



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TUBOS  
DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL MEDIO  
INTERPLANETARIO A PEQUEÑA ESCALA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN FÍSICA

P R E S E N T A :

LUIS FERNANDO VILLARRUEL RAMIREZ

TUTOR

ALEJANDRO LARA SANCHEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



1. Datos del alumno

Villarruel

Ramirez

Luis Fernando

56 74 56 92

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

315031973

2. Datos del tutor

Dr

Alejandro

Lara

Sanchez

3. Datos del sinodal 1

Dr

José Julio Emilio

Herrera

Velázquez

4. Datos del sinodal 2

Dra

María Dolores

Maravilla

Meza

5. Datos del sinodal 3

Dr

José Rubén

Alfaro

Molina

6. Datos del sinodal 4

Mtra

Paulina Maricela

Colín

Farias

7. Datos del trabajo escrito.

Identificación y caracterización de tubos de flujo magnético en el medio interplanetario a pequeña escala

Número de páginas

2024



*«That Indomitable Spirit within, that inspires our search without, of the universe and of the self within...»*

Pankaj S. Joshi



# Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido al desarrollo y culminación de este proyecto. Sin su apoyo, esta tesis no habría sido posible.

En primer lugar les agradezco a mis padres y a mi hermano que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos.

Le agradezco muy profundamente a mi tutor por su impulso, dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido llegar a este punto tan anhelado. Sus valiosas enseñanzas y retroalimentación contribuyeron significativamente al éxito de esta tesis. Gracias por su guía y todos sus consejos.

A mis familiares y amigos quienes han sido una fuente de ánimo y aliento durante este viaje académico y que conforman un pilar fundamental en mi vida personal. Su presencia constante me ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes. Gracias por brindarme su apoyo y consejos en cada paso de este viaje académico.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>3. Observatorio HAWC</b>	<b>5</b>
3.1. Reducción de datos escalador-TDC . . . . .	7
<b>4. Cuerdas de flujo magnético</b>	<b>9</b>
4.1. Descripción matemática de los tubos de flujo magnético . . . . .	11
<b>5. Rayos Cósmicos</b>	<b>13</b>
<b>6. Desarrollo experimental</b>	<b>17</b>
<b>7. Resultados</b>	<b>23</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>Apéndice A. Código Python</b>	<b>33</b>
<b>Apéndice B. Eventos MCI</b>	<b>39</b>
B.1. Evento ACE_211_213_19 . . . . .	39
B.2. Evento ACE_146_150_19 . . . . .	40
B.3. Evento ACE_242_244_19 . . . . .	41
B.4. Evento ACE_267_271_19 . . . . .	42



# 1 Resumen

El estudio de los tubos de flujo magnético es de gran importancia para comprender la dinámica del viento solar y sus efectos en el entorno espacial cercano a la Tierra. La detección y caracterización de estas estructuras pueden proporcionar información valiosa sobre los procesos físicos que ocurren en la atmósfera solar y su interacción con el entorno espacial.

En este contexto, el presente trabajo se centra en determinar la relación entre los parámetros del viento solar y los cambios en el flujo de rayos cósmicos detectados por el observatorio HAWC, con el fin de comprender la respuesta del observatorio a las estructuras coherentes presentes en el viento solar y brindar una herramienta semi automatizada para la detección de estas estructuras solares. A partir de este análisis comparativo, se logró proponer una forma cuantitativa para la detección de eventos solares coherentes en el medio interplanetario. Esta propuesta se basa en el comportamiento de las componentes del campo magnético, la magnitud del campo magnético total y la velocidad del plasma, identificando intervalos temporales en los que se observa una relación directa entre estos parámetros y un aumento en el número de detecciones del observatorio.

La importancia de esta investigación radica en la contribución al desarrollo de métodos más eficientes y precisos para la detección y caracterización de tubos de flujo magnético en el medio interplanetario. Estos avances son fundamentales para comprender mejor los procesos físicos en el Sol, el viento solar y su interacción con la magnetosfera terrestre.

En conclusión, esta tesis busca contribuir al conocimiento científico al proponer un método cuantitativo para la detección y caracterización de eventos solares basado en el análisis de datos utilizando conceptos físicos y herramientas computacionales.



## 2 Introducción

Hoy en día, los rayos cósmicos son una parte importante de la investigación astrofísica del sistema solar y galáctica ya que constituyen una de nuestras pocas muestras directas de materia procedente del exterior del sistema solar. Estos rayos cósmicos, al interactuar con campos magnéticos a lo largo de su trayectoria, generan una rica variedad de fenómenos observables que ofrecen una ventana única hacia los procesos fundamentales que ocurren en el universo. En este contexto, los tubos de flujo magnético, estructuras que confinan y canalizan el movimiento de partículas cargadas a lo largo de líneas de campo magnético, juegan un papel crucial en la modulación y desviación de los rayos cósmicos en su viaje a través del medio interplanetario. Estos tubos de flujo no solo actúan como guías para las partículas de alta energía, sino que también pueden influir en su distribución espacial y energética, lo que a su vez afecta las observaciones que realizamos desde la Tierra.

Para la detección y el estudio de estos y otros fenómenos astrofísicos, se recurre a las naves en el medio interplanetario y a los observatorios terrestres. El Observatorio HAWC (High-Altitude Water Cherenkov), situado en un altiplano mexicano a una altitud de más de 4,000 metros sobre el nivel del mar, destaca como una guía en la búsqueda de respuestas a preguntas importantes sobre astrofísica, astropartículas y la heliósfera. Equipado con un conjunto de detectores de agua Cherenkov, el observatorio HAWC tiene como objetivo capturar y analizar los destellos de luz generados por partículas secundarias creadas cuando los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera terrestre. Esta información permite reconstruir las propiedades de los rayos cósmicos primarios.

En esta tesis se estudiará la relación entre los rayos cósmicos y los tubos de flujo magnético tomando las observaciones realizadas en el Observatorio HAWC. Mediante el análisis de datos experimentales, se busca comprender la correlación entre estos fenómenos físicos y con base en ello proponer herramientas de detección y caracterización. En particular, investigamos cómo la presencia de campos magnéticos afecta la propagación de estas partículas y cómo estas interacciones pueden explicar ciertos patrones observados en los datos. La combinación de la tecnología de vanguardia del Observatorio HAWC y el análisis detallado de datos nos brinda una oportunidad para contribuir al campo de la física espacial y abrir nuevas ventanas de exploración tanto para el estudio de rayos cósmicos como de tubos de flujo magnético.



### 3 Observatorio HAWC

Los rayos gamma de muy alta energía (VHE por sus siglas en ingles) ( $E > 100$  GeV) se pueden usar para sondear el universo no térmico, rastreando los lugares de aceleración de partículas alrededor de agujeros negros, estrellas de neutrones, jets astrofísicos, regiones de formación de estrellas masivas y otros objetos en los que se producen fuertes choques. Mientras que los aceleradores de partículas fabricados por el hombre pueden acelerar partículas hasta unas pocas decenas de TeV, la naturaleza puede acelerar partículas hasta al menos  $10^8$  TeV. Se han observado rayos gamma con energías superiores a 100 TeV. Los rayos gamma VHE pueden ser producidos por dispersión Compton inversa, radiación sincrotrón y bremsstrahlung, y la desintegración de piones neutros creados por colisiones de hadrones acelerados en un medio ambiente o campos de radiación. Las observaciones de rayos gamma VHE nos brindan una visión de los entornos en los que se aceleran las partículas cargadas, lo que permite comprender mejor algunas de las regiones más extremas de nuestro universo. Desde radio hasta rayos gamma VHE, las observaciones en múltiples longitudes de onda crean una imagen detallada de estos entornos de aceleración. Más recientemente, se han utilizado observaciones multimensajero de rayos gamma, neutrinos y radiación gravitatoria para mejorar nuestra comprensión de las fusiones entre agujeros negros y estrellas de neutrones [1].



Figura 3.1: Observatorio HAWC. HAWC comprende un conjunto de 300 tanques que registran las partículas creadas de las cascadas de rayos gamma y rayos cósmicos. [11]

A energías suficientemente altas ( $\sim 80$  TeV), los rayos gamma y los rayos cósmi-

cos pueden generar extensas cascadas de partículas en el aire (EAS por sus siglas en inglés). Las EAS generan luz Cherenkov en la atmósfera (detectada por telescopios Cherenkov atmosféricos), y si el rayo gamma inicial tiene una energía suficientemente alta, las partículas del EAS sobrevivirán hasta el nivel del suelo y podrán ser detectadas por un conjunto de detectores en Tierra. Así pues, existen tres regímenes de energía de rayos gamma (que se traslapan) en función de las técnicas de detección. A bajas energías, los instrumentos espaciales se utilizan para detectar los rayos gamma primarios de 50 MeV a 100 GeV, los telescopios Cherenkov atmosféricos trabajan de 50 GeV a 10 TeV y los arreglos de detección de partículas operan de 1 - 1000 TeV [2], [3]. En esta tesis, nos centraremos en el observatorio de rayos gamma de TeV High Altitude Water Cherenkov (HAWC), que utiliza detectores Cherenkov de agua (WCD) para detectar las partículas, en el rango de energías de 100 GeV a 100 TeV, dentro de un EAS que sobreviven al nivel del suelo a gran altitud. El observatorio HAWC se diseñó para ampliar las capacidades del observatorio de rayos gamma TeV Cherenkov de agua de primera generación, Milagro ([4], [5], [6] y sus referencias). HAWC se ha convertido en el primer detector de rayos gamma en observar docenas de fuentes a energías desde un TeV hasta por encima de 100 TeV (por ejemplo, [7] y referencias al respecto) [8].

El observatorio está ubicado en una meseta entre los volcanes Sierra Negra y Pico de Orizaba en México, a  $18^{\circ}59'41''\text{N}$ ,  $97^{\circ}18'30''\text{W}$  y a una altitud de 4100 m. HAWC consta de 300 detectores Cherenkov de agua (WCD por sus siglas en inglés) (fig.3.1), cada uno de 7.3 m de diámetro y 4.5 m de profundidad. Los WCD (fig.3.2) están repartidos en una superficie de  $22,000\text{ m}^2$ , cada uno está lleno de agua filtrada y equipado con cuatro tubos foto-multiplicadores (PMT). Un PMT de 10 pulgadas ubicado en el centro del WCD y tres PMTs de 8 pulgadas están dispuestos a su alrededor, formando un triángulo equilátero de 3.2 m de lado [9].

El sistema principal de adquisición de datos (DAQ) mide los tiempos de llegada y el tiempo por encima del umbral de los pulsos de los PMTs. Esta información se utiliza para reconstruir el frente de la cascada de partículas secundarias y estimar la dirección de llegada y la energía de las partículas primarias. La electrónica se basa en convertidores de tiempo a digital (TDC). Además, el DAQ principal tiene un sistema escalador que cuenta los eventos registrados dentro de una ventana de tiempo de 30 ns para cada PMT (tasa R1 en adelante) y las coincidencias de dos, tres y cuatro PMT en cada WCD, denominadas multiplicidad M2, M3 y M4, respectivamente. El sistema escalador-TDC permite medir partículas con una rigidez relativamente baja, desde la rigidez de corte en el sitio HAWC ( $\sim 8\text{ GV}$ ) hasta el límite bajo de las EAS reconstruidas ( $\sim 100\text{ GV}$ ). La energía mediana de observación del sistema escalador-TDC y las multiplicidades están en el rango de 40–46 GeV. El área grande y la baja rigidez de corte de HAWC lo convierten en un instrumento adecuado para estudiar la modulación solar en general y el clima espacial en particular. Resumiendo, podemos decir que la tasa de escalador-TDC utilizada en este trabajo proporciona información sobre el flujo de Rayos Cósmicos Galácticos (GCR) primarios por encima de la rigidez de corte (desde 8 GV en adelante) que llega a la atmósfera terrestre, que se puede medir con alta precisión [10].

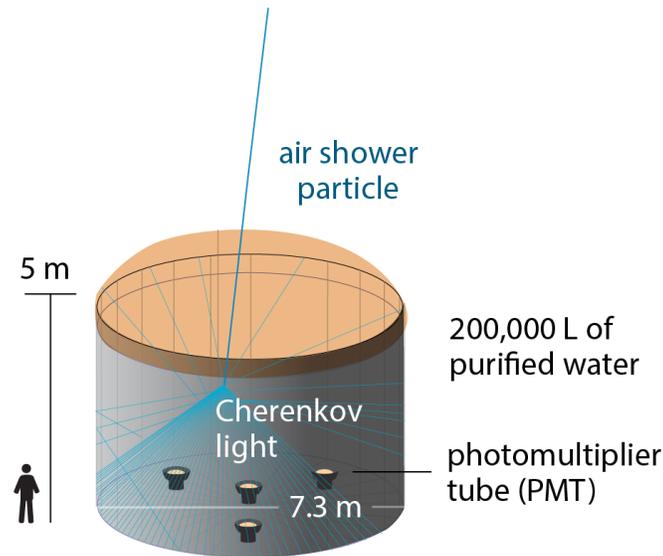


Figura 3.2: Detector Cherenkov de agua. Las partículas secundarias del interior de la cascada producen radiación Cherenkov que es detectada por los PMTs. [11]

### 3.1. Reducción de datos escalador-TDC

Durante largos períodos de observación, la eficiencia de los PMT puede variar debido a factores ambientales y del instrumento, por lo que para realizar estudios de alta precisión, es necesario corregir estas desviaciones. Para realizar estas correcciones, primero hemos identificado los PMTs relativamente estables durante un año comprobando continuamente sus desviaciones. Usando el método de "descomposición de valor singular", calculamos una tasa de referencia que se usó para modelar los cambios lentos y pequeños en la eficiencia de los PMT restantes y corregir su variación en la eficiencia. Cabe mencionar que luego de la corrección por eficiencia, las tasas del escalador-TDC están de acuerdo con la precisión estadística esperada de los datos. Al igual que otros detectores de EAS, las tasas del escalador-TDC muestran una dependencia con la presión barométrica. Corregimos esta modulación de presión siguiendo el método descrito por Arun Babu [10]. Finalmente, debido a la ubicación de HAWC cerca del ecuador y su rigidez de corte más baja a 8 GV, el componente de anisotropía solar diurna (DA) es muy significativo en sus observaciones de baja energía. El DA se eliminó de los datos mediante un filtro de rechazo de banda que elimina todas las frecuencias dentro del rango de  $\sim 1$  a 2 ciclos por día. Las tasas del escalador-TDC con corrección de eficiencia de todos los PMT se combinaron para proporcionar la tasa R1 con una precisión estadística  $< 0.01\%$  por minuto. También se aplicó el mismo proceso de corrección de eficiencia a las tasas de multiplicidad de todos los WCD, y se combinaron para obtener M2, M3 y M4 (fig. 3.3) [10].

