



# Análisis de datos en la relación entre la aparición de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones relativistas en el cinturón de radiación externo

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

**Christopher Alexis Lara Gallegos**

Santiago de Chile

Agosto, 2024

Directores de tesis:

**Dr. Pablo S. Moya**

**Dr. Victor A. Pinto**

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

**Christopher Alexis Lara Gallegos**

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 Privada de Tesis rendido el día 6 de agosto de 2024.

**Directores de Tesis:**

Dr. Pablo S. Moya

---

Dr. Victor A. Pinto

---

**Comisión de Evaluación de la Tesis:**

Dr. Mario Riquelme

---

Dra. Marina Stepanova

---

# Resumen

Utilizando datos de la misión Van Allen Probes, estudiamos el comportamiento de los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo, buscando correlaciones entre la ocurrencia de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones a distintas altitudes durante tormentas geomagnéticas. Consideramos tormentas geomagnéticas abarcando energías desde 0.47 MeV hasta 5.2 MeV, entre enero de 2013 y noviembre de 2018. Clasificamos las tormentas según su intensidad, tipo de precursor y evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación. Estudiamos la ocurrencia de onda a través de la potencia magnética bajo fundamentos de la teoría de ondas MHD, analizando las fluctuaciones paralelas y perpendiculares respecto al campo magnético de fondo, asociadas a modos de onda compresionales y de Alfvén. Nuestros resultados muestran que, al considerar todas las tormentas, las fluctuaciones paralelas indican una mayor correlación entre la potencia magnética de onda y la razón del flujo. Sin embargo, las fluctuaciones perpendiculares señalan menores anticorrelaciones entre dichas cantidades. Además, observamos que, en la fase principal de las tormentas, las regiones internas revelan posible interacción resonante, mientras que, durante la fase de recuperación, la resonancia se extiende en gran parte del cinturón de radiación externo. Al clasificar las tormentas geomagnéticas, encontramos que las tormentas intensas, las con precursor ICME y aquellas ligadas a un aumento del flujo muestran correlaciones significativas en los bordes del cinturón de radiación externo. Por otro lado, las tormentas moderadas y las con precursor SIR, muestran correlaciones significativas principalmente en regiones centrales y externas del cinturón de radiación externo. Nuestros resultados enfatizan la necesidad de profundizar en el área incorporando nuevos factores para una comprensión más completa del fenómeno.

# Abstract

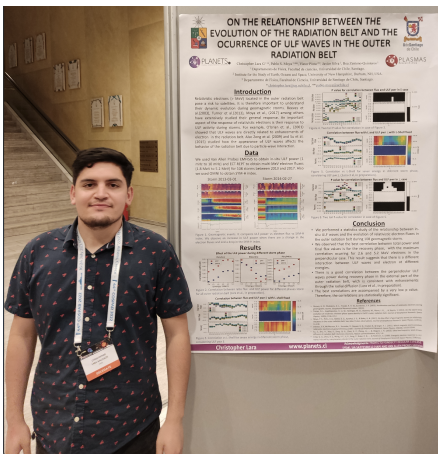
Using data from the Van Allen Probes mission, we study the behavior of relativistic electrons in the outer radiation belt, searching for correlations between the occurrence of ULF waves and the evolution of electron flux at different altitudes during geomagnetic storms. We consider geomagnetic storms spanning energies from 0.47 MeV to 5.2 MeV, between January 2013 and November 2018. We classify the storms according to their intensity, type of driver and evolution of the electron flux in the radiation belt. We study the occurrence of waves through magnetic power under the MHD wave theory, analyzing parallel and perpendicular fluctuations with respect to the background magnetic field, associated with compressional and shear Alfvén wave modes. Our results show that, when considering all storms, the parallel fluctuations indicate a greater correlation between the magnetic wave power and the flux ratio. However, perpendicular fluctuations indicate lower anticorrelations between these quantities. Furthermore, we observe that, in the Main Phase of storms, the inner regions reveal possible resonant interaction, while, during the Recovery Phase, the resonance extends over much of the outer radiation belt. When classifying geomagnetic storms, we find that intense storms, those with ICME precursors, and those linked to increased flux show significant correlations at the edges of the outer radiation belt. On the other hand, moderate storms and SIR driver storms show significant correlations mainly in central and external regions of the outer radiation belt. Our results emphasize the need to delve deeper into the area by incorporating new factors for a more complete understanding of the phenomenon.



# Publicaciones

1. Christopher Lara, Victor A. Pinto, Pablo S. Moya, Javier Silva, Bea Zenteno-Quinteros  
*On the Relationship Between ULF Wave Power and Changes of Relativistic Electron Fluxes in the Outer Radiation Belt.* In preparation.
2. Christopher Lara, Victor A. Pinto, Pablo S. Moya *Relationship between ULF waves and relativistic electron flux for different characteristics of a geomagnetic storm.* In preparation.

# Biografía



Nací el 4 de abril de 1995, en la comuna de Puente Alto, aunque prontamente nos cambiamos a Peñalolen, donde viví con mi madre, padre, lela y tata, quienes han sido fundamentales en mi vida. Desde pequeño tuve dos grandes pasiones, la astronomía y el fútbol (y Colo Colo). Más tarde, en 2007 ingresé al Instituto Nacional, donde tuve un importante desarrollo personal y aprendí de la importancia de la perseverancia. En 2013 ingresé a Licenciatura en Física, un nuevo y gran desafío en que me acerqué al área de la física espacial a través del plasma. De igual manera complementé mis estudios con la selección de fútbol de Ciencias y de la Universidad de Chile, que me permitió viajar a distintos lugares de Chile por nacionales deportivos. Durante los años de estudio adquirí el gusto e interés por la pedagogía, lo que me llevó a estudiar en el Programa de Formación Pedagógica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Dado mi constante interés de adquirir nuevos conocimientos y el gusto por la física, llevé a cabo el magíster en Física, lo que me ha conllevado un montón de aprendizaje y viajar a lugares que nunca pensé conocer. Además, he podido ejercer mi profesión de profesor en el Colegio Juan Pablo II, quienes me han permitido complementar mis estudios. Este es un importante hito que he podido concluir, lo que me deja las puertas abiertas a nuevos desafíos.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a tod@s quienes hayan aportado de alguna forma a este proceso académico. En primer lugar, agradezco de mi madre, padre, lela, tata y Rex, quienes siempre me han motivado a crecer y han sido fundamentales en mi formación académica y humana. A mi amor Andrea, quien me ha motivado, ayudado y apoyado incondicionalmente en mis procesos académicos. A mi prima Ale, que siempre me ha bancado y entregado buenas palabras. A mis amigos que me dio el fútbol de ciencias: Abiam, Pepe, Calule, Mati, Fabi, Jaime, Pelao, Iba, Estebandido, Adriano, Dani, Arielo, y todos con quienes jugué. Cada uno aportó en la etapa universitaria y logramos varios títulos. A la selección de fútbol de la U, con quienes compartí varios momentos representando a la U, con títulos incluidos. A mis primos por los momentos de distensión. Agradecer a Javier Silva, Daniel Hermosilla y Bea Zenteno, quienes me ayudaron en esta etapa académica y en la investigación. A l@s funcionarios; Luis Garrido, una excelente persona y que siempre nos transmitió algún aprendizaje desde su experiencia, Carla Valderrama, siempre tuvo la mejor disposición para ayudar a resolver problemas financieros, académicos y vocacionales, y Vicky Alcaíno, quien siempre ha tenido una excelente disposición a ayudar. Imposible no mencionar y agradecer profundamente a mis tutores Pablo y Víctor por guiarme, dedicarme parte de su tiempo, tenerme paciencia y enseñarme en este arduo camino. Agradecer al financiamiento de ANID a través de su beca para Magíster Nacional para profesionales de la educación 50220081 (CL), al proyecto FONDECYT Regular 1191351 (PSM) y 1211144 (MS) y proyecto ANID Instalación Académica SA77210112 (VAP). Agradecer a quienes proporcionan los datos de la misión Van Allen Probes y de NASA CDAweb, ya que sin ellos hubiese sido imposible el desarrollo de esta Tesis.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Anillos de radiación y tormentas geomagnéticas</b>	<b>7</b>
2.1. Estructura de la magnetosfera y cinturones de radiación . . . . .	11
2.2. Tormentas geomagnéticas y su origen . . . . .	15
2.3. Efectos de las tormentas geomagnéticas en el cinturón de radiación externo .	19
<b>3. Ondas de Ultra Baja Frecuencia (ULF)</b>	<b>23</b>
3.1. Ondas ULF Pc4 – Pc5 . . . . .	25
3.2. Ondas ULF Pc4 – Pc5 en el cinturón de radiación externo . . . . .	27
3.3. Energización por interacción onda-partícula . . . . .	28
3.4. Fundamento teórico de resonancia . . . . .	30
<b>4. Instrumentación, datos y metodología</b>	<b>33</b>
4.1. Misión Van Allen Probes . . . . .	33
4.2. Instrumentación . . . . .	35

4.2.1. MagEIS . . . . .	35
4.2.2. REPT . . . . .	36
4.2.3. EMFISIS . . . . .	37
4.3. Tratamiento de datos . . . . .	39
4.3.1. Flujo de electrones . . . . .	39
4.3.2. Campo magnético - Ocurrencia de ondas . . . . .	40
4.4. Metodología . . . . .	44
4.5. Correlaciones entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo . . . . .	47
<b>5. Relación entre las ondas ULF y los cambios de los flujos de electrones en el cinturón de radiación exterior</b>	<b>49</b>
5.1. Flujo de electrones y potencia magnética de ondas durante tormentas geomagnéticas . . . . .	50
5.2. Correlaciones totales entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo . . . . .	54
5.3. Correlaciones por $L^*$ entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo . . . . .	57
5.4. Análisis . . . . .	60
5.5. Resonancia onda partícula . . . . .	62
<b>6. Ocurrencia de ondas en la evolución del flujo de electrones bajo la clasificación de las tormentas geomagnéticas</b>	<b>65</b>
6.1. Tormentas geomagnéticas intensas, originada por ICME y aumento del flujo . . . . .	68

6.2. Tormentas geomagnéticas moderadas y precursor tipo SIR . . . . .	73
6.3. Discusión y análisis . . . . .	77
<b>7. Conclusión</b>	<b>81</b>
<b>Apéndice A. Lista de tormentas</b>	<b>87</b>
<b>Apéndice B. Resultados complementarios</b>	<b>89</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Durante más de un siglo, el plasma ha capturado la atención de físicas y físicos como un apasionante campo de estudio. Este estado de la materia, definido hoy como un gas ionizado cuasineutral a altas temperaturas que muestra un comportamiento colectivo (Chen, 1983)<sup>1</sup>, abarca un amplio campo de interés. Uno de los primeros en identificar este gas fue Crookes (1879), denominándolo en sus experimentos como “materia radiante”. Años más tarde, Langmuir (1928) formalizó el concepto de plasma, destacando que una de sus principales características es que lo forman una cantidad similar de iones y electrones. Actualmente, se reconoce que el plasma es un estado distintivo de la materia que constituye el 99% de la materia visible (Alfvén, 1986). Sus manifestaciones se extienden desde elementos artificiales de uso cotidiano, como televisores y tubos fluorescentes, hasta fenómenos naturales como la ionosfera, auroras boreales y el viento solar. Esta amplitud de contextos ha impulsado investigaciones en diversas áreas experimentales, como el Z-pinch y el Tokamak (Yamazaki et al., 2009; Haines, 2011), donde se manipulan los parámetros de campo magnético, temperatura, densidad, entre otros, con el fin de interpretar fenómenos cinéticos o colectivos. El estudio del plasma en el espacio también forma parte de esta línea experimental (Van Allen, 2004).

El espacio nos proporciona la principal fuente de plasma, actuando como un laboratorio natural para investigar una amplia gama de fenómenos. Estos eventos abarcan desde la formación

---

<sup>1</sup>Capítulo 1: Introduction

de estrellas hasta la presencia de plasmas en agujeros negros y el medio interplanetario, formado por las partículas y campos ubicados entre el Sol, planetas y medio interestelar (Pröls, 2004a; Inoue et al., 2009; Padovani et al., 2016)<sup>2</sup>. El viento solar se destaca como un foco importante en esta disciplina, ya que al interactuar con la Tierra es capaz de provocar perturbaciones globales en el campo magnético, fenómeno conocido como tormenta geomagnética. Las tormentas geomagnéticas se caracterizan por energizar el anillo de corriente de la magnetosfera interna de la Tierra, provocando una variación del campo magnético terrestre de al menos -50 nT (Gonzalez et al., 1994). Durante este proceso se pueden propagar ondas que generan fluctuaciones en el campo magnético terrestre, lo que puede alterar la aceleración o flujo de partículas (O'Brien et al., 2001; Kepko et al., 2002; Mann et al., 2004).

Eventos históricos, como el evento Halloween de 2003, que es una de las tormentas geomagnéticas más grandes de la historia reciente, ilustran la capacidad de estas perturbaciones para generar impactos significativos en la magnetosfera interna (Baker et al., 2004). Además, afectó el funcionamiento de satélites como GOES 9-10-11 (Geostationary Operational Environmental Satellites), Midori II, entre otros (Webb and Allen, 2004). Otro gran evento se produjo en 1989, donde se registraron millones de dólares en pérdidas en HydroQuebec debido al apagón producido por la tormenta geomagnética (Bolduc, 2002). A partir de los efectos de las tormentas geomagnéticas, se ha estudiado que las variaciones del cinturón de radiación externo pueden afectar a los satélites posicionamiento global (GPS), de clima espacial y de exploración extra planetaria (Baker, 2000; Wrenn et al., 2002; Wrenn, 2009; Horne et al., 2013), subrayando la importancia de anticiparse a tales eventos, especialmente dada la cantidad de dispositivos eléctricos que utilizamos hoy en día.

El viento solar desempeña un papel fundamental en la configuración de la magnetosfera terrestre, ya que la presión que ejerce modula las líneas del campo magnético casi dipolar terrestre, comprimiéndolas en el frente y creando una cola alargada en la región nocturna de la magnetosfera (Roelof and Sibeck, 1993; Pandya et al., 2019). La magnetosfera terrestre es nuestro principal escudo ante la radiación espacial, exhibe un comportamiento dinámico

---

<sup>2</sup>Capítulo 6: Interplanetary Medium



en respuesta a estas interacciones, albergando electrones, protones y otras especies de iones en diferentes rangos de energéticos desde decenas de eV (Denton et al., 2017) hasta decenas de MeV agrupados en distintas poblaciones (Baker et al., 2018), cada una con sus propias características (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>3</sup>. Las tormentas geomagnéticas afectan regiones internas de la magnetosfera, como la ionosfera, el anillo de corriente y los cinturones de radiación, donde el plasma contenido se ve perturbado por estas interacciones (Turner et al., 2015; Reeves et al., 2016; Georgiou et al., 2018). Un claro ejemplo de esta dinámica es el comportamiento que muestran los electrones en el cinturón de radiación interno y externo.

Las tormentas geomagnéticas se pueden clasificar principalmente en dos tipos de mecanismos que las provocan: las tormentas magnéticas originadas por Regiones de Interacción de Corrientes (SIR, Stream Interaction Region), que surgen en bordes de agujeros coronales y pueden ser recurrentes cada 27 días, por lo que se relacionan con regiones de interacciones corrotantes (CIR, Corotating Interaction Region), y son más comunes en la fase de declinación de un ciclo solar (Yermolaev and Yermolaev, 2003). Por otro lado, tenemos los eventos provocados por eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICME, por sus siglas en inglés), que representan expulsiones significativas de masa coronal del Sol viajando por el medio interplanetario, interactúan con el campo magnético terrestre y provocan perturbaciones en este. Las tormentas geomagnéticas producidas por ICME pueden generar grandes auroras y causar inducciones magnéticas severas, alcanzando su tasa máxima de ocurrencia durante los máximos solares (Yashiro et al., 2004; Borovsky and Denton, 2006). Estudios como los realizados por Borovsky and Denton (2006), Kataoka and Miyoshi (2006) y Yuan and Zong (2012) han demostrado que las tormentas magnéticas ICME y SIR afectan de manera distinta la dinámica del magnetosfera interna, incluido el comportamiento del cinturón de radiación externo.

Diversos parámetros físicos influyen en el comportamiento dinámico del cinturón de radiación externo, lo que motiva la investigación continua de esta compleja región. Entre los factores más destacados se encuentran el tipo y la energía de las partículas, la intensidad de las tor-

---

<sup>3</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

mentas geomagnéticas, la aparición de ondas y la velocidad del viento solar, entre otros (Mann et al., 2004; Turner et al., 2019). Un factor importante son las ondas que se propagan hacia el interior de la magnetosfera (Zong et al., 2017). Se ha observado que las ondas, especialmente durante tormentas geomagnéticas, tienen el potencial de influir significativamente en el comportamiento del cinturón de radiación externo (O'Brien et al., 2001; Baker et al., 2018). La dinámica de los electrones en la región está determinada por diversos mecanismos, que incluyen la resonancia onda-partícula, la difusión radial y la convección magnética (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>4</sup>. Estos procesos nos motivan a explorar la interacción onda-partícula en el cinturón de radiación externo, considerando el flujo de electrones a diferentes distancias radiales de la Tierra. Para ello, es fundamental calcular la potencia magnética asociada a las ondas y cuantificar su ocurrencia, especialmente aquellas de Ultra Baja Frecuencia (ULF) en el intervalo Pc4 y Pc5 (1 mHz a 22 mHz) (Georgiou et al., 2015).

La interacción resonante en el cinturón de radiación externo puede inducir procesos de aceleración en los electrones energéticos atrapados cuando la frecuencia de la onda coincide con la frecuencia del movimiento de deriva o rebote de las partículas a través del cinturón de radiación externo (Southwood and Kivelson, 1981). Comprender la importancia de cada uno de estos procesos subraya la necesidad continua de investigación en esta área. Nuestro estudio busca identificar correlaciones entre la evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo y la ocurrencia de ondas ULF. Además, corroborar numéricamente que podría ser posible tener resonancia entre las ondas ULF y los electrones relativistas en la región de estudio. Al profundizar en esta relación, esperamos avanzar en el conocimiento de la física de la magnetosfera interna y su respuesta a las perturbaciones solares.

El uso de satélites ha adquirido una importancia creciente en la investigación del clima espacial y el estudio del cinturón de radiación externo. Satélites como GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) y SAMPEX (Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explore) han acumulado una vasta cantidad de datos que proporcionan información detalla-

---

<sup>4</sup>Capítulo 7: Dynamics of the Electron Belts

da sobre el comportamiento de los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo (Reeves et al., 2003; Zhao and Li, 2013). Además, la misión Van Allen Probes ha sido fundamental al proporcionar mediciones in-situ en los cinturones de radiación, ofreciendo datos específicos en sus distintas alturas, horas locales magnéticas y latitudes magnéticas (Reeves et al., 2013; Spence et al., 2013). Estos satélites, que recopilan información sobre campos magnéticos y partículas en los cinturones de radiación, desempeñan un papel vital en la comprensión de las dinámicas espaciales, especialmente durante tormentas geomagnéticas. Por lo tanto, profundizar en este tema es significativo, ya que un mayor entendimiento del comportamiento del cinturón de radiación externo podría ayudar a mitigar los posibles daños en los satélites, con las consiguientes implicaciones humanas y económicas que estas fallas podrían acarrear (Wrenn et al., 2002; Wrenn, 2009).

El objetivo fundamental de esta tesis es investigar la correlación entre la ocurrencia de ondas ULF, a través de las fluctuaciones paralelas y perpendiculares del plasma respecto al campo magnético de fondo, y la dinámica de los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo durante tormentas geomagnéticas. En particular, buscamos establecer correlaciones entre la evolución del flujo de electrones en el rango de energías entre 0.47 MeV y 5.2 MeV y la ocurrencia de ondas ULF en distintos rangos de frecuencia entre 1 mHz y 22.5 mHz durante las fases de tormentas geomagnéticas, enfocándonos en intensidades moderadas e intensas, precursores del tipo ICME y SIR, y evoluciones del cinturón de radiación externo que implique un aumento, disminución o no cambio del flujo. Este análisis lo realizamos en un rango de altitudes de la magnetosfera terrestre, específicamente en el intervalo  $3.1 \leq R_T \leq 6.0$  ( $R_T$ , radios terrestres). Los datos para esta investigación se obtuvieron principalmente de los satélites de la misión NASA Van Allen Probes (Mauk et al., 2013), que proporcionan mediciones directas del campo magnético a través del instrumento EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) y del flujo de electrones mediante los instrumentos ECT-MagEIS (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite - Magnetic Electron Ion Spectrometer) y ECT-REPT (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma - Relativistic Electron-Proton Telescope). Estos datos son fundamentales

para nuestra investigación.

En el Capítulo 2, profundizamos en diversos estudios relacionados con la estructura y dinámica del cinturón de radiación externo, y características de las tormentas geomagnéticas. En el Capítulo 3, exploramos el impacto de las ondas ULF durante tormentas geomagnéticas en el cinturón de radiación externo, centrándonos especialmente en la resonancia onda-partícula. Luego, en el Capítulo 4, detallamos los aspectos técnicos de la misión Van Allen Probes y la metodología empleada en nuestra investigación, incluyendo las mediciones realizadas y el tratamiento de datos. En los Capítulos 5 y 6, presentamos y analizamos los resultados obtenidos en términos de las correlaciones entre la evolución del flujo de electrones relativistas y la presencia de ondas ULF, considerando varios parámetros asociados a los eventos geomagnéticos mencionados previamente. Este enfoque integral nos permite realizar una contribución significativa al entendimiento de la dinámica del cinturón de radiación y las complejas interacciones entre los electrones relativistas y las ondas ULF mediante un análisis estadístico de las correlaciones existentes entre estos parámetros. Finalmente, en el Capítulo 7, extraemos las principales conclusiones asociadas a nuestros resultados.

Abordar esta temática es de suma importancia, ya que aporta nuevos detalles sobre el comportamiento del cinturón de radiación durante tormentas geomagnéticas, en particular la relevancia de la resonancia onda-partícula como un fenómeno que afecta el comportamiento de los electrones relativistas. Este trabajo contribuye a futuras investigaciones en el campo del clima espacial, lo que podría tener un impacto significativo en la tecnología espacial y terrestre.

# Capítulo 2

## Anillos de radiación y tormentas geomagnéticas

El plasma en el Universo se puede encontrar en diversas condiciones de temperatura, campo magnético y densidad. Además, el parámetro  $\beta$  del plasma nos entrega características propias del plasma, corresponde a la razón entre la presión cinética y magnética en el plasma (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>1</sup>, lo que nos indica la dominancia relativa del campo magnético de fondo en la dinámica de las partículas. Si  $\beta \ll 1$ , entonces la presión magnética es dominante sobre la presión térmica. Además, podemos determinar el comportamiento colectivo de los procesos del plasma a través del parámetro  $N_D$  (Chen, 1983). Si  $N_D \gg 1$  podemos observar fenómenos colectivos, el cual se define como:

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3,$$

con  $n$  la densidad del plasma y  $\lambda_D$  la longitud de Debye del plasma. Esta se define como la distancia radial de apantallamiento para un potencial  $\psi$  y está dada por la expresión (Chen, 1983)<sup>2</sup>:

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

---

<sup>1</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

<sup>2</sup>Capítulo 1: Introduction

donde  $k_b$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura del plasma y  $e$  la carga unitaria. En la Figura 2.1 podemos observar las características de plasma en la magnetosfera, mientras que en la Tabla 2.1 encontramos los valores para el cinturón de radiación externo. Notamos que el plasma en la magnetosfera, y en particular en el cinturón de radiación externo, es de baja densidad, frío y de comportamiento colectivo.

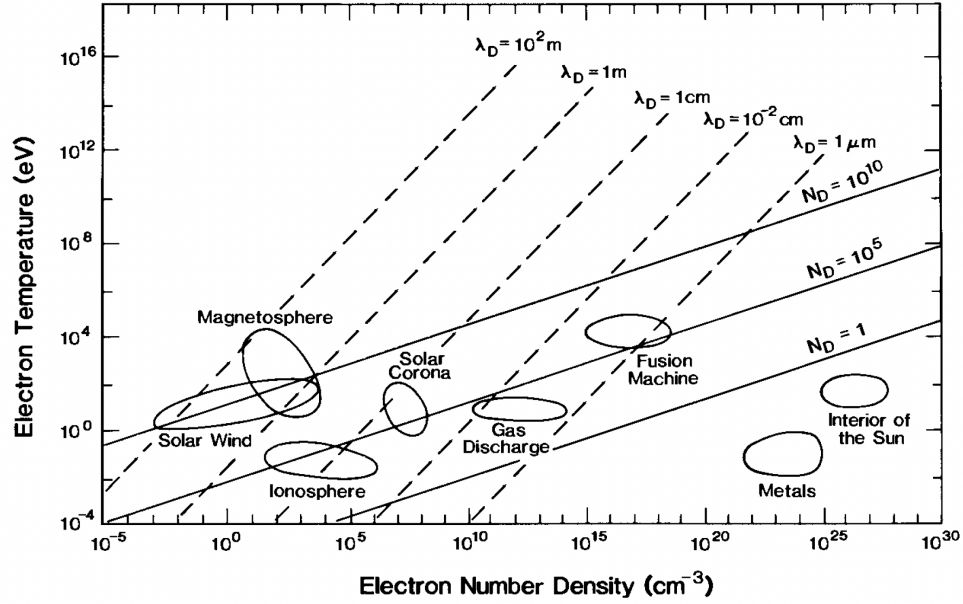


Figura 2.1: Temperatura en función de la densidad del plasma en distintas regiones. Además se agrega parámetro  $N_D$  y la longitud de Debye (Extraído de Benton and Benton (2001)).

Entorno	Densidad de plasma ( $n_e$ [ $cm^{-3}$ ])	Temperatura electrones ( $T$ [eV])	Campo magnético ( $B$ [T])	Longitud de Debye ( $\lambda_D$ [cm])	$N_D$
Núcleo solar	$10^{26}$	$10^3$	–	$10^{-9}$	$10^{-1}$
Tokamak	$10^{14}$	$10^4$	10	$10^{-2}$	$10^8$
Ionosfera	$10^6$	$10^{-1}$	$10^{-5}$	$10^{-1}$	$10^5$
Magnetosfera	10	$10^3$	$10^{-8}$	$10^4$	$10^{10}$
Viento solar	1	10	$10^{-9}$	$10^3$	$10^{10}$
Cinturón de radiación externo	$10^{-5}$	$10^5$	$10^{-5}$	$10^4$	$10^8$
Medio intergaláctico	$10^{-5}$	$10^2$	–	$10^7$	$10^{15}$

Tabla 2.1: Características del plasma en diferentes regiones de estudio (Adaptado de Blandford and Thorne (2008) y Borovsky and Valdivia (2018)).

Considerando la baja densidad y comportamiento colectivo de la magnetosfera (y del cinturón de radiación externo), es importante considerar que en ciertas situaciones podemos

observar un comportamiento como fluido, sin embargo, en otras ocasiones como el conjunto de partículas individuales (Chen, 1983)<sup>3</sup>. Como el plasma en la magnetosfera interactúa con el campo magnético cuasi dipolar de la Tierra, acorde a los objetivos de esta tesis, estudiaremos los movimientos de un electrón relativista entorno a una línea de campo magnético a través de la Ley de Lorentz<sup>4</sup>. <sup>5</sup>El primero es el **movimiento de giro**, que ocurre bajo la presencia de un campo magnético homogéneo en  $\hat{z}$ . A partir de la ecuación de movimiento, la partícula se mueve circularmente alrededor de la línea de campo magnético (centro de guía o guiding center) y con una velocidad constante en  $\hat{z}$  describirá una órbita helicoidal, tal que su frecuencia angular  $\omega_c$  y radio de giro  $r_L$  (conocido como radio de Larmour) están dados por

$$\omega_c = \frac{|q|B}{\gamma m} \quad r_L = \frac{\gamma m v_{\perp}}{qB}, \quad (2.1)$$

con  $\gamma$  el factor de Lorentz,  $q$  la carga unitaria,  $B$  la intensidad del campo magnético,  $m$  la masa de la partícula y  $v_{\perp}$  el módulo de la velocidad perpendicular a la línea de campo magnético. El segundo corresponde al **movimiento espejo** que aparece cuando una partícula se mueve paralela a la línea de un campo magnético no uniforme en  $\hat{z}$  con dos puntos espejo. Cuando la partícula se mueva a lo largo de la línea de campo, por conservación de la energía, mientras  $B$  sea más intenso, la partícula tendrá mayor  $v_{\perp}$  y disminuirá  $v_{\parallel}$ . De manera contraria ocurrirá cuando la intensidad de  $B$  decrece. Además, a partir de  $\nabla \cdot \mathbf{B}$ , se define el momento magnético  $\mu$  de una partícula que se mueve entorno a un campo magnético, que habla de la conservación de la energía respecto a la frecuencia angular, y se calcula como:

$$\mu = \frac{\gamma^2 m v_{\perp}^2}{2B}. \quad (2.2)$$

Por último, tenemos el **movimiento de deriva**, que está compuesto por distintas interacciones como la deriva por campo eléctrico y magnético  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , deriva por fuerzas externas al plasma, deriva por gradiente de campo magnético y gradiente por curvatura de campo

---

<sup>3</sup>Capítulo 1: Introduction

<sup>4</sup> $\gamma m \dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

<sup>5</sup>Basado en Chen (1983), Kivelson (2006) y Koskinen and Kilpua (2022)

magnético, tal que el movimiento se puede expresar por:

$$\mathbf{v}_D = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{\mathbf{F}_{\text{ext}} \times \mathbf{B}}{qB^2} + \frac{W_{\perp} \mathbf{B} \times \nabla \mathbf{B}}{qB^3} + \frac{2W_{\parallel} \hat{\mathbf{r}}_c \times \mathbf{B}}{qR_c B^2}, \quad (2.3)$$

con  $W_{\parallel, \perp}$  la energía cinética paralela y perpendicular de la partícula,  $R_c$  el radio de la curvatura del campo magnético y  $\hat{\mathbf{r}}_c$  la dirección radial. Estos tres tipos de movimientos nos serán de utilidad para analizar la estructura del cinturón de radiación externo.

Otra característica de los plasmas de bajas colisiones, es que a pesar de que puedan existir cambios en la energía, existen ciertas cantidades que no cambian cuando las variaciones de los campos magnéticos son suficientemente lentas (Chen, 1983; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>6,7</sup>. Por ejemplo, cuando la variación del campo magnético dentro de un giro en la órbita es comparable al campo magnético inicial, se conserva momento magnético (Ecuación (2.2)), que corresponde a la primera invariante adiabática del plasma  $\mu$ . La segunda invariante adiabática  $J$ , ocurre cuando las variaciones de campo magnético son lentas respecto al tiempo de rebote entre dos puntos y está dada por

$$J = \oint p_{\parallel} ds, \quad (2.4)$$

con  $p$  el momentum de la partícula a lo largo de la línea de campo,  $ds$  una longitud de camino del centro de guía. La tercera invariante magnética  $\Phi$  hace referencia al flujo magnético encerrado en un movimiento de deriva. Tiene gran importancia en los cinturones de radiación, ya que es bastante complejo tener variaciones de campo magnético lo suficientemente lentas como para que durante un giro de deriva no existan cambios en el flujo magnético. Ondas como las de Ultra Baja Frecuencia son capaces de violar esta invariante adiabática, ya que el periodo de estas es comparable con el giro de las partículas (Elkington et al., 2003; Zong

---

<sup>6</sup>Capítulo 2: Single-Particle Motions

<sup>7</sup>Capítulo 2: Charged Particles in Near-Earth Space



et al., 2017). La tercera invariante adiabática está dada por la expresión:

$$\Phi = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}, \quad (2.5)$$

$\mathbf{A}$  es el potencial vector del campo y  $d\mathbf{l}$  corresponde al elemento de arco del camino de deriva del centro de guía. A partir de la tercera invariante adiabática se define el parámetro  $L^*$ , que corresponde a la distancia radial (en  $R_T$ ) a los puntos ecuatoriales en que se encontraría la partícula si desapareciesen adiabáticamente las contribuciones no dipolares al campo magnético (Ukhorskiy and Sitnov, 2014).  $L^*$  se define como:

$$L^* = -\frac{2\pi B_0 R_T^2}{\Phi},$$

con  $B_0$  la intensidad del campo magnético terrestre en la superficie. Considerando que los movimientos de las partículas de un plasma están dominados por campos eléctricos y magnéticos, cualquier perturbación de estos campos puede afectar a la aceleración de las partículas. Por ejemplo una onda sinusoidal puede generar estas variaciones de  $\mathbf{E}$  o  $\mathbf{B}$ , por ende, afectar la dinámica del plasma en la magnetosfera. A continuación, abordamos cómo es la estructura de la magnetosfera y los cinturones de radiación, además ahondaremos en la dinámica del cinturón de radiación externo cuando el viento solar interactúa con la magnetosfera.

## 2.1. Estructura de la magnetosfera y cinturones de radiación

La magnetosfera es la región del espacio formada por el campo magnético de la Tierra, la cual controla los movimientos de las partículas cargadas (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>8</sup>. Esta estructura se origina a partir del campo magnético casi dipolar de la Tierra, y su forma y extensión espacial resultan de la interacción continua con el viento solar, que normalmente

---

<sup>8</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

alcanza velocidades de 300 km/s a 800 km/s (Borovsky and Valdivia, 2018). En esta dinámica, el balance de presión del viento solar y la magnetosfera da forma a la región frontal, formando la Magnetopausa (Magnetopause), que separa el campo magnético dominante de la Tierra del viento solar y cuyo punto máximo se sitúa en promedio a 8–10 radios terrestres ( $R_T$ ) de distancia, mientras que en la región nocturna se extiende una larga cola, conocida como la Magnetocola (Magnetotail), que se extiende probablemente hasta 100–200  $R_T$  (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>8</sup>.

En la Figura 2.2, podemos observar que la magnetosfera se subdivide en varias regiones, cada una con características distintivas en términos de temperatura, densidad y campo magnético. En la magnetosfera externa, encontramos la lámina de plasma en el centro de la magnetocola, que corresponde a un plasma relativamente denso ( $0.1\text{--}1\text{ cm}^{-3}$ ) compuesto de iones y electrones, con temperaturas en el orden de decenas de keV y  $\beta = 6$ . Además, notamos la presencia del lóbulo de la cola, un plasma de baja densidad ( $0.01\text{ cm}^{-3}$ ) y frío, con temperaturas en el orden de los eV y  $\beta = 0.003$  (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>8</sup>. Encontramos las cúspides polares, que corresponden a las zonas polares donde el plasma puede propagarse hacia la ionosfera (Borovsky and Valdivia, 2018). En la magnetosfera interna, encontramos la plasmasfera, una región de plasma frío ( $\sim 1\text{ eV}$ ) y denso ( $10^3\text{ cm}^{-3}$ ), formada principalmente por flujos ionosféricos (Kivelson, 2006)<sup>9</sup>. Además, están los cinturones de radiación, que se superponen parcialmente con la plasmasfera y presentan una densidad de partículas y energía variable a lo largo de las líneas de campo magnético, dependiendo de la población de iones o electrones. También se ubica el anillo de corriente, que corresponde a una región importante para el origen de las tormentas geomagnéticas y se forma por el movimiento de deriva de electrones y protones. Se encuentra en la magnetosfera interna y se concentra principalmente entre 3 y 4  $R_T$  (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>10</sup>. El valor de  $\beta$  del plasma en la magnetosfera interna es  $< 1$  en las tres poblaciones (Prölss, 2004b).

