



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICAS
CIENCIAS FÍSICAS

**CORRELACIONES ENTRE
DISTRIBUCIONES KAPPA Y PARÁMETRO DE
COLISIÓN
EN LA MAGNETÓSFERA TERRESTRE**

Tesis para ser presentada a la Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción
para optar al grado académico de Magíster en Ciencias con Mención en Física

Autor: Francisca Tapia Donoso
Profesor Guía: Dr. Roberto Navarro

18 de diciembre de 2023
Concepción, Chile

*Dedicado a mi madre Ximena...
Hasta la ultima palabra de este
manuscrito se escribió con su apoyo.*

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres. Mi padre, Mauricio Tapia, navegante de mar, quien sacrificó innumerables momentos para asegurarse de que a mis hermanos y a mí no nos faltara nada. Sé lo difícil que es estar lejos de un hijo, y admiro su valentía. Papá, te tengo gran amor y admiración.

A mi madre Ximena Donoso, quien no solo me crió a mí y a mis hermanos, sino que también ha desempeñado un papel fundamental en la crianza de mi hijo Lucas. Mamá, nunca podré agradecerte lo suficiente por haber dedicado tu tiempo a ser nuestra madre y por ser la figura materna de mi hijo mientras concluyo esta tesis. Ahora comprendo plenamente el inmenso sacrificio que has hecho por nosotros y aspiro a ser, al menos, la mitad de la madre excepcional que has sido y sigues siendo.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis hermanos Miguel Angel, Gustavo y Martín por todos los momentos compartidos, por aguantarme y brindarme su apoyo incondicional. Además, les agradezco de corazón por ser los mejores tíos para mi hijo Lucas. Su amor y dedicación hacia él han sido verdaderamente excepcionales.

Quiero dedicar un párrafo completo a quien ha sido, sin duda, el pilar más importante en mi vida mi hijo Lucas. Desde que llegaste, mi forma de ver el mundo ha cambiado. Eres mi luz en los momentos más oscuros, guiándome y llenando mis días de claridad. Lucas, me llenas de energía e inspiración para ser una mejor persona, mujer y madre cada día. Hemos recorrido este camino juntos desde el principio, y te pido perdón por haber tomado tiempo que te correspondía para terminar esta tesis. Eres mi universo, siempre te amaré.

A mi esposo Victor, con quien he compartido los últimos 10 años de mi vida, nos ha tocado vivir momentos tristes que nos han unido aún más como padres y esposos. Hemos sabido lidiar con el trabajo para mantener nuestra familia unida. Quiero expresar mi gratitud por brindarme la libertad de estudiar sin tener que preocuparme de aspectos económicos. También te agradezco por tu apoyo constante en todas las áreas de nuestras vidas. Hemos formado una hermosa familia y te amo.

A Marina Stepanova, por su apoyo, por trabajar junto a mí y por aceptar a esta sureña en su oficina. Al profesor Hernán Astudillo, por nuestras conversaciones, por compartir su conocimiento y por su ayuda. También quiero agradecer a Adetayo Eyelade, quien compartió parte de su trabajo, para que yo pudiera hacer el mio. A mis compañeros del grupo de plasmas UdeC, Guillermo Ziaballe, Hugo Carril, Jorge Gidi, Danilo Rivera y Cristopher León , por las conversaciones, los almuerzos y el apoyo que me han brindado durante mi tiempo en el magíster.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi profesor guía, Roberto Navarro. Su confianza en mí desde el inicio de este proyecto ha sido fundamental. Agradezco enormemente el conocimiento que ha compartido conmigo, así como su paciencia y su constante respaldo. Su apoyo ha sido invaluable, brindándome orientación y alentándome a explorar diversas oportunidades a lo largo de mi participación en el programa de magíster. Es gracias a su respaldo que he tenido la fortuna de embarcarme en diversas aventuras, tanto dentro de Chile como en el extranjero, para presentar y compartir este trabajo. Estas experiencias han resultado ser enriquecedoras tanto desde el punto de vista académico como personal. Agradezco sinceramente la oportunidad de aprender y crecer bajo su guía.

Por último, al proyecto FONDECYT-Iniciación No. 11180947 que financió parte de la ejecución de este proyecto.

Índice general

1. Introducción	1
2. Dinámica Solar y Magnetósfera Terrestre	12
2.1. Viento Solar	15
2.2. Magnetósfera Terrestre	15
3. Instrumentación y obtención de datos	19
3.1. El proyecto THEMIS	19
3.1.1. Instrumentos	21
3.2. Consideraciones previas a los resultados	24
3.2.1. Sistema de coordenadas	25
3.2.2. Resolución de los datos	27
3.2.3. Período de estudio	27
4. Análisis de datos	33
4.1. Distribuciones Kappa	33
4.2. Aproximación Cinética	34
4.3. Cálculo para la derivación de la Función Distribución Kappa	36
4.4. Flujo Diferencial	39
4.5. Índice κ	39
4.6. Perfiles de Distribución Kappa	43
4.7. Parámetros de colisión	49

4.8. Análisis de ξ_{col}	52
4.9. Estudio de Correlaciones	55
5. Conclusiones	58
Bibliografía	64

Índice de figuras

2.1. Esquema de la estructura del Sol (Ecured, 2023).	14
2.2. Esquema de la magnetósfera terrestre en el plano mediodía-medianoche. Las líneas discontinuas representan el campo dipolar original. Las líneas sólidas muestran campos magnéticos modificados por corrientes externas. IMF significa campo magnético interplanetario, de origen solar. Se muestran características principales de la magnetósfera (R_E , es la sigla de unidad de radio terrestre). Fuente: (G.K. Parks, 2015) .	17
3.1. En la primera imagen se observa la estructura de los satelites THEMIS, en la imagen siguiente se observa el conjunto de satelites THA, THB, THC, THD y THE. Fuente: (Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, 2023).	20
3.2. Ilustración de las coordenadas geocéntricas solares magnéticas (GSM) en color verde (Laundal y Richmond, 2017).	26
3.3. En rojo se observa la orbita del satélite THB de la misión THEMIS en diferentes planos con respecto a las coordenadas GSM, para los tiempos 10/11/2008 al 14/11/2008. Fuente: propia.	30
4.1. Valores del parámetro Kappa sobre distintas posiciones del satélite, cubriendo rangos del parámetro Kappa desde 2 hasta 10. En color gris se observan las zonas, día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.	41

- 4.2. Histograma 2D del índice κ con respecto a sus posiciones x e y en coordenadas GSM, que proporciona una visualización de la distribución espacial de los valores del índice Kappa promedio en escala \log_{10} . En colores tenemos el promedio de $\log_{10}(\kappa)$ por celda. Fuente: propia. 42
- 4.3. En la representación gráfica para la región diurna, el promedio de los flujos de energía se destaca en azul, mientras que los valores máximos y mínimos por canal de energía se visualizan en rojo, abarcando la totalidad de flujos en la ventana temporal. Además, se presenta en negro el ajuste Kappa en relación con el núcleo de la distribución. Los canales de energía en [KeV] se sitúan en el eje x, y en el eje y se muestra el flujo de energía en $[KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)]$. Este análisis corresponde a la ventana de tiempo 94 del día 19/06/2007, capturada por el satélite THB. Fuente: propia. 44
- 4.4. Se representan en rojo los espectros de flujo de energía $[KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)]$ (239) para la ventana de tiempo 94 correspondiente al día 16/06/2007 (región de día, satélite THB). En color azul se muestra el promedio de los 239 espectros, y en color negro, el ajuste Kappa calculado para el núcleo de la distribución. Las líneas verticales punteadas de color rojo representan los límites del núcleo de la distribución. Fuente: propia. 45

4.5.	En la representación gráfica para la región diurna, el promedio de los flujos de energía se destaca en azul, mientras que los valores máximos y mínimos por canal de energía se visualizan en rojo, abarcando la totalidad de flujos en la ventana temporal. Además, se presenta en negro el ajuste Kappa en relación con el núcleo de la distribución. Los canales de energía en [KeV] se sitúan en el eje x, y en el eje y se muestra el flujo de energía en $[KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)]$. Este análisis corresponde a la ventana de tiempo 12 del día 24/12/2007, capturada por el satélite THB.. Fuente: propia.	46
4.6.	Histogramas 1D $\log_{10}(\kappa)$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.	48
4.7.	Histogramas 1D $\log_{10}(\xi_{col})$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.	53
4.8.	Se representa un histograma 2D donde las posiciones son graficadas en coordenadas x e y en el sistema GSM, proporcionando una visualización de la distribución espacial de datos en relación con las coordenadas geográficas. En colores tenemos el promedio de $\log_{10}(\xi_{col})$. Fuente: propia.	54
4.9.	Histogramas 2D de $\log_{10}(\kappa)$ vs $\log_{10}(\omega_{col}/\Omega)$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. La escala de colores corresponde a la densidad de probabilidad en escala \log_{10} . Fuente: propia.	56

Abstract

Using data collected by the THEMIS mission from 2007 to 2012, we have investigated possible correlations between the Kappa index (κ) and a collision parameter (ξ_{col}) in the protons that make up the magnetosphere. Our research aims to validate the proposed hypothesis that particle collisions play a crucial role in the thermalisation of the plasma, leading to the observation of Maxwellian-type distributions. We expected that the collision rate could influence the presence or absence of high-energy-tail kappa distributions in the Earth's magnetosphere.

Using the energy flux data, we fitted kappa-type distributions. In addition, we introduced a new parameter, the collision frequency ratio, which depends on the background magnetic field, particle density and temperature. However, the results obtained showed significant discrepancies from our initial expectations. Contrary to our hypothesis, we observed that in the magnetosphere a higher collision rate is strongly associated with low values of the kappa index, indicating high-energy tails. On the other hand, lower values of the collision frequency ratio seem to be associated with higher Kappa values, behaving like Maxwellian distributions. These results challenge our expectations and raise new questions about the role of collisions in the Earth's magnetosphere.

Capítulo 1

Introducción

La física de plasmas es una rama fascinante que desempeña un papel fundamental en nuestra comprensión del universo. El plasma, un estado de la materia compuesto por partículas cargadas, que coexisten en un estado altamente energético, constituye aproximadamente el 99% de la materia observable en el Universo (Chen et al., 1984). En este estado, los átomos han perdido parcial o totalmente sus electrones, generando una mezcla de iones positivos y electrones libres. La presencia de estas partículas cargadas confiere al plasma la capacidad única de conducir electricidad y de responder de manera significativa a campos electromagnéticos. Las propiedades específicas del sistema, tales como su conductividad eléctrica y respuesta a influencias externas, son determinadas por las complejas interacciones entre las partículas cargadas y los campos eléctricos y magnéticos presentes en su entorno. Este estado de la materia es comúnmente observado en fenómenos naturales como las auroras y relámpagos, así como también nuestro propio Sol (Gallardo-Lacourt et al., 2021; Angot, 1897; Williams, Geotis y Bhattacharya, 1989), así como también en diversas aplicaciones tecnológicas que van desde lámparas fluorescentes hasta experimentos de fusión nuclear (Federici et al., 2001; Freidberg, 2008).

El estudio de los plasmas como campo científico independiente comenzó a prin-

cipios del siglo XX, con importantes contribuciones de científicos pioneros como Langmuir (1918) y Alfvén (1942). Irving Langmuir desempeñó un papel crucial al introducir conceptos fundamentales y herramientas experimentales en la física de plasmas. Su invención de la “sonda de Langmuir” permitió mediciones precisas de propiedades en plasmas, mientras que su modelo teórico para la doble capa eléctrica en la interfaz plasma-superficie proporcionó una base conceptual sólida.

Hannes Alfvén, por su parte, dejó una marca significativa al introducir la teoría de las ondas de Alfvén y realizar avances notables en magnetohidrodinámica (MHD). La teoría de las ondas de Alfvén, presentada en la década de 1940, ha sido esencial para comprender la propagación de ondas magnéticas en plasmas magnetizados, con aplicaciones cruciales en campos como la astrofísica y la fusión nuclear controlada. Sus contribuciones a la MHD han enriquecido nuestra comprensión de la dinámica de plasmas en presencia de campos magnéticos, desempeñando un papel destacado en la estabilidad de plasmas y en la generación de campos magnéticos en diversos entornos, desde laboratorios hasta el espacio interestelar.

Estos investigadores sentaron las bases teóricas y experimentales para el avance de la física de plasmas. A medida que se fue reconociendo la importancia y las aplicaciones de los plasmas en diversos sistemas astrofísicos, la disciplina se estableció firmemente y ha experimentado un crecimiento significativo desde entonces.

Hoy en día, el estudio de los plasmas nos permite comprender fenómenos complejos, como la formación y evolución de estrellas, la interacción entre el viento solar y los campos magnéticos planetarios, la generación y confinamiento de la energía en dispositivos de fusión nuclear, entre muchos otros. A medida que profundizamos en nuestra comprensión de los plasmas, también se abren nuevas preguntas y desafíos que impulsan la investigación y la innovación en este apasionante campo científico. El estudio de los plasmas destaca la relación esencial entre la Tierra y el Sol. En tiempos recientes, las tormentas geomagnéticas han generado diversos impactos en nuestro planeta, afectando sistemas tecnológicos como la infraestructura eléctrica y

las comunicaciones, así como redes de energía y telecomunicaciones. Estas tormentas también pueden causar daño a satélites, interfiriendo con su electrónica y funcionalidad, y resultar en la desviación de rutas aéreas, especialmente en áreas polares, debido a interferencias en los sistemas de navegación por satélite. Estos fenómenos subrayan la importancia de comprender y monitorear las tormentas geomagnéticas para mitigar posibles impactos en tecnologías y sistemas críticos.

Las misiones espaciales desempeñan un papel esencial al proporcionar información clave para la detección anticipada de diversos fenómenos solares, que incluyen tormentas solares, eyecciones de masa coronal, llamaradas solares y variaciones en el viento solar. Estas misiones permiten observar directamente la actividad solar y monitorear las condiciones del espacio interplanetario, como los campos magnéticos y otros factores cruciales para comprender y prever eventos espaciales. La capacidad de estudiar el Sol desde el espacio proporciona datos precisos y en tiempo real, permitiendo la identificación temprana de anomalías que podrían impactar la Tierra. Esta anticipación es fundamental para tomar medidas preventivas, como la protección de satélites, redes eléctricas y sistemas de comunicación, frente a posibles efectos adversos asociados con una variedad de eventos solares.

El viento solar, un flujo constante de partículas cargadas emitido por el Sol, desempeña un papel crucial en la exploración espacial al actuar como un laboratorio natural cercano. Su estudio no solo ofrece información valiosa sobre las interacciones Sol-Tierra, sino que también sirve como medio para comprender entornos planetarios más distantes. Por su parte la magnetósfera, es una región llena de plasma espacial que rodea la tierra. Dadas su proximidades y accesibilidad, el viento solar y la magnetósfera son una herramienta única para investigar los plasmas espaciales, siendo objeto de estudio en cientos de misiones espaciales a lo largo de las últimas décadas. Estas misiones, diseñadas para analizar su comportamiento a diferentes

distancias, desde proximidades cercanas a la Tierra hasta regiones interplanetarias e incluso áreas próximas al Sol, han proporcionado una comprensión más completa de los fenómenos solares y su impacto en el espacio circundante. Además, la magnetósfera, una región llena de plasma espacial que rodea la Tierra, amplifica este laboratorio natural, ofreciendo un entorno propicio para estudiar el comportamiento de las partículas cargadas y profundizar nuestro conocimiento sobre la dinámica de los plasmas en el espacio. Los resultados experimentales obtenidos no solo respaldan las teorías existentes, sino que también impulsan el avance hacia teorías más integrales en la exploración del espacio.

Entre las misiones espaciales destacadas se encuentran THEMIS, WIND y la PSP, cada una contribuyendo de manera significativa al entendimiento de fenómenos espaciales clave. *Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms* (en adelante THEMIS) (Vassilis Angelopoulos, 2009) ha proporcionado una visión tridimensional única de la magnetósfera terrestre, revelando detalles cruciales sobre las tormentas geomagnéticas, las subtormentas y los procesos de reconexión magnética en la magnetopausa. La sonda espacial *Wide-field Interferometer Explorer* (en adelante WIND) (Lin et al., 1995; Lepping et al., 1995), ubicada en el punto de Lagrange L1, ha permitido un monitoreo continuo del viento solar, ofreciendo datos esenciales para comprender la actividad solar y sus impactos en el espacio circundante. Por último, *Parker Solar Probe* (en adelante PSP) (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2023) ha logrado un hito al sumergirse directamente en la corona solar, brindando mediciones sin precedentes sobre su dinámica y composición, así como sobre fenómenos solares cruciales. Estas misiones destacadas han enriquecido significativamente nuestro conocimiento sobre el viento solar, la magnetósfera terrestre y la actividad solar, proporcionando valiosa información para avanzar en la comprensión de los fenómenos espaciales.

Comprender la interacción de partículas cargadas de alta energía en los plasmas astrofísicos y en el espacio ha sido un desafío central en la física espacial durante

décadas. Debido a la baja densidad de colisiones, estos plasmas a menudo se observan en estados estacionarios de cuasi-equilibrio, los cuales difieren del equilibrio termodinámico. En el cuasi-equilibrio, ciertas propiedades del plasma experimentan cambios lentos en el tiempo, pero a una velocidad mucho menor que otras escalas de tiempo relevantes del sistema.

La condición de cuasi-equilibrio se refiere a un estado en el cual el plasma no alcanza un equilibrio térmico total, pero algunas de sus propiedades pueden aproximarse a un estado estacionario. Esto implica que, aunque el plasma no está en equilibrio termodinámico, mantiene cierta estabilidad a lo largo del tiempo. A diferencia del equilibrio termodinámico, donde las propiedades del sistema no cambian con el tiempo, los plasmas astrofísicos pueden experimentar variaciones y cambios, pero aún así se mantienen en un estado general de equilibrio relativo. Esta característica única permite que los plasmas astrofísicos conserven cierta coherencia y estabilidad a pesar de las variaciones locales y los eventos dinámicos

La cinética del proceso de relajación necesario para alcanzar estos estados estacionarios y las características de dichos estados, donde coexisten el plasma y diversas formas de turbulencia, aún no se comprenden completamente (Eckart Marsch, 2006; Peter H Yoon, 2017; Vafin, Riazantseva y Pohl, 2019). Estos problemas sin resolver se deben, en gran medida, a una falta de comprensión suficiente de la interacción entre partículas cargadas en entornos de plasma, como el viento solar y la magnetósfera de la Tierra, que son esencialmente sistemas de plasma sin colisiones en estados estacionarios no equilibrados.

Las colisiones de partículas juegan un rol importante en el establecimiento del equilibrio térmico en un fluido. En efecto, las características no térmicas observadas del plasma del viento solar, como lo son anisotropía de temperatura y la velocidad de beam pareciesen estar reguladas por las colisiones. En el trabajo de Justin Christophe Kasper et al. (2017), se concluye que si bien el viento solar no térmico generalmente se asocia con altas velocidades, estas distribuciones sugieren que la frecuencia de

ocurrencia está realmente determinada por la edad de colisión. Por su lado, Maruca et al. (2013) demostraron que la relación de temperatura tiene una correlación más fuerte con el número de colisiones de Coulomb que otros parámetros del viento solar como densidad, velocidad y la temperatura. Chhiber et al. (2016), analiza colisiones en el viento solar mediante tres métodos: datos tridimensionales, simulaciones de magnetohidrodinámica y una expresión analítica para evaluar la edad de colisión. Estos enfoques ofrecen una visión completa del fenómeno. El estudio de Livi, Marsch y Rosenbauer (1986) muestra que plasmas de baja velocidad en el viento solar están fuertemente influenciados por las colisiones de Coulomb. En el trabajo de Bale, J. Kasper et al. (2009), se concluye que la potencia de las fluctuaciones magnéticas de corta longitud de onda está significativamente influenciada por la colisionalidad. Este efecto relaja la anisotropía de temperatura lejos de las condiciones de inestabilidad, resultando en una reducción correspondiente de la potencia de las fluctuaciones.

Se espera que bajas colisiones del plasma pueda desarrollar otras características no térmicas; como lo son; distribuciones con colas de alta energía, que son más elevadas que una Maxwelliana.