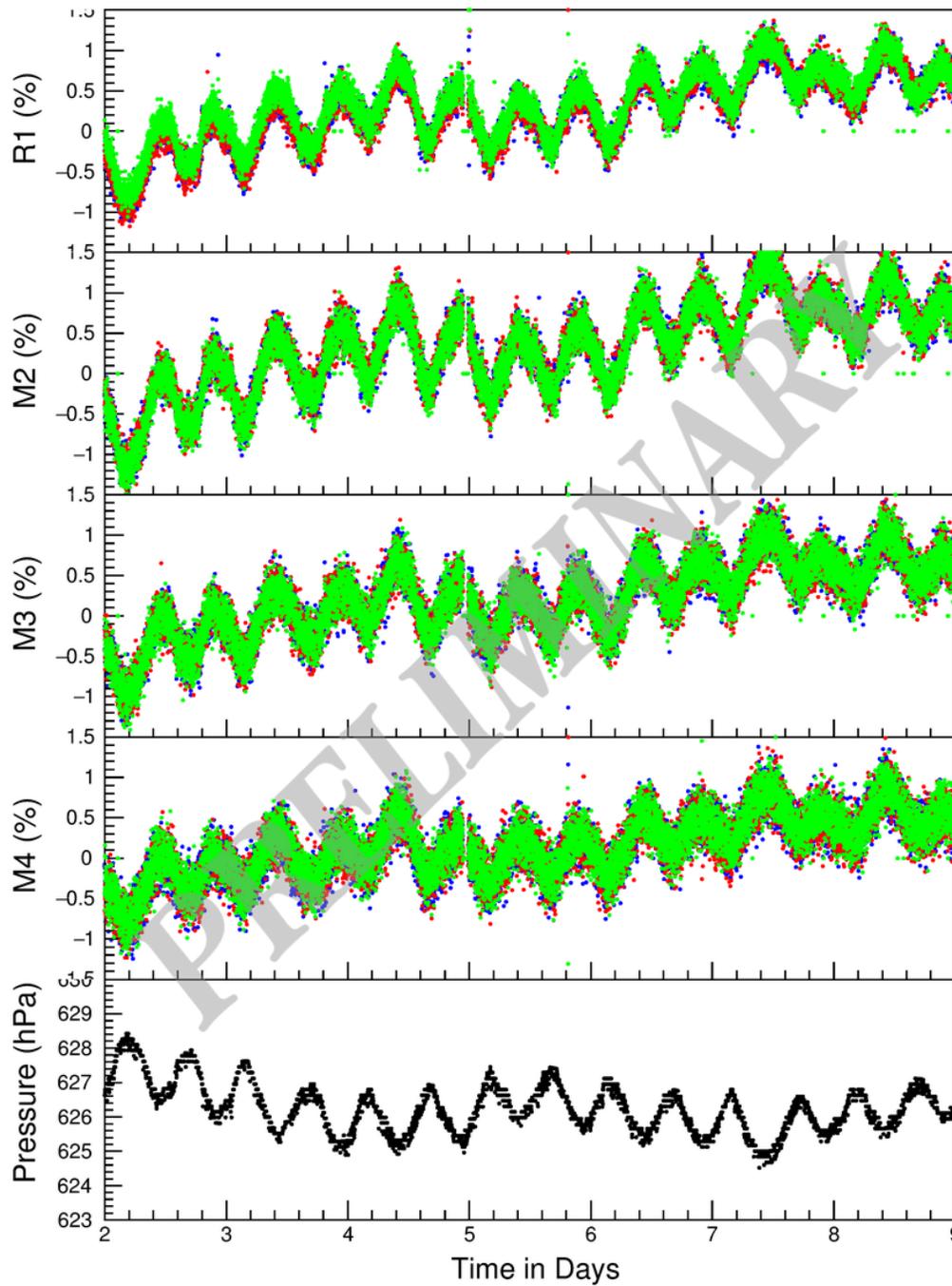


Figura 3.3: Los cuatro paneles superiores muestran los datos observados por HAWC escalador-TDC de datos R1 y las tasas de multiplicidad M2, M3, M4 respectivamente, de arriba a abajo. La variación de la tasa en porcentaje de algunos ejemplos PMTs y tanques se muestran en diferentes colores. El panel inferior muestra la presión ambiente en el sitio de HAWC. [12]

## 4 Cuerdas de flujo magnético

En 1939, el físico Scott Ellsworth Forbush encontró una correlación entre el flujo de GCRs y las perturbaciones del campo geomagnético, concluyendo: “... los cambios globales en la intensidad de rayos cósmicos resultan de la alteración de las trayectorias de las partículas en el campo externo superpuesto con el de la Tierra durante perturbaciones magnéticas”. Estas variaciones en la intensidad de GCRs son ahora conocidos como decrecimientos Forbush (Forbush decreases - FD), y ahora sabemos que las perturbaciones magnéticas son causadas por Eyecciones de Masa Coronal (Coronal Mass Ejections - CMEs por sus siglas en inglés), constituidas por tubos de flujo magnético (“magnetic flux rope”) eyectados por el Sol. Una CME es una erupción de plasma y energía magnética del Sol. Típicamente contiene una masa  $\sim 10^{11} - 10^{13}$  kg y viaja desde el Sol con velocidades entre 400 y 1000 km/s cubriendo decenas de grados de latitud heliográfica. Una CME “clásica” está compuesta de tres partes: el borde frontal, seguido de una cavidad oscura seguida de un filamento luminoso en el interior (fig4.1). Estas erupciones ocurren  $\sim 1$ /día en períodos de mínimo solar y  $\sim 5$ /día en periodos de máximo solar [13, 14]. A la manifestación interplanetaria de una CME, se le llama ICME; en otras palabras, es la CME cuando se alejó a más de  $\sim 50$  radios solares desde el Sol. Debido a que se dispone de mediciones in-situ de estas estructuras, sabemos mucho más de las ICMEs que de las CMEs (de las cuales solo se puede acceder a observaciones remotas). Generalmente son más lentas que su CME asociada debido a la desaceleración causada por su interacción con el viento solar [15], sin embargo, la mayoría tiene velocidades supersónicas (mayores que la velocidad del sonido en el viento solar) creando así una onda de choque que acelera a las partículas que lo rodea y produce ondas de radio (fig.4.1). La composición de estas estructuras es principalmente dominada por protones y electrones, con una pequeña contribución del  $He^{++}$  ( $\sim 4\%$ ) y su dinámica está determinada por la magneto-hidrodinámica.

Hoy se sabe que, a diferencia de lo que propuso Forbush en 1939, son las ICMEs las que modulan el flujo de rayos cósmicos observado en la órbita terrestre. Las nubes magnéticas (MC por sus siglas en inglés) forman un subconjunto de las ICMEs, cuyas características son: (i) la energía magnética es mucho mayor que la térmica, (ii) el campo magnético es de geometría suave y helicoidal, y (iii) baja energía térmica de los protones [16] [17]. Las nubes magnéticas, como Tubos de Flujo Magnético (MFR) interplanetario a gran escala (IMFR), tienen una distribución espacial que oscila entre 0.20 y 0.40 AU a 1 AU aproximadamente [18]. Las IMFR pequeñas (SIMFR) a menudo son detectadas por satélites cerca de la Tierra. En comparación con los MC, los SIMFR se definen empíricamente por Feng et al. [19] con las siguientes características: (1)

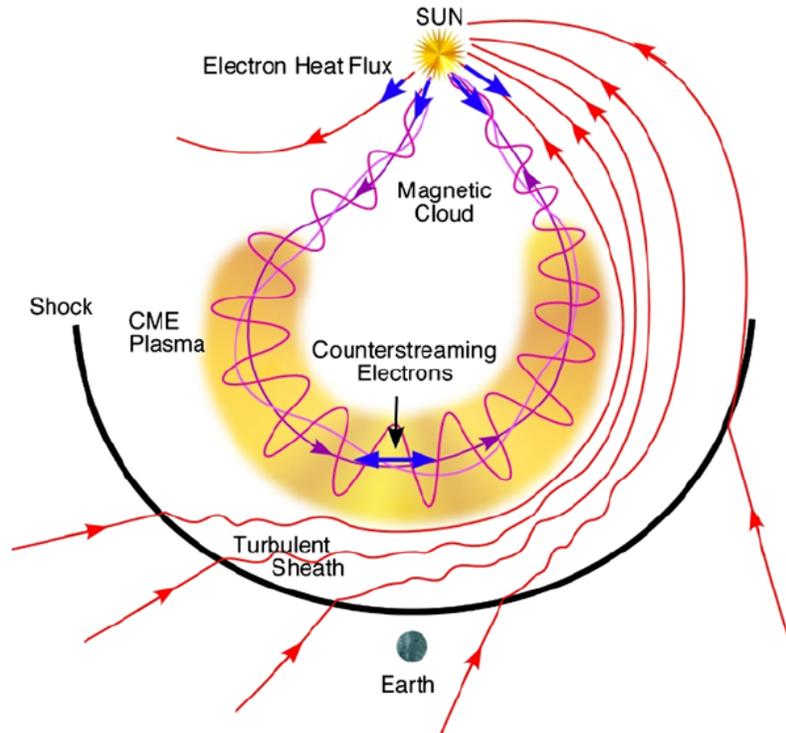


Figura 4.1: Esquema de una ICME y su frente de choque, indicando los flujos de campo magnético, plasma y flujos de electrones de viento solar. [17]

configuraciones de campo magnético de tubo de flujo y (2) diámetros  $< 0.20$  AU y duraciones  $< 12$  h. Las MC han llamado constantemente la atención y han sido ampliamente estudiadas, poseyendo una comprensión profunda de sus orígenes solares, estructuras magnéticas, evolución y efecto geomagnético [20–23]. Los orígenes de los SIMFR, en comparación con los de los MC, aún no se comprenden completamente [24]. Los SIMFR fueron reportados por primera vez por Moldwin et al. [25], quienes propusieron que se originan a partir de la reconexión magnética en la lámina de corriente heliosférica (HCS). Si los SIMFR y los MC se originan en la corona solar, entonces todos los IMFR (es decir, SIMFR y MC) deberían tener una distribución de tamaño continua, sin embargo, los autores argumentan principalmente que no se ha detectado un MFR de escala intermedia (es decir, varias horas) en el espacio interplanetario. Además, Feng et al. [26] investigó sistemáticamente la medición de datos magnéticos y de plasma por la nave Wind durante 1995–2001 e identificó 144 IMFR, y encontró que sus diámetros muestran una distribución continua. Por lo tanto, propusieron que todas las IMFR muestran el mismo origen y sean contra partes interplanetarias de las CME o pequeñas CME. [27]

## 4.1. Descripción matemática de los tubos de flujo magnético

Los tubos de flujo magnético son estructuras complejas de plasmas magnetizados, observadas a menudo en entornos astrofísicos y de laboratorio. Matemáticamente, pueden describirse como sigue: Un tubo de flujo magnético puede definirse como una configuración tridimensional de campo magnético con una estructura helicoidal o retorcida, caracterizada por una topología cerrada de líneas de campo magnético, típicamente embebida en un plasma magnetizado de fondo (fig. 4.2). Esta configuración es tal que las líneas de campo magnético se envuelven alrededor de un eje, formando un haz helicoidal o retorcido, y a menudo se asocian con la presencia de un plasma conductor de corriente o de tubos de flujo magnético retorcidos.

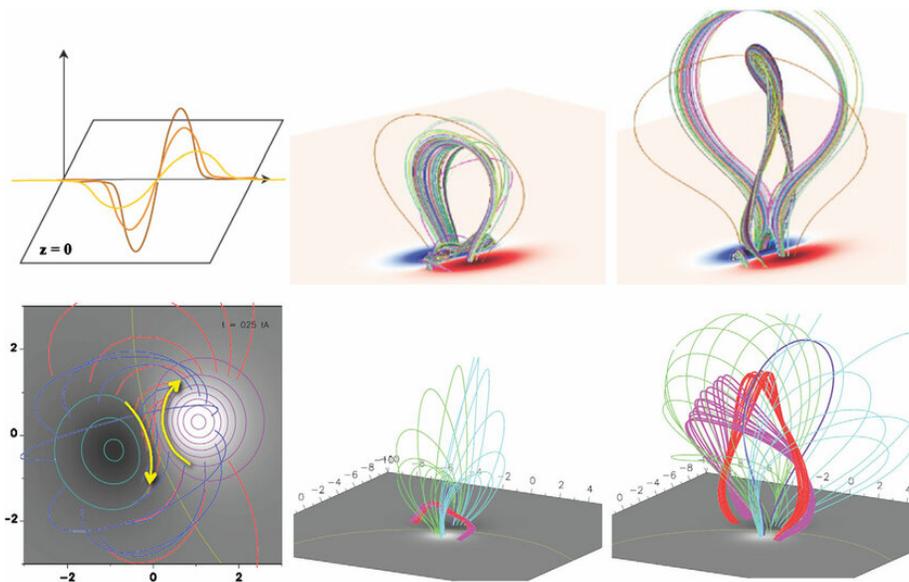


Figura 4.2: Ejemplos de formación y desestabilización de los tubos de flujo en simulaciones numéricas 3D. (paneles superiores): dispersión del flujo magnético (panel izquierdo) que conduce a la formación de un tubo de flujo y luego a la eyección (paneles central y derecho) [29]. (paneles inferiores): formación de el tubo de flujo en las manchas vacías tras difusión de flujo y movimiento de cizalladura en la fotosfera (flechas amarillas panel izquierdo). Los paneles central y derecho representan dos pasos temporales antes/después de que la cuerda de flujo haya alcanzado el umbral de inestabilidad del toro [30].

Matemáticamente, una cuerda de flujo magnético puede representarse por su vector de campo magnético,  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ , que es una función de la posición  $\mathbf{r}$  en el espacio tridimensional. La presencia de una cuerda de flujo viene indicada por la existencia de líneas de campo magnético cerradas dentro de un determinado volumen. Estas líneas de campo cerradas forman un haz de forma retorcida o helicoidal.

Una forma de describir matemáticamente tal configuración es mediante el uso de la helicidad magnética, que cuantifica el grado de torsión y enlace de las líneas de campo magnético en el sistema. La helicidad magnética,  $H$ , puede definirse como: [28]

$$H = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} dV$$

Donde:

- $\mathbf{A}$  es el potencial vectorial magnético.
- $\mathbf{B}$  es el campo magnético.
- $dV$  representa un elemento de volumen en el espacio tridimensional.

Los tubos de flujo magnético suelen presentar una helicidad magnética distinta de cero, lo que indica la presencia de líneas de campo magnético retorcidas. Además de la helicidad magnética, a menudo se utilizan otros parámetros y ecuaciones para describir la estructura detallada y el comportamiento de los MFR en diferentes contextos físicos, como las ecuaciones magnetohidrodinámicas o modelos más especializados en función de la aplicación específica. En el caso particular de esta tesis se aplica un método para calcular la helicidad magnética de un tubo de flujo magnético cilíndrico de sección transversal arbitraria a partir de datos recabados por naves espaciales, basándose en la ecuación de Grad- Shafranov [38].

## 5 Rayos C3smicos

Los rayos c3smicos son part3culas -un n3cleo at3mico o un electr3n- de alta velocidad que viajan por el espacio. La mayor3a de estas part3culas proceden de fuentes situadas en el interior de la V3a L3ctea y se conocen como rayos c3smicos gal3cticos (GCR). El resto de los rayos c3smicos proceden del Sol o, en el caso de las part3culas de mayor energ3a ( $>10^{15}$  eV), del exterior de la galaxia conocidos con rayos c3smicos extragal3cticos (EGCR).

Los rayos c3smicos fueron descubiertos en 1912 por Victor Hess, cuando comprob3 que un electroscopio se descargaba m3s r3pidamente a medida que ascend3a en un globo. Atribuy3 este hecho a una fuente de radiaci3n que entraba en la atm3sfera desde el espacio exterior, y en 1936 recib3 el premio Nobel por tal descubrimiento. Durante alg3n tiempo se crey3 que la radiaci3n era de naturaleza electromagn3tica (de ah3 el nombre de rayos c3smicos), y algunos libros de texto a3n incluyen incorrectamente los rayos c3smicos como parte del espectro electromagn3tico. Sin embargo, en la d3cada de 1930 se descubri3 que los rayos c3smicos deben estar cargados el3ctricamente ya que se ven afectados por el campo magn3tico de la Tierra.