Los cinturones de radiación de la Tierra, nombrados en honor a James Van Allen, quien los

---

<sup>9</sup>Capítulo 10: Magnetospheric Configuration

<sup>10</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

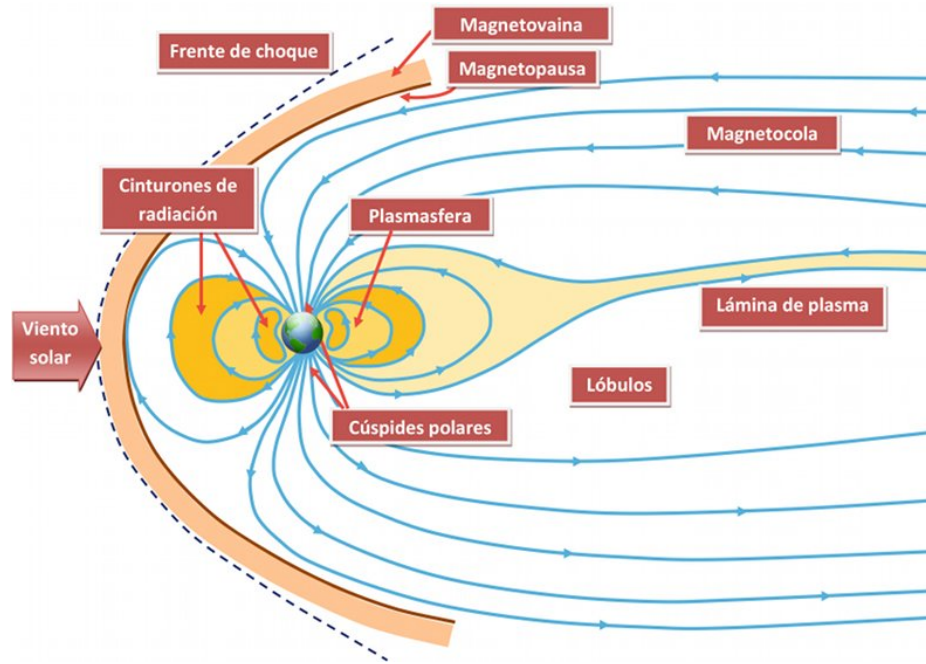


Figura 2.2: Estructura interna de la magnetosfera (Extraído de Aguado Molina (2011)).

descubrió en 1958 (Van Allen et al., 1959), son parte de la magnetosfera interna, presentan una dinámica variable y están poblados por iones y electrones de diferentes energías (Figura 2.3)(Van Allen, 2004). En esta región, el campo magnético adopta una estructura cuasi dipolar que se extiende desde aproximadamente  $1.2 R_T$  hasta alrededor de  $7-10 R_T$  en el plano ecuatorial (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>11</sup>. En el plasma de los cinturones de Van Allen, encontramos protones energéticos procedentes del viento solar, de la desintegración iónica en la atmósfera o de la lámina de plasma iónica. También encontramos electrones, algunos originados por la ionización atmosférica y otros provenientes de la convección magnética desde la magnetocola hacia la Tierra (Borovsky and Valdivia, 2018).

La estructura de los cinturones de radiación varía significativamente entre protones y electrones. Los protones con energías superiores a 5 MeV, e incluso hasta 100 MeV, ocupan una región continua del espacio que se extiende desde  $1.2 R_T$  hasta  $3.0 R_T$  (Baker et al., 2018; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>11</sup>. Estas energías son alcanzadas mediante procesos de aceleración causados por ondas, aceleración adiabática e inducción por campos eléctricos y/o magnéticos. Por otro lado, los electrones, objeto de interés en esta investigación, se distribuyen en tres

<sup>11</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

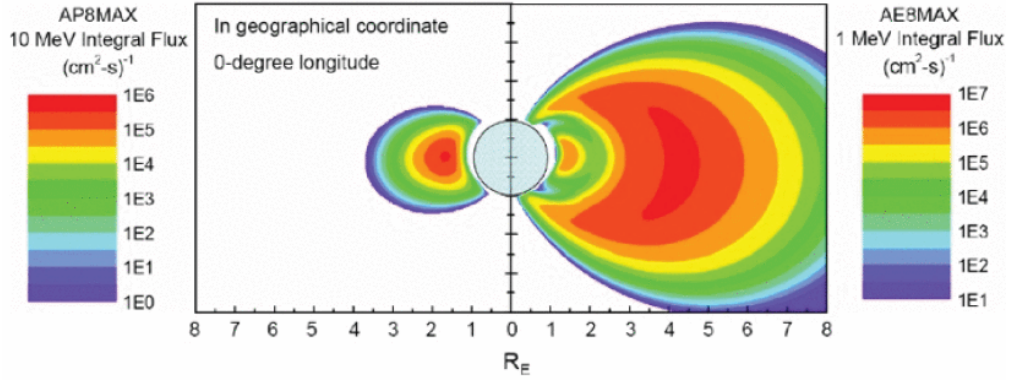


Figura 2.3: Representación de los cinturón de radiación para protones de 10 MeV (izquierda) y cinturones de radiación para electrones de 1 MeV (derecha). Extraída de Jun et al. (2024).

regiones: el cinturón de radiación interno, entre  $1.2 R_T$  y  $2.0 R_T$ , alberga principalmente electrones con energías del orden de los cientos de keV. Luego, un espacio con menos partículas, ubicada entre  $2-3 R_T$ , contiene electrones de baja energía, en el rango de decenas de keV, pero que también puede ser poblada por electrones relativistas durante algunas tormentas geomagnéticas intensas (Baker et al., 2018). Finalmente, el cinturón de radiación externo se extiende desde  $3 R_T$  hasta  $7-10 R_T$ , abarcando desde cientos de keV hasta  $\sim 10$  MeV (Baker et al., 2018; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>12</sup>. Esta región muestra una estructura toroidal, y es mucho más variable que la región interna debido a sus constantes interacciones con el entorno. Durante ciertas tormentas geomagnéticas, se ha observado la formación de un tercer cinturón de radiación, debido a las características del evento geomagnético (Baker et al., 2013a).

El cinturón de radiación externo adopta su estructura toroidal debido a los tipos de movimientos e interacciones que experimentan los electrones con el campo magnético terrestre. En la Figura 2.4, se pueden apreciar los tres tipos de movimientos que los electrones llevan a cabo en el cinturón de radiación externo. Estos movimientos incluyen el giro o ciclotrón (gyro motion), generando un movimiento circular alrededor de estas líneas. La frecuencia de giro de los electrones está determinada por la intensidad del campo magnético y su energía, con un período de giro para los electrones relativistas de unos pocos segundos. Además, los electrones experimentan un movimiento de rebote (bounce motion) entre dos puntos de las

<sup>12</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

líneas del campo magnético denominados espejos magnéticos y se debe a los gradientes de campo magnético a lo largo de estas líneas. Por último, los electrones presentan un movimiento de deriva hacia el este (drift motion), resultado de la curvatura del campo magnético, desplazándose en la dirección azimutal (Chen, 1983)<sup>13</sup>. El período de deriva de los electrones relativistas es de unos pocos minutos. Estos tres tipos de movimientos pueden ser alterados por interacciones como las tormentas geomagnéticas.

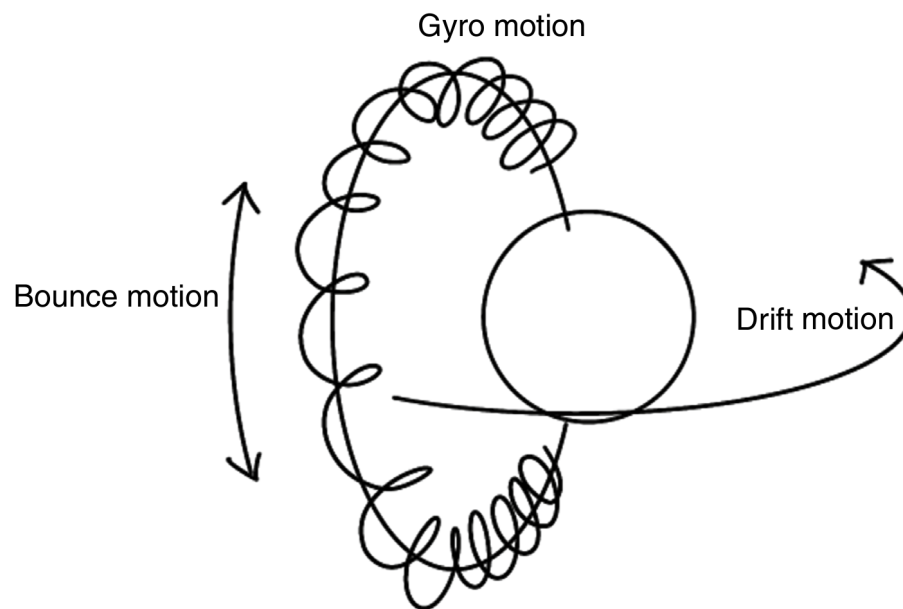


Figura 2.4: Movimiento de giro, rebote y deriva de un electrón en el cinturón de radiación terrestre debido a su interacción con el campo magnético (Extraído de Kataoka (2022)).

## 2.2. Tormentas geomagnéticas y su origen

Las tormentas geomagnéticas son períodos en los que el viento solar y el campo magnético interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés) generan una energización suficientemente intensa del anillo de corriente. Cuando el anillo de corriente se intensifica, se induce un campo magnético opuesto al de la Tierra por la Ley de Lenz, lo que se mide desde la Tierra como una disminución de la intensidad del campo magnético. Esta variación se cuantifica a través del

<sup>13</sup>Capítulo 2: Single-Particle Motion

índice  $D_{st}$ , y cuando este índice alcanza valores menores a -50 nT, se considera que estamos en presencia de una tormenta geomagnética (Gonzalez et al., 1994). En nuestro caso, utilizamos el índice SYM-H, el cual busca entregar la información del índice  $D_{st}$ , pero con una resolución temporal de 1 minuto, respondiendo de manera similar (Wanliss and Showalter, 2006). Las tormentas geomagnéticas pueden ser desencadenadas por diversos precursores relacionados con las perturbaciones del viento solar en la magnetosfera terrestre (Zong, 2022). Entre estos precursores se incluyen variaciones en el IMF, eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICME) o interacciones de regiones de corrientes (SIR) (Zhang et al., 2007), en algunos casos, la combinación de estos factores. Durante estos eventos, las fluctuaciones en los campos eléctricos y magnéticos pueden afectar la dinámica de los electrones (O'Brien et al., 2001; Reeves et al., 2003; Moya et al., 2017), lo que puede tener consecuencias graves, como fallos en dispositivos espaciales e interferencias en las comunicaciones (Wrenn et al., 2002).

Durante las tormentas geomagnéticas, los electrones en el cinturón de radiación externo pueden ser energizados a través de diversos mecanismos. Uno de estos mecanismos es el transporte radial, que implica el desplazamiento de partículas a través de las líneas del campo magnético, acercándose o alejándose de la Tierra, debido a las variaciones de los campos eléctrico o magnéticos con los que interactúa la partícula, lo que podría resultar en aceleraciones radiales (Zong et al., 2017). Otra posibilidad es la resonancia onda-partícula, donde la frecuencia del movimiento de las partículas coincide con la frecuencia de las ondas de Alfvén, ondas de Ciclotrón de Iones Electromagnéticos (EMIC, Electromagnetic Ion Cyclotron Waves), Muy Baja Frecuencia (VLF, Very Low Frequency), ULF, entre otras (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>14,15</sup>. Un tercer proceso relevante es la convección magnética desde la magnetocola hacia la ionosfera, donde la energía se propaga a través del plasma debido a gradientes de campo magnético, permitiendo el ingreso de partículas a la magnetosfera interna mediante movimientos a lo largo de las líneas del campo magnético (Kivelson, 2006)<sup>16</sup>. Estos procesos pueden manifestarse en distintas fases de una tormenta, como la fase principal, caracteriza-

---

<sup>14</sup>Capítulo 5: Drivers and Properties of Waves in the Inner Magnetosphere

<sup>15</sup>Capítulo 6: Particle Source and Loss Processes

<sup>16</sup>Capítulo 10: Magnetospheric Configuration

da por la propagación intensa de energía hacia la magnetosfera, o la fase de recuperación, cuando el campo magnético regresa a su estado previo a la tormenta. Esta tesis se centra en el estudio de las ondas ULF como un posible mecanismo de aceleración de electrones.

Los tipos de precursores de las tormentas geomagnéticas presentan características que determinan la evolución de los fenómenos en la magnetosfera interna. Por ejemplo, el precursor SIR emana corrientes de viento solar de alta velocidad desde los bordes de agujeros coronales (Tsurutani et al., 2006), que corresponden a regiones del Sol con polaridad magnética dominante y baja densidad (Delouille et al., 2018), lo que en ocasiones genera interacciones con regiones de viento solar de baja velocidad cada 27 días debido a la rotación del Sol (Kilpua et al., 2017). En esta dinámica, la rotación del Sol juega un papel crucial al arrastrar plasma del viento solar y generar inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz (K-H) en la interfaz de flujo de alta y baja velocidad (Bentley et al., 2018; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>14</sup>. Esta interacción entre diferentes regiones del viento solar es propensa a crear perturbaciones en el medio interplanetario y en el propio viento solar, lo que facilita la propagación de ondas que pueden generar energización o difusión radial en los electrones (Elkington et al., 1999). La Figura 2.5 ilustra cómo interactúan estas regiones a diferentes velocidades. Según Borovsky and Denton (2006), el precursor SIR se distingue del precursor ICME en que están seguidas por flujos de alta velocidad (HSS, High Speed Streams). Estos eventos, relacionados con HSS del viento solar, tienden a ocurrir en la fase de declinación de un ciclo solar. Aunque son menos intensas que las tormentas generadas por ICME, suelen tener una duración más prolongada y producen un alto flujo de electrones relativistas, lo que se traduce en una menor variación del índice  $D_{ST}$  (Borovsky and Denton, 2006; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>17</sup>. Además, en los precursores SIR se observa una elevada potencia de ondas ULF en mayores intervalos de tiempo, lo que se debe a los largos períodos de alta velocidad del viento solar (Borovsky and Denton, 2006).

Por otro lado, las tormentas geomagnéticas con precursor ICME son generadas por regiones de alta actividad solar. Durante estos eventos, el Sol emite grandes cantidades de masa solar

---

<sup>17</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

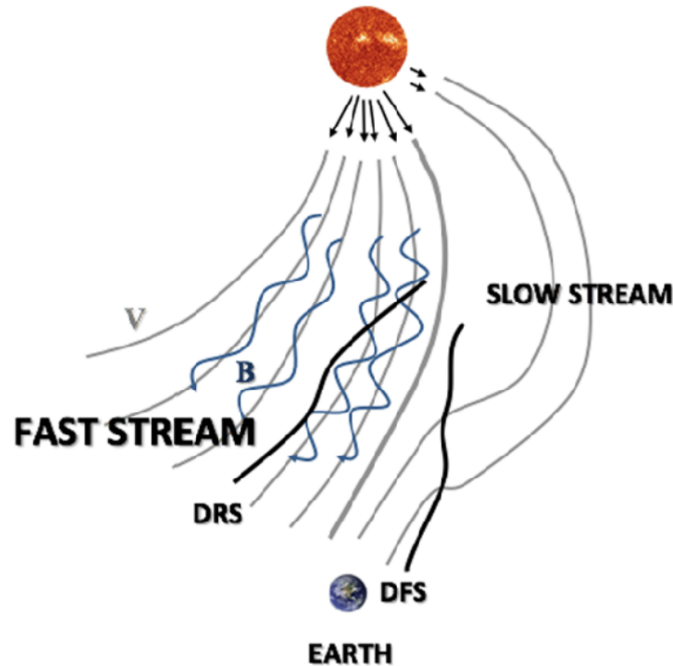


Figura 2.5: Representación de precursor de tormenta SIR (Extraída de: Dynamics of the Electron Belts (Koskinen and Kilpua, 2022))

en forma de plasma durante explosiones y erupciones solares que viajan a través del espacio interplanetario ( $10^{15-16}g$  desde la baja corona solar)(Zhang and Low, 2005), tal como se ilustra en la Figura 2.6. Al alcanzar el campo magnético terrestre, estas eyecciones interactúan con la magnetosfera, energizándola y provocando a veces tormentas geomagnéticas. Durante su trayectoria, el viento solar puede alcanzar velocidades de 400–800 km/s, llegando a veces hasta 1000 km/s. Borovsky and Denton (2006) señalan que las tormentas con precursor ICME parecen ocurrir de manera aleatoria en el tiempo y tienden a ser más frecuentes durante el máximo de una fase solar. Además, son particularmente más geoefectivos para energizar el anillo de corriente y desencadenar tormentas geomagnéticas con índices  $D_{ST}$  más intensos en comparación con otros precursores de tormentas, como las SIR. Aunque estas tormentas son de corta duración, tienen el potencial de generar auroras intensas y provocar corrientes inducidas geomagnéticamente, lo que conlleva a un desplazamiento de electrones (Borovsky and Denton, 2006).



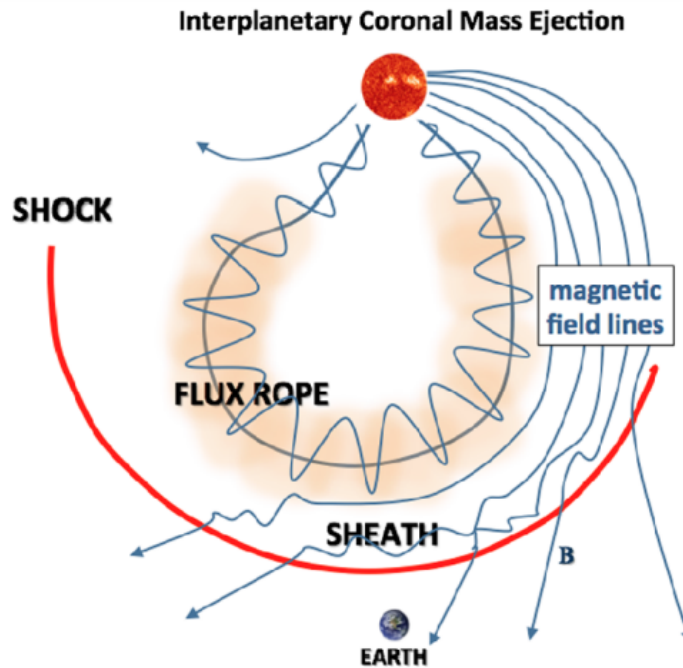


Figura 2.6: Representación de precursor de tormenta ICME (Extraída de Kilpua et al. (2017)).

Las tormentas geomagnéticas pueden tener un impacto significativo en la dinámica de la magnetosfera, especialmente en el anillo de corrientes, lo que podría impactar a los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo. Dependiendo del precursor de la tormenta geomagnética, la dinámica en la magnetosfera interna pueden variar. En la siguiente sección abordamos los efectos de las tormentas geomagnéticas en los electrones del cinturón de radiación externo.

### 2.3. Efectos de las tormentas geomagnéticas en el cinturón de radiación externo

Las tormentas geomagnéticas son eventos que tienen un gran impacto en el anillo de corrientes, pudiendo provocar cambios significativos de varios órdenes de magnitud en el flujo de electrones en el cinturón de radiación externo en cuestión de minutos, horas o días debido a las interacciones con el campo magnético terrestre (Yuan and Zong, 2012). Por ejemplo, los mecanismos de tormentas ICME y SIR que afectan el cinturón de radiación suelen durar

aproximadamente  $\sim 1$  día. La fase de recuperación para las tormentas ICME también es del orden de un día, mientras que en el caso de las SIR se extiende por 1-2 días, pero puede prolongarse hasta una semana (Chen et al., 2014). Estos tiempos pueden extenderse si las tormentas geomagnéticas son acompañadas por corrientes de alta velocidad (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>18,19</sup>. La aceleración de electrones no solo afecta el flujo de la magnetosfera interna, sino que también pueden alterar los dispositivos tecnológicos, lo que conlleva a consecuencias económicas (Bolduc, 2002; Cliver, 2006; Wrenn, 2009). Además, se ha observado que precursores ICME o SIR afectan de distinta manera a la tecnología espacial en sus órbitas o cargas inducidas (Borovsky and Denton, 2006; Chen et al., 2014).

Los cambios en el flujo de electrones en el cinturón de radiación externo pueden variar según diversas características del evento geomagnético, tales como, la actividad geomagnética, el tipo de tormenta geomagnética, la altitud de la población de electrones y la velocidad y densidad del viento solar, entre otros (Ukhorskiy et al., 2005, 2009). Por ejemplo, Reeves et al. (2003) encontraron que la magnitud del índice  $D_{ST}$ , que mide la intensidad de la tormenta geomagnética, no guarda una relación directa con la evolución del flujo de electrones relativistas. Esto sugiere que la intensidad de una tormenta geomagnética, ya sea moderada o intensa, no determina necesariamente cómo cambiará el flujo de electrones, motivando la investigación de otros parámetros. Por ejemplo, Tverskaya (2010) y Zhao and Li (2013) indican que el índice  $D_{ST}$  y la velocidad del viento solar ejercen un impacto en la propagación de los electrones hacia el interior del cinturón de radiación. Estos resultados destacan la importancia de considerar múltiples factores interrelacionados para comprender plenamente la dinámica de esta región crucial de la magnetosfera interna.

Se han realizado numerosos estudios utilizando datos de satélites para comprender la dinámica de los cinturones de radiación durante tormentas geomagnéticas. Reeves et al. (2003) indicaron tres categorías de variabilidad del flujo de electrones: disminución, aumento y ausencia de cambios. Aproximadamente el 19% de las tormentas geomagnéticas generan una disminu-

---

<sup>18</sup>Capítulo 1: Radiation Belts and Their Environment

<sup>19</sup>Capítulo 7: Dynamics of the Electron Belts

ción en el flujo de electrones, el 53 % resultan en un aumento, y el 28 % no muestra cambios notables en el flujo. Estudios posteriores, como el de Turner et al. (2013) realizaron un análisis similar utilizando datos de la misión THEMIS, obteniendo resultados bastante similares. A través de datos recopilados por la misión SAMPEX, Zhao and Li (2013) exploraron la evolución del flujo en relación con la altitud, obteniendo diferencias estadísticas en los resultados. La misión Van Allen Probes ha sido fundamental, proporcionando mediciones detalladas que han permitido analizar con datos in situ los cinturones de radiación. Estos satélites recopilaron datos de flujo de electrones y del campo magnético terrestre en diversas ubicaciones radiales, incluyendo regiones magnéticas ecuatoriales. Moya et al. (2017), utilizando datos de la misión Van Allen Probes, complementaron la estadística ya mencionada con un análisis que incorporó la influencia de parámetros físicos adicionales, como la energía de los electrones y su distancia a la Tierra.

Para cumplir el objetivo de esta tesis estudiamos las distintas fases de una tormenta geomagnética, ya que Murphy et al. (2018) encontraron que el flujo de electrones generalmente disminuye durante la fase principal de una tormenta y aumenta en la fase de recuperación. También clasificamos las tormentas geomagnéticas por el tipo de precursor y la altitud afectada, ya que estos parámetros influyen significativamente en la evolución de los electrones relativistas en el cinturón de radiación (Blake et al., 1997; Li et al., 2005; Pandya et al., 2019). Por ejemplo, Pandya et al. (2019) encontraron que el 70 % de los eventos no experimentaron mayor cambio en el flujo de electrones en  $L = 3$  para una energía de 3.4 MeV. Sin embargo, en  $L = 5$  y para una energía de 5.0 MeV, el 82 % de los eventos experimentaron cambios significativos. Asimismo, observaron, para el cinturón de radiación en  $L = 5$ , el 53 % de los eventos originados por SIR resultaron en un aumento del flujo de electrones, mientras que en el caso de los eventos de precursados por ICME, este aumento se produjo en un 30 % de las ocasiones. Los aumentos en el flujo de electrones en regiones internas del cinturón de radiación generalmente se asocian con tormentas de tipo ICME. Por otro lado, los incrementos en regiones externas tienden a vincularse con precursores de tipo SIR. Es importante mencionar que las tormentas ICME también pueden inducir una difusión radial hacia el exterior, lo que

puede resultar en una pérdida de electrones en regiones más externas del cinturón de radiación (Shprits et al., 2006; Pandya et al., 2019). Turner et al. (2019) investigaron la respuesta del cinturón de radiación externo a eventos impulsados por ICME, en donde sus resultados revelaron una disminución del flujo de electrones para energías sobre a 1 MeV y un aumento en regiones de baja altitud.

Es crucial investigar las condiciones geomagnéticas que determinan la variabilidad del cinturón de radiación o explicar por qué ocurre. Turner et al. (2019) profundizaron en este fenómeno y encontraron que la evolución de la energía de los electrones, tanto en el rango de decenas de keV como en el de MeV, varía de manera distinta durante una tormenta geomagnética. Este comportamiento está parcialmente relacionado con el tipo de precursor de tormenta y la fase en la que se encuentra. Además, otros estudios, como el de Kim et al. (2015), han demostrado que una tormenta geomagnética no es un requisito absoluto para la evolución de los electrones. Mientras que Antonova et al. (2018) identificaron que el índice AE (Auroral Electrojet, en inglés), el cual hace referencia a la actividad geomagnética por corrientes en la ionosfera, se posiciona actualmente como el mejor predictor para la aceleración de electrones, independientemente del tipo de tormenta. Estos hallazgos resaltan la complejidad y la diversidad de factores que contribuyen a la variabilidad en el cinturón de radiación externo y la importancia de comprenderlos en detalle.

La evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación está estrechamente vinculada a las características de las tormentas geomagnéticas. Los tipos de precursores de tormentas geomagnéticas desempeñan un papel fundamental en la variación del flujo de electrones en la magnetosfera interna, lo que afecta directamente a la comprensión de la dinámica del cinturón de radiación externo durante las distintas fases de una tormenta geomagnética. Comprender la dinámica de los anillos de Van Allen durante estos fenómenos es importante para proteger los dispositivos tecnológicos espaciales y terrestres. La evolución de los electrones en el cinturón de radiación externo es influenciada por la interacción onda-partícula, lo que estudiaremos en detalle en el próximo capítulo.

# Capítulo 3

## Ondas de Ultra Baja Frecuencia (ULF)

Las tormentas geomagnéticas son fenómenos complejos en los que el anillo de corriente se energiza y se generan y/o propagan ondas a través de la magnetosfera interna, pudiendo afectar (o no) la dinámica de los electrones (Gonzalez et al., 1994; Baker et al., 2018). En el cinturón de radiación externo, se propagan ondas en un amplio rango de frecuencias que pueden acelerar electrones mediante interacción onda-partícula; por ejemplo, las ondas ULF (1 mHz a 5 Hz) interactúan con electrones relativistas, mientras que las ondas VLF (0.1 kHz a 30 kHz) lo hacen con electrones de decenas a cientos de keV (Baker et al., 2018). Estas ondas pueden violar la tercera invariante adiabática de un plasma e inducir cambios en el flujo de partículas (Elkington et al., 2003; Georgiou et al., 2015). Para comprender este fenómeno, es relevante estudiar los modos de ondas presentes en la magnetosfera, sus características y cómo interactúan con las partículas de plasma.

Las ondas electromagnéticas desempeñan un papel importante en la interacción del plasma con la magnetosfera (Thorne, 2010). Las ondas pueden provocar variaciones en los campos eléctricos y magnéticos con los que interactúan las partículas, pudiendo afectar sus movimien-

tos (Chen, 1983)<sup>1</sup>. Los distintos modos de ondas se pueden generar por la interacción entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra, inestabilidades originadas por anisotropías del plasma y procesos locales en la plasmasfera, entre otros (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>2</sup>. En la Figura 3.1 se representa la ocurrencia de distintos modos de ondas que podemos encontrar en el plano ecuatorial de la magnetosfera, los cuales tienen interacciones con partículas específicas en cada región y aparecen según la actividad magnetosférica. Por ejemplo, las ondas ULF Pc4–Pc5 (1.7 mHz a 22 mHz) pueden originarse por interacciones internas y externas a la magnetosfera, acelerando electrones relativistas mediante difusión radial o interacción resonante (Zong et al., 2017). Las ondas VLF en el rango de 0.1 kHz a 10 kHz (VLF whistler chorus), se originan principalmente en regiones ecuatoriales fuera de la plasmasfera por anisotropías en la distribución de electrones y protones, y aceleran electrones de baja energía (decenas de keV) o los envían al cono de pérdida por dispersión (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>3,4</sup>. Las ondas EMIC (Electromagnetic Ion Cyclotron), coincidentes con el rango de frecuencias Pc1 (0.2 Hz a 5 Hz), también son originadas por anisotropías en la distribución de partículas (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>4</sup>. Estas ondas desempeñan un papel importante en la pérdida de electrones relativistas en la magnetosfera interna mediante dispersión y son importantes en la dinámica del anillo de corriente (Thorne, 2010). Las ondas de silbido (plasmaspheric hiss waves), aparecen en la plasmasfera durante tormentas geomagnéticas y son cruciales para la formación de la región entre el cinturón de radiación interno y externo (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>4</sup>.

El objetivo de esta tesis es investigar qué tan correlacionadas están las ondas ULF que se propagan en el cinturón de radiación externo con la dinámica de los electrones en esa región durante diferentes intensidades y precursores de tormentas geomagnéticas. Las ondas ULF, particularmente aquellas con frecuencias entre 1 mHz y 22.5 mHz, son especialmente relevantes debido a su capacidad para violar la tercera invariante adiabática de un plasma, ya que el periodo de la onda es similar al periodo del movimiento de deriva de los electrones,

---

<sup>1</sup>Capítulo 2: Single-Particle Motion

<sup>2</sup>Capítulo 5: Drivers and Properties of Waves in the Inner Magnetosphere

<sup>3</sup>Capítulo 4: Plasma Waves in the Inner Magnetosphere

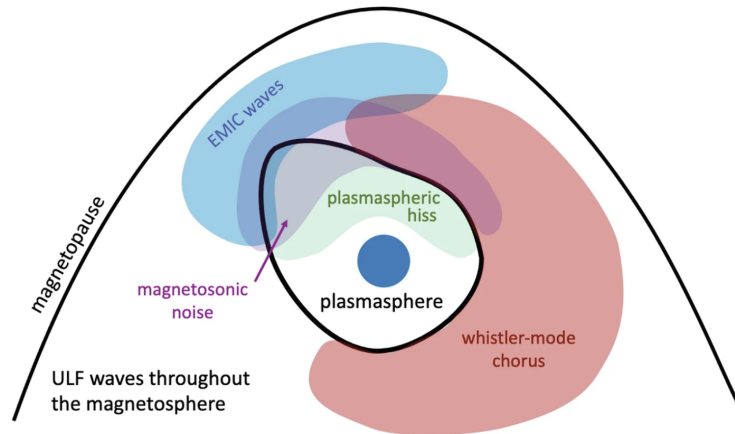


Figura 3.1: Ocurrencia de distintos modos de ondas en la magnetosfera terrestre. (Extraída de Koskinen and Kilpua (2022)<sup>3</sup>).

por lo que existe una fuerte correlación entre las ondas ULF con la dinámica del flujo de electrones (Mathie and Mann, 2001; O’Brien et al., 2001; Georgiou et al., 2018).

### 3.1. Ondas ULF Pc4 – Pc5

En el año 1950, durante los primeros estudios sobre la magnetosfera y la interacción entre el viento solar y el campo magnético terrestre, se midieron pulsaciones periódicas de 5 minutos utilizando magnetómetros, denominándolas Pc5, Pc por pulsaciones continuas y 5 por el intervalo de tiempo de repetición. Nuestro estudio se centra en ondas ULF en el rango Pc5, que corresponde a frecuencias entre 1.7 mHz a 7.5 mHz, las cuales pueden propagarse hasta altitudes de  $2 R_T$  (Georgiou et al., 2018) e influyen significativamente en la dinámica del cinturón de radiación cuando perduran en la fase de recuperación (O’Brien et al., 2001). Además, ampliamos nuestro análisis al rango de ondas ULF Pc4 (con frecuencias desde 7.5 mHz a 22.5 mHz) para investigar posibles diferencias significativas en su influencia sobre el flujo de electrones. El periodo de estas ondas, que alcanza hasta  $\sim 150$  s, puede coincidir con el periodo de deriva de los electrones relativistas de mayor energía o con los que se ubican en regiones más externas de los cinturones de radiación (Ver Tabla 3.1). Además, se ha demostrado que durante tormentas geomagnéticas las ondas ULF Pc4–Pc5 pueden propagarse

y resonar con los electrones del cinturón de radiación externo, afectando la evolución del flujo de electrones, tanto antes como después de estos eventos (Elkington et al., 1999, 2003; Ukhorskiy et al., 2005; Zong et al., 2017; Marchezi et al., 2022).

Las ondas ULF Pc4–Pc5 pueden originarse por interacciones internas y externas de la magnetosfera (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>4</sup>. Las fuentes externas incluyen la interacción entre el viento solar y la magnetosfera, a través de inestabilidades Kelvin-Helmoltz o mediante pulsos en la magnetopausa. Por otro lado, las causas internas pueden incluir inestabilidades en el anillo de corriente o dinámicas asociadas a las subtormentas. Las fuentes externas generan principalmente ondas con números de onda  $m$  pequeños, mientras que las fuentes internas suelen producir ondas con valores de  $m$  grandes (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>4</sup>. Murphy et al. (2018) encontraron que en regiones menores a  $8 R_T$  predominan valores de  $m$  positivos y menores que 20. El número de onda nos es relevante para la interacción resonante onda-partícula (ver Ecuación (3.1)).

La intensidad de las ondas ULF Pc5 muestran una fuerte correlación con la dinámica del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo (Mathie and Mann, 2001; O’Brien et al., 2001). Estudios han destacado que las ondas ULF de menor frecuencia, exhiben una mayor intensidad en la potencia de onda que las de mayor frecuencia (Zong et al., 2017; Zong, 2022). Además, los electrones energéticos tienden a fluctuar preferentemente en frecuencias que oscilan entre 2.2 mHz y 3.3 mHz (Liu and Zong, 2015), las que coinciden con el rango Pc5. O’Brien et al. (2001), demostraron que el aumento de la potencia de ondas ULF Pc5 guarda una fuerte correlación con el máximo flujo de electrones, especialmente durante la fase de recuperación de una tormenta geomagnética. Además, Zong (2022) señaló que la potencia de ondas ULF Pc5 juega un papel predominante en regiones con valores altos de  $L$ , tanto en los modos de ondas toroidales como poloidales. Mientras que Georgiou et al. (2018) revelaron que las ondas ULF Pc5 que se propagan hasta  $L = 4$  y persisten durante la fase de recuperación de una tormenta, provocan un aumento en el flujo de electrones con energías entre 1.5 MeV y 6 MeV. Es importante estudiar como la interacción onda-partícula, mediante

---

<sup>4</sup>Drivers and Properties of Waves in the Inner Magnetosphere



el análisis de los modos de ondas, es relevante en los procesos de aceleración de electrones y cómo afecta a la dinámica del cinturón de radiación externo.