Las distribuciones con colas de altas energías, se refieren a distribuciones de velocidades en un sistema de partículas que exhibe características de un núcleo de tipo Maxwelliano y, simultáneamente, presenta un componente de cola de alta energía modelado por una ley de potencias. Este fenómeno se observa comúnmente en plasmas y sistemas no equilibrados donde algunas partículas adquieren energías significativamente superiores a la media.

En un núcleo de tipo Maxwelliano, las partículas siguen una distribución de velocidades descrita por la distribución Maxwelliana, que es característica de sistemas en equilibrio térmico. Este componente describe la población predominante de partículas con energías cercanas a la media.

Por otro lado, el componente de cola de alta energía modelado por una ley de potencias revela la presencia de partículas con energías muy superiores a la media. En este caso, la probabilidad de observar partículas con una energía específica disminuye de acuerdo con una relación inversamente proporcional. La cola de alta energía es esencial para describir eventos raros pero impactantes, como partículas supra-térmicas que exhiben velocidades extremadamente elevadas en comparación con el conjunto general de partículas.

Este tipo de distribución se suele modelar con funciones *Lorentzianas* o funciones *Kappa* (Livadiotis y McComas, 2013; George Livadiotis, 2015; Livadiotis, M. Desai y L. Wilson, 2018; G. Livadiotis, M. I. Desai e I. Wilson L. B., 2018; Nicolaou y George Livadiotis, 2019; Maksimovic, Pierrard y Riley, 1997; Nicolaou, Wicks et al., 2020; G. Livadiotis, 2018). Las distribuciones Kappa han demostrado ser ajustes eficaces para describir las características observadas en el viento solar y la magnetósfera. Estas distribuciones son particularmente útiles debido a su capacidad para modelar de manera precisa las colas de altas energías, las cuales no pueden ser adecuadamente representadas por distribuciones Maxwellianas.

Las distribuciones Maxwellianas, que son típicamente utilizadas para describir plasmas en equilibrio térmico, a menudo no capturan de manera efectiva las partículas de alta energía presentes en los entornos astrofísicos y espaciales. Sin embargo, las distribuciones Kappa ofrecen una alternativa más flexible al proporcionar un marco que puede adaptarse mejor a las colas de las distribuciones de energía.

La característica distintiva de las distribuciones Kappa es su capacidad para modelar de manera más realista las poblaciones de partículas de alta energía que son comunes en el viento solar y la magnetósfera (Vytenis M Vasyliunas, 1968a; Pierrard, Maksimovic y José Lemaire, 1999; Collier et al., 1996). Estas distribuciones presentan colas más pronunciadas, lo que significa que pueden describir con mayor precisión la presencia de partículas de alta energía que no se ajustan bien a las predicciones de

las distribuciones Maxwellianas convencionales.

Las distribuciones Kappa fueron propuestas en sus inicios por Montgomery et al. (1965) y Olbert (1968) y luego fueron introducidas en el estudio del viento solar por su estudiante Vytenis M. Vasyliunas (1968b), usando los satelites OGO 1, 2 y 3. Desde entonces, las distribuciones Kappa se han convertido en una de las herramientas más utilizadas para caracterizar y describir las distribuciones de velocidad observadas en ambientes espaciales. Aunque las distribuciones Kappa son útiles para describir ciertos fenómenos en plasmas espaciales, su aplicación a veces genera debate debido a la falta de claridad en su base teórica y al hecho de que pueden considerarse más como herramientas empíricas que como representaciones fundamentales de los procesos físicos subyacentes.

Se han propuesto diferentes teorías que expliquen el origen físico de estas distribuciones, como por ejemplo, Leubner (2002), en su trabajo muestra que distribuciones muy cercanas a las distribuciones Kappa son consecuencia de la entropía generalizada favorecida por la estadística no extensiva, usando la base física proporcionada por el formalismo de entropía no extensivo de Tsallis (1988), proponiendo una forma funcional ligeramente modificada, cualitativamente similar a la distribución Kappa tradicional. Aunque también se ha discutido la posibilidad de que estas distribuciones sean un verdadero equilibrio según la estadística de Boltzmann-Gibbs-Shannon (Collier, 2004). Al día de hoy, sigue siendo un tema de discusión entre la comunidad de plasmas, pues aún no se ha encontrado una conexión directa entre algunas propiedades de las distribuciones Kappa y la física detrás de ella.

La presencia de un parámetro adicional en estas funciones Kappa, llamado índice Kappa (κ), proporciona más información que una función Maxwelliana estándar, este índice se relaciona con las colas de altas energías. Valores altos de κ indican un

comportamiento más Maxwelliano, mientras que valores bajos señalan la existencia de una población significativa de partículas energéticas. Esta presencia se entiende parcialmente debido a la escasez de colisiones de partículas en estos plasmas y a la falta de un mecanismo eficiente para termalizarlas en escalas de tiempo cortas.

Recientemente, se ha prestado especial atención al estudio del índice Kappa en el viento solar y la magnetósfera. Trabajos clave de Livadiotis (Livadiotis y McComas, 2013; Livadiotis, M. Desai y L. Wilson, 2018) han revelado relaciones significativas. Por ejemplo, se ha establecido que el índice κ muestra correlaciones con la densidad y la temperatura del viento solar. Además, se ha identificado una relación entre el índice κ , el índice politrópico y el campo magnético. Asimismo, señalan que el índice κ disminuye a medida que las interacciones de largo alcance del campo magnético inducen correlaciones entre partículas, alejándose del equilibrio térmico del sistema.

Por otro lado, Stepanova y Antonova (2015) utilizaron distribuciones Kappa para ajustar los espectros de flujo de iones y electrones para cinco eventos en los que los satélites THEMIS estaban alineados a lo largo de la lámina de plasma. Obtuvieron instantáneas de las propiedades Kappa que muestran una tendencia del índice κ a aumentar en la dirección trasera. Espinoza et al. (2018) también utilizaron la distribución Kappa para modelar espectros de flujo de iones y electrones a lo largo de la lámina de plasma. Sus resultados revelan que $\kappa_i > \kappa_e$, lo que sugiere que las propiedades no térmicas de los electrones son más fuertes que las de los iones. Además, sus resultados muestran una persistente asimetría entre el amanecer y el anochecer en el número relativo de iones energéticos, que aumenta durante las subtormentas. Finalmente Adetayo V Eyelade et al. (2021), realiza un estudio entre el índice Kappa y el parámetro beta del plasma, encontrando correlaciones dependientes de la dirección del transporte turbulento.

En este estudio de investigación, nos proponemos examinar la posible relación entre el índice Kappa y un parámetro de colisión específico en la magnetósfera te-

restre. Reconocemos que las colisiones representan un mecanismo de relajación del plasma que lo conduce al equilibrio termodinámico, evidenciado por la igualdad de sus temperaturas independientes de la dirección, lo cual está asociado con las conocidas distribuciones Maxwellianas. Nuestra hipótesis para este trabajo sugiere que existe una correlación entre estos dos parámetros (índice Kappa y parámetro de colisión), ya que cuando el índice Kappa tiende a infinito, la distribución resultante se asemeja a una Maxwelliana. Dado que los plasmas colisionales generan distribuciones tipo Maxwellianas, parece existir una relación que exploraremos y discutiremos más detalladamente en el transcurso de esta tesis.

El impulso inicial para este estudio surge de una observación crítica en las misiones espaciales, donde la información sobre los momentos del plasma se obtiene comúnmente mediante el ajuste de una distribución Maxwelliana al núcleo. Aunque esta técnica ha sido ampliamente utilizada para calcular características esenciales del plasma, como velocidad térmica, temperatura y densidad, surge una inquietud significativa. Tanto en el viento solar como en la magnetósfera terrestre, se ha observado la presencia de distribuciones Kappa en lugar de Maxwellianas.

Esta discrepancia plantea la posibilidad de que la aproximación convencional para el cálculo de momentos y propiedades del plasma pueda no ser precisa en entornos específicos, lo que subraya la importancia de reconsiderar la metodología utilizada. En consecuencia, nuestra motivación principal radica en explorar y entender la validez de los cálculos tradicionales de características del plasma en situaciones donde las distribuciones Kappa son prominentes.

En los próximos capítulos, abordaremos conceptos fundamentales relacionados con el Sol y la magnetósfera. Este enfoque nos permitirá comprender los procesos que impactan tanto en la magnetósfera como en otros entornos espaciales. Posteriormente, nos sumergiremos en la discusión sobre los satélites e instrumentos utilizados

en el desarrollo de nuestra investigación. Exploraremos aspectos cruciales del análisis de datos, incluyendo procesos de filtrado, periodos de estudio y sistemas de coordenadas, entre otros. Presentaremos el nuevo parámetro de estudio diseñado para examinar colisiones y, finalmente, analizaremos los datos recopilados para llegar a conclusiones fundamentadas sobre nuestros resultados.

Capítulo 2

Dinámica Solar y Magnetósfera

Terrestre

El Sol es una estrella que se encuentra en el centro de nuestro sistema solar a una distancia aproximada de 149.6 millones de kilómetros de la Tierra (David H. Hathaway, 2010). Esta distancia se conoce como Unidad Astronómica (AU, por sus siglas en inglés) y se utiliza como una medida de referencia en astronomía para medir distancias típicas del sistema solar (Union, 2012). El Sol está compuesto principalmente de hidrógeno y helio, los cuales constituyen alrededor del 99% de su masa. Además de estos elementos, también contiene trazas de otros elementos como carbono, oxígeno, nitrógeno y hierro, entre otros (Bahcall, 1989). Debido a las altas temperaturas y presiones en su núcleo, el Sol se encuentra en un estado de plasma, que es un estado de la materia en el cual los átomos están ionizados y los electrones se han separado de los núcleos (Smith, 2019).

El periodo de rotación del Sol varía a lo largo de su superficie. En el ecuador, el Sol rota más rápidamente que en los polos, 27 días en el ecuador y 34 días en los polos aproximadamente. Esto se debe a un fenómeno conocido como *diferencial de rotación* (Goldreich y Schubert, 1967; Stix, 1989). Al ser un cuerpo compuesto de plasma, los diferentes componentes del Sol pueden moverse a diferentes velocidades.

La rotación diferencial se atribuye a la influencia de las corrientes de convección y los campos magnéticos que generan una dinámica compleja en el interior del Sol. Estos procesos internos dan lugar a una rotación diferencial entre el ecuador y los polos del Sol.

Además de su rotación, el Sol también experimenta un ciclo solar que se repite aproximadamente cada 11 años (David H Hathaway, 2015). Durante el ciclo solar, se observan cambios en la actividad del Sol, especialmente en la aparición de manchas solares. Las manchas solares son regiones oscuras en la superficie del Sol que están asociadas con campos magnéticos intensos (Howard, 1996; Solanki, 2003; Azariadis y Guesnerie, 1986). Se forman cuando líneas de campo magnético emergen a la superficie y crean áreas de menor temperatura. En ciertos momentos del ciclo solar, conocidos como máximo solar (Sawyer y Vette, 1976; Richardson, Cliver y Cane, 2001), se observa un mayor número de manchas solares. Durante este período, la actividad magnética del Sol es más intensa, lo que se traduce en un aumento en la frecuencia y tamaño de las manchas solares.

El Sol presenta una estructura estratificada que abarca varias capas esenciales, cada una desempeñando un papel único en su dinámica y comportamiento como se ve en la figura 2.1. En el núcleo, se produce la fusión nuclear, liberando inmensas cantidades de energía. La zona radiativa, adyacente al núcleo, facilita la transferencia de esta energía hacia las capas exteriores a través de radiación térmica. Más hacia la superficie, la zona convectiva está marcada por corrientes ascendentes y descendentes de plasma, transportando energía por convección.

La fotosfera, la capa más externa y visible del Sol, es aquella donde se forman las manchas solares. Aquí, los campos magnéticos entrelazados generan áreas de baja temperatura, dando origen a las manchas oscuras que observamos desde la Tierra. Estas manchas, indicativas de intensa actividad magnética, revelan la compleja interacción entre los campos magnéticos solares.

La cromósfera es una capa delgada de la atmósfera del Sol, que se ubica sobre la

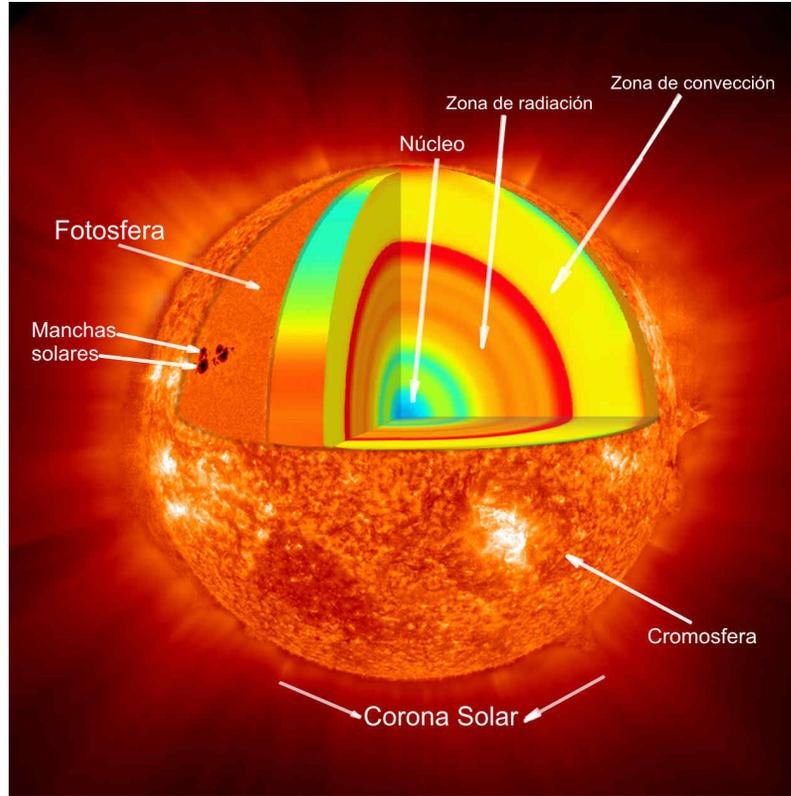


Figura 2.1: Esquema de la estructura del Sol (Ecured, 2023).

fotosfera y por debajo de la corona solar, formada por gases a baja presión.

La corona solar, la capa más externa del Sol, es sorprendentemente más caliente que las capas inferiores. Esta discrepancia de temperaturas sigue siendo un enigma para los científicos solares y es objeto de intensa investigación. Además, aunque su visibilidad es limitada, la corona solar se extiende radialmente vastas distancias desde la superficie del Sol.

Estas capas atmosféricas, aunque menos evidentes a simple vista, desempeñan un papel crucial en la dinámica solar y son esenciales para la comprensión integral de la estrella.

Un fenómeno importante relacionado con la dinámica solar es la reconexión magnética (Yamada, Kulsrud y Ji, 2010; Biskamp, 1996). Ocurre cuando los campos magnéticos del Sol se reconectan, liberando gran cantidad de energía y generando

llamaradas solares y eyecciones de masa coronal (CMEs). Estos eventos pueden tener impactos significativos en la Tierra, como perturbaciones en la magnetósfera y la ionosfera, afectando las comunicaciones y los sistemas de energía.

2.1. Viento Solar

El viento solar es una corriente continua de partículas cargadas, principalmente protones, partículas alfa y electrones, que son expulsadas por la corona solar. Estas partículas cargadas conforman un flujo constante que se propaga de manera radial por el espacio interplanetario. El físico Parker ([1958](#)) predijo su existencia y realizó una gran contribución al formular teóricamente este fenómeno. Su modelo explicó cómo el calor y la presión en la atmósfera solar generan un flujo constante de partículas cargadas. Las predicciones de Parker, que abarcaban la expansión de la corona solar y la aceleración de partículas solares, fueron posteriormente confirmadas por observaciones de misiones espaciales. Su destacado trabajo en este campo fue reconocido y honorificado con el nombramiento de la sonda *Parker Solar Probe* en 2018.

El viento solar se puede clasificar en dos tipos: viento solar rápido y viento solar lento (Feldman, Landi y Schwadron, [2005](#)). El viento solar rápido se origina en las regiones coronales abiertas, donde los campos magnéticos se extienden hacia el espacio y las partículas solares escapan a altas velocidades. Por otro lado, el viento solar lento se origina en las regiones coronales cerradas, donde los campos magnéticos están más restringidos y las partículas solares se liberan a velocidades más bajas.

2.2. Magnetósfera Terrestre

La magnetósfera terrestre es una región del espacio que rodea el planeta Tierra, tiene una forma parecida a una esfera, aunque se deforma debido a la presión del

viento solar. Está formada por el campo magnético que se origina en el núcleo externo líquido de nuestro planeta, producto de la rotación y el movimiento del material conductor.

En la dirección del viento solar, la magnetósfera terrestre experimenta compresión y forma la estructura conocida como la “nariz”. Esta formación resulta de la interacción entre el viento solar, compuesto por partículas cargadas y campos magnéticos provenientes del Sol, y el campo magnético terrestre. El impacto del viento solar ejerce presión sobre la magnetósfera, causando deformaciones en la forma del campo magnético terrestre. La extensión de la nariz varía según la intensidad y velocidad del viento solar, así como las condiciones específicas del campo magnético terrestre. Por lo general, la nariz se extiende a una distancia de alrededor de 10 a 15 radios terrestres en la dirección Tierra-Sol. En la dirección opuesta al viento solar, la magnetósfera terrestre se extiende formando lo que se conoce como la ‘cola magnética’. La ubicación característica de la cola magnética varía, pero generalmente se extiende a distancias mucho mayores que la nariz en la dirección del viento solar. La cola magnética puede alcanzar distancias de varios cientos de radios terrestres en la dirección opuesta al Sol.

La interacción entre el viento solar y la magnetósfera es la responsable de fenómenos naturales como las auroras boreales y australes, que se producen cuando las partículas cargadas provenientes del Sol son canalizadas hacia los polos magnéticos de la Tierra y chocan con la atmósfera.

Como se ha comentado anteriormente, la forma de la magnetósfera es dinámica, aún así podemos identificar la ubicación de distintas estructuras que la conforman (ver Figura 2.2). Entre ellas encontramos:

- Magnetopausa: Es la frontera exterior de la magnetósfera, donde la presión del viento solar es equilibrada por el campo magnético terrestre. Marca el límite de la influencia solar dominante.

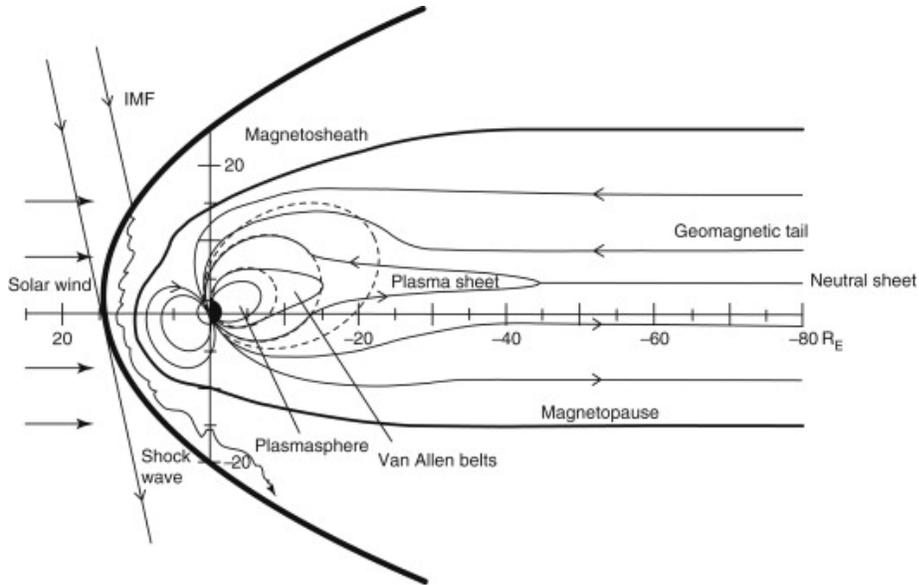


Figura 2.2: Esquema de la magnetósfera terrestre en el plano mediodía-medianoche. Las líneas discontinuas representan el campo dipolar original. Las líneas sólidas muestran campos magnéticos modificados por corrientes externas. IMF significa campo magnético interplanetario, de origen solar. Se muestran características principales de la magnetósfera (R_E , es la sigla de unidad de radio terrestre). Fuente: (G.K. Parks, 2015)

- Arco de Choque (*Bow shock*): Se encuentra en la región donde el viento solar choca con la magnetósfera, creando una onda de choque que desacelera y comprime el viento solar.
- Funda Magnética (*Magnetosheath*): Situada entre la magnetopausa y el arco de choque, es la región donde el viento solar impacta y comprime el campo magnético terrestre. La magnetosheath es una región turbulentamente agitada, impregnada de ondas de gran amplitud y partículas calientes generadas durante la formación del choque. Al igual que en los choques convencionales, la energía del flujo del viento solar se transforma en energía térmica. La velocidad del viento solar en esta región, justo detrás del choque, experimenta una notable

reducción, aproximadamente a $50[km/s]$, para luego recuperar su velocidad más adelante en esa dirección.