Desde la d3cada de 1930 hasta la de 1950, antes de que los aceleradores de part3culas fabricados por el hombre alcanzaran energ3as elevadas, los rayos c3smicos sirvieron como fuente de part3culas para investigaciones de f3sica de alta energ3a y condujeron al descubrimiento de part3culas subat3micas entre las que se encontraban el positr3n y el mu3n. Aunque estas aplicaciones contin3an, desde los albores de la era espacial el principal foco de investigaci3n de los rayos c3smicos se ha dirigido hacia las investigaciones astrof3sicas sobre d3nde se originan los rayos c3smicos, c3mo se aceleran a velocidades tan altas, qu3 papel desempe3an en la din3mica de la Galaxia y qu3 nos dice su composici3n sobre la materia procedente de fuera del sistema solar. Para medir los rayos c3smicos directamente, antes de que la atm3sfera los frene y los descomponga, se utilizan instrumentos instalados en naves espaciales y globos aerost3ticos, que emplean detectores de part3culas similares a los utilizados en los experimentos nucleares y de f3sica de altas energ3as [32].

Los rayos c3smicos primarios no se observan directamente en la superficie de la Tierra. Esto se debe a que llegan al borde exterior de la atm3sfera terrestre y colisionan con n3cleos atmosf3ricos y dan lugar a part3culas secundarias (fig.5.1). Algunas part3culas secundarias son fragmentos de los n3cleos que colisionan, incluidos neutrones, electrones, positrones y otras part3culas de vida corta creadas a partir de la energ3a de las colisiones. Las part3culas secundarias pronto tienen sus propias colisiones y son observados a nivel del mar.

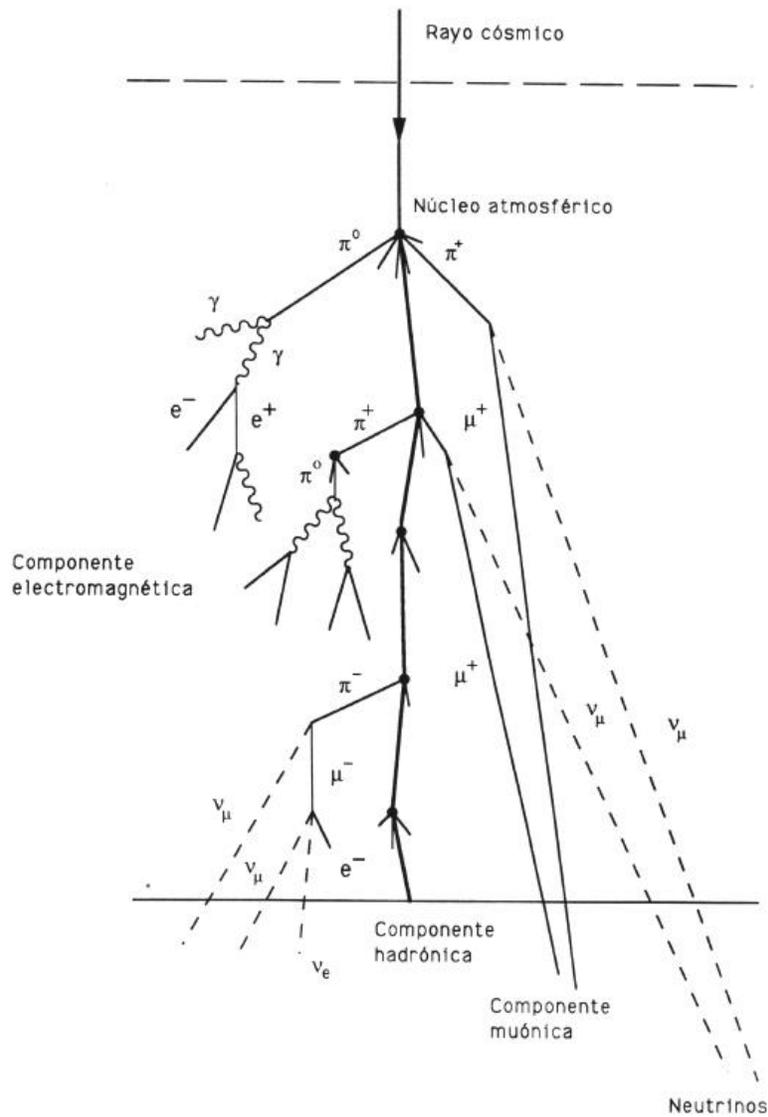


Figura 5.1: Diagrama esquemático de una cascada de rayos cósmicos. Una partícula incidente de rayo cósmico interactúa con los átomos en la parte superior de la atmósfera. Debido a su alta energía desintegra los átomos produciendo una cascada de radiación electromagnética, de muones y nucleones. [35]

El espectro energético de los rayos cósmicos revela cómo varía la tasa de partículas a medida que aumenta la energía. La investigación en este campo ha desvelado particularidades notables de este espectro, como una curvatura distintiva o “rodilla” donde el espectro experimenta una caída abrupta en la energía, cambiando su pendiente y tras la cual va descendiendo aún más pronunciadamente (fig.5.2). Experimentos anteriores han indicado que la rodilla es el resultado de una disminución en el flujo de núcleos ligeros. Los mismos modelos esperan que los núcleos más pesados de los rayos cósmicos de nuestra galaxia tengan una caída similar a mayor energía. Por encima de esta energía, los rayos cósmicos restantes deberían ser de origen extragaláctico [33].

Entre los GCR, las abundancias relativas de los diferentes núcleos y de los electrones varían con la energía. Por encima de  $\sim 1$  GeV por nucleón, las proporciones son de alrededor del 85 por ciento de protones (núcleos de átomos de hidrógeno), con  $\sim 13$  por ciento de partículas alfa (núcleos de helio)<sup>1</sup>. El 2 por ciento restante son electrones y núcleos de átomos más pesados. A energías de varios cientos de MeV por nucleón, las cifras correspondientes son aproximadamente 90.9 y 1 por ciento respectivamente.

Las trayectorias de los rayos cósmicos primarios de menor energía están fuertemente influenciadas por el campo magnético de la Tierra. En consecuencia, para energías inferiores a 1 GeV por nucleón, se establece una energía de corte para cada latitud geomagnética, por debajo de la cual los rayos cósmicos primarios no son detectados. A este fenómeno se le conoce como rigidez. El flujo de estas partículas de baja energía está influido por la actividad solar, y la cantidad de radiación cósmica que llega a la Tierra está inversamente correlacionada con el número de manchas solares a lo largo del ciclo solar de 11 años. En el momento de máxima actividad solar, el viento solar transporta al espacio interplanetario campos magnéticos más intensos que bloquean o desvían los rayos cósmicos [34].

Debido a la desviación de RC por los campos magnéticos de la Vía Láctea, los GCR primarios siguen trayectorias irregulares tal que, llegan a la parte superior de la atmósfera terrestre casi uniformemente desde todas las direcciones. En consecuencia, las fuentes de rayos cósmicos no pueden identificarse a partir de la dirección de llegada de los mismos.

---

<sup>1</sup>Una energía de 1 GeV corresponde a velocidades superiores a aproximadamente el 87 por ciento de la velocidad de la luz.

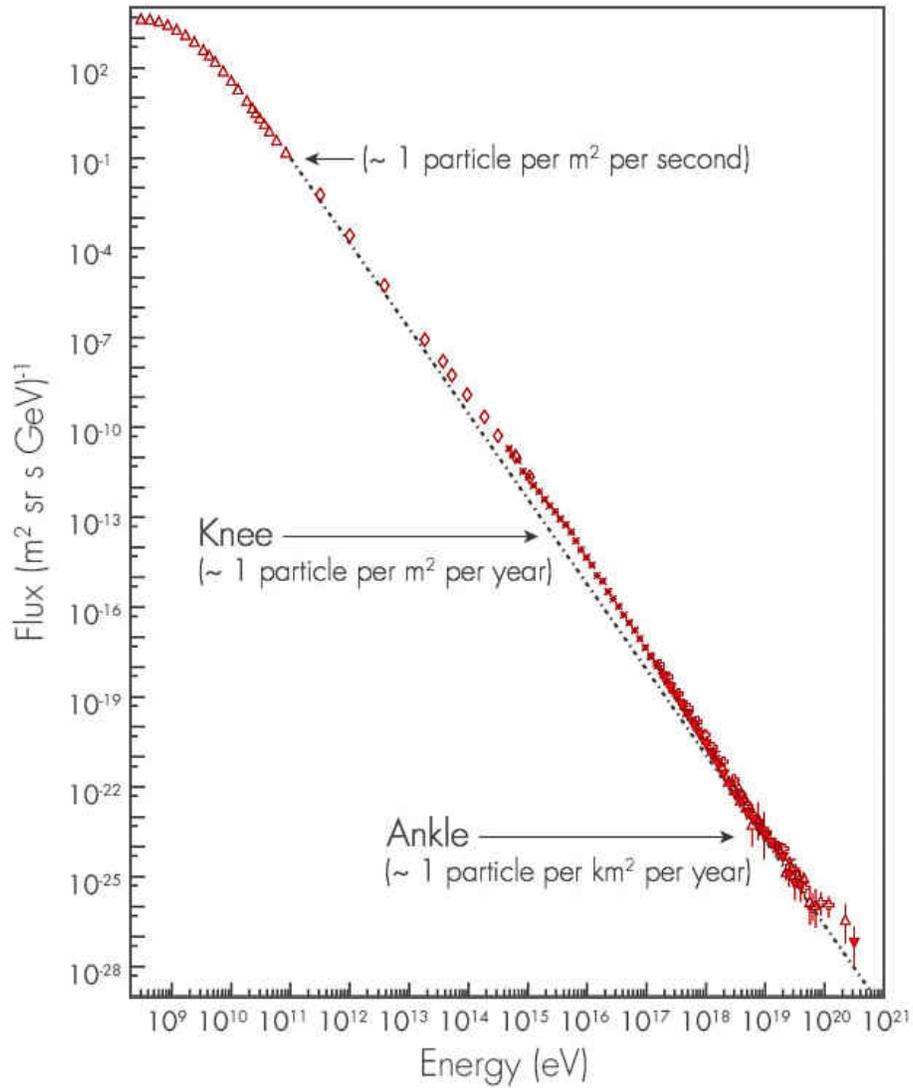


Figura 5.2: Espectro energético de los rayos cósmicos medidos en la Tierra. En la gráfica se muestra el flujo de rayos cósmicos en función de la energía, ambos ejes en escala logarítmica.

## 6 Desarrollo experimental

Como primera parte de este proyecto se realizó una corrección de los datos obtenidos por HAWC, debido a la variación en la eficiencia de los PMT, del año 2019 (fig.6.1). Para realizar estas correcciones se aplicó el método descrito por Arun Babu K.P. [9] utilizando el lenguaje de programación ROOT.

- Como primer paso de este método se tienen que eliminar manualmente los PMTs que causan una gran dispersión hasta llegar a un subconjunto de los mejores 30 PMTs.
- El siguiente paso de este proceso consistió en modelar la variación de la eficiencia. Este proceso toma primero la relación de cada PMT con la tasa de referencia y modela la variación de la eficiencia ajustando un polinomio de cuarto orden. En esta parte se tuvieron que determinar los rangos de cada PMT en los que la eficiencia variara lo menos posible (i.e. que gráficamente el comportamiento de la eficiencia se aproxima a una constante). Los rangos para los 1200 PMTs fueron ingresados manualmente en un archivo de texto para una vez obtenidos los parámetros de ajuste, a través de ellos corregir la eficiencia de cada PMT.
- Antes de proseguir, se realizó una revisión de los rangos de forma gráfica para determinar si los rangos ingresados fueron correctos y detectar cualquier error tipográfico.
- Después de realizar la corrección de la eficiencia se realizó la corrección debida a la presión y posteriormente eliminación de la anisotropía diurna, ambos procesos realizados de forma automatizada ejecutando dos códigos en ROOT.
- Como resultado de aplicar este método se obtiene la tasa R1 la cual es la combinación de las tasas del escalador-TDC con corrección de eficiencia de todos los PMT.

La siguiente etapa del proyecto consistió en comparar dicha tasa con datos de parámetros del viento solar tales como la velocidad y el campo magnético (total y sus componentes). Los datos del viento solar fueron obtenidos de SPDF-OMNIWeb [36] y recabados por la nave espacial WIND (fig. 6.2). La comparación fue realizada graficando, utilizando como herramienta el lenguaje de programación ‘Python’ (Apéndice A).

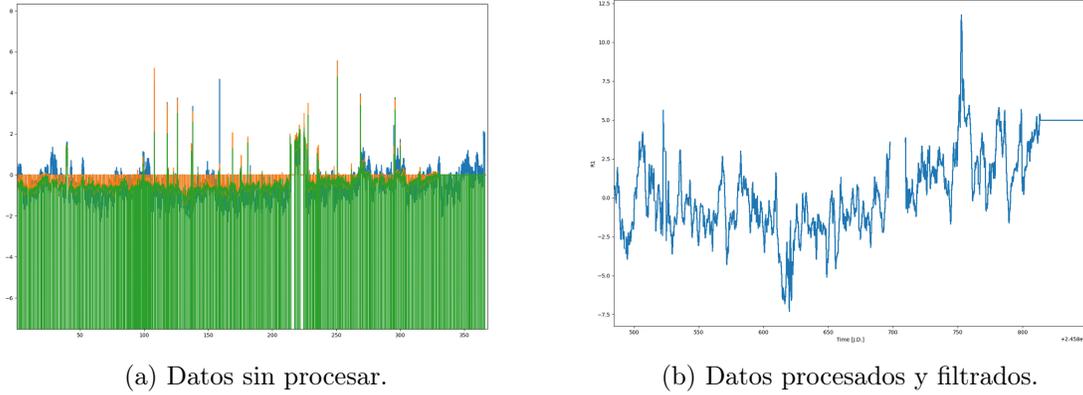


Figura 6.1: Distintas etapas del proceso de corrección de datos del observatorio HAWC.

- Primeramente, se normalizaron los datos y se transformaron a una misma escala temporal, en este caso días julianos.
- Posteriormente se caracterizó mes a mes el comportamiento de los parámetros en relación a la tasa R1, identificando especialmente aquellos puntos en los cuales se observa una relación entre los parámetros con un aumento en la tasa R1. Cabe mencionar que a cada conjunto de datos se les aplicó un filtro de media móvil para una mejor visualización de los mismos.
- Una vez identificados dichos puntos y teniendo una caracterización de todo el año, se prosiguió a aplicar el rotacional al campo magnético <sup>1</sup>, tomando como referencia el vector de velocidad promedio para, de igual forma poder relacionar la rotación del campo con los aumentos. El vector velocidad nos brinda la dirección de movimiento del sistema y al aplicar el rotacional se puede ir cuantificando la tendencia del campo magnético a inducir rotación en dicha dirección. El rotacional fue aplicado de la siguiente forma de modo que el cambio de variable en el denominador equivale a un cambio en la posición.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \left( \frac{\Delta B_z}{\Delta t V_y} - \frac{\Delta B_y}{\Delta t V_z}, \frac{\Delta B_x}{\Delta t V_z} - \frac{\Delta B_z}{\Delta t V_x}, \frac{\Delta B_y}{\Delta t V_x} - \frac{\Delta B_x}{\Delta t V_y} \right)$$

- Para eliminar el ruido y descartar eventos no relacionados a estructuras coherentes en el viento solar, se fijaron límites a los parámetros basados en la desviación estándar de cada uno.
- Realizando un segundo análisis de los datos, se planteó un ‘Índice de Coherencia Magnética’ (MCI), en el cual se integran los límites de la velocidad, el campo magnético y la rotación del campo para fijar intervalos en los cuales el comportamiento de las variables y la tasa R1 podrían relacionarse con tubos de flujo magnético (fig.6.3).

<sup>1</sup>Cabe destacar que se toma al rotacional como un parámetro de referencia *aproximado* del comportamiento que presenta el campo magnético.

