema, de otra manera, la turbulencia desaparece rápidamente a medida que la energía cinética se convierte en energía térmica producto de la viscosidad interna. La turbulencia causa la formación de eddies de una gran cantidad de tamaños, pues es un proceso que ocurre a múltiples escalas. Un eddy es un remolino de corriente moviéndose en sentido contrario al original del flujo, y que se crea cuando un fluido se encuentra con un obstáculo. Debido al vacío en la parte posterior del obstáculo, se produce movimiento de flujo en esa dirección.

En un fluido turbulento, la mayor parte de la energía cinética se encuentra en estructuras de gran escala. Es mediante el proceso de cascada energética desde estructuras de gran escala a otras de menor escala que se produce la disipación, pues en algún momento se crean estructuras suficientemente pequeñas para que la viscosidad disipe la energía través de la difusión molecular, que se ha vuelto importante. La escala en que este proceso sucede se denomina largo de escala de Kolmogorov.

Podemos entender el flujo turbulento como una superposición de un espectro de fluctuaciones de velocidad y de eddies actuando en un flujo laminar. Los eddies se definen como patrones coherentes de la velocidad, vorticidad y presión dentro del flujo. A partir de esta descripción, los flujos turbulentos se forman a partir de toda una jerarquía de eddies en una amplia gama de escalas de longitud. Esta jerarquía puede ser descrita por el espectro que mide la energía de las fluctuaciones de velocidad del sistema. Las escalas en la cascada de energía son generalmente impredecibles y altamente no simétricas. Ahora bien, sobre la base de las escalas de longitud típi-

camente apreciadas, los eddies se puede dividir en tres categorías: largos de escala integral, micro-escalas de Taylor y largos de escala de Kolmogorov.

El largo de escala integral corresponde a las escalas más grandes en el espectro de energía. Acá los eddies obtienen energía del flujo medio, y de otros eddies. Las micro-escalas de Taylor corresponden a las escalas intermedias, en donde aún no se produce disipación, si no que es donde se produce el traspaso de energía desde las escalas grandes a las pequeñas, jugando un rol importante en la transferencia de energía y momentum. La escala de Kolmogorov corresponde a la escala más pequeña, en donde entra energía a través de interacciones no lineales y sale energía a través de procesos viscosos.

Cabe destacar que lo anterior corresponde a dinámica de fluidos. Al estudiar turbulencia en la magnetósfera, o en general en un plasma espacial, debemos realizar algunas precisiones respecto a lo ya expuesto. Mientras que en fluidos ordinarios los términos viscosos juegan un rol disipativo predominante, en un plasma nos encontramos con ausencia de colisiones, de la manera que la viscosidad no puede ser introducida en la misma manera. Esto actualmente es un tema abierto, pues no hay consenso al respecto. Existen diferentes tipos de turbulencia en el plasma, sin embargo, las que son diferentes a la MHD no son de relevancia en este trabajo, y por lo mismo no han sido consideradas. Finalmente, en física de plasmas la cascada energética no es el único mecanismo de traspaso de energía ya que podría existir un mecanismo de cascada inversa, en donde la energía se traspara desde pequeñas a grandes escalas [11, 45]

### 3.1. Turbulencia en la magnetósfera terrestre

Existe diversa evidencia de que la magnetósfera presenta, al menos en ciertas regiones, un comportamiento de tipo turbulento. Esta evidencia ha sido recogida en diversos trabajos, usando diferentes métodos. Por ejemplo mediante las imágenes fotográficas del cielo —*all-sky imager*— durante la aparición y expansión de auroras y como estas se mueven con diferentes y a veces muy grandes velocidades [46]; la evidencia de grandes fluctuaciones en el campo eléctrico de las líneas de campo auroral medidas por diversos satélites como las misiones Viking, Freja, Fast, Interkosmos-Bulgaria-1300 [47–50]. Otra evidencia importante es la obtenida a partir del estudio de las fluctuaciones en los índices geomagnéticos [10, 51–57], absorción auroral [58, 59] e imágenes UVI polares [60].

La turbulencia en la magnetósfera se desarrolla en diferentes escalas tanto de manera espacial como temporal. La convección magnetosférica de vórtices, forzada por el campo eléctrico amanecer-atardecer, puede ser considerada como la escala más grande del entorno, pues tiene un tamaño de escala característico similar al tamaño de la magnetósfera misma. Las escalas menores aún necesitan mayor estudio, pues a pesar de toda la evidencia, la naturaleza de la turbulencia del plasma en la magnetósfera aún no es clara, y es probable que existan diversos procesos físicos a diferentes escalas involucrados en la generación de turbulencia. Por ejemplo, se sugiere que los gradientes de presión en el plasma podrían ser los responsables de la generación de turbulencia en gran escala y mediana escala [32, 61–63]. De igual manera, se ha discutido como posibilidad una cascada inversa turbulenta como explicación [11, 45]. Por otra parte, diversos trabajos indican que la turbulencia en la magnetósfera presenta un carácter intermitente [52, 54, 59, 64, 65].

La condición de equilibrio magnetoestático en donde el gradiente de presión en el plasma es compensado por la fuerza de Ampere se cumple en general en el plasma de la magnetósfera, aún así, el problema de la creación y del mantenimiento del equilibrio magnetosestático en la magnetósfera terrestre permanece sin ser resuelto ya que la estabilidad de las configuraciones de plasma turbulentas han sido aún menos estudiadas.

La primera parte de este trabajo, que corresponde a los Capítulos 4 y 5 se centra en la problemática del estudio de la turbulencia en la lámina de plasma en la cola de la magnetósfera. Los trabajos previos en esta área han mostrado a partir de mediciones del flujo de partículas en el interior de la lámina de plasma que las fluctuaciones de la velocidad de deriva superan con creces las velocidades medias de esta misma [27, 30, 33, 34, 44, 64, 66–72].

## **3.2. Turbulencia en la lámina de plasma**

La turbulencia en la lámina de plasma está influenciada por diversos factores tanto internos como externos a la magnetósfera. Específicamente, se ha observado que las subtormentas geomagnéticas incrementan la turbulencia. Diversos trabajos han mostrado que las fluctuaciones en la velocidad y especialmente el campo magnético se incrementan junto con el incremento del índice auroral de electrojets (AE) [73, 74]. En el capítulo 5 se analiza la relación entre el coeficiente de difusión tipo eddy en la lámina de plasma en función de las diversas fases de una subtormenta geomagnética tomando como base trabajos similares que se han realizado en los últimos años [69, 71, 72] y que han encontrado que el coeficiente de difusión aumenta significativamente durante las fases de crecimiento y de expansión.

En el último tiempo, se ha mostrado que el transporte turbulento en la lámi-



na de plasma es afectado por la orientación del campo magnético interplanetario (IMF) [75, 76]. En esa línea, la teoría de la formación de la lámina de plasma de Antonova y Ovchinnikov [77–79] explica con anterioridad a los hechos experimentales el porqué la dinámica turbulenta debe ser sensible a variaciones del campo magnético interplanetario. De acuerdo a esta teoría, la lámina de plasma estable y turbulenta puede ser formada cuando el transporte regular de plasma, producido por los campos eléctricos en dirección amanecer-atardecer a lo largo de la lámina de plasma es compensado por el transporte turbulento debido a difusión de tipo eddy.

### 3.3. Estabilidad de la lámina de plasma

Para estudiar la estabilidad de la lámina de plasma, se propone una modificación del sistema de ecuaciones de transporte comúnmente usadas en magnetohidrodinámica. Este problema es resuelto usando una aproximación desarrollada para transporte anómalo de plasma en laboratorio, por ejemplo promediando el sistema de ecuaciones de transporte sobre las fluctuaciones turbulentas y por la introducción de partículas anómalas y flujos de calor. El modelo propuesto por Antonova y Ovchinnikov propone que el flujo de partículas del plasma es igual a

$$\mathbf{\Gamma} = \langle n\mathbf{V} \rangle = n_0\mathbf{V}_0 - D\nabla n = 0 \quad (3.1)$$

donde  $\mathbf{\Gamma} = \langle n\mathbf{V} \rangle$  es el flujo total,  $\mathbf{V}_0$  es el flujo debido a transporte regular y  $D\nabla n$  es el flujo debido a transporte turbulento. Además,  $n$  es la densidad del plasma,  $\mathbf{V}$  es la velocidad de flujo del plasma,  $n_0$  es el promedio de las fluctuaciones de la densidad de partículas del plasma y  $D$  es el coeficiente de difusión de tipo eddy, en general de carácter tensorial.

La ecuación 3.1 explica el porqué a pesar del alto nivel de turbulencia, la lámina

de plasma permanece en un relativo equilibrio estable. Mientras las fluctuaciones turbulentas actúan expandiendo la lámina de plasma, el campo electrostático dirigido en la dirección amanecer-atardecer trata de comprimir la lámina de plasma. Esto es similar a lo que sucede en el laboratorio durante los experimentos tipo *pinch* en donde el plasma es comprimido por la inducción de un campo eléctrico. Cuando la compresión y la expansión se equilibran, el flujo resultante es cero, y es posible obtener una estructura estacionaria ( $\Gamma = 0$ ). Si el flujo resultante no es cero, tendremos una compresión ( $\Gamma > 0$ ) o una expansión ( $\Gamma < 0$ ) de la lámina de plasma en el plano ecuatorial.

Para resolver la ecuación 3.1 se supone la existencia de un balance de la presión total en la lámina de plasma [80–84]

$$p + \frac{B^2}{2\mu_0} = \text{const.} \quad (3.2)$$

donde  $p$  es la presión de plasma y  $B$  la intensidad del campo magnético. Para relacionar la presión con la densidad, se utiliza la ecuación de estado

$$p = k_B n T \quad (3.3)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann, sin embargo, es necesario conocer la distribución de la temperatura de los iones en la lámina de plasma para continuar. Damos por hecho que la temperatura de los iones es considerablemente mayor que la de los electrones, de manera que podemos despreciar a estos últimos de los cálculos.

Hay más de un proceso involucrado en la estimación de la distribución de temperatura de los iones. Mientras que la mezcla del plasma mediante la turbulencia ayuda a igualar la temperatura en toda la lámina de plasma, el calentamiento local durante subtormentas geomagnéticas y el transporte de plasma más frío desde los flancos de la cola producen una distribución no uniforme de temperatura. Mediciones

satelitales a gran altura de la temperatura de los iones en la lámina de plasma no revelan que existan cambios significativos en la temperatura en su interior ni una fuerte disminución en los bordes [85, 86]. En contraste, los satélites de baja altitud muestran una clara distribución de temperatura de los iones en la lámina de plasma. Usando las mediciones de la precipitación del flujo de partículas y suponiendo un ángulo de inclinación isotrópico, se puede suponer que la temperatura es constante en la lámina de plasma y que las variaciones de la presión del plasma son principalmente debido a variaciones en la densidad de partículas [77, 78, 87–90]. En el modelo descrito por Antonova y Ovchinnikov se supone que la temperatura de los iones es constante en la lámina de plasma, condición suficiente para obtener la densidad del plasma y con esto poder estimar el coeficiente de difusión tipo eddy. Notemos que al suponer la temperatura como una constante, la distribución de equilibrio de la densidad del plasma es proporcional a la distribución de presión del plasma. Dada una determinada dependencia de la velocidad y el coeficiente de difusión respecto de la intensidad del campo magnético, la condición  $\Gamma = 0$  determina la manera en que la presión del plasma depende de la intensidad del campo magnético. Suponiendo que la presión varía principalmente en la componente norte-sur,

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dz} = f(b) \quad (3.4)$$

donde  $b = B/B_L$  y  $B_L$  es el campo magnético en los lóbulos,  $f(b) = V_z(b)/D(b)$ ,  $l = (D/V_z)|_{B=B_L}$  es la escala característica y  $D$  es el coeficiente de difusión de tipo eddy. Hasta ahora, la dependencia de la componente norte-sur de la velocidad  $v_z$  y de  $D$  respecto del campo magnético en la lámina de plasma no es clara. Por ejemplo, si el tiempo de correlación de las fluctuaciones turbulentas es  $\tau = \text{const.}$  a lo largo de la lámina de plasma y los valores de la velocidad media de las partículas y de las



fluctuaciones turbulentas son proporcionales a  $B^{-1}$  y  $B^{-2}$  respectivamente, entonces  $f(b) \sim b$ . Tomando en consideración que la presión total en la cola es constante, suponiendo que  $p = p_0(1 - b^2)$  se puede integrar la ecuación 3.4 para obtener una solución de tipo Harris para el campo geomagnético:

$$B = B_L \tanh(z/2l). \quad (3.5)$$

La presión de plasma en este caso varía en la lámina de plasma como

$$p = p_0 \cosh^{-2}(z/2l). \quad (3.6)$$

Otro escenario posible es cuando  $f(b) = \text{const.}$  Esto puede suceder en el caso en que se tiene un plasma magnetizado con  $D \sim B^{-1}$  (difusión tipo Bohm) y  $v_z = E_y/B$  (deriva eléctrica) o bien cuando se cumple que  $D = \text{const.}$  y  $v_z = \text{const.}$  En este caso se tiene

$$p = p_0 \exp(-|z|/l) \quad (3.7)$$

$$B = B_L \sqrt{(1 - \exp(-|z|/l))} \text{sgn}(z) \quad (3.8)$$

Este modelo puede ser extendido más allá de la suposición  $T_i = \text{const.}$  para considerar cualquier distribución de temperatura de iones y coeficientes de difusión tipo eddy en la lámina de plasma, por ejemplo, la distribución de temperatura en el plano ecuatorial incluyendo efectos de la asimetría amanecer-anocheceer observada [91, 92]. Es importante considerar que el modelo de deriva de plasma desarrollado hace algún tiempo [93] que no incluye efectos de transporte turbulento, reproduce la asimetría amanecer-anocheceer sólo durante condiciones geomagnéticas quietas.

Considerando estas suposiciones para el modelo de la lámina de plasma estable, es posible estimar teóricamente el valor del coeficiente de difusión tipo eddy en la lámina

de plasma, el que en la dirección  $D_{zz}$  debe tener un valor cercano a  $10^5 \text{ km}^2/\text{s}$  [27], valor necesario para reproducir el ancho observado de la lámina de plasma en la cola de la magnetósfera terrestre. Estos valores coinciden con diferentes estimaciones del coeficiente de difusión realizadas a partir de mediciones en distintos proyectos satelitales como son ISEE-2, Interball-Tail y GEOTAIL [27, 30, 68–72].

De la teoría actual, parece claro que el transporte en la lámina de plasma y el coeficiente de difusión están afectados por la posición espacial en la lámina de plasma, por la actividad geomagnética y por el cambio en los parámetros del viento solar [69, 71–76]. Con esta interrogante en mente, en el Capítulo 4 se trabaja en realizar un análisis simultáneo del coeficiente de difusión de tipo eddy en la lámina de plasma en distintos puntos espaciales, para obtener algún indicador acerca de la variación esperada de este coeficiente.