- **Plasmasfera (Plasmasphere):** Ubicada en la parte interna de la magnetósfera, es una región rica en partículas cargadas (plasma) que incluye la ionosfera y es crucial para procesos como la propagación de ondas de radio.
- **Cinturones de Van Allen:** Los cinturones de Van Allen son regiones en forma de anillo alrededor de la Tierra que contienen partículas cargadas, principalmente electrones y protones, atrapadas por el campo magnético terrestre. Estos cinturones fueron descubiertos por el científico Van Allen et al. (1958), poco después del lanzamiento del primer satélite, el Explorer 1.
- **Lámina de Plasma (Plasma Sheet):** Se encuentra en la cola magnética de la magnetósfera y representa una región donde el plasma fluye desde la magnetósfera hacia el espacio interplanetario.

Capítulo 3

Instrumentación y obtención de datos

El objetivo principal de este trabajo se centra en el análisis de datos para el estudio y comprensión de la dinámica de la magnetósfera terrestre. Para lograr resultados confiables y significativos, es crucial seleccionar cuidadosamente el conjunto de datos a utilizar. En este contexto, el acceso libre a los datos y la diversidad de los mismos hicieron que el satélite THEMIS se convirtiera en un candidato ideal para nuestro estudio.

3.1. El proyecto THEMIS

La misión THEMIS (Angelopoulos et al., 2008) conformada por un conjunto de cinco satélites (ver Figura 3.1), lanzada al espacio el día 17 de Febrero de 2007, tiene como propósito estudiar y comprender las liberaciones de energía que se producen en la magnetósfera terrestre, así como también estudiar la interacción del viento solar con ésta, brindando información relevante para la comprensión de fenómenos como las auroras boreales, australes y otras formas de actividad geomagnética.

THEMIS es una colaboración conjunta entre la NASA y el Instituto de Tecnología de Georgia (Georgia Tech). Los satélites abordo de la misión THEMIS están equipados con una serie de instrumentos que miden electricidad, campo magnético y otras

especies de partícula con carga en la cercanía de la magnetósfera terrestre. Desde 2011, dos de las sondas (THB, THC) se red desplegaron para formar parte de la misión ARTEMIS, orbitando ahora alrededor de la luna. La misión ARTEMIS busca estudiar la aceleración, reconexión, turbulencia y electrodinámica de la interacción de la luna con el sol. Las 3 sondas THEMIS restantes (THA, THD y THE) orbitan dentro de la magnetósfera. La información proveniente de estos satélites tiene la posibilidad de sincronizarse con observaciones provenientes de otras misiones del Observatorio del Sistema Heliofísico (HSO), tales como las misiones Van Allen Probes (VAP), Magnetospheric Multiscale (MMS), CLUSTER (CL), Geotail (GT) y Arase (ARA), cuyos objetivos principales es la adquisición de datos de mejor calidad.

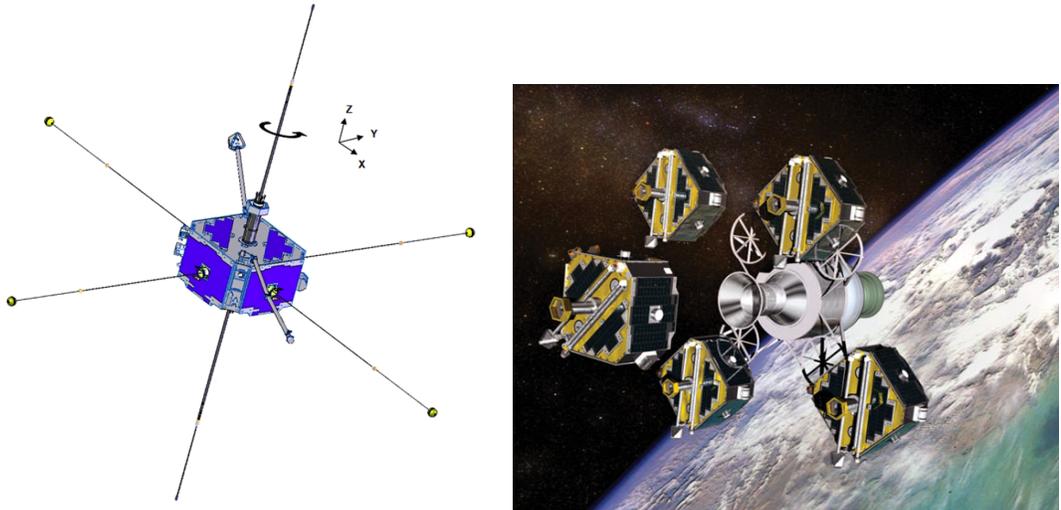


Figura 3.1: En la primera imagen se observa la estructura de los satélites THEMIS, en la imagen siguiente se observa el conjunto de satélites THA, THB, THC, THD y THE. Fuente: (Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, [2023](#)).

Las sondas THEMIS están equipadas con diversos instrumentos que realizan mediciones *in situ* en la magnetósfera terrestre. Estos instrumentos desempeñan un papel crucial en la recopilación de datos para el estudio de fenómenos espaciales. Algunos de los instrumentos a bordo de las sondas son: Los magnetómetros, instrumento encargado de medir la intensidad y dirección del campo magnético en la mag-

netósfera, lo cual apunta a mejorar la comprensión de la dinámica y la estructura del plasma espacial. Los analizadores de partículas, instrumento que permite medir la distribución y características de las partículas cargadas (electrones e iones) en la magnetósfera. Estos proporcionan información sobre densidad, temperatura y velocidad de las partículas, información fundamental para estudiar procesos de aceleración y transporte de partículas en el espacio. Los detectores de ondas electromagnéticas registran las señales de ondas electromagnéticas presentes en la magnetósfera (ondas de plasma y ondas de baja frecuencia). Estas mediciones son importantes para comprender la interacción entre el campo magnético y las partículas cargadas. Estos son solo algunos de los instrumentos abordo de las sondas THEMIS.

3.1.1. Instrumentos

En este trabajo de investigación, se ha utilizado la información y data proveniente de los siguientes instrumentos abordo de las sondas que componen la misión THEMIS.

Analizador Electroestático (ESA)

El analizador electroestático, por sus siglas en inglés: Electrostatic Analyzer (ESA), es un instrumento utilizado para medir la energía y el número de partículas cargadas dentro de la magnetósfera terrestre (JP McFadden et al., 2008). Los analizadores electrostáticos se utilizan a menudo en satélites de investigación para estudiar el plasma y las partículas cargadas en el espacio. Este instrumento tiene un amplio rango de operación que abarca desde 2 [eV] hasta 32 [KeV] para electrones, y desde 1,6 [eV] hasta 25 [KeV] para iones siendo capaz de medir con precisión la energía cinética de las partículas cargadas en ese rango de energías, lo que nos permite obtener información detallada sobre la composición y la dinámica de las partículas presentes en el entorno espacial.

Los datos recopilados por ESA se utilizan para comprender cómo el viento solar interactúa con la magnetósfera terrestre y para mejorar los modelos de esta misma.

Telescopio de Estado Sólido (SST)

El telescopio de estado sólido (SST) es un instrumento que se utiliza para observar el cielo en el rango de longitudes de onda de los rayos X (V. Angelopoulos, 2008). Los telescopios en estado sólido utilizan cristales sólidos en lugar de espejos para enfocar los rayos X, lo que los hace muy útiles para observar objetos muy calientes como estrellas y galaxias.

El SST es uno de los instrumentos a bordo de la misión THEMIS, su rango de medición va desde los 25 [KeV] a 6 [MeV] para iones y de 25 [Kev] a 1 [MeV] para electrones, ampliando el rango de medición, respecto del ESA. Este instrumento se utiliza para medir las emisiones de rayos X en el espacio cercano a la Tierra, permitiendo comprender de mejor manera la actividad solar y su influencia en el sistema solar. Además, el SST proporciona información sobre la dinámica de los plasmas en la magnetósfera terrestre y en el viento solar.

Magnetómetro de Flujo (FGM)

El magnetómetro de puerta de flujo (FGM) de la misión THEMIS mide el campo magnético de fondo y sus fluctuaciones de baja frecuencia (hasta 64 Hz) en el espacio cercano a la Tierra (Auster et al., 2008). FGM está diseñado específicamente para estudiar reconfiguraciones abruptas de la magnetósfera de la Tierra durante la fase de inicio de una subtormenta. Debido a su alta sensibilidad, el FGM es capaz de detectar variaciones del campo magnético con amplitudes desde 0,01 [nT] hasta 25000 [nT] (cerca de la Tierra).

GMOM

Este nuevo subproyecto de THEMIS tiene como objetivo combinar los momentos del analizador electrostático (ESA) y el telescopio de estado sólido (SST) y ponerlo a disposición de quien lo requiera. Entre los datos disponibles en GMOM se encuentran los flujos de energía de iones y electrones (iones y electrones en rango de energía desde 5 a más de 300 [keV]), densidad, temperatura, velocidad de las partículas, entre otros, los cuales son procesados desde tierra. Los archivos disponibles incluye un modo FULL, REDUCED y BURST para ESA, y modo FULL y BURST para SST.

Los modos mencionados anteriormente constituyen una clasificación de distintos tipos de datos recopilados por los satélites, y cada modo está diseñado para satisfacer requisitos específicos de observación.

En el **Modo BURST**, se lleva a cabo una recopilación intensiva y rápida de datos durante eventos específicos o períodos de interés científico. Este modo puede activarse durante eventos notables o cuando se anticipa la ocurrencia de fenómenos particulares, permitiendo una captura detallada de la información en cortos intervalos de tiempo.

En el **Modo REDUCED (Reducido)**, la operación implica la adquisición de menos datos o la reducción de la tasa de muestreo. Este enfoque tiene como objetivo conservar energía o recursos a bordo de los satélites, y suele implementarse durante períodos de menor actividad o cuando la cantidad total de datos no es crítica.

En el **Modo FULL (Completo)**, se obtienen los datos a la máxima capacidad del instrumento. Este modo se utiliza especialmente cuando se requiere una alta resolución en las mediciones o durante situaciones de interés científico.

Para llevar a cabo esta investigación, hemos utilizado datos en el modo FULL.

Clasificación de datos

Los datos recolectados por los instrumentos a bordo de la misión THEMIS, pasan por varias etapas previas de procesamiento antes de estar preparados para un análisis posterior. Estas etapas se clasifican por niveles, y cada nivel representa un grado diferente de procesamiento y calibración del instrumento.

- Nivel Cero (L0): Datos crudos o sin procesar extraídos directamente de los instrumentos a bordo de los satélites. Estos datos están en forma de números binarios y transformarlos en productos científicamente útiles es una tarea de ingeniería compleja y es responsabilidad del operador del satélite.
- Nivel Uno (L1): Los datos recopilados han pasado por un procesamiento básico y calibraciones iniciales, han sido corregidos de manera atmosférica y se han aplicado las transformaciones geométricas necesarias. Estos datos son adecuados para análisis preliminares y estudios básicos.
- Nivel 2 (L2): Datos procesados, refinados y calibrados en unidades físicas. En este nivel se han aplicado correcciones adicionales para mejorar la calidad y la precisión. Los datos obtenidos son útiles para estudios científicos detallados y aplicaciones especializadas.

3.2. Consideraciones previas a los resultados

En el transcurso de esta investigación, se utilizó el software MATLAB (Matrix Laboratory) y su lenguaje de programación, con el objetivo de analizar los datos recopilados de la misión THEMIS. La elección de este lenguaje de programación como herramienta principal se basó en su versatilidad y en la extensa gama de recursos disponibles para el análisis y procesamiento de datos científicos. MATLAB ofrece una amplia variedad de librerías y funciones especializadas que simplifican la

manipulación, visualización de la información e interpretación de los resultados de esta investigación.

La base de datos fueron proporcionadas por el Centro de Análisis de Datos de NASA (CDAWeb), sitio web reconocido internacionalmente en el ámbito de la investigación espacial (NASA's Coordinated Data Analysis Web, 2023). CDAWeb es una plataforma en línea que proporciona acceso y distribución de datos científicos relacionados con la física espacial. La confiabilidad y robustez de los datos proporcionados por la NASA a través de CDAWeb son respaldo de la solidez y la validez de los resultados obtenidos en esta investigación.

3.2.1. Sistema de coordenadas

Los fenómenos geoespaciales, tales como, las auroras, el movimiento del plasma, las corrientes ionosféricas están fuertemente influenciados por el campo magnético de la Tierra. Esto se debe a que las partículas cargadas del plasma espacial tienen la capacidad de moverse a lo largo de las líneas del campo magnético, pero su movimiento a través de estas líneas está restringido. Por este motivo, tiene sentido analizar y estudiar estos fenómenos en relación con el campo magnético terrestre. Se han desarrollado diversos sistemas de coordenadas magnéticas para diferentes propósitos y regiones, abarcando desde la magnetopausa hasta la ionosfera. Estos sistemas facilitan el uso de la información y la comprensión de los eventos geoespaciales tras considerar la influencia y la estructura del campo magnético terrestre.

Coordenadas Geocéntricas Solares Magnéticas (GSM)

Las coordenadas geocéntricas solares magnéticas (GSM, por sus siglas en inglés) son un sistema de coordenadas utilizado en la investigación espacial y geofísica para describir la posición de un objeto en relación con la Tierra y su campo magnético. Como se ve en la Figura 3.2, el eje x en coordenadas GSM (en color verde) se dirige desde el centro de la Tierra (el origen) hacia el centro del Sol y posee vector director

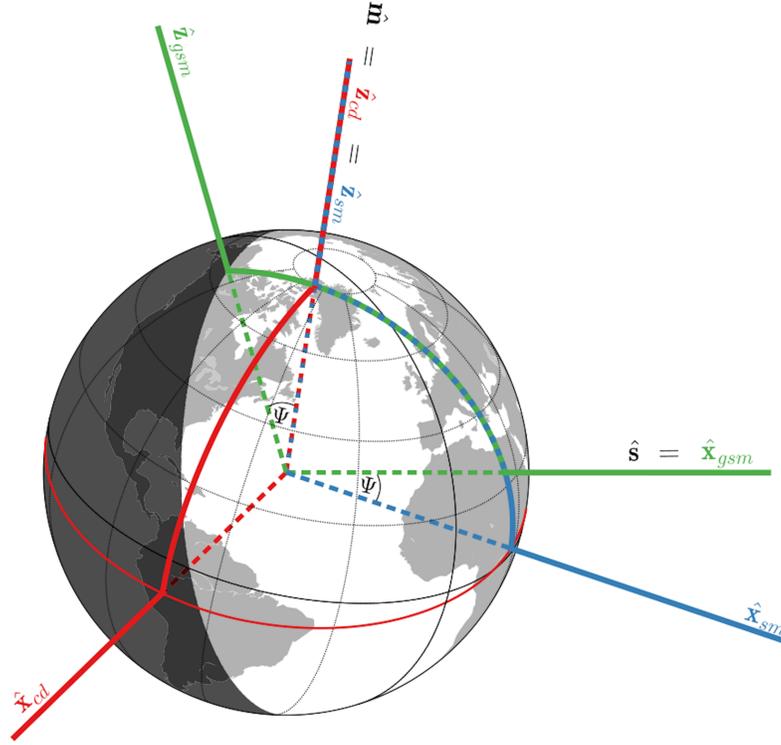


Figura 3.2: Ilustración de las coordenadas geocéntricas solares magnéticas (GSM) en color verde (Laundal y Richmond, 2017).

\hat{x}_{gsm} . El eje y en coordenadas GSM es perpendicular tanto al eje del dipolo magnético (vector director \hat{m}) como al eje Tierra-Sol (vector director \hat{x}_{gsm}), y es positivo en dirección del atardecer. El eje z en coordenadas GSM (color verde), es perpendicular al plano generado por los vectores \hat{x}_{gsm} e \hat{y}_{gsm} , lo anterior completa un sistema coordinado diestro (Laundal y Richmond, 2017). Los vectores base de GSM son los siguientes:

$$\hat{x}_{gsm} = \hat{s} \quad (3.1)$$

$$\hat{y}_{gsm} = \frac{\hat{m} \times \hat{x}_{gsm}}{\|\hat{m} \times \hat{x}_{gsm}\|} \quad (3.2)$$

$$\hat{z}_{gsm} = \hat{x}_{gsm} \times \hat{y}_{gsm}. \quad (3.3)$$

Para los propósitos de esta investigación, se empleó el sistema de coordenadas GSM.

3.2.2. Resolución de los datos

Los datos utilizados en este estudio fueron recopilados mediante dos instrumentos: GMOM, que mide el flujo de energía y momentos (temperatura, velocidad, densidad, otros) del plasma; y FGM, que proporciona datos sobre el campo magnético. Estos instrumentos ofrecen datos de buena calidad, sin embargo, poseen diferentes resoluciones temporales ($\Delta t \approx 3 \text{ s}$, Δt es variable), cuyo resultado genera vectores de información de distintas dimensiones. Para manejar convenientemente esta dificultad se propone crear ventanas de tiempo para homogeneizar la información. En esta dirección, se procesará la información o datos disponibles en ventanas de 6 minutos, obteniendo un total de 239 ventanas por día. Este intervalo de tiempo ($\Delta t = 6 \text{ min}$) se considera óptimo para nuestro estudio, ya que proporciona un equilibrio entre la cantidad mínima de datos necesarios y un período lo suficientemente extenso para captar posibles cambios en el sistema.

Para garantizar la consistencia en el análisis, cada parámetro examinado (temperatura, densidad, velocidad y campo magnético) fue sometido a un proceso de promediado por ventana de tiempo. Esto conlleva a una mejora de la representación de los datos contenidos en el intervalo de tiempo de la ventana, brindando así un valor representativo para cada parámetro por ventana. Este enfoque permite obtener vectores de información de igual dimensión, entre otras características relevantes en caso de ser necesario aplicar algún tipo de interpolación.

3.2.3. Período de estudio

El análisis realizado en el contexto de este proyecto de investigación considera los datos disponibles desde el año 2007 hasta el año 2012, totalizando seis años. Los datos bajo análisis provienen de la misión THEMIS y han sido recopilados por los cinco satélites de la misión: THA, THB, THC, THD y THE.

El área de interés para esta investigación abarca la magnetósfera terrestre. No obstante, como previamente destacamos, la magnetósfera posee una naturaleza dinámica, lo que implica que sus límites son algo difusos. Dada esta característica, nuestra primera tarea consistió en definir las delimitaciones específicas de la magnetósfera, considerando sus distintas componentes. Es crucial tener en cuenta que las unidades de distancia empleadas son los radios terrestres, representados por R_E . Un radio terrestre equivale a la distancia aproximada desde la superficie de la Tierra hasta su centro (6371 kilómetros aproximadamente).

Iniciamos nuestro análisis estudiando las órbitas sin aplicar ningún filtro, observando las distancias relativas respecto a la Tierra. Resultó que los valores en la componente x_{GSM} variaban entre $-60 < x/R_E < 30$, mientras que en la componente y_{GSM} los valores oscilaban en el rango $-50 < y/R_E < 50$. Los valores de la componente z_{GSM} no se tomaron en consideración.

Se notó que los valores más grandes en las componentes x_{GSM} e y_{GSM} correspondían a los satélites THB y THC. Estos satélites, con el tiempo, comenzaron a orbitar la Luna, llevando así trayectorias circulares y más extensas.

