



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA
MAGNETÓSFERA-IONÓSFERA ANALIZADO
EN LOS REGISTROS DE ESTACIONES
GEOMAGNÉTICAS UBICADAS EN LA REGIÓN
DE LA ANOMALÍA MAGNÉTICA DEL
ATLÁNTICO SUR (AMAS)

Nicolás Randone

Director: Prof. Dr. Clezio Marcos Denardini

Codirectora: Prof. Dra. Patricia Sallago

LA PLATA, ARGENTINA

M. Paula Natali

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profunda gratitud a mi familia. Su amor y apoyo constante han sido una guía invaluable a lo largo de este camino. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome palabras de aliento y demostrando una paciencia infinita. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y por siempre creer en mí.

A mi novia, cuyo amor y paciencia han sido esenciales para la culminación de esta etapa. Tu apoyo incondicional ha sido una fuente de fortaleza y motivación constante.

A mis amigos de la facultad, quienes han sido una fuente de alegría y soporte durante estos años. Gracias a todos por los momentos compartidos, por las risas y por estar ahí, brindando siempre una mano amiga. Un agradecimiento especial a Nico Rezzano, cuya ayuda fue fundamental para terminar mi carrera.

A mis amigos de Neuquén, que siempre fueron mi cable a tierra. Gracias por sus risas contagiosas y por su cariño incondicional. Su compañía y amistad me han brindado momentos de alegría y descanso, recordándome siempre la importancia de disfrutar el camino.

Por último, quiero agradecer a la universidad pública y gratuita, y a cada uno de sus trabajadores. A los profesores, administrativos, personal de limpieza y a todos aquellos que con su dedicación y esfuerzo diario hacen posible que la educación siga adelante. Gracias por crear un ambiente de aprendizaje y crecimiento, y por brindar las herramientas necesarias para que podamos alcanzar nuestras metas.

Índice general

Agradecimientos	1
Introducción	1
1. Nociones básicas	3
1.1. El Sol	3
1.2. Elementos del sistema y su relación	10
2. Herramientas para el estudio de la actividad geomagnética	19
2.1. Magnetómetros y sus mediciones	19
2.2. Índices geomagnéticos	21
2.3. Días quietos y perturbados	24
2.4. Datos satelitales	24
3. Generalidades sobre los impulsos	27
4. Análisis cualitativo de los datos y resultados	31
4.1. Descripción básica de la red de magnetómetros Embrace	31
4.2. Recopilación de los datos	33
4.3. Descripción de los distintos fenómenos en las distintas estaciones . . .	37
4.3.1. Evento del 3 de Julio de 2017	37

4.3.2. Evento del 16 de Julio de 2017	40
4.3.3. Evento complejo del 6 al 9 de septiembre de 2017	42
4.3.4. Comparación para los eventos de julio entre datos de Embrace y datos del ISGI	49
4.3.5. Retardos temporales entre los eventos medidos en satelite y Embrace	51
5. Conclusiones	52

Introducción

El entorno espacial que rodea a nuestro planeta está constantemente sujeto a fenómenos dinámicos que pueden tener un impacto significativo en nuestras tecnologías y sistemas terrestres. Uno de estos eventos notables es el cambio repentino en la presión dinámica del viento solar, conocido como 'comienzo brusco' (Sudden Commencement, SC), que se origina cuando una onda de choque interplanetario o una discontinuidad interacciona con la magnetopausa. Esta interacción provoca la compresión de la magnetosfera y, como resultado, un aumento repentino en la componente horizontal del campo geomagnético.

Este fenómeno, el SC, no solo constituye un interesante objeto de estudio en el campo de la climatología espacial, sino que también representa una amenaza potencial para nuestros bienes tecnológicos. La generación de corrientes inducidas como consecuencia de los SCs puede tener un impacto severo en sistemas electrónicos y de comunicación, haciendo que su caracterización y comprensión sean vitales.

Dentro de este contexto, es fundamental considerar la variabilidad geográfica y las peculiaridades regionales que pueden influir en la respuesta de la magnetosfera a los SCs. Una de estas áreas de particular interés es la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (AMAS), que se caracteriza por un campo geomagnético menos intenso debido a las particularidades intrínsecas del geodínamo terrestre. (Denardini, 2018).

En esta tesis, se llevó a cabo un análisis detallado de diferentes tipos de SCs utilizando datos recopilados por la red de magnetómetros de EMBRACE en el año 2017. Se centró en cinco estaciones distribuidas en la zona de estudio, con un enfoque especial en dos eventos específicos: un SC vinculado a agujeros coronales que ocurrió

el 3 de julio de 2017 y otro relacionado con tormentas solares que tuvo lugar el 16 de julio del mismo año. Estos eventos proporcionaron una base sólida para comprender las características y las respuestas magnéticas a los SCs en la AMAS.

Además, se exploró un evento complejo que tuvo lugar entre el 6 y el 9 de septiembre de 2017, compuesto por tres eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICMEs)), con el objetivo de comprender cómo eventos múltiples pueden afectar la magnetosfera en esta región geográfica particular.

Este trabajo de investigación busca arrojar luz sobre la dinámica de los SCs, su impacto en la AMAS y su relevancia en la climatología espacial. A través de un análisis detallado y una caracterización exhaustiva de estos eventos, se pretende contribuir al conocimiento de los fenómenos espaciales y su influencia en nuestras tecnologías terrestres en una zona geográfica única y crítica como la AMAS.

Capítulo 1

Nociones básicas

En las últimas décadas, hemos aprendido que nuestra atmósfera es afectada por eventos dinámicos del Sol, que proporciona energía para la vida de la Tierra, pero que también puede causar inconvenientes en nuestros sistemas de comunicaciones. La meteorología espacial (en inglés, Space Weather) es el campo dentro de las ciencias espaciales que estudia cómo el Sol influye en el entorno espacial de la Tierra y los impactos tecnológicos y sociales de esta interacción. [Moldwin 2008, Schrijver et al, 2015]

1.1. El Sol

En el desarrollo de esta tesis es importante conocer las características del Sol, desde su núcleo hasta sus capas exteriores, como así también dar cuenta de los procesos que se llevan a cabo en cada una de dichas regiones. En la siguiente sección se presentan las características generales del Sol, y daremos una breve reseña de su estructura interna, de su atmósfera exterior y de algunos de los fenómenos que se manifiestan en él, de interés para nuestro trabajo. Se pueden hacer diferentes observaciones de la superficie del Sol y de su atmósfera, comenzando con su composición. La misma se conoce con una buena exactitud a partir de análisis de líneas de absorción en el espectro solar. El Sol se compone de dos elementos principales, el Helio y

el Hidrógeno.