## Capítulo 4

# Estudio del transporte turbulento en la cola de la Magnetósfera

Como ya ha sido adelantado, la dinámica del transporte turbulento en la lámina de plasma de la magnetósfera presenta aún bastantes aristas que no han sido resueltas. En este Capítulo<sup>1</sup>, se utiliza la configuración espacial de los satélites THEMIS para realizar la estimación simultáneamente el coeficiente de difusión en la lámina de plasma, cuando los satélites están ubicados entre 8 y 30 radios terrestres y alineados en la cola de la magnetósfera, en la zona denominada lámina de plasma. La razón principal para utilizar los satélites de la misión THEMIS es que por primera vez es posible realizar mediciones y análisis simultáneos en diversos puntos de la lámina de plasma. Para el cálculo, se ha optado por utilizar la distribución de momentos a bordo de los satélites entregadas por el instrumento ESA (ver Apéndice A) debido a que de momento son los datos más confiables procesados por el equipo de desarrollo de THEMIS.

---

<sup>1</sup>Este capítulo corresponde a gran parte del artículo “*Estimation of the eddy-diffusion coefficients in the plasma sheet using THEMIS satellite data*”, V. Pinto, M. Stepanova, E. E. Antonova, J. A. Valdivia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73 (2011) 1472-1477 [94]

## 4.1. Tiempo de autocorrelación de los iones

Sea  $V_\alpha(i)$  una de las componentes de la velocidad de flujo de los iones en el sistema de coordenadas GSM obtenida con una resolución temporal de 3 segundos, de acuerdo al tiempo de giro de los satélites. Consideremos dos componentes  $\alpha$  y  $\beta$  tal que  $\alpha, \beta = x, y, z$ , entonces es posible calcular la función de autocorrelación entre ambas componentes de acuerdo a

$$A_{\alpha\beta}(\tau) = \frac{\sum (V_\alpha(i) - \langle V_\alpha \rangle) (V_\beta(i + \tau) - \langle V_\beta \rangle)}{\sqrt{\sum (V_\alpha(i) - \langle V_\alpha \rangle)^2} \sqrt{\sum (V_\beta(i) - \langle V_\beta \rangle)^2}}, \quad (4.1)$$

donde  $\langle V_\alpha \rangle$  corresponde a la velocidad media para  $N$  datos y está definida por

$$\langle V_\alpha \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_\alpha(i). \quad (4.2)$$

De acuerdo a la literatura [27] los tiempos de autocorrelación son cercanos a los 140 segundos en la magnetósfera terrestre, de manera que se han considerado intervalos de  $N = 240$  puntos, que corresponden a 12 minutos de tiempo, para asegurarnos que tenemos una cantidad adecuada de datos. Para aumentar la cantidad de intervalos a evaluar, se realizan superposiciones de la mitad de cada intervalo,  $N = 120$  datos. En la práctica se obtiene un resultado para cada 6 minutos de datos. Los tiempos indicados en los resultados corresponderán al tiempo de la mitad de cada intervalo.

El tiempo de autocorrelación de la velocidad de los iones corresponderá al mejor ajuste en escala logarítmica de la función de autocorrelación de tipo exponencial definida por

$$A_{\alpha\beta}(\tau) = \exp(-\tau/\tau_{\alpha\beta}) \quad (4.3)$$

por la expresión lineal  $y = 1 - ax$ . La determinación del tiempo de autocorrelación es delicada, pues diferentes elecciones pueden llevar a resultados extremadamente

distintos. Para reducir el error asociado a la elección se han utilizado tres métodos distintos para el ajuste lineal.

El primer método consiste en determinar el valor  $\tau_0$  a partir del punto en donde el logaritmo de la función de autocorrelación aumentado en uno pasa de un valor positivo a uno negativo. A partir de esa cantidad de puntos se realiza un ajuste para todo  $\tau$  tal que  $3 \leq \tau \leq \tau_0$  y se selecciona el valor  $\tau_{\alpha\beta}$  a partir del ajuste que tenga el menor error medio.

El segundo método consiste en encontrar el valor  $\tau_{\min}$  en donde la función de autocorrelación tiene su primer mínimo y luego determinar  $\tau_{\alpha\beta}$  como el ajuste con el mínimo error para  $0 \leq \tau \leq \tau_{\min}$ .

En el tercer método se define el valor  $\tau_e$  donde la función de autocorrelación aumentada en uno se hace menor que  $e^{-1}$  y se determina  $\tau_{\alpha\beta}$  como el ajuste con menor error estadístico entre  $0 \leq \tau \leq \tau_e$ .

## 4.2. Coeficiente de Difusión

Como se ha discutido en el Capítulo 3, una vez determinado el tiempo de autocorrelación a partir de los tres métodos utilizados, es posible definir el coeficiente de difusión de eddy en la lámina de plasma de la cola de la magnetósfera como [27]

$$D_{\alpha\beta} = \frac{V_{rms,\alpha\beta}^2 \tau_{\alpha\beta}}{2}, \quad (4.4)$$

donde la velocidad RMS  $V_{rms,\alpha\beta}$  de las componentes  $\alpha$  y  $\beta$  está definida por

$$V_{rms,\alpha\beta}^2 = \frac{1}{N} \sum (V_\alpha(i) - \langle V_\alpha \rangle)(V_\beta(i) - \langle V_\beta \rangle), \quad (4.5)$$

donde  $N$  corresponde al número de puntos en el intervalo de tiempo seleccionado.

Es importante dejar en claro que este procedimiento permite estimar las 6 componentes independientes del tensor de difusión en coordenadas GSM (o cualquier



otra coordenada realizando las transformaciones apropiadas) sin embargo este trabajo se concentra en el estudio de las componentes diagonales del tensor, es decir, calcularemos  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$  y  $D_{zz}$ .

Como hay que utilizar el tiempo de autocorrelación en la determinación del coeficiente de difusión, y considerando que existen tres valores calculados por tres métodos diferentes, se ha decidido utilizar como valor final para el tiempo de autocorrelación el valor máximo entre los tres valores obtenidos, siempre y cuando estos no se diferencien en más de un 50%. En caso de que uno de los tres valores difiera significativamente respecto de los otros, ese valor se descarta y se toma el máximo entre los dos. En caso de que los tres valores difieran significativamente, ese intervalo queda nulo.

### 4.3. Caso particular: 22 de Febrero de 2008

Establecidos todos los parámetros y exigencias, se ha determinado que el día 22 de Febrero de 2008 es un buen candidato para realizar el estudio. Durante ese día los satélites se encuentran alineados en la cola de la magnetósfera. La figura 4.1 muestra la posición de los cinco satélites a las 8:00 UT en el plano XY y XZ, lo que nos indica a primera vista que el intervalo de tiempo entre las 7:00 UT y 8:00 UT es ideal para el análisis comparativo de los cinco satélites, debido a que estos se encuentran en posiciones cercanas a la lámina de plasma de la magnetósfera. La figura 4.2 indica que durante ese intervalo de tiempo existe actividad geomagnética moderada, como indican los índices aurorales de electrojet superior e inferior (AL y AU).

Adicionalmente al posicionamiento de los satélites mediante la observación espacial de estos, es necesario tener la certeza de que cada satélite se encuentra en la zona correspondiente a la lámina de plasma. Para esto se compararán los parámetros de

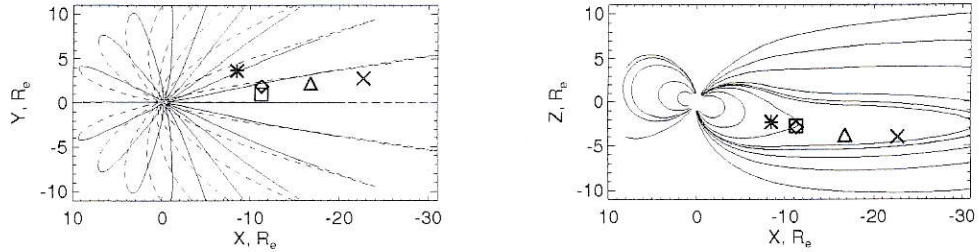


Figura 4.1: Posición de los satélites THEMIS en coordenadas GSM el plano XY (a) y el plano XZ (b). A (asterisco), B (cruz), C (triángulo), D (cuadrado) y E (diamante).

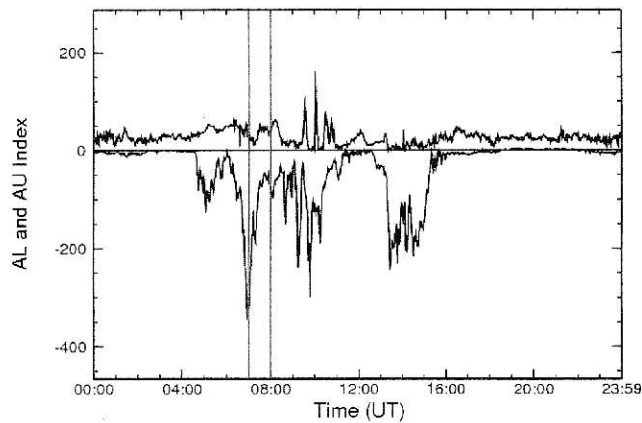


Figura 4.2: Los índices AL y AU durante el día 22 de Febrero de 2008

plasma medidos por los satélites con los típicamente observados dentro de la lámina de plasma. De todos los parámetros, parece razonable para este estudio en particular utilizar el parámetro  $\beta$  del plasma. Recordemos que en un plasma es posible definir la la presión dinámica como

$$p = nk_B T \quad (4.6)$$

a la vez que es posible definir la presión magnética del plasma debido a la influencia



de los campos magnéticos externos presentes como

$$p_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4.7)$$

Para describir algunas características en los plasmas espaciales, principalmente en los que corresponden al estudio de la magnetósfera terrestre, se define el parámetro  $\beta$  como la razón entre la presión de plasma (eq. 4.6) y la presión magnética (eq. 4.7), es decir,

$$\beta = \frac{2\mu_0 nk_B T}{B^2} \quad (4.8)$$

Esta decisión se ha adoptado principalmente debido al hecho de que la cola puede estar flameando en la dirección norte-sur (eje  $z$ ) lo que hace necesario que exista certeza de que los satélites están en la zona correcta. En este trabajo, se consideran válidos los coeficientes de difusión sólo cuando se cumpla que el parámetro  $\beta$  medio en un intervalo de 12 minutos es  $\beta \geq 1$ . Si bien en cada satélite esto se cumple en considerable cantidad de puntos, para el análisis general, la condición debe cumplirse simultáneamente para los 5 satélites THEMIS, lo que puede repercutir en una menor cantidad de puntos sobre los cuales podemos realizar el análisis.

El tiempo de autocorrelación, el parámetro  $\beta$ , las velocidades de flujo y finalmente el coeficiente de difusión han sido obtenidos a partir de los datos públicos de el proyecto THEMIS disponibles en el sitio web (<http://themis.ssl.berkeley.edu/>) y procesados con el software de análisis de datos IDL.

La figura 4.3 muestra los valores del parámetro  $\beta$ ,  $V_{\text{rms},zz}$ ,  $\tau_z$  y el coeficiente de difusión  $D_{zz} \pm \sigma_{D_{zz}}$  para el satélite THEMIS B durante el día 22 de Febrero de 2008, con intervalos de 12 minutos espaciados cada 6 minutos. Es importante notar que el error relativo  $\sigma_{D_{zz}}/D_{zz}$  es menor que el 15% de manera que no es posible apreciarlo en la escala logarítmica en que se exhibe el coeficiente de difusión.

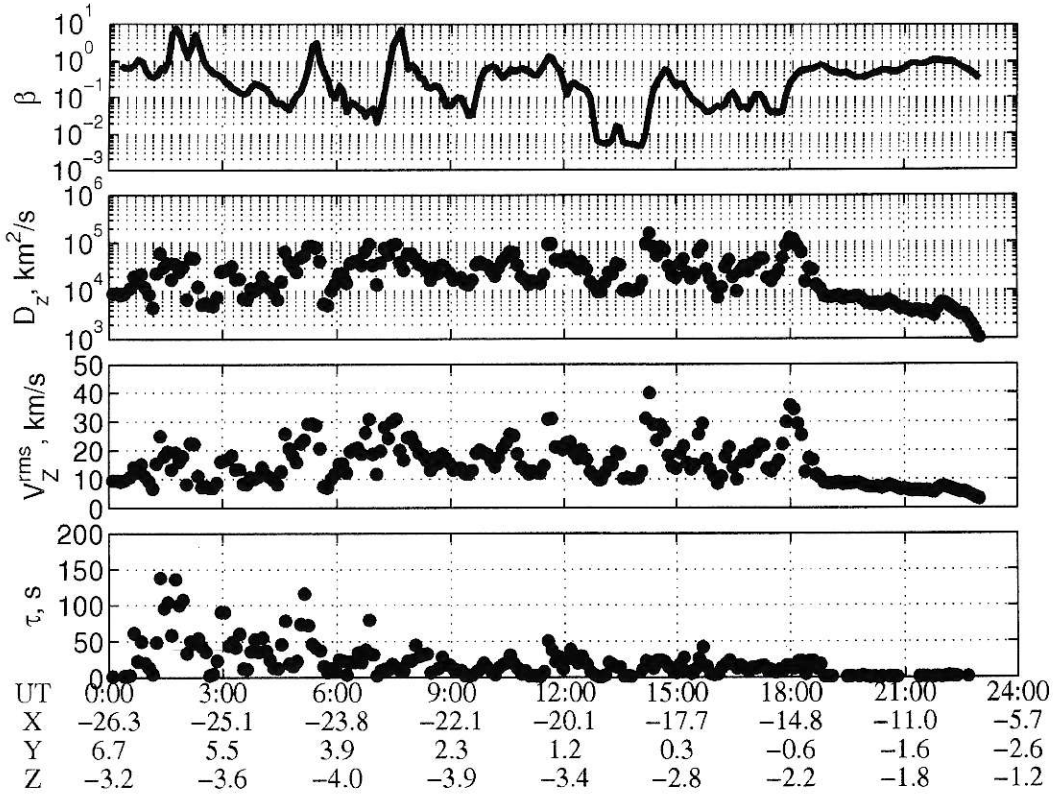


Figura 4.3: Desde arriba hacia abajo: promedio del parámetro  $\beta$ ,  $D_{zz}$ ,  $V_{rms,zz}$ ,  $\tau_{zz}$ , durante intervalos de 12 minutos cada uno el día 22 de Febrero de 2008. para el satélite THEMIS B. Cada intervalo se superpone en 6 minutos con el siguiente, de manera que los tiempos están marcados en la mitad de cada intervalo.

Impuesta la condición  $\beta \geq 1$  para determinar la cercanía de los satélites a la lámina de plasma, se realiza el análisis en detalle del coeficiente de difusión entre las 07:00 y 08:00 UT donde se satisface esta restricción para los cinco satélites. La figura 4.4 muestra los valores estimados para el coeficiente de difusión  $D_{zz}$  para los cinco satélites THEMIS en función de la posición de cada satélite en el eje  $x$  durante un intervalo de tiempo de una hora.

Es posible apreciar claramente en la figura 4.4 que existe una tendencia hacia el aumento del coeficiente de difusión a en la dirección de la cola.