Además, se analizaron los periodos en los que algunos satélites se encontraban a distancias características del viento solar, es decir, $x/R_E > 15$. En estos casos, resultó evidente que los datos carecían de fiabilidad, ya que durante esos intervalos temporales, las sondas proporcionaban datos procesados como NaN (no es un número), indicando que los instrumentos no eran capaces de realizar mediciones a estas distancias. Los datos que no eran NaN resultaban ser poco significativos. Estos hallazgos nos llevaron a la conclusión de que no es óptimo estudiar estas regiones con THEMIS. Dado que el objetivo principal de la misión es analizar la magnetósfera y no el viento solar, es posible que los instrumentos no estén diseñados para medir en estas áreas específicas.

Considerando estos resultados y teniendo en cuenta las distancias aproximadas

que delimitan la magnetósfera, decidimos establecer los siguientes límites para describir la posición de la magnetósfera que sería estudiada: $-50 < x/R_E < 15$ e $-30 < y/R_E < 30$.

En la Figura 3.3, se representa en rojo la posición en coordenadas GSM del satélite THB durante un período de cinco días (desde el 10/11/2008 hasta el 14/11/2008), mientras que en azul se presenta una aproximación de la posición y de la dimensión del planeta Tierra. Durante este periodo de tiempo, el satélite completa una órbita. La Figura 3.3(a) muestra la posición del satélite THB, destacando su notable desplazamiento en la dirección del eje z_{GSM} . En las Figuras 3.3(b) y 3.3(c), se proporciona la misma información en los planos $y_{GSM}z_{GSM}$ y $x_{GSM}y_{GSM}$, respectivamente. La posición en relación con el eje z_{GSM} exhibe un patrón de movimiento oscilatorio, fluctuando entre posiciones superiores e inferiores a lo largo del tiempo. Además, es relevante señalar que la órbita se encuentra en la región correspondiente al amanecer.

Método de Ajuste

El plasma que compone la magnetósfera terrestre está compuesto principalmente por partículas cargadas eléctricamente, como electrones y protones. Sin embargo, también puede contener otras partículas cargadas, como partículas alfa, iones pesados (átomos ionizados, como oxígeno, nitrógeno, helio, hidrógeno, entre otros) y electrones energéticos. La composición exacta del plasma varía según las condiciones del viento solar, la actividad solar y otros factores ambientales. Estos iones pesados, junto con electrones y protones, contribuyen a la complejidad y dinámica de la magnetósfera terrestre.

En el estudio de electrones, se ha observado la presencia de características no térmicas, como asimetrías, strahls y halos en sus distribuciones (Pierrard, Maksimovic y Joseph Lemaire, 2001; Maksimovic, Zouganelis et al., 2005). Estas particularidades pueden no estar necesariamente asociadas a distribuciones con colas alargadas.

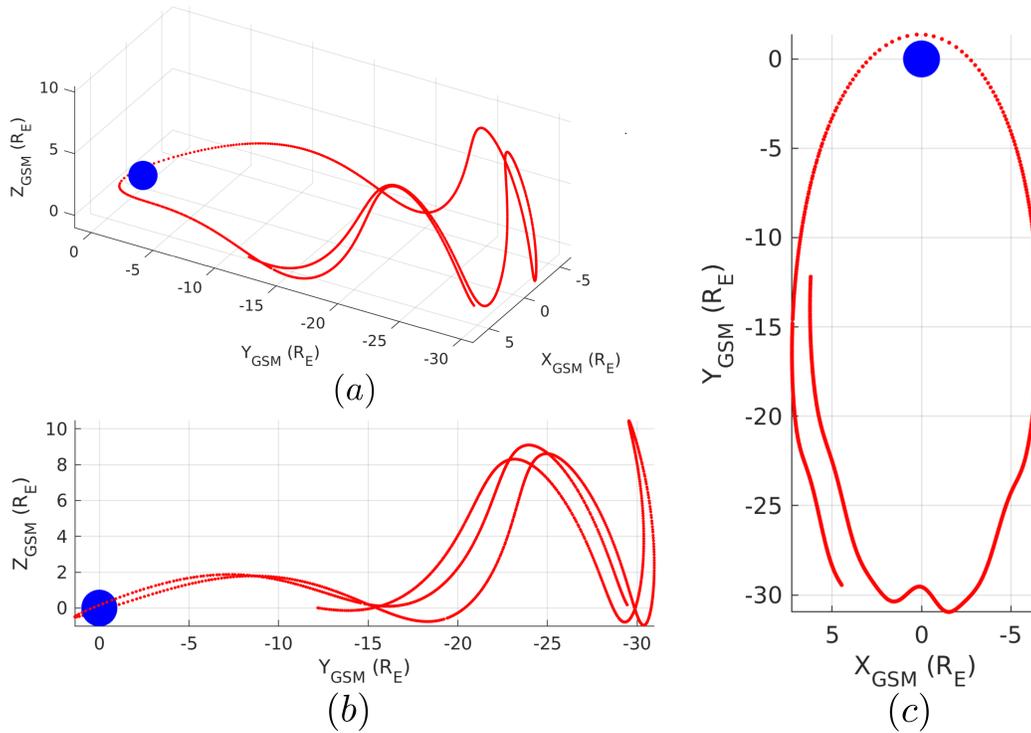


Figura 3.3: En rojo se observa la órbita del satélite THB de la misión THEMIS en diferentes planos con respecto a las coordenadas GSM, para los tiempos 10/11/2008 al 14/11/2008. Fuente: propia.

Por esta razón se decidió estudiar solo la población de protones. Dado nuestro interés específico en estudiar únicamente los protones, hemos ajustado nuestro enfoque para centrarnos en el núcleo de la distribución. En este ajuste, se espera que la concentración de partículas refleje una sola especie iónica. Esta aproximación tiene sentido, ya que al estudiar el núcleo de la distribución, podemos obtener información valiosa sobre la población principal de partículas. Aunque esta metodología no permite diferenciar entre varios tipos de iones de manera detallada, que podrían presentarse como segundas poblaciones (beams), nos proporciona una visión más precisa de la población principal que queremos analizar, en este caso, los protones.

Dentro de los datos proporcionados por GMOM, se encuentra un parámetro co-

nocido como “flujo de energía de partículas” que abarca tanto electrones como iones. Este parámetro se presenta en forma de un espectrograma de flujo de energía, el cual está dividido para canales de energía específicos (un total de 48). Las unidades de medida para este espectrograma son $1/(cm^2 - s - sr)$, donde cm^{-2} indica la inversa de la densidad de área, es decir, cuántas partículas o cuánta energía llega por unidad de superficie, s indica el tiempo, la inversa de esta cantidad representa la frecuencia de llegada de las partículas o la energía y donde sr indica el ángulo sólido, la inversa de esta cantidad se relaciona con la dirección angular en la que se mide el flujo. Esta unidad permite describir la tasa de llegada o flujo de energía por unidad de área, tiempo y ángulo sólido. Los canales de energía se expresan en unidades de electronvoltios (eV).

Este es el parámetro que usaremos como base para ajustar distribuciones Kappa. Para llevar a cabo este proceso, primero hemos representado la función de distribución Kappa en términos de flujo diferencial (ecuación (4.20)), para luego establecer una relación entre esta función y el flujo de energía de partículas (ecuación (4.21)), que es el parámetro recolectado a partir de los instrumentos a bordo. De este modo, podemos estudiar la función de distribución Kappa en función del flujo de energía de partículas (ecuación (4.22)), centrándonos específicamente en el estudio de iones en nuestro caso.

El método de ajuste utilizado fue el de Mínimos Cuadrados No Lineales con una distribución tipo Kappa. Este ajuste involucra tres parámetros: el primero relacionado con el índice Kappa, el segundo dependiente de la energía, y el tercero dependiente de la densidad. Utilizamos el criterio de chi cuadrado reducido (χ^2/df) como método de confianza, limitándolo a valores menores a 10. Además, solo se consideraron ajustes calculados con un mínimo de 10 datos de flujo de energía, asegurando así la validez de los resultados.

Para no salir de la zona de interés se aplican filtros adicionales. Restringimos la posición del satélite a $-50 < X/R_E < 15$ y $-30 < Y/R_E < 30$, utilizando el sistema

GSM. También limitamos las velocidades a granel a $V_{bulk} < 300 [km/s]$, el campo magnético medio de fondo a $B_0 < 10^3 [nT]$, y la densidad de iones a $n_i \geq 0,1 [cm^{-3}]$. Estos filtros aseguran que el análisis se centre específicamente en la magnetósfera terrestre y que los resultados sean coherentes con el entorno de interés. Con estos criterios se obtuvieron un total de 228.285 intervalos de tiempo durante el periodo de estudio.

Para el análisis del índice Kappa y el parámetro de colisión, se estudiaron cuatro zonas características. Estas zonas corresponden a: día, noche, amanecer y atardecer.

Las estrategias de filtrado de la información previas y el enfoque por regiones permite examinar el comportamiento de los parámetros de interés en diferentes tiempos, observando a detalle cómo estas magnitudes pueden cambiar en respuesta a las condiciones específicas de cada región. La división en estas cuatro regiones facilita la identificación de patrones y comportamientos particulares asociados con cada período, contribuyendo positivamente a la comprensión de las dinámicas presentes en la magnetósfera terrestre.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores utilizados para las restricciones impuestas durante el estudio de la magnetósfera, como se mencionó anteriormente.

Parámetro	símbolo	Condición
Velocidad total de los iones ($km s^{-1}$)	V_{bulk}	< 300
Campo magnético (nT)	B_0	< 1000
Densidad de iones del plasma (cm^{-3})	n	$\geq 0,1$
Componente x de la posición (R_E)	x_{GSM}	$-50 < x/R_E < 15$
Componente y de la posición (R_E)	y_{GSM}	$-30 < y/R_E < 30$

Cuadro 3.1: Criterios aplicados para estudiar magnetósfera terrestre.

Capítulo 4

Análisis de datos

4.1. Distribuciones Kappa

Estas distribuciones se caracterizan por tener colas de altas energías más pronunciadas que las distribuciones térmicas de Maxwell-Boltzmann y que decaen como ley de potencia. El parámetro Kappa en estas distribuciones determina el grado de desviación de la distribución respecto a una forma térmica y está relacionado con la presencia de fenómenos no térmicos y eventos energéticos en el plasma. El estudio de las distribuciones Kappa permite comprender mejor las propiedades y los mecanismos físicos que generan las colas de altas energías en el viento solar y otros sistemas plasmáticos, y su influencia en la dinámica y la evolución del plasma.

Mientras que los valores Kappa altos implican una mayor pendiente de la distribución en las energías más altas (de ahí un comportamiento más Maxwelliano), los valores Kappa bajos indican la presencia de una población sustancial de partículas energéticas. Como mencionamos anteriormente, su presencia puede entenderse en parte por el hecho de que las colisiones de partículas son raras en estos plasmas, y no parece haber un mecanismo eficiente para termalizarlas (evolucionar la distribución hacia una función Maxwelliana) en escalas de tiempo más cortas que las principales escalas dinámicas que gobiernan el sistema. La distribución Kappa fue diseñada

para expresar esta situación de manera analítica conveniente por:

$$f(E; n, k, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)}, \quad (4.1)$$

donde E es la energía cinética, n es la densidad de las partículas, m es la masa de las partículas, Γ es la función gamma de Euler, κ es el índice espectral y E_c es la energía característica o central, respectivamente. El índice κ es una medida de la pendiente del espectro de energía de las partículas supratérmicas que forman la cola de la función de distribución de velocidades. Las distribuciones Kappa dadas por la ecuación (4.1) exhiben un núcleo térmico con energía característica E_c y colas supratérmicas, de modo que la energía cinética característica total de las partículas E_{total} (también conocida como temperatura efectiva (T_{eff})) está dada por

$$E_{total} = E_c \frac{\kappa}{\kappa - 3/2}. \quad (4.2)$$

Esto que permite una comparación sencilla entre las distribuciones Kappa y Maxwelliana, y describir los efectos de las supratérmicas como lo muestran Lazar, Poedts y Fichtner (2015) y Lazar, Fichtner y P. Yoon (2016). De hecho, para $\kappa \rightarrow \infty$, la ecuación (4.1) se vuelve idéntica a la distribución Maxwelliana:

$$f(E; n, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right). \quad (4.3)$$

4.2. Aproximación Cinética

La teoría cinética se centra en los conceptos esenciales del espacio de fases y la función de distribución, fundamentales para una descripción estadística del plasma. La función de distribución encapsula toda la información físicamente relevante sobre el sistema y se utiliza para derivar de manera sistemática las variables macroscópicas cruciales para entender el comportamiento del plasma a nivel macroscópico. Estas variables macroscópicas, que son funciones del tiempo y la posición, se encuentran

directamente vinculadas a los valores promedio de diversas cantidades físicas de interés en las partículas. Para ello, se emplea la función de distribución como una función de ponderación en el espacio de fase, considerándola como una herramienta clave para entender la dinámica del plasma.

Las funciones de distribución que evolucionan en el tiempo se expresan mediante seis variables independientes, representadas como $f(r, v, t)$. Estas variables abarcan tanto las tres coordenadas de posición en (x, y, z) como las tres componentes de velocidad (v_x, v_y, v_z) . En otras palabras, la función de distribución se define como $f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$.

Para un sistema de multi partículas, la función distribución se escribe como:

$$f_\alpha = f_\alpha(r, v, t) \tag{4.4}$$

Donde el índice α indica el tipo de especie. Definimos de esta forma tal que $f_\alpha(r, v, t)drdv = dN(r, v, t)$. Esta ecuación establece una conexión crucial entre la función de distribución f_α y la variación infinitesimal en el número de partículas dN en el espacio de fase.

$f_\alpha(r, v, t)$ es la función de distribución que describe la probabilidad de encontrar una partícula de la especie α en el espacio de fase, definido por las coordenadas (r, v) , en un instante t . La expresión $drdv$ representa un pequeño elemento de volumen en el espacio de fase. Multiplicar este elemento por la función de distribución proporciona el cambio diferencial en el número de partículas, $dN(r, v, t)$.

Esta ecuación encapsula la esencia de la teoría cinética, donde al integrar la función f_α sobre el espacio de fase, se obtiene el número total de partículas (N_α) de la especie α en un momento dado.

Los parámetros macro se pueden obtener mediante la integración de cualquier función de distribución. En principio, la función de distribución tiene un número infinito de momentos, pero sólo los primeros son físicamente significativos. El momento i de cualquier función de distribución está dado por:

$$M_i(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_\alpha(r, v, t) v^i d^3v \quad (4.5)$$

En especial el momento de orden cero nos entrega la densidad numérica de las partículas.

$$n_\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} f_\alpha(r, v, t) d^3v \quad (4.6)$$

4.3. Cálculo para la derivación de la Función Distribución Kappa

En esta sección se presentarán brevemente las formulaciones estándar de las distribuciones Kappa en función de la energía cinética. La distribución Kappa se derivó de las distribuciones isotrópicas en ausencia de potencial (en el sistema comoving, $\vec{u}_b = 0$, ver (Livadiotis y McComas, 2013). Siguiendo (Livadiotis y McComas, 2013; George Livadiotis, 2015), la función de distribución de velocidad o densidad de probabilidad en el espacio de fases (la base física que ya se ha discutido en la sección anterior), para un sistema de partículas con $d = 3$ grados cinéticos de libertad, está dada por P ;

$$P(\vec{u}; \vec{u}_b; k, T) = \left[\pi v_t^2 \left(\kappa - \frac{d}{2} \right) \right]^{-\frac{d}{2}} \frac{\Gamma(\kappa + 1)}{\Gamma(\kappa - \frac{d}{2} + 1)} \left[1 + \frac{1}{(\kappa - \frac{d}{2})} \frac{(\vec{u} - \vec{u}_b)^2}{v_t^2} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.7)$$

Donde, $v_t \equiv \sqrt{2K_B T/m}$, es la velocidad térmica y expresa la energía cinética en un sistema en movimiento del flujo de partículas con la velocidad total \vec{u}_b , es decir:

$$E_k = \frac{m}{2} (\vec{u} - \vec{u}_b)^2 \quad (4.8)$$

La temperatura efectiva T_κ de una distribución tipo Tsallis-kappa se puede definir en términos de la temperatura Maxwelliana T (Viñas et al., 2015; George Livadiotis,

2015), obteniendo el segundo momento de la ecuación de la función de distribución (4.7) para producir

$$T_\kappa = \frac{\kappa}{(\kappa - 3/2)} T \quad (4.9)$$

Sustituyendo v_t por el valor de d , la relación de energía cinética dada en la ecuación (4.8) y la ecuación (4.9) en (4.7), llegamos a la distribución de energía de las partículas no normalizada, función que se indica a continuación.

$$P(E; \kappa, E_c) = \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \times \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.10)$$

Normalizando la ecuación (4.10), usando $\int_0^\infty P(E; \kappa, E_c) dE = 1$, se transformará en una distribución Kappa, cuya función de distribución de energía f está dada por:

$$f(E; n, \kappa, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \times \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.11)$$

Donde f es la densidad en el espacio de fase, E es la energía cinética, n es la densidad de partículas, m es la masa de la partícula, Γ es la función gamma de Euler, y κ y E_c son el parámetro κ y la energía característica o central, respectivamente. El índice espectral κ debe tomar valores suficientemente grandes, $\kappa > 3/2$, para evitar el valor crítico $\kappa_c = 3/2$, donde la función de distribución en la ecuación (4.11) colapsa y la temperatura central no está definida. De hecho, para $\kappa \rightarrow \infty$, utilizando las definiciones a continuación:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n} \right)^n = e^x \quad (4.12)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Gamma(n + \alpha)}{\Gamma(n)n^\alpha} = 1 \quad (4.13)$$

$$\lim_{\kappa \rightarrow \infty} f(E; n, \kappa, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \cdot \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[\frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \right] \cdot \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.14)$$

$$= n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \cdot \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[\frac{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}}{\Gamma(\kappa)} \right]^{-1} \cdot \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[\left(1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right)^{-\kappa} \left(1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right)^{-1} \right] \quad (4.15)$$

Usando el límite (4.13), con $\alpha = -1/2$, el segundo factor de (4.15) es igualdad a 1, como se muestra a continuación

$$\lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[\frac{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})}{\Gamma(\kappa)\kappa^{-1/2}} \right]^{-1} = 1. \quad (4.16)$$

Luego,

$$\lim_{\kappa \rightarrow \infty} f(E; n, \kappa, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} \cdot \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right)^\kappa}. \quad (4.17)$$

Sea $Z = \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right)^\kappa}$, usando el límite (4.12), se obtiene $Z = e^{-E/E_c}$, así la ecuación 4.17, queda

$$f(E; n, E_c) = n \left(\frac{m}{2\pi E_c} \right)^{3/2} e^{-\frac{E}{E_c}}, \quad (4.18)$$

obteniendo la distribución Maxwelliana.

La función de distribución Kappa se destaca como una aproximación efectiva para ajustar observaciones y datos satélites en el contexto de plasmas astrofísicos y espaciales. Además, demuestra ser una buena opción para adaptarse a las funciones de distribución de velocidad (VDF) de partículas en plasmas espaciales. Su utilidad se extiende al proporcionar una generalización que permite describir con éxito plasmas con colas decrecientes, representándolos como leyes de potencia en función de la velocidad.

4.4. Flujo Diferencial

Existe una relación entre el flujo diferencial de partículas y la función de distribución en el espacio de fase de dichas partículas, descrita por la siguiente expresión (Wolfgang Baumjohann y Treumann, 2012):

$$F_p = \frac{2E}{m^2} \times f(E, n, \kappa, E_c) \quad (4.19)$$

Sustituyendo la ecuación (4.1) en (4.19), podemos reescribir el flujo diferencial de partículas de la siguiente forma:

$$F_p = \frac{1}{\pi} \frac{n}{\sqrt{2\pi m}} \frac{E}{E_c^{3/2}} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.20)$$

El flujo diferencial de energía es otra cantidad diferente del flujo diferencial de partículas que se utiliza a menudo en la física del plasma espacial (Christon et al., 1988) y se define como:

$$F_E = F_p \cdot E \quad (4.21)$$

Sustituyendo la ecuación (4.20) en (4.21), el flujo de energía diferencial viene dado por:

$$F_E(E) = \frac{1}{\pi} \frac{n}{\sqrt{2\pi m}} \frac{E^2}{E_c^{3/2}} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - \frac{1}{2})\sqrt{\kappa}} \left[1 + \frac{E}{\kappa E_c} \right]^{-(\kappa+1)} \quad (4.22)$$

Para el cálculo de las distribuciones Kappa en este trabajo, se ocupó la ecuación (4.22).