## 3.2. Ondas ULF Pc4 – Pc5 en el cinturón de radiación externo

Las ondas ULF Pc4–Pc5 desempeñan un papel crucial en la energización de los electrones dentro del cinturón de radiación externo a través de difusión radial o interacción resonante (Elkington et al., 2003; Zong et al., 2017). Cuando la magnetosfera interactúa con el viento solar se propagan modos de ondas poloidales (compresionales) y toroidales hacia el interior (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>5</sup>. Estudios realizados con el satélite GOES han encontrado ondas ULF toroidales en el cinturón de radiación externo en alturas de  $L = 4.4$  (Zong et al., 2009). Estos hallazgos son relevantes para nuestro estudio, ya que la resonancia de deriva relacionada a los modos de onda ULF Pc4–Pc5 toroidales y poloidales juegan un rol importante en diferentes distancias radiales, en particular, en el cinturón de radiación externo (Elkington et al., 1999; Su et al., 2011; Zong et al., 2009; Hudson et al., 2004).

Las ondas en modo toroidal corresponden a ondas de Alfvén que perturban el campo eléctrico radialmente y el campo magnético azimutalmente. En contraste, las ondas en modo poloidal afectan el campo eléctrico en la dirección azimutal, paralela a la dirección de deriva de los electrones, y el campo magnético en la dirección radial. Las ondas en modo compresional, por su parte, alteran el campo magnético en la dirección paralela a este y el campo eléctrico en la dirección azimutal (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>6</sup>. En general, los valores bajos del número de onda  $m$  están asociados a ondas en modo toroidal, mientras que valores altos a modos poloidales (Elkington et al., 2003; Zong, 2022).

Las ondas ULF toroidales pueden acelerar significativamente a los electrones debido a la

---

<sup>5</sup>Capítulo 5: Drivers and Properties of Waves in the Inner Magnetosphere

<sup>6</sup>Capítulo 4: Plasma Waves in the Inner Magnetosphere

compresión del campo magnético, especialmente cuando este tiene una forma asimétrica; este efecto se mantiene incluso en el caso de un campo magnético dipolar puro (Ukhorskiy et al., 2005). La resonancia con modos poloidales es más eficiente en comparación con el modo toroidal para valores bajos de  $m$ , mientras que para valores elevados de  $m$ , las ondas toroidales pueden tener un impacto significativo (Li et al., 2021). El número de onda y la ubicación en la que ocurre la interacción son importantes para entender cómo afectan a las partículas en diferentes niveles de energía (Zong et al., 2009). La resonancia predominante para los electrones de alta energía ocurre cuando  $m$  es bajo y solo se considera la resonancia de deriva, excluyendo la de rebote (Zong, 2022).

La interacción onda-partícula es fundamental para la dinámica de los electrones en el cinturón de radiación externo. Las ondas ULF toroidales y poloidales están estrechamente relacionadas con la aceleración de partículas y el aumento del flujo de electrones, causando variaciones en sus niveles de energía. Por esta razón, profundizamos en la energización de los electrones cinturón de radiación externo por medio de ondas.

### **3.3. Energización por interacción onda-partícula**

Varios estudios han demostrado que los procesos ondulatorios están relacionados con la aceleración de partículas en el cinturón de radiación externo (Tan et al., 2004; Millan and Baker, 2012; Jaynes et al., 2015). Las ondas pueden propagarse a diferentes altitudes dependiendo de las características de las tormentas geomagnéticas, afectando así a distintas poblaciones de partículas (Borovsky and Denton, 2006; Ukhorskiy et al., 2005; Georgiou et al., 2018). El rol de las ondas en la aceleración de los electrones en el cinturón de radiación externo puede explicarse a través de distintos mecanismos. Por un lado, existen los procesos de interacción resonante, donde la frecuencia del movimiento de los electrones coincide con la frecuencia de las ondas. Por otro lado, se ha descubierto que las ondas ULF desempeñan un papel importante en la difusión radial, energizando a los electrones radialmente debido a las va-

riaciones de los campos eléctricos y magnéticos de la magnetosfera (Thorne, 2010). Además, la presencia de ondas ULF al perturbar el campo magnético y/o eléctrico puede favorecer los procesos de convección magnetosférica desde la magnetocola hacia la ionosfera, lo que genera variaciones en el flujo de electrones (Li et al., 2020). Comprender los mecanismos de aceleración a través de la interacción de ondas ULF con electrones es complejo, ya que estos son procesos multifactoriales.

El modo de onda que ejercerá interacción resonante dependerá del tipo de movimiento del electrón y de la ubicación en el cinturón de radiación externo. En la Tabla 3.1 podemos ver los tiempos de giro ( $\tau_L$ ), rebote ( $\tau_b$ ) y deriva ( $\tau_d$ ) de un electrón en distintas alturas. Por ejemplo, Elkington et al. (1999) investigaron los procesos de resonancia de deriva con las ondas ULF, mientras que Mager and Klimushkin (2005) estudiaron la interacción con la resonancia de rebote en relación con las ondas de Alfvén. Sin embargo, para cumplir con el objetivo de esta tesis, al trabajar con electrones relativistas, solo consideraremos la resonancia de deriva por ondas ULF Pc4–Pc5. Esta condición resonante puede acelerar las partículas y llevar a violaciones de la tercera invariante adiabática de un plasma, lo que implica ganancia o pérdida de energía de los electrones en los cinturones de Van Allen (Zong et al., 2009, 2017; Georgiou et al., 2018).

<b>L-shell</b>	<b>Parameter</b>	<b>10 keV</b>	<b>100 keV</b>	<b>1 MeV</b>	<b>5 MeV</b>	<b>10 MeV</b>
L = 2	$\tau_L$	9.71 $\mu$ s	11.4 $\mu$ s	28.1 $\mu$ s	103 $\mu$ s	196 $\mu$ s
	$\tau_b$	0.64 s	0.23 s	0.14 s	0.13 s	0.13 s
	$\tau_d$	44.2 h	3.65 h	36.9 min	8.09 min	4.19 min
L = 4	$\tau_L$	0.08 ms	0.09 ms	0.26 ms	0.82 ms	1.57 ms
	$\tau_b$	1.27 s	0.46 s	0.27 s	0.26 s	0.26 s
	$\tau_d$	22.1 h	1.83 h	18.5 min	4.05 min	2.09 min
L = 6	$\tau_L$	0.26 ms	0.31 ms	0.76 ms	2.88 ms	5.29 ms
	$\tau_b$	1.91 s	0.69 s	0.41 s	0.38 s	0.38 s
	$\tau_d$	12.3 h	1.22 h	12.3 min	2.70 min	1.40 min

Tabla 3.1: Periodo de movimiento de giro, rebote y deriva de un electrón a distintas distancias radiales y para distintas energías (Tabla extraída de Capítulo 2: Charged Particles in Near-Earth Space (Koskinen and Kilpua, 2022)).

Para el estudio de la interacción onda-partícula en el cinturón de radiación externo, consideramos las ecuaciones de onda MHD, que nos permiten analizar las fluctuaciones originadas

por la interacción de un fluido MHD y un campo magnético uniforme. Dado que trabajamos con un plasma frío y magnetizado que exhibe un comportamiento colectivo, tal como indicamos en el Capítulo 2, podemos aplicar este análisis (Kivelson, 2006)<sup>7</sup>. A través de la teoría de ondas MHD, estudiamos la propagación de perturbaciones paralelas y perpendiculares al campo magnético de fondo en el plasma del cinturón de radiación externo. Las ecuaciones de onda MHD nos ofrecen dos modos de onda como soluciones. El primero es el modo de Alfvén (shear Alfvén wave, en inglés), que propaga energía paralelamente al campo magnético de fondo, origina fluctuaciones perpendiculares al campo magnético de fondo y se relaciona con el modo toroidal. El segundo es el modo de onda rápido (fast mode wave, en inglés), que propaga energía en una dirección arbitraria y puede generar cambios en la presión y densidad del plasma, así como también, fluctuaciones paralelas y perpendiculares al campo magnético de fondo. Este modo se relaciona con el modo poloidal y compresional (Kivelson, 2006; Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>7,8</sup>. A través de las fluctuaciones del campo magnético de fondo, podemos cuantificar la ocurrencia de ondas ULF Pc4–Pc5 en un plasma magnetizado y compararla con la evolución del flujo de electrones del plasma durante una tormenta geomagnética.

### 3.4. Fundamento teórico de resonancia

Múltiples estudios han mostrado que los electrones y las ondas ULF pueden estar bajo interacción de resonancia onda-partícula (Elkington et al., 1999, 2003; Zhu et al., 2020). Entre las posibles interacciones, en el caso de ondas ULF con frecuencias entre 1 mHz y 22.5 mHz y electrones relativistas, la más relevante es la resonancia de deriva. Por lo tanto, usando la condición de resonancia de deriva utilizada por Da Silva et al. (2019), Southwood and Kivelson (1981), Zhu et al. (2020), entre otros, podremos identificar que frecuencia de onda tiene una interacción resonante con los electrones relativistas con diferentes niveles de energía. En

---

<sup>7</sup>Capítulo 11: Pulsations and Magnetohydrodynamic Waves

<sup>8</sup>Capítulo 4: Plasma Waves in the Inner Magnetosphere

particular, la condición de resonancia de deriva satisface la siguiente ecuación:

$$\omega - m\omega_d = N\omega_b \quad (3.1)$$

con  $\omega$  la frecuencia angular de onda,  $\omega_d$  la frecuencia de deriva promediada por rebote de la partícula de este a oeste y  $m$  el número de onda azimutal. Además,  $\omega_b$  es la frecuencia de rebote de la partícula y  $N$  corresponde al número de longitud de onda azimutal que la partícula se desplaza en un ciclo de rebote. Sumado a lo propuesto en Zhu et al. (2020), promediando en el ángulo de pitch ecuatorial entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , tenemos que la frecuencia de deriva para la partícula esta dada por:

$$\omega_d = -\frac{3WL^*}{qB_E R_E^2} \left( 0.7 + \frac{0.6}{\pi} \right), \quad (3.2)$$

con  $W$  y  $q$  la energía relativista y la carga del electrón respectivamente.  $L^*$  es calculado de la tercera invariante adiabática,  $B_E$  es el campo magnético en la superficie de la Tierra y  $R_E$  es el radio de la Tierra.

En el caso de los electrones relativistas, el periodo de deriva está en el orden de algunos minutos, mientras que el movimiento de rebote es de unos pocos segundos. Por lo tanto, la resonancia entre los electrones relativistas y las ondas ULF en el rango Pc4–Pc5 es dominado por el movimiento de deriva (Kokubun et al., 1977) y el movimiento de rebote se puede ignorar (Zhu et al., 2020). Por simplicidad, y continuando con estudios previos de Southwood and Kivelson (1981), Elkington et al. (1999), Murphy et al. (2018) y Da Silva et al. (2019), en la Ecuación (3.1) consideraremos  $N = 0$ . En cuanto al valor de  $m$ , las perturbaciones en el modo azimutal están tradicionalmente asociadas con los modos toroidales de las ondas, las cuales generalmente tienen bajos valores de  $m$  (Yeoman et al., 2012). Por lo cual, en nuestro caso consideramos valores para  $m$  entre 1 y 10, ya que presentan un factor dominante y relevante para la interacción de ondas ULF Pc5 y electrones relativistas (Kokubun et al., 1977; Ukhorskiy et al., 2005). Balasis et al. (2016) y Elkington et al. (2013) han mostrado que la interacción de resonancia más importante ocurre para  $m \leq 3$ . En particular, observaron que

$m = 1$  es dominante durante la fase de recuperación del cinturón de radiación durante una tormenta geomagnética, mientras que  $m = 2$  y  $m = 3$  están presente durante la fase principal de la tormenta geomagnética. Dichos resultados muestran consistencia con lo obtenido por Murphy et al. (2018). Para esta tesis, consideramos corroborar la resonancia onda partícula con valores de  $m \leq 10$ , los cuales corresponden a los modos dominantes en el espectro de frecuencia de ondas utilizados y relevante para los electrones relativistas.

En el próximo capítulo, exploramos la metodología utilizada para investigar la dinámica del cinturón de radiación externo durante las tormentas geomagnéticas. Nos enfocamos en establecer correlaciones entre la presencia de ondas de ultra baja frecuencia y la evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo durante las tormentas geomagnéticas. Para lograrlo, examinamos una serie de parámetros, como la intensidad de las tormentas, tipos de precursores de tormentas y los patrones de evolución del flujo. En el siguiente capítulo, también detallamos el tratamiento de los datos, abarcando tanto el flujo de electrones relativistas como la detección de ondas a través del campo magnético terrestre, utilizando los datos obtenidos por la misión Van Allen Probes.

# Capítulo 4

## Instrumentación, datos y metodología

En este capítulo, proporcionamos información detallada sobre la misión Van Allen Probes y la instrumentación utilizada para la recopilación de datos necesarios para abordar la problemática enmarcada en la relación entre la ocurrencia de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones relativistas durante tormentas geomagnéticas. Describimos también en este capítulo la metodología para el tratamiento de datos llevado a cabo para obtener correlaciones y analizar los resultados.

### 4.1. Misión Van Allen Probes

Analizamos los flujos de electrones en el cinturón de radiación utilizando datos in situ recolectados por la misión Van Allen Probes (Mauk et al., 2013), la cual se mantuvo en órbita entre los años 2012 y 2019. Esta misión constaba de dos satélites idénticos, RBSP-A y RBSP-B, diseñados para medir datos de electrones, protones, otras especies de iones, campos magnéticos y ondas en los cinturones de radiación. En la Figura 4.1 observamos el satélite RBSP con sus instrumentos.

Estos satélites seguían una trayectoria en órbita elíptica a transferencia geoestacionaria con

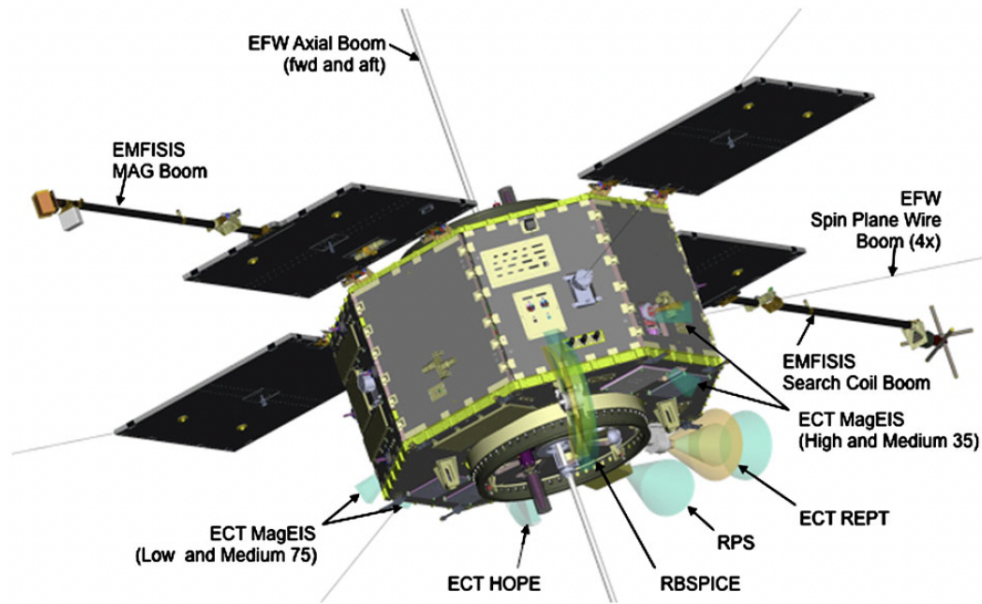


Figura 4.1: Instrumentos de los satélites de la misión Van Allen Probes. Extraída de Stratton et al. (2014).

una inclinación de  $10^\circ$  respecto a la eclíptica, como se muestra en la Figura 4.2. El periodo de traslación alrededor de la Tierra era de aproximadamente 9 horas, con un perigeo de  $\sim 1.1 R_T$  y un apogeo de  $\sim 5.8 R_T$ . Esta misión proporcionó información detallada sobre los cinturones de radiación, gracias a la implementación de dos satélites iguales que siguieron trayectorias casi idénticas. Esto permitió medir simultáneamente dos regiones de los cinturones de radiación, cuantificando los cambios espaciales y temporales. Con estas características se pueden realizar estudios locales y/o globales sobre los cinturones de radiación.

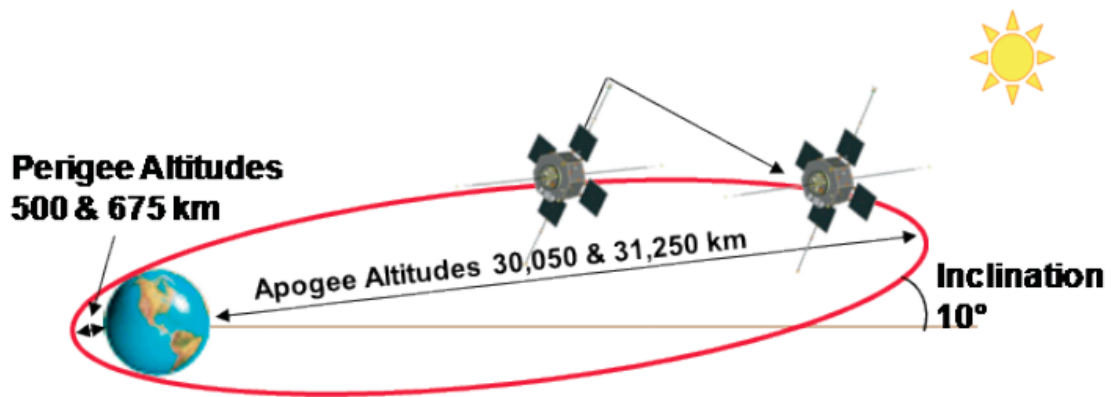


Figura 4.2: Trayectoria de la misión Van Allen Probes. Modificada de Stratton et al. (2014).



## 4.2. Instrumentación

Para estudiar los flujos de electrones en el cinturón de radiación externo, utilizamos los datos recopilados por el Telescopio Relativista Electrón-Protón (Relativistic Electron-Proton Telescope, REPT (Baker et al., 2013b)) y el Espectrómetro de Iones Magnéticos (Magnetic Electron Ion Spectrometer, MagEIS (Blake et al., 2013)). Estos instrumentos formaron parte del conjunto de partículas energéticas, composición y plasma térmico (Energetic particle, Composition, and Thermal plasma, ECT (Spence et al., 2013)). Mientras que para el estudio de la ocurrencia de ondas utilizamos los datos de campo magnético obtenidos del conjunto de instrumentos de Campo Eléctrico y Magnético y Ciencia Integrada (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science, EMFISIS (Kletzing et al., 2013; Blake et al., 2013)).

### 4.2.1. MagEIS

MagEIS (Figura 4.3) tuvo como objetivo medir el flujo de electrones, protones y diferentes especies de iones en el cinturón de radiación. En nuestro caso, nos centramos en el flujo de electrones medido en unidades de  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{keV}^{-1}$ . MagEIS estaba compuesto por cuatro espectrómetros magnéticos en cada satélite, diseñados para cubrir electrones en diferentes rangos de energía: uno para energías bajas (20 keV a 240 keV), dos para energías medias (80 keV a 1200 keV), y uno para energías altas (800 keV a 4800 keV). El espectrómetro de energía baja, uno de energía media y el de energía alta estaban colocados a  $75^\circ$  respecto al eje de giro del satélite, mientras que el segundo espectrómetro de energía media estaba a  $35^\circ$  respecto al mismo eje. Los electrones ingresaban a través de un colimador que definía el campo de visión de  $10^\circ \times 20^\circ$  y la apertura de entrada era de  $2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  para las cámaras de energía baja y media, y de  $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  para las cámaras de energía alta. El flujo de electrones era medido en detectores de silicio dentro de cámaras con un campo magnético uniforme. Este campo magnético provocaba que los electrones giraran  $180^\circ$ , con un radio de

giro dependiente de su velocidad de llegada, permitiendo así que impactaran en detectores específicos para cuantificar su energía. El campo magnético de las cámaras era de 550 G, 1600 G y 4800 G para las energías baja, media y alta respectivamente. El factor geométrico (o eficiencia) de MagEIS variaba en función de la energía, desde  $0.04 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{keV}$  hasta  $8.26 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{keV}$ .

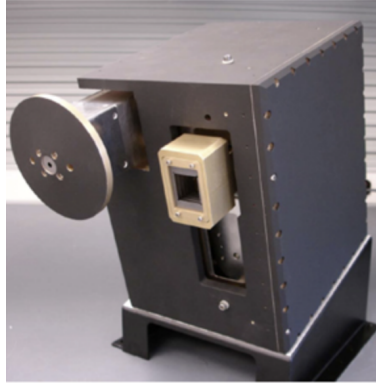


Figura 4.3: Instrumento ECT-MagEIS. Extraída de Blake et al. (2013).

Utilizamos 8 canales de energía entre 470 keV y 1728 keV, que corresponden a la población de electrones relativistas. El flujo de electrones lo obtuvimos con una resolución temporal de  $\sim 11$  segundos. Para cada tiempo y en cada canal de energía, obtuvimos datos distribuidos a distintos ángulos de pitch de las partículas, abarcando entre  $8^\circ$  y  $172^\circ$ .

#### 4.2.2. REPT

REPT (Figura 4.4) tenía como objetivo estudiar el flujo de electrones desde 1.6 MeV hasta más de 19 MeV, y de protones desde 17 MeV hasta más de 100 MeV en los cinturones de radiación. En nuestro caso, nos centramos en el estudio del flujo de electrones, que se mide en unidades de  $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$ . REPT estaba compuesto por una pila de detectores de estado sólido. Se utilizaron detectores de silicio con diámetros de 20 mm (dos frontales) y 40 mm (siete posteriores), con esta estructura, y para poder medir flujo de electrones (y protones) energéticos en regiones internas y externas de los cinturones de radiación, se fijó un factor geométrico de  $0.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ , dado por un campo de visión cónico de  $32^\circ$ . Estos detectores

generan una corriente eléctrica proporcional a la energía de la partícula que los impacta. Además, contaba con un colimador de berilio que excluía partículas de energías más bajas de lo previsto y una carcasa que protegía los sensores, evitando la radiación penetrante y la radiación de frenado (Bremsstrahlung). REPT proporcionaba una diferencia de energía  $\Delta E/E = 0.25$  para 11 canales de energía. Apuntaba perpendicularmente al eje de giro de la nave espacial, permitiendo medir en todos los ángulos de pitch para casi todas las direcciones del campo magnético (Baker et al., 2013b).

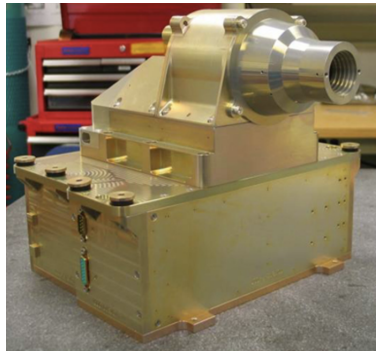


Figura 4.4: Instrumento ECT-REPT. Extraída de Baker et al. (2013b).

Utilizamos 6 canales de energía que van desde 1.8 MeV hasta 5.2 MeV, los cuales corresponden a la población de electrones ultra relativistas. No se consideraron energías superiores debido a la escasez de datos disponibles para nuestro propósito. Los datos de flujo de electrones utilizados tienen una resolución temporal de  $\sim 11$  segundos. Además, para cada tiempo y en cada canal de energía, obtuvimos datos distribuidos en distintos ángulos de pitch de las partículas, que van desde  $5^\circ$  y  $175^\circ$ .

### 4.2.3. EMFISIS

EMFISIS está compuesto por dos magnetómetros: MAG, que es una compuerta de flujo triaxial con tres sensores ortogonales para el estudio de campo magnético, y MSC, una bobina captadora de CA diseñada para el estudio de ondas de plasma. Estos instrumentos estaban situados a 4 metros del centro de la nave para minimizar la interferencia con los sistemas

de la nave. EMFISIS proporcionó mediciones de ondas de campos eléctricos y magnéticos en el rango de 10 Hz a 400 kHz, y midió campos magnéticos desde 0.008 nT hasta 65536 nT, lo permitió medir el campo magnético terrestre en el perigeo de la órbita de la nave. Además, tiene una precisión de 0.1 nT. El ruido de fondo para la banda de frecuencia de 0.001 Hz a 10 Hz no supera los 0.01 nT<sup>2</sup>/Hz, lo que es adecuado para identificar fenómenos de campo magnético de interés. El campo magnético se midió por la inducción de corrientes eléctricas que generaron señales de voltaje proporcionales a la intensidad del campo magnético detectado. Estos datos fueron procesados por un convertidor analógico-digital (A/D) y la caja receptora (MEB), que gestionan las mediciones (Kletzing et al., 2013).

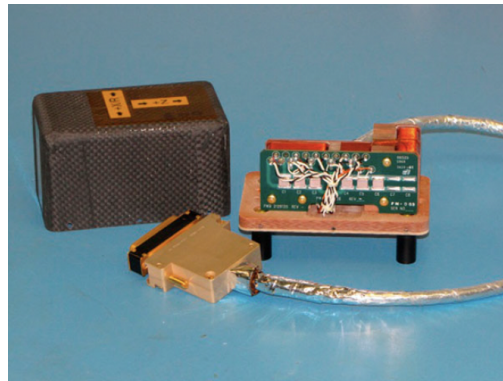


Figura 4.5: Instrumento EMFISIS MAG utilizado para medir datos de campo magnético. Extraída de Kletzing et al. (2013).

Utilizamos datos de campo magnético obtenidos con una resolución temporal de 4 segundos en coordenadas GSM (Geocentric Solar Magnetospheric). En estas coordenadas,  $\hat{x}$  indica la dirección Tierra-Sol,  $\hat{z}$  sigue la dirección del dipolo magnético, e  $\hat{y}$  corresponde a  $\hat{x} \times \hat{z}$ . El instrumento MAG se puede observar en la Figura 4.5.

## 4.3. Tratamiento de datos

### 4.3.1. Flujo de electrones

Los datos de flujos de electrones fueron procesados de la misma manera para las mediciones de REPT y MagEIS. En este estudio nos enfocamos en la cantidad de partículas en el cinturón de radiación externo, por lo que promediamos el flujo de electrones sobre todos los ángulos de radiación de pitch. Para esto creamos una función de flujo  $J$ , tal que,  $J(E,t) = \langle J(E,t,\alpha) \rangle_\alpha$ , con  $E$  la energía del electrón,  $t$  el tiempo y  $\langle \rangle_\alpha$  el promedio sobre los ángulos de pitch. Además, los límites del cinturón de radiación externo los fijamos para  $3.1 \leq L^* \leq 6.0$ .

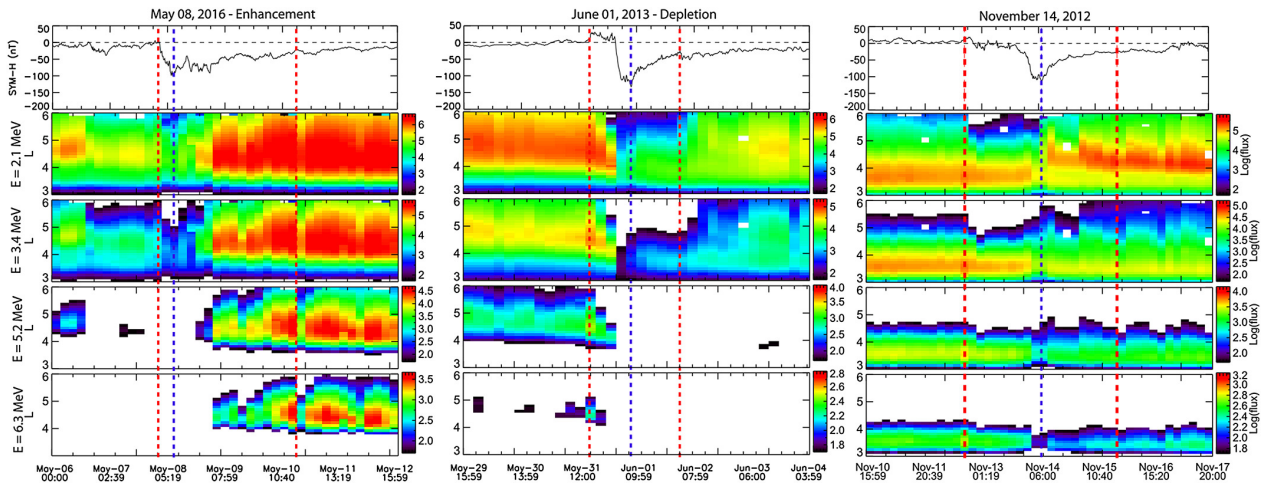


Figura 4.6: Flujo de electrones en función de  $L$  y el tiempo para tres eventos geomagnéticos distintos. Izquierda: 8 de mayo de 2016 para un evento que aumentó el flujo. Centro: 1 de junio de 2013 para un evento que generó una disminución del flujo. Derecha: 14 de noviembre de 2013 para un evento que no tuvo cambios en el flujo. La línea vertical izquierda roja indica el comienzo de la tormenta geomagnética. La línea vertical azul indica el mínimo índice SYM-H. La línea derecha roja indica el término de la tormenta geomagnética (Extraída de Moya et al. (2017)).

Para cada canal de energía, los datos de flujo de electrones fueron agrupados en escalas espaciales con  $\Delta L^* = 0.1$  y escalas temporales  $\Delta t = 6$  h. Esto con el fin de dar cobertura completa a una órbita con la mayor cantidad de datos. Además, todas las mediciones al interior de estos intervalos fueron promediadas. Esta metodología fue adoptada de lo realizado por Moya et al. (2017), mostrado en la Figura 4.6. En los paneles superiores se muestra

el índice SYM-H, que representa la actividad geomagnética. Los cuatro paneles siguientes muestran el flujo de electrones para 2.1 MeV, 3.4 MeV, 5.2 MeV y 6.3 MeV respectivamente. Para eliminar cualquier posible efecto no físico de los satélites, descartamos los datos del flujo de electrones para valores inferiores a  $J_{\min} = 50 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$  para todas las energías. Este criterio se adoptó de lo realizado por Claudepierre et al. (2015) y Moya et al. (2017).

### 4.3.2. Campo magnético - Ocurrencia de ondas

Para investigar la ocurrencia de las ondas ULF en el cinturón de radiación externo durante tormentas geomagnéticas, utilizamos los datos de campo magnético. Calculamos la potencia magnética para cualquier rango de frecuencias entre la banda de 1 mHz a 22.5 mHz, correspondientes al rango de frecuencia de ondas ULF Pc4 y Pc5. Este análisis lo realizamos tanto para las fluctuaciones paralelas como perpendiculares respecto al campo magnético de fondo. Para obtener la potencia magnética de onda, calculamos la traza de la matriz de densidad espectral de potencia para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares, denotadas como  $PSD_{\parallel}$  y  $PSD_{\perp}$  respectivamente. Consideramos la frecuencia  $f = 1/T$ , donde  $T$  es el periodo de onda. Para capturar el espectro de frecuencias ULF, seleccionamos intervalos de tiempo de 1200 segundos (20 minutos) para los datos de campo magnético obtenidos por EMFISIS, que tiene una resolución de 4 segundos, correspondiendo esto a 300 datos. La frecuencia mínima que podemos obtener para captar el rango ULF es  $f = 0.83 \text{ mHz}$ , lo que corresponde a un periodo máximo de 1200 s. Para determinar el periodo mínimo de una onda, necesitamos al menos tres puntos. En nuestro caso, esto equivale a considerar tres datos, equivalente a 8 segundos. Con un periodo de 8 s, podemos calcular que la frecuencia máxima es  $f = 125 \text{ mHz}$ . Esto nos entrega un espectro de frecuencias entre 0.83 mHz y 125 mHz, con intervalos de 0.83 mHz. Estos intervalos de 20 minutos para los datos de campo magnético se realizaron cada 6 minutos utilizando el método de ventana móvil para aumentar la cantidad de datos y, en consecuencia, el número total de cálculos. Para cada serie de tiempo de 20 minutos,

calculamos el campo magnético de fondo como  $\mathbf{B}_0 = \langle \mathbf{B}_i \rangle_t$ , donde el subíndice  $i$  denota el paso de tiempo en la serie. Luego, determinamos las variaciones del campo magnético como  $\delta\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_i - \mathbf{B}_0 = \delta\mathbf{B}_{i\parallel} + \delta\mathbf{B}_{i\perp}$ . Las variaciones de las componentes paralelas y perpendiculares al campo magnético de fondo son calculadas como:

$$\delta\mathbf{B}_{i\parallel} = (\delta\mathbf{B}_i \cdot \hat{b}_0)\hat{b}_0, \quad \delta\mathbf{B}_{i\perp} = (\mathbb{I} - \hat{b}_0\hat{b}_0)\delta\mathbf{B}_i, \quad (4.1)$$

con  $\hat{b}_0 = \mathbf{B}_0/\|\mathbf{B}_0\|$  el vector unitario indicando la dirección magnética promedio.

Para obtener el espectro de frecuencia asociado, es necesario eliminar la tendencia global y hacer que las series de tiempo sean periódicas en los bordes para poder calcular la Transformada de Fourier y trabajar en el dominio de frecuencias. Por lo tanto, llevamos a cabo un proceso de eliminación de tendencia, como se muestra en la Fig. 4.7(f). Específicamente, realizamos los siguientes pasos: i) calculamos la regresión lineal para las variaciones del campo magnético paralelo y perpendicular, que se obtiene en la Ecuación (4.1), ii) restamos los 20 minutos de datos de campo magnético  $\delta\mathbf{B}_{i\parallel,\perp}$  con su respectiva línea de tendencia. A continuación, buscamos la periodicidad de la serie de tiempo y aplicamos una reducción gradual en los bordes utilizando una ventana de Tukey con un factor coseno al 10% de los datos. Esto corresponde a suavizar los primeros y últimos 15 datos de la serie. Así, nos aseguramos que la serie de tiempo sea periódica en los bordes. Un resultado de este proceso se observa en la Fig. 4.7(f). Realizado lo anterior, procedemos a calcular la Transformada de Fourier sobre los datos. Calculamos  $\mathcal{B}_{\parallel} = \mathcal{F}(\delta\mathbf{B}_{i\parallel})$  y  $\mathcal{B}_{\perp} = \mathcal{F}(\delta\mathbf{B}_{i\perp})$ , correspondientes a las fluctuaciones paralelas y perpendiculares del campo magnético en el dominio de Fourier. Finalmente, para obtener las matrices  $PSD_{\parallel,\perp}$  (en unidades de  $\text{nT}^2/\text{Hz}$ ), calculamos:

$$PSD_{\parallel,\perp} = \mathcal{B}_{i\parallel,\perp} \otimes \mathcal{B}_{i\parallel,\perp}^* \quad (4.2)$$

La potencia de onda magnética asociada a las fluctuaciones paralelas y perpendiculares se calcula como  $\text{Tr}(PSD_{\parallel,\perp})$ , donde el operador  $\text{Tr}$  indica la traza de un 3 por 3 matriz.