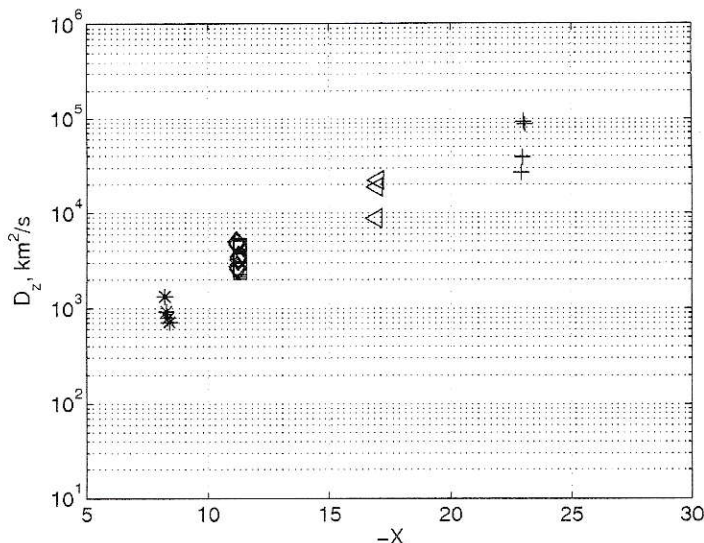


Figura 4.4: Estimación múltiple de  $D_{zz}$  en  $\text{km}^2/\text{s}$  como función de  $x$ , cuando se satisface el criterio  $\beta \geq 1$  para los cinco satélites durante el intervalo de tiempo 07:00 – 08:00 UT de la figura 4.3. Los símbolos representan a cada satélite: A (asterisco), B (cruz), C (triángulo), D(cuadrado), and E (diamante).

De la misma manera se ha realizado el análisis para las componentes  $D_{xx}$  y  $D_{yy}$  y se han encontrado resultados similares, esto es, que el coeficiente de difusión aumenta en dirección de la cola de la magnetósfera. La figura 4.5 muestra los valores medios del coeficiente de difusión durante el intervalo de tiempo 07:00 – 08:00 UT para los cinco satélites en función de la posición en el eje  $x$ . Se cumple que  $D_{xx}, D_{yy} \geq D_{zz}$ . Es relevante notar que para  $-x < 15$  radios terrestres se cumple que  $D_{yy} < D_{xx}$  mientras que para  $-x > 15$  radios terrestres se cumple que  $D_{xx} < D_{yy}$ .

#### 4.4. Otros casos

De la misma manera se han analizado una serie de casos en donde se cumplen los requisitos establecidos en la sección 4.3 y se han obtenido en general los mismos resultados que en el caso único analizado anteriormente.

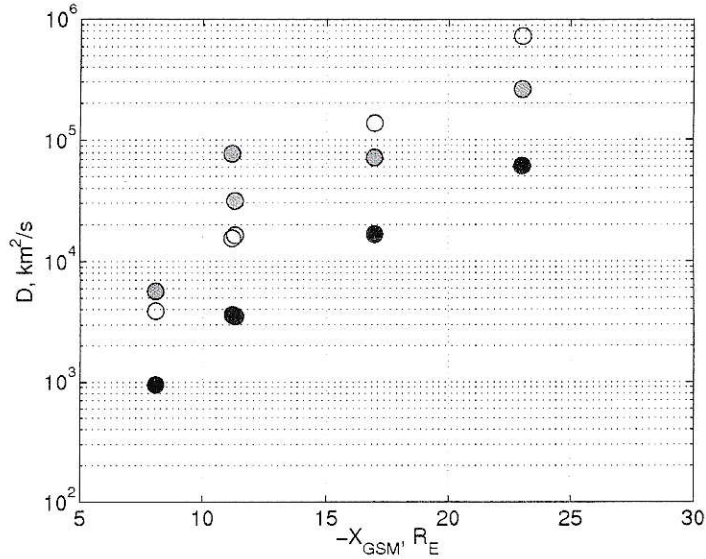


Figura 4.5: Promedio temporal de los términos diagonales del tensor de difusión tipo eddy como función de  $x$  para los cinco satélites, donde están marcados  $D_{xx}$  (círculo blanco),  $D_{yy}$  (círculo gris) y  $D_{zz}$  (círculo negro). Los promedios corresponden al intervalo de tiempo de la figura 4.4

### 14 de Febrero de 2008

Durante el día 14 de Febrero existe un intervalo más extenso de tiempo para realizar el análisis, en donde se cumplen de buena manera todos los requisitos exigidos para el cálculo del coeficiente de difusión. La figura 4.6 muestra el promedio de los coeficientes de difusión en función de la distancia de la Tierra y la posición de los satélites en el plano  $x - z$  entre las 04:00 y 07:00 UT.

### 22 de Febrero de 2008

Para el día 22 de Febrero de 2008 se han encontrado otros dos casos apropiados para el análisis, adicionales a los que ya se han detallado en las secciones previas. La figura 4.7 muestra un resumen similar al de la figura 4.6 para el intervalo de tiempo que va entre las 01:00 y 04:00 UT. La figura 4.8 representa lo mismo para el intervalo



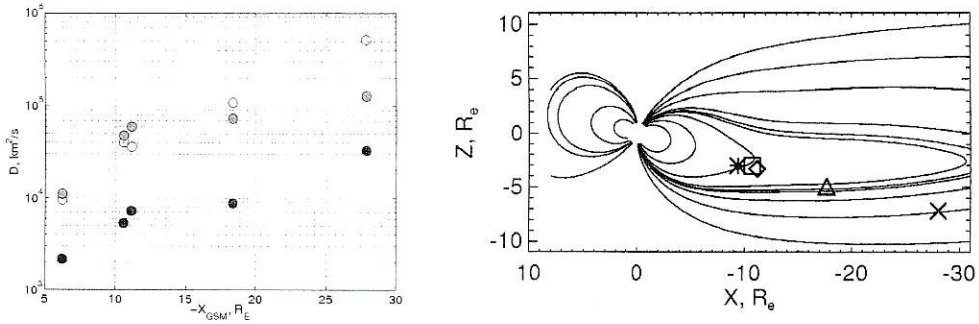


Figura 4.6: A la izquierda: Coeficiente de difusión promedio para todos los satélites en función de la distancia por componentes,  $D_{xx}$  (blanco),  $D_{yy}$  (gris) y  $D_{zz}$  (negro). A la derecha: Posición de los satélites en el tiempo medio del intervalo; THA (asterisco), THB (cruz), THC (triángulo), THD (cuadrado) y THE (diamante). Intervalo de tiempo 04:00 – 07 UT

de tiempo 05:00 – 06:00 UT.

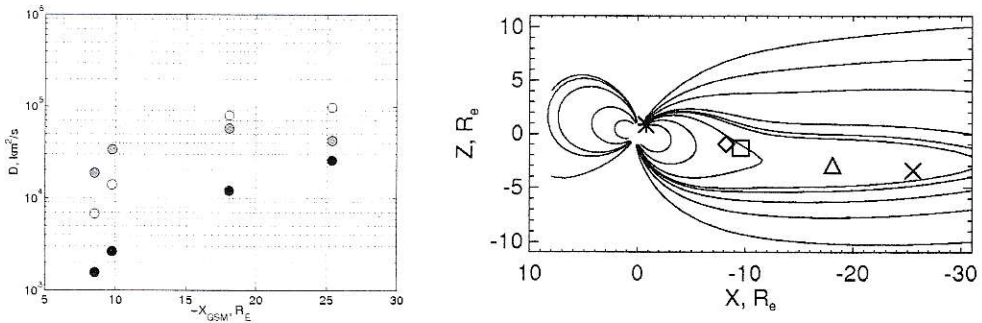


Figura 4.7: A la izquierda: Coeficiente de difusión promedio para todos los satélites en función de la distancia por componentes,  $D_{xx}$  (blanco),  $D_{yy}$  (gris) y  $D_{zz}$  (negro). A la derecha: Posición de los satélites en el tiempo medio del intervalo; THA (asterisco), THB (cruz), THC (triángulo), THD (cuadrado) y THE (diamante). Intervalo de tiempo 01:00 – 04:00 UT



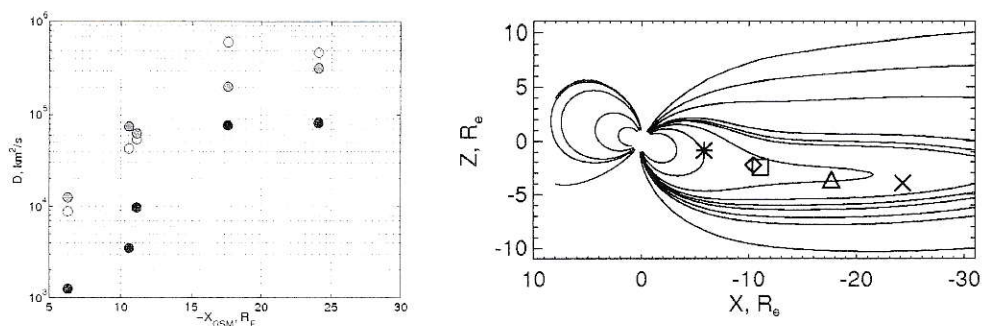


Figura 4.8: A la izquierda: Coeficiente de difusión promedio para todos los satélites en función de la distancia por componentes,  $D_{xx}$  (blanco),  $D_{yy}$  (gris) y  $D_{zz}$  (negro). A la derecha: Posición de los satélites en el tiempo medio del intervalo; THA (asterisco), THB (cruz), THC (triángulo), THD (cuadrado) y THE (diamante). Intervalo de tiempo 05:00 – 06:00 UT

## 26 de Febrero de 2008

El último caso a incluir en el análisis corresponde al día 26 de Febrero de 2008, en el intervalo de tiempo 03:00 – 06:00 UT. El resumen se puede apreciar en la figura 4.9. De igual manera que en el resto de los casos, la tendencia es similar, es decir, se mantiene una tendencia al incremento del coeficiente de difusión tipo eddy en la dirección de la cola de la magnetósfera.

Para profundizar en los resultados obtenidos en estos casos particulares de estudio, en el Capítulo 5 se realizará un análisis estadístico sobre los datos recolectados por la misión THEMIS en los años 2007 y 2008, para determinar si los casos particulares estudiados en las secciones previas corresponden a un comportamiento general de la lámina de plasma o si se tratan de casos aislados.

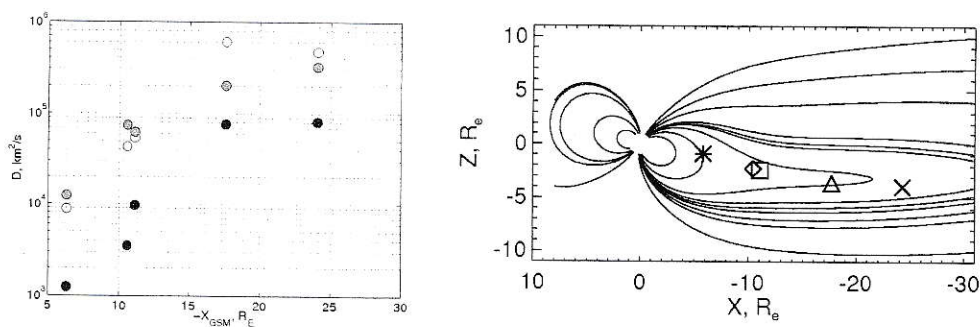


Figura 4.9: A la izquierda: Coeficiente de difusión promedio para todos los satélites en función de la distancia por componentes,  $D_{xx}$  (blanco),  $D_{yy}$  (gris) y  $D_{zz}$  (negro). A la derecha: Posición de los satélites en el tiempo medio del intervalo; THA (asterisco), THB (cruz), THC (triángulo), THD (cuadrado) y THE (diamante). Intervalo de tiempo 03:00 – 06:00 UT

## Capítulo 5

# Distribución Espacial del Coeficiente de Difusión

Como ha sido mostrado en el Capítulo 4, es posible calcular el coeficiente de difusión de tipo eddy para el transporte turbulento en la lámina de plasma de la magnetósfera terrestre. Para avanzar en esta misma línea, en este capítulo<sup>1</sup> se analiza la distribución espacial del coeficiente de difusión tipo eddy, usando nuevamente los datos entregados por los satélites THEMIS para las diferentes fases de las subtormentas geomagnéticas acontecidas durante ese periodo de tiempo.

### 5.1. Parámetros de selección

Para realizar este trabajo se ha utilizado la función de distribución de iones obtenida de los momentos a bordo para el Analizador Electroestático (ver Apéndice A.1.1) y del Telescopio de Estado Sólido (ver Apéndice A.1.2), y el campo magnético obtenido de las mediciones del Magnetómetro de Flujo (ver Apéndice A.1.3), utilizados para calcular el parámetro  $\beta$  del plasma. La selección automática de datos

---

<sup>1</sup>Este capítulo corresponde a gran parte del artículo “*Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data*”, M. Stepanova, V. Pinto, J. A. Valdivia, and E. E. Antonova, *Journal of Geophysical Research* 116, A00I24, (2011), doi:10.1029/2010JA015887. [95]

trabaja buscando los intervalos de tiempos en donde se cumple que  $n \geq 0.1 \text{ cm}^{-3}$ , y la temperatura de los iones es  $T \geq 1 \text{ keV}$ . Adicionalmente, para asegurarnos que el satélite se encuentre efectivamente dentro de la zona de estudio, hemos forzado a que se encuentre en un rango variable entre los  $-8 R_E$  y  $8 R_E$  en la coordenada norte-sur  $z$ , con valor del parámetro  $\beta \geq 1$ , para tener certeza de que el satélite se encuentre efectivamente dentro de la lámina de plasma. En la figura 5.1 se muestra un ejemplo de datos para el satélite THEMIS C el día 26 de Febrero de 2008. Como se puede apreciar, el satélite no está siempre ubicado dentro de la lámina de plasma y la combinación de criterios de densidad, temperatura y parámetro  $\beta$  es suficientemente robusto para brindarnos seguridad en la decisión.