4.5. Índice κ

Se llevó a cabo el ajuste de las distribuciones Kappa en relación con el flujo de energía de los protones, utilizando la ecuación (4.22), la cual se detalla en la sección

anterior. Esta metodología representa la única forma que poseemos para analizar las distribuciones basándonos en los datos proporcionados por THEMIS, específicamente los espectros de flujo de energía expresados en unidades de $eV/(cm^2 - s - sr - eV)$ que dependen de los 48 canales de energía que miden en unidades de electronvolts. Así, logramos obtener ajustes de distribuciones Kappa mediante ecuaciones que establecen la conexión entre las distribuciones Kappa y el flujo diferencial. A su vez, relacionamos el flujo diferencial con los flujos de energía, mediante la ecuación (4.21) que constituyen los datos disponibles para nuestro análisis.

En el contexto de este estudio, centrado en la dinámica de la magnetósfera, hemos ampliado nuestro rango de estudio a Kappas comprendidos entre $3/2 < \kappa < 30$. Esta extensión del rango nos permite examinar una variedad más amplia de distribuciones.

Una vez obtenidos los valores de los índices Kappa para todas las ventanas de tiempo, se procedió a seleccionar únicamente aquellos que cumplieran con las restricciones establecidas. Estas restricciones incluyeron condiciones específicas para las posiciones en las componentes x_{GSM} ($-50 < X/R_E < 15$) e y_{GSM} ($-30 < Y/R_E < 30$), así como restricciones para el campo magnético de fondo ($B_0 < 10^3$ nT), la densidad de iones ($n_i \geq 0,1$ cm⁻³) y la velocidad de los iones ($V_{bulk} < 300$ km/s). Estas condiciones reflejan valores característicos observados en las regiones de la magnetósfera. En total, se obtuvieron 228,285 valores de índice Kappa que superaron exitosamente los criterios de filtrado establecidos.

Para el análisis del índice Kappa y el parámetro de colisión, se estudiaron cuatro zonas características (ver Figura 4.1). Estas zonas corresponden a: día, noche, amanecer y atardecer. La zona de la izquierda comprende la región de día, al lado derecho (posterior a la Tierra) encontramos la región noche, la región superior corresponde a la región del amanecer y finalmente la región inferior corresponde a la región del atardecer. En este gráfico solo se utilizaron valores de κ entre $3/2$ y 10. Esto se hizo

para ilustrar las regiones de estudio y observar de forma rápida los valores de Kappa en relación a sus posiciones en coordenadas GSM.

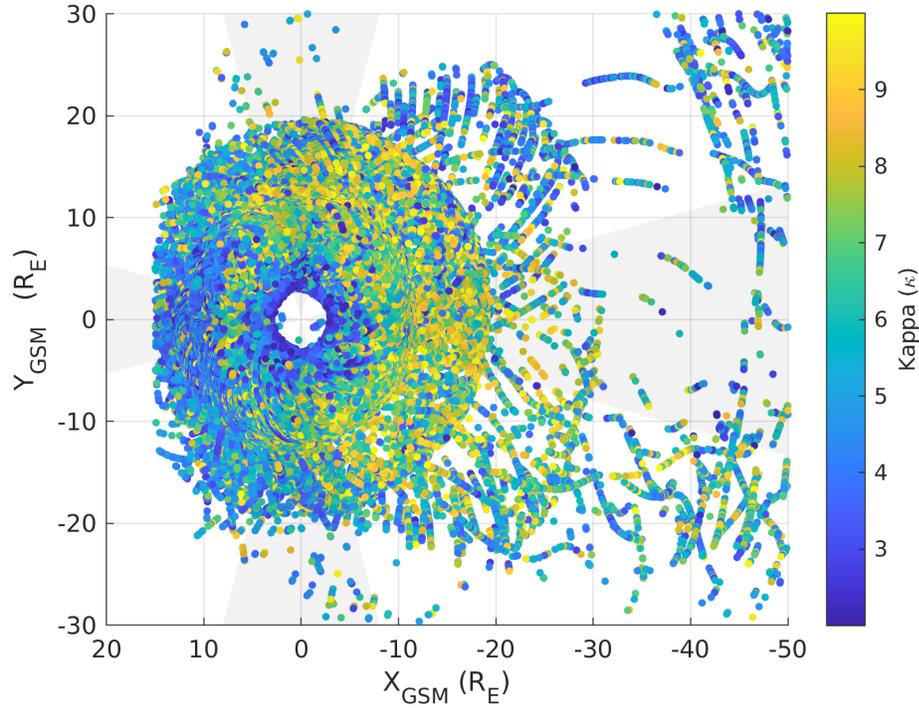


Figura 4.1: Valores del parámetro Kappa sobre distintas posiciones del satélite, cubriendo rangos del parámetro Kappa desde 2 hasta 10. En color gris se observan las zonas, día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.

Para la elaboración del gráfico 4.2, inicialmente dividimos el espacio en 50 celdas, cada una definida por intervalos Δx y Δy basados en la posición asociada a cada valor del índice Kappa. Estos límites se establecieron en $-50 < x_{GSM} < 40$ e $-60 < y_{GSM} < 50$. Luego, se contabilizó el número de índices Kappa que cayeron dentro de cada celda y se calculó un promedio simple. El valor resultante representa el promedio del índice Kappa en cada celda. Para visualizar de manera efectiva la variación de estos valores por celda, se representaron en escala \log_{10} . Así, el gráfico exhibe un histograma bidimensional que presenta los valores del índice Kappa en escala logarítmica (en color), en función de su posición x_{GSM} e y_{GSM} .

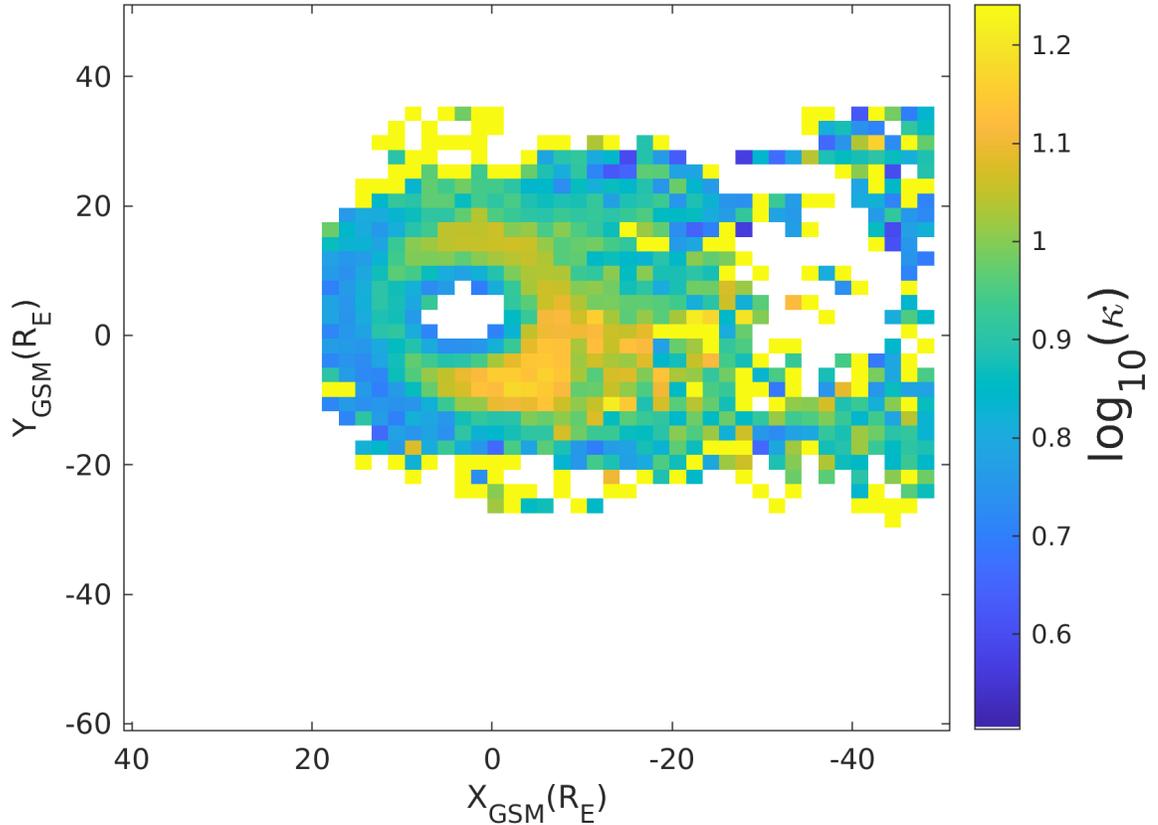


Figura 4.2: Histograma 2D del índice κ con respecto a sus posiciones x e y en coordenadas GSM, que proporciona una visualización de la distribución espacial de los valores del índice Kappa promedio en escala \log_{10} . En colores tenemos el promedio de $\log_{10}(\kappa)$ por celda. Fuente: propia.

En la Figura 4.2, se destaca que, en la región comprendida entre $15 > x/R_E > 0$, las celdas adyacentes exhiben en promedio valores de Kappa cercanos a $\kappa \approx 5$ y $\kappa \approx 6$, correspondientes a distribuciones Kappa con colas largas. Las áreas con los valores promedio más altos de κ , alrededor de $\kappa \approx 20$, se localizan en $20 < y/R_E < 30$ y en $-30 < y/R_E < -20$. Un aspecto notable es que estas áreas parecen tener una simetría con respecto a la Tierra. Además, llama la atención una zona ubicada entre los valores $-15 < x/R_E < 5$ y $-15 < y/R_E < 1$, donde se identifica claramente

una población de distribuciones con valores cercanos a $\kappa \approx 12$. La forma y ubicación de esta región sugiere que podría pertenecer a una zona de interés significativo, posiblemente relacionada con la plasma sheet o incluso con los cinturones de Van Allen.

4.6. Perfiles de Distribución Kappa

En la figura 4.3, se presenta un perfil de distribución Kappa en la zona de día, específicamente para el satélite THB en la fecha 19/06/2007, utilizando la ventana de tiempo 94 del día (que corresponde a la hora 09:40 am en unidades de horas). El índice Kappa obtenido fue $\kappa = 2,87 \pm 0,1$. En el gráfico, la curva en color azul representa el promedio del flujo calculado a partir de los datos, donde se promediaron 239 flujos para los 48 canales de energía.

Las curvas rojas en el gráfico ilustran los valores máximos y mínimos de los flujos por cada canal de energía utilizados en el cálculo del promedio. En este contexto, el color negro indica el ajuste Kappa, mostrando cómo la distribución teórica se adapta a los datos observados (solo al núcleo).

Como complemento, en la Figura 4.4 presentamos un gráfico donde los ejes x muestran los canales de energía (medidos en eV), mientras que en los ejes y representamos los espectros de flujo de energía (medidos en $[KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)]$). Para la misma fecha 16/06/2007, en la representación, los 239 espectros de flujo de energía correspondientes a la ventana número 94 del día están destacados en color rojo, mientras que en azul se destaca el promedio del flujo de energía de estos 239 espectros para los 48 canales de energía (puntos). La amplitud de las curvas rojas coincide con las curvas rojas de la figura anterior 4.3 que representan los valores máximo y mínimo de flujo por canal de energía. Además, las líneas verticales punteadas indican los límites del núcleo de la distribución que se emplea para ajustar la distribución Kappa. En color negro se observa la distribución kappa ajustada

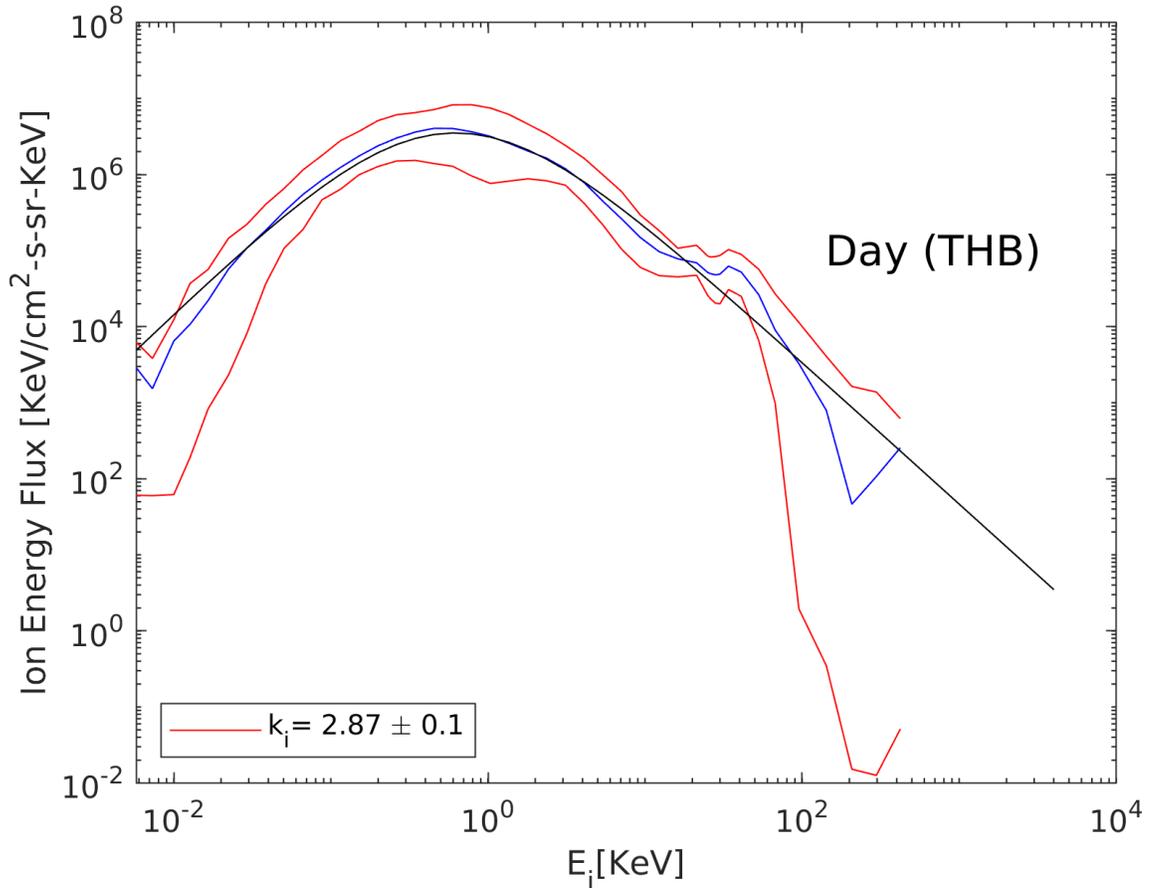


Figura 4.3: En la representación gráfica para la región diurna, el promedio de los flujos de energía se destaca en azul, mientras que los valores máximos y mínimos por canal de energía se visualizan en rojo, abarcando la totalidad de flujos en la ventana temporal. Además, se presenta en negro el ajuste Kappa en relación con el núcleo de la distribución. Los canales de energía en [KeV] se sitúan en el eje x, y en el eje y se muestra el flujo de energía en $[\text{KeV}/(\text{cm}^2 - \text{s} - \text{sr} - \text{KeV})]$. Este análisis corresponde a la ventana de tiempo 94 del día 19/06/2007, capturada por el satélite THB. Fuente: propia.

obtenida pero graficada para todos los canales de energía.

En la figura 4.5, se presenta un perfil de distribución Kappa en la zona de noche, específicamente para el satélite THB en la fecha 24/12/2007, utilizando la ventana

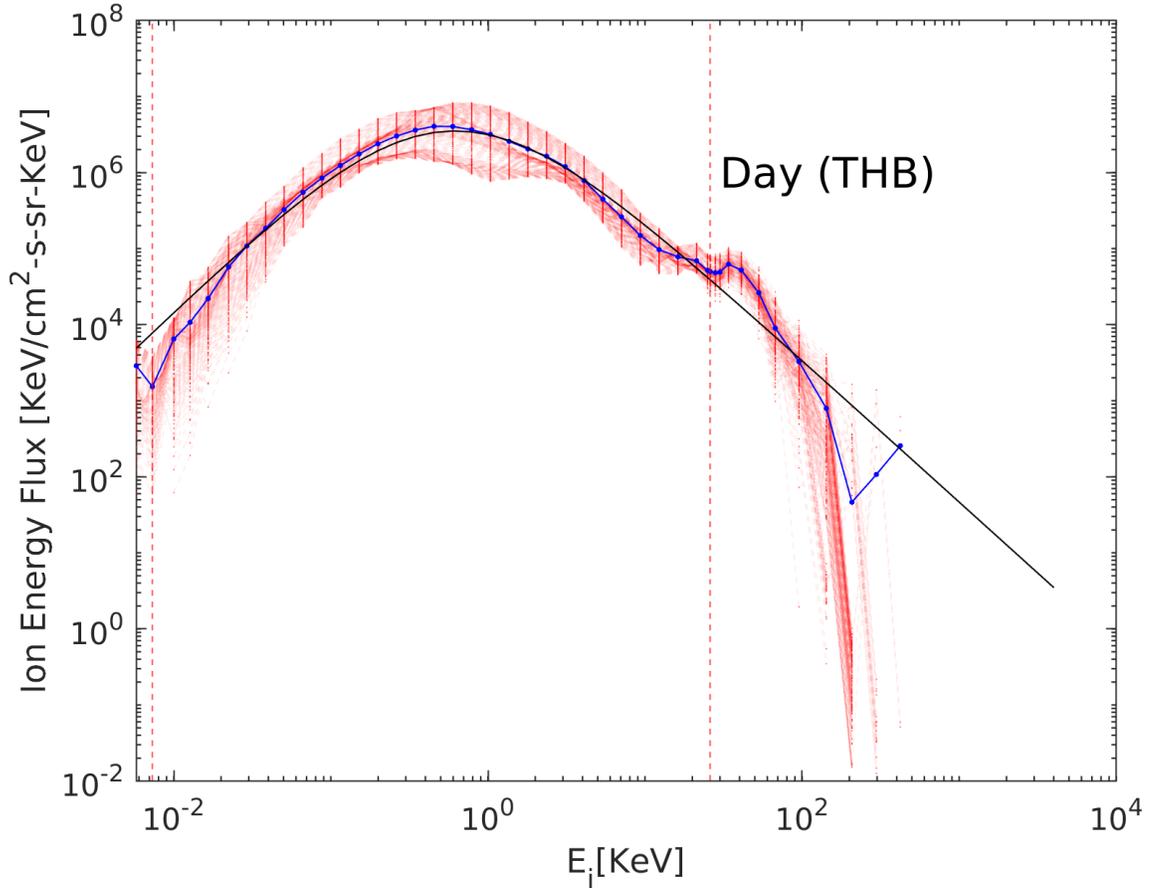


Figura 4.4: Se representan en rojo los espectros de flujo de energía [$KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)$] (239) para la ventana de tiempo 94 correspondiente al día 16/06/2007 (región de día, satélite THB). En color azul se muestra el promedio de los 239 espectros, y en color negro, el ajuste Kappa calculado para el núcleo de la distribución. Las líneas verticales punteadas de color rojo representan los límites del núcleo de la distribución. Fuente: propia.

de tiempo 12 del día (que corresponde a la hora 01:20 am en unidades de horas) . El índice Kappa obtenido fue $\kappa = 6,55 \pm 0,5$. La curva en color azul representa el promedio del flujo calculado a partir de los datos, donde se promediaron 242 flujos para los 48 canales de energía.