- De cada intervalo con una respuesta coherente y conjunta del MCI y de HAWC, se obtuvo el máximo de velocidad, del campo magnético y del rotacional, el área bajo la curva de la velocidad y el campo magnético y el máximo de la tasa R1.
- Los datos obtenidos se representaron gráficamente y se compararon con el máximo de la tasa R1 mediante los lenguajes de programación R y Python. Las gráficas obtenidas se muestran en la sección de Resultados. En ellas se representan el máximo de R1 en el eje Y en función de los máximos de los parámetros del viento solar en el eje X.
- Finalmente, se aplicó un ajuste mediante un modelo de regresión lineal robusta, se determinó el coeficiente de correlación y se llevó a cabo una prueba-t para evaluar la validez del ajuste (Capítulo 7, Tablas 7.2 y 7.3). El intervalo de confianza del modelo se ajustó al 95 % utilizando la biblioteca *seaborn* de Python.

Para la etapa final de este proyecto, se recurrió al software en Matlab desarrollado por Christian Möstl y Charles J. Farrugia [37] para reconstruir los MFRs registrados por el MCI y determinar si, en efecto, hay rotación del campo magnético en dichos intervalos, con el fin de corroborar el funcionamiento del MCI.

- El uso de este software comienza con un programa para leer datos fusionados de plasma y campo magnético del satélite ACE y transformarlos a un formato adecuado que pueda ser leído por los programas de reconstrucción. Para el uso de este programa se solicita definir un intervalo del evento y, a su vez, ya dentro del programa, un subintervalo que será analizado y tomado como referencia para los demás programas. El uso del software descrito se aplicó para todos los eventos marcados por el MCI; sin embargo, en este caso se ejemplificará con el evento del 20 al 23 de Febrero de 2019 (ACE\_051\_053\_19) (fig. 6.4).
- Para el segundo programa ejecutado, basta con seleccionar la carpeta generada del evento y correr los subprogramas de manera automática a través de una interfaz gráfica. Los subprogramas utilizados son descritos a continuación:
  - **Plot data:** Traza una figura de datos en pantalla, así como una salida *.eps* de esta figura en el directorio de eventos.
  - **dhT and MVUB analysis:** Realiza el análisis de Hoffmann Teller y de varianza mínima. La dirección de varianza mínima es la primera aproximación para buscar el eje Grad-Shafranov (GS).
  - **GS axis:** Busca que la función  $Pt(A)$  sea de un solo valor. Esta orientación es entonces el eje del tubo de flujo subsiguiente.
  - **GS-Solver:** Crea un mapa de campo magnético perpendicular al eje invariante y una bonita versión del gráfico  $Pt(A)$ , ambos como archivos *.eps*.

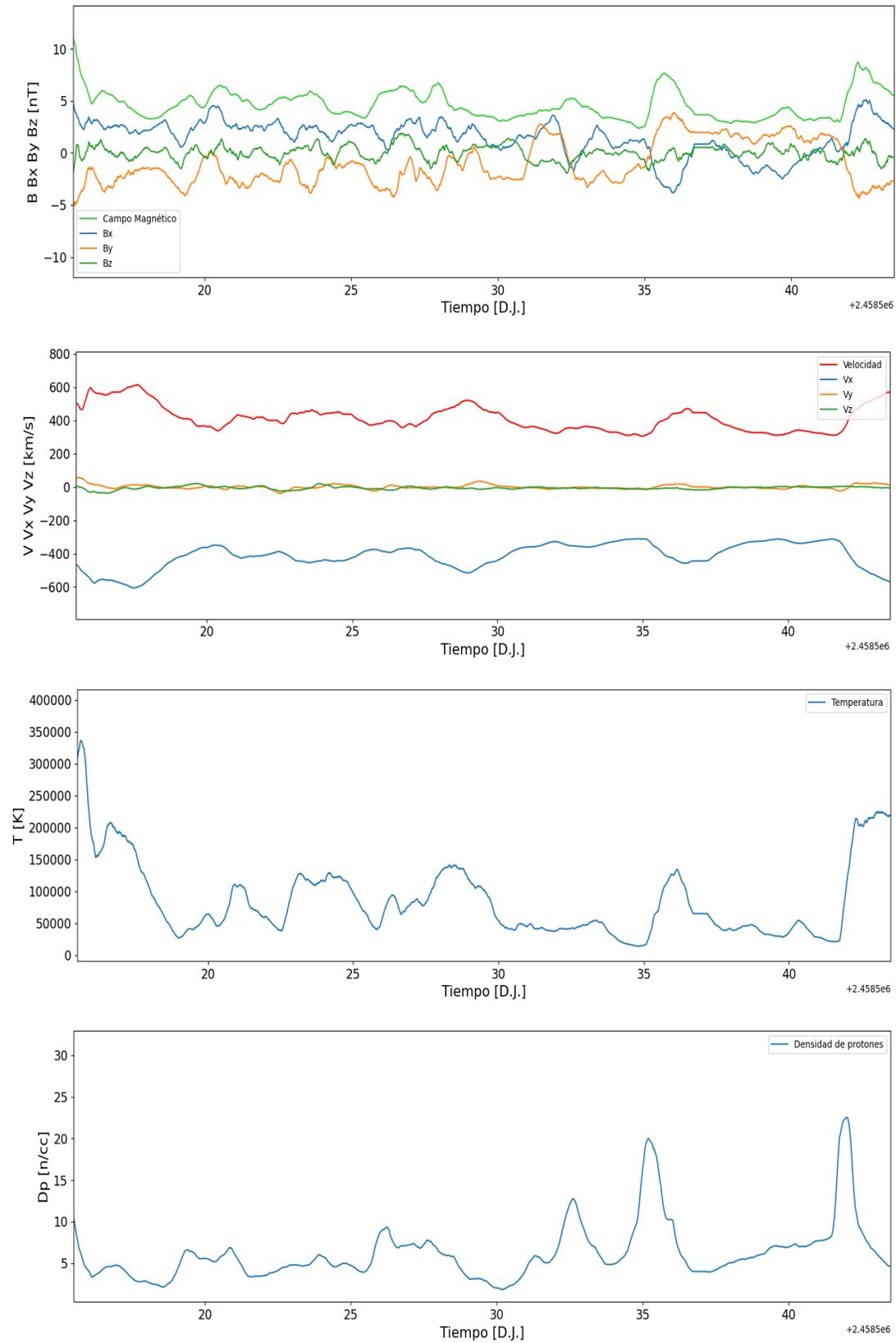


Figura 6.2: Datos correspondientes al mes de Febrero de 2019 recabados de SPDF-OMNIWeb. De arriba a abajo se muestran el campo magnético total y sus componentes, la velocidad total y sus componentes, la temperatura de los protones y la densidad de los mismos.

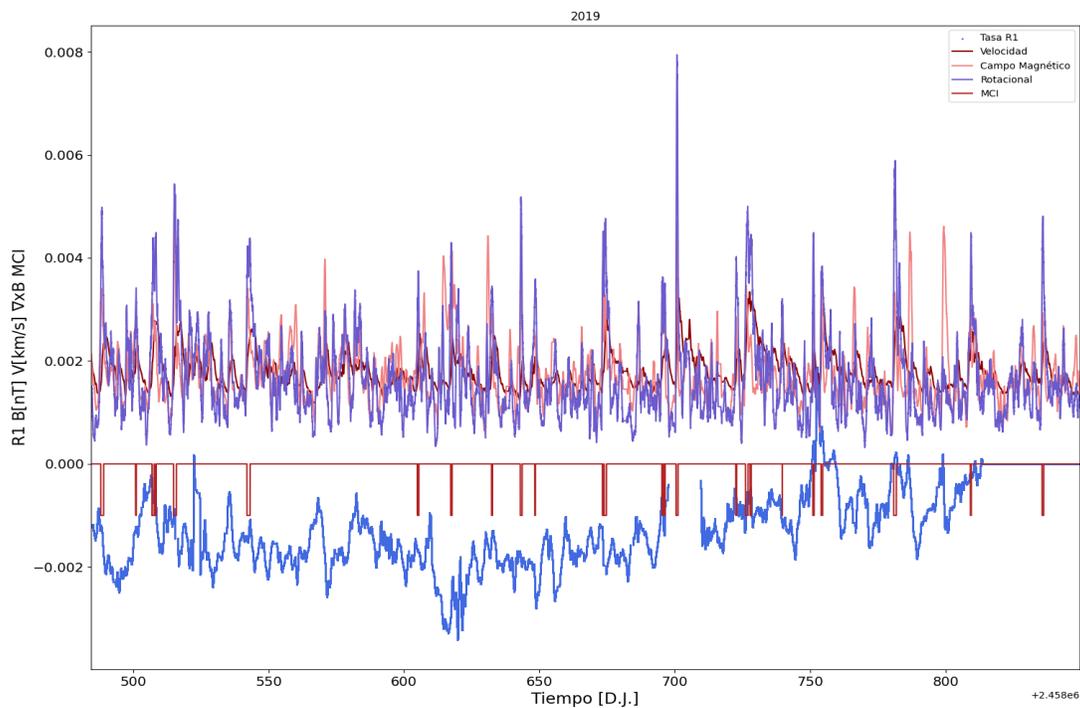


Figura 6.3: Gráfica tasa R1, campo magnético [nT], velocidad [km/s], rotacional e índice de Coherencia Magnética (MCI) a lo largo del año 2019.

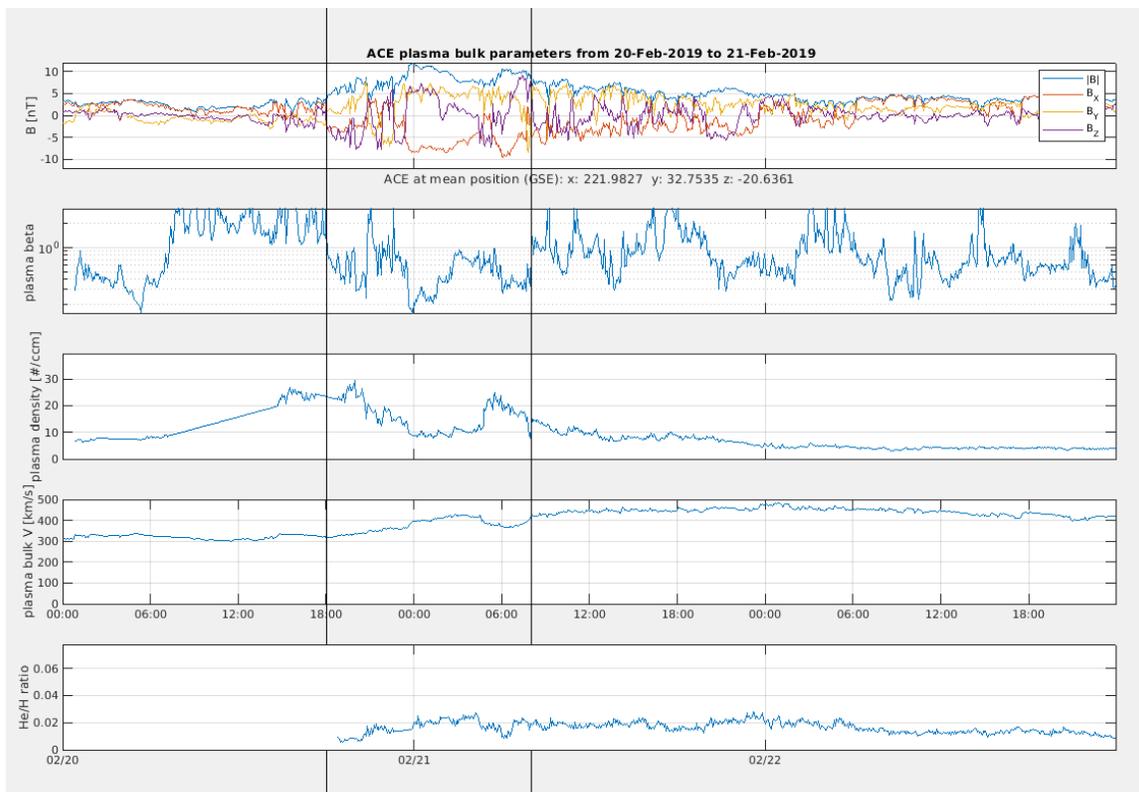


Figura 6.4: Evento ACE\_051\_053\_19.



## 7 Resultados

Los resultados principales de este estudio se presentan en la tabla 7.1, la cual detalla los eventos registrados por el MCI. Para cada evento, se proporcionan la fecha de inicio y final, la respuesta cualitativa del MCI y de HAWC, así como los valores máximos de campo magnético y velocidad en el intervalo respectivo. Se identificaron un total de 33 eventos, de los cuales 24 mostraron una respuesta significativa del MCI, es decir, la duración del intervalo temporal marcado por el índice fue lo suficientemente extensa ( $>4$ hrs) como para permitir un análisis (fig.7.1). De estos 24 eventos, 16 exhibieron una respuesta considerable en HAWC, lo que permitió su clasificación y utilización para un análisis posterior.

De este último grupo de respuesta se caracterizaron dos tipos de eventos: los que presentaban una respuesta positiva ( $\uparrow$ ) y aquellos que presentaban una respuesta negativa ( $\downarrow$ ). Los primeros fueron aquellos eventos en los que se presentaba un máximo o un incremento en la tasa de cuentas mientras que los segundos fueron aquellos en los cuales se encontraba un mínimo o un decremento en la tasa de cuentas.

Al graficar los máximos de los parámetros del viento solar y los máximos de la tasa R1 (ver fig.7.2), se observa una tendencia positiva reflejada en el signo positivo de las pendientes obtenidas. Sin embargo, al ajustar un modelo de regresión lineal y analizar la correlación entre ellos, se obtienen valores bajos tanto para el coeficiente de determinación  $R^2$  (ver Tabla 7.2) como para el coeficiente de correlación (ver Tabla 7.3). Estos valores cuantifican que tan estrecha es la relación entre nuestras variables y qué tan bien los valores predichos por el modelo se ajustan a los valores reales de la variable dependiente, respectivamente. Esta baja correlación se atribuye a la falta de datos, lo que impide obtener resultados estadísticamente significativos tal como se interpreta de la mayoría de los valores-p obtenidos para los coeficientes de correlación. De los valores de las pruebas-t se tiene que la mayoría son relativamente altos y sugieren que hay una diferencia sustancial entre las dos variables. Sin embargo hay dos valores más bajos en comparación con los anteriores, correspondientes al área bajo la curva del campo magnético y el área bajo la curva de la velocidad, los cuales pueden indicar que hay menos diferencia entre las dos variables o que hay menos variabilidad en los datos.