Para evaluar el nivel del transporte turbulento, es conveniente determinar el tensor de los coeficientes de difusión tipo eddy producidos por la convección turbulenta de vórtices en una aproximación de difusión. Este procedimiento ya fue explicado teóricamente (ver sección 3.3) y su desarrollo aplicado fue ampliamente descrito en el capítulo anterior, (ver sección 4.2). Para determinar si el coeficiente de difusión es evaluado durante tiempo quieto, fase de expansión o fase de recuperación de una subtormenta, se ha realizado un análisis sobre el índice auroral de electrojet bajo (AL) con resolución temporal de un minuto. El intervalo de tiempo es considerado un periodo quieto, cuando el índice AL es mayor o igual que  $-100 \text{ nT}$  y el valor absoluto de la pendiente  $s$  del índice AL es  $|s| < 0.5 \text{ nT/min}$  por un periodo de 40 minutos antes y después del punto medio del intervalo. El intervalo de tiempo es considerado un periodo en fase de expansión cuando AL es menor  $-100 \text{ nT}$  y el valor de la pendiente del índice AL es  $s \leq -0.5 \text{ nT/min}$  en un periodo de tiempo de 5 minutos respecto del punto medio del intervalo, y  $s < 0$  durante al menos 20 minutos respecto del punto medio del intervalo. El intervalo de tiempo es conside-



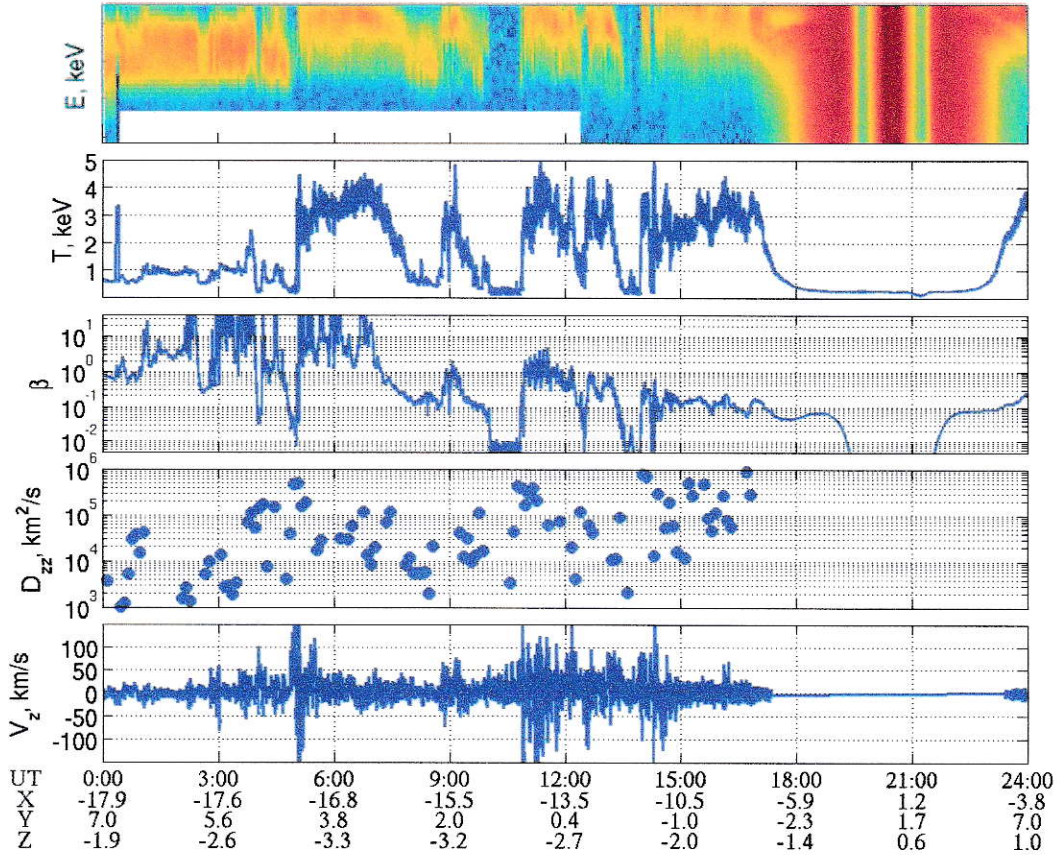


Figura 5.1: De arriba a abajo: Espectrograma de Iones, Temperatura de Iones, Parámetro  $\beta$  del plasma, coeficiente de difusión eddy, componente Z de la velocidad de iones obtenidos para el satélite THEMIS C el día 26 de Febrero de 2008

rado un periodo de fase de recuperación de la subtormenta cuando AL menor que  $-100$  nT y el valor de la pendiente del índice AL es  $s \geq 0.5$  nT/min por al menos 5 minutos con respecto del punto medio del intervalo y  $s > 0$  durante al menos 20 minutos respecto del punto medio del intervalo. Durante este estudio no ha sido posible distinguir los datos que corresponden al periodo de la fase crecimiento de una subtormenta ya que es complejo establecer un criterio automático para la selección de datos. Dicho esto, debemos considerar que todos los periodos correspondientes a



crecimiento están incluidos en el tiempo de periodos quietos.

Para analizar la distribución espacial del coeficiente de difusión tipo eddy, se ha particionado el plano  $X$ - $Y$  (en coordenadas GSM) en 30 cuadros superpuestos entre los 6 y los 30 radios terrestres en la cola y entre  $-\pi/4$  y  $\pi/4$  donde el origen se encuentra en el punto de medianoche, en la dirección azimutal. Cada cuadro cubre una extensión de 6 radios terrestres en la dirección radial, y  $\pi/12$  en la dirección azimutal. Cada cuadro está superpuesto con los demás por la mitad de su tamaño (3 radios terrestres y  $\pi/24$  de ángulo). Esto ha sido determinado para mejorar la estadística de manera que cada cuadro tiene al menos 10 estimaciones del coeficiente de difusión, lo que permite obtener una distribución final más pareja. Adicionalmente, se han eliminado los tiempos de autocorrelación muy cortos ( $\tau < 10$  s) y los muy largos ( $\tau > 300$  s). Al eliminar tiempos de autocorrelación excesivamente largos estamos eliminando los flujos coherentes en el sistema.

## 5.2. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de la distribución espacial de los valores de los coeficientes de difusión tipo eddy en la lámina de plasma se utilizaron los datos comprendidos entre los meses de Abril de 2007 hasta Diciembre de 2008. Si bien el análisis se realizó en cada intervalo de tiempo que agrupara a los satélites en la lámina de plasma, es importante destacar que el periodo comprendido entre los meses de Diciembre 2007 hasta Marzo 2008 y Diciembre de 2008 corresponden a la fase de cola de la misión THEMIS. La figura 5.2 muestra la distribución espacial del número de datos utilizado en el análisis para las fases quietas, expansión y recuperación de las subtormentas.

La figura 5.3 muestra la distribución espacial de los términos diagonales del coe-

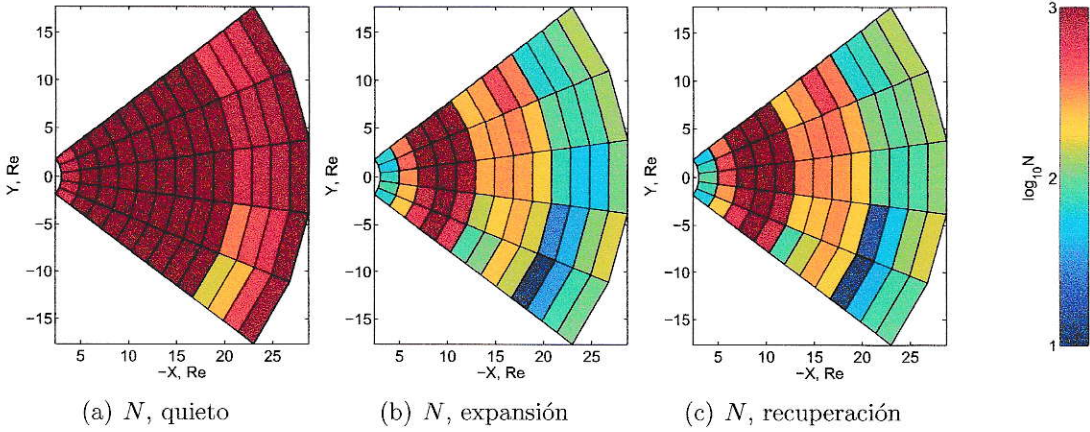


Figura 5.2: Número de mediciones del coeficiente de difusión tipo eddy  $N$  en cada cuadro espacial durante cada fase de una subtormenta. La escala utilizada para los colores es de tipo logarítmica.

ficiente de difusión tipo eddy en coordenadas GSM durante las tres diferentes fases de las subtormentas consideradas en el análisis. Es posible apreciar de las imágenes que aún cuando existen condiciones geomagnéticas quietas, el valor del coeficiente de difusión varía significativamente. Ahora bien, pese a esta variación, se ve claramente que el promedio de los términos diagonales del tensor de coeficientes de difusión aumenta a medida que nos alejamos de la Tierra en dirección de la cola, independiente de la condición geomagnética. Tal como se mostró en el Capítulo 4 se cumple en general que  $D_{xx}, D_{yy} > D_{zz}$ . De igual manera se aprecia que los valores de los coeficientes de difusión encontrados se acercan bastante a los valores típicos reportados en la literatura [27, 68–72].

En la figura 5.4 se muestra la variación del coeficiente de difusión en función de la distancia a la Tierra, obtenido promediando los valores en cada cuadro de la figura 5.3 por el ángulo completo. Se puede apreciar que en general todos los componentes diagonales del tensor de coeficientes de difusión tienden a aumentar

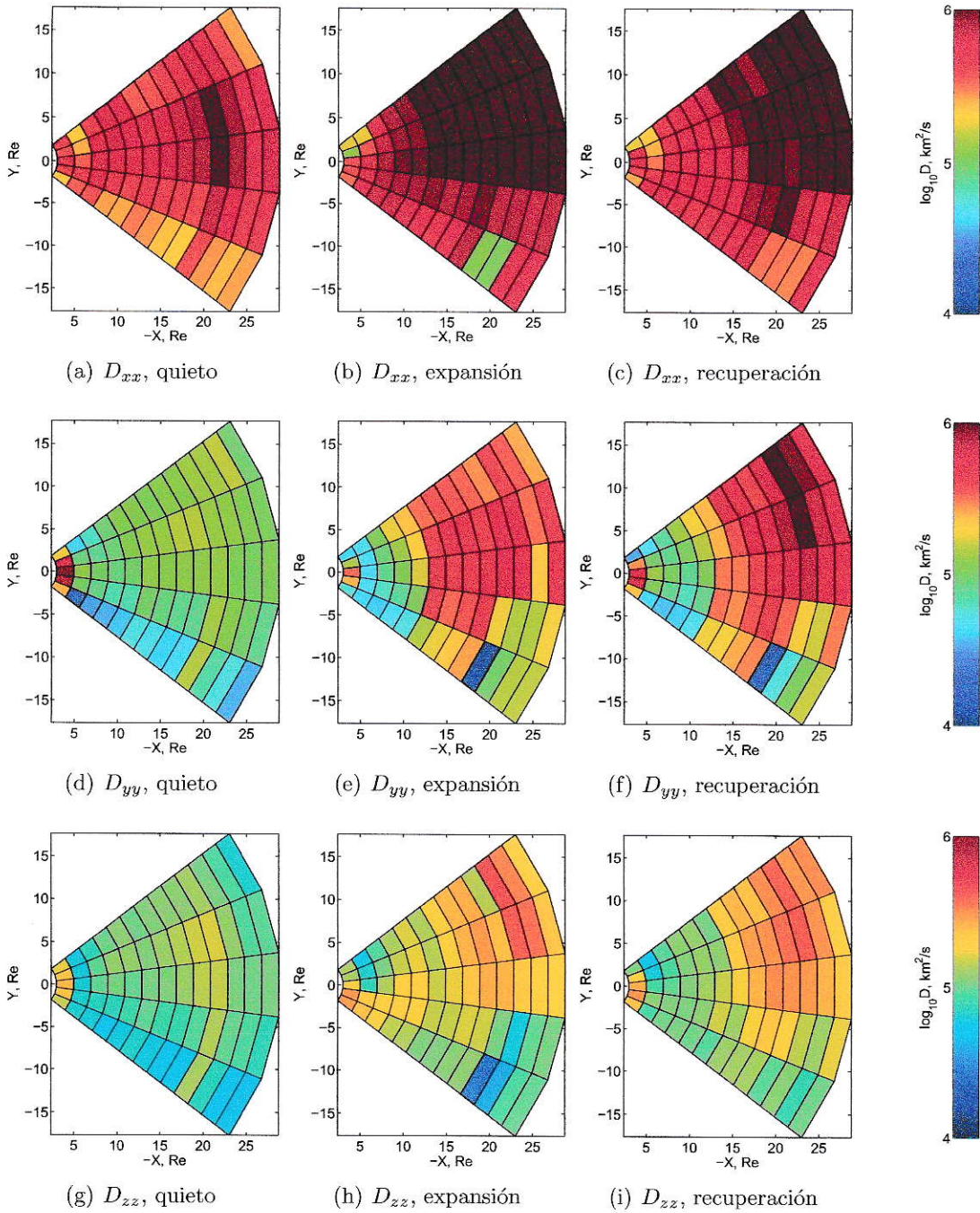


Figura 5.3: Estimación de los perfiles espaciales de los términos diagonales del tensor de coeficientes de difusión tipo eddy para las diferentes fases de una subtormenta y para los diferentes ejes espaciales en coordenadas GSM.



su valor en dirección de la cola, alejándose de la Tierra, especialmente durante la fase de expansión y de recuperación de las subtormentas. Se aprecia de igual manera una cierta saturación alrededor de los 15 a 20 radios terrestres que podría estar relacionada con el cambio del campo magnético dipolar al campo magnético típico de la cola.

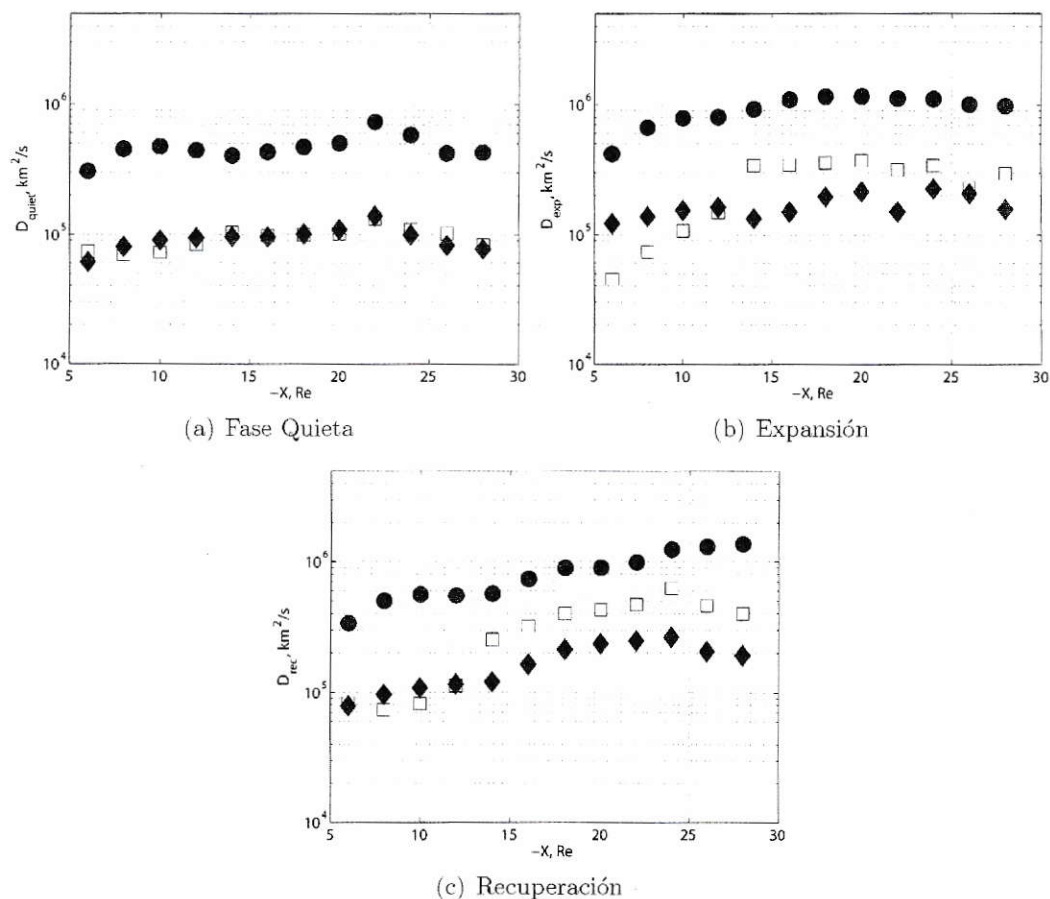


Figura 5.4: Variación del coeficiente de difusión en función de la distancia a la Tierra para las distintas fases de una subtormenta. En cada imagen se muestra  $D_{xx}$  (círculos negros),  $D_{yy}$  (cuadrados blancos) y  $D_{zz}$  (diamantes negros).

Del análisis realizado es posible notar un incremento general de las componentes del coeficiente de difusión durante las subtormentas con respecto de los periodos

quietos, sin embargo, parece existir un máximo en una posición cercana a los 22 radios terrestres, lo que debe ser considerado para un estudio más detallado.