Las curvas rojas en el gráfico ilustran los valores máximos y mínimos de los flujos

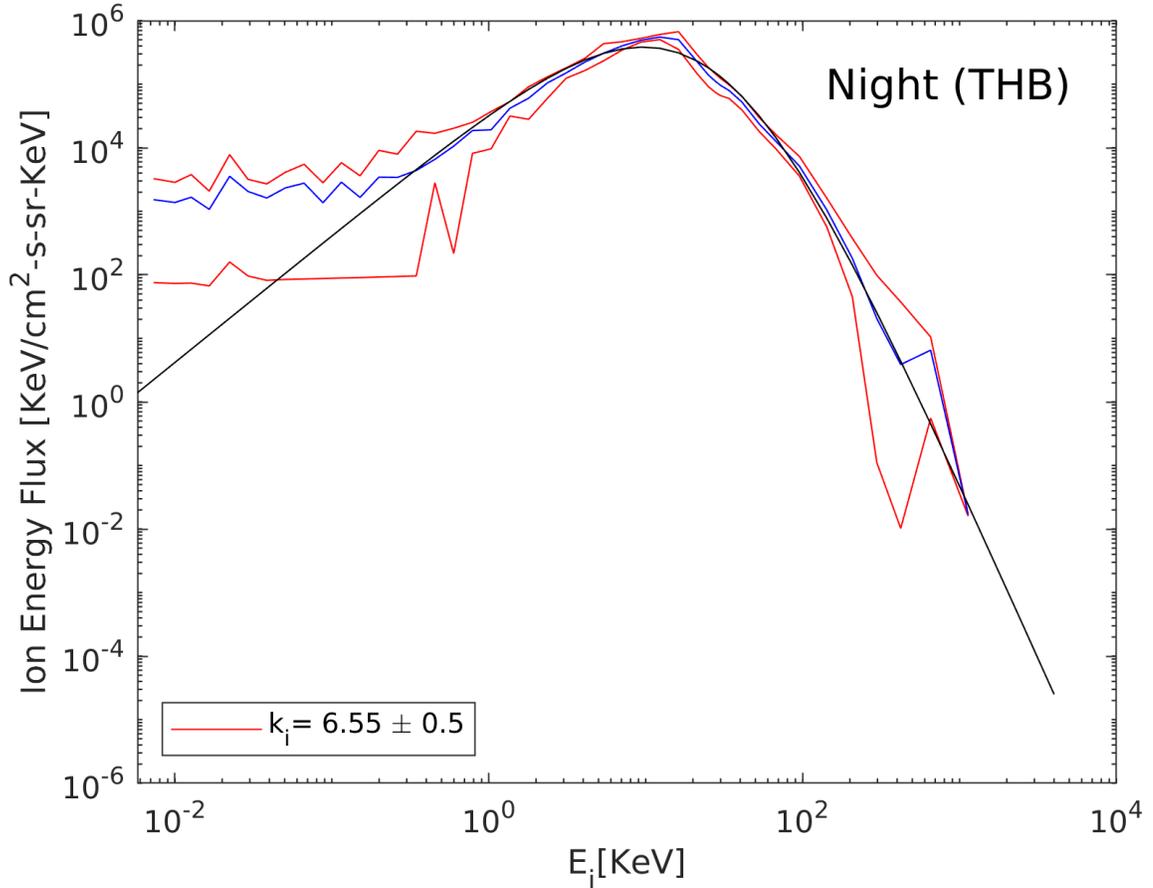


Figura 4.5: En la representación gráfica para la región diurna, el promedio de los flujos de energía se destaca en azul, mientras que los valores máximos y mínimos por canal de energía se visualizan en rojo, abarcando la totalidad de flujos en la ventana temporal. Además, se presenta en negro el ajuste Kappa en relación con el núcleo de la distribución. Los canales de energía en [KeV] se sitúan en el eje x, y en el eje y se muestra el flujo de energía en [$KeV/(cm^2 - s - sr - KeV)$]. Este análisis corresponde a la ventana de tiempo 12 del día 24/12/2007, capturada por el satélite THB.. Fuente: propia.

por cada canal de energía utilizados en el cálculo del promedio. La curva en color negro indica el ajuste Kappa, mostrando cómo la distribución teórica se adapta a los datos observados(solo al núcleo).

El procesamiento de las figuras 4.5 y 4.3 fue idéntico. En estas dos ventanas particulares, los perfiles de flujos de energía, respecto a los canales de energía, no exhiben una amplia dispersión de datos, especialmente en los valores cercanos al núcleo de las distribuciones, donde la separación entre las curvas rojas fue mínima.

Por esta razón, ajustar una distribución Kappa solo al núcleo resulta beneficioso, porque los promedios de flujo obtenidos exhiben una baja desviación estándar (DE). En el cálculo del ajuste, se utilizó la desviación estándar para determinar el peso (P) de los flujos en cada canal de energía, definiendo el peso como $P = 1/DE$. De esta manera, los pesos con valores cercanos a 1 tuvieron un impacto más significativo en el ajuste que aquellos con valores significativamente menores a 1.

Las representaciones gráficas en la Figura 4.6 fueron generadas mediante un histograma simple en escala \log_{10} , buscando así obtener una visualización más clara de la distribución para facilitar su comparación con la Figura 4.2, que también utiliza la misma escala logarítmica. Además, se emplearon 100 bins para la construcción de estos gráficos.

En la Figura 4.6a correspondiente a la región de día, se muestra un histograma o distribución del índice κ , destacando una concentración predominante alrededor de $\kappa \approx 10^{0,6} \approx 4$. Este hallazgo indica que los datos exhiben un comportamiento consistente con distribuciones que presentan colas alargadas para esta región específica. No obstante, esta distribución es asimétrica en relación con el máximo mencionado anteriormente, mostrando concentraciones de índice Kappa en un rango de valores entre $10^{0,8} \approx 6$ y $10^{1,4} \approx 25$. Esto significa que las distribuciones obtenidas son más parecidas a una Maxwelliana. En consecuencia, en la zona de día, a pesar de exhibir perfiles de distribución coherentes con distribuciones Kappa, se observa una notable presencia de perfiles correspondientes a distribuciones Maxwellianas.

Para la región de noche, la figura 4.6b revela que los valores más frecuentes para el índice kappa se sitúan entre $10^{0,9} < \kappa < 10^{1,3}$ que equivalen a $\kappa \approx 8$ y $\kappa \approx 19$. Estos valores están distantes de la descripción de colas de altas energías.

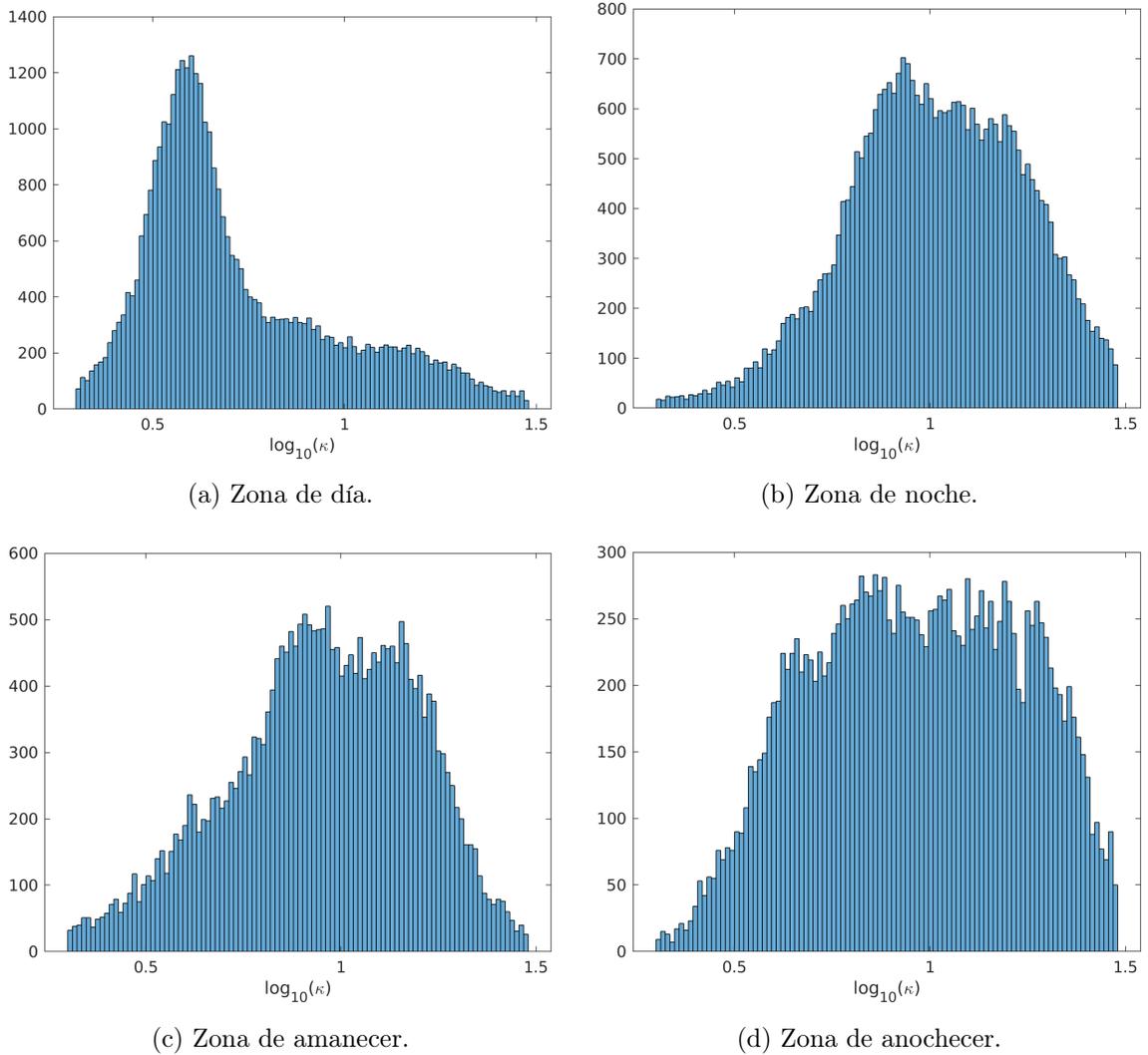


Figura 4.6: Histogramas 1D $\log_{10}(\kappa)$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.

Para la región del amanecer, de la figura 4.6c se observa una distribución aproximadamente bimodal, que además es asimétrica en sus colas. Sus máximos se presentan cercanos a $\kappa \approx 8$ y $\kappa \approx 15$, pero encontramos muchos valores de Kappa entre los valores $\kappa \approx 4$ y $\kappa \approx 25$. También en esta zona identificamos poblaciones de Kappa que modelan de manera efectiva las colas de altas energías.

Finalmente, la Figura 4.6d, correspondiente a la región del atardecer, se aprecian

varios valores para el índice Kappa, $4 < \kappa < 25$. Se destaca que varios valores en los datos presentan frecuencias bastante similares, sugiriendo que no hay un valor dominante y que la distribución es bastante equitativa. Por lo tanto, se trata de una distribución sin máximos evidentes.

4.7. Parámetros de colisión

En estudios recientes acerca del comportamiento del viento solar, se ha investigado la relación entre las colisiones y otros parámetros característicos del plasma. En estas investigaciones, se suele usar un parámetro conocido Edad Colisional (A_c), definido por (J. Kasper, Lazarus y Gary, 2008; Justin Christophe Kasper et al., 2017; Chhiber et al., 2016; Maruca et al., 2013; Heidrich-Meisner, Berger y Wimmer-Schweingruber, 2020; Bale, Pulupa et al., 2013; Livi, Marsch y Rosenbauer, 1986):

$$A_c = \frac{R}{U} \omega_{col}, \quad (4.23)$$

donde R es la distancia total entre el Sol y el punto de observación, U es la velocidad del viento solar y ω_{col} es la frecuencia característica para las interacciones de Coulomb entre dos especies. A_c es una medida que cuantifica qué tan frecuente son las colisiones comparadas con el tiempo característico de vuelo de un paquete de plasma.

La frecuencia de colisión es proporcional a (Hernandez, Livi y Marsch, 1987):

$$\omega_{col} \propto \frac{n}{T^{3/2}}, \quad (4.24)$$

siendo n y T la densidad y la temperatura de las partículas, respectivamente.

En plasmas de alta edad colisional, las colisiones entre partículas son frecuentes y energéticamente eficientes, lo que debería resultar en un rápido equilibrio térmico y una distribución de velocidades relativamente isotrópica. Por otro lado, en plasmas de baja edad colisional, las colisiones son menos frecuentes y la interacción entre

partículas es limitada. Esto puede conducir a una separación de las distribuciones de velocidad o energía, dando lugar a fenómenos como la formación de haces de partículas energéticas y la posible aparición de inestabilidades.

La edad colisional se suele utilizar para estudiar el viento solar, donde se asume que el paquete de plasma viaja con la misma rapidez desde la fuente al punto de observación. Sin embargo, en el estudio de la magnetósfera terrestre, no se puede hacer esta suposición pues las velocidades observadas son mucho más bajas que las velocidades del viento solar y la fuente de los paquetes de plasma no son claros, además que la magnetósfera está fuertemente influenciada por otros eventos y procesos de origen especialmente electromagnético que ocurren en esta región.

Para abordar el estudio de las colisiones de partículas que tienen lugar en la magnetósfera terrestre, se propone una razón de frecuencias que es dependiente de un tiempo característico acorde con las condiciones específicas de la magnetósfera. En este caso, dado que el campo magnético terrestre es relativamente constante por periodos de tiempo relativamente largos, entonces una posible escala de tiempo característica es el período de giro ciclotrónico de las partículas en torno a las líneas de campo magnético. Así, usaremos la frecuencia de ciclotrón (Ω), también conocida frecuencia de oscilación, frecuencia giroscópica o frecuencia de Larmor, dada por:

$$\Omega = \frac{qB_0}{m}, \quad (4.25)$$

donde q y m son la carga y masa de la partícula, respectivamente, y B_0 es la intensidad del campo magnético de fondo.

En el contexto de nuestro estudio, hemos determinado el campo magnético de fondo utilizando las componentes del campo magnético (B_x, B_y, B_z) y aplicando un proceso de ajuste de tendencia. Este procedimiento tiene como objetivo eliminar o ajustar la tendencia a largo plazo presente en los datos, lo que resulta en datos más estacionarios y facilita un análisis más preciso de las variaciones temporales más sutiles y significativas.

A partir de este proceso, hemos obtenido las componentes del campo magnético de fondo (B_{0x}, B_{0y}, B_{0z}) . Posteriormente, hemos calculado las fluctuaciones del campo magnético (δB) a partir de estas componentes. Seguidamente, determinamos el promedio del campo magnético de fondo (B_0) utilizando las componentes obtenidas. Finalmente, calculamos la frecuencia de ciclotrón en términos de la magnitud del campo magnético de fondo (\vec{B}_0) .

La frecuencia de ciclotrón se refiere a la frecuencia angular con la cual una partícula cargada (electrón o ión) en movimiento experimenta un movimiento circular o helicoidal en respuesta a un campo magnético. Este fenómeno de excitación de las partículas como respuesta a un campo magnético es fundamental en la física de plasmas y otras áreas para comprender la interacción de partículas cargadas en presencia de campos magnéticos.

Es sabido que cuando una partícula cargada se mueve en un campo magnético, experimenta una fuerza llamada fuerza de Lorentz, que actúa perpendicular tanto a la dirección de movimiento de la partícula como al campo magnético. Esta fuerza provoca que la partícula describa una trayectoria circular o helicoidal alrededor de las líneas del campo magnético.

Con el propósito de estudiar las colisiones que ocurren en la magnetósfera terrestre, definiremos un nuevo parámetro que compare la frecuencia de colisiones ω_{col} , según (4.24), y la frecuencia de ciclotrón Ω según (4.25), es decir

$$\xi_{col} = \frac{\omega_{col}}{\Omega} \propto \frac{n m}{q T^{3/2} B_0}. \quad (4.26)$$

Para efectos prácticos, consideraremos que la constante de proporcionalidad tanto en (4.24) y (4.26) es unitario y con las unidades correctas para que ξ_{col} sea adimensional. Esta constante de proporcionalidad solo depende de cantidades fundamentales como la masa y carga de iones, además del logaritmo de Coulomb $\ln \Lambda$ que usualmente toma valores entre 5 y 15. Así, esta constante de proporcionalidad no afecta demasiado

(salvo magnitudes) en el cálculo siguiente, por lo que de aquí en adelante usaremos:

$$\xi_{col} = \frac{n m}{q T^{3/2} B_0}. \quad (4.27)$$

4.8. Análisis de ξ_{col}

La razón de frecuencias que propusimos fue calculada a partir de la intensidad del campo magnético de fondo, la densidad y la temperatura de las partículas (protones). De manera similar al índice Kappa, se estudiaron las cuatro zonas características correspondientes al día, noche, amanecer y atardecer. En la Figura 4.7a corresponde a la región de día. El histograma muestra la distribución de los valores de la razón de frecuencias ξ_{col} en escala logarítmica (\log_{10}). En este caso particular, la distribución bimodal es notoria. El máximo total se encuentra cerca de valores cercanos a $\xi_{col} \approx 10^{-1}$ y la segunda población tiene un máximo aproximado de $\xi_{col} \approx 10^{-6}$. En las representaciones gráficas 4.7b, 4.7c y 4.7d, que corresponden a las regiones de noche, amanecer y atardecer, respectivamente, se destaca una notable similitud en los valores de ξ_{col} en las distribuciones, donde $\xi_{col} \approx 10^{-6}$ constituye el máximo en todas ellas. Asimismo, se evidencia que las tres distribuciones exhiben asimetría con respecto al máximo, mostrando colas alargadas hacia valores de ξ_{col} cercanos a 10^{-2} .

En un enfoque más integral, exploramos el parámetro ξ_{col} en diversas posiciones de la magnetósfera en coordenadas GSM. Este enfoque nos permitió observar cómo se comporta en regiones específicas que fueron identificadas previamente en el histograma bidimensional para los índices Kappa, donde se revelaron regiones distintivas con valores característicos de κ . Este análisis tiene como objetivo proporcionar una comprensión más completa de la distribución de los datos de ξ_{col} a lo largo de la magnetósfera.

La figura 4.8 muestra un mapa de colisiones relativas ξ_{col} dentro de la magnetósfera. El procedimiento para crear el histograma bidimensional 4.8 fue idéntico

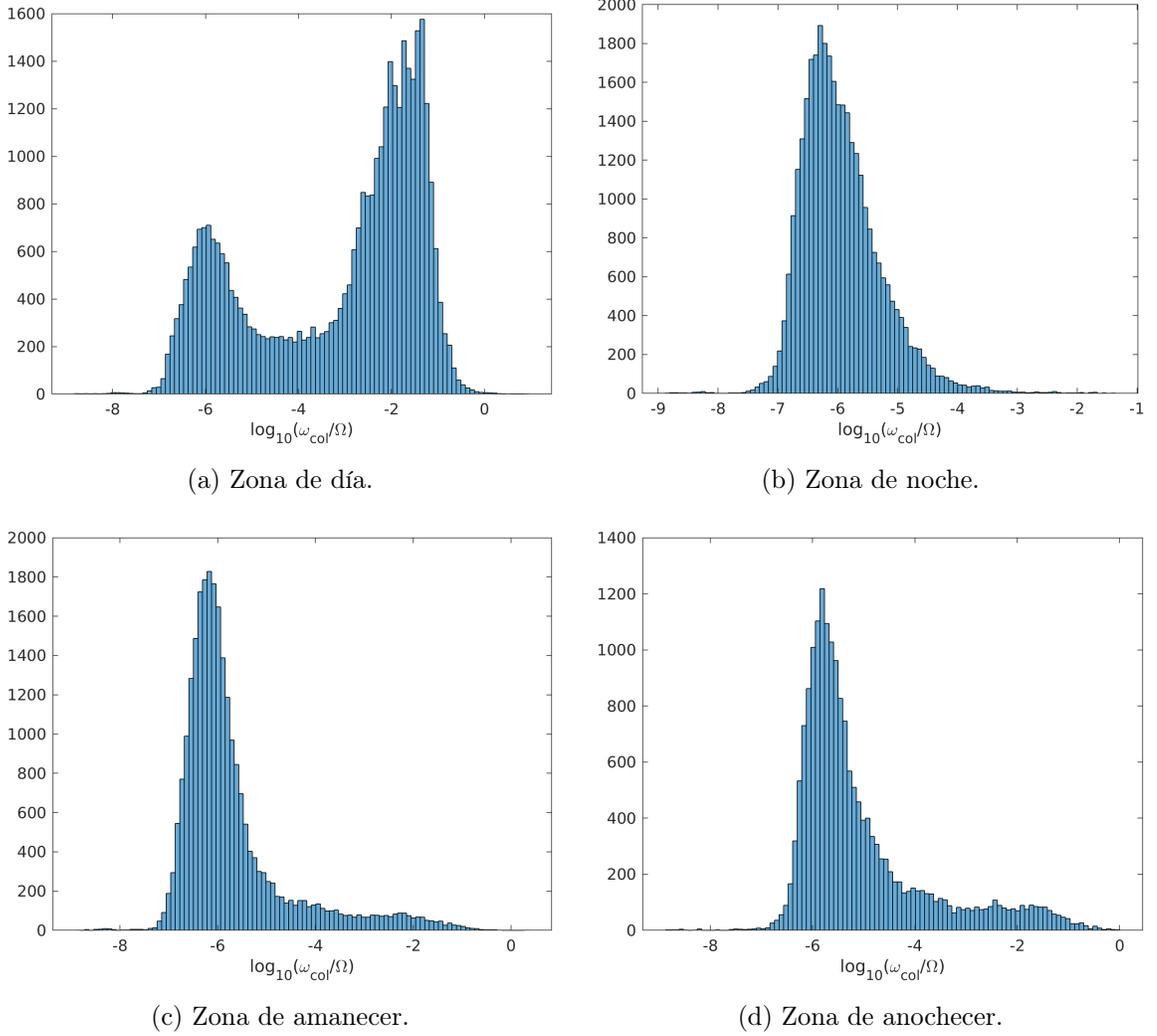


Figura 4.7: Histogramas 1D $\log_{10}(\xi_{col})$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. Fuente: propia.

al utilizado en la subsección anterior, donde estudiamos el índice Kappa promedio en escala \log_{10} . En consecuencia, cada celda representa un color específico correspondiente al promedio de ξ_{col} asociado a esa ubicación particular.