Elemento	Símbolo	Abundancia Relativa (%)
Hidrógeno	H	92.1
Helio	He	7.8
Oxígeno	O	0.061
Carbono	C	0.030
Nitrógeno	N	0.0084

Tabla 1.1: Abundancia relativa de elementos del Sol, extraída de Moldwin 2008

Por otro lado, las regiones de la atmósfera Solar, son definidas por su densidad y temperatura. Como se indica en la figura 1.1

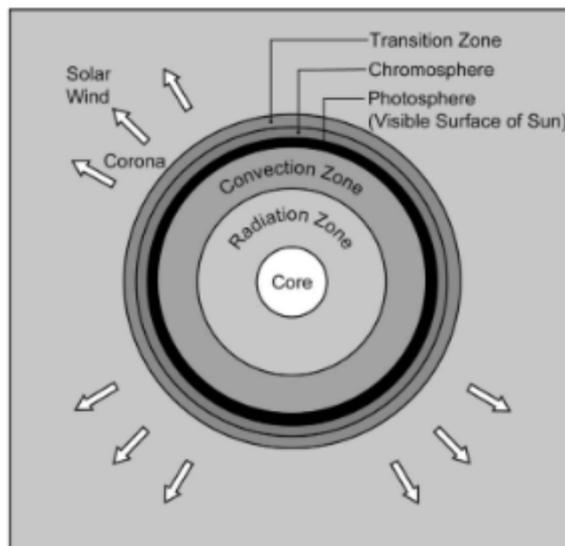


Figura 1.1: Regiones del Sol definidas por su densidad y temperatura. Figura extraída de Moldwin, 2008

Estructura:

El Modelo solar Estándar sugiere que las abundancias mostradas en la Tabla 1 es representativa en todo el Sol (Moldwin, 2008), excepto en el núcleo, donde las reacciones nucleares están continuamente cambiando su composición.

El Sol representa casi el 99% de la masa del sistema Solar, lo que equivale a $1,9 \times 10^{30}$ kg de material o cerca de 300,000 masas de la Tierra.

Interior Solar:

La parte interna del Sol está dividida en 3 regiones principales, la zona convectiva, la zona radiativa y el núcleo. Las regiones dentro del Sol son definidas por cuánta energía es transferida del núcleo a la superficie.

El núcleo del Sol ocupa aproximadamente el 15% del radio Solar, R . Es el dominio principal donde las reacciones nucleares se producen a temperaturas superiores a 10^7 K, generando el flujo de energía solar. "Los neutrinos producidos por las reacciones nucleares abandonan el núcleo casi desinhibidos y pueden ser detectados en la Tierra como testigos directos de los procesos de generación de energía"(Moldwin, 2008).

La energía generada en el núcleo es transportada por fotones hacia la zona de radiación del Sol, la cual está definida en una región comprendida entre $0,15 - 0,7 R$. La transferencia de energía a través de la zona de radiación, la temperatura en esta zona es decreciente a medida que nos alejamos, por lo que se puede aproximar muy bien por un proceso de difusión (Scherer, 2004).

A medida que la temperatura disminuye hacia el exterior, los electrones comienzan a recombinarse con los diversos núcleos atómicos. Las posibilidades resultantes de transiciones electrónicas aumentan la opacidad de la materia y, por lo tanto, disminuyen el coeficiente de difusión de la radiación, de modo que el gradiente de temperatura tiene que aumentar para mantener constante el flujo de energía en un estado estacionario.

Alrededor de $0,7 R$ y a una temperatura de 2×10^6 K, el gradiente térmico necesario para el transporte radiativo de la energía se vuelve más pronunciado que

el gradiente de temperatura adiabático. Como resultado, la estratificación se vuelve inestable con respecto a movimientos convectivos, que rápidamente asumen el control como el mecanismo dominante de transporte de energía. (Scherer, 2004).

Atmósfera Solar:

La atmósfera solar puede ser dividida en capas de acuerdo con ciertas propiedades, tal como se presenta en la figura 1.2 .

Fotósfera: es la superficie visible del Sol, opaca a la luz visible, con una temperatura promedio de 5800 K. Dado que el Sol está compuesto de gas, no tiene una superficie sólida. Mediante imágenes de alta resolución de la fotosfera, se pueden apreciar una superficie moteada, con regiones claras y oscuras llamadas gránulos, lo que es una prueba directa de la convección solar.

Cromosfera: la región justo encima de la fotosfera se llama cromosfera, con unos 1500 km de espesor, y se caracteriza por una temperatura superior a la de la fotosfera (alrededor de 10,000 K). Esta no es visible contra el fondo brillante de la fotosfera. Sin embargo, una de las formas más utilizadas por los científicos para estudiar la cromosfera fue observando eclipses totales del Sol. Cuando la Luna bloquea la fotosfera brillante, la cromosfera se hace visible con sus tonos rojizos debido a la línea de emisión H-alfa del hidrógeno (transición electrónica específica dentro del hidrógeno) (Moldwin, 2008).

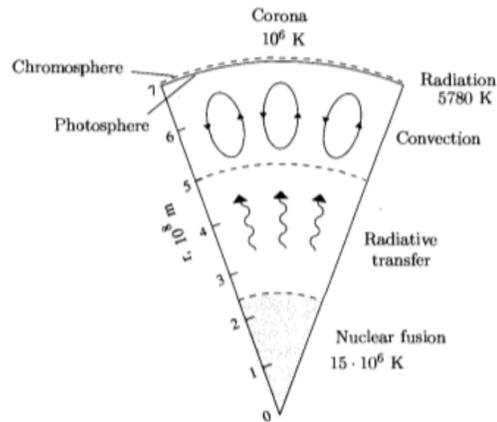


Figura 1.2: Corte transversal del Sol. Figura extraída de Prolss, 2004

Por encima de la cromosfera la temperatura aumenta dramáticamente con la altura en una región de transición relativamente delgada. Luego de esta zona de transición está la atmósfera exterior del Sol, llamada corona solar, que es visible durante los eclipses solares como se describió anteriormente o con ayuda de telescopios especiales llamados coronógrafos. Estudiando la atmósfera solar se pueden encontrar características como regiones activas del Sol y/o manchas solares.

Manchas solares y regiones activas:

Las manchas solares son áreas relativamente oscuras en la fotosfera del Sol, la capa más externa y visible de la estrella. Estas regiones son causadas por intensos campos magnéticos que inhiben la convección normal del gas solar, lo que resulta en una temperatura ligeramente más baja que la de su entorno circundante (alrededor de 4500 K).

Desde el punto de vista histórico, Galileo fue el primero que observó la superficie del Sol alrededor del año 1609. Notando estas manchas oscuras en la superficie del Sol.

Cada mancha tiene una polaridad y generalmente aparecen en pares de polaridades opuestas. Para una polaridad norte el campo se dirige hacia el exterior formando un bucle alrededor de la superficie Solar, y se sumerge al interior del sol sobre la mancha Solar para una polaridad sur. Todos los pares de manchas solares en un determinado hemisferio tiene la misma configuración magnética esto se debe a la rotación diferencial del Sol. (Moldwin, 2008). En la figura 1.3 podemos ver un mapa del campo magnético en la fotosfera solar tomado con el Interferómetro Doppler Michelson (MDI) a bordo del SOHO. El negro y blanco indican polaridad magnética positiva y negativa, respectivamente, el gris representa bajo flujo magnético.