Es claro también en la figura 5.3 que existe una clara asimetría las tres componentes diagonales respecto de la zona amanecer-anochece. Este efecto se da para las tres fases estudiadas pero es más significativo en la fase de recuperación. Es muy interesante si se observa que existe una disminución importante en las tres componentes diagonales alrededor de  $X = 20 R_E$  y  $Y = -10 R_E$  lo que podría estar relacionado con la baja mostrada en la figura 5.4 a partir de los 20 radios terrestres.

Con este trabajo se ha tratado de realizar una contribución al impacto que tiene la turbulencia en la dinámica de la magnetósfera terrestre. En el capítulo siguiente se estudiarán fenómenos que ocurren en lugares donde no es claro que sea la turbulencia el factor predominante, es decir, en la parte interna y diurna de la magnetósfera terrestre. Mediante el estudio de la resonancia de las líneas de campo magnético FLR, se espera realizar una contribución a las técnicas de monitoreo remoto de la magnetósfera terrestre.



## Capítulo 6

# Validación del método de determinación de la densidad de plasma en la magnetósfera interna usando datos de SAMBA y THEMIS

La medición de los parámetros del plasma en la magnetósfera terrestre interna es un trabajo de mucha importancia y es de gran complicación técnica en la práctica, tanto así que es uno de los objetivos que persigue la comunidad de Física Espacial con bastante dedicación desde hace una buena cantidad de años. El problema radica principalmente en que las mediciones *in-situ* son muy escasas debido al rápido movimiento de los satélites a través de esta región ( $\sim$ minutos) por una parte y a las limitaciones propias en el rango abarcado por los instrumentos de medición que portan dichos satélites. Es por esto que el monitoreo constante de procesos dinámicos desde la superficie terrestre es muy importante. Originalmente las ondas VLF silbantes —*whistler en inglés*— [96,97] fueron usadas para el monitoreo remoto de la magnetosfera interna en la determinación de la densidad ecuatorial de iones de un determinado tubo de flujo magnético,  $\rho_{eq}$ . La mayor limitación de este método es

que carece de una cobertura continua, ya que las ondas silbantes no están siempre presentes.

Actualmente, los magnetómetros terrestres ofrecen una manera robusta para monitorear la densidad de masa del plasma en la magnetósfera interna a través e la determinación de resonancias en las líneas de campo de frecuencias ultra bajas (ULF) a partir de estaciones pareadas. La densidad de masa se determina a través de la resonancia del tubo de flujo que se origina en el punto medio entre las dos estaciones. Este proceso se conoce como resonancia de las líneas de campo —*Field Line Resonance*— (FLR) [98–108]. A partir del cálculo de esta resonancia, es posible determinar el promedio de la masa molecular de los iones, lo cual entrega información indirecta acerca de la composición de la magnetósfera interna y el nivel de contribución de los iones pesados.

## 6.1. Resonancia de las líneas de campo

Los magnetómetros de la red SAMBA están diseñados para facilitar el trabajo de las técnicas de resonancia de las líneas de campo (ver Apéndice A.2). Esta es la razón de que se encuentren en disposición de pares cercanos. En este trabajo utilizaremos las estaciones ubicadas en la península Antártica en la base O’Higgins(OHI) y en la isla Rey Jorge en la base Escudero (ESC). En la latitud en que se encuentran estas estaciones (ver sección A.2) las resonancias de líneas de campo ocurren en el rango de las pulsaciones Pc3 con frecuencias típicas entre 1 y 60 mHz dependiendo de la latitud. Estas pulsaciones se caracterizan por estar presentes en la parte diurna de la magnetósfera y son originadas por las ondas formadas en el arco de choque en la parte diurna. Estas ondas generan una perturbación de compresión en la magnetopausa, la que se propaga uniformemente a través de la magnetósfera interna [98]. Las ondas

Pc3 se pueden detectar aplicando un filtro de frecuencias sobre las componentes del campo magnético, como se muestra en la figura 6.1

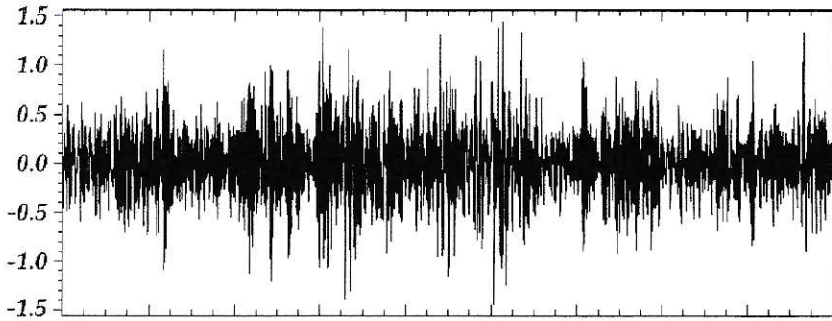


Figura 6.1: Filtro de frecuencias sobre la componente  $x$  del campo magnético medido en la superficie terrestre para la búsqueda de pulsaciones Pc3 [108].

Cuando la pulsación Pc3 se acopla con el campo magnético, se observa un acoplamiento de tipo radial y transversal y los efectos de la resonancia son detectados en la superficie de la Tierra en una latitud particular correspondiente a la línea de campo magnético en la que la resonancia ha ocurrido. Para la detección de estas resonancias existen diversos métodos que por lo general funcionan en base a la detección de onda de frecuencia ultra baja (ULF) y que requieren de un par de estaciones separadas algunos cientos de kilómetros. Estos métodos son: diferencia de fases de la componente  $H$  del campo magnético entre dos estaciones [99, 101–103] y la razón de las amplitudes de la componente  $H$  del campo magnético obtenido por ambas estaciones [103–105].

Para determinar la densidad de masa en el plano ecuatorial del tubo de flujo magnético en resonancia usando las frecuencias de resonancia se asume que el campo magnético cercano a la Tierra tiene comportamiento dipolar y que la densidad de

masa  $\rho$  varía a lo largo de la línea de campo magnético como: [106, 107]

$$\rho = \rho_{\text{eq}} \left( \frac{LR_E}{R} \right)^m \quad (6.1)$$

en donde  $\rho$  es la densidad de masa en un punto de la línea de campo,  $\rho_{\text{eq}}$  es la densidad de masa del plano ecuatorial,  $R_E$  es el radio de la Tierra,  $L$  es el parámetro de McIlwain y  $m$  es la potencia que determina la disminución de la densidad a lo largo de la línea de campo magnético.

En los últimos años, se han desarrollado métodos automáticos de detección de frecuencias de línea de campo para las técnicas descritas de razón de amplitudes y diferencias de fases [108], y que serán el punto de partida de nuestro análisis.

## 6.2. Comparación con datos espaciales de THEMIS

Para validar el método de detección de frecuencias de resonancia de líneas de campo se realiza la comparación de los resultados obtenidos en la superficie terrestre por el par de magnetómetros ESC-OHI con los datos entregados por los satélites de la misión THEMIS, de dos maneras diferentes. La primera consiste en la búsqueda de la resonancia utilizando el mismo método descrito en la sección anterior, pero optimizado para ser utilizado en satélites en movimiento. La segunda manera es a través de la comparación con los valores medidos *in-situ* por los satélites. Se estudiará la correlación existente entre las frecuencias de resonancia y las densidades de masa estimadas tanto en la superficie terrestre como en el espacio.

El análisis de órbitas de la misión THEMIS demuestra que cuando los perigeos de los satélites se encuentran en el lado diurno de la magnetósfera, estos se encuentran en la misma línea del campo geomagnético que las estaciones de la red SAMBA.



Para determinar la línea del campo geomagnético se utiliza el modelo semi-empírico de Nikolai Tsyganenko T89 [109]

### 6.3. Caso: 16 de Junio de 2007

Para efectuar la validación se ha seleccionado la conjunción del día 16 de Junio de 2007. En este día en particular existe una conjunción de 4 satélites de la misión THEMIS con las estaciones ESC y OHI, con una tolerancia de  $5^\circ$  en latitud y longitud, con centro en la estación Escudero, la que ocurre entre las 12:00 y 12:50 horas UT. Para encontrar esta conjunción se utiliza la proyección de la posición satelital sobre la superficie terrestre a través de la simulación de las líneas de campo magnético entregadas por el modelo de Tsyganenko T89 [109]. La figura 6.2 muestra la proyección de los satélites sobre la superficie terrestre en dos instantes de tiempo diferentes.

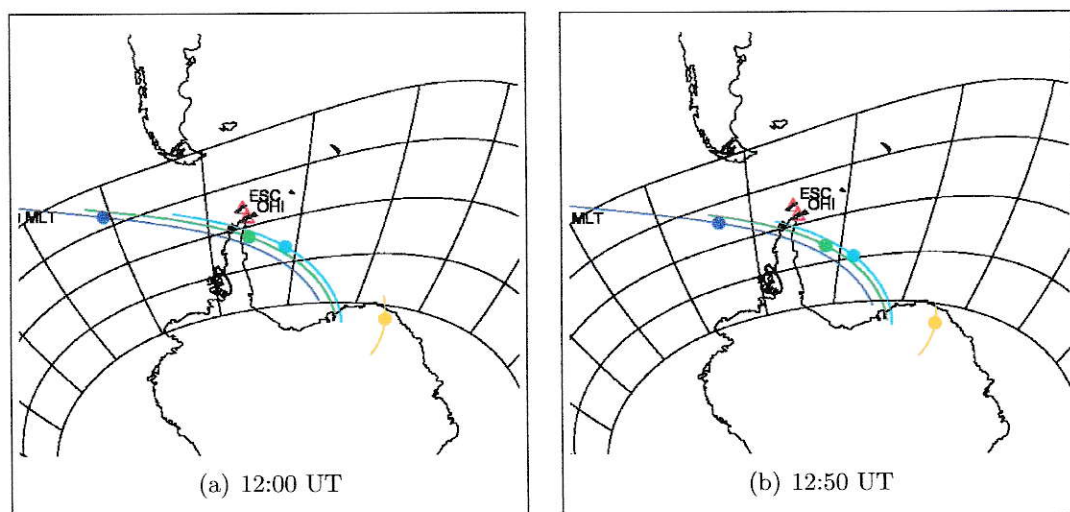


Figura 6.2: Posición de los satélites THB (azul), THC (celeste), THD (verde) y THE (amarillo) en conjunción magnética con las estaciones antárticas Escudero y O'Higgins.

Para tener un panorama completo del caso que se analiza, se han estudiado los índices AL y DST para establecer las condiciones geomagnéticas. Adicionalmente se ha recopilado la información del viento solar. La figura 6.3 muestra que para el evento seleccionado no se aprecia una alta actividad geomagnética, esto es, hay ausencia de tormentas magnéticas, aunque de acuerdo al índice AL es posible que exista una subtormenta en la magnetósfera terrestre.

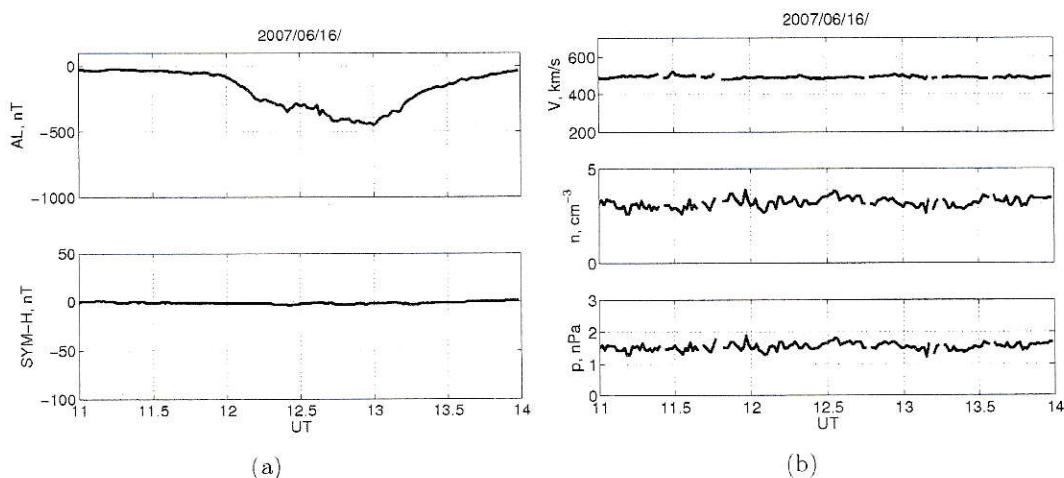


Figura 6.3: (a) De arriba a abajo: índice AL, índice DST (b) De arriba a abajo: velocidad, densidad de iones y presión dinámica del viento solar. Datos obtenidos de World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japón.

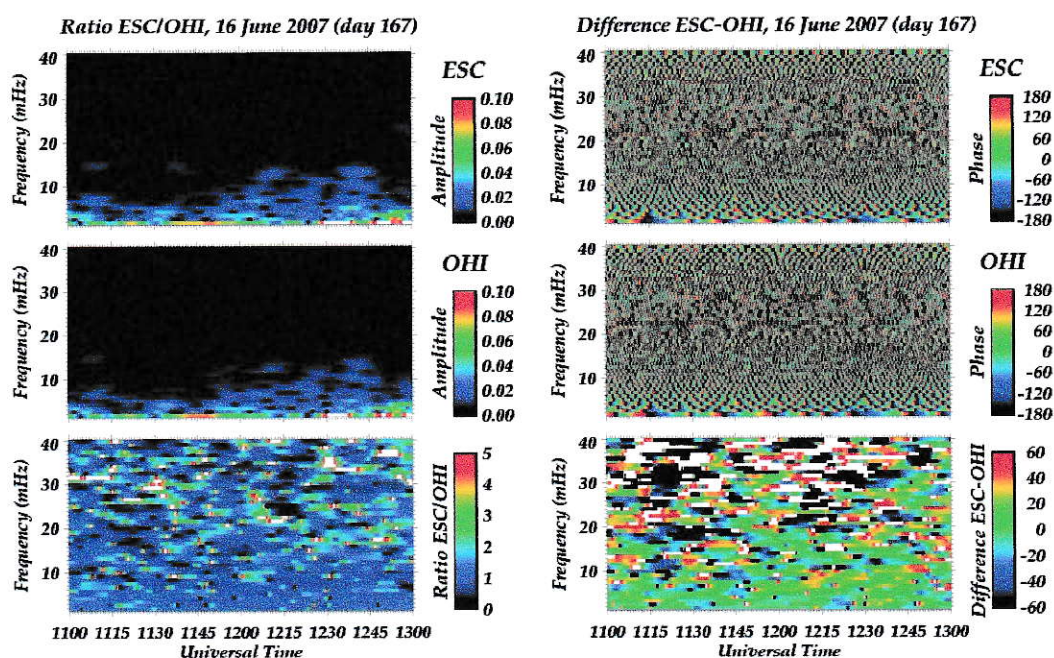
Para la búsqueda de las frecuencias de resonancia de las líneas del campo magnético se ha utilizado la técnica automatizada descrita por Zesta y Boudouridis [108] que utiliza el método de razón de amplitudes y de diferencia de fases. El procedimiento consiste en seleccionar los datos de un par de estaciones de magnetómetros en la superficie terrestre separados por unos cientos de kilómetros en latitud y muy cercanos en longitud, y calcular el espectro dinámico de la componente  $H$  del campo magnético (la componente que apunta al norte) o la componente horizontal  $B_{\text{Hor}} = (H^2 + D^2)^{1/2}$ , ( $D$  es la componente que apunta hacia el este) en ambas estaciones utilizando una

transformada de Fourier. Es importante destacar que se cumple  $D \ll H$  debido a que los magnetómetros están orientados hacia el norte magnético. La componente  $H$  es de interés debido a que las oscilaciones toroidales resonantes en la magnetósfera se muestran principalmente en la componente  $H$  [110, 111]. El perfil latitudinal de la resonancia tiene un máximo característico en amplitud en el punto de resonancia, mientras que la diferencia de fases es de  $180^\circ$  en la resonancia.