En la Figura 4.8, se distingue una región característica con forma de arco, situada entre $0 < x/R_E < 15$, que exhibe valores promedio de $\xi_{col} > 10^{-2}$. Estos valores representan los más altos en esta razón de frecuencias ξ_{col} . Como observamos en la

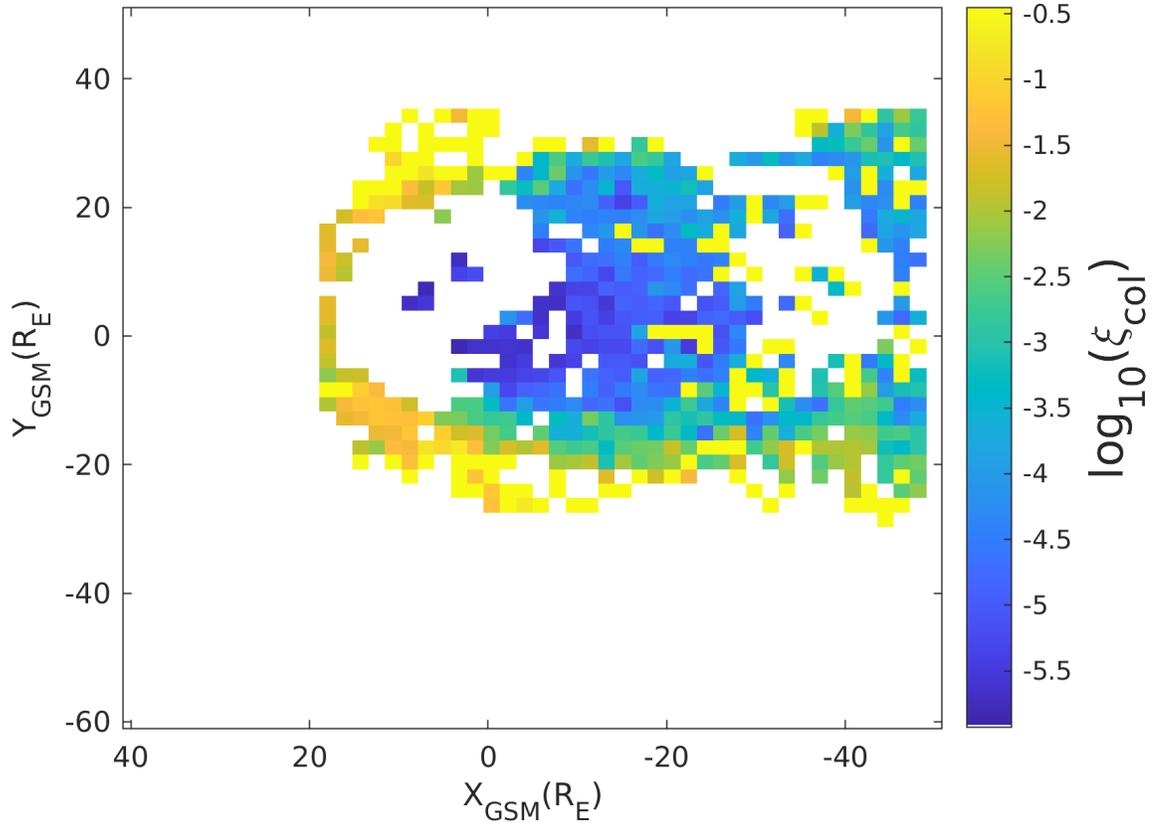


Figura 4.8: Se representa un histograma 2D donde las posiciones son graficadas en coordenadas x e y en el sistema GSM, proporcionando una visualización de la distribución espacial de datos en relación con las coordenadas geográficas. En colores tenemos el promedio de $\log_{10}(\xi_{col})$. Fuente: propia.

Figura 4.2, esta zona está asociada con valores bajos del índice Kappa, los cuales describen colas de altas energías.

En la región situada detrás de la Tierra, especialmente en la región de noche, se observan valores bajos de ξ_{col} que alcanzan valores cercanos a 10^{-6} . Además, la región que captó nuestra atención en el histograma bidimensional de Kappa, ubicada entre $-15 < x/R_E < 5$ y $-15 < y/R_E < 1$, muestra valores promedio de ξ_{col} cercanos a 10^{-6} . Estos resultados generan discrepancias con las expectativas de nuestro estudio, lo que suscita nuevas discusiones sobre el papel real de las colisiones en los procesos

de regulación de energía en la magnetósfera.

Un valor bajo de la razón ξ_{col} sugiere que el papel de las colisiones, en comparación con la frecuencia de ciclotrón, no es predominante. Por otro lado, un valor grande de ξ_{col} indica un papel significativo de las colisiones en relación con la frecuencia de ciclotrón. Nuestros valores de ξ_{col} , en todas las regiones, parecen ser relativamente bajos. No obstante, es importante destacar que esta apreciación depende en gran medida de cómo definimos nuestro parámetro. En realidad, la frecuencia de colisiones ω_{col} es un parámetro proporcional a $\propto n/T^{3/2}$. Sin embargo, como se indica por Hernandez, Livi y Marsch (1987), este parámetro contiene otros factores constantes que pueden aumentar o disminuir los valores de ξ_{col} .

4.9. Estudio de Correlaciones

La figura 4.9 muestra cuatro gráficas de dispersión bidimensionales, cada una correspondiente a las cuatro zonas (día, noche, amanecer y anochecer) que describimos en la figura 4.1, para estudiar la relación entre κ y ω_{col}/Ω . Ambas cantidades se muestran en escala \log_{10} . La escala de colores a la derecha de cada gráfica indica la densidad de probabilidad a la que denotaremos por la letra N , que viene dada, por $N = n_i/(a_{bin} * n_T)$, donde n_i corresponde al número total de valores obtenidos por celda, el a_{bin} corresponde al área de cada celda ($\Delta x \Delta y$) y n_T corresponde al número total de valores obtenidos en todas las celdas. Esta densidad de probabilidad muestra la frecuencia relativa de las mediciones en cada celda. Los colores más cálidos (como el amarillo) indican una mayor densidad de probabilidad, mientras que los colores más fríos (como el azul) indican una menor densidad.

La figura 4.9a muestra la zona de día, donde se observa una concentración densa de puntos la región de parámetros $0,4 \leq \log_{10} \kappa \leq 0,9$ (o bien $2,5 \leq \kappa \leq 8$) y $10^{-4} \leq \xi_{col} \leq 1$, con el máximo de probabilidad aproximadamente en $\kappa = 4$ y $\xi_{col} = 0,01$. Sin embargo, se observa un grupo menos denso o menos probable de

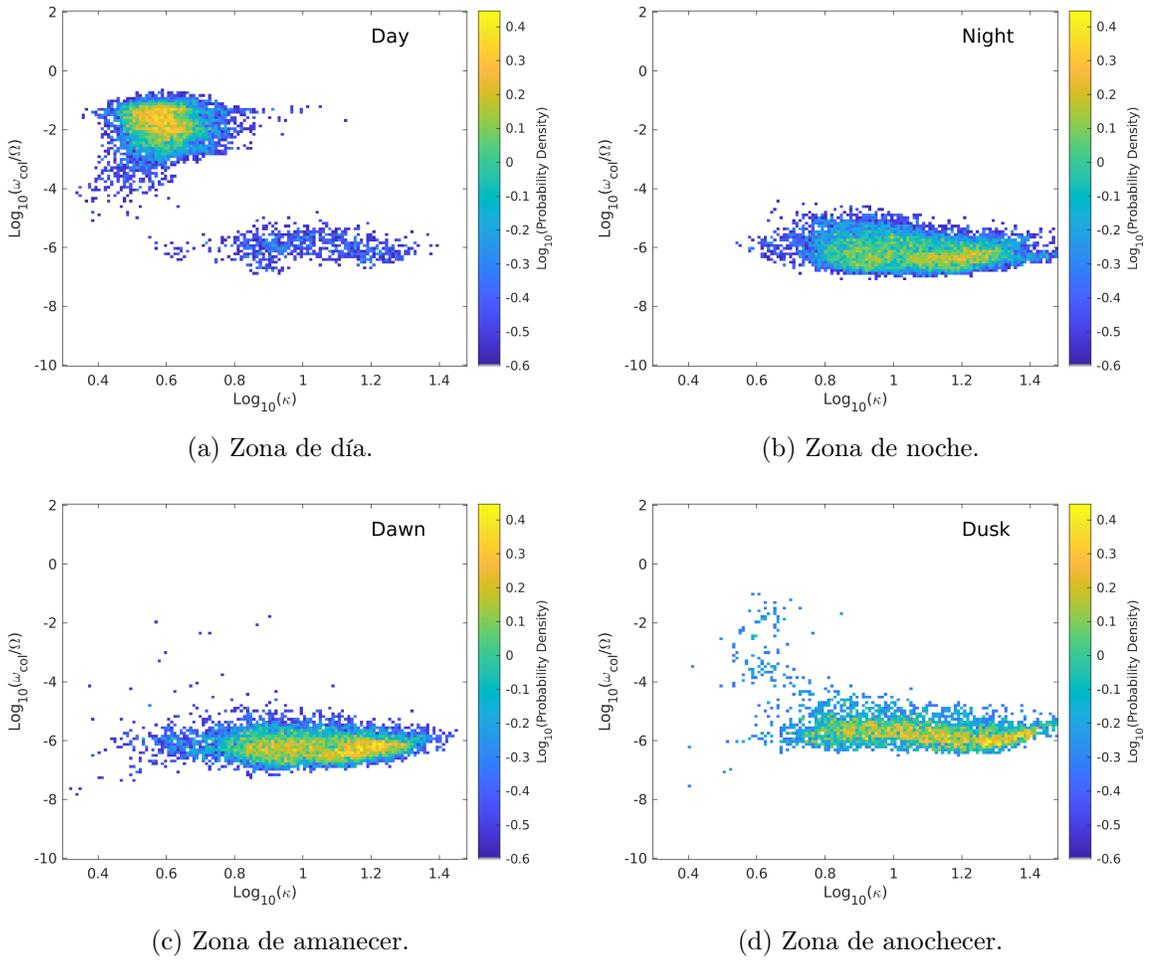


Figura 4.9: Histogramas 2D de $\log_{10}(\kappa)$ vs $\log_{10}(\omega_{col}/\Omega)$ para diferentes zonas de la magnetósfera: día, noche, amanecer y atardecer. La escala de colores corresponde a la densidad de probabilidad en escala \log_{10} . Fuente: propia.

datos para valores de $0,8 \leq \log_{10} \kappa \leq 1,4$ y $\xi_{col} \approx 10^{-6}$. Si bien hay una bimodalidad en la mayoría de los datos, parecen estar centrado en Kappas mas pequeños $\kappa \approx 10^{0,6}$. En concordancia con figuras anteriores, el plasma magnetosférico en la zona de día predominan las distribuciones con colas de altas energías levantadas, que parecen estar correlacionadas con valores muy pequeños de la frecuencia de colisión comparada con la frecuencia de ciclotrón.

Las figuras 4.9b, 4.9c y 4.9d muestran el mismo estudio pero en las zonas de noche, amanecer y atardecer, respectivamente. Aunque las densidades varían ligeramente en magnitud, la distribución de puntos comparte características similares en las tres gráficas: una distribución de puntos más estrecha y alargada horizontalmente en relación a la zona de día, que se extiende para valores más grandes de κ en el rango $0,6 \leq \log_{10} \kappa \leq 1,5$ ($4 \leq \kappa \leq 30$) pero para colisiones relativas acotadas cerca de $\xi_{col} = 10^{-6}$.

Así, las distribuciones de κ más altas parecen vincularse con colisiones mucho menos frecuentes en comparación con la frecuencia ciclotrón. Similarmente, distribuciones con colas elevadas de altas energías, como en la zona de día, están asociadas a procesos donde las colisiones son más frecuentes en relación a un giro ciclotrónico. Esta observación contradice nuestra hipótesis original, que sugería que las distribuciones más cercanas a las Maxwellianas deberían presentar una mayor incidencia de colisiones. En este caso, la tendencia es inversa.

Este descubrimiento resulta contradictorio con nuestra hipótesis inicial o, al menos, desafía nuestra idea original que postulaba que la falta de colisiones debería regular la formación de distribuciones Kappa. Contrariamente a nuestras expectativas, observamos que un aumento en el número de colisiones se asocia con colas más largas en las distribuciones Kappa. Este hallazgo plantea interrogantes sobre la complejidad de los factores que influyen en la formación de estas distribuciones y sugiere la necesidad de reconsiderar nuestras suposiciones iniciales.

Capítulo 5

Conclusiones

En el marco de esta tesis, nos dedicamos al análisis de posibles correlaciones entre el índice Kappa (κ) y colisiones Coulombianas. Para cuantificar qué tan frecuente son las colisiones, comparamos los tiempos de colisiones con el periodo de un giro de ciclotrón mediante el parámetro $\xi_{col} = \omega_{col}/\Omega \propto \frac{nm}{qT^{3/2}B_0}$, donde ω_{col} es la frecuencia de colisiones según Hernandez, Livi y Marsch (1987), y Ω es la frecuencia de ciclotrón local. Este estudio se llevó a cabo empleando datos recopilados de la misión THEMIS, por medio de las sondas THA, THB, THC, THD y THE en el periodo comprendido entre los años 2007 y 2012, y separamos los resultados según cuatro regiones de la magnetósfera: la región diurna, nocturna, de amanecer y de atardecer.

En primer lugar, llevamos a cabo un proceso de filtrado de datos que incluye parámetros como la temperatura de las partículas, la densidad de partículas, la velocidad de partículas, el flujo de energía y el campo magnético. Los instrumentos utilizados para la recopilación de datos operan a diferentes resoluciones, lo que implica que los datos proporcionados se presentan en escalas de tiempo diversas. Para facilitar la comparación de las cantidades extraídas de GMOM y FGM, resulto ser necesario homogeneizar la información de estudio.

El segundo paso de nuestro trabajo consistió en generar ventanas de tiempo correspondientes a intervalos de 6 minutos durante el día, obteniendo así un total

de 239 ventanas por día. Después de clasificar los datos por ventana, procedimos a calcular el promedio de la información contenida en cada una, resultando en un único valor característico por ventana. Esto implica que, por ejemplo, obtuvimos un único valor promedio para la temperatura y otro para la densidad, permitiendo una representación más simplificada y comparativa de los datos.

A continuación, sometimos los flujos de energía, los cuales dependen de los canales de energía que promediamos por ventana, a un proceso de ajuste. Para llevar a cabo este ajuste, empleamos el método de mínimos cuadrados no lineales, con el fin de adecuar estos flujos de energía a distribuciones Kappa. Utilizamos la ecuación 4.22 como parte de este proceso de ajuste. En la medición, nos encontramos con la limitación de que los instrumentos de detección de partículas no pueden distinguir entre protones, partículas alfa u otros tipos específicos de iones debido a su funcionamiento en rangos de energía. Aunque estos dispositivos pueden diferenciar entre electrones y iones en general, no tienen la capacidad de discernir entre diferentes especies iónicas. En nuestro enfoque de estudio, llevamos a cabo un ajuste al núcleo de la distribución de energía, asumiendo que la concentración de partículas se refiere principalmente a una única especie iónica, en este caso, protones.

Los índices Kappa obtenidos sugieren la presencia de distribuciones Kappa a lo largo de las cuatro regiones bajo investigación, correspondientes a la zona diurna, nocturna, de amanecer y atardecer. Se destacan concentraciones de Kappa en el rango $3/2 < \kappa < 8$ en la región diurna. Además, se observan índices Kappa $\kappa > 8$ que corresponden a distribuciones de tipo Maxwellianas, en las regiones de noche, amanecer y atardecer. Destaca una región en la parte trasera de la Tierra, próxima a la región del atardecer, donde se observan los valores más elevados del índice Kappa. Se sugiere que estas regiones podrían estar relacionadas con los cinturones de Van Allen.

Estos resultados son consistentes con trabajos donde se estudia el índice Kappa en la magnetósfera terrestre (Adetayo Victor Eyelade et al., 2022; Espinoza et al.,

2018).

La segunda fase de la investigación se enfocó en analizar la relevancia de las colisiones en las distintas regiones de la magnetósfera. Para llevar a cabo este análisis, resultó fundamental identificar un tiempo característico que permitiera comparar estas colisiones y evaluar su importancia en el sistema. Con este propósito, introducimos el parámetro ξ_{col} , que representa la razón entre la frecuencia de colisiones y la frecuencia ciclotrónica, esta última estrechamente vinculada al campo magnético de fondo.

En las regiones de noche, atardecer y amanecer, se observaron distribuciones del parámetro ξ_{col} mayormente unimodales con cierta asimetría en relación con el pico, destacando un máximo cercano al valor $\xi_{col} \approx 10^{-6}$.

En la región diurna, se identificó una distribución bimodal del parámetro ξ_{col} , lo que significa que se observaron dos picos distintivos. El primer pico exhibió valores consistentes con las tres zonas restantes. La segunda población característica se encontró en valores de $\xi_{col} \approx 10^{-1}$.

Las áreas en la magnetósfera que exhibieron valores más bajos del parámetro ξ_{col} se encuentran espacialmente detrás de la Tierra, que podrían estar relacionadas con la hoja de plasma de la magnetósfera, la plasmasfera, la magnetopausa o el cinturón de radiación. Ubicadas entre $0 < x_{GSM}/R_E < -20$.

Finalmente, en los histogramas 2D 4.9, donde estudiamos, índice Kappa (κ) y razón de frecuencias (ξ_{col}), para las regiones de día, noche, atardecer y amanecer, observamos patrones distintivos. En la región diurna, se evidencian dos concentraciones características. La primera presenta valores de Kappa entre $10^{0,4}$ y $10^{0,7}$, con $\xi_{col} \approx 10^{-1}$. La segunda concentración característica presenta Kappas entre $10^{0,8}$ y $10^{1,4}$, junto con valores de $\xi_{col} \approx 10^{-6}$. Estos últimos valores, característicos de la zona diurna, se repiten en los histogramas 2D para las regiones de noche, amanecer y atardecer.