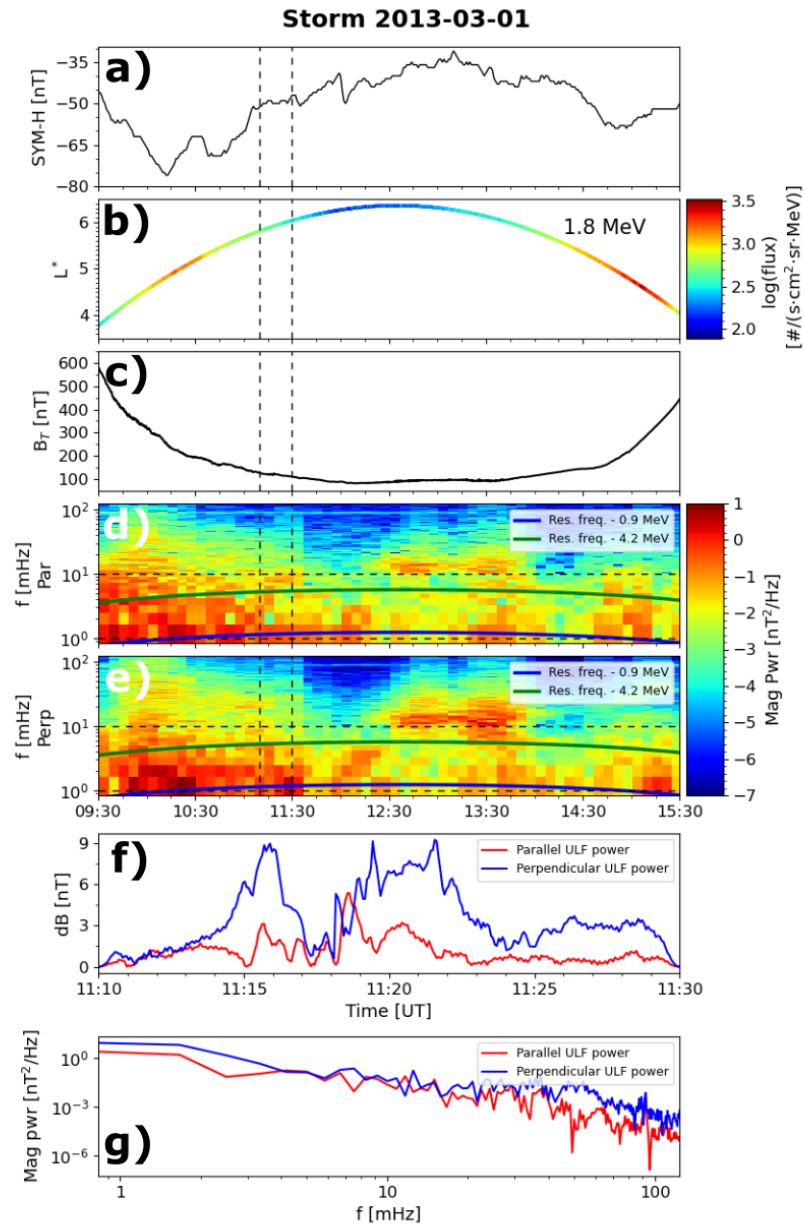


Figura 4.7: Datos obtenidos desde Van Allen Probes REPT y EMFISIS para un extracto de la tormenta geomagnética de 1 de marzo de 2013. a) Índice SYM-H. b) Órbita de RBSP-A y el flujo de electrones para 1.8 MeV. c) Magnitud del campo magnético. d) Potencia magnética de ondas ULF respecto a fluctuaciones paralelas al campo magnético de fondo. e) Lo mismo que d) pero para potencia de onda perpendicular. f) Fluctuaciones del campo magnético para un intervalo de 20 minutos. g) Potencia magnética de las fluctuaciones paralelas (azul) y perpendiculares (rojo) al campo magnético de fondo como función de la frecuencia para el periodo mostrado en (f). Las líneas verticales negras representan el tiempo considerado en la Figura 5.1 f). Las líneas negras horizontales representan el rango de frecuencia de onda considerado. Las líneas verdes y azules indican la interacción resonante dada por la Ecuación (3.1).

El proceso descrito anteriormente nos permitió obtener el espectro de frecuencia entre 1



mHz y 125 mHz. La marca de tiempo para cada frecuencia corresponde al promedio de 20 minutos de los datos. A modo de ejemplo, la Figura 4.7(d), (e) y (g) muestra la potencia de onda para el espectro ULF en fluctuaciones paralelas y perpendiculares respecto al campo magnético. Es relevante destacar que durante maniobras, RBSP-A y RBSP-B exhiben un ruido de fondo debido a la resonancia en 3 mHz, lo cual también afecta la señal en 4.2 mHz. Para reducir los efectos de fenómenos no físicos, filtramos el ruido considerando la razón entre  $\log(f_i)/\log(f_{i-1})$  y  $\log(f_{i+1})/\log(f_i)$ , donde  $f_i$  representa la potencia magnética de onda a 3.3 mHz o 4.2 mHz, mientras que  $f_{i-1}$  y  $f_{i+1}$  representan la potencia magnética de onda asociada a la frecuencia inmediatamente menor o mayor al ruido de fondo, respectivamente. Si esta razón es mayor que 8, reemplazamos  $\log(f_i)$  por un promedio entre  $\log(f_{i-1})$  y  $\log(f_{i+1})$ . Luego, obtenemos  $\log^{-1}$  del promedio. Un ejemplo de este procedimiento se puede observar en la Figura 4.7(g), donde representamos la potencia de onda para el espectro ULF asociado a las fluctuaciones paralelas y perpendiculares después de eliminar el ruido de fondo. Este ejemplo corresponde a la misma serie de tiempo representada en la Figura 4.7(f). Mediante esta metodología, obtuvimos la potencia magnética de ondas asociadas a los distintos rangos de frecuencias para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares relativas al campo magnético de fondo, calculadas cada 6 minutos. Este proceso lo aplicamos sobre períodos de 10 días para cada tormenta geomagnética considerada en el estudio, permitiéndonos visualizar el transporte de energía por las ondas ULF a través de todos los segmentos de órbitas.

De manera similar al flujo de electrones, los datos de potencia magnética de onda ULF fueron agrupados en escalas temporales  $\Delta t = 6$  h y espaciales con  $\Delta L^* = 0.1$ , donde todas las mediciones al interior de estos intervalos fueron promediadas. Esto lo realizamos considerando la potencia magnética entre  $4.0 \leq L^* \leq 6.0$ . No consideramos menores valores de  $L^*$  para evitar grandes gradientes de campo magnético. En la siguiente sección, detallamos cómo definimos las distintas fases de una tormenta geomagnética y cómo calculamos las correlaciones entre la ocurrencia de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones. Este cálculo se llevó a cabo de la misma manera tanto para los resultados obtenidos en el Capítulo 5 como para el Capítulo 6.

## 4.4. Metodología

Para nuestro trabajo, queremos cuantificar la correlación entre la ocurrencia de ondas ULF Pc4–Pc5 y la evolución del flujo de electrones relativistas en el cinturón de radiación externo ( $3.1 \leq L^* \leq 6.0$ ) durante las diferentes fases de una tormenta geomagnética. Escogimos 101 tormentas geomagnéticas que ocurrieron entre enero de 2013 y noviembre de 2018. Esta base de datos de tormentas geomagnéticas utiliza la de Moya et al. (2017), y usando los mismos criterios, donde se consideraron eventos con un índice SYM-H inferior a  $-50$  nT, la extendimos hasta el final del 2018. La lista completa de eventos se encuentra disponible en el Apéndice A. Analizamos el flujo de electrones en un rango de energías que va desde los 470 keV hasta los 5.2 MeV, que corresponden a la población de electrones relativistas y ultra relativistas (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>1</sup>. Mientras que, el rango de frecuencias considerado para las ondas ULF abarcan desde 1 mHz hasta 22.5 mHz, correspondiente a los rangos Pc4 y Pc5 (Koskinen and Kilpua, 2022)<sup>2</sup>

La Figura 4.8 presenta ejemplos del flujo de electrones y potencia magnética de onda ULF para la tormenta geomagnética del 20 de abril de 2018. Marcamos tres líneas verticales que indican momentos claves en el periodo de una tormenta geomagnética. Este criterio se adoptó de lo realizado por Moya et al. (2017). Indicamos el comienzo de una tormenta geomagnética (línea izquierda), caracterizado por una gran disminución del índice SYM-H o un rápido incremento en el índice SYM-H y el fin de la tormenta o la recuperación del campo magnético, que coincide con la recuperación del 80% del índice SYM-H (línea derecha). Además, indicamos el mínimo índice SYM-H (línea central), que corresponde al punto máximo de la tormenta.

A partir de los tiempos establecidos para una tormenta geomagnética, similar a Moya et al. (2017), definimos tres periodos de tiempo: fase principal (Main Phase), fase de recuperación (Recovery Phase) y duración total de la tormenta (Entire Storm). La fase principal se define

---

<sup>1</sup>Capítulo 7: Dynamics of the Electron Belts

<sup>2</sup>Capítulo 4: Plasma Waves in the Inner Magnetosphere.

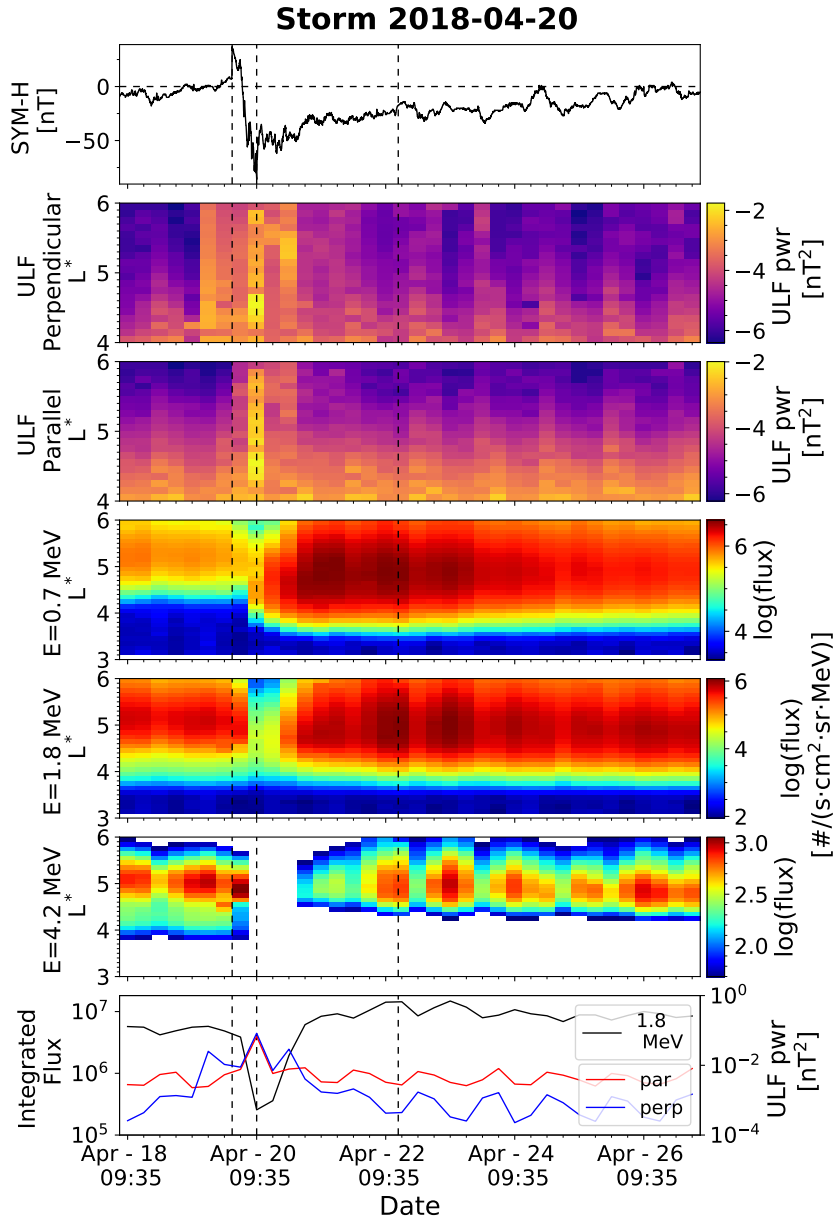


Figura 4.8: Tormenta geomagnética del 20 de abril de 2018. (a) Índice SYM-H. (b) Potencia ULF para fluctuaciones perpendiculares. (c) Potencia ULF para fluctuaciones paralelas. (d-f) Flujo de electrones de 0.7 MeV, 1.8 MeV, y 4.2 MeV, respectivamente. (g) Flujo integrado sobre  $L^*$  para el flujo de 1.8 MeV (negro), potencia ULF paralela (rojo) y potencia ULF perpendicular (azul). Líneas verticales negras representan el comienzo de las tormentas (izquierda), el mínimo índice SYM-H (centro) y el fin de la fase de recuperación (derecha).

como el tiempo entre el comienzo de la tormenta y el mínimo índice SYM-H. La fase de recuperación se define entre el mínimo índice SYM-H y el fin de la recuperación del campo magnético. La tormenta total corresponde al período entre el inicio y el fin de la tormenta. Para evitar problemas con la agrupación de datos, no se consideraron las fases principales de

menos de 6 horas. De manera similar, si la recuperación del índice SYM-H ocurrió en menos de un día, la fase de recuperación se considera de duración 24 horas.

En la primera parte del trabajo, desarrollada en el Capítulo 5, calculamos las correlaciones entre la evolución del flujo de electrones relativistas y la potencia de ondas ULF en el rango de 1 mHz a 10 mHz para las 101 tormentas geomagnéticas durante sus distintas fases: la fase principal, la fase de recuperación y la tormenta total. La ocurrencia de ondas la estudiamos mediante las fluctuaciones paralelas y perpendiculares respecto al campo magnético terrestre, asociada a los modos de onda descritos por la teoría de onda MHD. Las correlaciones las obtuvimos comparando la potencia de onda ULF integrada en todo  $L^*$  con respecto a la evolución del flujo de electrones integrado en todo  $L^*$  para cada fase de las tormentas, así como también, comparando la potencia de onda ULF integrada en todo  $L^*$  respecto a la evolución del flujo de electrones por cada  $L^*$ . Además, mediante la Ecuación (3.1), notamos que es coherente la posibilidad de encontrar resonancia onda-partícula en nuestra región de interés, el cinturón de radiación externo, para la energía de los electrones y la frecuencia de las ondas estudiadas.

En la segunda parte del trabajo, expuesta en el Capítulo 6, ampliamos el trabajo del Capítulo 5 considerando diferentes criterios de clasificación para las tormentas geomagnéticas. Primero, incorporamos nuevos rangos de frecuencia para identificar qué espectro de ondas podría tener mayor relevancia para la resonancia onda-partícula. Calculamos las correlaciones utilizando los rangos Pc4 (7.5 mHz a 22.5 mHz), Pc5 (1.6 mHz a 7.5 mHz) y la combinación de los rangos (1.6 mHz a 22.5 mHz). Seleccionamos el rango Pc5 para calcular las correlaciones en base a tres nuevos criterios.

El primer criterio se basa en los datos de OMNIWeb, lo que nos permite clasificar las tormentas según su intensidad. Siguiendo los criterios de Reyes et al. (2021), consideramos como tormentas moderadas (81 eventos) a las que la variación del campo magnético terrestre está dado por  $-100 \text{ nT} < \text{SYM-H} < -50 \text{ nT}$ , y tormentas intensas (20 eventos), que corresponden al rango  $\text{SYM-H} < -100 \text{ nT}$ . El segundo criterio clasifica nuestra lista de eventos por el tipo

de precursor, ya sea tormentas del tipo SIR (45 eventos) o ICME (36 eventos). Por último, separamos las tormentas según la evolución del flujo de electrones basada en los criterios de Reeves et al. (2003) y Moya et al. (2017). Si la razón entre el flujo posterior a la tormenta y el flujo previo a la tormenta es mayor que 2, el evento se considera un aumento (enhancement, en inglés, 70 %-40 % de los eventos), una razón menor a 0.5 indica una disminución (depletion, en inglés, 3 %-33 % de los eventos), y otros valores indican que no hubo un cambio en el flujo (no change, en inglés, 30 %-20 % de los eventos). Para el caso de la evolución del flujo de electrones entregamos un rango de porcentajes, que va desde la energía más baja a la energía más alta, ya que la cantidad de eventos varía según cada canal de energía. Las correlaciones fueron calculadas mediante la potencia magnética de ondas ULF Pc5 y flujo de electrones integrado en  $L^*$ , así como también, comparando la potencia de ondas ULF Pc5 integrada en  $L^*$  respecto al flujo de electrones por cada  $L^*$ .

## 4.5. Correlaciones entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo

Con el cálculo y agrupación de la potencia de ondas ULF y el flujo de electrones, llevamos a cabo un estudio de la correlación entre la potencia ULF y el máximo del flujo integrado (sumando los flujos sobre todos los  $L^*$ ) en todo el cinturón de radiación externo. Obtuvimos las correlaciones para cada canal de energía, considerando las tormentas analizadas en este trabajo y separando las fases de cada tormenta. Específicamente, para el análisis consideramos un periodo pre-tormenta, que abarca 24 horas antes del inicio de la tormenta, y un periodo post-tormenta, que corresponde al rango de 96 horas posteriores al final de la fase de recuperación. Luego, calculamos las siguientes correlaciones para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares: i) La correlación entre la potencia ULF integrada en  $L^*$  durante la fase principal (desde ahora denominada como “Main Phase”) y la razón del flujo de electrones integrados en  $L^*$  en el instante del mínimo índice SYM-H respecto al máximo del flujo de

electrones integrados en  $L^*$  en el periodo pre-tormenta. ii) La correlación entre la potencia de onda integrada en  $L^*$  durante la fase de recuperación (desde ahora “Recovery Phase”) y la razón del máximo del flujo de electrones integrado en  $L^*$  post-tormenta respecto al flujo de electrones integrado en  $L^*$  en el mínimo índice SYM-H. iii) La correlación entre la potencia ULF integrada en  $L^*$  durante toda la tormenta (ahora denominada como “Entire Storm”) y la razón del máximo flujo de electrones integrado en  $L^*$  post-tormenta respecto al pre-tormenta. Las correlaciones las calculamos mediante el coeficiente de correlación de Pearson y el valor de  $p$  ( $p$ -value, en inglés) correspondiente para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares respecto al campo magnético de fondo. Este procedimiento se repitió pero considerando la potencia de onda ULF integrada en  $L^*$  respecto a la razón de flujo para cada  $L^*$  en cada fase de la tormenta.

En el Capítulo 5 y 6 mostramos y analizamos los resultados obtenidos para las dos etapas de trabajo, además de analizar numéricamente la Ecuación (3.1).

# Capítulo 5

## Sobre la relación entre la potencia de las ondas ULF y los cambios de los flujos de electrones relativistas en el cinturón de radiación exterior <sup>1</sup>

En este capítulo, presentamos resultados sobre las correlaciones entre el flujo de electrones relativistas y la ocurrencia de ondas ULF en el rango de frecuencias entre 1 mHz y 10 mHz. Además, exploramos la posibilidad de observar procesos de energización por resonancia onda-partícula en el cinturón de radiación externo, descritos por la Ecuación (3.1).

---

<sup>1</sup>Este capítulo está basado en el artículo: *On the Relationship Between ULF Wave Power and Changes of Relativistic Electron Fluxes in the Outer Radiation Belt*, **Christopher Lara**, Victor A. Pinto, Javier Silva, Bea Zenteno-Quinteros, y Pablo S. Moya, JGR (Under review, 2024).

## 5.1. Flujo de electrones y potencia magnética de ondas durante tormentas geomagnéticas

Para estudiar la dinámica de los electrones en el cinturón de radiación externo durante tormentas geomagnéticas, calculamos las correlaciones entre la ocurrencia de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones relativistas. La Figura 5.1, corresponde a una muestra de la tormenta geomagnética del 27 de febrero de 2014. El panel (a) muestra el índice SYM-H en función del tiempo, indicando una tormenta geomagnética moderada dado por la variación del campo magnético. El panel (b) ilustra la órbita del satélite RBSP-A junto con flujo de electrones para el canal de energía de 1.8 MeV, en donde los colores más rojizos indican un mayor flujo de electrones y hacia el azul un menor flujo de electrones. En el panel (c), se presenta la magnitud del campo magnético  $\mathbf{B}_T$  obtenida desde el instrumento EMFISIS durante la misma trayectoria de RBSP-A (panel (b)).

Los paneles (d) y (e) de la Figura 5.1 muestran la potencia magnética de onda para frecuencias entre 1 mHz y 10 mHz (indicadas por las líneas horizontales negras punteadas), tanto para las fluctuaciones paralelas como perpendiculares. La curva azul y verde representan la interacción resonante para electrones de 0.9 MeV y 4.2 MeV respectivamente, calculada a partir de la Ecuación (3.1). En los paneles (d) y (e), observamos un incremento en la potencia ULF al inicio de la tormenta geomagnética. Las líneas negras verticales marcan una ventana de tiempo de 20 minutos, lo que corresponde al periodo necesario para detectar las ondas en el rango de frecuencia esperado. El panel 5.1(f) muestra las fluctuaciones paralelas (rojo) y perpendiculares (azul) utilizadas para calcular la potencia ULF en la ventana de tiempo de 20 minutos, indicada por las líneas negras verticales. Estas series temporales son periódicas en los bordes, variando entre entre 0 nT y  $\sim 5.5$  nT para ambos tipos de fluctuaciones, y presentan diferencias entre sí para cada instante. El panel 5.1(g) ilustra la potencia magnética de onda en el espectro ULF, correspondiente a la serie de tiempo del panel (f). El máximo de la potencia ULF se encuentra en las frecuencias más bajas.



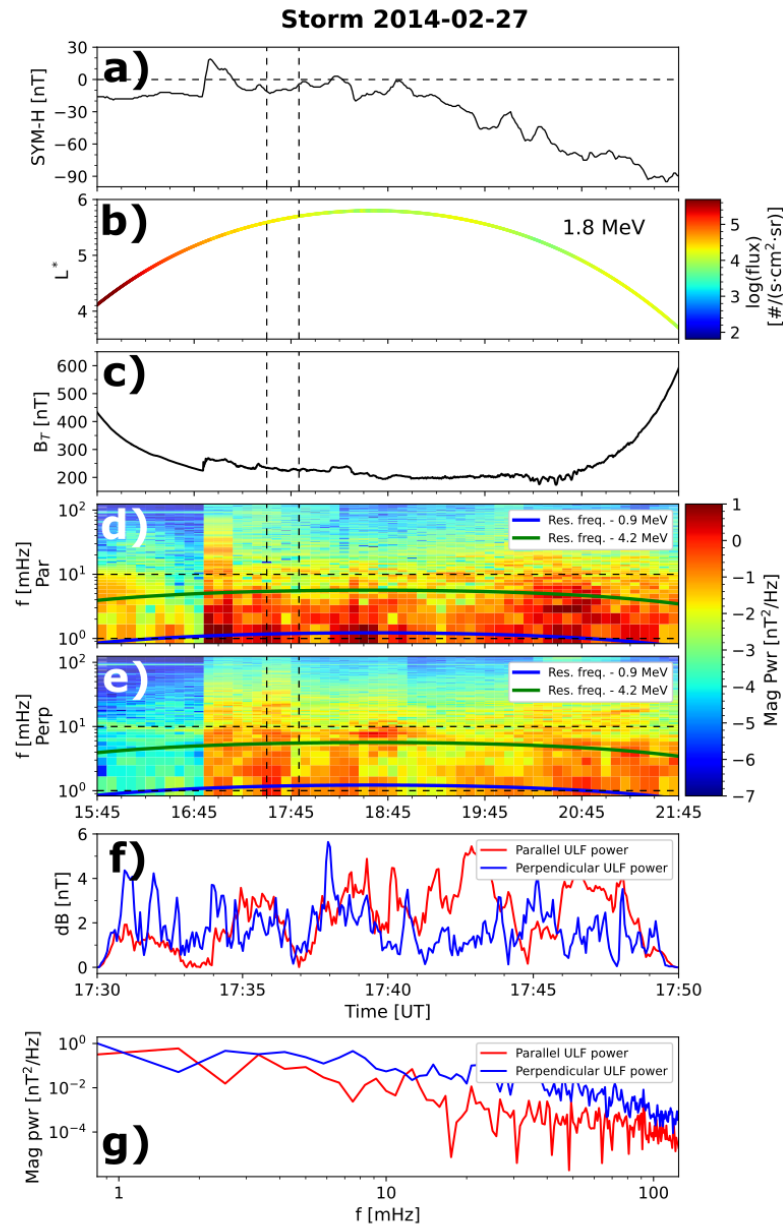


Figura 5.1: Datos obtenidos desde Van Allen Probes REPT y EMFISIS para la tormenta geomagnética de 27 de febrero de 2014. a) Índice SYM-H. b) Órbita de RBSP-A y el flujo de electrones para 1.8 MeV. c) Magnitud del campo magnético. d) Potencia magnética de ondas ULF respecto a fluctuaciones paralelas al campo magnético de fondo. e) Lo mismo que d) pero para potencia de onda perpendicular. f) Fluctuaciones del campo magnético para un intervalo de 20 minutos. g) Potencia magnética de las fluctuaciones paralelas (azul) y perpendiculares (rojo) como función de la frecuencia para el periodo mostrado en (f). Las líneas verticales negras representan el tiempo considerado en la Figura 5.1 f). Las líneas negras horizontales representan el rango de frecuencia de onda considerado. Las líneas verdes y azules indican la interacción resonante dada por la Ecuación (3.1).

En la Figura 5.2 presentamos dos tormentas geomagnéticas ocurridas el 1 de marzo de 2013 (izquierda) y el 27 de febrero de 2014 (derecha). En el panel (a) se muestra el índice SYM-H, que representa la actividad geomagnética. Los paneles (b) y (c) ilustran la potencia ULF para fluctuaciones paralelas y perpendiculares, respectivamente, considerando ondas en el rango de 1 mHz a 10 mHz. El panel (d) muestra el flujo de electrones relativistas para energías de 0.7 MeV, mientras que los paneles (e) y (f) muestran el flujo para 1.8 MeV y 4.2 MeV, respectivamente. Finalmente, el panel (g) muestra la potencia ULF y el flujo integrado sobre  $L^*$  a partir de los paneles (b), (c) y (d). Las líneas negras punteadas verticalmente indican el inicio, máximo y fin de la tormenta geomagnética.

La Figura 5.2 ilustra la evolución del flujo de electrones en función del tiempo y  $L^*$ . En el panel izquierdo, se observa un incremento del flujo de electrones relativistas, principalmente en regiones de  $L^*$  mayores a 4.0 para todos los canales de energía. El tiempo en el cuál se puede apreciar un aumento en los flujos varía para cada  $L^*$  y energía. Además, observamos que luego del índice SYM-H mínimo, en  $L^*$  cercanos a 5.0 obtenemos mayores flujos que en comparación con  $L^*$  entre 4.0 y 5.0. Por otro lado, el flujo de electrones para 4.2 MeV en  $L^*$  inferior a 4.0 experimenta una disminución del flujo de electrones. En los paneles de la derecha, observamos una disminución del flujo de electrones en todos los  $L^*$ . Sin embargo, para 1.8 MeV, en  $L^*$  menores a 4.2, la disminución de los flujos es mucho menor que en  $L^*$  mayores a 4.2. El índice SYM-H, utilizado como indicador de la intensidad de una tormenta geomagnética, muestra una tormenta moderada (izquierda) y otra intensa (derecha). Además, estas tormentas son originas por SIR e ICME, respectivamente. Estudios previos han demostrado que la evolución de los flujos puede diferir según la energía de los electrones,  $L^*$  o la intensidad de la tormenta (Reeves et al., 2003; Turner et al., 2013; Zhao and Li, 2013; Moya et al., 2017). Además, observamos que cualitativamente la variación en el índice SYM-H es similar para los dos eventos, con una fuerte disminución consistente con la Ley de Lenz durante la fase principal. Como consecuencia, el campo magnético terrestre tiene un tiempo de recuperación que podría variar para cada tormenta. Sumado a lo anterior, los paneles asociados a la potencia ULF en la Figura 5.2 (b) y (c) muestran un aumento en la ocurrencia de ondas ULF durante la

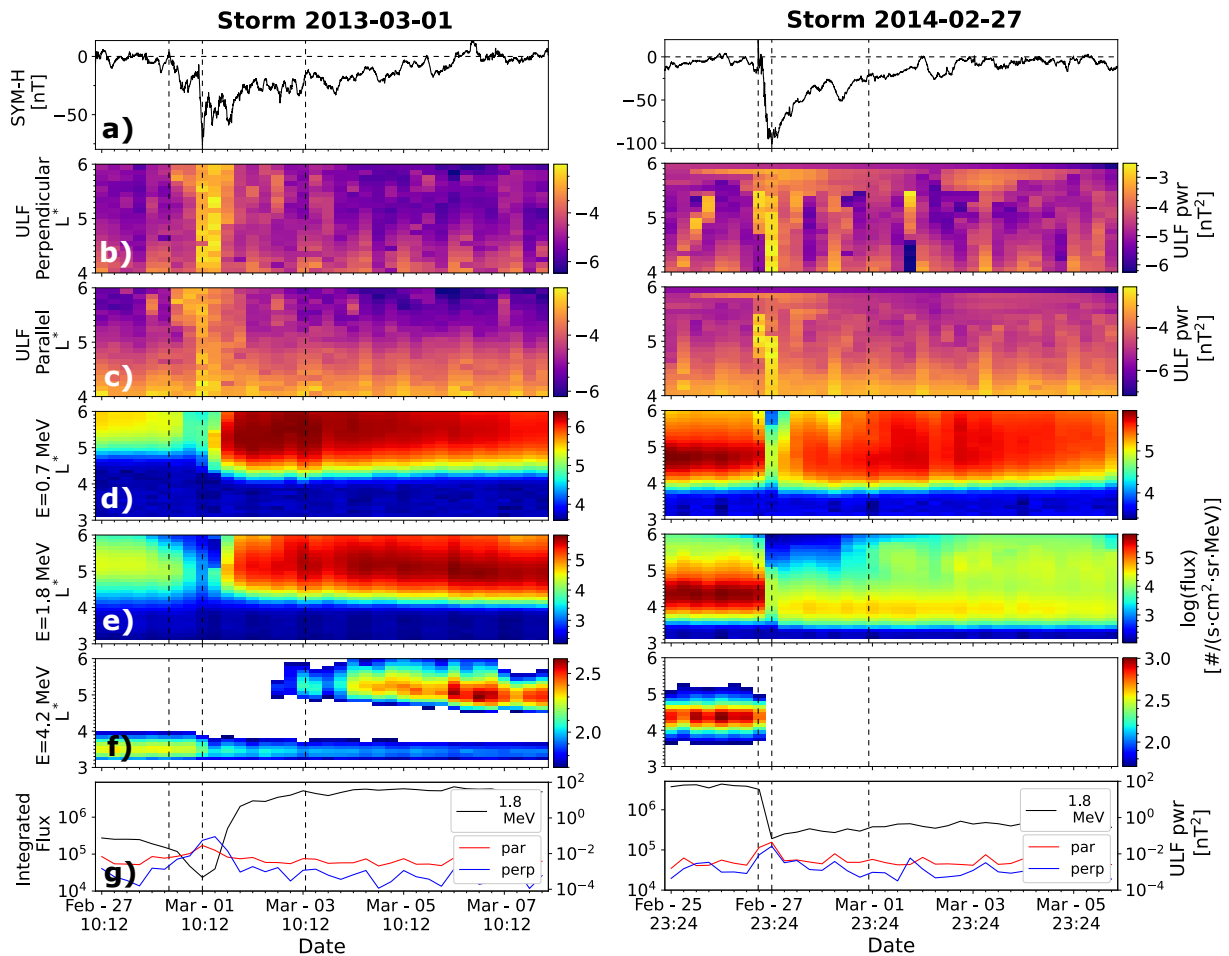


Figura 5.2: Tormenta geomagnética del 1 de marzo de 2013 (izquierda) y 27 de febrero de 2014 (derecha). (a) Índice SYM-H. (b) Potencia ULF para fluctuaciones perpendiculares. (c) Potencia ULF para fluctuaciones paralelas. (d-f) Flujo de electrones de 0.7 MeV, 1.8 MeV, y 4.2 MeV, respectivamente. (g) Flujo integrado sobre  $L^*$  para el flujo de 1.8 MeV (negro), potencia ULF paralela (rojo) y potencia ULF perpendicular (azul). Líneas verticales negras representan el comienzo de las tormentas (izquierda), el mínimo índice SYM-H (centro) y el fin de la fase de recuperación (derecha).

fase principal de la tormenta en el espectro entre 1 mHz y 10 mHz. Esto se confirma para ambas tormentas en el panel (g) de la misma figura, donde se observa un aumento en la potencia ULF integrada durante una tormenta geomagnética, mientras que para electrones de 1.8 MeV, se nota una disminución del flujo integrado durante el máximo de la tormenta, seguido de un aumento del flujo integrado posterior al mínimo índice SYM-H.

## 5.2. Correlaciones totales entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo

Calculamos las correlaciones entre la ocurrencia de ondas ULF de 1 mHz a 10 mHz y la evolución del flujo de electrones relativistas durante las tormentas geomagnéticas seleccionadas en el cinturón de radiación externo. Sumado a lo anterior, exponemos los resultados numéricos sobre la resonancia onda-partícula entregada en la Ecuación (3.1), corroborando que esta interacción puede ser una de las causalidades de la dinámica no lineal de los electrones en el cinturón de radiación externo.