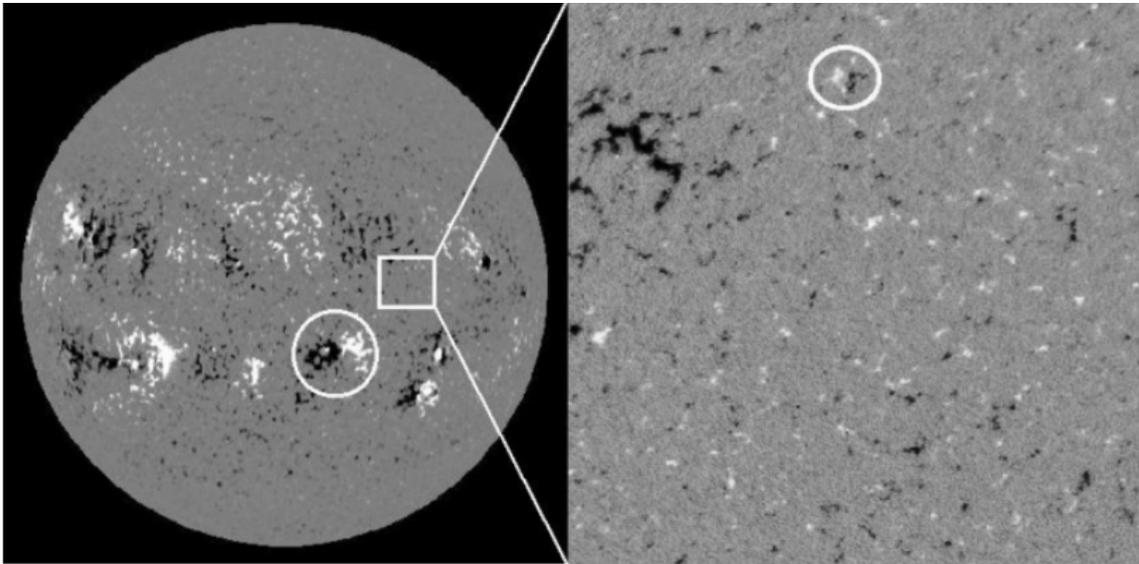


Figura 1.3: Mapa del campo magnético en la fotosfera solar. Figura extraída de Scherer, 2004

Además de sus características morfológicas, estas manchas solares están bien relacionadas con las regiones activas, las mismas, son áreas en la fotosfera que liberan grandes cantidades de energía, estos eventos pueden emitir enormes cantidades de energía en tan solo unos minutos, alcanzando temperaturas de hasta 100 millones de grados Kelvin, lo que los convierte en significativamente más calientes que el núcleo solar. La intensidad de estos eventos expulsa partículas cargadas en el espacio, algu-

nas a velocidades cercanas a la de la luz, así como emiten radiación electromagnética en todas las longitudes de onda, incluyendo Rayos-X. La liberación de estas partículas energéticas y la radiación electromagnética en el espacio interplanetario puede tener efectos en el entorno espacial de la Tierra, contribuyendo al denominado "clima espacial". (Moldwin, 2008) Existen eventos relacionados con estas regiones activas que emiten partículas al medio interplanetario llamados Eyecciones de Masa Coronal (CME por su sigla en inglés), descubiertos con las primeras imágenes de coronógrafo en la década del 80. Estas eyecciones constan de una estructura magnética de gran escala que puede contener un billón de kilogramos de partículas cargadas y tienen velocidades mayores a las del viento Solar de fondo (>1000 km/s). Generalmente, forman ondas de choque frente a ellas a medida que avanzan, llevando consigo partículas muy energéticas que pueden arribar a la Tierra. A menudo, tardan más de un día en llegar a la Tierra. El frente de choque de las CMEs tiene una alta densidad de plasma de viento Solar, ya que es barrido el viento Solar lento. Son la principal causa de las grandes tormentas geomagnéticas y, por lo tanto, uno de los fenómenos más importantes para el clima espacial. Otro tipo de eventos que emiten partículas son Los flujos de alta velocidad los cuales son regiones de viento solar que se mueven a velocidades más altas que el promedio. Estos flujos pueden ocurrir en la corona solar y se originan en agujeros coronales, que son áreas de la corona con campos magnéticos abiertos que permiten que el viento solar escape a velocidades más altas que las áreas circundantes. Los flujos de alta velocidad pueden ser generados por la rotación diferencial del Sol, que causa la aparición y desaparición de agujeros coronales en la superficie solar.

Ciclo Solar:

El número de manchas solares en el Sol aumenta y disminuye a lo largo de un ciclo solar de 11 años. Dado que las manchas solares están asociadas con la actividad solar (es decir, llamaradas y otras liberaciones rápidas de energía que pueden calentar regiones localizadas de la atmósfera solar a muchos millones de grados Kelvin), el ciclo solar también describe el nivel de actividad y variabilidad del Sol. Este ciclo ha persistido durante siglos. La figura 1.4 muestra el número de manchas solares

observadas en el Sol desde la década de 1700.

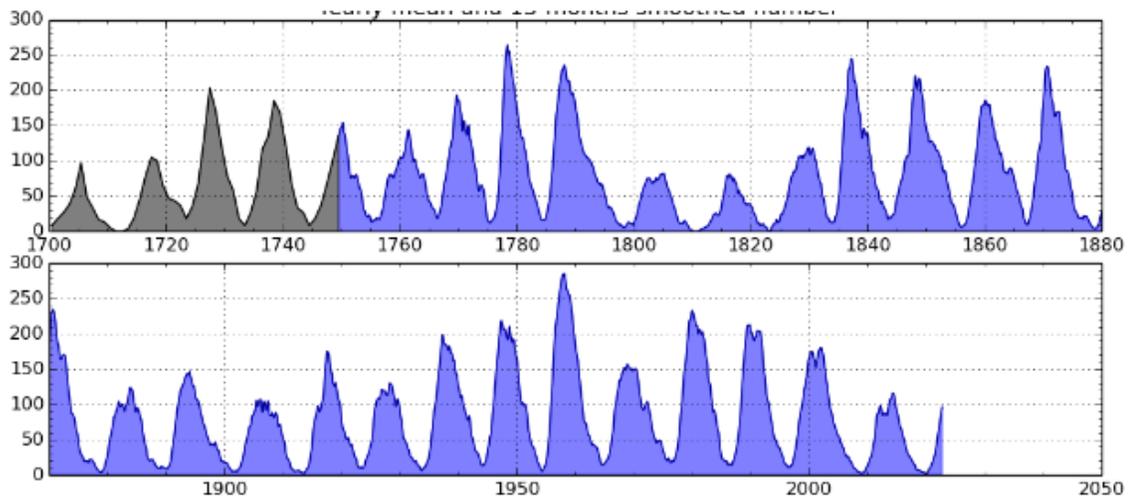


Figura 1.4: representa la actividad solar medida en número de manchas solares con respecto al tiempo en años desde el 1700. Figura extraída de la pagina web del Royal Observatory of Belgium (<http://sidc.be/silso>).