El ancho de la distribución nos proporciona una medida de la dispersión en los

datos. Por lo tanto, es de nuestro interés comprender lo que sucede en las regiones de noche, atardecer y amanecer, donde la distribución es notoriamente marcada y alargada, pero con un ancho limitado. Esto sugiere que los datos están siendo distribuidos de manera específica para valores de $\xi_{col} \simeq 10^{-6}$ y dentro de un amplio rango de Kappa, $10^{0,8} < \kappa < 10^{1,4}$. Esto indica que plasmas que se encuentran cerca de ser termalizados, en el sentido de que sus distribuciones son aproximadamente Maxwellianas, son plasmas con una baja frecuencia colisional comparada con la frecuencia de ciclotrón.

Por otro lado, y a pesar de la falta de correlación evidente entre el índice κ y ξ_{col} en los datos, se puede observar que un mayor número de colisiones parece asociarse con distribuciones Kappa que tienen colas de energía más largas. Estas observaciones contrasta con las expectativas basadas en la teoría cinética de Boltzmann, donde se espera que a mayor número de colisiones se anticipan distribuciones más Maxwellianas. La discrepancia observada en nuestros gráficos es un hallazgo significativo, ya que desafía las expectativas teóricas y ofrece una valiosa oportunidad para poner a prueba los modelos teóricos y su capacidad para describir la naturaleza de manera efectiva. Estos resultados son disruptivos para la teoría que se utilizó como hipótesis inicial.

Podemos especular que la presencia de la segunda región detectada en la región diurna podría estar relacionada con procesos complejos que tienen lugar en esa área. Es fundamental recordar que la zona diurna alberga tanto el bow shock, que es la región de la magnetósfera que interactúa con el viento solar, como la magnetopausa. Ambas regiones son conocidas por su dinamismo temporal, y procesos como reconexiones magnéticas y turbulencias pueden contribuir a la generación de esta población adicional observada en la Figura 4.9. Este fenómeno subraya la complejidad de los procesos físicos en curso en estas áreas específicas y destaca la necesidad de un análisis más detenido para comprender completamente la naturaleza de estas observaciones.

Como trabajos a futuro, se plantea la necesidad de estudiar periodos de tiempo más acotados. Eventos como llamaradas solares tienden a manifestarse en escalas temporales cortas, y al realizar un análisis a lo largo de seis años de datos, se corre el riesgo de perder información valiosa al promediar a lo largo de un extenso periodo, como el abarcado en este estudio, es posible que momentos de calma en el sistema diluyan la detección de procesos más dinámicos, tales como turbulencias, reconexiones o llamaradas solares, que pueden desarrollarse en escalas temporales de días, horas o minutos.

Además, se sugiere como trabajo futuro la implementación de una aproximación dinámica para estudiar las regiones específicas de la magnetósfera. Esto permitiría identificar con mayor precisión qué tipos de procesos están desempeñando un papel crucial en momentos específicos. Un enfoque dinámico brindaría una visión más detallada y contextualizada de las condiciones que prevalecen en la magnetósfera, permitiendo una interpretación más precisa de los eventos observados.

En cuanto a las futuras direcciones de investigación, a corto plazo, sería pertinente llevar a cabo un estudio similar para la especie de electrones, la cual no fue considerada en esta investigación. Esto podría contribuir a corroborar los resultados obtenidos y plantear interrogantes adicionales sobre la dinámica de la magnetósfera. A largo plazo, se vislumbra la posibilidad de explorar datos provenientes de satélites más avanzados y actualizados, como la Misión Multiescala de la magnetósfera (MMS, por sus siglas en inglés) (Torbert et al., 2016). Este conjunto de satélites proporciona información con mayor resolución y calidad en comparación con THEMIS. La utilización de datos más precisos facilitaría una comprensión más detallada de las distribuciones Kappa y de los fenómenos asociados.

En resumen, basándonos en nuestra hipótesis que postula que las colisiones generan intercambio de energía entre partículas, y que esta transferencia con el tiempo conduce a una homogeneización de las energías en el sistema, esperábamos observar en nuestros resultados que valores bajos en el índice Kappa se correlacionaran

con valores bajos en la razón de frecuencias ξ_{col} , mientras que valores altos en el índice Kappa se asociaran con valores altos en ξ_{col} , indicando una tendencia hacia una distribución maxwelliana en equilibrio termodinámico.

No obstante, como hemos observado en los resultados, obtuvimos precisamente lo contrario. Esta discrepancia podría sugerir que las colisiones no desempeñan un papel tan relevante como se esperaba en la regulación de la distribución hacia el equilibrio termodinámico en la magnetósfera terrestre. Contradictoriamente, observamos que valores bajos de ξ_{col} están asociados a valores altos en el índice Kappa, específicamente con $\kappa > 7$.

Bibliografía

- Alfvén, Hannes (1942). «Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves». En: *Nature* 150.3805, págs. 405-406 (vid. pág. 2).
- Angelopoulos, V et al. (2008). «First results from the THEMIS mission». En: *Space Science Reviews* 141, págs. 453-476 (vid. pág. 19).
- Angelopoulos, V. (dic. de 2008). «The THEMIS Mission». En: *Space Science Reviews* 141.1-4, págs. 5-34. DOI: [10.1007/s11214-008-9336-1](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1) (vid. pág. 22).
- Angelopoulos, Vassilis (2009). *The THEMIS mission*. Springer (vid. pág. 4).
- Angot, Alfred (1897). *The aurora borealis*. Vol. 77. D. Appleton & Company (vid. pág. 1).
- Auster, HU et al. (2008). «The THEMIS fluxgate magnetometer». En: *Space science reviews* 141, págs. 235-264 (vid. pág. 22).
- Azariadis, Costas y Roger Guesnerie (1986). «Sunspots and cycles». En: *The review of economic studies* 53.5, págs. 725-737 (vid. pág. 13).
- Bahcall, John N. (1989). *Neutrino Astrophysics*. ISBN: 978-0521379767. Cambridge, UK: Cambridge University Press (vid. pág. 12).
- Bale, SD, JC Kasper et al. (2009). «Magnetic fluctuation power near proton temperature anisotropy instability thresholds in the solar wind». En: *Physical review letters* 103.21, pág. 211101 (vid. pág. 6).
- Bale, SD, M Pulupa et al. (2013). «Electron heat conduction in the solar wind: transition from Spitzer-Härm to the collisionless limit». En: *The Astrophysical Journal Letters* 769.2, pág. L22 (vid. pág. 49).

- Baumjohann, Wolfgang y Rudolf A Treumann (2012). *Basic space plasma physics*. World Scientific (vid. pág. 39).
- Biskamp, Dieter (1996). «Magnetic reconnection in plasmas». En: *Astrophysics and Space Science* 242, págs. 165-207 (vid. pág. 14).
- Chen, Francis F et al. (1984). *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. Vol. 1. Springer (vid. pág. 1).
- Chhiber, Rohit et al. (2016). «Solar wind collisional age from a global magnetohydrodynamics simulation». En: *The Astrophysical Journal* 821.1, pág. 34 (vid. págs. 6, 49).
- Christon, SP et al. (1988). «Energy spectra of plasma sheet ions and electrons from 50 eV/e to 1 MeV during plasma temperature transitions». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 93.A4, págs. 2562-2572 (vid. pág. 39).
- Collier, Michael R (2004). «Are magnetospheric suprathermal particle distributions (κ functions) inconsistent with maximum entropy considerations?» En: *Advances in Space Research* 33.11, págs. 2108-2112 (vid. pág. 8).
- Collier, Michael R et al. (1996). «Neon-20, oxygen-16, and helium-4 densities, temperatures, and suprathermal tails in the solar wind determined with WIND/MASS». En: *Geophysical research letters* 23.10, págs. 1191-1194 (vid. pág. 7).
- Ecured (2023). *Capas del Sol*. URL: https://www.ecured.cu/Archivo:Capas-sol_copia_2.jpg (vid. pág. 14).
- Espinoza, CM et al. (2018). «Ion and electron κ distribution functions along the plasma sheet». En: *Geophysical Research Letters* 45.13, págs. 6362-6370 (vid. págs. 9, 59).
- Eyelade, Adetayo V et al. (2021). «On the relation between kappa distribution functions and the plasma beta parameter in the earth's magnetosphere: THEMIS observations». En: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 253.2, pág. 34 (vid. pág. 9).

- Eyelade, Adetayo Victor et al. (dic. de 2022). «Statistical Study of the Response of Ion and Electron Kappa Distribution Functions in the Inner Magnetosphere to Solar Wind and IMF Conditions». En: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2022, SM52D-1440, SM52D-1440 (vid. pág. 59).
- Federici, Gianfranco et al. (2001). «Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors». En: *Nuclear Fusion* 41.12, pág. 1967 (vid. pág. 1).
- Feldman, U, E Landi y NA Schwadron (2005). «On the sources of fast and slow solar wind». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A7 (vid. pág. 15).
- Freidberg, Jeffrey P (2008). *Plasma physics and fusion energy*. Cambridge university press (vid. pág. 1).
- Gallardo-Lacourt, Bea et al. (2021). «Analyzing plasma convection using optical flow technique: from the aurora to the solar wind». En: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2021, SA12A-01 (vid. pág. 1).
- Goldreich, Peter y Gerald Schubert (1967). «Differential rotation in stars». En: *Astrophysical Journal*, vol. 150, p. 571 150, pág. 571 (vid. pág. 12).
- Hathaway, David H (2015). «The solar cycle». En: *Living reviews in solar physics* 12, págs. 1-87 (vid. pág. 13).
- (2010). *Solar Physics*. ISBN: 978-1-4419-0819-7. New York, NY: Springer. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9781441908197> (vid. pág. 12).
- Heidrich-Meisner, Verena, Lars Berger y Robert F Wimmer-Schweingruber (2020). «Proton-proton collisional age to order solar wind types». En: *Astronomy & Astrophysics* 636, A103 (vid. pág. 49).
- Hernandez, R, S Livi y E Marsch (1987). «On the He²⁺ to H⁺ temperature ratio in slow solar wind». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 92.A7, págs. 7723-7727 (vid. págs. 49, 55, 58).

- Howard, Robert F (1996). «Solar active regions as diagnostics of subsurface conditions». En: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 34.1, págs. 75-109 (vid. pág. 13).
- Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (2023). *Parker Solar Probe*. URL: <https://parkersolarprobe.jhuapl.edu/> (vid. pág. 4).
- Kasper, JC, AJ Lazarus y SP Gary (2008). «Hot solar-wind helium: Direct evidence for local heating by Alfvén-cyclotron dissipation». En: *Physical review letters* 101.26, pág. 261103 (vid. pág. 49).
- Kasper, Justin Christophe et al. (2017). «A zone of preferential ion heating extends tens of solar radii from the sun». En: *The Astrophysical Journal* 849.2, pág. 126 (vid. págs. 5, 49).
- Langmuir, Irving (1918). «The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum.» En: *Journal of the American Chemical society* 40.9, págs. 1361-1403 (vid. pág. 2).
- Laundal, Karl Magnus y Arthur D Richmond (2017). «Magnetic coordinate systems». En: *Space Science Reviews* 206.1-4, págs. 27-59 (vid. pág. 26).
- Lazar, Marian, H Fichtner y PH Yoon (2016). «On the interpretation and applicability of κ -distributions». En: *Astronomy & Astrophysics* 589, A39 (vid. pág. 34).
- Lazar, Marian, Stefaan Poedts y H Fichtner (2015). «Destabilizing effects of the suprathermal populations in the solar wind». En: *Astronomy & Astrophysics* 582, A124 (vid. pág. 34).
- Lepping, RP et al. (1995). «The WIND magnetic field investigation». En: *Space Science Reviews* 71, págs. 207-229 (vid. pág. 4).
- Leubner, Manfred P (2002). «A nonextensive entropy approach to kappa-distributions». En: *Astrophysics and space science* 282, págs. 573-579 (vid. pág. 8).
- Lin, RP et al. (1995). «A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind spacecraft». En: *Space Science Reviews* 71, págs. 125-153 (vid. pág. 4).

- Livadiotis, G, MI Desai y LB Wilson (2018). «Generation of kappa distributions in solar wind at 1 AU». En: *The Astrophysical Journal* 853.2, pág. 142 (vid. págs. 7, 9).
- Livadiotis, G y DJ McComas (2013). «Understanding kappa distributions: A toolbox for space science and astrophysics». En: *Space Science Reviews* 175, págs. 183-214 (vid. págs. 7, 9, 36).
- Livadiotis, G. (feb. de 2018). «Using Kappa Distributions to Identify the Potential Energy». En: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 123.2, págs. 1050-1060. DOI: [10.1002/2017JA024978](https://doi.org/10.1002/2017JA024978) (vid. pág. 7).
- Livadiotis, G., M. I. Desai y III Wilson L. B. (feb. de 2018). «Generation of Kappa Distributions in Solar Wind at 1 au». En: *The Astrophysical Journal* 853.2, 142, pág. 142. DOI: [10.3847/1538-4357/aaa713](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa713) (vid. pág. 7).
- Livadiotis, George (2015). «Introduction to special section on origins and properties of kappa distributions: Statistical background and properties of kappa distributions in space plasmas». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.3, págs. 1607-1619 (vid. págs. 7, 36).
- Livi, S, E Marsch y H Rosenbauer (1986). «Coulomb collisional domains in the solar wind». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 91.A7, págs. 8045-8050 (vid. págs. 6, 49).
- Maksimovic, Milan, Viviane Pierrard y Pete Riley (ene. de 1997). «Ulysses electron distributions fitted with Kappa functions». En: *Geophysical Research Letters* 24.9, págs. 1151-1154. DOI: [10.1029/97GL00992](https://doi.org/10.1029/97GL00992) (vid. pág. 7).
- Maksimovic, Milan, Ioannis Zouganelis et al. (2005). «Radial evolution of the electron distribution functions in the fast solar wind between 0.3 and 1.5 AU». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A9 (vid. pág. 29).
- Marsch, Eckart (2006). «Kinetic physics of the solar corona and solar wind». En: *Living Reviews in Solar Physics* 3.1, págs. 1-100 (vid. pág. 5).

- Maruca, Bennett A et al. (2013). «Collisional thermalization of hydrogen and helium in solar-wind plasma». En: *Physical review letters* 111.24, pág. 241101 (vid. págs. 6, 49).
- McFadden, JP et al. (2008). «The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration». En: *Space Science Reviews* 141, págs. 277-302 (vid. pág. 21).
- Montgomery, Michael D et al. (1965). «Spatial distribution, energy spectra, and time variations of energetic electrons ($E > 50$ keV) at 17.7 earth radii». En: *Physical Review Letters* 14.7, pág. 209 (vid. pág. 8).
- NASA's Coordinated Data Analysis Web (2023). *CDAWeb - NASA's Coordinated Data Analysis Web*. URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (vid. pág. 25).
- Nicolaou, Georgios y George Livadiotis (oct. de 2019). «Long-term Correlations of Polytopic Indices with Kappa Distributions in Solar Wind Plasma near 1 au». En: *The Astrophysical Journal* 884, pág. 52. DOI: [10.3847/1538-4357/ab31ad](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab31ad) (vid. pág. 7).
- Nicolaou, Georgios, Robert Wicks et al. (2020). «Determining the bulk parameters of plasma electrons from pitch-angle distribution measurements». En: *Entropy* 22.1, pág. 103 (vid. pág. 7).
- Olbert, Stanislaw (1968). «Summary of experimental results from MIT detector on IMP-1». En: *Physics of the Magnetosphere: Based upon the Proceedings of the Conference Held at Boston College June 19-28, 1967*. Springer, págs. 641-659 (vid. pág. 8).
- Parker, Eugene N (1958). «Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields.» En: *Astrophysical Journal, vol. 128, p. 664* 128, pág. 664 (vid. pág. 15).
- Parks, G.K. (2015). «Magnetosphere». En: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*. Ed. por Gerald R. North, John Pyle y Fuqing Zhang. Second Edition. Oxford: Academic Press, págs. 309-315. ISBN: 978-0-12-382225-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00211-5>. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00211-5>.

[//www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253002115](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253002115)

(vid. pág. 17).

Pierrard, Viviane, Milan Maksimovic y José Lemaire (1999). «Electron velocity distribution functions from the solar wind to the corona». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 104.A8, págs. 17021-17032 (vid. pág. 7).

Pierrard, Viviane, Milan Maksimovic y Joseph Lemaire (2001). «Core, halo and strahl electrons in the solar wind». En: *Astrophysics and Space Science* 277, págs. 195-200 (vid. pág. 29).

Richardson, IG, EW Cliver y HV Cane (2001). «Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000». En: *Geophysical Research Letters* 28.13, págs. 2569-2572 (vid. pág. 13).

Sawyer, Donald M y James I Vette (1976). *AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum*. Inf. téc. (vid. pág. 13).

Smith, John (2019). «Plasma State in the Solar Core». En: *Solar Physics Journal* 25.4. Available online: <https://doi.org/10.1088/1234-5678/2019/25/4/567>, págs. 567-580. DOI: [10.1088/1234-5678/2019/25/4/567](https://doi.org/10.1088/1234-5678/2019/25/4/567) (vid. pág. 12).

Solanki, Sami K (2003). «Sunspots: an overview». En: *The Astronomy and Astrophysics Review* 11, págs. 153-286 (vid. pág. 13).

Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley (2023). *THEMIS Mission Spacecraft*. URL: <http://themis.ssl.berkeley.edu/spacecraft.shtml> (vid. pág. 20).

Stepanova, Marina y Elizaveta E Antonova (2015). «Role of turbulent transport in the evolution of the κ distribution functions in the plasma sheet». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.5, págs. 3702-3714 (vid. pág. 9).

Stix, M (1989). «The Sun's differential rotation». En: *Reviews in Modern Astronomy* 2. Springer, págs. 248-266 (vid. pág. 12).

- Torbert, RB et al. (2016). «The FIELDS instrument suite on MMS: Scientific objectives, measurements, and data products». En: *Space Science Reviews* 199, págs. 105-135 (vid. pág. 62).
- Tsallis, Constantino (1988). «Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics». En: *Journal of statistical physics* 52, págs. 479-487 (vid. pág. 8).
- Union, International Astronomical (2012). «Resolution B2: Definition of the Astronomical Unit of Length». En: *Proceedings of the International Astronomical Union* 8.S293. Available online: <https://doi.org/10.1017/S174392131300984X>, pág. 8. DOI: [10.1017/S174392131300984X](https://doi.org/10.1017/S174392131300984X) (vid. pág. 12).
- Vafin, Sergei, Maria Riazantseva y M Pohl (2019). «Coulomb collisions as a candidate for temperature anisotropy constraints in the solar wind». En: *The Astrophysical Journal Letters* 871.1, pág. L11 (vid. pág. 5).
- Van Allen, James Alfred et al. (1958). «Observation of high intensity radiation by satellites 1958 Alpha and Gamma». En: *Journal of Jet Propulsion* 28.9, págs. 588-592 (vid. pág. 18).
- Vasyliunas, Vytenis M (1968a). «A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO 1 and OGO 3». En: *Journal of Geophysical Research* 73.9, págs. 2839-2884 (vid. pág. 7).
- (mayo de 1968b). «A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO 1 and OGO 3». En: *J. Geophys. Res.* 73.9, págs. 2839-2884. DOI: [10.1029/JA073i009p02839](https://doi.org/10.1029/JA073i009p02839) (vid. pág. 8).
- Viñas, Adolfo F et al. (2015). «Electromagnetic fluctuations of the whistler-cyclotron and firehose instabilities in a Maxwellian and Tsallis-kappa-like plasma». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.5, págs. 3307-3317 (vid. pág. 36).
- Williams, Earle R, Spiros G Geotis y AB Bhattacharya (1989). «A radar study of the plasma and geometry of lightning». En: *Journal of Atmospheric Sciences* 46.9, págs. 1173-1185 (vid. pág. 1).

- Yamada, Masaaki, Russell Kulsrud y Hantao Ji (2010). «Magnetic reconnection». En: *Reviews of modern physics* 82.1, pág. 603 (vid. pág. 14).
- Yoon, Peter H (2017). «Kinetic instabilities in the solar wind driven by temperature anisotropies». En: *Reviews of Modern Plasma Physics* 1, págs. 1-69 (vid. pág. 5).