Ahora bien, la razón de las amplitudes será cercana a uno en el punto medio entre las estaciones si se supone que las ondas resonantes tienen la misma amplitud y ancho de resonancia [112]. En el otro método, la diferencia de fases de las dos estaciones mostrará un máximo en el punto medio si se supone que el gradiente latitudinal de fase en las dos estaciones es el mismo. De esto se deduce que si miramos la razón de amplitudes y la diferencia de fases del espectro dinámico de dos estaciones adyacentes en latitud podremos determinar las frecuencias del punto de cruce de las amplitudes y la diferencia de fase máxima como función del tiempo. En teoría, las dos debieran ocurrir en el mismo valor de la frecuencia y mostrar donde se encuentra la resonancia de la línea de campo originada en el punto medio entre ambas estaciones.

Para el día 16 de Junio se ve de la figura 6.2 que existe una buena conjunción, de manera que se ha realizado el análisis del espectro dinámico para el par de estaciones ESC-OHI. El análisis se realizó entre las 11:00 UT y las 13:00 UT utilizando una ventana de Fourier de 20 minutos con un desfase de 10 minutos entre cada evaluación para aumentar el número de datos. Para evitar problemas en los bordes simplemente se ha utilizado el intervalo correspondiente, pese a que este excede en 10 minutos antes y después el tiempo evaluado. Para la latitud de las estaciones ESC y OHI se ha decidido buscar resonancias en el rango Pc3 que va entre 1 y 40 mHz. La figura 6.4 muestra los resultados de cada estación con ambos métodos y las respectivas





(a) Raz3n de Amplitudes

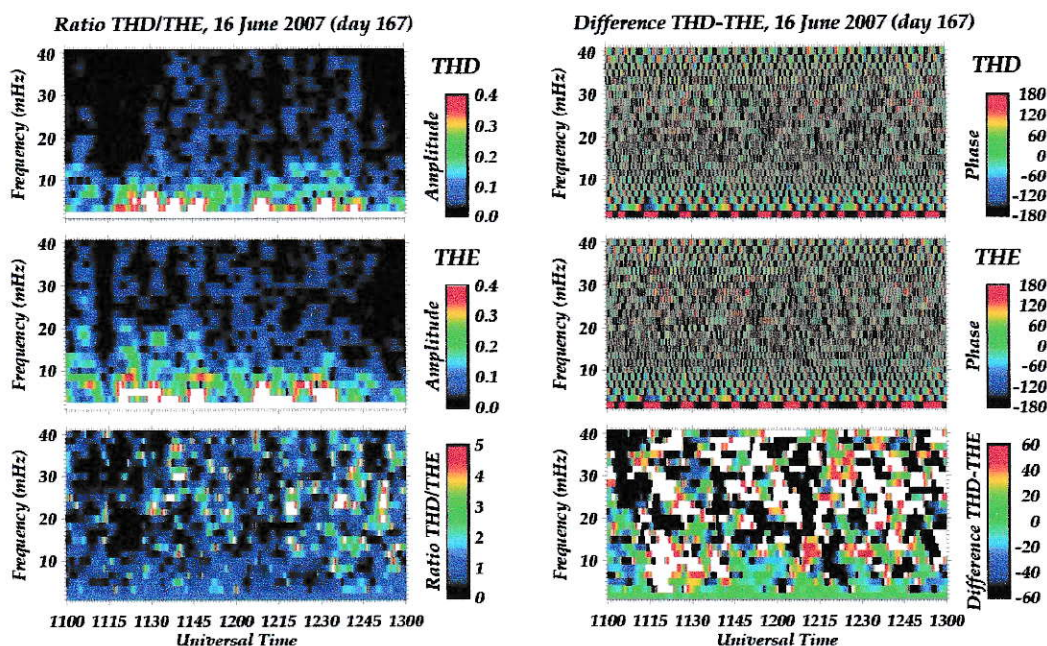
(b) Diferencia de Fases

Figura 6.4: Espectro dinámico de Fourier para el par de estaciones ESC y OHI y sus respectivas razones de amplitud (a) abajo y diferencias de fase (b) abajo.

diferencia de fases y razones de amplitud.

El punto central de este trabajo consiste en estudiar la factibilidad de que la técnica sea replicada en satélites en movimiento. Para esto se han procesado todos los pares de satélites en conjunción con la misma rutina adaptada para el caso, y preparando los datos satelitales a través de una interpolación polinomial simple para ajustarlos a la misma resolución temporal. La figura 6.5 muestra el análisis para el par de satélites THD y THE con las mismos parámetros usados para ESC y OHI. En la figura 6.6 se puede ver la frecuencia de resonancia en función del tiempo calculada en Tierra y en el espacio mediante ambos métodos.





(a) Raz3n de Amplitudes

(b) Diferencia de Fases

Figura 6.5: Espectro dinámico de Fourier para el par de satélites THD y THE y sus respectivas razones de amplitud (a) abajo y diferencias de fase (b) abajo.

## 6.4. Análisis

Se ha realizado el análisis de datos para los pares de satélites THC-THD, THC-THE y THD-THE, sin embargo, de igual manera que en la sección anterior se mostrará sólo el par THD-THE, pues para el resto de los casos el proceso es idéntico y los resultados similares. Se ha comparado la frecuencia de resonancia de las líneas de campo obtenidas en función del tiempo obtenidas por el par de magnetómetros ESC-OHI y por los satélites THD-THE. La figura 6.7 muestra las frecuencias obtenidas por ambos métodos por separado tanto en tierra como en el espacio.

De las imágenes parece haber una clara concordancia en las frecuencias estimadas

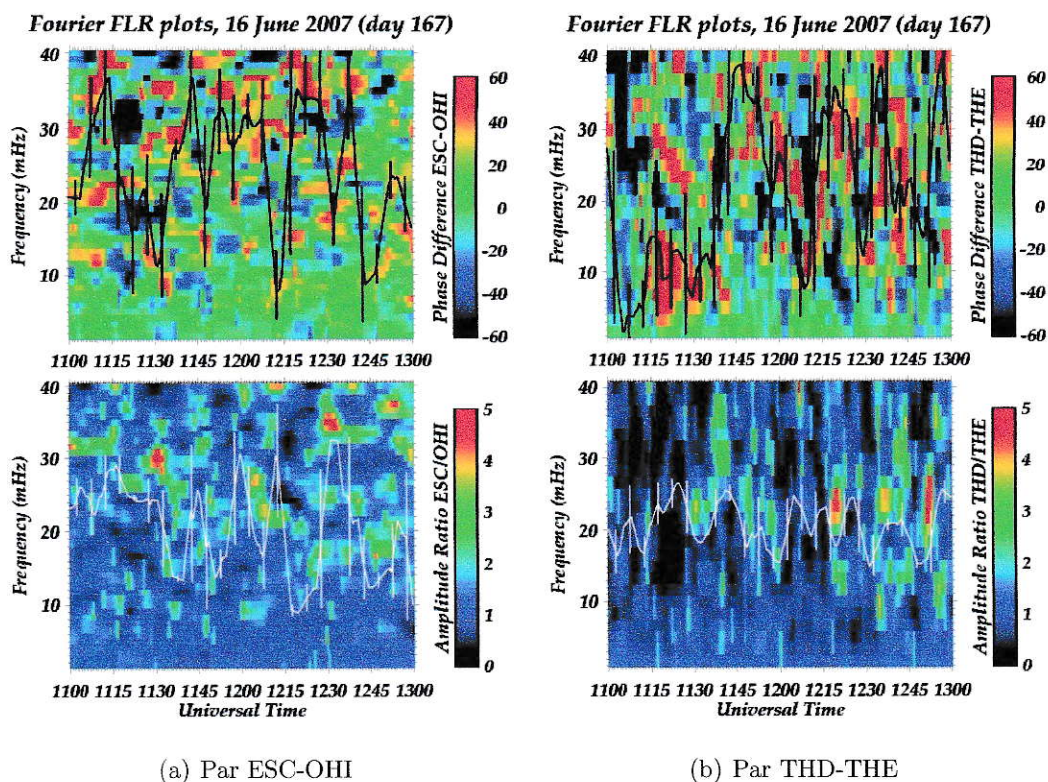


Figura 6.6: Frecuencias de resonancia utilizando el método de diferencia de fases (arriba) y razón de amplitudes (abajo) para el par ESC-OHI (a) y THD-THE (b)

en tierra y en el espacio en determinados intervalos de tiempo. Si bien esto no se cumple para el intervalo completo, llegando en ciertos instantes a tener diferencias notables, se aprecia que en general parece haber una mayor similitud en las frecuencias calculadas mediante el método de razón de amplitudes. Para ver la concordancia real de frecuencias en tierra y en el espacio se ha calculado la correlación de datos entre uno y otro par para ambos métodos utilizados. La figura 6.8 muestra la correlación entre las frecuencias calculadas por el método de diferencia de fases y razón de amplitudes. Para ampliar el análisis se consideró un desfase  $r$  de tiempo de algunos minutos.



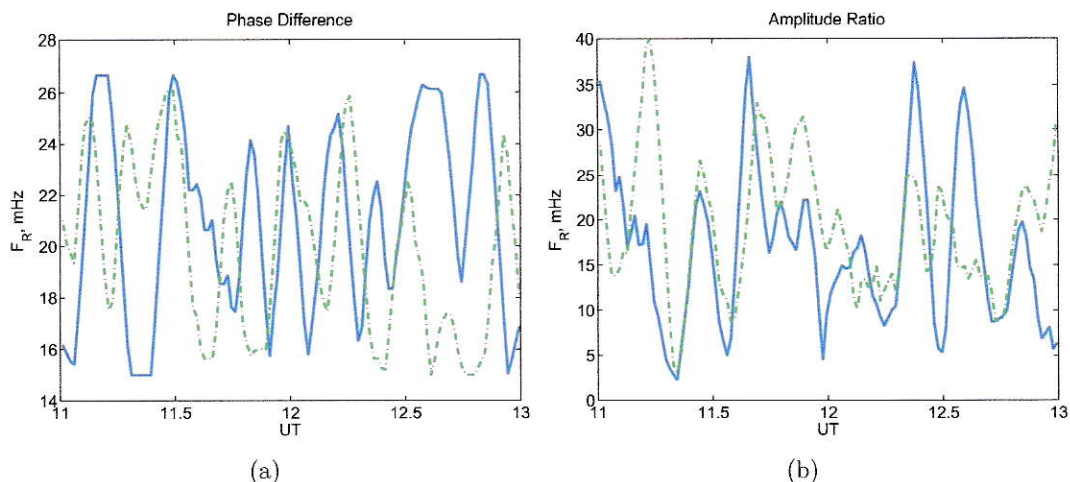


Figura 6.7: Frecuencia de resonancia de línea de campo para el par THD-THE (línea punteada) y los magnetómetros ESC-OHI (línea continua) obtenidas mediante el método de diferencia de fases (a) y razón de amplitudes (b).

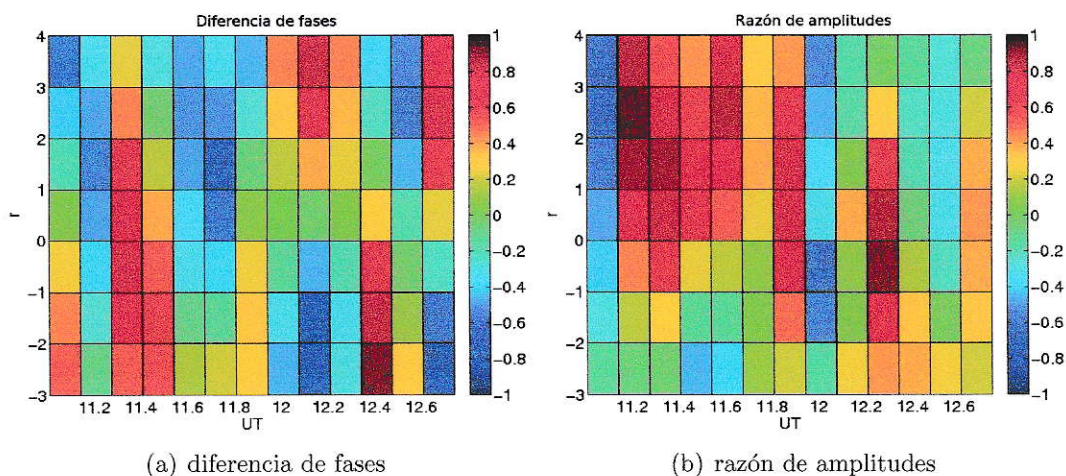


Figura 6.8: Correlación cruzada entre las frecuencias calculadas para el par THD-THE y ESC-OHI mediante el método de diferencia de fases (a) y razón de amplitudes (b)

Podemos apreciar de la figura 6.8 que en el intervalo de tiempo entre las 11:00 UT y 11:40 UT existe una alta correlación entre los datos obtenidos en tierra y en el

espacio. Este intervalo de tiempo es cercano al tiempo de conjunción, sin embargo, no coincide directamente. En contraste, en el intervalo de tiempo cercano a las 12:50 se observa una cierta anticorrelación en los datos. Finalmente se ha realizado una comparación entre los datos obtenidos directamente a partir del analizador electrostático ESA del satélite THD y se ha comparado con la cantidad  $1/f_{\text{FLR}}^2$  que según el modelo es proporcional a la densidad de iones en la línea de campo estudiada. Los resultados de esta comparación pueden ser apreciados en la figura 6.9.

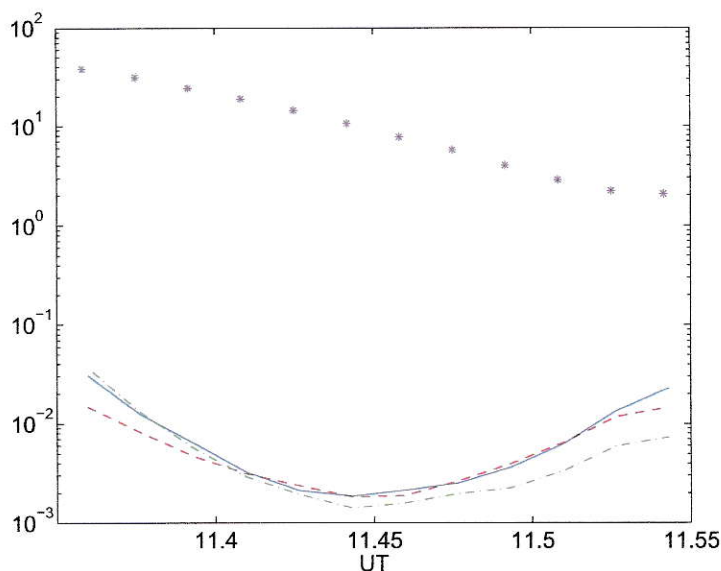


Figura 6.9: Valor de  $1/f^2$  para el par THC-THD (azul), THD-THE (rojo) y ESC-OHI (verde). Los asteriscos de color magenta muestran la densidad de iones medida desde el instrumento ESA.