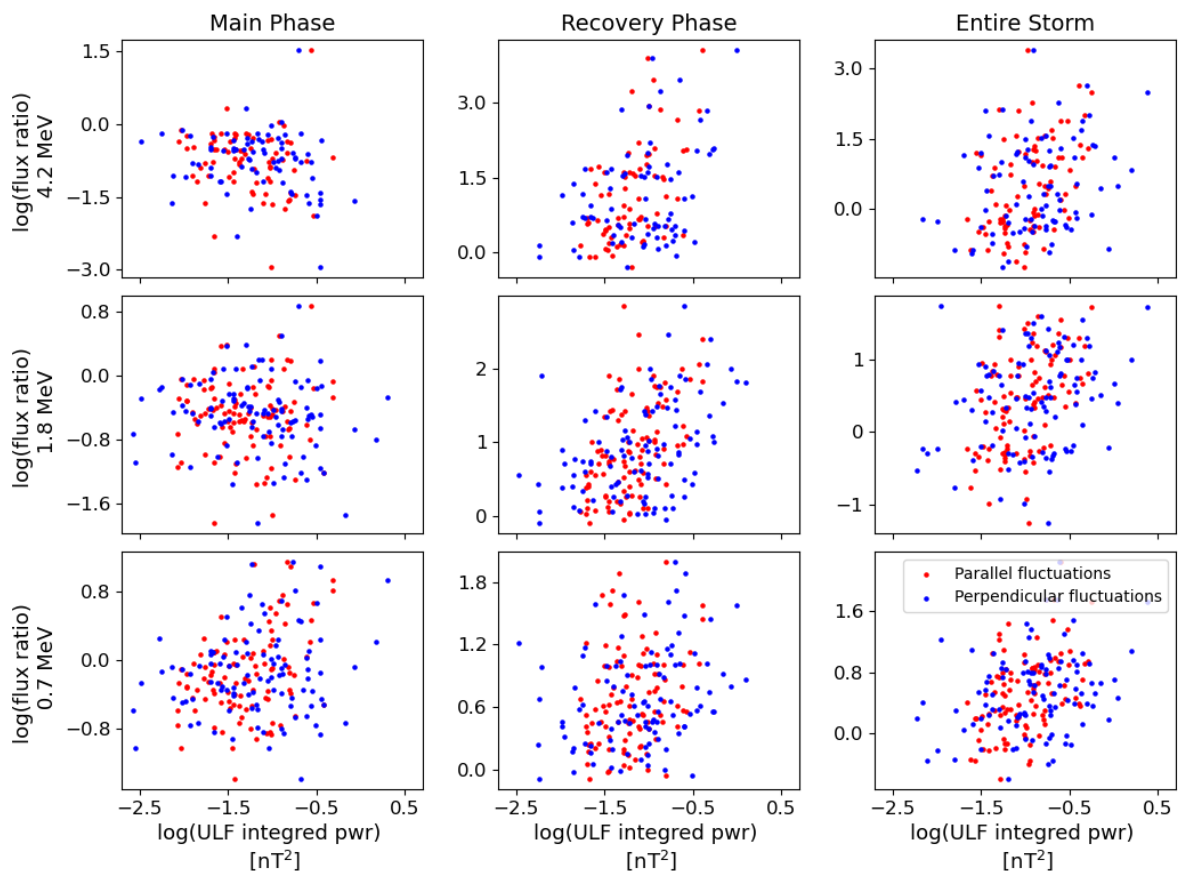


Figura 5.3: Cociente de la evolución del flujo y la potencia integrada ULF para cada fase de tormenta de las 101 tormentas del estudio. La figura muestra Main Phase (izquierda), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (derecha). Las filas corresponden a diferentes energías de electrones; 4.2 MeV (arriba), 1.8 MeV (centro) y 0.7 MeV (abajo). Los puntos rojos corresponden a las fluctuaciones paralelas respecto al campo magnético de fondo, y los puntos azules corresponden a las fluctuaciones perpendiculares.

La Figura 5.3 resume los resultados de las tormentas geomagnéticas consideradas en este estudio. La figura muestra gráficos de dispersión de los cocientes de flujo previamente definidos y la potencia ULF integrada en  $L^*$  para las fluctuaciones paralelas (rojas) y perpendiculares (azules) para las 101 tormentas consideradas en el estudio (arriba: 4.2 MeV, centro: 1.8 MeV, abajo: 0.7 MeV). A partir de la Figura 5.3, podemos calcular el coeficiente de correlación entre la evolución de los flujos de electrones relativistas y la potencia ULF integrada en  $L^*$  durante las fases de una tormenta geomagnética. La Figura 5.4 (filas superiores) muestra los coeficientes de correlación de Pearson  $C$  para los mismos periodos de tormenta mostrados en la Figura 5.3 en función de la energía de los electrones. También evaluamos la significancia estadística de los resultados calculando el valor de  $p$  asociado a cada coeficiente de correlación (filas inferiores de la Figura 5.3). Consideramos que  $p < 0.05$  establece una buena significancia estadística, ya que considera un intervalo de confianza del 95 %.

La Figura 5.4 muestra que, en general, la estadística entregada por las correlaciones es similar para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares, pero con diferencias en la mayoría de los valores de los coeficientes de correlación y el valor de  $p$  para la significancia estadística. Durante Main Phase (Figura 5.4(a)), el coeficiente de correlación es máximo para la energía más baja y decae consistentemente con el incremento de la energía. El valor más alto de la correlación es  $C = 0.42$  para electrones con energía de 0.47 MeV en las fluctuaciones paralelas, y  $C = 0.24$  para las fluctuaciones perpendiculares en 0.47 MeV. Además, el valor de  $p$  muestra que los resultados son estadísticamente significativos solo para energías  $< 1$  MeV para el caso de fluctuaciones paralelas. Durante Recovery Phase (Figura 5.4(b)), observamos un comportamiento opuesto a Main Phase, es decir, los canales de energía más bajos presentan los coeficientes de correlación más bajos y menor significancia estadística, no obstante, tanto las correlaciones como la significancia aumenta en conjunto a la energía de los electrones hasta 3.4 MeV para luego disminuir nuevamente. Observamos correlaciones más altas entre la potencia de onda ULF y el flujo de electrones integrado en  $L^*$  con un máximo de  $C = 0.58$  para 3.4 MeV, mientras que para las fluctuaciones perpendiculares el máximo es  $C = 0.45$  para electrones de 2.6 MeV. Finalmente, la Figura 5.4(c) muestra que, para Entire Storm, las

correlaciones parecen presentar un comportamiento aditivo. En otras palabras, los valores de  $C$  tienden a sumarse entre Main Phase y Recovery Phase para los mismos canales de energía, lo que provoca que las correlaciones permanezcan relativamente constante y moderadamente alta para todos los canales de energía. Además, la significancia estadística siempre es alta. En este caso, la correlación máxima para fluctuaciones paralelas es  $C \sim 0.51$  para 5.2 MeV, mientras que para fluctuaciones perpendiculares es  $C \sim 0.35$  para 5.20 MeV.

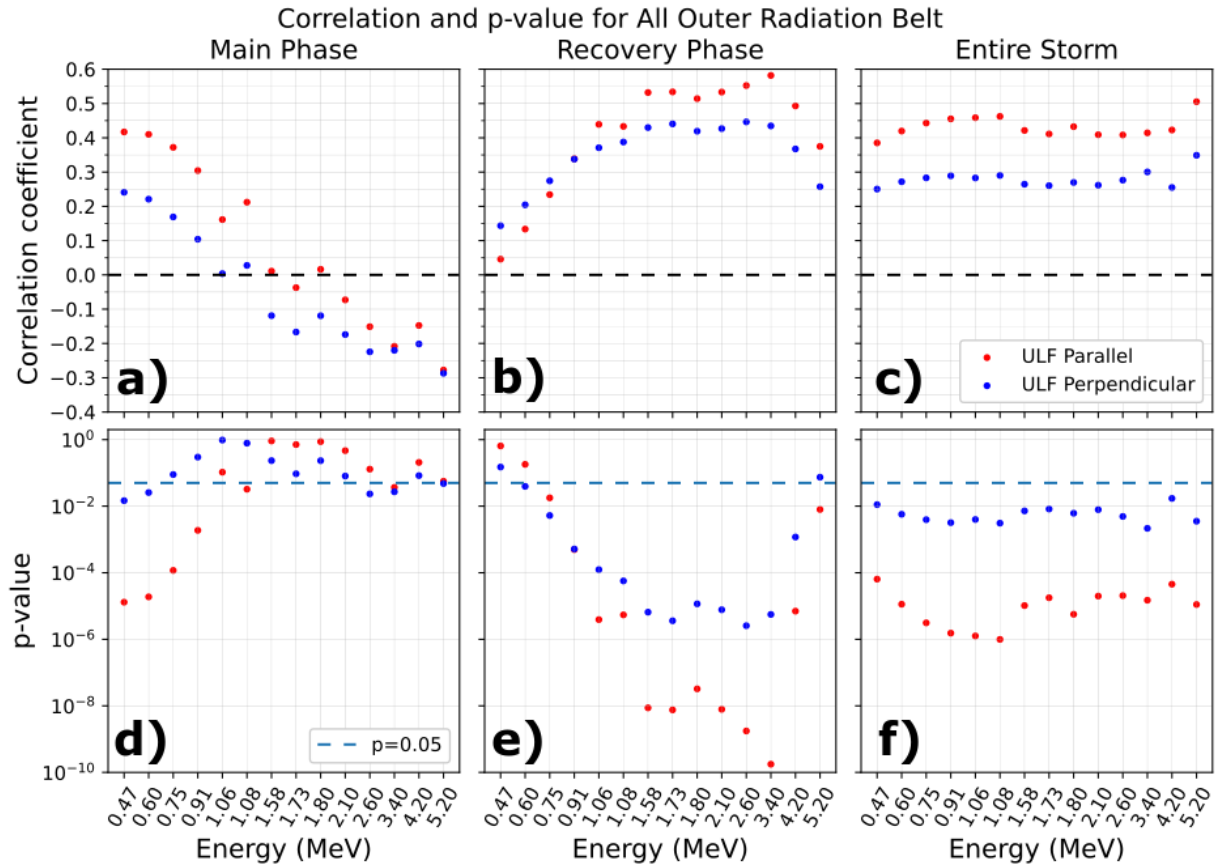


Figura 5.4: Coeficiente de correlación (paneles superiores) y valores de  $p$  (paneles inferiores) obtenidos para la comparación entre la potencia ULF integrada y el cociente de evolución del flujo para todas las tormentas geomagnéticas consideradas. Las columnas corresponden a las fases de tormenta: Main Phase (izquierda), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (derecha). Los puntos rojos y azules indican fluctuaciones paralelas y perpendiculares, respectivamente. La línea negra en los paneles superiores indica  $C = 0$ . La línea azul claro en los paneles inferiores indica el umbral de valor  $p$  del 5% ( $p = 0.05$ ).

### 5.3. Correlaciones por $L^*$ entre ocurrencia de ondas ULF y evolución del flujo

Ampliando el trabajo previo, calculamos las correlaciones entre la ocurrencia de ondas ULF en todo el cinturón de radiación externo respecto a los cambios del flujo en el cinturón de radiación externo por cada  $L^*$ . Repetimos el procedimiento previo pero calculamos las correlaciones considerando la evolución del flujo de electrones por cada  $L^*$  (con variaciones  $\Delta L^* = 0.1$ ) y la potencia ULF integrada entre  $4.0 \leq L^* \leq 6.0$ . La Figura 5.5 y la Figura 5.6 presentan los coeficientes de correlación para todos los canales de energía y para las fluctuaciones paralelas y perpendiculares, respectivamente. Las figuras muestran el coeficiente de correlación (izquierda) y el valor  $p$  respectivo (derecha), para Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). En la columna de la derecha, el color verde indica un valor de  $p$  inferior al 5%. Se puede apreciar que tanto la Figura 5.5 como la Figura 5.6 son generalmente consistentes con los hallazgos de la Figura 5.4, pero al mismo tiempo, el cálculo por cada  $L^*$  muestra un escenario muy complejo en diferentes energías y ubicaciones.

Los paneles superiores en la Figura 5.5 confirman que la evolución del flujo para los canales de energías más bajas están mayormente correlacionados con la potencia de ondas ULF integrada durante Main Phase. Sin embargo, las correlaciones son significativamente mayores para  $L^* < 4.5$  en energías hasta 1.6 MeV, destacando en  $L^* = 4.0$ . Para  $4.5 < L^* < 5.2$  obtenemos anticorrelaciones estadísticamente significativa para energías entre 1.5 y 2.6 MeV. En Recovery Phase (paneles centrales), observamos correlaciones positivas en toda la región para la mayoría de los canales de energía. Hay una significancia estadística muy alta para la mayoría de las regiones en las que los flujos están altamente correlacionados. Los valores máximos del coeficiente de correlación son alrededor de  $C = 0.65$  en  $L^* \sim 5.5$  para  $E \sim 4.2$  MeV. Además, observamos valores de  $C$  alrededor de  $C = 0.6$  para  $L^* \sim 3.8$  para energías menores a  $\sim 1$  MeV. También es claro que las correlaciones para las energías más bajas entre  $4.0 \leq L^* \leq 5.0$  y en las energías más altas en los bordes del sistema son muy bajas, o lige-

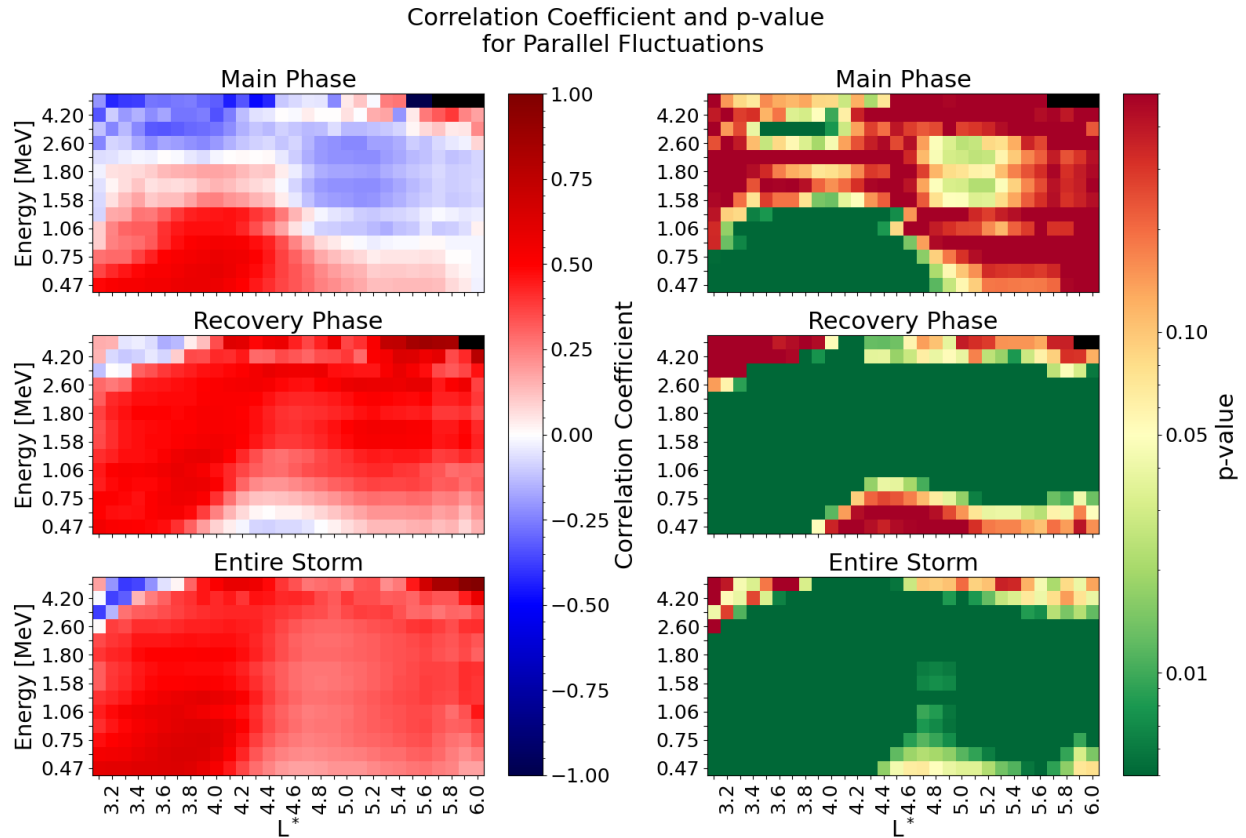


Figura 5.5: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para todas las tormentas geomagnéticas consideradas. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún coeficiente de correlación.

ramente negativas, pero con una significancia estadística baja. Al considerar Entire Storm (paneles inferiores), el efecto aditivo mencionado anteriormente parece continuar. En general, las correlaciones de Main Phase y Recovery Phase parecen sumarse para cada  $L^*$  en cada energía. La mayoría de los resultados obtenidos presentan una alta significancia estadística con correlaciones relativamente alta. El coeficiente de correlación máximo estadísticamente es  $C \sim 0.65$  para 0.6 MeV en  $L^* \sim 3.8$ . Para  $L^* < 4.6$ , obtenemos  $C > 0.47$ , particularmente para energías menores a 2.6 MeV.

En el caso de las fluctuaciones perpendiculares, a primera vista, la Figura 5.6 sigue la misma estructura que la Figura 5.5 pero con algunas diferencias claves que valen la pena señalar. Durante Main Phase (fila superior), observamos una región similar de alta correlación en



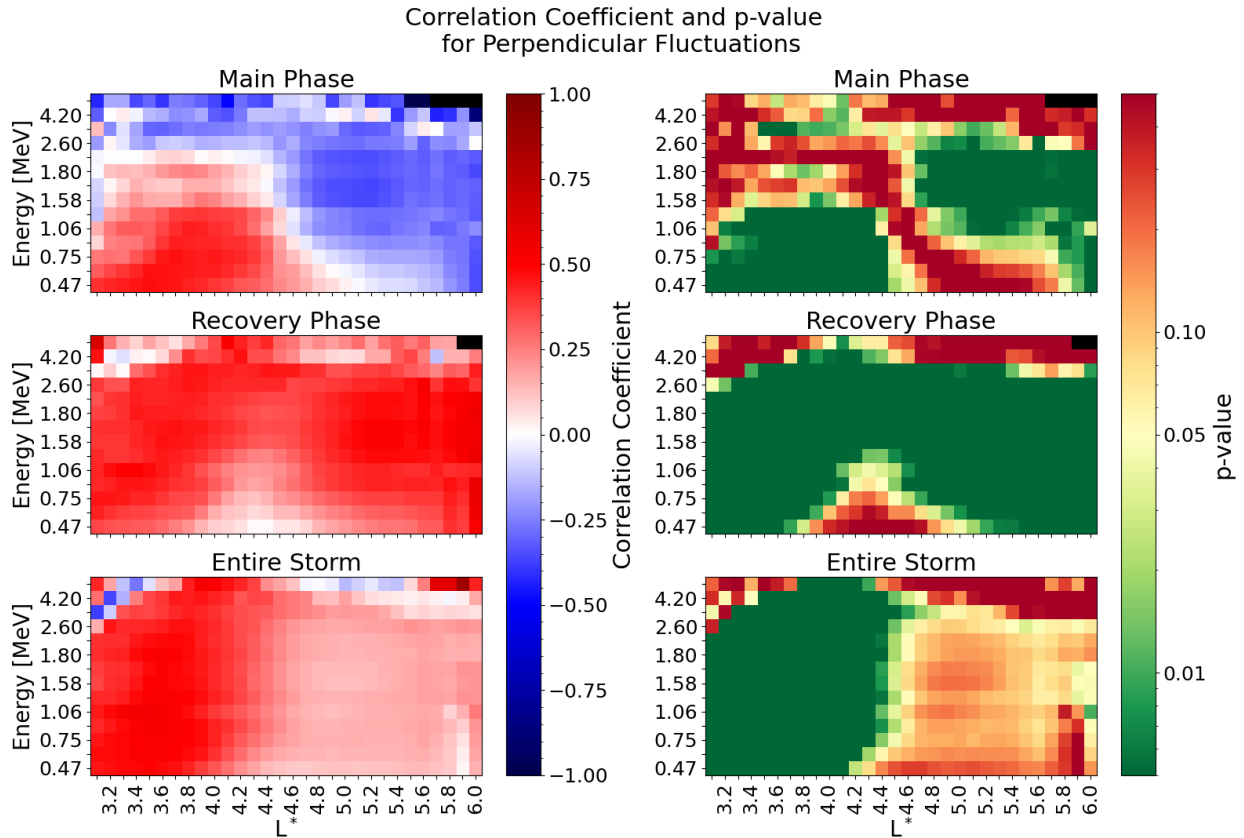


Figura 5.6: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor de  $p$  (derecha) para comparar la potencia ULF para fluctuaciones perpendiculares y la razón de la evolución del flujo, para todas las tormentas geomagnéticas consideradas. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún coeficiente de correlación.

$L^*$  bajos para canales de energía bajos, en donde obtenemos un máximo de  $C = 0.47$  en  $L^* = 3.5$  para 0.47 MeV. Sin embargo, hay una anticorrelación muy fuerte para la mayoría de los canales de energía a medida que  $L^*$  aumenta (mínimo de  $C = -0.36$  en  $L^* = 5.2$  en  $E = 1.73$  MeV). Podría ser opción que este comportamiento opuesto en valores más pequeños o más grandes de  $L^*$  afecte en parte los resultados en la Figura 5.4, donde los flujos están menos correlacionados con las fluctuaciones perpendiculares que con las fluctuaciones paralelas. Durante Recovery Phase (fila intermedia), los resultados están en acuerdo con la Figura 5.5 indicando que tanto la potencia ULF paralela como perpendicular correlacionan de manera similar con la evolución del flujo de electrones en las mismas energías y  $L^*$ . Para las fluctuaciones perpendiculares, encontramos los valores más altos de  $C = 0.57$  en

$L^* \sim 6.0$  y ligeramente más bajos para la mayoría de los canales de energía. Finalmente, al considerar Entire Storm (fila inferior), nuevamente observamos que el efecto de Main Phase y Recovery Phase tienden a sumarse, en este caso, resultando en una región con correlaciones estadísticamente significativas para  $L^* < 4.5$ , con un máximo de  $C = 0.55$  para energías inferiores a 1.8 MeV. Sin embargo, para  $L^* > 4.5$ , hay una región con correlaciones cercanas a 0 y con baja confianza estadística.

## 5.4. Análisis

Hemos realizado un estudio estadístico de la correlación entre la potencia ULF integrada entre 1 mHz y 10 mHz y la evolución de los flujos de electrones relativistas en el cinturón de radiación externo durante diferentes fases de una tormenta geomagnética. Los tres intervalos de tiempo diferentes analizados fueron la fase principal de la tormenta (Main Phase), donde calculamos la relación entre los flujos máximos previos a la tormenta y los flujos en el momento en que ocurrió el mínimo SYM-H; la fase de recuperación de la tormenta (Recovery Phase), donde calculamos la relación entre los flujos en el momento del mínimo SYM-H y los flujos máximos al final de la fase de recuperación; y la tormenta completa (Entire Storm), con la relación considerando los flujos máximos previos a la tormenta frente a los flujos máximos al final de la fase de recuperación. Nuestro conjunto de datos seleccionados contenía 101 tormentas entre el 1 de enero de 2013 y el 30 de noviembre de 2018. Separamos las ondas entre fluctuaciones paralelas y perpendiculares al campo magnético de fondo para estudiar diferencias en las correlaciones asociadas con los diferentes modos de oscilación. Al utilizar los datos del ECT de Van Allen Probes, particularmente los instrumentos MagEIS y REPT, pudimos estudiar el rango de energía entre 470 keV y 5.2 MeV.

Es importante destacar que en este trabajo consideramos todas las tormentas, independientemente de si resultaron en un aumento o disminución general de los flujos de electrones para diferentes fases, y por lo tanto, se espera que los coeficientes de correlación se vean algo

reducidos por la multitud de procesos que ocurren durante cada evento de tormenta. Aún así, la Figuras 5.3 y 5.4 muestran que existe una correlación entre la potencia ULF integrada en  $L^*$  y la dinámica del cinturón de radiación externo para la mayoría de los canales de energía estudiados. En particular, la Figura 5.4 muestra que al considerar la duración completa de las tormentas, hay una alta correlación en la mayoría de los canales de energía para fluctuaciones paralelas y una correlación ligeramente menor, pero también relativamente similar en los canales de energía para fluctuaciones perpendiculares. Curiosamente, el coeficiente de correlación relativamente constante a través de los canales de energía parece ser el resultado de alguna influencia aditiva de la evolución del cinturón de radiación externo durante Main Phase y Recovery Phase.

Durante Main Phase, las correlaciones son más altas para los canales de energía más bajos y disminuye a medida que aumenta la energía con un cambio a anticorrelación para  $E > 1$  MeV. Sin embargo, tal anticorrelación para canales de energía más altos es de baja significancia estadística. En contraste, durante Recovery Phase, el coeficiente de correlación aumenta a medida que aumenta la energía, y para energías por encima de 0.75 MeV es estadísticamente sólido. Una posible explicación para este comportamiento durante las diferentes fases de la tormenta es que, como indican Turner et al. (2015), las energías más bajas pueden responder más rápidamente a cambios abruptos, como los que se observan durante Main Phase. En cambio, durante Recovery Phase, los procesos de energización en curso tienden a afectar de manera más consistente las energías más altas. Según Jaynes et al. (2015), una correlación con la actividad ULF es probablemente importante, ya que pueden llevar a la energización de electrones. En la Figura 5.4, para todas las correlaciones que pueden considerarse significativas (valor de  $p < 5\%$ ), se encuentra consistentemente que la potencia ULF asociada con las oscilaciones paralelas correlaciona mejor con la tasa de cambios de flujo que la potencia ULF asociada con las oscilaciones perpendiculares. Dado que las fluctuaciones paralelas corresponden a la componente de compresión de las ondas ULF (Takahashi et al., 2022), estos resultados son consistentes con las interacciones de resonancia de deriva entre las partículas del cinturón de radiación y las ondas toroidales de compresión informadas anteriormente (Li

et al., 2021).

Los resultados de Recovery Phase para la Figura 5.5 y la Figura 5.6 son relativamente similares, pero con correlaciones más altas encontradas para fluctuaciones paralelas. Esto sugiere que las fluctuaciones generadas por las ondas ULF podrían desempeñar un papel esencial en el aumento de los flujos de electrones durante la fase de recuperación de una tormenta geomagnética, excepto para energías más bajas (0.47 MeV – 0.75 MeV), o en energías muy altas. La interacción resonante entre las ondas ULF y las partículas podría ser una de las razones de estos resultados observados, ya que coincide con la perturbación azimutal del campo eléctrico. Estos hallazgos sugieren que la resonancia entre las ondas ULF y los electrones son un proceso físico importante para impulsar los cambios en el flujo del cinturón de radiación durante una tormenta geomagnética, lo que es consistente con lo que muchos otros trabajos ya han reportado. Es probable que este mecanismo viole el tercer invariante adiabático, y posteriormente impulse la difusión radial (Ukhorskiy et al., 2009). Dicho esto, es imperativo enfatizar que nuestro estudio se centró en interacciones a escala global, teniendo en cuenta el tiempo sustancial de propagación de ondas requerido para resonar efectivamente con partículas en la región. Como mencionamos anteriormente, el análisis de Entire Storm se comporta como si Main Phase y Recovery Phase se sumaran, y como tal, presenta correlaciones más fuertes. Un resultado inusual se obtiene para las fluctuaciones perpendiculares, donde la fuerte anticorrelación para  $L^* > 4.5$  durante Main Phase y una fuerte correlación en la misma región durante Recovery Phase se cancelan durante Entire Storm, lo que resulta en que la mayor parte de la región  $L^* > 4.5$  no se correlacionen en absoluto entre los flujos y la potencia ULF perpendicular integrada.

## 5.5. Resonancia onda partícula

Para evaluar la posibilidad de que correlaciones significativas indiquen interacciones resonantes, la Figura 5.7 evalúa la Ecuación (3.1) para  $N = 0$  (resonancia de deriva) y pequeños

valores del número de onda azimutal ( $m = 1, 3, 5$  y  $10$ ), coherente con lo expuesto en el Capítulo 3. Las líneas coloreadas corresponden a frecuencias resonantes en función de  $L^*$  para diferentes energías. Cada panel incluye un cuadrado negro que indica resonancias dentro de nuestra zona de interés de resonancia de deriva entre ondas ULF, con frecuencias entre 1 y 10 mHz, y electrones relativistas en el cinturón de radiación externo en  $4.0 \leq L^* \leq 6.0$ . Los resultados muestran que, en general, las partículas de mayor energía pueden resonar con ondas de mayor frecuencia. Dentro de la zona de interés, los electrones de varios MeV pueden resonar con ondas ULF de menos de 10 mHz solo para  $m = 1$  (panel superior izquierdo de la figura). Por el contrario, los electrones de cientos de keV pueden experimentar la resonancia de deriva solo para un valor de  $m$  más grande (panel inferior derecho). Además, los electrones de  $\sim 1$  MeV pueden resonar con ondas ULF para valores intermedios del número de onda azimutal ( $m = 3, 5$ ). En resumen, para todas las energías consideradas, nuestros resultados indican que la resonancia de deriva con ondas ULF de menos de 10 mHz puede ocurrir en la zona de interés.

Es importante tener en cuenta que nuestro estudio fue de alcance amplio, considerando cada tormenta geomagnética independientemente de su resultado de flujo de electrones. Se necesitan análisis e investigaciones adicionales para profundizar en nuestra comprensión de los mecanismos y procesos específicos involucrados en la resonancia entre las ondas ULF y los electrones, y cómo contribuyen a los cambios observados en el cinturón de radiación durante las tormentas geomagnéticas. Por ejemplo, incluir el valor experimental de  $m$  podría ser útil para descubrir qué tipo de ondas están interactuando con los electrones y detallar la interacción resonante en cada tormenta geomagnética en el análisis. Además, parece razonable pensar que, especialmente en bandas de  $L^*$  estrechas, un estudio de la evolución de la densidad de espacio de fase de los electrones podría arrojar mejores resultados para determinar el efecto que las ondas ULF pueden tener en las poblaciones de electrones.

En general, nuestros hallazgos destacan la naturaleza compleja de la relación entre las ondas ULF y el comportamiento del flujo de electrones dentro del cinturón de radiación. Dicho esto,

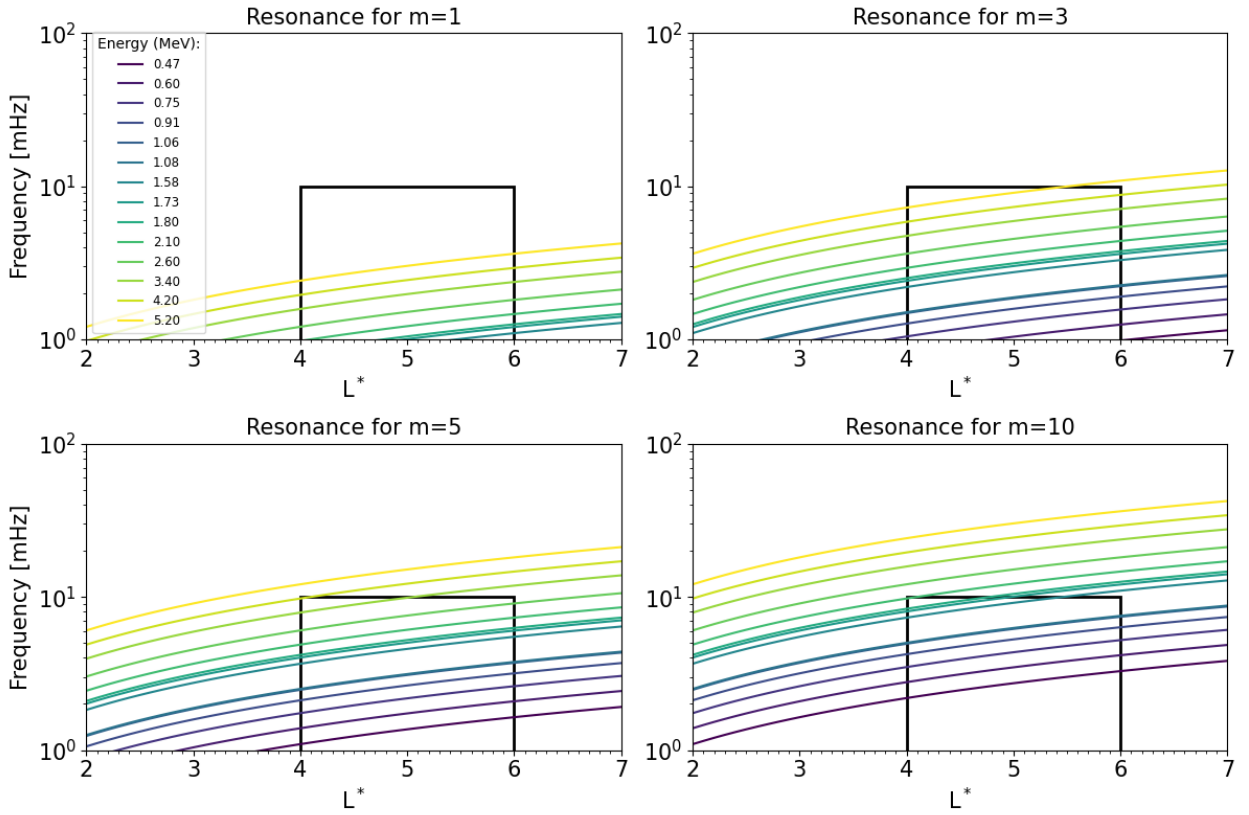


Figura 5.7: Resonancia de deriva onda-partícula. Evaluación de la Ecuación (3.1) y (3.2) para  $N = 0$ , y cuatro opciones de  $m$  en función de  $L^*$  para todos los canales de energía considerados. Los cuadrados negros indican resonancias dentro de nuestra zona de interés de ondas ULF que interactúan con electrones energéticos en el cinturón de radiación exterior.

estudios adicionales considerando más parámetros podrían aclarar estos resultados, mejorar la correlación posible entre procesos físicos y la dinámica de los cinturones de radiación durante las tormentas, e incluso demostrar una relación de causalidad. Esperamos explorar más estas ideas, ampliar el espectro de frecuencias, estudiar los tipos de precursores y correlacionar con la evolución del índice SYM-H, AE, entre otros. Es por esto, que en el siguiente capítulo abordamos algunos de estos criterios para poder tener una mayor claridad en estas interacciones resonantes.

# Capítulo 6

## Ocurrencia de ondas en la evolución del flujo de electrones bajo la clasificación de las tormentas geomagnéticas<sup>1</sup>

Continuando el trabajo del Capítulo 5, realizamos importantes ampliaciones. Para evaluar si un rango de frecuencias más amplio cambia significativamente los coeficientes de correlación entre la evolución del flujo de electrones relativistas y la ocurrencia de ondas ULF, consideramos los rangos de frecuencia Pc4, Pc5 y Pc4+Pc5, tanto para las fluctuaciones paralelas como perpendiculares. Como se observa en la Tabla 3.1, el periodo de deriva de un electrón varía según su energía, lo que le permite interactuar con ondas en estos nuevos rangos de frecuencia, tal como indicamos en el Capítulo 3. Con el mismo objetivo, ampliamos nuestra estadística clasificando las tormentas geomagnéticas según su intensidad, tipo de precursor y tipo de evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo.

---

<sup>1</sup>Este capítulo está basado en el artículo: *Occurrence of waves in the evolution of electron flux under the classification of geomagnetic storms*, **Christopher Lara**, Victor A. Pinto, y Pablo S. Moya, (In preparation, 2024).