1.2. Elementos del sistema y su relación

Heliosfera:

El gas ionizado (plasma) y el campo magnético, son expulsados del Sol constantemente. El viento Solar se expande hacia el espacio interplanetario marcando el límite de la heliosfera. Las partículas en la corona tienen una temperatura de más de 1 millón de grados Kelvin, por lo tanto, muchas de estas tienen velocidades suficientemente grandes para escapar del Sol. Estas partículas forman el viento Solar, un plasma compuesto principalmente de protones, núcleos de helio y electrones, que llevan consigo el campo magnético del Sol. Estas propiedades del viento solar son mencionadas en la tabla 1.2 La parte del campo magnético del Sol que es expulsada hacia la heliosfera se denomina Campo Magnético Interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés). Se caracteriza por tener una configuración espiral cuando se ve por encima o por debajo del plano ecuatorial debido a la rotación del Sol. No solo tiene un patrón espiral como el patrón de Arquímedes, sino que también tiene variaciones

de norte a sur debido a que el ecuador magnético del Sol no está totalmente alineado con el de rotación, estos efectos los podemos ver en la figura 1.5. (Moldwin, 2008)

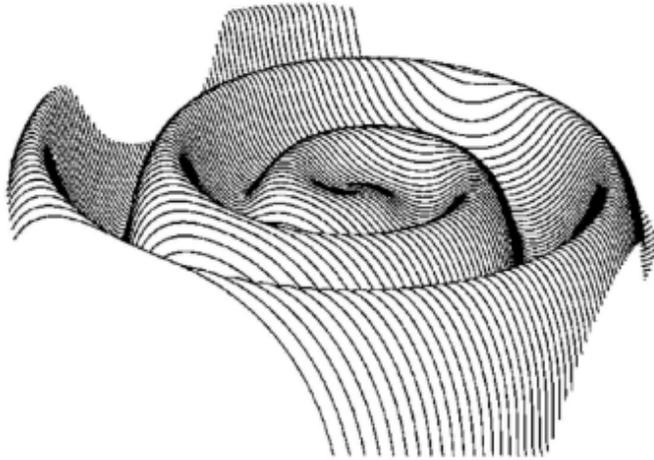


Figura 1.5: Diagrama de perspectiva de la hoja de corriente heliosférica. Figura tomada de Moldwin 2008.

Parámetro	Valor
Densidad de partículas	5 partículas cm^{-3}
Temperatura	1,000,000 K
Velocidad	400 km s^{-1}
Composición	90 % H, 8 % He, y cantidades menores de otros iones
Intensidad de campo magnético	10 nT

Tabla 1.2: Representa las propiedades del viento Solar a la distancia de 1 UA (Moldwin, 2008).

Campo Geomagnético:

El Campo Geomagnético resulta de la combinación de diversas fuentes, las cuales pueden considerarse de manera separada, y cada una contribuye de manera distinta:

1. **Campo principal:** Este es generado en el núcleo fluido de la Tierra mediante un proceso conocido como geodínamo.
2. **Campo de la corteza:** Este es generado por las rocas magnetizadas presentes en la corteza terrestre.
3. **Campo externo:** Producido por corrientes eléctricas que fluyen en la ionosfera y la magnetosfera debido a la interacción entre la radiación electromagnética solar, el viento solar y el campo magnético terrestre.

El Campo Geomagnético puede aproximarse como un dipolo magnético. Se puede descomponer en la superficie terrestre a lo largo de tres direcciones, considerando el punto de medición como el origen de un sistema cartesiano de referencia:

El eje x está en el meridiano geográfico, apuntando al norte.

El eje y está en el paralelo geográfico, apuntando al este.

El eje z es paralelo a la vertical en el punto, positivo hacia abajo.

Las componentes del campo magnético de la Tierra a lo largo de estos ejes se denominan X , Y y Z , respectivamente. Entonces, las expresiones que describen estas componentes son las siguientes:

$$H = F \cos I \quad (\text{Componente horizontal del campo magnético})$$

$$Z = F \sin I \quad (\text{Componente vertical del campo magnético})$$

$$Z = H \tan I \quad (\text{Relación entre componente vertical y horizontal})$$

$$X = H \cos D \quad (\text{Componente norte-sur del campo magnético})$$

$$Y = H \sin D \quad (\text{Componente este-oeste del campo magnético})$$

Donde I es la inclinación geomagnética, que es el ángulo entre las líneas del campo magnético terrestre y la dirección vertical en un punto dado en la superficie de la

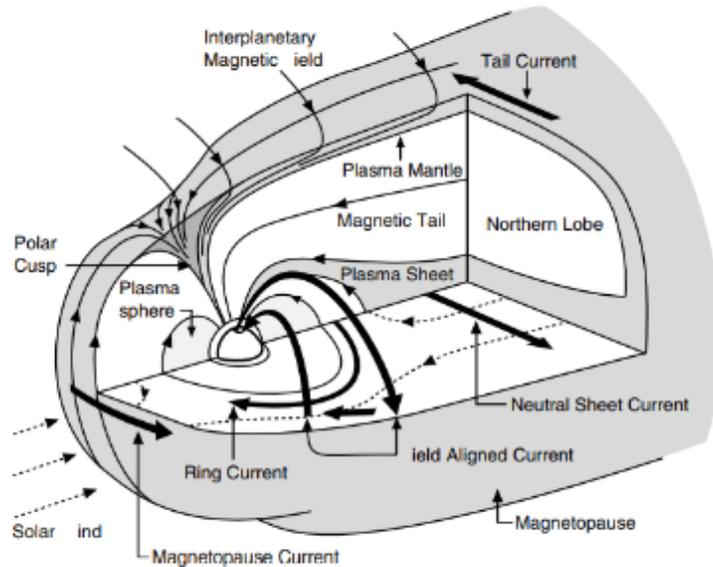


Figura 1.7: Esquema de la magnetósfera terrestre mostrando los distintos flujos de corrientes eléctricas señalados con flechas oscuras. (Moldwin 2008).

Superpuestos a la Plasmasfera, se encuentran los cinturones de Van Allen y las corrientes de anillo. Estas dos regiones se caracterizan por poseer partículas de alta energía que quedan atrapadas en la magnetosfera del planeta. La corriente anillo está formada por partículas con una energía máxima de 200 KeV, mientras que los cinturones de radiación consisten en partículas con energías que llegan al régimen relativista. Las flechas más gruesas indican las direcciones de las diferentes corrientes que fluyen en la magnetósfera. Por la forma y fuerza de la región del campo magnético del dipolo terrestre, los iones energéticos fluyen desde medianoche al lado oscuro, y los electrones energéticos fluyen en el lado opuesto. Esta diferencia da lugar a la corriente anillo que rodea la Tierra. A su vez, esta corriente genera un campo

magnético opuesto al dipolar terrestre, generando una disminución del efecto de este.

Existen cinturones de radiación llamados cinturones de Van Allen, bautizados así en honor a su descubridor James Van Allen, los cuales comprenden dos regiones de partículas cargadas. El cinturón exterior está compuesto principalmente por electrones energéticos y tiene su borde interior a aproximadamente 3 radios terrestres, extendiéndose hacia el exterior justo más allá de las órbitas geosíncronas. Este cinturón exterior es ampliamente estudiado debido a su influencia en las operaciones de satélites y en la exposición a la radiación de astronautas y equipos electrónicos.

En contraste, el cinturón interior consiste en protones y electrones de mayor energía, atrapados por el campo magnético terrestre en una región más cercana al planeta. Este cinturón, menos conocido que su contraparte externa, se extiende desde aproximadamente 1.000 kilómetros hasta 6.000 kilómetros sobre la Tierra.

La interacción entre el campo magnético terrestre y el viento solar magnetizado es similar a la de una roca en un arroyo: el viento solar se encuentra con la magnetósfera de la Tierra como un obstáculo y se mueve alrededor de él, generando una estela detrás conocida como la magnetocola. Debido a que el viento solar es supersónico, se forma una onda de choque en el lado diurno de la magnetosfera. La región entre la onda de choque y la magnetosfera se denomina magneto-vaina, mientras que la magnetopausa es el límite de la magnetosfera, cuya posición está definida por la densidad y la velocidad del viento solar.