En este periodo es relevante notar de la figura 6.8 que el tiempo de conjunción satelital predicho por el modelo T89 nos indica una anticorrelación en las frecuencias obtenidas en la superficie terrestre y en el espacio. Adicionalmente a este problema se debe sumar el hecho de que en la figura 6.9 se aprecia una relación directa entre la densidad calculada directamente en el satélite y la estimada por el modelo entre las



11:00 UT y las 11:45 UT, sin embargo, en el tiempo posterior esta relación directa se pierde. Esto lleva a pensar que es necesario realizar estudios adicionales de las órbitas satelitales para entender de donde provienen estas diferencias.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Este trabajo ha permitido despejar varias interrogantes en los tópicos tratados, sin embargo, ha generado nuevos problemas que antes no estaban contemplados, los que presentan una buena proyección de trabajo para el futuro, tanto a nivel de investigación, como de posibles trabajos de tesis.

Toda la evidencia, tanto previa como la obtenida en este trabajo apuntan a que la turbulencia en la magnetósfera terrestre es un hecho, y como tal, los análisis deben ser realizados considerando esta propiedad. En particular, hemos determinado que las componentes diagonales del tensor de coeficientes de difusión de tipo eddy en la lámina de plasma de la magnetósfera terrestre varían significativamente con tendencia a aumentar su valor en la dirección de la cola. Si bien el tema sigue abierto, este cambio en el valor podría estar relacionado con la transición desde un entorno dipolar en las cercanías del planeta, a la configuración de cola de la magnetósfera terrestre.

El análisis de las fluctuaciones de la velocidad de flujo del plasma ha permitido determinar el valor del coeficiente de difusión en las diferentes fases de una subtormenta geomagnética. El análisis del coeficiente de difusión realizado en sectores acotados permite nuevamente observar una gran variación en los valores obtenidos,

especialmente durante la fase de expansión de las subtormentas. Estos resultados son coherentes con la teoría propuesta por Antonova y Ovchinnikov de que una lámina de plasma turbulenta y estable puede ser formada cuando el transporte regular de plasma producido por el campo eléctrico dirigido en la dirección amanecer-anocheecer es compensado por la difusión de tipo eddy [32], y los resultados acá mostrados ofrecen en parte de la prueba experimental necesaria para la corroboración de esta teoría.

Una nueva interrogante planteada al estudiar el tensor de difusión, es determinar si los coeficientes no diagonales realizan un aporte significativo al transporte turbulento en la lámina de plasma, o simplemente pueden ser despreciados. Por otra parte, la asimetría detectada en los valores del coeficiente de difusión en la parte amanecer y anocheecer de la lámina de plasma invitan a seguir adentrándose en el problema de la difusión turbulenta tipo eddy.

Respecto del estudio de la magnetósfera interna, el poder replicar las técnicas de detección de frecuencias de resonancia de línea de campo magnético y poder adaptarlas para el uso de datos satélites brinda inmensas posibilidades futuras para el perfeccionamiento del monitoreo remoto. Este proceso no ha estado exento de críticas, y aún se deben realizar algunas pruebas con el fin de verificar la validez de la adaptación. Para el análisis de este trabajo se ha elegido un día en donde la frecuencia es altamente variable, lo que no es un buen caso de estudio desde la búsqueda de las resonancias pues no permite determinar con precisión la densidad de masa del plasma en el plano ecuatorial, sin embargo, permite estudiar con mayor detalle las posibles correlaciones que existen entre los datos obtenidos en el espacio y en la superficie terrestre.

La gran complicación de la búsqueda de frecuencias de resonancia de línea campo magnético usando datos satelitales está en el poco tiempo de conjunción entre los

satélites y las estaciones terrestres y en el poco tiempo que estos se encuentran en una determinada línea de campo magnético. En un futuro cercano se espera depurar la técnica para tiempos breves y así poder establecer con claridad si los métodos de diferencia de fases y de razón de amplitudes son suficientemente robustos para ser utilizados de manera constante en el monitoreo remoto de la magnetósfera terrestre.



# Apéndice A

## Instrumentos

Desde sus inicios, la Física Espacial ha logrado sus avances en la medida de que nuestra capacidad de obtener datos y de analizarlos posteriormente aumenta. Muchas veces eso ha significado una restricción importante, debido a la limitada capacidad tecnológica y económica en que nos encontramos como científicos. Afortunadamente a medida que pasan los años la cantidad de datos disponibles se incrementa gracias a nuevas tecnologías, nuevas técnicas de medición, nuevos proyectos científicos y a una política colaborativa en donde los datos actualmente se encuentran a disposición de la comunidad científica.

Al estar este trabajo orientado al análisis de datos para el entendimiento de los fenómenos turbulentos en la magnetósfera terrestre, se hace fundamental elegir con cuidado el set de datos a utilizar. En este caso, la disponibilidad de datos en una extensión espacial significativa de la magnetósfera es fundamental. Es esta la razón por la que se han escogido los datos del proyecto THEMIS.

La elección de este proyecto conlleva casi necesariamente la elección del programa IDL para el análisis de datos, debido a que el equipo científico del proyecto THEMIS está constantemente publicando códigos para facilitar el trabajo de lectura y calibración de los archivos que contienen los datos y a los intentos de la NASA de

universalizar el software de análisis. Dicho esto, durante el desarrollo de esta tesis se ha trabajado utilizando el software de procesamiento de datos IDL como principal herramienta de trabajo, aunque en determinados gráficos y cálculos se utilizará el software Matlab.

## A.1. El proyecto THEMIS

El proyecto THEMIS [113] (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) fue lanzado al espacio el día 17 de Febrero de 2007. El proyecto consiste en 5 micro satélites idénticos orbitando la Tierra en distancias máximas que van desde los 10 RE a los 30 RE y distancias mínimas cercanas a los 1.2 RE. La órbita de los satélites es cercana al plano ecuatorial terrestre y el periodo de órbita de los satélites está diseñada para que se realice una alineación de los 5 satélites cada 4 días y de los 4 satélites internos cada 2 días. Según la época del año, la alineación se realiza en distintos lugares de la magnetósfera, siendo para nuestro trabajo la más relevante la alineación en la cola, que se produce entre los meses de Diciembre y Marzo.

Si bien los objetivos principales del proyecto THEMIS están bien establecidos desde el principio de la misión [114], la amplitud de temas tratados, así como la gran cantidad de instrumentos de medición que posee cada satélite nos brindan la posibilidad de investigar en una gran variedad de temas distintos. Adicionalmente, los resultados obtenidos en estos primeros años, han abierto la puerta a nuevas líneas de investigación no consideradas inicialmente como parte del proyecto, como por ejemplo los fenómenos turbulentos en el plasma. Debido a que los datos obtenidos por la misión son de libre disposición, está asegurada la continuidad de un estudio científico de largo plazo.

Durante este trabajo, se han usado los datos de los instrumentos que registran flujo de partículas: Analizador Electroestático (ESA), Telescopio de Estado Sólido (SST) y campo magnético Magnetómetro de Flujo (FGM). A continuación se provee una breve descripción técnica de cada uno de los instrumentos nombrados.

### **A.1.1. Analizador Electroestático (ESA)**

El Analizador Electroestático [115] —*ESA por sus siglas en inglés: Electrostatic Analyzer*— es el instrumento encargado de medir el flujo de iones y electrones del plasma en la magnetósfera y viento solar, según sea el caso. El rango de funcionamiento del Analizador Electroestático es entre los 2 eV y los 32 keV para electrones y entre los 1.6 eV y los 25 keV para iones.

Las características del diseño del instrumento permiten realizar un barrido completo del espacio cada 3 segundos, tiempo que corresponde al periodo de rotación del satélite. El instrumento realiza mediciones con una frecuencia de 1024 conteos por rotación del satélite, es decir, se obtiene una medición cada 3 ms. aproximadamente. Con esta información es posible calcular las funciones de distribución de iones y electrones. Debido a las limitaciones del ancho de banda de transmisión de datos, no es posible obtener la resolución completa de datos y las funciones de distribución durante un día completo. Como compensación a esta pérdida de información cada satélite calcula a bordo los momentos de la función de distribución y los envía a la Tierra. Debido a esta restricción muchas veces es conveniente utilizar prioritariamente los datos de momentos obtenidos a bordo para estudios estadísticos.

### A.1.2. Telescopio de Estado Sólido (SST)

El Telescopio de Estado Sólido —*SST por sus siglas en inglés: Solid State Telescope.*— cumple una función similar a la del Analizador Electroestático pero para un rango de energía superior. Para iones, el rango de trabajo es entre 25 keV y 6 MeV, mientras que para los electrones el rango varía entre 25 keV y 1 MeV.

En general, los datos obtenidos por este instrumento se han utilizado como complemento a los datos obtenidos por el Analizador Electroestático. Para este instrumento, también existe un cálculo de momentos a bordo de los satélites, de manera que existen los datos en dos formatos disponibles.

### A.1.3. Magnetómetro de Flujo (FGM)

El Magnetómetro de Flujo del proyecto THEMIS [116] —*FGM por sus siglas en inglés: Fluxgate Magnetometer*— es un magnetómetro de 3 ejes diseñado para medir el campo magnético de fondo y fluctuaciones de este en baja frecuencia (hasta 64 Hz.) Este instrumento es capaz de medir campo magnético en un rango de  $\pm 25.000$  nT con una sensibilidad de 0.01 nT.

El sistema de medición consiste en dos canales. El canal de alta telemetría mide permanentemente a 128 Hz y el canal de baja telemetría es capaz de operar en un rango entre los 4 y 128 Hz. De ambas mediciones se obtiene un valor del campo magnético cada segundo.

## A.2. El proyecto SAMBA

El proyecto SAMBA (South American Meridional B-field Array) corresponde a una cadena de magnetómetros de flujo ubicados a lo largo de Chile y en la península Antártica. Sus inicios se remontan al año 2002, cuando fueron instaladas las primeras



cuatro estaciones en Chile continental. En 2003, otras 4 estaciones fueron instaladas en Chile, y en 2004 otras dos estaciones fueron instaladas en las bases antárticas chilenas Profesor Julio Escudero y General Bernardo O'Higgins. Todos estos magnetómetros han sido complementados con la instalación de nuevos equipos en la bases antárticas norteamericanas Palmer y WAIS-D. En el año 2008, así como en el 2009 se realizó un recambio de los magnetómetros por equipos mas modernos en distintas localidades, y a principios de 2011, como parte de este trabajo se realizó el recambio del equipo en la base antártica chilena General Bernardo O'Higgins.

Los magnetómetros de la red SAMBA tienen una resolución temporal de 0.5 segundos y una sensibilidad de 0.01 nT. Su rango dinámico es de 4000 nT. Los equipos funcionan con un receptor GPS que permite conocer el tiempo de medición con precisión mayor a 10 ms y un computador que se encarga de almacenar y transmitir los datos. La ubicación de los magnetómetros de la red SAMBA está diseñada específicamente para realizar estudios de las líneas de campo magnéticas a través de las resonancias de línea de campo (FLR, ver sección 6.1), de ahí que las estaciones se encuentren "pareadas" con separaciones entre los pares de unos pocos cientos de kilómetros. Las coordenadas tanto geográficas como magnéticas de las estaciones del proyecto SAMBA se pueden ver en la tabla A.1

Estación	Código	Latitud Geográfica	Longitud Geográfica	Latitud Magnética	Longitud Magnética	Tiempo (UT) del mediodía magnético	Valor L
Putre	PUT	-18.33	-69.5	-5.50	1.44	16:30	1.01
Antofagasta	ANT	-23.39	-70.24	-10.31	0.72	16:26	1.03
La Serena	SER	-30.0	-71.13	-16.55	0.17	16:28	1.09
Cerrillos	CER	-33.45	-70.6	-19.80	0.75	16:26	1.13
Valdivia	VLD	-39.48	-73.14	-25.58	359.60	16:32	1.23
Osorno	OSO	-40.34	-73.09	-26.39	359.73	16:32	1.25
Puerto Natales	PNT	-52.13	-70.9	-37.58	1.59	16:22	1.59
Punta Arenas	PAC	-53.2	-70.9	-38.27	2.87	16:22	1.63
Escudero	ESC	-62.18	-58.92	-47.17	11.45	15:48	2.18
O'Higgins	OHI	-63.32	-57.9	-48.8	12.43	15:45	2.28
Palmer	PAL	-64.77	-64.05	-49.74	9.20	16:00	2.39
WAIS-D	WSD	-79.47	-112.86	-66.99	355.43	17:08	6.54

Tabla A.1: Localización geográfica y magnética de la red de magnetómetros SAMBA así como la hora universal del mediodía magnético de en las estaciones (MLT)

# Referencias

- [1] I. Langmuir, P. Natl. Acad. Sci. USA **14**, 627 (1928).
- [2] F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: Plasma physics*, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (Plenum Press, 1984).
- [3] N. Krall y A. Trivelpiece, *Principles of plasma physics*, International series in pure and applied physics (San Francisco Press, 1973).
- [4] E. T. Lu, Phys. Rev. Lett. **74**, 2511 (1995).
- [5] D. Biskamp, *Magnetic Reconnection in Plasmas* (Cambridge University Press, 2000).
- [6] B. Carreras, D. Newman, V. E. Lynch y P. H. Diamond, Phys. Plasmas **3**, 2903 (1996).
- [7] A. J. Klimas, J. A. Valdivia, D. Vassiliadis, D. N. Baker, M. Hesse y J. Takalo, J. Geophys. Res. **105**, 18765 (2000).
- [8] A. J. Klimas, V. M. Uritsky, D. Vassiliadis y D. N. Baker, Geophys. Res. Lett. **32**, L14108, doi:10.1029/2005GL022916 (2005).

- [9] A. J. Klimas, V. M. Uritsky y E. F. Donovan, *J. Geophys. Res.* **115**, A06202, doi:10.1029/2009JA014995 (2010).
- [10] V. M. Uritsky y M. I. Pudovkin, *Ann. Geophys.* **16**, 1580 (1998).
- [11] V. M. Uritsky, A. J. Klimas, J. A. Valdivia y *et al.*, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **63**, 1425 (2001).
- [12] V. M. Uritsky, A. J. Klimas y D. Vassiliadis, *Adv. Space Res.* **37**, 539 (2006).
- [13] V. M. Uritsky, A. J. Klimas y D. Vassiliadis, *Geophys. Res. Lett.* **33**, L08102, doi:10.1029/2005GL025330 (2006).
- [14] V. M. Uritsky, M. Paczuski, J. M. Davila y S. T. Jones, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 025001, doi:10.1103/PhysRevLett.99.025001 (2007).
- [15] J. A. Valdivia, A. Sharma y K. Papadopoulos, *J. Geophys. Res.* **23**, 2899 (1996).
- [16] J. A. Valdivia, A. J. Klimas, D. Vassiliadis y *et al.*, *Space Sci. Rev.* **107**, 515 (2003).
- [17] J. A. Valdivia, J. Rogan, V. Munoz, L. Gomberoff, A. J. Klimas, D. Vassiliadis, V. M. Uritsky, S. Sharma y B. T. L. Wastavino, *Adv. Space Res.* **35**, 961 (2005).
- [18] J. A. Valdivia, J. Rogan, V. Munoz y B. Toledo, *Space Sci. Rev.* **122**, 313 (2006).
- [19] Z. Voros, W. Baumjohann, R. Nakamura, M. Volwerk, A. Runov, T. L. Zhang, H. U. Eichelberger, R. Treumann, E. Georgescu, A. Balogh, B. Klecker y H. Rème, *J. Geophys. Res.* **109**, A11215, doi:10.1029/2004JA010404 (2004).