### Correlation for All Outer Radiation Belt

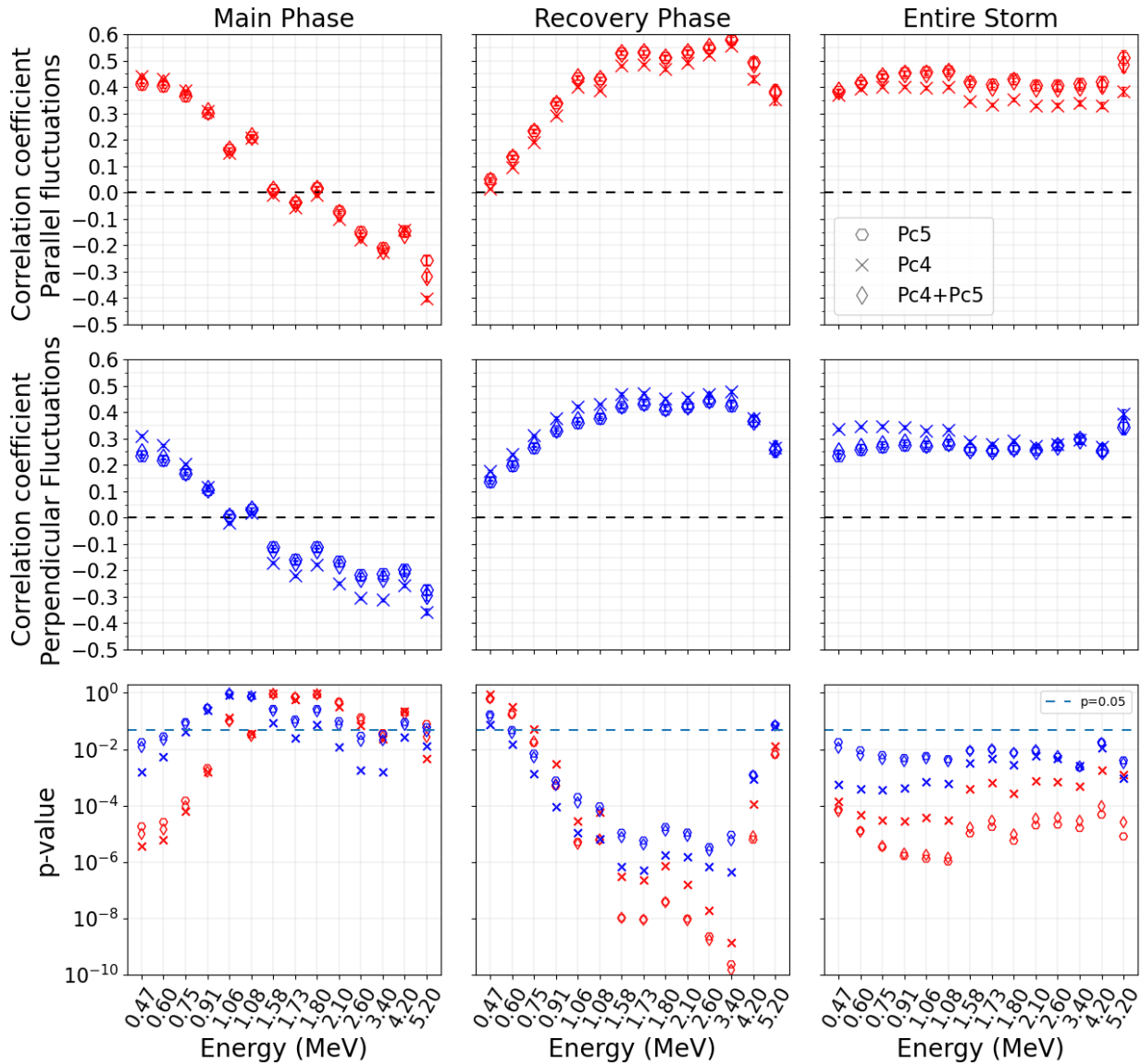


Figura 6.1: Coeficientes de correlación para fluctuaciones paralelas (paneles superiores) y perpendiculares (paneles centrales), y valor de  $p$  (paneles inferiores) obtenido para la comparación entre la potencia ULF integrada y el cociente de evolución del flujo de electrones para todas las tormentas geomagnéticas. La simbología corresponde a los rangos de frecuencias Pc4, Pc5 y Pc4+Pc5. Las columnas corresponden a las fases de tormenta: Main Phase (izquierda), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (derecha). Los colores rojo y azul indican fluctuaciones paralelas y perpendiculares, respectivamente. La línea negra en los paneles superiores indica  $C = 0$ . La línea azul claro en los paneles inferiores indica el umbral de valor de  $p$  del 5% ( $p = 0.05$ ).

Al considerar los nuevos rangos de frecuencia, obtenemos los resultados de la Figura 6.1, que ilustra los coeficientes de correlación para las fluctuaciones paralelas (paneles superiores) y



perpendiculares (paneles centrales), junto con el valor de  $p$  respectivo (paneles inferiores). Los valores de  $C$  y  $p$  son similares a los obtenidos en la Figura 5.4 para ambos tipos de fluctuaciones en las distintas fases de una tormenta geomagnética. Estos resultados son consistentes con lo indicado por Simms et al. (2021), ya que no existe una diferencia significativa en la contribución de los rangos de frecuencia ULF Pc4 y Pc5 en el flujo de electrones. Dado que el rango ULF Pc5 en general tiende a obtener los valores de  $C$  más altos, y considerando la Figura 5.7, que muestra que para nuestra región de interés la interacción resonante para bajos valores de números de onda ( $m$ ) está principalmente en el rango Pc5, continuamos con el cálculo de nuevas correlaciones clasificando las tormentas geomagnéticas por su intensidad, precursor y evolución del flujo, considerando la ocurrencia de ondas solo en el rango Pc5.

Para el cálculo de los coeficientes de correlación clasificando las tormentas geomagnéticas por su intensidad (moderada o intensa), su origen (SIR o ICME) y por la evolución del flujo de electrones (aumento, disminución o sin cambio), comparamos la potencia ULF Pc5 con la evolución del flujo de electrones, ambos integrados en  $L^*$ . Además comparamos la potencia ULF Pc5 integrada en  $L^*$  con la evolución del flujo de electrones por cada  $L^*$ . Consideramos continuar con el análisis de las correlaciones por cada  $L^*$ , ya que hay cierta similitud con los resultados totales y esto nos permite realizar un análisis más descriptivo y detallado.

Presentamos los resultados en dos grupos, clasificados según la similitud en el comportamiento cualitativo de las correlaciones en las distintas alturas del cinturón de radiación y las distintas energías de los electrones. El primer grupo está compuesto por las tormentas geomagnéticas intensas, las originadas por ICME y las tormentas en las que aumenta el flujo de electrones. Mientras que el segundo grupo corresponde a tormentas geomagnéticas moderadas y las con precursor tipo SIR. Para las tormentas que sufren una disminución o no cambio del flujo, decidimos no proseguir en esta línea de investigación (consultar Apéndice B). Los resultados pueden estar marcados por una baja muestra para este tipo de eventos o a que estamos considerando la evolución del flujo de manera global, mientras que los resultados corresponden a una evolución del flujo por  $L^*$ . A continuación, presentamos los resultados

junto con su análisis respectivo. Algunas figuras se presentan en el Apéndice B, debido a su baja significancia estadística.

## 6.1. Tormentas geomagnéticas intensas, originada por ICME y aumento del flujo

La Figura 6.2 muestra los coeficientes de correlación para las tormentas geomagnéticas intensas para las fluctuaciones paralelas con su respectivo valor de  $p$ . En Main Phase, observamos altas correlaciones significativas estadísticamente para electrones con energías bajo 2.6 MeV en regiones internas del cinturón de radiación externo. El máximo valor de  $C = 0.67$  en  $L^* = 3.3$  en electrones con energías de  $E = 0.6$  MeV. En Recovery Phase, notamos fuertes correlaciones con una confianza estadística superior al 95% en altitudes de  $L^* < 4.4$ , para gran parte de las energías, a excepción de las más bajas y más altas. Por ejemplo, en  $L^* = 3.9$  para el canal de energía de 1.06 MeV obtuvimos una correlación máxima de  $C = 0.65$ . En Entire Storm, observamos que la ocurrencia de ondas ULF Pc5 correlaciona fuertemente con la evolución del flujo electrones en la región interna del cinturón de radiación externo, similar a lo obtenido en Main Phase y Recovery Phase. Las correlaciones en esta región tienen una importante confianza estadística. Obtuvimos que  $C = 0.77$  en  $L^* = 3.8$  para electrones con energía de 4.2 MeV. Valores similares de  $C$  los encontramos en energías más bajas. Para regiones externas, los valores de  $C$  son cercanos a 0 y no muestran significancia estadística.

Los resultados correspondientes a fluctuaciones perpendiculares durante tormentas geomagnéticas intensas (Figura 6.3), muestran algunas similitudes en el comportamiento de las correlaciones obtenidas en la Figura 6.2. No obstante, para Main Phase y Recovery Phase, observamos una mayor significancia estadística en el borde externo del cinturón de radiación externo, con (anti-)correlaciones más (bajas) altas. Además, en Entire Storm, las correlaciones son significativas en una región interna más acotada y para una menor cantidad de canales de energía ( $C \sim 0.75$ ).

Correlation Coefficient and p-value  
for Parallel Fluctuations for Intense storm

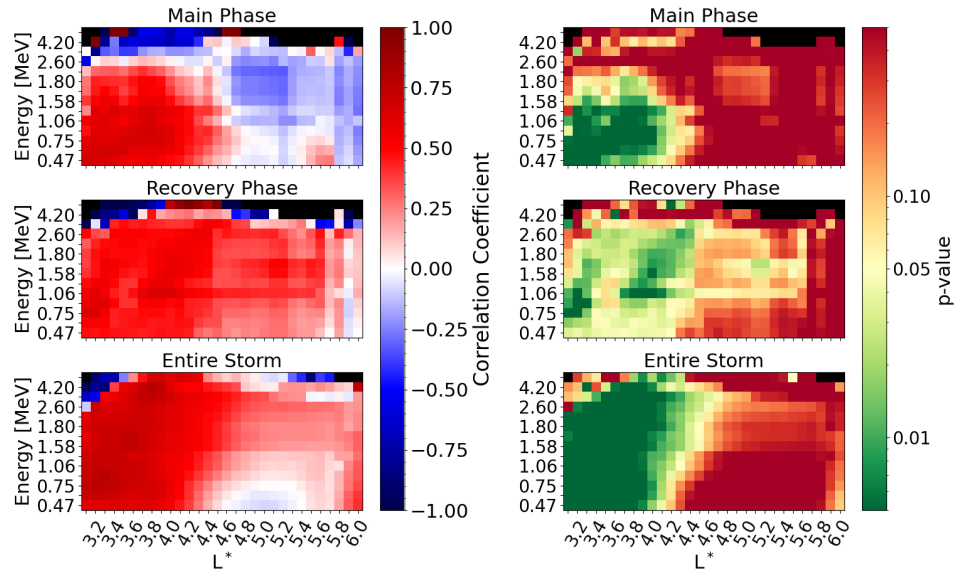


Figura 6.2: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF Pc5 integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas geomagnéticas intensas. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

Correlation Coefficient and p-value  
for Perpendicular Fluctuations for Intense storm

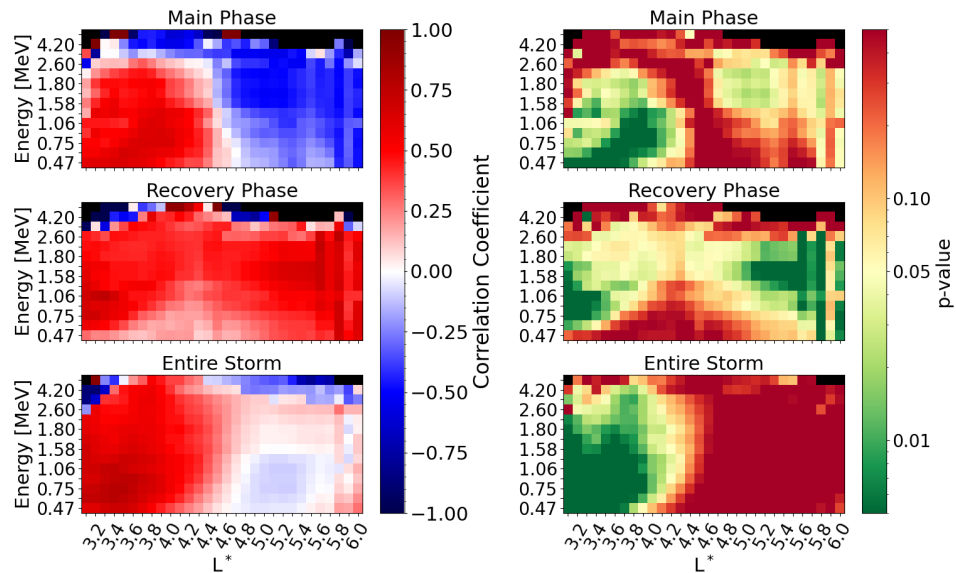


Figura 6.3: Ilustra lo mismo que la Figura 6.2, pero para fluctuaciones perpendiculares.

La Figura 6.4 muestra las correlaciones para tormentas geomagnéticas originadas por ICME para las fluctuaciones paralelas. En Main Phase, obtuvimos correlaciones estadísticamente significativas entre la potencia ULF Pc5 y el flujo de electrones para energías menores  $\sim 2$  MeV en la mitad interna del cinturón de radiación externo. El valor máximo de  $C = 0.67$  en  $L^* = 3.7$  para el canal de energía de 0.47 MeV. Por otro lado, las anticorrelaciones están dadas en las energías más altas, principalmente para la mitad externa. Sin embargo, la anticorrelación mínima es de  $C = -0.7$  en  $L^* = 3.2$  para electrones con energías ultra relativistas. En Recovery Phase tenemos fuertes correlaciones en casi todos los canales de energía en gran parte el cinturón de radiación externo. Por ejemplo, en el canal de energía de  $E = 0.47$  MeV obtuvimos un coeficiente de correlación máximo significativo de  $C = 0.7$  en  $L^* = 3.1$ . En general, la mayoría de las correlaciones más altas rondan valores similares. También notamos que desde  $4.0 < L^*$  en energías bajas y algunas medias, hay una disminución de las correlaciones, junto con una baja o nula significancia estadística. Por lo tanto, las correlaciones son más fuertes y significativas en las regiones internas y externas, pero no en el centro del cinturón de radiación externo ( $4.0 \leq L^* \leq 5.0$ ). En Entire Storm, notamos correlaciones significativas estadísticamente en  $L^* < 4.5$ . En  $L^* = 3.7$  obtenemos que  $C \sim 0.75$  para la energía más baja. En las regiones externas, notamos correlaciones sin significancia estadística, excepto en algunas energías cercanas a 1 MeV. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en las fases anteriores. A diferencia de las tormentas geomagnéticas intensas, observamos anticorrelaciones significativas en las fluctuaciones paralelas .

Correlation Coefficient and p-value  
for Parallel Fluctuations in ICME-Driver

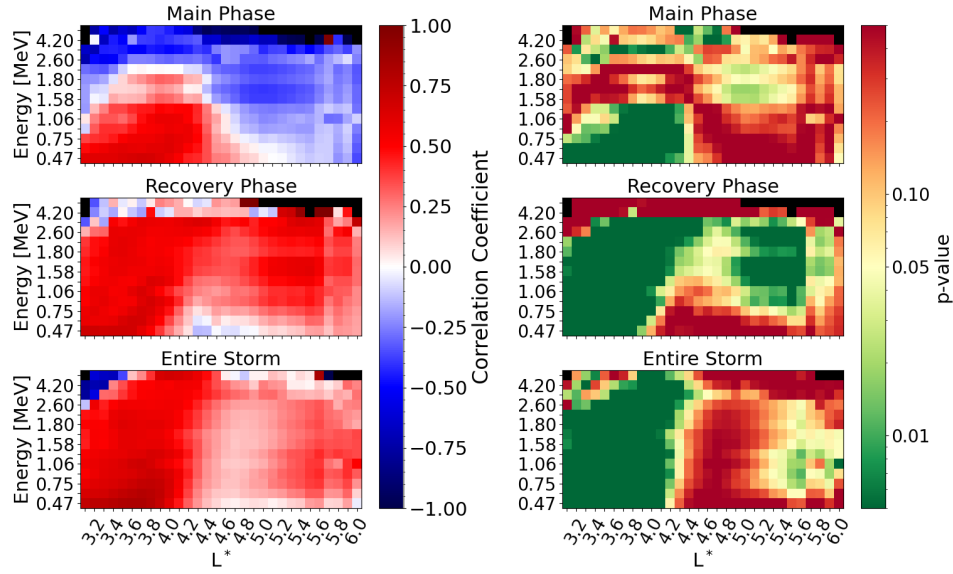


Figura 6.4: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para precursor ICME. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

La Figura 6.5 muestra las correlaciones para eventos en los que el flujo total de electrones relativistas aumenta. En Main Phase, la región interna del cinturón de radiación externo presenta principalmente correlaciones significativas para energías menores a 1.8 MeV. Mientras que para energías altas, observamos valores poco significativos. Obtuvimos un valor máximo de  $C = 0.83$  para electrones con energías de  $E = 1.08$  MeV en  $L^* = 3.2$ . En Recovery Phase, las ondas ULF Pc5 correlacionan fuertemente con la recuperación y/o aumento del flujo de electrones en varias regiones del cinturón de radiación externo. En la mitad externa en energías bajas, vemos que  $C \sim 0$ , indicando que en esta región son otros procesos los que podrían afectar la dinámica de los electrones. En  $L^* \sim 4.5$ , se observa una baja significancia estadística para casi todas las energías. En la mitad interna notamos algunas correlaciones importantes, como la que observamos en el canal de energía  $E = 3.4$  MeV para  $L^* = 3.5$ , en donde obtuvimos que  $C = 0.85$ . En Entire Storm, las ondas ULF Pc5 pueden desempeñar un papel importante en el aumento del flujo principalmente en la región interna ( $L^* < 4.0$ ), lo que coincide con los resultados de las fases anteriores. Notamos un comportamiento similar

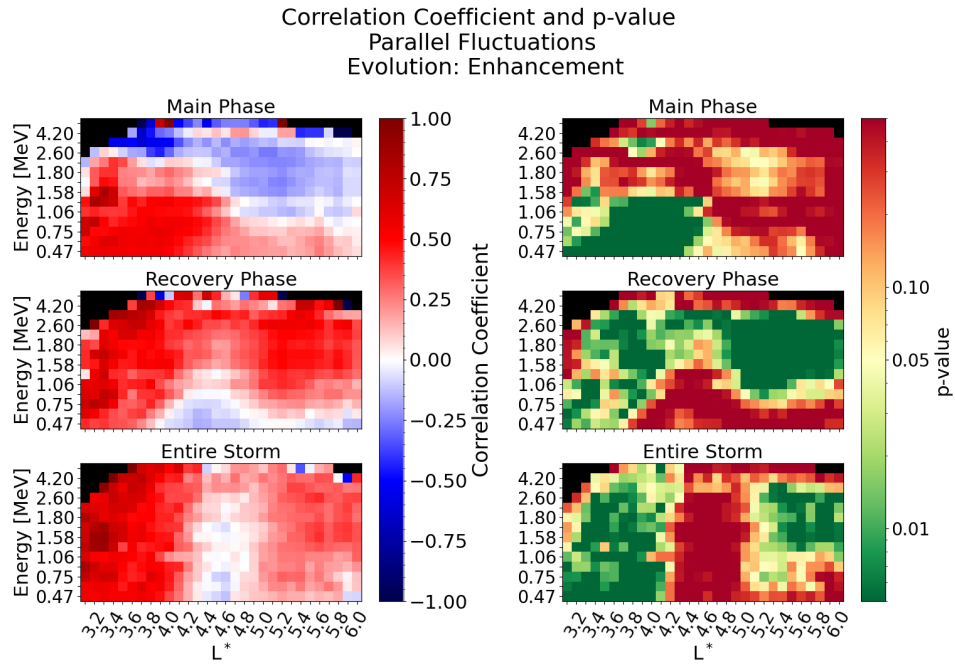


Figura 6.5: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones perpendiculares y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas geomagnéticas en que aumenta el flujo de electrones en un factor de 2. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

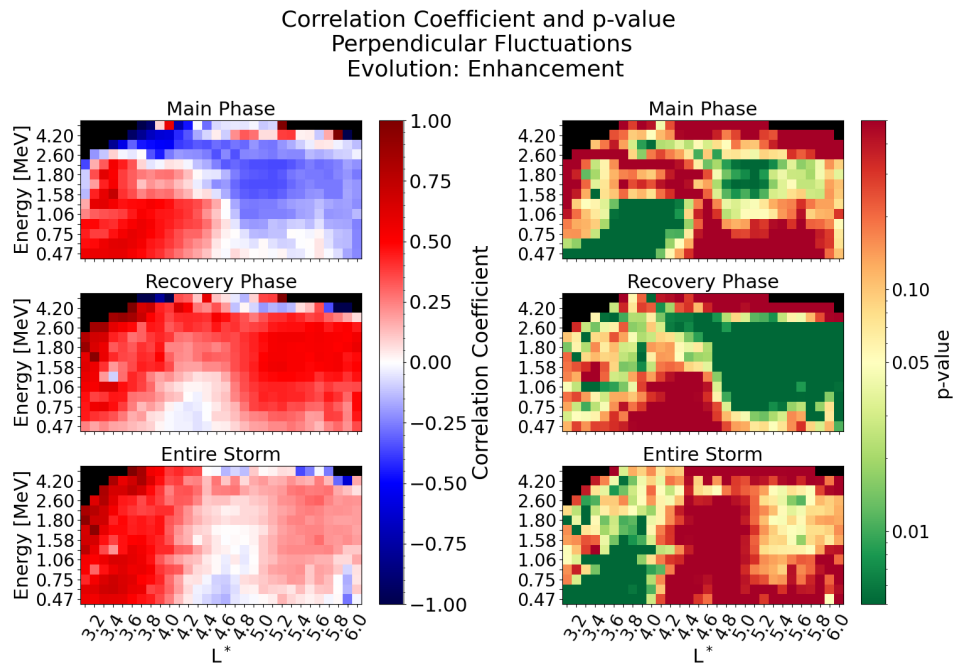


Figura 6.6: Ilustra lo mismo que la Figura 6.5, pero para fluctuaciones perpendiculares.

en el borde externo del cinturón de radiación ( $L^* > 5.0$ ). Estos resultados pueden indicar que las ondas ULF Pc5 pueden ser un mecanismo importante en la aceleración de los electrones en los bordes del cinturón de radiación externo, mientras que en el corazón existen más procesos que dominan la dinámica.

En la Figura 6.6, observamos pequeñas pero importantes diferencias en los resultados. Durante Main Phase, obtenemos anticorrelaciones significativas en la región externa para electrones con energías superiores a 1 MeV ( $C \sim -0.33$ ). Por otro lado, en Recovery Phase, la significancia estadística disminuye para la mitad interna del cinturón de radiación externo, mientras que aumenta para la mitad externa. En la región externa del cinturón de radiación las correlaciones son levemente mayores a las obtenidas en las fluctuaciones paralelas, alcanzando a  $C \sim 0.55$ . Para Entire Storm, tenemos valores de  $C$  significativos en una región mucho más acotada. Destacan los canales de energías bajo  $\sim 2$  MeV en  $L^* < 4.0$  con  $C \sim 0.7$ , siendo levemente menores a las fluctuaciones paralelas.

## 6.2. Tormentas geomagnéticas moderadas y precursor tipo SIR

La Figura 6.7 representa las correlaciones para tormentas geomagnéticas moderadas. En Main Phase muestra dos regiones; una con anticorrelaciones pero con nula significancia estadística, y una segunda región entre  $3.1 < L^* < 4.8$  para energías bajo  $\sim 1$  MeV, donde obtenemos valores de  $C$  relativamente similares y con alta significancia estadística. En  $L^* = 4.2$ , obtuvimos un coeficiente de correlación máximo  $C = 0.53$  para electrones con energía de  $E = 0.75$  MeV. Durante Recovery Phase, tenemos correlaciones con alta significancia estadística en gran parte del cinturón de radiación externo, sin embargo, esto se ve restringido para algunas de las energías más bajas y más altas. Para  $L^* > 3.9$ , en energías sobre  $\sim 1$  MeV, obtuvimos que las correlaciones más altas rondan  $C \sim 0.65$  en las regiones más externas. Por otro lado, para  $L^* < 4.0$ , obtuvimos correlaciones significativas en las energías más bajas. En esta re-

gión, en el canal de energía de 0.91 MeV obtuvimos un coeficiente de correlación máximo de  $C = 0.46$ . En Entire Storm, obtuvimos valores estadísticamente significativos en gran parte del cinturón de radiación externo, salvo para algunos  $L^*$  bajos en energías altas. Calculamos que  $C \sim 0.52$  para energías bajo 1 MeV en altitudes de  $L^* < 4.0$ . Notamos que para los casos que el valor de  $p < 0.05$ , los coeficientes de correlación respecto a los valores del primer grupo, disminuyen significativamente. Estos resultados sugieren que las características de las tormentas geomagnéticas guardan estrecha relación con los posibles efectos de las ondas ULF Pc5 con el flujo de electrones.

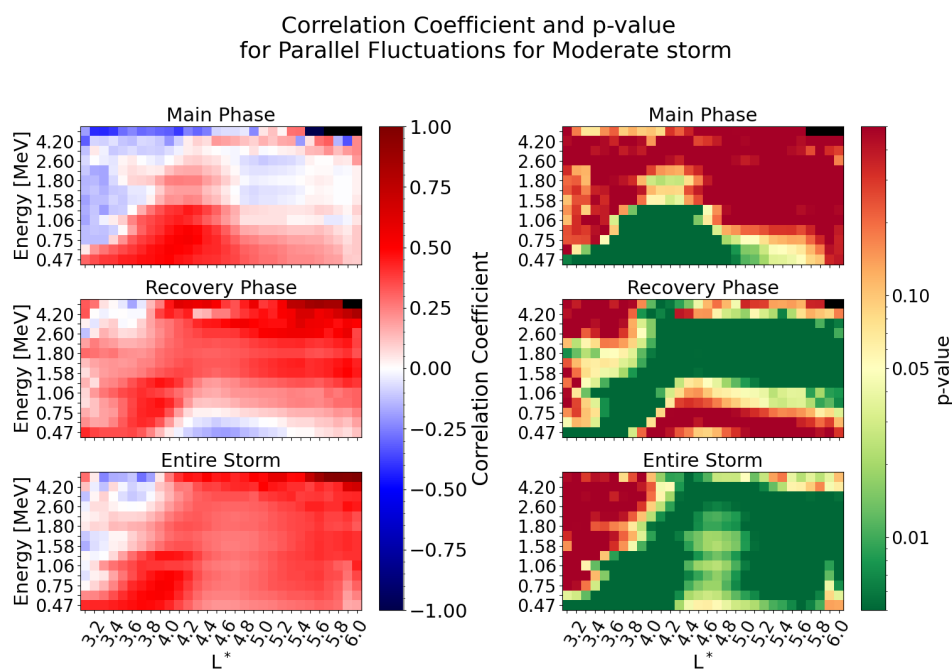


Figura 6.7: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para las tormentas moderadas. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

En la Figura 6.8, observamos las correlaciones para tormentas geomagnéticas con precursor tipo SIR para las fluctuaciones paralelas. Encontramos que en Main Phase, en energías bajo 1.08 MeV tenemos coeficientes de correlación con buena significancia estadística, especialmente en regiones cercanas a  $L^* = 4.0$ . En  $L^* = 4.5$ , obtuvimos un máximo de  $C = 0.48$  para el canal de energía de 0.6 MeV. Durante Recovery Phase, observamos fuertes correlaciones



Correlation Coefficient and p-value  
for Parallel Fluctuations in SIR-Driver

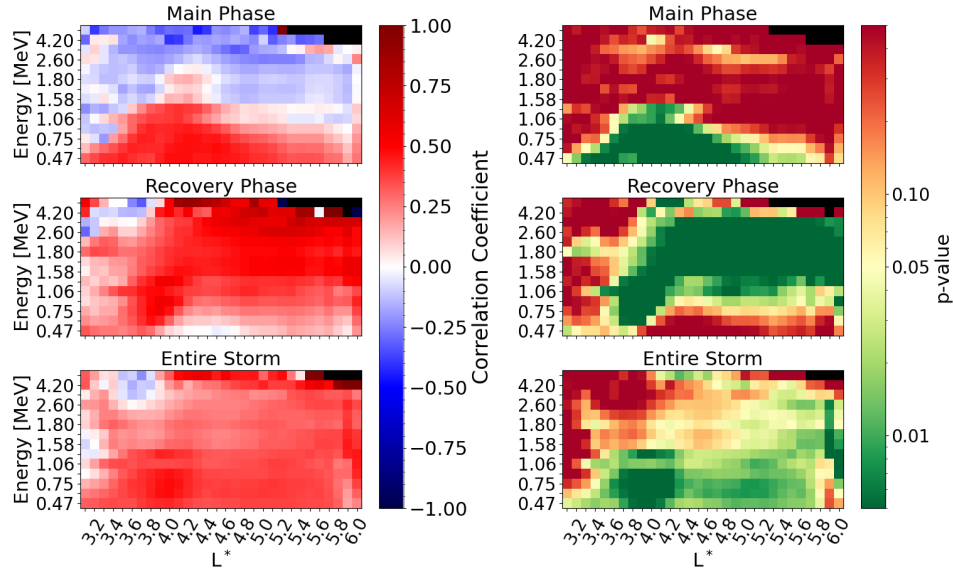


Figura 6.8: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas precedidas por SIR. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

en  $L^* > 3.6$ , coincidiendo en gran parte con una estadística significativa. Destacamos que en  $L^* \sim 5.4$  obtenemos correlaciones altas ( $C \sim 0.7 - 0.85$ ) para los canales de energía más altos. Por otro lado, en el centro del cinturón de radiación externo, observamos correlaciones nulas para las energías más bajas. Durante Entire Storm, vemos coeficientes de correlación mayores a 0 en casi todo el cinturón de radiación, pero ligeramente menores que en Recovery Phase, lo que puede deberse, en parte, a las anticorrelaciones obtenidas en Main Phase. Las correlaciones son estadísticamente significativas para energías menores a 1.08 MeV en gran parte del cinturón de radiación externo, y para energías más altas desde  $L^* \sim 5.2$ . Obtuvimos un valores de  $C \sim 0.48$  en  $L^* = 4.0$  para las energías más bajas.

En la Figura 6.9 se ilustran los resultados para las fluctuaciones perpendiculares, los cuales cualitativamente tienen un comportamiento similar en a los de la Figura 6.8 en las distintas energías de los electrones y regiones del cinturón de radiación externo. Sin embargo, podemos apreciar algunas diferencias entre las fases de las tormentas. En Main Phase, notamos

Correlation Coefficient and p-value  
for Perpendicular Fluctuations in SIR-Driver

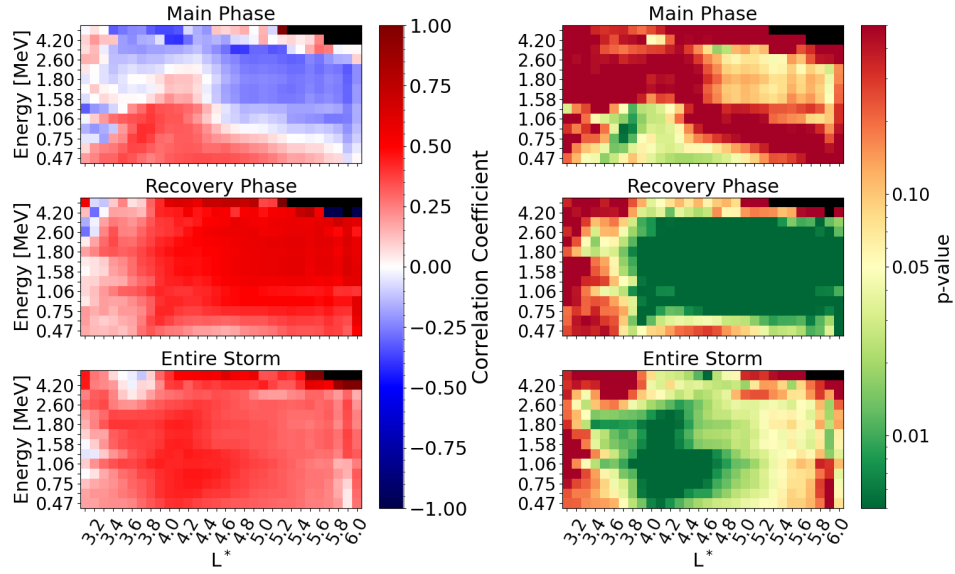


Figura 6.9: Coeficiente de correlación (izquierda) y valor  $p$  (derecha) para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones perpendiculares y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas precedidas por SIR. Los paneles muestran Main Phase (arriba), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (abajo). El color negro corresponde a que no se calculó ningún valor de  $C$ .

correlaciones más bajas y una menor significancia estadística, logrando valores de  $C \sim 0.4$ . En Recovery Phase, obtenemos altas correlaciones ( $C \sim 0.63$ ) y una mayor cantidad de resultados estadísticamente significativos respecto a las fluctuaciones paralelas. Mientras que en Entire Storm, la significancia estadística se centra en regiones cercanas entre  $L^* = 3.5$ – $5.0$  para la mayoría de las energías ( $C \sim 0.45$ ). En la región más externa, la significancia estadística disminuye en conjunto con las correlaciones. Por lo cual, si bien el comportamiento de las correlaciones tiene un patrón similar, los distintos modos de onda afectan de manera distinta la dinámica del flujo de electrones en distintas regiones del cinturón de radiación externo.

### 6.3. Discusión y análisis

Hemos expandido el contenido del Capítulo 5 considerando distintos rangos de frecuencia de ondas ULF y clasificando las tormentas geomagnéticas bajo los precursores ICME y SIR, intensidades moderadas e intensas y según si el flujo de electrones en el cinturón de radiación externo aumentaba, disminuía o no cambiaba. Al considerar distintos espectros de frecuencia, encontramos que no existen diferencias significativas en la contribución de las distintas ondas ULF en la evolución del flujo de electrones. Al clasificar las tormentas geomagnéticas, hemos identificado dos grupos que se caracterizan por la similitud cualitativa de los resultados, mostrando correlaciones estadísticamente significativas para canales de energía y regiones similares del cinturón de radiación externo. El primer grupo abarca las tormentas geomagnéticas intensas, las originadas por ICME y las que experimentan un aumento en el flujo de electrones. En general, las tormentas geomagnéticas precursadas por ICME suelen generar tormentas intensas, por lo que suelen tener variaciones similares en el índice SYM-H (Echer et al., 2013), por lo que los resultados podrían estar dados por características similares en las tormentas. Además, Turner et al. (2019) indicaron que los eventos ICME muestran un alto porcentaje de aumento del flujo, lo que podría explicar la similitud en las correlaciones. El segundo grupo muestra las tormentas geomagnéticas moderadas y aquellas originadas por SIR, que coinciden en mostrar una menor variabilidad en el índice SYM-H (Echer et al., 2013).

El primer grupo lo encontramos desde la Figura 6.2 hasta la Figura 6.6. Hemos comparado la potencia ULF Pc5 y la evolución del flujo de electrones en cada  $L^*$  considerando un intervalo de  $\Delta L^* = 0.1$ . Observamos que para este tipo de tormentas podemos dividir el cinturón de radiación externo en tres regiones: la región interna ( $L^* < 4.0$ ), el corazón del cinturón de radiación externo ( $4.0 \leq L^* \leq 5.0$ ) y la región externa ( $5.0 < L^*$ ). Estas tres zonas muestran diferentes correlaciones y/o significancia estadística, indicando que las ondas ULF Pc5 podrían tener más relevancia en la dinámica de los electrones relativistas en los bordes del cinturón de radiación externo. Además, los distintos modos de ondas, representado por

el tipo de fluctuaciones que consideramos, pueden contribuir en mayor o menor medida a los cambios en los flujos de electrones.