De la última parte del proyecto, del software de reconstrucción de MFRs, se tomaron tres de las gráficas generadas para el análisis: el hodograma, la serie de tiempo del evento y el gráfico de contorno (fig. 7.3, fig. 7.4 y fig. 7.5, respectivamente). La

Fecha inicial (D.J.)	Fecha final (D.J.)	MCI	Resp. HAWC	Max B [nT]	Max V [km/s]
2458488.02291667	2458489.08333333	✓	↑	8.682	498.992
2458501.00902778	2458501.01041667	x	–	7.563	392.602
2458501.03541667	2458501.0375	x	–	7.576	391.236
2458501.04027778	2458501.15347222	✓	↑	7.587	391.029
2458506.95277778	2458506.95625	x	–	6.788	325.648
2458506.98819444	2458507.85972222	✓	↑	7.901	457.571
2458507.95416667	2458508.49236111	✓	↑	7.014	569.349
2458514.90277778	2458515.97222222	✓	–	12.932	476.580
2458542.00277778	2458543.17222222	✓	↑	8.694	333.728
2458605.05833333	2458605.10763889	x	–	6.519	366.618
2458605.10972222	2458605.14930556	x	–	6.811	365.077
2458605.15347222	2458605.49444444	✓	x	7.259	367.703
2458617.25138889	2458617.77569444	✓	↑	10.354	376.179
2458632.33541667	2458632.68541667	✓	↑	7.393	343.927
2458642.95833333	2458643.63402778	✓	x	11.502	326.588
2458643.63541667	2458643.63680556	x	–	6.423	326.846
2458648.29097222	2458648.53680556	✓	↓	6.344	443.636
2458673.28888889	2458673.78263889	✓	↓	9.713	374.032
2458673.8875	2458674.76875	✓	–	8.355	361.974
2458695.25763889	2458695.26111111	x	–	7.769	363.176
2458695.27708333	2458695.71875	✓	↑	7.995	364.207
2458696.12986111	2458696.13333333	x	—	8.145	342.100
2458696.19166667	2458696.43055556	✓	↓	8.330	339.948
2458700.5	2458701.21944444	✓	–	11.983	419.807
2458722.54375	2458722.85138889	✓	↓	7.270	370.093
2458726.12222222	2458727.08402778	✓	↑	8.832	357.093
2458727.85486111	2458728.22708333	✓	↑	6.394	329.438
2458739.71111111	2458739.72013889	x	–	6.790	493.273
2458750.98888889	2458751.48263889	✓	↑	8.968	430.018
2458754.05555556	2458754.63125	✓	↑	9.370	315.490
2458780.84236111	2458781.83958333	✓	↑	8.501	418.511
2458809.17222222	2458809.53125	✓	x	7.840	337.755
2458835.65694444	2458836.24375	✓	–	7.474	367.419

Tabla 7.1: Eventos registrados por el MCI con su respectiva respuesta en HAWC y máximos de velocidad y campo magnético.

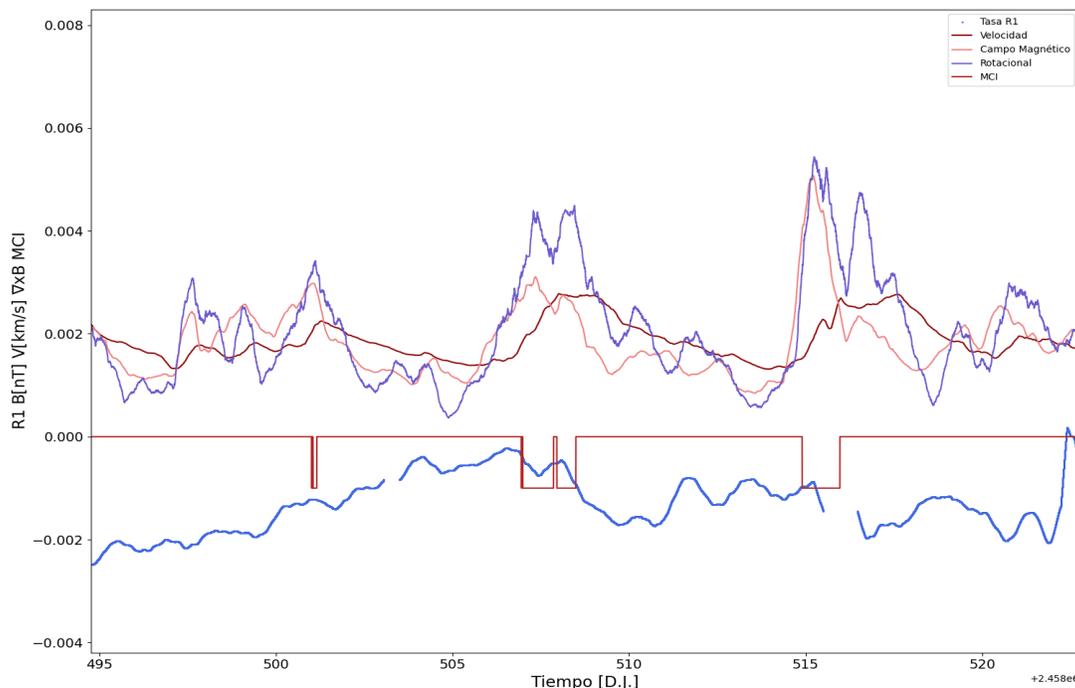


Figura 7.1: Gráfica que presenta a detalle el funcionamiento del MCI además de la relación entre la tasa R1, los parámetros del viento solar y el rotacional.

importancia de estas gráficas radica en que permiten determinar la presencia de los eventos y además observar y analizar la rotación del campo magnético durante el evento ACE\_051\_053\_19 en el intervalo temporal indicado por el MCI.

El hodograma muestra la trayectoria del vector de campo magnético en un plano. Esto permite visualizar la evolución y los cambios en la dirección y amplitud del campo magnético durante el evento. En este caso específico, el hodograma mostró evidencia de rotación del campo magnético, lo cual es un indicativo importante de la presencia de una MFR.

La serie de tiempo del evento muestra la evolución del campo magnético a lo largo del tiempo. Permite analizar cómo varían las componentes del campo magnético durante el evento y proporciona información adicional sobre la estructura y características de la MFR, así como parámetros relacionados con la presión del plasma. Analizando la figura 7.4, se puede definir la duración del evento de manera más específica a través del comportamiento de las componentes del campo y de la presión total. De igual forma, en la misma gráfica se pudo observar y analizar la presencia de rotación del campo magnético, expresada como cambios en la dirección de las componentes, durante el intervalo de interés.

Finalmente, el gráfico de contorno (ver Figura 7.5) muestra una reconstrucción del MFR estudiado. Este gráfico de contorno muestra los vectores de flujo de plasma restantes proyectados en la dirección x-y. En él se observa de igual forma la rotación expresada por los contornos cerrados. Para comparación, también se ejemplifica el caso en el que el evento registrado no presenta rotación notoria (fig. B.4), así como

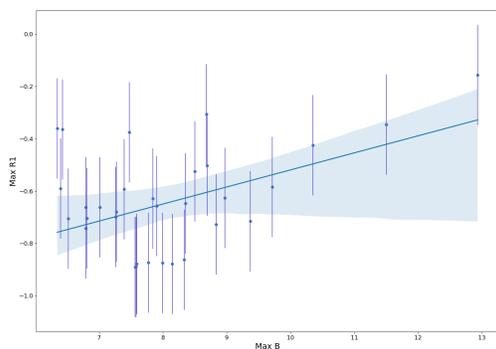
Parámetro	pendiente	intercepto	MSE	R <sup>2</sup>
Max B	0.0652	-1.171	0.0306	0.2490726
Max V	0.0006	-0.8512	0.0353	0.0309
Max $\nabla \times \mathbf{B}$	2.54E-07	-1.2957	0.0235	0.4186
Area B	5.25E-05	-0.7753	0.0228	0.4387
Area V	1.09E-06	-0.7698	0.0249	0.3542

Tabla 7.2: Parámetros de ajuste de modelo de regresión lineal robusta, error cuadrático medio (MSE) del modelo, coeficiente de determinación para cada parámetro en relación con los máximos de la tasa R1.

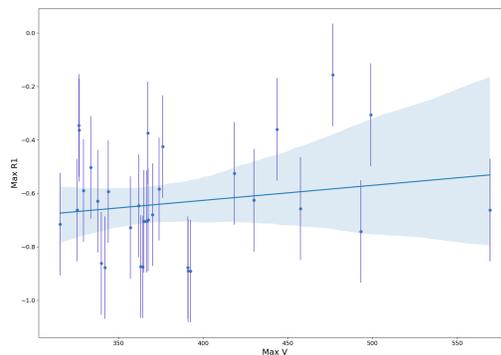
Parámetro	Coef. correl	valor-p	prueba-t	valor-p
Max B	0.1862	0.2992	33.1889	3.47E-41
Max V	0.1443	0.4228	36.3329	1.66E-43
Max $\nabla \times \mathbf{B}$	0.159	0.3765	29.5599	2.99E-38
Area B	0.4634	0.0066	6.0345	9.73E-08
Area V	0.4503	0.0097	6.4649	1.80E-08

Tabla 7.3: Coeficiente de correlación y prueba-t junto con su valor-p respectivo para cada parámetro en relación con los máximos de la tasa R1.

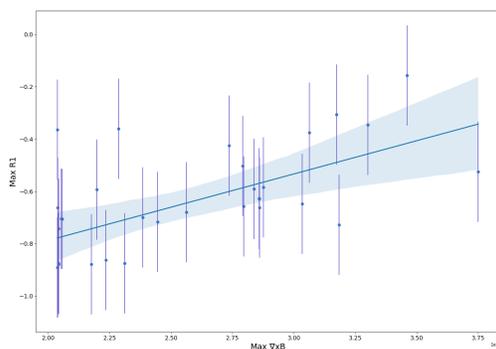
otros eventos destacados, tomando como referencia las gráficas antes descritas (figs. 7.4, 7.3, 7.5) en el Apéndice B. Estas tres gráficas proporcionaron evidencia visual y permitieron interpretar la presencia de rotación del campo magnético durante los eventos estudiados. Esto respalda la hipótesis de la existencia de una MFR durante ese intervalo de tiempo.



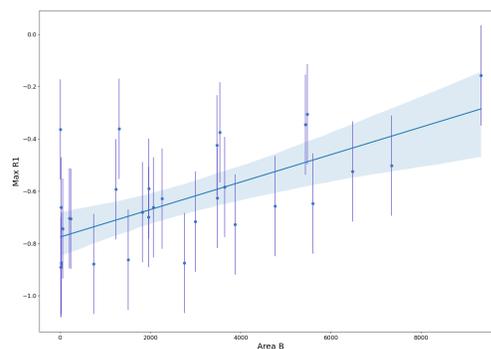
(a) Gráfico de dispersión entre 'Max B' y 'Max R1'.



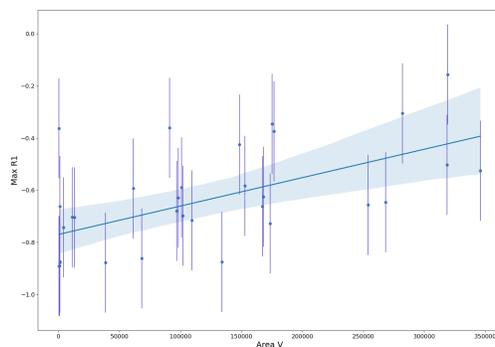
(b) Gráfico de dispersión entre 'Max V' y 'Max R1'.



(c) Gráfico de dispersión entre 'Max Curl(B)' y 'Max R1'.



(d) Gráfico de dispersión entre 'area B' y 'Max R1'.



(e) Gráfico de dispersión entre 'area V' y 'Max R1'.

Figura 7.2: Gráficos de dispersión que muestran la regresión lineal robusta entre los máximos de los distintos parámetros del viento solar y los máximos de la tasa R1. En ellos las barras de error vienen dadas por la desviación estándar de 'Max R1'.

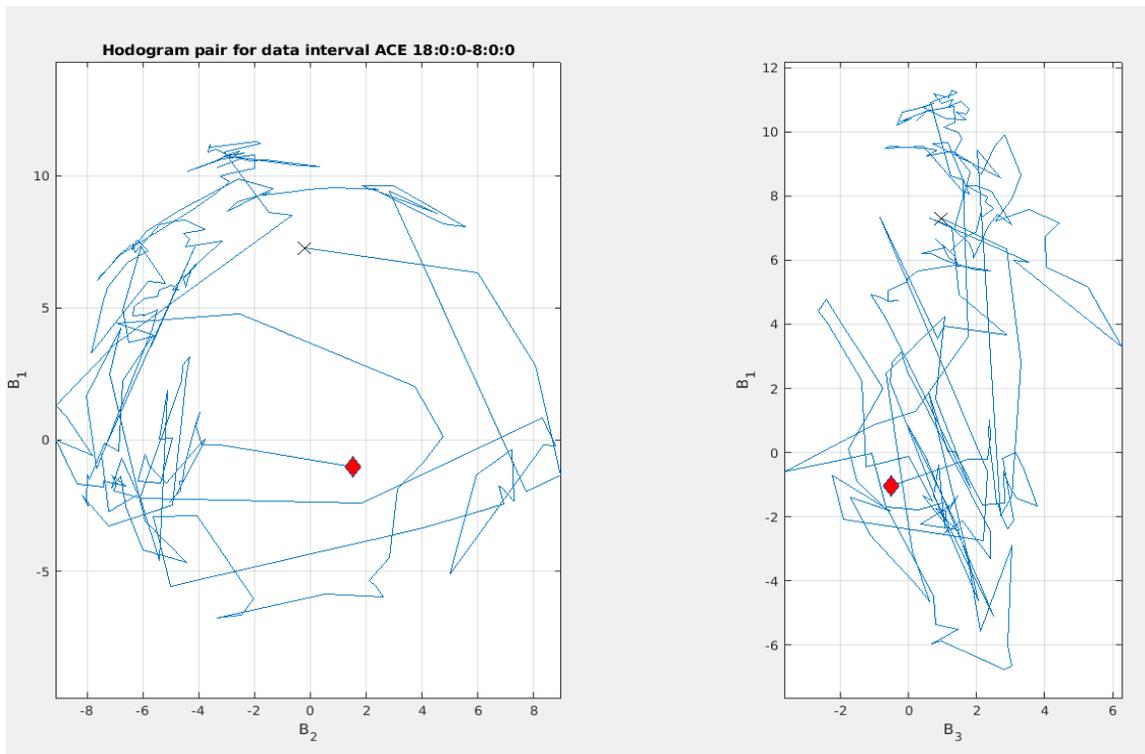


Figura 7.3: Hodograma del evento ACE\_051\_053\_19.

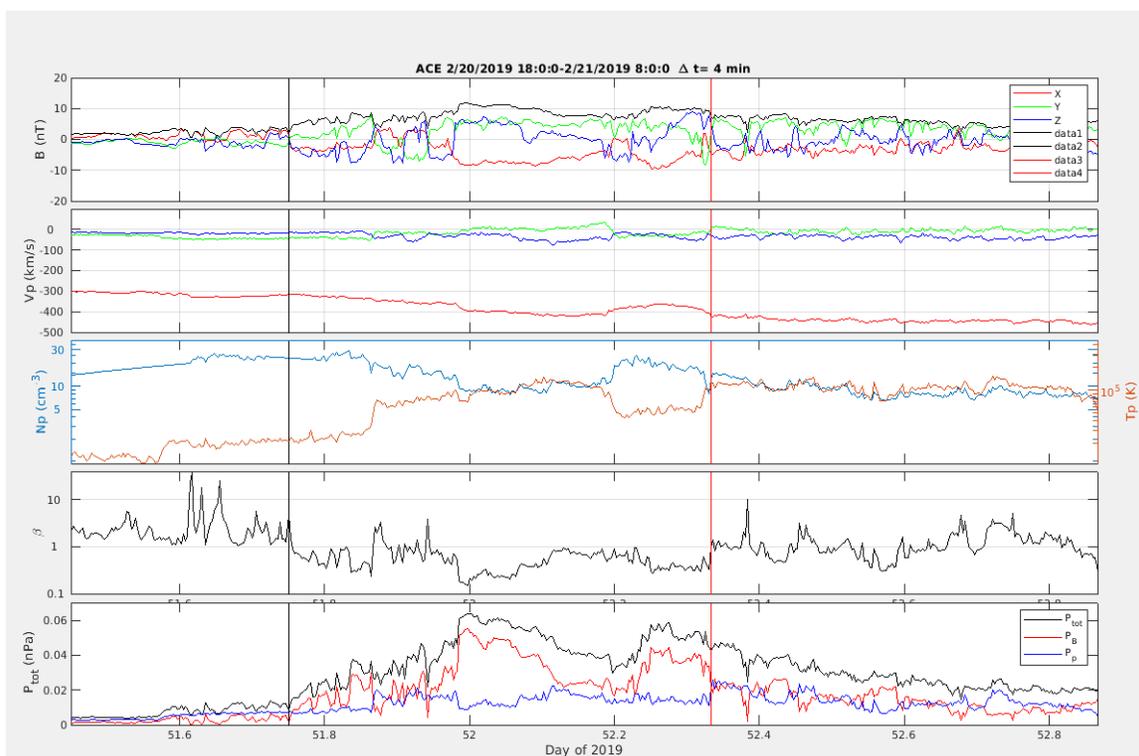


Figura 7.4: Serie de tiempo del evento ACE\_051\_053\_19. De arriba a abajo se muestran el campo magnético en el GSE, la velocidad de flujo del plasma en el GSE, la densidad de partículas junto con la temperatura de las mismas, la presión del plasma y la  $\beta$  del plasma, donde  $\beta = \frac{p}{(B^2/2\mu_0)}$ . Las líneas verticales indican el intervalo analizado.