Se genera una interacción adicional entre el campo magnético terrestre y el viento solar magnetizado, donde se suman o restan contribuciones para formar nuevas líneas de campo. Este proceso se conoce como reconexión magnética, durante el cual la energía magnética se transforma en energía cinética de las partículas. La reconexión magnética ocurre cuando un paquete de plasma magnetizado (llamado tubo de flujo) de una polaridad se enfrenta a un paquete de plasma magnetizado de polaridad opuesta. Cuando ocurre la reconexión magnética, las líneas de campo se conectan y cambian sus topologías o conectividad.

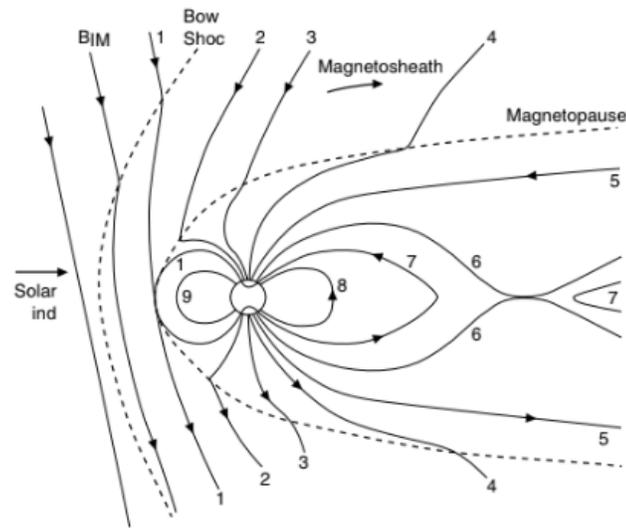


Figura 1.8: Muestra los cambios de topología de campo en el lado diurno de la magnetosfera. Figura tomada de Moldwin 2008

La figura 1.8 muestra una magnetopausa idealizada con el campo magnético, hacia el sur del viento Solar. Las líneas con ambos extremos conectados a la Tierra se denominan 'cerradas', y aquellas con un extremo conectado a la Tierra y el otro en el viento Solar son llamadas 'abiertas'. El plasma puede quedar 'atrapado' en líneas de campo cerradas y por lo tanto, las densidades pueden acumularse. La plasmasfera y los cinturones de radiación se encuentran en líneas de campo cerradas. Las líneas de campo abiertas generalmente tienen mucho menos plasma ya que el plasma puede fluir a lo largo del campo magnético lejos de la Tierra. El campo magnético de la Tierra es barrido hacia la parte nocturna por el viento Solar generando una región larga de forma cilíndrica llamada magnetocola. (Moldwin, 2008)

Ionosfera

La ionosfera se sitúa aproximadamente entre 50 y 1500 km sobre la superficie de la Tierra, se subdivide en la región D (50-90 km), la región E (90-120 km), y la región F (120-1500 km). La ionización se origina con la interacción de la radiación

solar ultravioleta con varios constituyentes atmosféricos. La densidad de electrones aumenta de la región D a la región F, donde normalmente alcanzan 10^{-5} y 10^{-6} partículas/cm³ al mediodía. Las energías de los electrones rondan unos pocos eV.

Las partículas en la ionosfera se ven afectadas por la rotación de la Tierra y por las mareas.

El grado de ionización es tan pequeño en la región D que las colisiones regionales con partículas neutras dan como resultado rotación sincrónica. La región D desaparece por la noche. En la región E las colisiones son menos frecuentes que en altitudes más bajas y el grado de ionización es más grande para que haya un desacoplamiento parcial entre las partículas ionizadas y partículas neutras. En la región F se suele suponer que, en un primer momento, hay un desacoplamiento completo entre las partículas ionizadas y partículas neutras, es decir, las fuerzas electromagnéticas son mucho más fuertes que las fuerzas de colisión y, por lo tanto, los movimientos de las partículas cargadas están controlados por procesos que se producen en la magnetosfera y el viento solar.

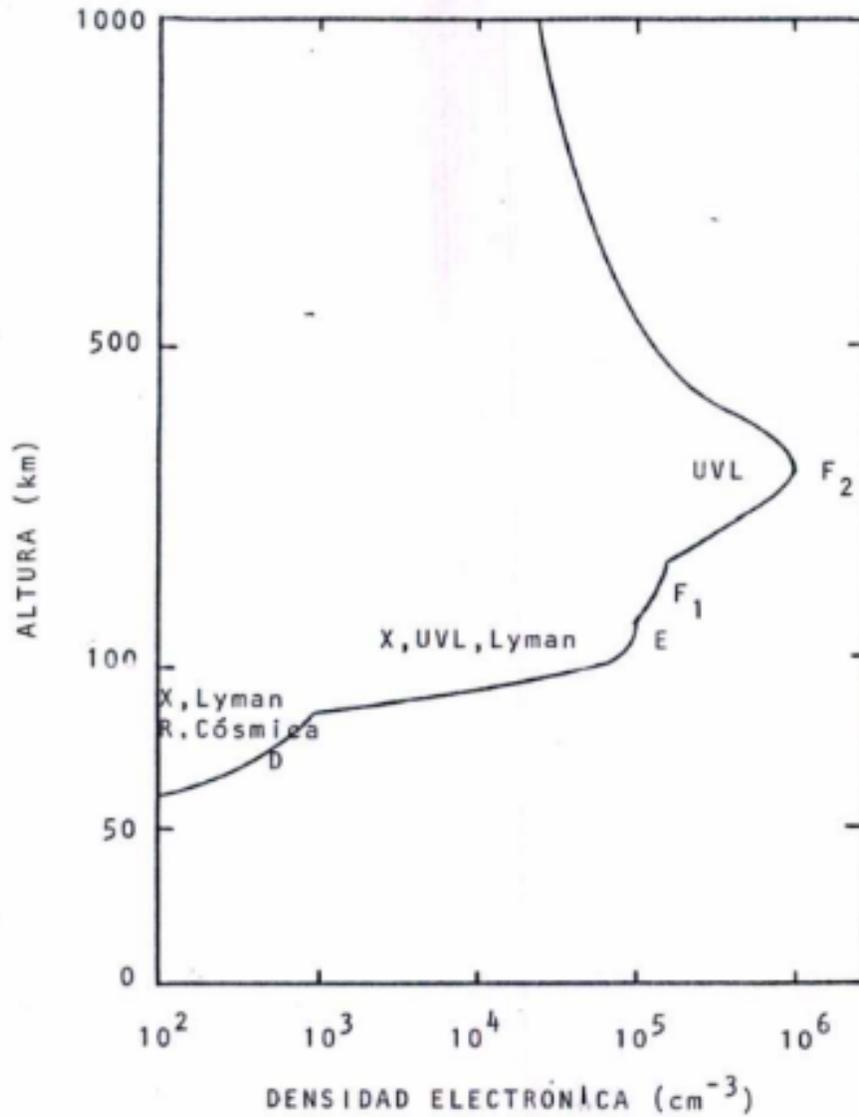


Figura 1.9: Muestra el perfil de densidad electrónica diurno a latitud media y las fuentes de ionización en cada región (Banks y Kockarts, 1973).

Capítulo 2

Herramientas para el estudio de la actividad geomagnética

2.1. Magnetómetros y sus mediciones

Para este trabajo se utilizaron los datos del programa EMBRACE, el cual consta de una red de magnetómetros fluxgate de tres componentes. Este tipo de magnetómetros es sensible al campo magnético en el rango de ± 2500 nT, con una resolución alcanzable de 0.1 nT (Denardini, 2018a).