En Main Phase, observamos que la región más interna del cinturón de radiación externo, para energías inferiores a 2 MeV, podría experimentar un aumento en el flujo de electrones con una mayor presencia de ondas ULF Pc5 para ambos tipos de fluctuaciones. Esto podría deberse a una rápida energización de los electrones de baja energía, consistente con lo planteado por Turner et al. (2015). En las regiones externas, encontramos anticorrelaciones que varían según la clasificación de la tormenta y del tipo de fluctuación considerado. Esto sugiere que durante una disminución del flujo, puede haber una alta ocurrencia de ondas o que otros mecanismos están dominando este proceso. Las fluctuaciones paralelas tienden a mostrar más correlaciones estadísticamente significativas en las regiones internas, lo que podría estar impulsado por la resonancia con la componente azimutal del campo eléctrico de las ondas. En cambio, las fluctuaciones perpendiculares indican más anticorrelaciones en las regiones externas, lo que es coherente con la pérdida por efectos de la magnetopausa y la difusión radial mencionada por Turner et al. (2015). La compresión del campo magnético y la componente radial del campo eléctrico de las ondas, pueden favorecer fenómenos de resonancia de deriva (Li et al., 2021). Es común notar que en parte del corazón del cinturón de radiación externo no encontramos correlaciones significativas, lo que indica que pueden ser múltiples los procesos que juegan un rol en dicha región.

En Recovery Phase, observamos que los distintos modos de onda se correlacionan con el aumento del flujo de electrones en los bordes del cinturón de radiación externo. Para  $L^* = 4.0-5.0$  las correlaciones son cercanas a cero o tienen nula significancia estadística. Las tormentas geomagnéticas que aumentan el flujo de electrones y las originadas por ICME muestran mayores correlaciones en la región interna y externa del cinturón de radiación externo para las fluctuaciones paralelas, lo que coincide con la componente azimutal del campo eléctrico en las ondas compresivas. Para las tormentas intensas, esto ocurre en las fluctuaciones perpendiculares, pudiendo ser resultado de la compresión de campo magnético, coherente

con el aumento por difusión radial (Elkington et al., 2003; Ukhorskiy et al., 2005; Zong et al., 2017). Por otro lado, en las tormentas que aumentan el flujo de electrones, las fluctuaciones perpendiculares se relacionan mayormente con el aumento del flujo en regiones externas.

Al igual que en los resultados del Capítulo 5, Entire Storm parece mostrar un comportamiento aditivo respecto a Main Phase y Recovery Phase, por lo que advertimos que la interacción onda-partícula en estos eventos puede ser importante para la energización de electrones. Además los distintos modos de onda tienen distintas predominancia en las distintas regiones del cinturón de radiación externo y en las distintas fases de una tormenta geomagnética.

Para el segundo grupo, desde la Figura 6.7 hasta la Figura 6.9, hemos realizado un análisis idéntico al del primero grupo. Sin embargo, las correlaciones entre la potencia de las ondas ULF Pc5 y la evolución del flujo de electrones varían con respecto al primer grupo, tanto en los canales de energía como en las regiones del cinturón de radiación afectadas. En estos eventos se presentan importantes diferencias entre las fases de las tormentas geomagnéticas.

En Main Phase, las ondas ULF Pc5 pueden desempeñar un papel importante en las energías más bajas ( $< 1$  MeV), para  $L^* \sim 4.0$ . Las correlaciones se extienden entre  $3.0 \leq L^* \leq 5.0$ , pero en energías cada vez menores mientras consideramos regiones más extremas. En este tipo de eventos, las fluctuaciones paralelas indican mayores correlaciones que las fluctuaciones perpendiculares, sin embargo, los distintos modos de onda podrían acelerar a los electrones en la región descrita. En esta fase de las tormentas geomagnéticas, los cambios en los electrones ultrarelativistas no correlacionan con ondas ULF Pc5 en tormentas de intensidad moderadas y originadas por SIR.

En Recovery Phase, observamos que las ondas ULF Pc5 pueden jugar un rol importante en la aceleración de electrones en  $L^*$  sobre  $3.5 - 4.0$  para la mayoría de las energías, excepto para algunas de las energías más altas y más bajas. En este tipo de eventos, las ondas ULF Pc5 tienden a perdurar más tiempo (Borovsky and Denton, 2006), lo que puede generar estos aumentos de flujo durante la fase de recuperación. Las ondas ULF Pc5 durante tormentas

geomagnéticas originadas por SIR suelen estar más correlacionadas con el aumento del flujo de electrones durante la fase de recuperación que las tormentas moderadas. Las fluctuaciones paralelas (en moderadas y SIR) muestran una menor significancia estadística que las fluctuaciones perpendiculares (en SIR).

En Entire Storm también observamos un posible carácter aditivo. Destacamos que en estos eventos, la interacción onda-partícula podría ser relevante en gran parte del cinturón de radiación externo; no obstante, vale la pena analizar con más detalle el tipo de evento para estudiar qué energías muestran mayores correlaciones (tormentas moderadas u originada por SIR). Las fluctuaciones paralelas muestran correlaciones con el aumento del flujo en gran parte del cinturón de radiación externo, mientras que las fluctuaciones perpendiculares muestran correlaciones significativas principalmente para las regiones internas. La compresión radial de los campos eléctricos y magnéticos podrían generar este aumento en los flujos hacia regiones más internas.

Los resultados indican que la interacción de resonancia podría ser importante en la evolución del flujo de electrones. Las altas correlaciones obtenidas en las distintas regiones del cinturón de radiación externo son coherentes con lo expuesto por Pandya et al. (2019), quien señala que en  $L = 5.0$ , las tormentas provocadas por SIR muestran un incremento en el flujo en la mitad de los eventos, mientras que los eventos originados por ICME solo en un tercio de las tormentas. Sin embargo, en  $L = 3.0$ , las tormentas con precursores ICME tienden a generar un aumento del flujo, lo que en nuestro caso se correlaciona con la ocurrencia de ondas ULF Pc5. Con los principales resultados y análisis mostrados en los Capítulos 5 y 6, procedemos a plantear nuestras principales conclusiones sobre la relación existente entre la ocurrencia de ondas ULF y la evolución del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo durante tormentas geomagnéticas.

# Capítulo 7

## Conclusión

Esta tesis, tiene como fin ampliar el conocimiento en la dinámica no lineal de los electrones en el cinturón de radiación externo durante tormentas geomagnéticas. Para contribuir en esta línea de investigación, llevamos a cabo un estudio estadístico sobre cuan correlacionada está la ocurrencia de ondas ULF entre 1 mHz y 22.5 mHz con la evolución del flujo de electrones relativistas entre 0.47 MeV y 5.2 MeV durante distintas fases de una tormenta geomagnética. Para esto estudiamos 101 eventos entre enero de 2013 y noviembre de 2018 usando los datos medidos por la misión Van Allen Probes, en particular, usamos mediciones de campos y partículas de los instrumentos EMFISIS, ECT-MagEIS y ECT-REPT.

Para estudiar la ocurrencia de ondas ULF, calculamos la potencia magnética asociada a las fluctuaciones paralelas y perpendiculares respecto al campo magnético de fondo. Estas fluctuaciones son originadas por modos de ondas poloidales, toroidales y compresivos, de acuerdo con la teoría de ondas MHD. Comparamos la ocurrencia de estas ondas con la evolución del flujo de electrones relativistas durante distintas fases de una tormenta geomagnética: la fase principal (Main Phase), la fase de recuperación (Recovery Phase) y la tormenta completa (Entire Storm).

Nuestros resultados de la primera parte del trabajo, correspondientes al cálculo de correla-

ciones entre flujo de electrones relativistas y la potencia magnética ULF integrada, muestran que las fluctuaciones paralelas correlacionan mayormente con el aumento del flujo de electrones en comparación con las fluctuaciones perpendiculares en distintas regiones del cinturón de radiación externo y para diversos rangos de energías durante las diferentes fases de la tormenta. Los valores de  $C > 0.4$  sugieren que una mayor ocurrencia de ondas ULF provoca un aumento del flujo de electrones.

Durante Main Phase, observamos que las ondas ULF podrían jugar un rol importante en la rápida energización de electrones con energías relativistas más bajas. Durante Recovery Phase, encontramos correlaciones estadísticamente significativas (valor de  $p < 0.05$ ) para gran parte de las energías, lo que indica que esta fase podría ser crucial para la aceleración de electrones con energías más altas, ya sea mediante la recuperación o el aumento del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo. En Entire Storm, se ilustra que las ondas ULF correlacionan con el aumento del flujo de electrones con una importante significancia estadística. Estos resultados, en general, parecen mostrar un carácter aditivo, es decir, son producto de la combinación de los coeficientes de correlación obtenidos en Main Phase y Recovery Phase.

En segundo lugar, contrastamos la potencia ULF integrada en  $L^*$  (en el mismo rango de frecuencias) con la evolución del flujo de electrones para cada  $L^*$ , considerando  $3.1 \leq L^* \leq 6.0$ . Durante Main Phase, similar al análisis global, las energías más bajas en regiones interiores muestran importantes correlaciones ( $C \sim 0.5$ ), mientras que las altas energías en regiones externas se asocian con anti-correlaciones ( $C \sim -0.36$ ). Recovery Phase indica que las ondas ULF podrían ser significativas como mecanismo de aceleración de electrones, especialmente en los bordes del cinturón de radiación externo ( $C \sim 0.55-0.65$ ). En las regiones centrales, como en  $L^* \sim 4.5$  para energías bajas, los coeficientes de correlación obtenidos son cercanos a cero y presentan nula significancia estadística. Durante Entire Storm, observamos que las correlaciones son elevadas en la región interna del cinturón de radiación externo ( $C \sim 0.55-0.65$ ) y tienden a disminuir a partir de  $L^* = 4.5$ . Las diferencias observadas en  $L^* =$



4.0–4.5 sugieren que las ondas ULF tienen un impacto diferente en el centro y en los bordes del cinturón de radiación externo. Además, notamos que la Entire Storm, en general, muestra un carácter aditivo de las fases previas, es decir, los coeficientes de correlación parecen sumarse entre Main Phase y Recovery Phase.

Notamos que las correlaciones correspondientes a las fluctuaciones paralelas suelen alcanzar valores mayores que las perpendiculares, mientras que estas últimas presentan menores anti-correlaciones. Observamos que las fluctuaciones paralelas proporcionan una estadística más significativa en las distintas fases de una tormenta geomagnética. Las fluctuaciones paralelas están relacionadas con el modo de onda compresional, mientras que las ondas de modo poloidal y toroidal están asociadas con cambios perpendiculares al campo magnético. Además, pudimos observar que en nuestra región de interés se puede encontrar resonancia onda-partícula, dependiendo del número de onda azimutal ( $m$ ). Para ondas con valores de  $m$  más bajos, encontraremos interacción resonante para electrones de energías más altas (5.2 MeV) con ondas ULF Pc5 inferiores a 5 mHz. Por otro lado, para  $m$  altos, tenemos resonancia onda-partícula para las frecuencias de onda ULF Pc5 superiores a 5 mHz en electrones con energías más bajas (0.47 MeV). Valores intermedios de  $m$  logran interacción resonante con electrones en una amplia gama de energías para distintas frecuencias de ondas ULF Pc5. Una de las preguntas que deja abierta nuestro trabajo es identificar la causalidad de los procesos de energización de partículas y determinar en qué fase de la tormenta predominan estas ondas. Por lo tanto, sería importante añadir el parámetro  $m$  de manera experimental.

Estos primeros hallazgos sugieren que la interacción onda-partícula podría desempeñar un papel relevante en las distintas regiones del cinturón de radiación externo para las diversas energías de los electrones durante las diferentes fases de una tormenta geomagnética. Encontramos que en nuestra región de interés existe la posibilidad de interacción resonante entre ondas ULF y electrones relativistas. Además, considerando que una mayor ocurrencia de ondas ULF correlaciona con un aumento del flujo de electrones, es posible que las ondas ULF actúen como un mecanismo de aceleración durante las tormentas geomagnéticas. Estos resul-

tados nos abren nuevas líneas de investigación, particularmente en cuanto a cómo varían estas correlaciones si clasificamos las tormentas geomagnéticas según diferentes características.

Para evaluar si un rango de frecuencias más amplio cambia las correlaciones obtenidas previamente, hemos ampliado este estudio considerando ondas ULF en los rangos de frecuencia Pc4, Pc5 y Pc4+Pc5. Encontramos que los valores de las correlaciones son similares entre sí, por lo que no existen diferencias significativas. Estos resultados son consistentes con lo indicado por Simms et al. (2021). Basados en la Ecuación 3.1, continuamos ampliando la estadística de correlaciones considerando solo el rango de frecuencia Pc5. Clasificamos las tormentas geomagnéticas según su intensidad (intensa y moderada), su mecanismo de origen (ICME y SIR), y el tipo de evolución del flujo de electrones (aumento, disminución o sin cambios). Encontramos una baja significancia estadística en los resultados asociados a una disminución o sin cambio en el flujo de electrones. Algunas propuestas para investigaciones futuras incluyen considerar la evolución del flujo por cada  $L^*$ , ya que en distintos  $L^*$  se pueden observar diferentes tipos de evoluciones (Moya et al., 2017; Turner et al., 2019). Además, sería importante considerar nuevas misiones espaciales que complementen la limitada cantidad de datos proporcionados por la misión Van Allen Probes debido a su tiempo de duración.

Al clasificar las tormentas, hemos decidido continuar con el análisis de los resultados por cada  $L^*$ , ya que nos entregan un mayor detalle de las correlaciones entre la evolución del flujo y la ocurrencia de ondas ULF Pc5. Dada la similitud de algunos resultados, agrupamos las tormentas en dos grupos: i) Tormentas geomagnéticas intensas, originadas por ICME, y aquellas que experimentan un aumento del flujo. ii) Tormentas geomagnéticas de intensidad moderada y aquellas originadas por SIR.

En el primer grupo, notamos que estos eventos marcan tres regiones en el cinturón de radiación externo, indicando principalmente correlaciones significativas en los bordes internos y externos. Las tormentas intensas y las originadas por ICME muestran importantes correlaciones en las regiones internas ( $C \sim 0.65$ ), lo que sugiere que el mecanismo de aceleración por interacción onda-partícula es relevante. Estas ondas también podrían contribuir a la re-

recuperación del borde externo del cinturón de radiación externo si este sufre una disminución del flujo de electrones debido a difusión o transporte radial ( $C \sim 0.7$ ). En el segundo grupo, durante la Main Phase, las ondas ULF Pc5 pueden desempeñar un papel importante en el aumento del flujo para las energías más bajas ( $C \sim 0.5$ ), mientras que en la Recovery Phase, esto ocurre para las regiones externas ( $L^* > 4.0$ ) en la mayoría de las energías, excepto para algunas de las más altas y bajas. Estos resultados se sustentan en la observación de Borovsky and Denton (2006) de que, durante estos eventos, las ondas ULF Pc5 tienden a durar más tiempo, lo que podría generar aumentos de flujo en regiones más altas. Para ambos grupos, notamos que, en general, Entire Storm parece mostrar un carácter aditivo entre Main Phase y Recovery Phase, por lo que los coeficientes de correlación parecen ser el resultado de los valores de  $C$  obtenidos para las distintas regiones y energías de electrones durante las fases previas.

En el estudio del Capítulo 6, al clasificar las tormentas geomagnéticas según el precursor, intensidad y evolución del flujo, obtuvimos (anti-)correlaciones más (bajas) altas que en los resultados del Capítulo 5. En Main Phase, encontramos correlaciones estadísticamente significativas para las fluctuaciones paralelas, mientras que las anti-correlaciones se asocian mayormente a las fluctuaciones perpendiculares, alcanzando valores de  $C = 0.85$  y  $C = -0.5$ , respectivamente. Esto último podría explicarse por posibles interacciones resonantes y compresiones del campo magnético, respectivamente, coherente con lo propuesto por Li et al. (2021). Además, ciertas variaciones en los flujos pueden deberse a cambios de densidad y presión, como menciona Kivelson (2006)<sup>1</sup>, la propagación del modo de onda rápido provoca estas fluctuaciones. En Recovery Phase, ambos modos de ondas están fuertemente correlacionados con la evolución del flujo de electrones ( $C \sim 0.8$ ), pero las fluctuaciones perpendiculares toman mayor protagonismo en esta fase de la tormenta. El predominio del modo de onda MHD depende de la clasificación considerada; por lo tanto, ambos modos de ondas pueden energizar las partículas, contribuyendo a la recuperación y/o aumento del flujo de electrones. A partir de este análisis, sería relevante realizar un estudio específico de los tipos de onda

---

<sup>1</sup>Capítulo 11: Pulsations and Magnetohydrodynamic Waves

que interactúan con los electrones y profundizar en la dinámica, ya sean modos poloidales, toroidales o compresionales, así como incluir información del campo eléctrico.

Este trabajo contribuye a la comprensión de la dinámica de los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo y dejar abiertos nuevos desafíos que permitan profundizar en esta línea de investigación. Comprender estos fenómenos puede contribuir significativamente al estudio del clima espacial y ayudar a ahorrar costos relacionados con la tecnología electrónica. Reconocemos que múltiples parámetros y factores pueden influir (o no) en la dinámica del flujo de electrones en el cinturón de radiación externo, aunque no fueron incluidos en nuestro análisis. Por ejemplo, el comportamiento de los electrones relativistas, especialmente durante eventos geomagnéticos, involucra pérdidas debido a efectos de la magnetopausa, ondas tipo EMIC, y aceleraciones debido a ondas coro o por el transporte de partículas. Mientras estos factores son importantes para entender completamente la dinámica del cinturón de radiación, caen fuera del alcance específico de nuestra investigación.

Esperamos que las proyecciones trabaja contribuyan a una comprensión más completa de los mecanismos subyacentes. Considerar nuevos índices como AE, estudiar la evolución del flujo por cada  $L^*$ , el impacto de la magnetopausa, entre otros, también podrían ser nuevos parámetros para clasificar nuestras tormentas geomagnéticas. Un estudio local en lugar de global también podría proporcionar detalles sobre la causalidad de estos procesos. Esta tesis ha sido una importante exploración en el análisis de ondas en un plasma magnetizado, dando pie a futuras investigaciones más detalladas sobre el comportamiento de los electrones en el cinturón de radiación.

# Apéndice A

## Lista de tormentas

Tabla A.1: Lista de tormentas geomagnéticas - Set de datos 1

Tiempo SYM-H min	Mínimo SYM-H
17-01-13 18:19	-58
26-01-13 22:19	-62
01-03-13 10:12	-76
17-03-13 20:28	-132
21-03-13 03:54	-68
29-03-13 04:05	-66
24-04-13 18:11	-52
01-05-13 19:10	-67
18-05-13 03:40	-67
25-05-13 05:46	-65
01-06-13 07:48	-137
29-06-13 06:34	-111
06-07-13 08:33	-80
10-07-13 07:35	-57
14-07-13 23:25	-77
05-08-13 02:20	-56
16-08-13 04:29	-54
27-08-13 21:43	-64
02-10-13 06:19	-90
09-10-13 00:41	-77
15-10-13 03:18	-52
30-10-13 23:20	-57
07-11-13 12:34	-52
09-11-13 08:14	-79

Tabla A.2: Lista de tormentas geomagnéticas - Set de datos 2

Tiempo SYM-H min	Mínimo SYM-H
11-11-13 07:13	-68
08-12-13 08:30	-72
19-02-14 08:23	-127
22-02-14 01:31	-63
27-02-14 23:24	-101
12-04-14 08:30	-92
30-04-14 09:10	-76
04-05-14 05:58	-58
08-05-14 08:50	-62
08-06-14 06:50	-72
27-08-14 18:18	-90
12-09-14 23:03	-97
09-10-14 06:20	-50
14-10-14 18:38	-52
20-10-14 17:10	-57
28-10-14 01:52	-58
10-11-14 17:07	-63
16-11-14 07:24	-51
22-12-14 05:25	-65
04-01-15 16:42	-79
07-01-15 11:00	-135
26-01-15 10:30	-54
02-02-15 06:35	-52
17-02-15 23:55	-70

Tabla A.3: Lista de tormentas geomagnéticas - Set de datos 3

Tiempo SYM-H min	Mínimo SYM-H
24-02-15 03:36	-76
02-03-15 08:51	-70
17-03-15 22:47	-234
11-04-15 09:36	-89
16-04-15 23:29	-88
13-05-15 06:59	-98
19-05-15 02:55	-64
08-06-15 07:45	-105
23-06-15 04:24	-208
05-07-15 04:52	-87
13-07-15 10:54	-71
23-07-15 07:28	-83
16-08-15 07:37	-94
23-08-15 08:34	-62
27-08-15 20:32	-101
09-09-15 08:03	-113
11-09-15 14:21	-95
20-09-15 11:05	-84
07-10-15 22:23	-124
04-11-15 13:01	-106
07-11-15 06:05	-106
14-12-15 19:04	-60
20-12-15 22:49	-170
01-01-16 01:07	-117
20-01-16 16:42	-95
03-02-16 02:52	-60
18-02-16 00:28	-60
06-03-16 21:20	-110
16-03-16 23:41	-69
02-04-16 22:49	-66
08-04-16 00:27	-67
13-04-16 01:09	-70
16-04-16 20:47	-64
02-05-16 03:19	-56

Tabla A.4: Lista de tormentas geomagnéticas - Set de datos 4

Tiempo SYM-H min	Mínimo SYM-H
08-05-16 08:15	-105
06-06-16 06:47	-55
25-07-16 17:17	-51
03-08-16 06:49	-63
23-08-16 21:13	-83
02-09-16 01:53	-74
04-10-16 04:19	-57
13-10-16 23:45	-114
25-10-16 22:57	-81
29-10-16 07:25	-78
03-11-16 08:51	-52
10-11-16 15:21	-55
25-11-16 06:38	-53
21-12-16 15:41	-52
01-03-17 22:17	-74
27-03-17 14:45	-86
04-04-17 07:06	-50
22-04-17 23:58	-53
28-05-17 07:13	-142
16-07-17 15:51	-67
31-08-17 11:48	-64
08-09-17 01:08	-146
13-09-17 00:12	-65
28-09-17 05:55	-74
14-10-17 05:36	-68
08-11-17 04:04	-89
21-11-17 06:50	-60
20-04-18 09:35	-86
06-05-18 02:31	-66
26-08-18 07:11	-206
11-09-18 10:07	-64
07-10-18 21:53	-56
05-11-18 06:02	-66

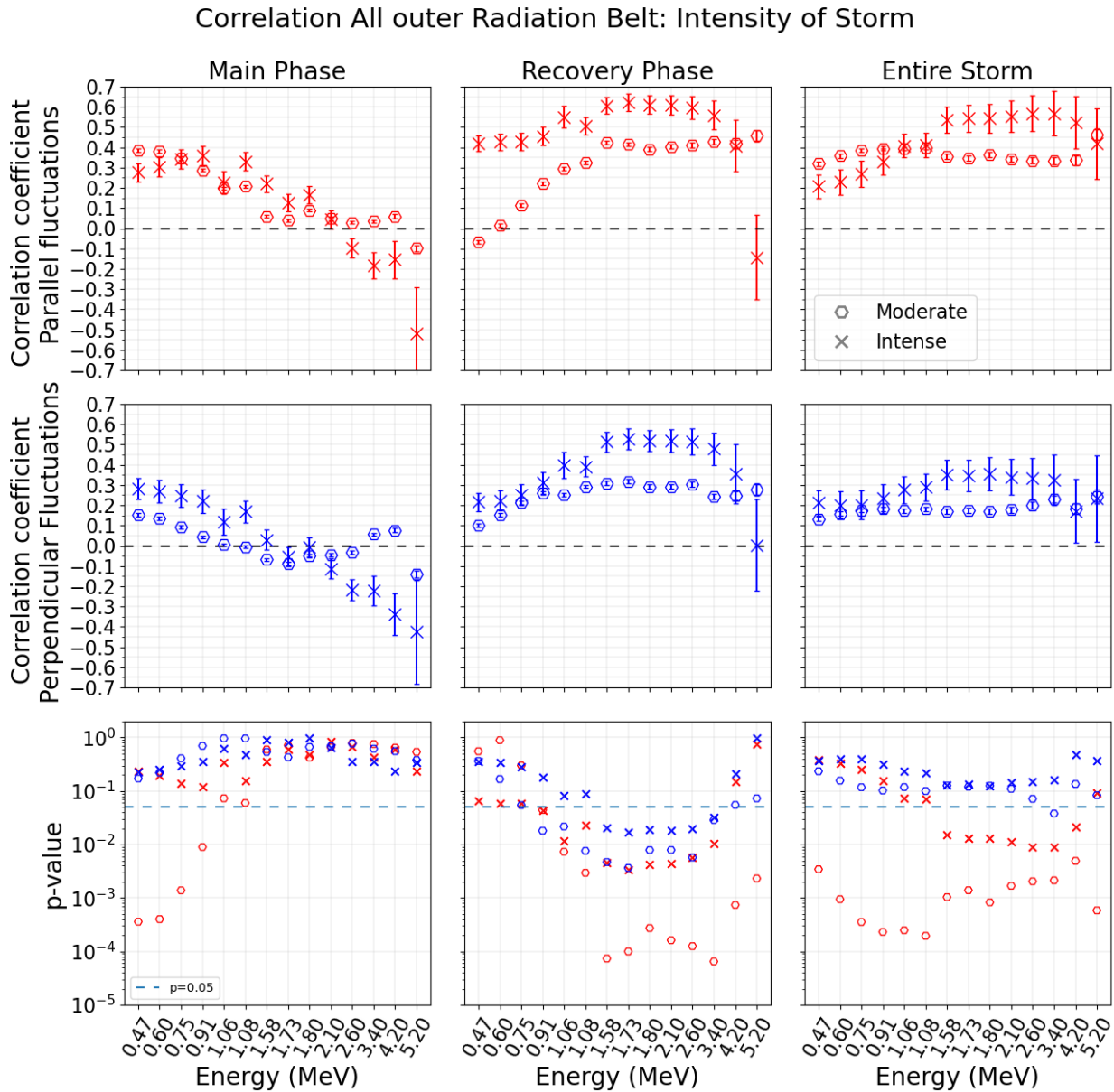
# Apéndice B

## Resultados complementarios

A continuación presentamos las figuras mencionadas en el Capítulo 6, las cuales corresponde a resultados con una menor significancia estadística en comparación a los presentado previamente. Primero ilustramos las correlaciones entre la evolución del flujo de electrones y la potencia ULF integrados en  $L^*$  en el cinturón de radiación externo. Esto lo realizamos para tormentas geomagnéticas clasificadas por su intensidad, su precursor y evolución del flujo de electrones. Tenemos las fases de la tormenta en las columnas: Main Phase (izquierda), Recovery Phase (centro) y Entire Storm (derecha). Las filas representan a: fluctuaciones paralelas (arriba, rojo), fluctuaciones perpendiculares (centro, azul) y valor de  $p$  (abajo) que lo representamos con el color dependiendo del tipo de fluctuación. La simbología corresponde al tipo de clasificación de la tormenta geomagnética. La línea negra en los paneles superiores y centrales indica  $C = 0$ . La línea azul claro en los paneles inferiores indica el umbral de valor de  $p$  del 5% ( $p = 0.05$ ).

Las correlaciones totales, en general, muestran un carácter aditivo en  $L^*$ . Es decir, los valores de  $C$  obtenidos para cada energía, parecen ser el resultado de una superposición de los valores de  $C$  distintos  $L^*$  mostrados en el Capítulo 6.

En la Figura B.1, observamos las correlaciones y valores de  $p$  totales según la intensidad de la tormenta, ya sea, intensa o moderada.





La Figura B.2 indica las correlaciones y valores de  $p$  totales para la clasificación de la tormenta según el precursor de tormenta, ya sea ICME o CIR.

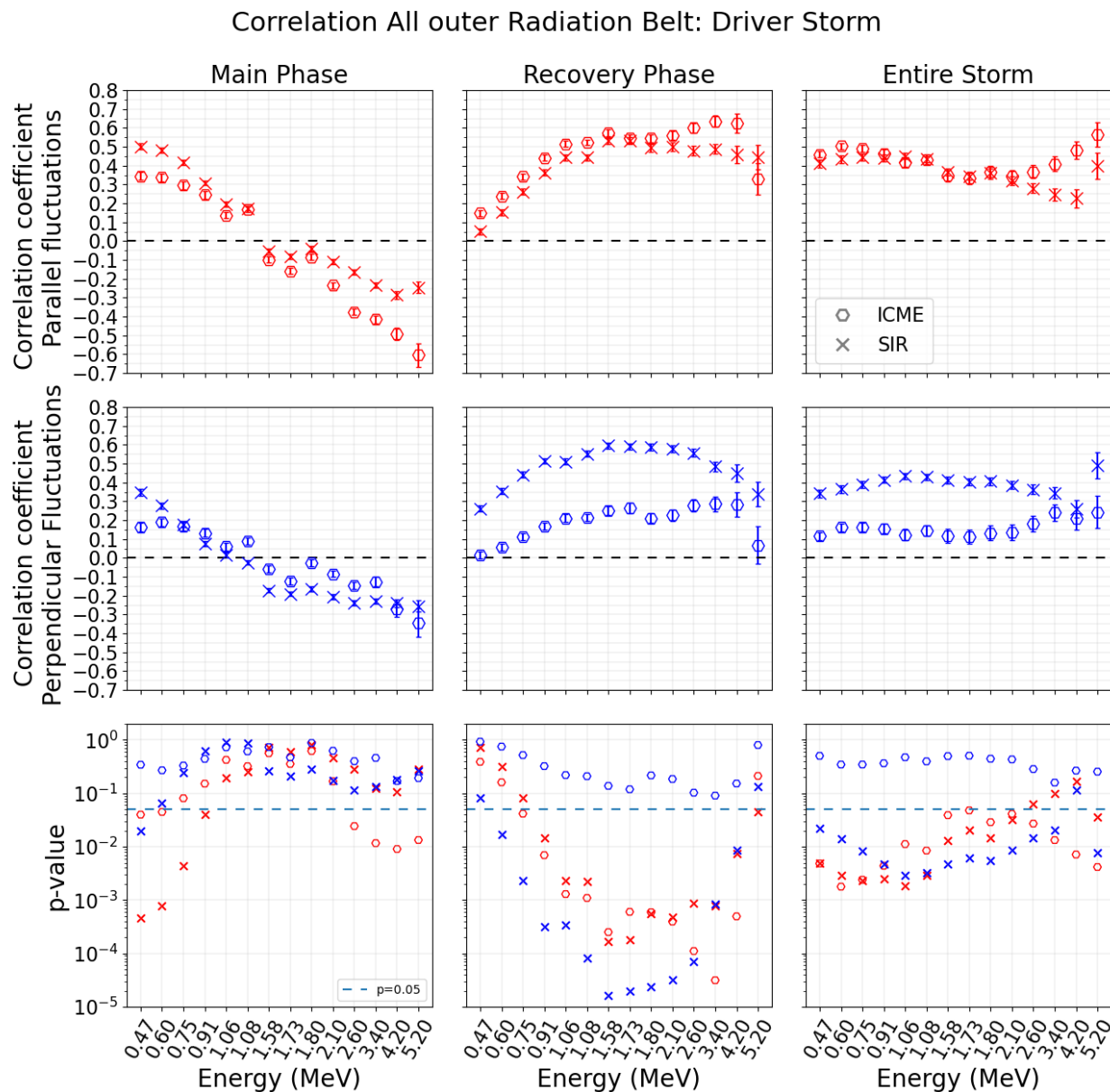


Figura B.2: Coeficientes de correlación entre el cociente del flujo de electrones y la ocurrencia de ondas ULF para tormentas intensas y moderadas.

La Figura B.3 corresponde a las correlaciones y valores de  $p$  totales para la clasificación de tormentas según su evolución del flujo de electrones relativistas, ya sea, un aumento, una disminución o no cambio.

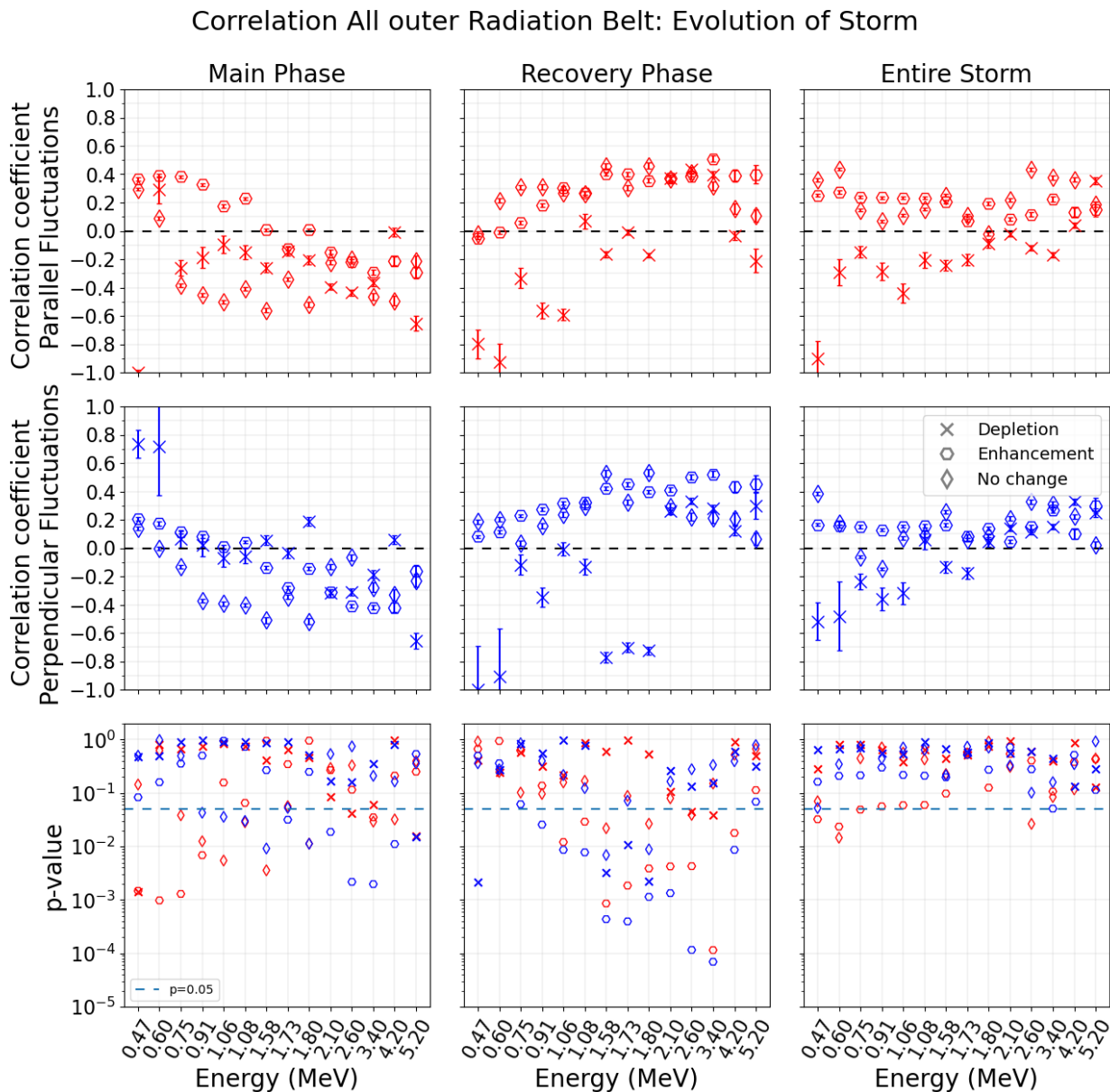


Figura B.3: Coeficientes de correlación entre el cociente del flujo de electrones y la ocurrencia de ondas ULF para tormentas que sufren un aumento, disminución o no cambio del flujo.