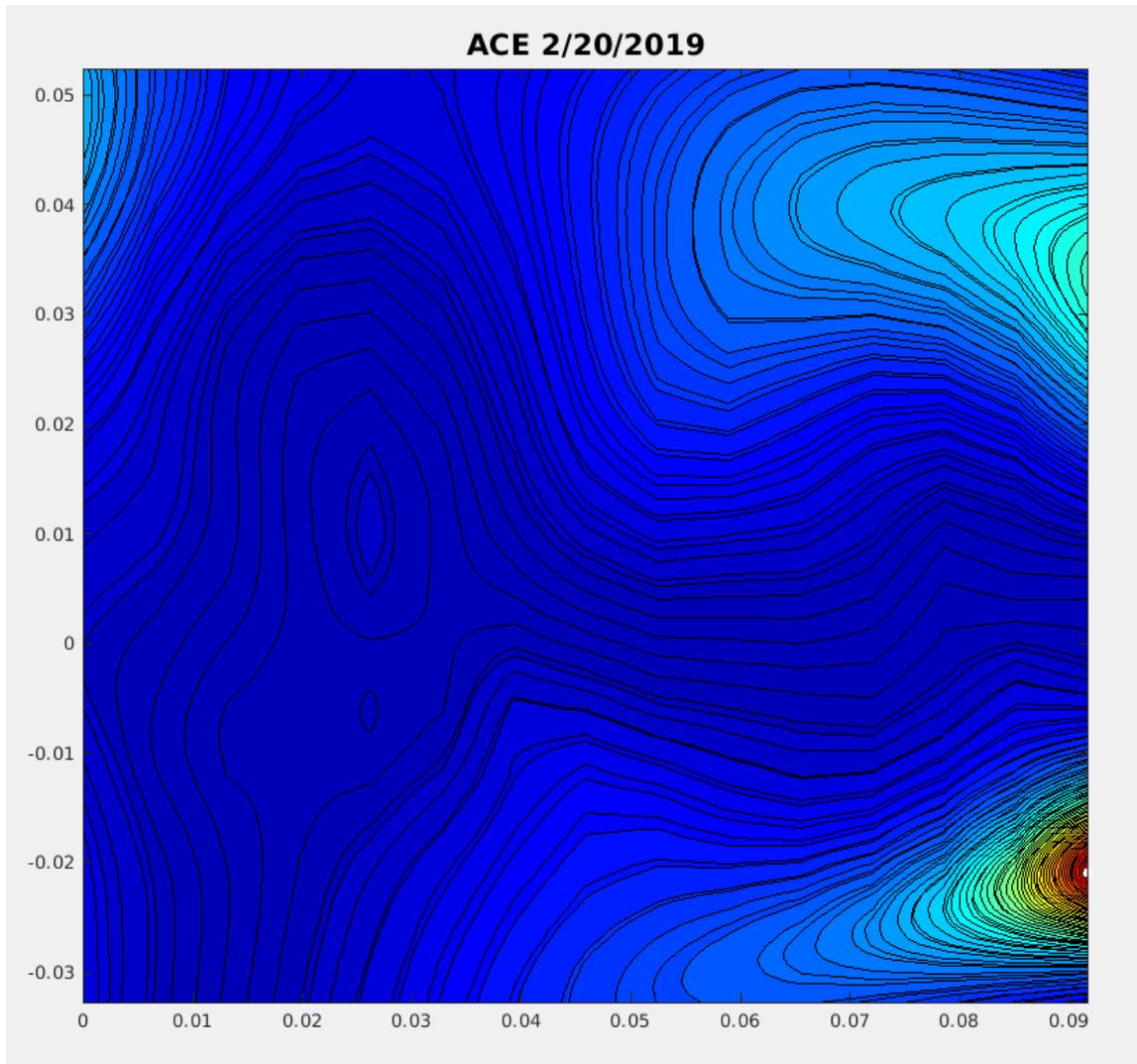


Figura 7.5: Gráfico de contorno del potencial magnético.

## 8 Conclusiones

Utilizando este método se pudieron detectar eventos solares en los que se observa rotación del campo magnético ligado a los tubos de flujo magnético y además analizar cómo es su interacción con los rayos cósmicos detectados por HAWC. Como se menciona en la parte de resultados, se registraron 33 eventos en total, de los cuales el 72.7 % tuvieron una respuesta en un intervalo coherente de tiempo y el 70.9 % presentaron una respuesta conjunta del índice y de HAWC y además un cambio significativo en HAWC. De los datos útiles, el 20 % fue clasificado como eventos con respuesta negativa, el 15 % no presentó un cambio significativo en la respuesta de HAWC y el 65 % restante fue clasificado como eventos con respuesta positiva. Con ello se determina que son más frecuentes aquellos eventos en los que la tasa de respuesta aumenta ante la presencia del campo magnético proveniente de estructuras interplanetarias.

Con respecto al análisis de correlación entre los parámetros del viento solar y la tasa R1, como se discutió en la sección de resultados, se observaron valores de correlación y coeficiente de determinación bajos. Sin embargo, se aprecia una tendencia positiva en estos datos. Se sugiere que estos valores podrían mejorar aumentando el tamaño de la muestra, por lo tanto, se propone llevar a cabo un análisis similar al realizado en este proyecto utilizando datos recopilados en otros años como proyectos a futuro.

En la sección de resultados, se menciona que utilizando el software de reconstrucción de MFRs se pudo comprobar la rotación del campo magnético en la mayoría de los intervalos marcados por el MCI lo cual corrobora la validez del método propuesto para la detección de tubos de flujo magnético. Por otro lado, la complejidad de los eventos fue una limitante en análisis a través del software ya que entender la dinámica del campo magnético de eventos complejos, en donde interaccionan los campos magnéticos provenientes de dos o más estructuras diferentes, resultaba complicado para poder determinar los intervalos de estudio e interpretar los gráficos obtenidos. De igual forma, algunos conjuntos de datos presentaban huecos los cuales impedían realizar un mayor análisis de algunos de los eventos o brindaban una visión incompleta de lo que se pretendía estudiar. Sin embargo, tomando ambos resultados de los análisis, se puede llegar a que el método propuesto puede funcionar de manera conjunta con detecciones realizadas por observatorios terrestres como una herramienta de comparación y detección que aporta al estudio de tubos de flujo magnético.



# A Código Python

```
1
2 #####2019#####
3 import numpy as np
4 import matplotlib as mpl
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import astropy
7 from astropy.time import Time
8 import math
9 import statistics as stats
10 from scipy.stats import pearsonr
11 from scipy.stats import spearmanr
12 from sklearn import preprocessing
13 import seaborn as sns
14 import pandas as pd
15 from statsmodels.robust.robust_linear_model import RLM
16
17 #Importar los datos
18 data1 = np.genfromtxt('R1_2019.dat')
19 dataB = np.genfromtxt('Omni_Data_YDBxByBzB.csv')
20 dataV = np.genfromtxt('Omni_Data_YDVVxVyVzTPd.csv')
21
22 #Transponer datos
23 dataB1 = dataB.T
24 dataV1 = dataV.T
25
26 #Separacion variables
27 #R1 (TasaR1, tiempo)
28 data2 = data1[:, 4]
29 indat = np.where((data2 > -10) & (data2 < 0.9))
30 data3 = data2[indat][1:]
31 t1 = data1[:, 0]
32 t2 = t1[indat][1:]
33
34 #B (Campo magnetico, Bi, tiempo)
35 Bx, By, Bz, t_B = dataB1[2], dataB1[3], dataB1[4], dataB1[1]
36 B = np.sqrt(Bx**2 + By**2 + Bz**2)
37
38 #V (Velocidad, Vi, Temperatura, densidad de protones, tiempo)
39 V_0, Vx_0, Vy_0, Vz_0, T_0, Pd_0, t_0 = dataV1[2], dataV1[3], dataV1[1]
40 [4], dataV1[5], dataV1[6], dataV1[7], dataV1[1]
41 indat = np.where(V_0 < 820)
42 V, Vx, Vy, Vz, T, Pd, t_V = V_0[indat], Vx_0[indat], Vy_0[indat],
```

```

    Vz_0[indat], T_0[indat], Pd_0[indat], t_0[indat]
42
43 #Conversiones de tiempo (Frac. DOY->Dias julianos)
44 def convert_time(t):
45     t_str = ['2019:{:03d}:{:02d}:{:02d}'.format(int(t[i]), int((t[i]
46         - int(t[i])) * 24),
47         int(((t[i] - int(
48         t[i])) * 24 - int((t[i] - int(t[i])) * 24)) * 60))
49         for i in range(len(t))]
50     return Time(t_str, format='yday').jd
51
52 tjd_R = convert_time(t2)
53 tjd_B = convert_time(t_B)
54 tjd_V = convert_time(t_V)
55
56 #Rotacional
57 curl_x = []
58 curl_y = []
59 curl_z = []
60 CurlB1 = []
61 #Tomando como referencia el vector V_avrg: (-0.999979171727133,
62     -0.0004624775189010250, -0.00643756370551272) normalizado
63 for i in range(len(B) - 1):
64     dt = t_B[i + 1] - t_B[i]
65     curl_x.append(((1 / dt) * ((Bz[i + 1] - Bz[i]) /
66         (-0.0004624775189010250) - (By[i + 1] - By[i]) /
67         (-0.00643756370551272)))
68     curl_y.append(((1 / dt) * ((Bz[i + 1] - Bz[i]) /
69         (-0.999979171727133) - (Bx[i + 1] - Bx[i]) /
70         (-0.00643756370551272)))
71     curl_z.append(((1 / dt) * ((By[i + 1] - By[i]) /
72         (-0.999979171727133) - (Bx[i + 1] - Bx[i]) /
73         (-0.0004624775189010250)))
74     CurlB1.append(math.sqrt(curl_x[i] ** 2 + curl_y[i] ** 2 + curl_z[i]
75         ] ** 2))
76
77 CurlB = np.array(CurlB1)
78
79
80 #Filtro (Media movil)
81 def rollavg_roll_edges(a,n):
82     'Numpy array rolling, edge handling'
83     assert n%2==1
84     a = np.pad(a,(0,n-1-n//2), 'constant')*np.ones(n)[: ,None]
85     m = a.shape[1]
86     idx = np.mod((m-1)*np.arange(n)[: ,None] + np.arange(m), m) #
87     Rolling index
88     out = a[np.arange(-n//2,n//2)[: ,None], idx]
89     d = np.hstack((np.arange(1,n),np.ones(m-2*n+1+n//2)*n,np.arange(
90     n,n//2,-1)))
91     return (out.sum(axis=0)/d)[n//2:]
92
93 #Datos filtrados

```

```

83 filt_R1 = rollavg_roll_edges(data3, 761)
84 filt_B = rollavg_roll_edges(B, 461)
85 filt_V = rollavg_roll_edges(V, 231)
86 filt_Bx = rollavg_roll_edges(Bx, 461)
87 filt_By = rollavg_roll_edges(By, 461)
88 filt_Bz = rollavg_roll_edges(Bz, 461)
89 filt_Vx = rollavg_roll_edges(Vx, 461)
90 filt_Vy = rollavg_roll_edges(Vy, 461)
91 filt_Vz = rollavg_roll_edges(Vz, 461)
92 filt_T = rollavg_roll_edges(T, 461)
93 filt_Pd = rollavg_roll_edges(Pd, 461)
94 filt_CurlB = rollavg_roll_edges(CurlB, 461)
95
96
97 #Desviacion estandar
98 sd_B = stats.stdev(filt_B)
99 sd_V = stats.stdev(filt_V)
100 sd_CurlB = stats.stdev(filt_CurlB)
101 sd_MaxR1 = np.std(Max_R1)
102 print('Stdev B:', (sd_B), 'Stdev V:', (sd_V), 'Stdev CurlB:', (
    sd_CurlB))
103 #Stdev B: 1.5517797302160994
104 #Stdev V: 76.50543539114096
105 #Stdev CurlB: 535952.5170273522
106
107
108 #Indice de Coherencia Magnetica (MCI)
109 MCI_1 = []
110 for i in range(len(filt_B)):
111     if ((filt_V[i] > 3.7*sd_V) and (filt_B[i] > 4.0*sd_B) and (
        filt_CurlB[i] > 3.8*sd_CurlB )) :
112         MCI_1.append(-0.001)
113     else:
114         MCI_1.append(0)
115
116 MCI = np.array(MCI_1)
117
118
119 #Intervalos de tiempo en donde hay una respuesta en el MCI
120 strt = []
121 end = []
122 x = []
123 y = []
124 for i in range(len(tjd_B)):
125     if ((MCI[i]-MCI[i-1]) == -0.001 ):
126         print (tjd_B[i]) #Fecha inicial del evento (J.D.)
127         print (t_B[i]) # " " " " (FDOY)
128         strt.append(tjd_B[i])
129         x.append(i)
130     if ((MCI[i]-MCI[i-1]) == 0.001 ):
131         print (tjd_B[i]) #Fecha final del evento (J.D.)
132         print (t_B[i]) # " " " " (FDOY)
133         end.append(tjd_B[i])
134         y.append(i)

```

```

135
136
137 #Valores maximos de los parametros del SW y de la tasa R1
138 Max_R1_0 = []
139 Max_B_0= []
140 Max_V_0 = []
141 Max_Curl_0 = []
142 area_B_0 = []
143 area_V_0 = []
144
145 for i in range(len(strt)):
146     Max_B_0.append(max(filt_B[int(x[i]):int(y[i])]))
147     Max_V_0.append(max(filt_V[int(x[i]):int(y[i])]))
148     Max_Curl_0.append(round(max(filt_CurlB[int(x[i]):int(y[i])]),3))
149     Max_R1_0.append(round(max(filt_R1[int(x[i]):int(y[i])]),3))
150     area_B_0.append(round(sum(filt_B[int(x[i]):int(y[i])]), 3))
151     area_V_0.append(round(sum(filt_V[int(x[i]):int(y[i])]), 3))
152
153 Max_B_1 = np.array(Max_B_0)
154 Max_R1_1 = np.array(Max_R1_0)
155 Max_V_1 = np.array(Max_V_0)
156 Max_Curl_1 = np.array(Max_Curl_0)
157 area_B_1 = np.array(area_B_0)
158 area_V_1 = np.array(area_V_0)
159
160 #Eliminando outliers
161 ind = np.where(Max_R1_1 > -1)
162 Max_B_2 = Max_B_1[ind]
163 Max_R1 = Max_R1_1[ind]
164 Max_V_2 = Max_V_1[ind]
165 Max_Curl_2 = Max_Curl_1[ind]
166 area_B_2 = area_B_1[ind]
167 area_V_2 = area_V_1[ind]
168
169 Max_B = np.array(Max_B_2).reshape(-1, 1)
170 Max_V = np.array(Max_V_2).reshape(-1, 1)
171 Max_Curl = np.array(Max_Curl_2).reshape(-1, 1)
172 area_B = np.array(area_B_2).reshape(-1, 1)
173 area_V = np.array(area_V_2).reshape(-1, 1)
174
175
176 #Reducir las dimensiones de los arreglos
177 X = area_V.flatten()
178 Y = Max_R1.flatten()
179
180
181 #Análisis de significancia
182 Ba_sd = stats.stdev(filt_B[int(x[0]-50):int(x[0])])
183 Bp_sd = stats.stdev(filt_B[int(y[0]):int(y[0]+50)])
184 Bap_sd = (Ba_sd + Bp_sd)/2
185 R1a_mean = float(np.mean(filt_R1[int(x[30]-50):int(x[30])]))#
    anterior interval mean
186 R1p_mean = float(np.mean(filt_R1[int(y[31]):int(y[31]+50)]))#
    posterior interval mean