Es un instrumento que opera mediante el flujo de una corriente de excitación a través de una bobina de inducción que genera un campo magnético que periódicamente satura el núcleo de material ferromagnético del sensor (generalmente compuesto de aleaciones como FeCoNi, FeNi, MoFeNi o CoFeSiCr).

La medición del campo magnético se realiza detectando la tensión inducida en la bobina en función de su dirección (Ripka, 1992).

Sin embargo, cuando una de las bobinas se alinea con el campo magnético horizontal hacia el norte (H), los cambios de voltaje son proporcionales a las variaciones medidas en las componentes horizontal (H), declinación (D) o vertical (Z) del campo geomagnético. Estos cambios se registran en el sistema al eliminar las variaciones en tres direcciones ortogonales (Denardini et al., 2018a). en la figura 2.1 (a) se muestra

el núcleo del sensor de una sola barra que se construye dentro de la carcasa de PVC la cual sella los sensores del magnetómetro la cual se puede ver en la figura 2.1 (b), lo que compone el sistema de magnetómetro Embrace MagNet

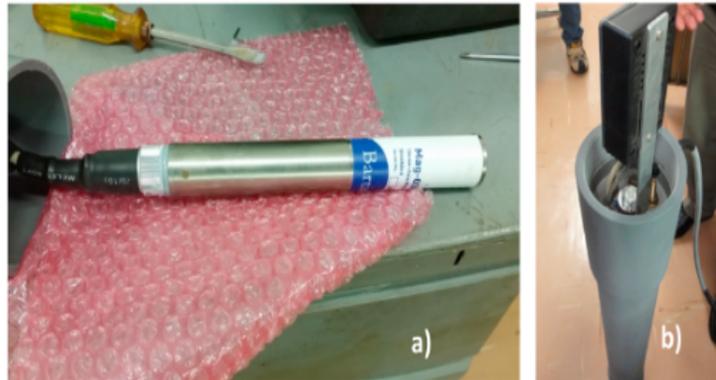


Figura 2.1: Composición de los magnetómetros de la red Embrace.

Los archivos de salida primarios proporcionados son archivos ASCII sin procesar de resolución de tiempo de 1 segundo. La horizontal (H), declinación (D), y verticales (Z) son componentes del vector magnético además de la temperatura en la sala del controlador (T1) y el sensor enterrado (T2), la figura 2.2 muestra un ejemplo del registro tomado por el magnetómetro de la red Embrace en Cachoeiro Paulista

```

CACHOEIRA PAULISTA EMBRACE-01 <001> 1 Sec. Raw data

HH MM SS H(Ch2) D(Ch4) Z(Ch6) T1(Ch7) T2(Ch8)

12 00 00 -0077668 -0036585 -0101692 0056192 0049044
12 00 01 -0077673 -0036590 -0101680 0056189 0049042
12 00 02 -0077682 -0036597 -0101674 0056189 0049039
12 00 03 -0077701 -0036588 -0101683 0056191 0049039
12 00 04 -0077709 -0036589 -0101682 0056190 0049038
12 00 05 -0077711 -0036599 -0101674 0056188 0049036
    
```

Figura 2.2: ejemplo de archivo de salida ASCII.(Denardini 2018a).

Durante la adquisición de los datos, el software agrega el valor promedio por minuto al archivo AASCII diario. Estos valores corresponden al valor promedio de las mediciones tomadas por el magnetómetro cada un segundo. Es decir, desde el segundo 0,000 hasta el segundo 59,999. Durante este proceso, estos números enteros largos se convierten en niveles de voltaje. El encabezado del archivo mantiene la misma información mencionada anteriormente. Finalmente, los datos se vuelven a convertir a sus unidades originales y el ángulo de inclinación magnética (I) y el módulo del campo principal (F) también se calculan y se agregan al archivo ASCII final. Las temperaturas se eliminan de este archivo final, ya que se utilizan sólo para la eventual corrección de datos (Denardini et al., 2018a).

2.2. Índices geomagnéticos

La actividad geomagnética asociada con el campo externo y registrada por los magnetómetros en la superficie de la Tierra pueden ser claramente muy complejas. Tradicionalmente esto se hace mediante el uso de índices magnéticos. Los índices de actividad geomagnética son indicadores que cuantifican el comportamiento del campo geomagnético en cualquier instante del tiempo. Existen distintos tipos de índices según la región de estudio, como nuestro estudio se realizó en latitudes geomagnéticas medias/bajas se utilizaron los índices Kp y Dst.

Índice Kp

El índice geomagnético planetario Kp fue introducido por J. Bartels en 1949 y se deriva a partir de los índices estandarizados K (Ks) de 13 observatorios magnéticos ubicados en latitudes medias. El índice Kp fue diseñado para medir los efectos magnéticos de los eventos solares y se presenta en escala pseudo logarítmica con rangos de variabilidad que van desde 0 (no actividad) a 9 (máxima actividad de la tormenta). En la figura 2.3 se muestra la distribución de estaciones que se utilizan para medir el índice Kp

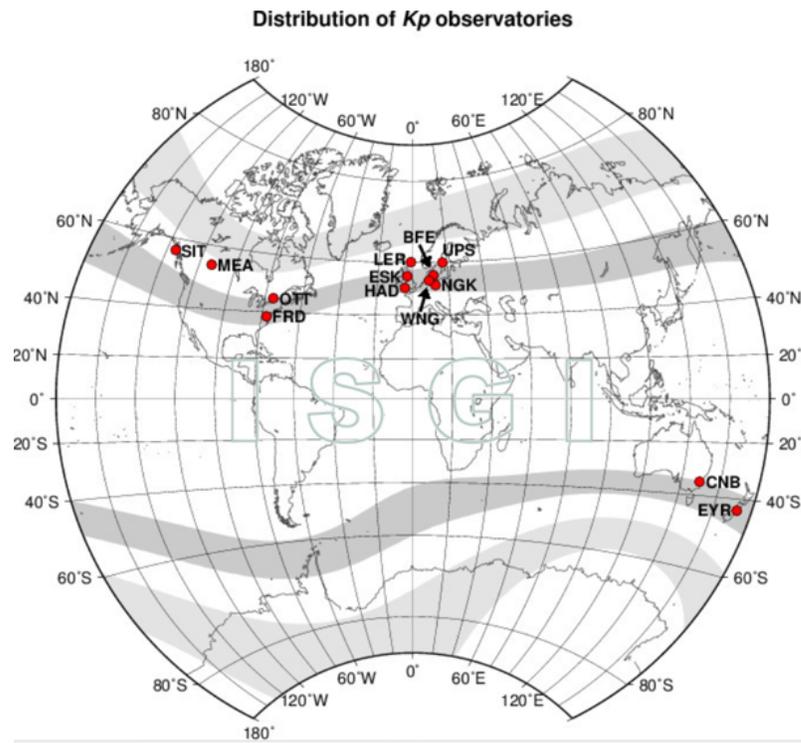


Figura 2.3: Red de estaciones geomagnéticas que contribuyen a la determinación del índice Kp.