Además, tenemos las correlaciones entre la evolución del flujo de electrones relativistas y la ocurrencia de ondas ULF para cada  $L^*$ . Estos resultados presentan una menor significancia estadística que los presentados en el Capítulo 6. Las columnas indican las correlaciones (izquierda) y valor de  $p$  (derecha), mientras que desde arriba a abajo los paneles indican las fases de una tormenta geomagnética; Main Phase, Recovery Phase y Entire Storm, respectivamente. El color negro corresponde a que no se calculó ningún coeficiente de correlación.

La Figura B.4 ilustra los coeficientes de correlación y valor de  $p$  por  $L^*$  para precursores tipo ICME para las fluctuaciones perpendiculares.

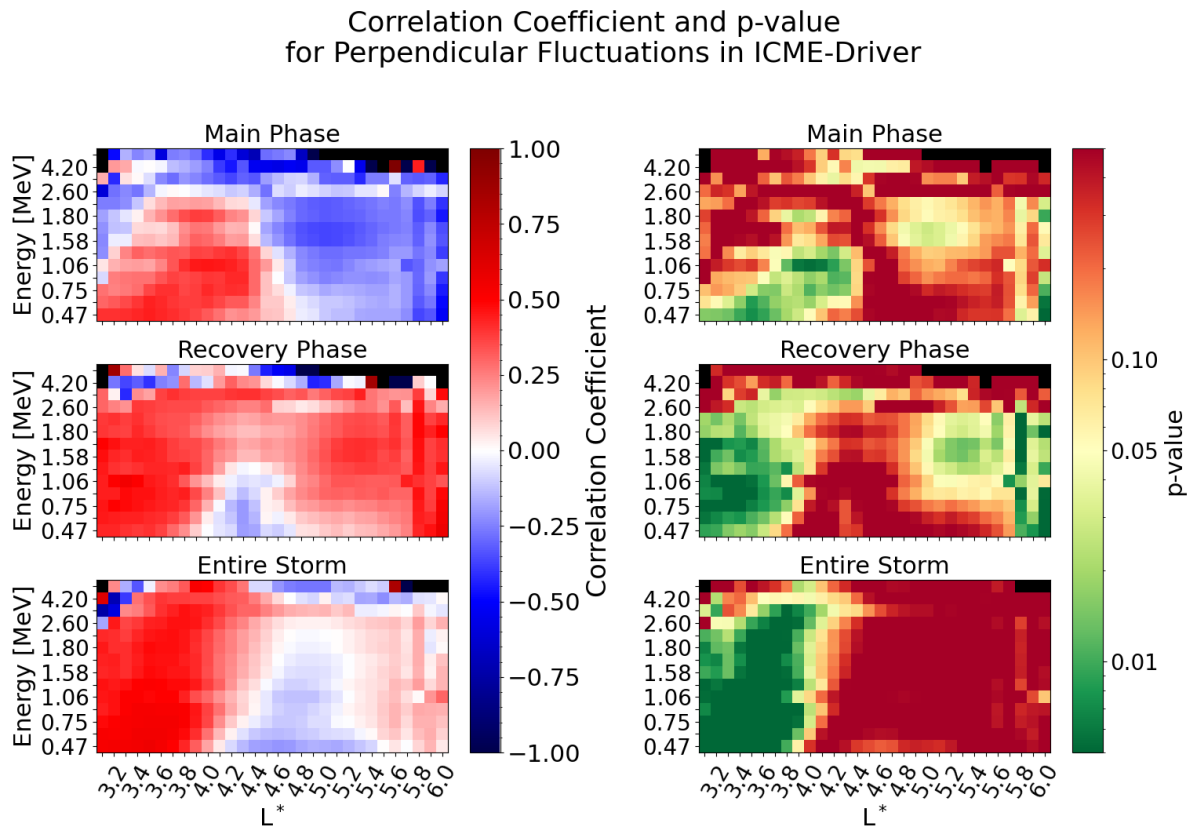


Figura B.4: Coeficiente de correlación y valor  $p$  para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones perpendiculares y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas con precursor ICME.

En la Figura B.5 se ilustran los coeficientes de correlación y valor de  $p$  por  $L^*$  para las fluctuaciones paralelas en que la evolución total del flujo de electrones durante una tormenta geomagnética disminuye en un factor de 2.

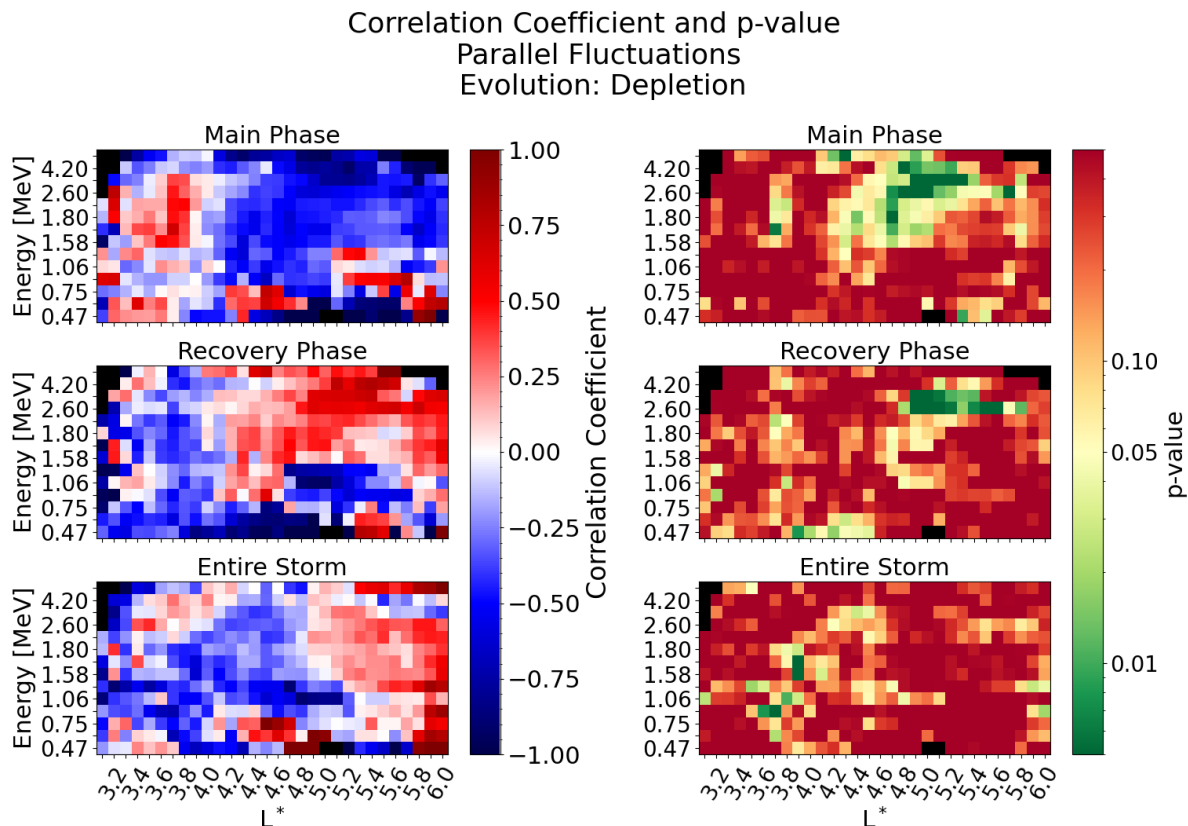


Figura B.5: Coeficiente de correlación y valor  $p$  para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas que disminuyen el flujo de electrones en un factor de 2 en una tormenta geomagnética.

En la Figura B.6 se ilustran los coeficientes de correlación y valor de  $p$  para las fluctuaciones paralelas en que la evolución total del flujo de electrones durante una tormenta geomagnética no cambia.

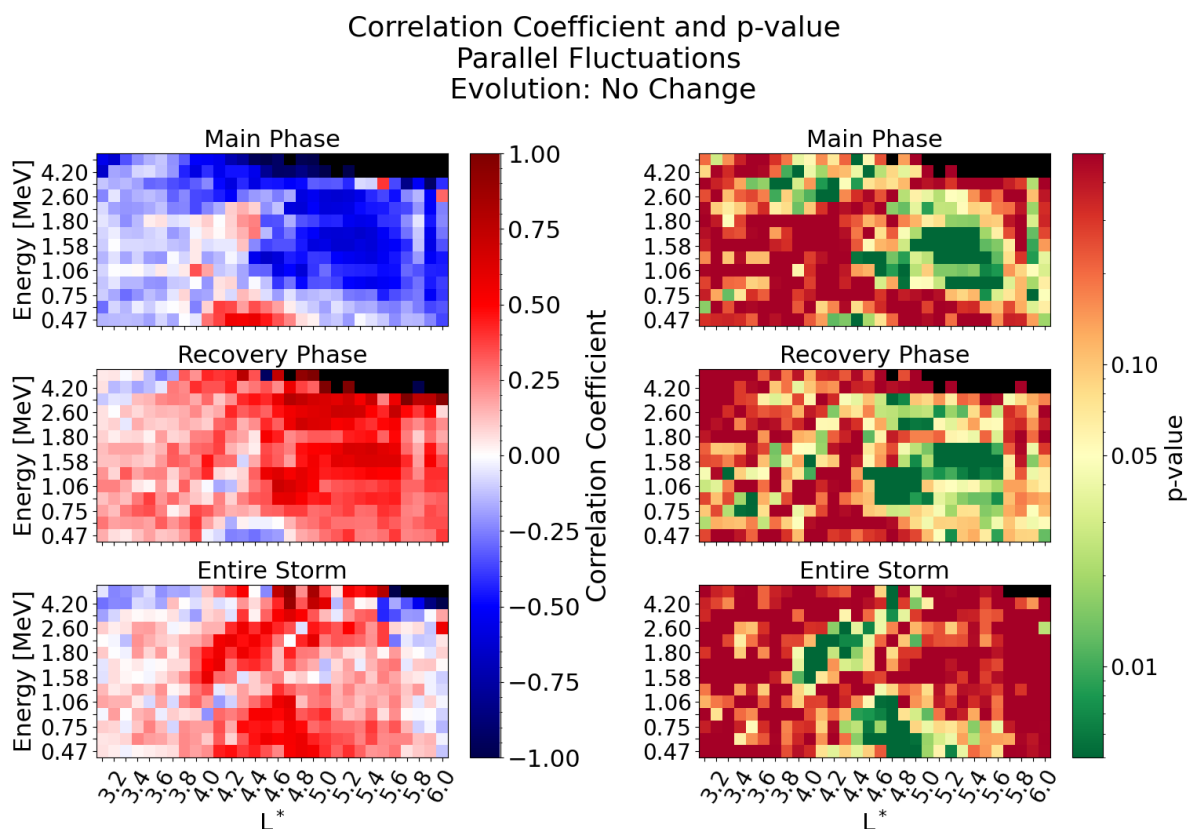


Figura B.6: Coeficiente de correlación y valor  $p$  para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones paralelas y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas que no cambia el flujo de electrones.

En la Figura B.7 se ilustran los coeficientes de correlación y valor de  $p$  para las fluctuaciones perpendiculares en que la intensidad de una tormenta geomagnética es moderada.

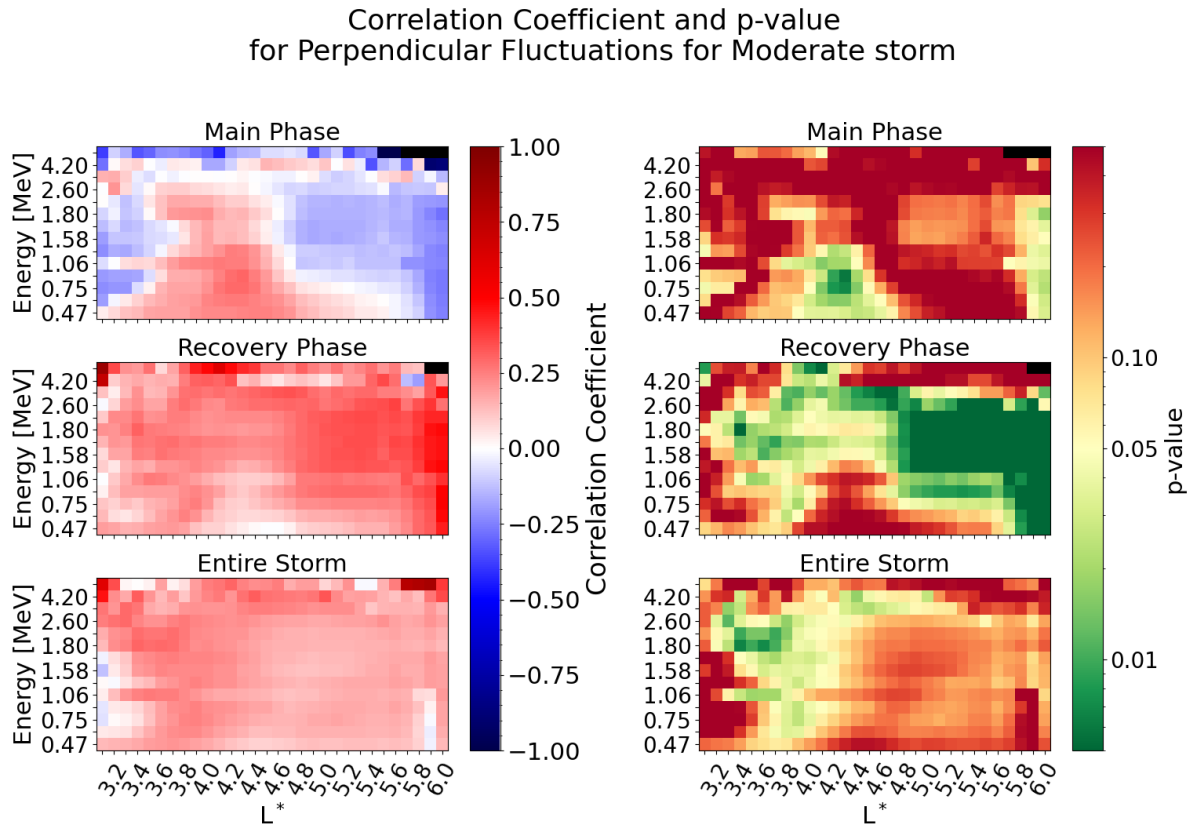


Figura B.7: Coeficiente de correlación y valor  $p$  para comparar entre la potencia ULF integrada para fluctuaciones perpendiculares y la razón del flujo dependiente de  $L^*$ , para tormentas de intensidad moderada.

# Bibliografía

- Aguado Molina, J. (2011). *Recuperación de la magnetosfera terrestre tras sucesos solares geoeffectivos*. PhD thesis, Universidad de Alcalá.
- Alfvén, H. (1986). Model of the Plasma Universe. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 14(6):629–638.
- Antonova, E. E., Stepanova, M. V., Moya, P. S., et al. (2018). Processes in auroral oval and outer electron radiation belt. *Earth, Planets and Space*, 70(1).
- Baker, D. and Kanekal, S. (2008). Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(2-4):195–206.
- Baker, D., Kanekal, S., Hoxie, V., et al. (2013a). A long-lived relativistic electron storage ring embedded in earth’s outer van allen belt. *Science*, 340(6129):186–190.
- Baker, D., Kanekal, S., Li, X., Monk, S., Goldstein, J., and Burch, J. (2004). An extreme distortion of the van allen belt arising from the ‘hallowe’en’ solar storm in 2003. *Nature*, 432(7019):878–881.
- Baker, D. N. (2000). The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to space weather. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(6):2007–2016.
- Baker, D. N., Erickson, P. J., Fennell, J. F., et al. (2018). Space Weather Effects in the Earth’s Radiation Belts. *Space Science Reviews*, 214(1):17.

- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Hoxie, V. C., et al. (2013b). The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Instrument on Board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft: Characterization of Earth's Radiation Belt High-Energy Particle Populations. *Space Science Reviews*, 179(1-4):337–381.
- Balasis, G., Daglis, I. A., and Mann, I. R., editors (2016). *Waves, Particles, and Storms in Geospace: A Complex Interplay*. Oxford University Press.
- Bentley, S., Watt, C., Owens, M., and Rae, I. (2018). Ulf wave activity in the magnetosphere: Resolving solar wind interdependencies to identify driving mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(4):2745–2771.
- Benton, E. and Benton, E. (2001). Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 184(1-2):255–294.
- Blake, J. B., Baker, D. N., Turner, N., et al. (1997). Correlation of changes in the outer-zone relativistic-electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements. *Geophysical Research Letters*, 24(8):927–929.
- Blake, J. B., Carranza, P. A., Claudepierre, S. G., et al. (2013). The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) Instruments Aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft. *Space Science Reviews*, 179(1-4):383–421.
- Blandford, R. D. and Thorne, K. S. (2008). Applications of classical physics. *lecture notes, California Institute of Technology*, page 12.
- Bolduc, L. (2002). Gic observations and studies in the hydro-québec power system. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 64(16):1793–1802.
- Borovsky, J. E. and Denton, M. H. (2006). Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7):2005JA011447.



- Borovsky, J. E. and Valdivia, J. A. (2018). The earth's magnetosphere: a systems science overview and assessment. *Surveys in geophysics*, 39(5):817–859.
- Chen, F. F. (1983). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer International Publishing, Cham.
- Chen, G.-m., Xu, J., Wang, W., and Burns, A. G. (2014). A comparison of the effects of cir-and cme-induced geomagnetic activity on thermospheric densities and spacecraft orbits: Statistical studies. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(9):7928–7939.
- Claudepierre, S. G., O'Brien, T. P., Blake, J. B., et al. (2015). A background correction algorithm for Van Allen Probes MagEIS electron flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(7):5703–5727.
- Cliver, E. (2006). The 1859 space weather event: Then and now. *Advances in Space Research*, 38(2):119–129.
- Crookes, W. (1879). On radiant matter. *Journal of the Franklin Institute*, 108(5):305–316.
- Da Silva, L. A., Sibeck, D., Alves, L. R., et al. (2019). Contribution of ULF Wave Activity to the Global Recovery of the Outer Radiation Belt During the Passage of a High-Speed Solar Wind Stream Observed in September 2014. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(3):1660–1678.
- Degeling, A. W., Ozeke, L. G., Rankin, R., et al. (2008). Drift resonant generation of peaked relativistic electron distributions by Pc 5 ULF waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A2):2007JA012411.
- Delouille, V., Hofmeister, S. J., Reiss, M. A., et al. (2018). Coronal holes detection using supervised classification. In *Machine learning techniques for space weather*, pages 365–395. Elsevier.
- Denton, M., Reeves, G. D., Larsen, B. A., et al. (2017). On the origin of low-energy electrons

- in the inner magnetosphere: Fluxes and pitch-angle distributions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2):1789–1802.
- Drozhdov, A. Y., Blum, L. W., Hartinger, M., et al. (2022). Radial Transport vs. Local Acceleration: The long-standing debate. *Earth and Space Science*.
- Echer, E., Tsurutani, B., and Gonzalez, W. (2013). Interplanetary origins of moderate ( $-100 \text{ nt} < \text{dst} \leq -50 \text{ nt}$ ) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996–2008). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(1):385–392.
- Elkington, S. R., Chan, A. A., and Wiltberger, M. (2013). Global Structure of ULF Waves During the 24-26 September 1998 Geomagnetic Storm. *Dynamics of the earth's radiation belts and inner magnetosphere*, pages 127–138.
- Elkington, S. R., Hudson, M. K., and Chan, A. A. (1999). Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations. *Geophysical Research Letters*, 26(21):3273–3276.
- Elkington, S. R., Hudson, M. K., and Chan, A. A. (2003). Resonant acceleration and diffusion of outer zone electrons in an asymmetric geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A3):2001JA009202.
- Georgiou, M., Daglis, I., Zesta, E., et al. (2015). Association of radiation belt electron enhancements with earthward penetration of Pc5 ULF waves: A case study of intense 2001 magnetic storms. In *Annales Geophysicae*, volume 33, pages 1431–1442. Copernicus GmbH.
- Georgiou, M., Daglis, I. A., Rae, I. J., et al. (2018). Ultralow Frequency Waves as an Intermediary for Solar Wind Energy Input Into the Radiation Belts. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(12).
- Gonzalez, W., Joselyn, J.-A., Kamide, Y., et al. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4):5771–5792.

- Haines, M. G. (2011). A review of the dense  $Z$ -pinch. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 53(9):093001.
- Hands, A. D. P., Ryden, K. A., Meredith, N. P., et al. (2018). Radiation Effects on Satellites During Extreme Space Weather Events. *Space Weather*, 16(9):1216–1226.
- Horne, R. B., Glauert, S. A., Meredith, N. P., et al. (2013). Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth’s electron radiation belts with SPACECAST. *Space Weather*, 11(4):169–186.
- Hudson, M. K., Denton, R. E., Lessard, M. R., et al. (2004). A study of Pc-5 ULF oscillations. *Annales Geophysicae*, 22(1):289–302.
- Inoue, T., Yamazaki, R., and Inutsuka, S.-i. (2009). Turbulence and magnetic field amplification in supernova remnants: Interactions between a strong shock wave and multiphase interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 695(2):825.
- Jaynes, A. N., Baker, D. N., Singer, H. J., et al. (2015). Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(9):7240–7254.
- Jun, I., Garrett, H., Kim, W., Zheng, Y., Fung, S. F., Corti, C., Ganushkina, N., and Guo, J. (2024). A review on radiation environment pathways to impacts: Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs. *Advances in Space Research*.
- Kanekal, S. (2006). A review of recent observations of relativistic electron energization in the earth’s outer van allen radiation belt. In *Proceedings of the ILWS Workshop on Solar Influence on the Heliosphere and Earth’s Environment*, pages 274–279. Citeseer.
- Kanekal, S. and Miyoshi, Y. (2021). Dynamics of the terrestrial radiation belts: a review of recent results during the VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact) era, 2014–2018. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1):35.

- Kataoka, R. (2022). Chapter 2 - disturbed space weather. In Kataoka, R., editor, *Extreme Space Weather*, pages 31–64. Elsevier.
- Kataoka, R. and Miyoshi, Y. (2006). Flux enhancement of radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. *Space Weather*, 4(9):2005SW000211.
- Kepko, L., Spence, H. E., and Singer, H. J. (2002). ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations. *Geophysical Research Letters*, 29(8).
- Kilpua, E. K. J., Balogh, A., Von Steiger, R., et al. (2017). Geoeffective Properties of Solar Transients and Stream Interaction Regions. *Space Science Reviews*, 212(3-4):1271–1314.
- Kim, H., Kim, K. C., Lee, D., et al. (2006). Origin of geosynchronous relativistic electron events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A3):2005JA011469.
- Kim, H.-J., Lyons, L., Pinto, V., et al. (2015). Revisit of relationship between geosynchronous relativistic electron enhancements and magnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 42(15):6155–6161.
- Kivelson, M. G. (2006). *ULF Waves from the Ionosphere to the Outer Planets*, pages 11–30. American Geophysical Union (AGU).
- Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Acuna, M., et al. (2013). The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP. *Space Science Reviews*, 179(1-4):127–181.
- Kokubun, S., Kivelson, M. G., McPherron, R. L., Russell, C. T., and West, H. I. (1977). Ogo 5 observations of Pc 5 waves: Particle flux modulations. *Journal of Geophysical Research*, 82(19):2774–2786.
- Koskinen, H. E. J. and Kilpua, E. K. J. (2022). *Physics of earth’s radiation belts: theory and observations*. Astronomy and astrophysics library. Springer, Cham, Switzerland.

- Langmuir, I. (1928). Oscillations in Ionized Gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 14(8):627–637.
- Li, L., Omura, Y., Zhou, X.-Z., Zong, Q.-G., Fu, S.-Y., Rankin, R., and Degeling, A. W. (2020). Roles of magnetospheric convection on nonlinear drift resonance between electrons and ulf waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(6):e2020JA027787.
- Li, L., Zhou, X.-Z., Omura, Y., et al. (2021). Drift Resonance Between Particles and Compressional Toroidal ULF Waves in Dipole Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(10).
- Li, X., Baker, D. N., Temerin, M., et al. (2005). Energetic electrons, 50 keV to 6 MeV, at geosynchronous orbit: Their responses to solar wind variations. *Space Weather*, 3(4):2004SW000105.
- Liu, W., Sarris, T. E., Li, X., et al. (2010). Solar wind influence on Pc4 and Pc5 ULF wave activity in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A12):2010JA015299.
- Liu, Y. and Zong, Q. (2015). Energetic electron response to interplanetary shocks at geosynchronous orbit. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6):4669–4683.
- Mager, P. N. and Klimushkin, D. Y. (2005). Spatial localization and azimuthal wave numbers of Alfvén waves generated by drift-bounce resonance in the magnetosphere. *Annales Geophysicae*, 23(12):3775–3784.
- Mann, I., O’Brien, T., and Milling, D. (2004). Correlations between ULF wave power, solar wind speed, and relativistic electron flux in the magnetosphere: Solar cycle dependence. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(2):187–198.
- Marchezi, J. P., Dai, L., Alves, L. R., et al. (2022). Electron Flux Variability and Ultra-Low Frequency Wave Activity in the Outer Radiation Belt Under the Influence of Interplanetary Coronal Mass Ejections and High-Speed Solar Wind Streams: A Statistical

- Analysis From the Van Allen Probes Era. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(8):e2021JA029887.
- Marín, D. (2012). Lanzamiento de los satélites rbsp (atlas v 401).
- Mathie, R. A. and Mann, I. R. (2001). On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at mid-latitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A12):29783–29796.
- Mauk, B. H., Fox, N. J., Kanekal, S. G., et al. (2013). Science Objectives and Rationale for the Radiation Belt Storm Probes Mission. *Space Science Reviews*, 179(1-4):3–27.
- McDougall, W. A. (1985a). Sputnik, the space race, and the Cold War. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 41(5):20–25.
- McDougall, W. A. (1985b). Sputnik, the space race, and the Cold War. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 41(5):20–25.
- Millan, R. M. and Baker, D. N. (2012). Acceleration of Particles to High Energies in Earth’s Radiation Belts. *Space Science Reviews*, 173(1-4):103–131.
- Mouikis, C. G., Bingham, S., Kistler, L. M., et al. (2019). The storm-time ring current response to icmes and cirs using van allen probe observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(11):9017–9039.
- Moya, P. S., Pinto, V. A., Sibeck, D. G., et al. (2017). On the Effect of Geomagnetic Storms on Relativistic Electrons in the Outer Radiation Belt: Van Allen Probes Observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(11):11,100–11,108.
- Murphy, K. R., Inglis, A. R., Sibeck, D. G., et al. (2018). Determining the Mode, Frequency, and Azimuthal Wave Number of ULF Waves During a HSS and Moderate Geomagnetic Storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(8):6457–6477.

- O'Brien, T. P., McPherron, R. L., Sornette, D., et al. (2001). Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A8):15533–15544.
- Padovani, M., Marcowith, A., Hennebelle, P., and Ferrière, K. (2016). The plasma physics of cosmic rays in star-forming regions. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 59(1):014002.
- Pandya, M., Bhaskara, V., Ebihara, Y., et al. (2019). Variation of Radiation Belt Electron Flux During CME- and CIR-Driven Geomagnetic Storms: Van Allen Probes Observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, page 2019JA026771.
- Pinto, V. A., Bortnik, J., Moya, P. S., et al. (2018). Characteristics, Occurrence, and Decay Rates of Remnant Belts Associated With Three-Belt Events in the Earth's Radiation Belts. *Geophysical Research Letters*, 45(22):12,099–12,107.
- Prölss, G. W. (2004a). Interplanetary medium. *Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction*, pages 277–347.
- Prölss, G. W. (2004b). Magnetosphere. *Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction*, pages 209–275.
- Reeves, G., Spence, H. E., Henderson, M., et al. (2013). Electron acceleration in the heart of the van allen radiation belts. *Science*, 341(6149):991–994.
- Reeves, G. D., Friedel, R. H. W., Larsen, B. A., et al. (2016). Energy-dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(1):397–412.
- Reeves, G. D., McAdams, K. L., Friedel, R. H. W., et al. (2003). Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 30(10):n/a–n/a.
- Reyes, P. I., Pinto, V. A., and Moya, P. S. (2021). Geomagnetic Storm Occurrence and Their Relation With Solar Cycle Phases. *Space Weather*, 19(9):e2021SW002766.

- Roelof, E. C. and Sibeck, D. G. (1993). Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 98(A12):21421–21450.
- Shprits, Y. Y., Thorne, R., Friedel, R., et al. (2006). Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A11).
- Simms, L. E., Engebretson, M. J., Rodger, C. J., et al. (2021). The Combined Influence of Lower Band Chorus and ULF Waves on Radiation Belt Electron Fluxes at Individual  $L$ -Shells. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(5).
- Southwood, D. J. and Kivelson, M. G. (1981). Charged particle behavior in low-frequency geomagnetic pulsations 1. Transverse waves. *Journal of Geophysical Research*, 86(A7):5643.
- Spence, H. E., Reeves, G. D., Baker, D. N., et al. (2013). Science Goals and Overview of the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma (ECT) Suite on NASA’s Van Allen Probes Mission. *Space Science Reviews*, 179(1-4):311–336.
- Stratton, J., Harvey, R., and Heyler, G. (2014). Mission overview for the radiation belt storm probes mission. *The van Allen probes mission*, pages 29–57.
- Su, Z., Xiao, F., Zheng, H., et al. (2011). Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions: INFLUENCE OF ADIABATIC TRANSPORT. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A4):n/a–n/a.
- Su, Z., Zhu, H., Xiao, F., et al. (2015). Ultra-low-frequency wave-driven diffusion of radiation belt relativistic electrons. *Nature Communications*, 6(1):10096.
- Takahashi, K., Crabtree, C., Ukhorskiy, A. Y., et al. (2022). Van Allen Probes Observations of Symmetric Stormtime Compressional ULF Waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(2).



- Tan, L. C., Fung, S. F., and Shao, X. (2004). Observation of magnetospheric relativistic electrons accelerated by Pc-5 ULF waves. *Geophysical Research Letters*, 31(14):2004GL019459.
- Thorne, R. M. (2010). Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. *Geophysical Research Letters*, 37(22).
- Thorne, R. M., Li, W., Ni, B., et al. (2013). Evolution and slow decay of an unusual narrow ring of relativistic electrons near  $L \sim 3.2$  following the September 2012 magnetic storm. *Geophysical Research Letters*, 40(14):3507–3511.
- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L., Guarnieri, F. L., Gopalswamy, N., Grande, M., Kamide, Y., Kasahara, Y., Lu, G., Mann, I., et al. (2006). Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Turner, D. L., Angelopoulos, V., Li, W., et al. (2013). On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth’s outer radiation belt. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(5):2196–2212.
- Turner, D. L., Kilpua, E. K. J., Hietala, H., et al. (2019). The Response of Earth’s Electron Radiation Belts to Geomagnetic Storms: Statistics From the Van Allen Probes Era Including Effects From Different Storm Drivers. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(2):1013–1034.
- Turner, D. L., O’Brien, T. P., Fennell, J. F., et al. (2015). The effects of geomagnetic storms on electrons in Earth’s radiation belts. *Geophysical Research Letters*, 42(21):9176–9184.
- Tverskaya, L. (2010). Dynamics of the earth’s radiation belts. *Moscow University Physics Bulletin*, 65:246–251.
- Ukhorskiy, A. and Sitnov, M. (2014). Dynamics of radiation belt particles. *The van allen probes mission*, pages 545–578.

- Ukhorskiy, A. Y., Sitnov, M. I., Takahashi, K., et al. (2009). Radial transport of radiation belt electrons due to stormtime Pc5 waves. *Annales Geophysicae*, 27(5):2173–2181.
- Ukhorskiy, A. Y., Takahashi, K., Anderson, B. J., et al. (2005). Impact of toroidal ULF waves on the outer radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A10):2005JA011017.
- Van Allen, J. A. (2004). *Origins Of Magnetospheric Physics: An Expanded Edition*. University of Iowa Press.
- Van Allen, J. A., McIlwain, C. E., and Ludwig, G. H. (1959). Radiation observations with satellite 1958  $\epsilon$ . *Journal of Geophysical Research*, 64(3):271–286.
- Wanliss, J. A. and Showalter, K. M. (2006). High-resolution global storm index: Dst versus sym-h. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A2).
- Webb, D. F. (1991). The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. *Advances in Space Research*, 11(1):37–40.
- Webb, D. F. and Allen, J. H. (2004). Spacecraft and ground anomalies related to the october-november 2003 solar activity. *Space Weather*, 2(3).
- Wrenn, G. (2009). Chronology of ‘killer’ electrons: Solar cycles 22 and 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(10-11):1210–1218.
- Wrenn, G. L., Rodgers, D. J., and Ryden, K. A. (2002). A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging. *Annales Geophysicae*, 20(7):953–956.
- Yamazaki, K., Taira, Y., Oishi, T., et al. (2009). Analyses and Experiments of Compact Spherical Tokamak-Stellarator “TOKASTAR”. *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, 8:1044.
- Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., et al. (2004). A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A7):2003JA010282.

- Yeoman, T. K., James, M., Mager, P. N., et al. (2012). SuperDARN observations of high- $m$  ULF waves with curved phase fronts and their interpretation in terms of transverse resonator theory. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A6):2012JA017668.
- Yermolaev, Y. I. and Yermolaev, M. Y. (2003). Statistical Relationships between Solar, Interplanetary, and Geomagnetic Disturbances, 1976–2000: 3. *Cosmic Research*, 41(6):539–549.
- Yuan, C. J. and Zong, Q. (2012). Quantitative aspects of variations of 1.5–6.0 MeV electrons in the outer radiation belt during magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A11):2011JA017346.
- Zhang, J., Richardson, I. G., Webb, D. F., et al. (2007). Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during 1996–2005. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A10):2007JA012321.
- Zhang, M. and Low, B. C. (2005). The hydromagnetic nature of solar coronal mass ejections. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 43:103–137.
- Zhao, H. and Li, X. (2013). Inward shift of outer radiation belt electrons as a function of  $Dst$  index and the influence of the solar wind on electron injections into the slot region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(2):756–764.
- Zhu, Y.-F., Gu, S.-J., Zhou, X.-Z., et al. (2020). Drift-Bounce Resonance Between Charged Particles and Ultralow Frequency Waves: Theory and Observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(1).
- Zong, Q. (2022). Magnetospheric response to solar wind forcing: Ultra-low-frequency wave–particle interaction perspective. *Annales geophysicae*, 40(1):121–150.
- Zong, Q., Rankin, R., and Zhou, X. (2017). The interaction of ultra-low-frequency pc3–5 waves with charged particles in Earth’s magnetosphere. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 1(1):10.

Zong, Q.-G., Zhou, X.-Z., Wang, Y. F., et al. (2009). Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A10):n/a–n/a.