```

```

187 R1a_sd = stats.stdev(filt_R1[int(x[7]-50):int(x[7])])
188 R1p_sd = stats.stdev(filt_R1[int(y[7]):int(y[7]+50)])
189 R1ap_mean = (R1a_mean + R1p_mean)/2
190 R1ap_sd = (R1a_sd + R1p_sd)/2
191 R1Max_Mean = (max(filt_R1[int(x[30]):int(y[30])]) - R1a_mean) #
    Maximum - a_interval's mean
192 print(R1Max_Mean)
193 print(max(filt_R1[int(x[3]):int(y[3])]))
194 print('ap mean:', R1ap_mean)
195 print('ap sd:', R1ap_sd)
196 print(Bap_sd)
197
198
199 #Normalizacion
200 norm_R11 = preprocessing.normalize([filt_R1])
201 norm_R1 = np.transpose(norm_R11)
202 norm_CurlB1 = preprocessing.normalize([filt_CurlB])
203 norm_CurlB = np.transpose(norm_CurlB1)
204 norm_B1 = preprocessing.normalize([filt_B])
205 norm_B = np.transpose(norm_B1)
206 norm_Bx1 = preprocessing.normalize([filt_Bx])
207 norm_Bx = np.transpose(norm_Bx1)
208 norm_By1 = preprocessing.normalize([filt_By])
209 norm_By = np.transpose(norm_By1)
210 norm_Bz1 = preprocessing.normalize([filt_Bz])
211 norm_Bz = np.transpose(norm_Bz1)
212 norm_V1 = preprocessing.normalize([filt_V])
213 norm_V = np.transpose(norm_V1)
214 norm_Rot1 = preprocessing.normalize([Rota])
215 norm_Rot = np.transpose(norm_Rot1)
216
217
218 #Grafica datos
219 plt.scatter(tjd_R, norm_R1, s = 1, label = 'Tasa R1', color = '
    royalblue')
220 plt.plot(tjd_V, norm_V, label = 'Velocidad', color = 'darkred')
221 plt.plot(tjd_B, norm_B, label = 'Campo Magnetico', color = '
    lightcoral')
222 plt.plot(tjd_B, norm_Bx, label = 'Bx')
223 plt.plot(tjd_B, norm_By, label = 'By')
224 plt.plot(tjd_B, norm_Bz, label = 'Bz')
225 plt.plot(tjd_B[0:-1], norm_CurlB, label = 'Rotacional', color = '
    slateblue')
226 plt.plot(tjd_B, MCI, label = 'MCI', color = 'firebrick')
227 plt.legend()
228 plt.xlim([2458484.50000, 2458849.49931])
229 plt.title('2019')
230 plt.xlabel('Tiempo [D.J.]', fontsize = 16)
231 plt.ylabel('R1 B[nT] V[km/s] 'r'$\nabla\times B$ MCI', fontsize = 16)
232 plt.xticks(size = 14)
233 plt.yticks(size = 14)
234 plt.show()
235
236

```

```
237 # Grafica de correlacion y regresion lineal robusta
238 plt.errorbar(area_V, Max_R1, yerr=sd_MaxR1, fmt='none', color = '
    slateblue')
239 plt.scatter(area_V, Max_R1, s= 10, color = 'slateblue', marker='o')
240 sns.regplot(x=X, y=Y, ci = 95, robust=True)
241 plt.xlabel('Area V', fontsize = 16.7)
242 plt.ylabel('Max R1', fontsize = 16.7)
243 plt.show()
```

## B Eventos MCI

En este apéndice, se presentan mas ejemplos de las visualizaciones obtenidas para los eventos analizados. En estas visualizaciones se incluye la serie de tiempo del evento con el intervalo de tiempo analizado delimitado por las barras negra y roja, el hodograma y el gráfico de contorno para cada evento. Los ejemplos seleccionados fueron aquellos en los que se observa de forma mas clara el fenómeno estudiado o fueron incluidos, como el caso del evento ACE\_146\_150\_19, para ejemplificar aquellos casos en los que no se lograba visualizarla rotación en estas estructuras.

### B.1. Evento ACE\_211\_213\_19

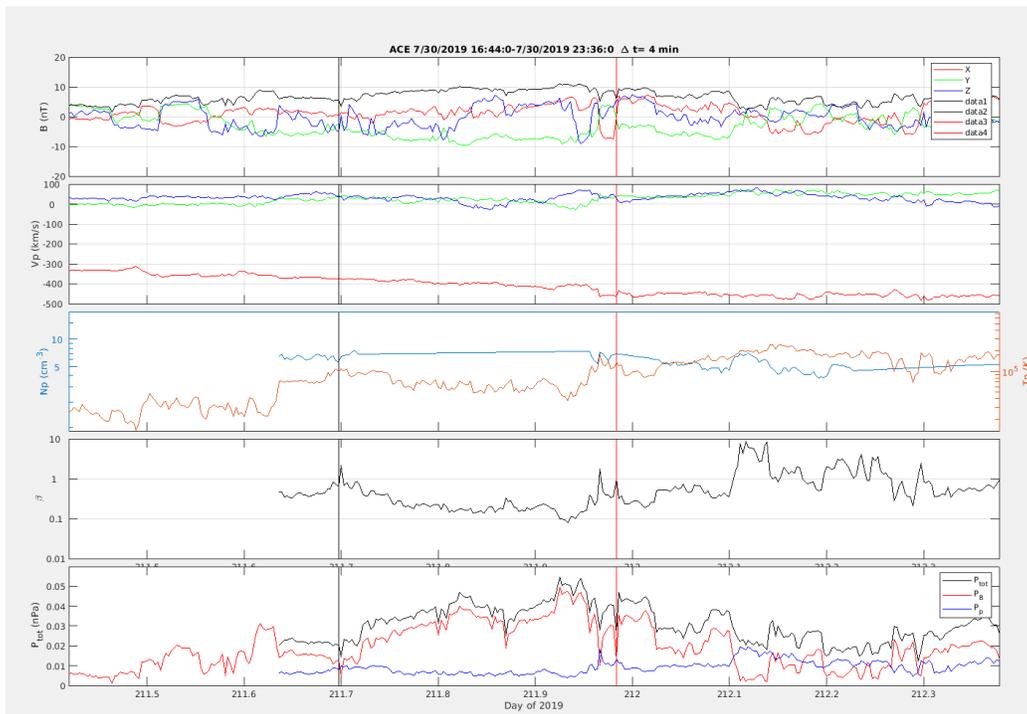


Figura B.1: Serie de tiempo del evento ACE\_211\_213\_19 (30 Jul.- 1 Ago. de 2019).

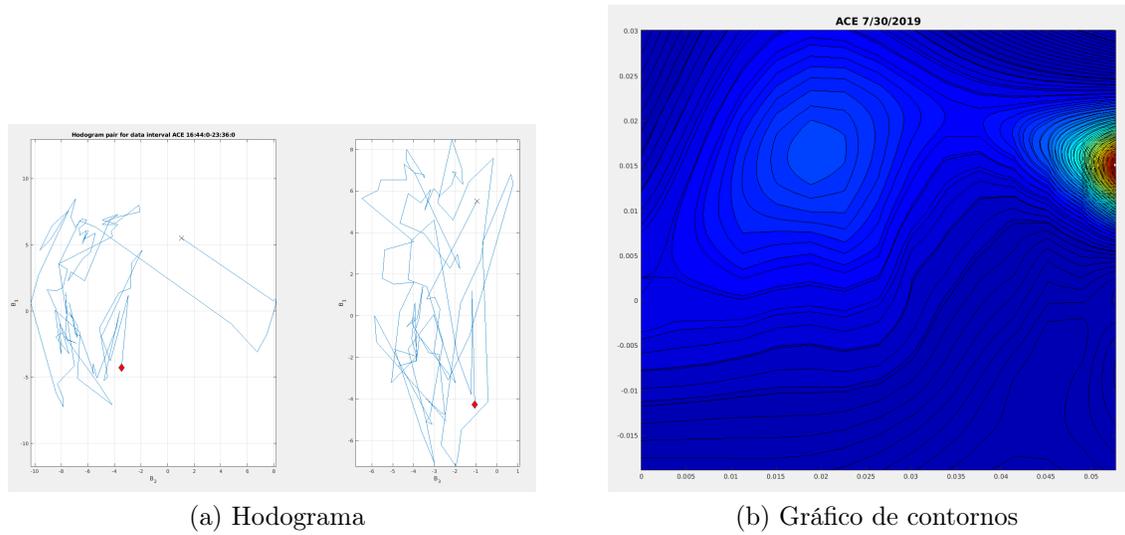


Figura B.2: Hodograma (a) y gráfico de contorno (b) del evento ACE\_211\_213\_19.

## B.2. Evento ACE\_146\_150\_19

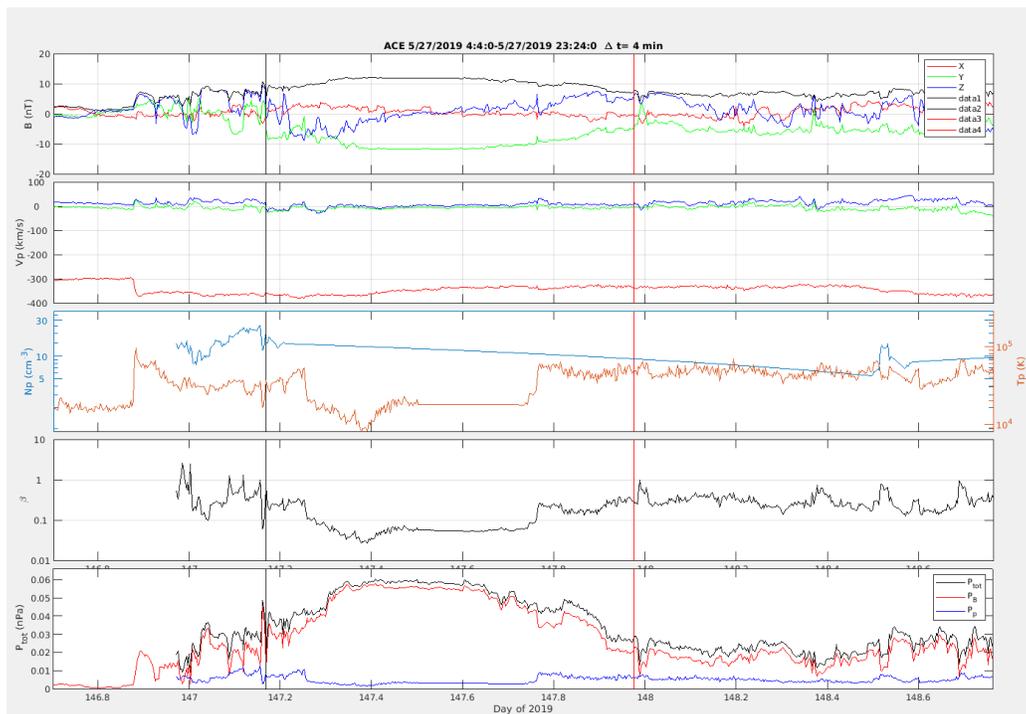


Figura B.3: Serie de tiempo del evento ACE\_146\_150\_19 (26 - 30 May. de 2019).

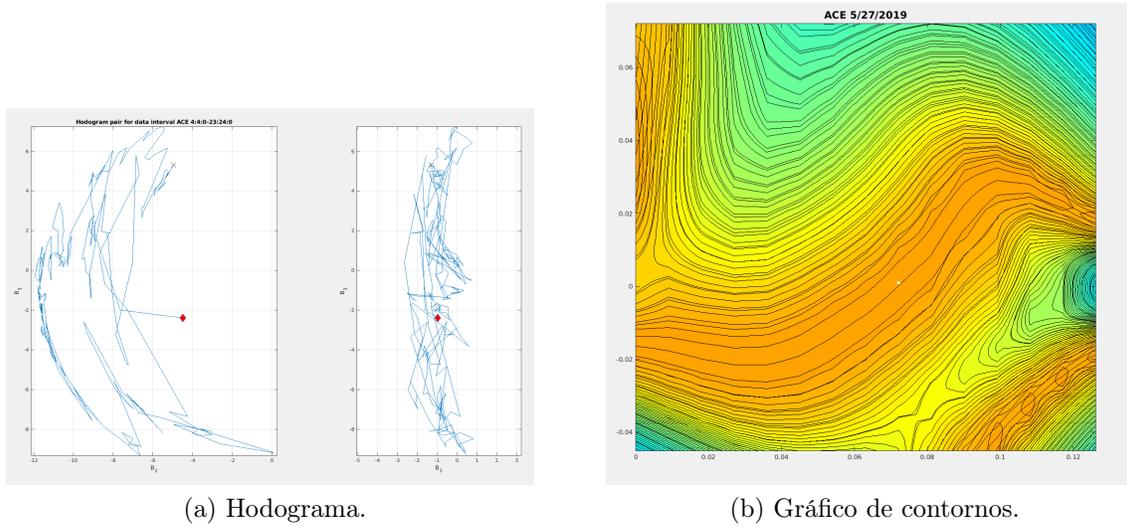


Figura B.4: Hodograma (a) y gráfico de contorno (b) del evento ACE\_146\_150\_19.

### B.3. Evento ACE\_242\_244\_19

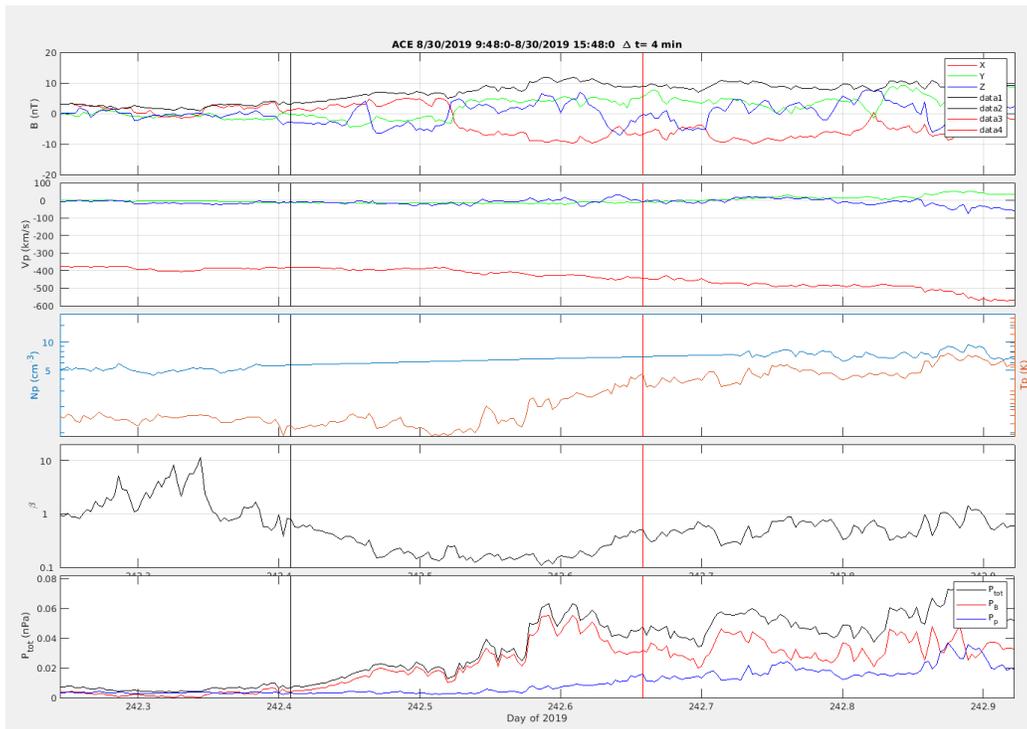


Figura B.5: Serie de tiempo del evento ACE\_242\_244\_19 (30 Ago.- 1 Sept. de 2019).