Índice Dst (Disturbance Storm Time)

Este índice se utiliza típicamente para describir los procesos físicos que ocurren durante una tormenta magnética. Su variación nos brinda una indicación clara de la ocurrencia de tormentas magnéticas y su intensidad cuando suceden. Por lo tanto, la variación de Dst obtenida de esta manera proporciona una medida cuantitativa de la perturbación geomagnética, que puede ser correlacionada con otros parámetros solares y geofísicos. La Figura 2.4 muestra la localización de las 4 (cuatro) estaciones magnéticas que son utilizadas para el cálculo del índice de actividad geomagnética Dst. Estos observatorios se eligen cuidadosamente en función de su ubicación, ya que están conectados con las corrientes de las capas superiores de la atmósfera, incluidos los cinturones de radiación de Van Allen, y se encuentran a una distancia suficiente

de los electrochorros. Sin embargo, sería preferible una distribución más uniforme de estos observatorios en términos de su ubicación longitudinal, para obtener una representación más equitativa.



Figura 2.4: Red de estaciones geomagnéticas que contribuyen a la determinación del índice Dst, fuente: WDC para Geomagnetismo, Kioto (kyoto-u.ac.jp).

Observatorio	Longitud Geográfica(E)	Latitud geográfica (N)	Latitud Dipolar
Hermanus	19.22°	-34.40°	-33.3°
Kakioka	140.18°	36.23°	26.0°
Honolulu	201.98°	21.32°	21.1°
San Juan	293.88°	18.11°	28.0°

Tabla 2.1: Coordenadas de observatorios que contribuyen la determinación del índice Dst.

2.3. *Días quietos y perturbados*

Los días quietos y los días perturbados geomagnéticos son términos utilizados para describir diferentes niveles de actividad en el campo magnético de la Tierra. De acuerdo con criterios establecidos en Potsdam (Alemania).

Los días quietos se refieren a aquellos en los que el campo magnético de la Tierra es relativamente estable y no hay grandes fluctuaciones en su intensidad o dirección. Estos días suelen estar asociados con una actividad solar baja y un viento solar débil.

Por otro lado, los días perturbados geomagnéticos se refieren a aquellos en los que hay grandes fluctuaciones en el campo magnético de la Tierra. Estos días suelen estar asociados con la actividad solar alta y un viento solar fuerte que interactúa con la magnetosfera terrestre.

A través de los días quietos podemos identificar y estudiar la variación diurna y estacional del campo magnético que puede llevar al desarrollo de un modelo complementario al Campo Geomagnético Internacional de Referencia(IGRF). Dichos modelos podrían proporcionar información adicional sobre la variación del campo debido a periodos quietos (Sq, del inglés: Solar quiet) sobre América del Sur (Denardini et al., 2018b; Chen et al., 2020; Chen et al., 2021).

La curva del día quieto es una representación obtenida de la variación diaria de la componente horizontal promedio mensual, adquirida durante los cinco días más tranquilos del mes (Denardini et al., 2015). La cual utilizamos en secciones posteriores. A ese promedio se le denomina QDC (del inglés: Quiet Day Curve).

La lista de los cinco días quietos y perturbados es provista mes a mes por la IAGA (por su siglas en inglés International Association of Geomagnetism and Aeronomy), y la clasificación se hace en función del índice Kp conforme presentado en el sitio de GFZ (Potsdam, Alemania).

2.4. *Datos satelitales*

La Misión de Exploración de la Composición Avanzada (ACE, Advanced Composition Explorer), gestionada por la NASA, es fundamental para estudiar el clima espacial. Esta misión recopila datos sobre fenómenos como tormentas solares y erup-

ciones solares, que pueden afectar sistemas terrestres y espaciales, como las redes de energía eléctrica y los satélites.

Estos datos son cruciales para comprender y predecir el clima espacial y sus impactos en la Tierra y el espacio circundante. Desde que comenzaron a utilizarse en las últimas décadas del siglo XX, las mediciones de ACE han sido vitales para mejorar nuestra capacidad de prever y mitigar los efectos del clima espacial.

Está equipada con seis sensores de alta resolución entre ellos dos magnetómetros vectoriales fluxgate gemelos y tres instrumentos que capturan partículas de baja energía de origen solar, así como partículas galácticas de alta energía, con la capacidad de medir densidad de plasma y su velocidad

ACE orbita el punto lagrangiano L1. Un equilibrio gravitacional entre la Tierra y el Sol, ubicado a aproximadamente 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta y a 148,5 millones de kilómetros del Sol. Su posición en L1 le permite registrar y analizar el viento solar, el campo magnético interplanetario y las partículas de alta energía aceleradas por el Sol, así como de las partículas aceleradas en la heliosfera y en las regiones galácticas más distantes (<https://izw1.caltech.edu/ACE/>). En la figura 2.4 se muestra la composición de satélite ACE.

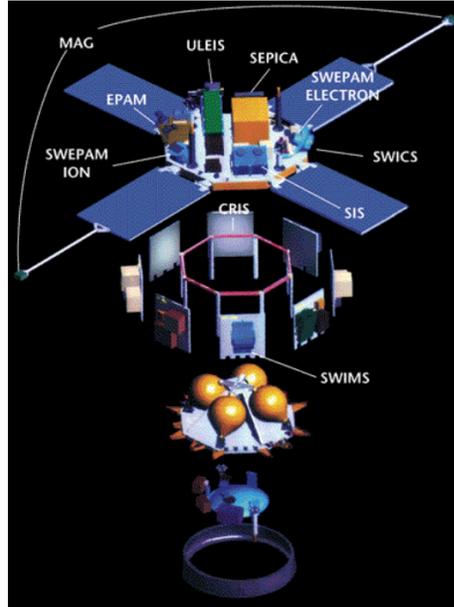


Figura 2.5: Componentes de ACE. (<https://izw1.caltech.edu/ACE/>)

Capítulo 3

Generalidades sobre los impulsos

Entre los eventos del clima espacial que impactan el sistema de la magnetosfera de la Tierra, se pueden mencionar las Eyección de Masa Coronal Interplanetaria (ICME del inglés: Interplanetary Coronal Mass Ejection) y el Flujo de alta velocidad (HSS, del inglés: high-speed stream) del viento solar. El primero está asociado con las eyecciones de masa coronal las cuales parten como respuesta de los procesos de reconexiones magnéticas de manchas solares, como se mencionó en la sección 1.2. El segundo está asociado con agujeros coronales en la corona solar donde pueden partir flujos de alta velocidad que se acumulan en el viento solar normal. Estos fenómenos solares son conocidos por tener características notables en las mediciones realizadas fuera de la magnetosfera, así como para producir claros y repentinos efectos sobre las mediciones magnéticas a nivel del suelo (Araki, 1994; Curto, 2007 ; Denardini et al. 2018b).

El concepto de los inicios repentinos se fue analizando en el tiempo con datos de magnetómetros terrestres y/o con magnetómetros en satélites. Según Curto et al.(2007), “el aumento repentino del campo magnético debería designarse con el término general "SC", que puede denominarse SSC si es seguido por una tormenta magnética o como SI si no lo es”. Los SC (SSC y SI) son causados por un aumento repentino de la presión dinámica del viento solar y las tormentas magnéticas después de los SC son causadas por la alta posibilidad de que el campo magnético inter-

planetario llegue al campo magnético terrestre con polaridad sur (Tsurutani et al., 1988).

Se han llevado a cabo varios estudios sobre la frecuencia de ocurrencia de las "Sudden Storm Commencements"(SSC) utilizando listas de eventos solares registrados en diferentes lugares de la tierra y durante diversos períodos de tiempo. Estos estudios han demostrado que, durante un período de once años que respalda la relación entre la actividad solar y las manchas solares, existe una clara tendencia tanto en la ocurrencia como en la intensidad de estas SSC.