- [20] G. Zimbardo, A. Greco, L. Sorriso-Valvo, S. Perri, Z. Voros, G. Chagarzia y O. Alexandrova, *Space Sci. Rev.* **156**, 89 (2010).
- [21] W. I. Axford, *Adv. Space Res.* **2**, 11 (1982).
- [22] P. G. Richards, *J. Geophys. Res.* **106**, 803 (2001).
- [23] M. G. Kivelson y C. T. Russell, *Introduction to space physics*, Cambridge atmospheric and space science series (Cambridge University Press, 1995).
- [24] J. Van Allen, *Origins of magnetospheric physics* (Smithsonian Institution Press, Washington, D.C. :, 1983).
- [25] T. Gold, *J. Geophys. Res.* **64**, 1219 (1959).
- [26] C. C. Finlay, S. Maus, C. D. Beggan, T. N. Bondar, A. Chambodut, T. A. Chernova, A. Chulliat, V. P. Golovkov, B. Hamilton, M. Hamoudi, R. Holme, G. Hulot, W. Kuang, B. Langlais, V. Lesur, F. J. Lowes, H. Lühr, S. Macmillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle, I. Michaelis, N. Olsen, J. Rauberg, M. Rother, T. J. Sabaka, A. Tangborn, L. Toffner-Clausen, E. Thebault, A. W. P. Thomson, I. Wardinski, Z. Wei y T. I. Zvereva, *Geophysical Journal International* **183**, 1216 (2010).
- [27] J. E. Borovsky, M. F. Thomsen y R. C. Elphic, *J. Geophys. Res.* **103**, 17617 (1998).
- [28] C. T. Russell, *Adv. Space Res.* **25**, 1413 (2000). Proceedings of the DO.1 Symposium of COSPAR Scientific Commission D.
- [29] T. E. Eastman, L. A. Frank, W. K. Peterson y W. Lennartsson, *J. Geophys. Res.* **89**, 1553 (1984).

- [30] J. E. Borovsky, R. C. Elphic, H. O. Funsten y M. F. Thomsen, *J. Plasma Phys.* **57**, 1 (1997).
- [31] W. Baumjohann, G. Paschmann y C. A. Cattell, *J. Geophys. Res.* **94**, 6597 (1989).
- [32] E. E. Antonova, *Geom. and Aeron.* **25**, 517 (1985).
- [33] V. Angelopoulos, W. Baumjohann, C. F. Kennel, F. V. Coroniti, M. G. Kivelson, R. Pellat, R. J. Walker, H. Luhr y G. Paschmann, *J. Geophys. Res.* **97**, 4027 (1992).
- [34] V. Angelopoulos, R. Pellat, M. G. Kivelson, R. J. Walker, W. C. Feldman, J. T. Gosling y C. T. Russell, *Geophys. Res. Lett.* **20**, 1711 (1993).
- [35] S. Ohtani, K. Takahashi, T. Higuchi, A. T. Y. Lui, H. E. Spence y J. F. Fennell, *J. Geophys. Res.* **103**, 4671 (1998).
- [36] K. R. Birkeland, *The Norwegian aurora polaris expedition, 1902-1903*, Vol. 1 (Christiania, H. Aschelhoug, 1908).
- [37] S. I. Akasofu, *Plan. Space. Sci.* **12**, 273 (1964).
- [38] T. N. Davis y M. Sugiura, *J. Geophys. Res.* **71**, 785 (1966).
- [39] D. N. Baker, T. I. Pulkkinen, V. Angelopoulos, W. Baumjohann y R. L. McPherron, *J. Geophys. Res.* **101**, 12975 (1996).
- [40] A. T. Y. Lui, *J. Geophys. Res.* **101**, 13067 (1996).
- [41] A. T. Y. Lui, *Space Sci. Rev.* **113**, 127 (2004).

- [42] V. Angelopoulos, J. P. McFadden, D. Larson, C. C. W. y *et al.*, Science **321**, 931 (2008).
- [43] A. T. Y. Lui, Science **324**, 1391 (2009).
- [44] J. E. Borovsky, American Physical Society (2005), nº 47th Annual DPP Meeting, 24-28 October, abstract B11.004, 2005APS..DPPB11004B.
- [45] R. R. Rosa, A. S. Sharma y J. A. Valdivia, Physica A **257**, 509 (1998).
- [46] J. W. Chamberlain, *Physics of the aurora and airglow* (Academic Press, New York :, 1961).
- [47] N. C. Maynard, J. P. Heppner y T. L. Aggson, J. Geophys. Res. **87**, 1445 (1982).
- [48] F. S. Mozer, C. A. Cattell, M. K. Hudson, R. L. Lysak, M. Temerin y R. B. Torbert, Space Sci. Rev. **27**, 155 (1980).
- [49] D. R. Weimer, C. Goerts, D. A. Gurnett, N. C. Maynard y J. L. Burch, J. Geophys. Res. **90**, 7479 (1985).
- [50] M. V. Stepanova, E. E. Antonova, R. Labbe, G. Stanev, N. Bankov, T. Vucina, M. V. Teltsov y N. V. Isaev, Adv. Space Res. **31**, 1425 (2003).
- [51] J. Takalo, J. Timonen y H. Koskinen, Geophys. Res. Lett. **20**, 1527 (1993).
- [52] G. Consolini y P. D. Michelis, Geophys. Res. Lett. **25**, 4087 (1998).
- [53] B. Hnat, S. C. Chapman, G. Rowlands, N. W. Watkins y M. P. Freeman, Geophys. Res. Lett. **29**, 2078 (2002).

- [54] M. V. Stepanova, E. E. Antonova y O. Troshichev, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1127 (2003).
- [55] M. V. Stepanova, E. E. Antonova y O. Troshichev, *Adv. Space Res.* **36**, 2423 (2005).
- [56] A. Pulkkinen, A. J. Klimas, D. Vassiliadis y V. M. Uritsky, *J. Geophys. Res.* **111**, A10218 (2006).
- [57] J. Wanliss y V. M. Uritsky, *J. Geophys. Res.* **115**, A03215 (2010).
- [58] M. V. Stepanova, E. E. Antonova, A. J. Foppiano, T. J. Rosenberg y E. Ovalle, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **67**, 1876 (2005).
- [59] M. V. Stepanova, E. E. Antonova, A. J. Foppiano y T. Rosenberg, *Adv. Space Res.* **37**, 559 (2006).
- [60] V. M. Uritsky, E. Donovan, A. J. Klimas y E. Spanswick, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L21101 (2008).
- [61] E. E. Antonova, M. V. Stepanova, M. V. Teltzov y B. A. Tverkoy, *J. Geophys. Res.* **103**, 9317 (1998).
- [62] E. E. Antonova, *Geom. and Aeron.* **3**, 117 (2002).
- [63] O. Luizar, M. V. Stepanova, J. M. Bosqued, E. E. Antonova y R. A. Kovrazhkin, *Ann. Geophys.* **18**, 1399 (2000).
- [64] V. Angelopoulos, T. Mukai y S. Kokubun, *Phys. Plasmas* **6**, 4161 (1999).
- [65] K. A. Riveros, M. Stepanova, J. M. Bosqued y E. E. Antonova, *Geofis. Int.* **47**, 265 (2008).



- [66] V. Angelopoulos, F. V. Coroniti, C. F. Kennel, M. G. Kivelson, R. J. Walker, E. Sanchez, C. T. Russell, R. L. McPherron, C. I. Meng, W. Baumjohann, N. Sato, G. D. Reeves, R. D. Belian, P. R. Sutcliffe, E. Friis-christensen, K. Yumoto y T. Harris, *J. Geophys. Res.* **101**, 4967 (1996).
- [67] J. E. Borovsky y H. O. Funsten, *J. Geophys. Res.* **108**, 1246 (2003).
- [68] J. E. Borovsky y H. O. Funsten, *J. Geophys. Res.* **108**, 1284 (2003).
- [69] I. L. Ovchinnikov, E. E. Antonova y Y. I. Yermolaev, *Kosmicheskiye Issledovaniya* **38** (2000). (In Russian).
- [70] O. A. Troshichev, E. E. Antonova y Y. Kamide, *Adv. Space Res.* **30**, 2683 (2002).
- [71] M. V. Stepanova, T. Vucina-Parga, E. E. Antonova, I. L. Ovchinnikov y Y. I. Yermolaev, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **67**, 1815 (2005).
- [72] M. V. Stepanova, E. E. Antonova, D. I. Paredes-Davis, I. L. Ovchinnikov y Y. I. Yermolaev, *Ann. Geophys.* **27**, 1407 (2009).
- [73] E. Neagu, J. E. Borovsky, M. F. Thomsen, S. P. Gary, W. Baumjohann y R. A. Treumann, *J. Geophys. Res.* **107**, 1098, doi:10.1029/2001JA000318 (2002).
- [74] E. Neagu, J. E. Borovsky, S. P. Gary, W. Baumjohann y R. A. Treumann, *J. Geophys. Res.* **110**, A05203, doi:10.1029/2004JA010448 (2005).
- [75] D. Nagata, S. Machida, S. Ohtani, Y. Saito y T. Mukai, *Ann. Geophys.* **26**, 4031 (2008).

- [76] C. P. Wang, L. R. Lyons, T. Nagai, J. M. Weygand y A. T. Y. Lui, *J. Geophys. Res.* **115**, A06210, doi:10.1029/2009JA015028 (2010).
- [77] E. E. Antonova y I. L. Ovchinnikov, *Geom. and Aeron.* **36**, 7 (1996).
- [78] E. E. Antonova y I. L. Ovchinnikov, *J. Geophys. Res.* **104**, 17289 (1999).
- [79] E. E. Antonova y I. L. Ovchinnikov, *Adv. Space Res.* **28**, 1747 (2001).
- [80] H. E. Spence, M. G. Kivelson y R. J. Walker, *J. Geophys. Res.* **94**, 5264 (1989).
- [81] W. Baumjohann, G. Paschmann y H. Lühr, *Geophysical Research Letters* **17**, 45 (1990).
- [82] L. M. Kistler, W. Baumjohann, T. Nagai y E. Möbius, *J. Geophys. Res.* **98**, 9249 (1993).
- [83] A. A. Petrukovich, T. Mukai, S. Kokubun, S. A. Romanov, Y. Saito, T. Yamamoto y L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **104**, 4501 (1999).
- [84] N. A. Tsyganenko y T. Mukai, *J. Geophys. Res.* **108**, 1136 (2003).
- [85] C. Y. Huang y L. A. Frank, *J. Geophys. Res.* **99**, 83 (1994).
- [86] T. Terasawa, M. Fujimoro, T. Mukai, I. Shinohara, Y. Saito, T. Yamamoto, S. Machida, S. Kokubun, A. J. Lazarus, J. T. Steinberg y R. P. Lepping, *Geophys. Res. Lett.* **24**, 935 (1997).
- [87] E. E. Antonova, M. V. Stepanova y M. V. Teltzov, *Adv. Space Res.* **18**, 119 (1996).
- [88] M. V. Antonova, E. E. and Stepanova, E. A. Vikhрева, I. L. Ovchinnikov y M. V. Teltzov, *J. Geophys. Res.* **104**, 19941 (1999).

- [89] M. Stepanova, E. E. Antonova y J. M. Bosqued, *Adv. Space Res.* **38**, 1631 (2006).
- [90] M. Stepanova, E. E. Antonova y J. M. Bosqued, *Adv. Space Res.* **41**, 1658 (2008).
- [91] S. Wing y P. T. Newell, *J. Geophys. Res.* **103**, 6785 (1998).
- [92] S. Wing y P. T. Newell, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1307 (2002).
- [93] C. P. Wang, L. R. Lyons, M. W. Chen, R. A. Wolf y F. R. Toffoletto, *J. Geophys. Res.* **108**, 1 (2003).
- [94] V. Pinto, M. Stepanova, E. E. Antonova y J. A. Valdivia, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **73**, 1472 (jul. 2011).
- [95] M. Stepanova, V. Pinto, J. a. Valdivia y E. E. Antonova, *J. Geophys. Res.* **116**, A00I24 (ene. 2011).
- [96] P. T. Chi, C. T. Russell, D. L. Carpenter, H. Kawano y K. Yumoto, *EOS Trans.* **81**, F1054 (2000).
- [97] D. C. Web y L. J. Lanzerotti, *J. Geophys. Res.* **82**, 5063 (1977).
- [98] K. Yumoto, T. Saito, S. I. Akasofu, B. T. Tsurutani y E. J. Smith, *J. Geophys. Res.* **90**, 6439 (1985).
- [99] C. L. Waters, F. W. Menk y B. J. Fraser, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 2293 (1991).
- [100] C. L. Waters, F. W. Menk y B. J. Fraser, *J. Geophys. Res.* **99**, 17547 (1994).
- [101] F. W. Menk, D. Orr, M. A. Clilverd, A. J. Smith, C. L. Waters, D. K. Milling y B. J. Fraser, *J. Geophys. Res.* **104**, 955 (1999).

- [102] F. W. Menk, C. L. Waters y B. J. Fraser, *J. Geophys. Res.* **105**, 7747 (2000).
- [103] C. T. Russell, P. J. Chi, V. Angelopoulos, W. Goedecke, F. K. Chun, G. Le, M. B. Moldwin y G. D. Reeves, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **61**, 1289 (nov. 1999).
- [104] L. N. Baransky, J. E. Borovkov, M. B. Gokhberg, S. M. Krylov y V. A. Troistkaya, *Plan. Space. Sci.* **33**, 1369 (1985).
- [105] L. N. Baransky, S. P. Belokris, Y. E. Borokov y C. A. Green, *Plan. Space. Sci.* **38**, 1573 (1990).
- [106] M. Schulz, *J. Geophys. Res.* **101**, 17385 (1996).
- [107] R. E. Denton y D. L. Gallagher, *J. Geophys. Res.* **105**, 27717 (2000).
- [108] A. Boudouridis y E. Zesta, *J. Geophys. Res.* **112**, 1 (ago. 2007).
- [109] N. A. Tsyganenko, *Plan. Space. Sci.* **37**, 5 (1989).
- [110] W. J. Hughes y D. J. Southwood, *J. Geophys. Res.* **81**, 3234 (1976).
- [111] W. J. Hughes y D. J. Southwood, *J. Geophys. Res.* **81**, 3241 (1976).
- [112] H. Kawano, K. Yumoto, V. A. Pilipenko, Y. M. Tanaka, S. Takasaki, M. Iizima y M. Seto, *J. Geophys. Res.* **107**, 1202 (2002).
- [113] V. Angelopoulos, *Space Sci. Rev.* **141**, 5 (2008).
- [114] D. G. Sibeck y V. Angelopoulos, *Space Sci. Rev.* **141**, 35 (2008).
- [115] J. P. McFadden, C. W. Carlson, D. Larson, M. Ludlam, R. Abiad, B. Elliott, P. Turin, M. Marckwordt y V. Angelopoulos, *Space Sci. Rev.* **141**, 277 (2008).



- [116] H. U. Auster, K. H. Glassmeiner, W. Magnes, O. Aydogar, W. Baumjohann y *et al.*, *Space Sci. Rev.* **141**, 235 (2008).