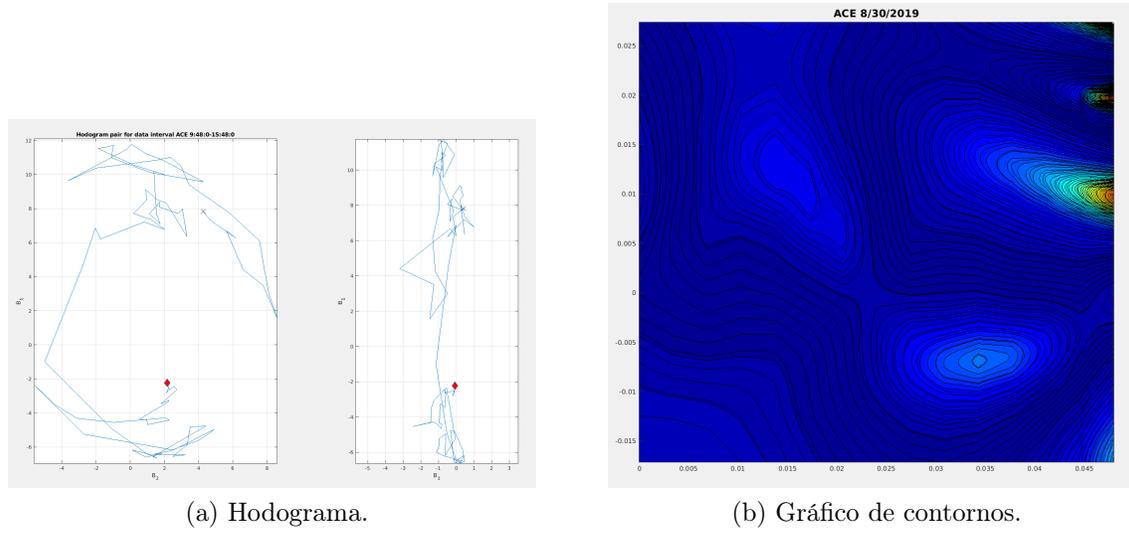


Figura B.6: Hodograma (a) y gráfico de contorno (b) del evento ACE\_242\_244\_19.

### B.4. Evento ACE\_267\_271\_19

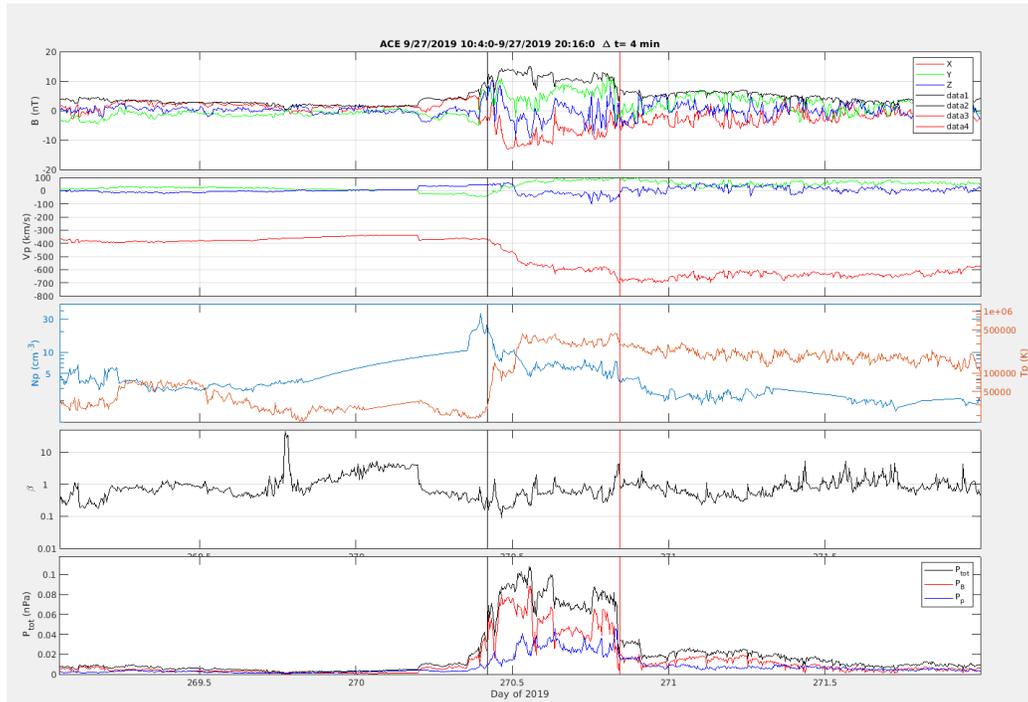
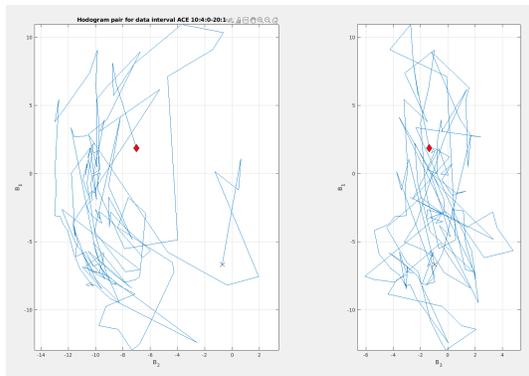
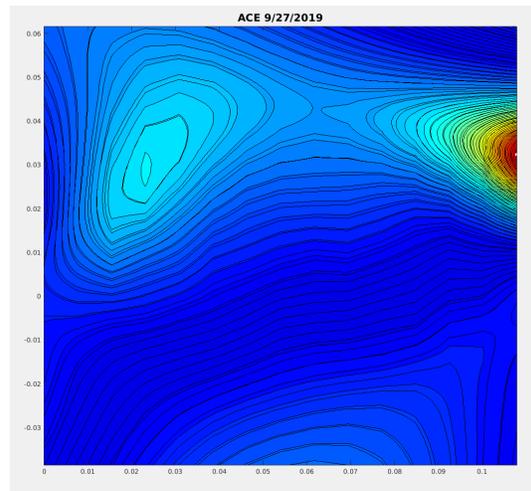


Figura B.7: Serie de tiempo del evento ACE\_267\_271\_19 (24 - 28 Sept. de 2019).



(a) Hodograma.



(b) Gráfico de contornos.

Figura B.8: Hodograma (a) y gráfico de contorno (b) del evento ACE\_267\_271\_19.



# Bibliografía

- [1] Abbott B.P., et al. (2017). Multi-messenger observations of a binary neutron star merger, *Astrophys. J. Lett.* 848. <https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>.
- [2] The LHAASO Collaboration, Z. Cao, et al.(2021). Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$  -ray Galactic sources, *Nature* 594 33–36. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z>.
- [3] The LHAASO Collaboration, Z. Cao, et al. (2021). Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula, *Science* 373 425–430.
- [4] The Milagro Collaboration, R. Atkins, et al.(2004). TeV Gamma-ray survey of the northern hemisphere sky using the milagro observatory, *Astrophys. J.* 608 680–685, <http://dx.doi.org/10.1086/420880>.
- [5] The Milagro Collaboration, Abdo, A., et al.(2007). TeV Gamma-ray sources from a survey of the galactic plane with milagro. *Astrophys. J.* 664, L91–L94, <http://dx.doi.org/10.1086/520717>.
- [6] The Milagro Collaboration, A.A. Abdo, et al.(2014). Milagro observations of potential TeV emitters, *Astropart. Phys.* 57, 16–25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2014.03.001>.
- [7] Albert, A., Alfaro, R., et al. (2020). 3HWC: The Third HAWC Catalog of Very-high-energy Gamma-Ray Sources. *Astrophys. J.* 905(1), 76. doi:10.3847/1538-4357/abc2d8
- [8] Abeysekara, A. U., Albert, A., et al. (2023). The High-Altitude Water Cherenkov (HAWC) observatory in México: The primary detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1052, 168253. doi:10.1016/j.nima.2023.168253
- [9] Alvarez, C., Angeles Camacho, J.R., Arteaga-Velázquez, J.C. et al. (2021). HAWC as a Ground-Based Space-Weather Observatory. *Sol Phys* 296, 89. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01827-z>
- [10] Akiyama, S., et al. (2020). Interplanetary Magnetic Flux Rope Observed at Ground Level by HAWC. *Astrophys. J.* 905(1), 73. doi:10.3847/1538-4357/abc344

- [11] Nisa, U. (08 2017). Probing Cosmic-ray Propagation with TeV Gamma Rays from the Sun Using the HAWC Observatory. 340. doi:10.22323/1.301.0340
- [12] K. P., A. B., Lara, A., & Ryan, J. (08 2019). Atmospheric pressure dependence of HAWC scaler system. doi:10.22323/1.358.1095
- [13] Howard, T. (2011). Coronal mass ejections: An introduction (Vol. 376). Springer Science & Business Media.
- [14] Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Rich, N. B., et al. (2004). Influence of cme interaction on propagation of interplanetary shocks. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- [15] Lara, A., Flandes, A., Borgazzi, A., & Subramanian, P. (2011). Velocity profile of interplanetary coronal mass ejections beyond 1 AU. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A12). doi:10.1029/2011JA016807
- [16] Nakwacki, M., Dasso, S., Mandrini, C., Démoulin, P. (2008). Analysis of large scale mhd quantities in expanding magnetic clouds. *Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics*, 70, 1318–1326.
- [17] Masias Meza, J. J. (2011). Estudios de actividad solar mediante modulación de rayos cósmicos galácticos. [Phdthesis, Universidad Nacional de Cuyo]. <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/315/>
- [18] Lepping, R. P., Jones, J. A., Burlaga, L. F. (1990). Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 95(A8), 11957–11965. doi:10.1029/JA095iA08p11957
- [19] Feng, H. Q., Wu, D. J., Lin, C. C., Chao, J. K., Lee, L. C., and Lyu, L. H. (2008), Interplanetary small- and intermediate-sized magnetic flux ropes during 1995–2005, *J. Geophys. Res.*, 113, A12105, doi:10.1029/2008JA013103.
- [20] Webb, D., Cliver, E., Crooker, N., Cry, O., & Thompson, B. (04 2000). Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms. *Jgr*, 105, 7491–7508. doi:10.1029/1999JA000275
- [21] Burlaga, L. F. (1988). Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 93(A7), 7217–7224. doi:10.1029/JA093iA07p07217
- [22] Bothmer, V., & Schwenn, R. (1998). The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Annales Geophysicae*, 16(1), 1–24. doi:10.1007/s00585-997-0001-x
- [23] Wu, C.-C., Lepping, R., & Gopalswamy, N. (12 2006). Relationships Among Magnetic Clouds, CMES, and Geomagnetic Storms. *Solar Physics*, 239, 449–460. doi:10.1007/s11207-006-0037-1

- [24] Zheng, J., & Hu, Q. (2018). Observational Evidence for Self-generation of Small-scale Magnetic Flux Ropes from Intermittent Solar Wind Turbulence. *The Astrophysical Journal Letters*, 852(2), L23. doi:10.3847/2041-8213/aaa3d7
- [25] Moldwin, M. B., Ford, S., Lepping, R., Slavin, J., & Szabo, A. (2000). Small-scale magnetic flux ropes in the solar wind. *Geophysical Research Letters*, 27(1), 57–60. doi:10.1029/1999GL010724
- [26] Feng, H. Q., Wu, D. J., & Chao, J. K. (2007). Size and energy distributions of interplanetary magnetic flux ropes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A2). doi:10.1029/2006JA011962
- [27] Feng, H., Zhao, G., & Wang, J. (2020). Small interplanetary magnetic flux rope. *Science China Technological Sciences*, 63(2), 183–194. doi:10.1007/s11431-018-9481-1
- [28] Wiegmann, T., & Sakurai, T. (2021). Solar force-free magnetic fields. *Living Reviews in Solar Physics*, 18(1), 1. doi:10.1007/s41116-020-00027-4
- [29] Amari, T., Luciani, J. F., Aly, J. J., Mikic, Z., & Linker, J. (2003). Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity, and Flux Ropes. I. Boundary Motion-driven Evolution. *The Astrophysical Journal*, 585(2), 1073. doi:10.1086/345501
- [30] Aulanier, G., Török, T., Démoulin, P., & DeLuca, E. E. (2009). FORMATION OF TORUS-UNSTABLE FLUX ROPES AND ELECTRIC CURRENTS IN ERUPTING SIGMOIDS. *The Astrophysical Journal*, 708(1), 314. doi:10.1088/0004-637X/708/1/314
- [31] Hu, Q., & Dasgupta, B. (2005). Calculation of magnetic helicity of cylindrical flux rope. *Geophysical Research Letters*, 32(12). doi:10.1029/2005GL023004
- [32] Mewaldt, R. A. (1996) Cosmic Rays. In: *Macmillan Encyclopedia of Physics*. Vol.1. Simon & Schuster Macmillan , New York, NY. ISBN 9780028973593.
- [33] Apel, W. D., Arteaga-Velázquez, J. C., Bekk, K., Bertaina, M., Blümer, J., Bozdog, H., ... Zabierowski, J. (2011). Kneelike Structure in the Spectrum of the Heavy Component of Cosmic Rays Observed with KASCADE-Grande. *Phys. Rev. Lett.*, 107, 171104. doi:10.1103/PhysRevLett.107.171104
- [34] Schlaepfer H. (2003). *Cosmic Rays*. International Space Science Institute.
- [35] Prada, J., Rosales, M., & Guada, C. (12 2020). Montaje y calibración de un detector de Ioduro de Sodio-NaI(Tl ), para medir la componente electromagnética de baja energía en una cascada de partículas de radiación cósmica. [La Hechicera, estado Mérida, 1893 msnm, 800 gr/cm<sup>2</sup> ]. doi:10.13140/RG.2.2.21952.76806
- [36] Papitashvili, Natalia E. and King, Joseph H. (2020), OMNI Hourly Data [WIND 92-sec. Plasma SWE Experiment (all orbit phases),92-sec Key Parameter Plasma Data from Wind/SWE], NASA Space Physics Data Facility, <https://doi.org/10.48322/1shr-ht18>, Consultado el 29 de septiembre de 2022.

- [37] Möstl, C., Farrugia, C., Biernat, H., Leitner, M., Kilpua, E., Galvin, A., & Luhmann, J. (2009). Optimized Grad – Shafranov Reconstruction of a Magnetic Cloud Using STEREO-Wind Observations. *Solar Physics*, 256, 427–441. doi:10.1007/s11207-009-9360-7
- [38] Hu, Q., & Sonnerup, B. U. Ö. (2002). Reconstruction of magnetic clouds in the solar wind: Orientations and configurations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A7), SSH 10-1-SSH 10-15. doi:10.1029/2001JA000293