Estudios posteriores, como los realizados por Ferraro y Unthank en 1951, que se enfocaron en la amplitud, observaron en varios registros que las amplitudes más altas se registraron cerca de las 00:00 hora local. Después de ese momento, se observa un descenso gradual hasta alcanzar el valor mínimo alrededor de las 07:00 hora local. Es importante destacar que las amplitudes alcanzadas durante las "Sudden Storm Commencements"(SSC) y las "Sudden Impulses"(SI) no muestran diferencias significativas.

Araki (1994) propuso interpretar SSC por superposición de funciones escalonadas como variación dominante en latitudes bajas y una estructura de dos pulsos en latitudes altas. El primero se denominó DL y el segundo DP. El campo DP se descompone en campo DP_{pi} y DP_{mi} impulso preliminar e impulso principal, entonces el campo de perturbación del SC será:

$$DSC = DL + DP = DL + (DP_{pi} + DP_{mi})$$

Se piensa que los cambios en el campo geomagnético medidos en superficie son causados por corrientes ionosféricas que se generan como resultado de campos eléctricos asociados con los SC (Schutz et al, 1974; Denardini et al, 2018b). Además, como consecuencia de los SC, se producen corrientes inducidas tanto en la superficie topográfica como a lo largo de grandes estructuras conductoras, por ejemplo, los tendidos

eléctricos y cañerías, pudiendo resultar afectadas en forma adversa la infraestructura y las actividades de nuestra sociedad moderna (Schrijver et al., 2015; Denardini et al, 2018b). La actividad geomagnética en la región de América y Atlántico Sur ha sido objeto de interés y estudio por parte de la comunidad científica debido a la presencia de la Anomalía magnética de América del Sur (SAMA), la cual fue conocida en los 70's y 80's como Anomalía Magnética del Atlántico Sur. Esta es una región en la que el campo magnético de la Tierra es más débil de lo normal que el resto del planeta. Esta zona es particularmente sensible a las perturbaciones del viento solar, lo que puede generar eventos como los impulsos repentinos geomagnéticos (IRGs), que son variaciones bruscas en el campo magnético terrestre. En la Figura 3.1 se puede ver a partir de la componente horizontal del campo magnético principal un gran decaimiento en la zona de Sudamérica, justamente asociado con la SAMA.

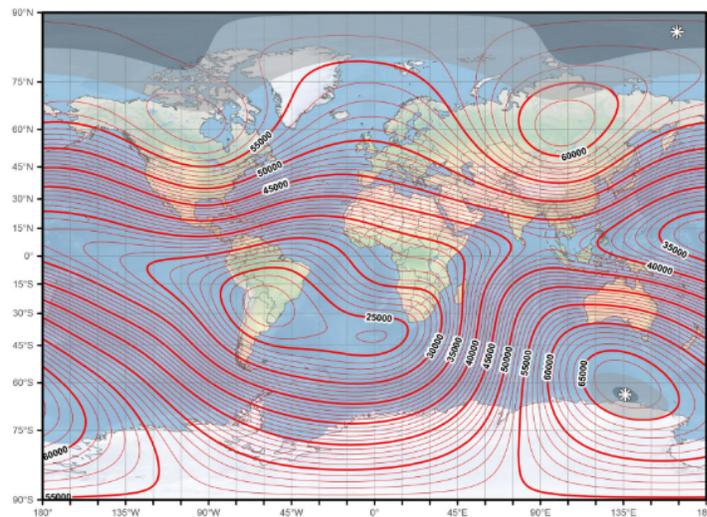


Figura 3.1: Componente horizontal de la intensidad de campo magnético principal. Con curvas de nivel cada 1000 nT. imagen tomada de Modelos de campo geomagnético en NGDC | NCEI (noaa.gov).

En la figura 3.2 podemos ver la distribución de fallos informáticos que se producen en la información satelital, claramente esta información está muy relacionada con la

baja intensidad del campo magnético en la región de Sudamérica.

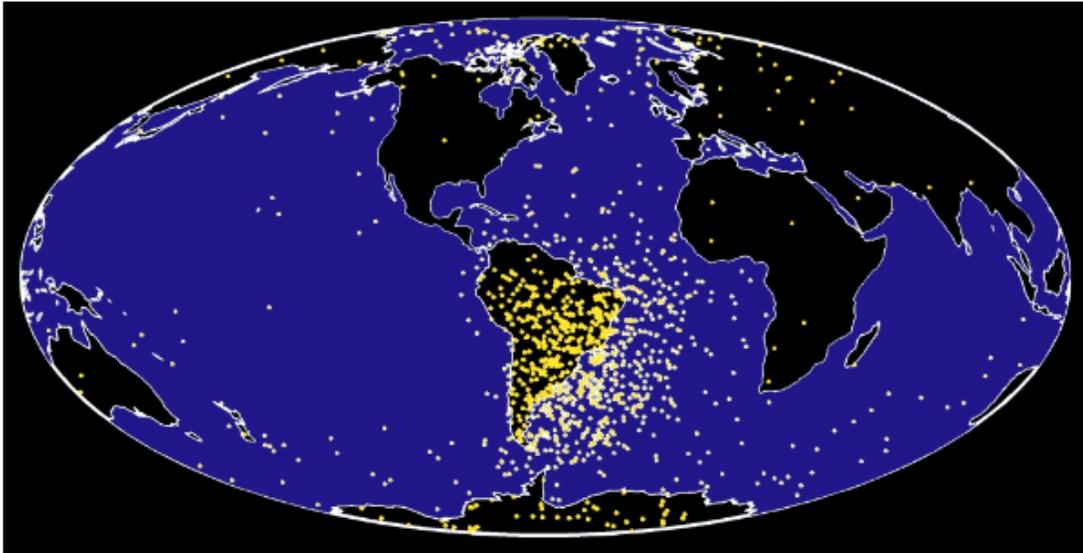


Figura 3.2: En la figura se puede observar la distribución de fallos informáticos detectados a bordo del satélite UoSat, dependiendo de su ubicación. Imagen tomada de radhome.gsfc.nasa.gov

Hasta 2017 no se habían llevado adelante mediciones y análisis sistematizados de la respuesta del sistema de corrientes ionosféricas en el sector sudamericano (Denardini et al., 2018a). Por lo tanto, en este estudio se analizan los datos geomagnéticos obtenidos de la red de estaciones de monitoreo Embrace en la región de la SAMA ya mencionada en el capítulo 2, con el objetivo de caracterizar los IRGs y su relación con la actividad solar, además de su correlación con la ubicación de la SAMA. Los resultados de este estudio contribuyen para una mejor comprensión de la dinámica del campo magnético en esta región y pueden tener implicaciones para la navegación y la comunicación en la zona.

Capítulo 4

Análisis cualitativo de los datos y resultados

4.1. Descripción básica de la red de magnetómetros Embrace

Como ya mencionamos en el capítulo 2, este trabajo se basa en datos de la red de magnetómetros de Embrace MagNet la cual se creó para cubrir la mayor parte del sector longitudinal de América del Sur y poder tener disponibles mediciones magnéticas en tiempo real. Se localizaron los magnetómetros que constituyen la red en base a la disponibilidad de Internet veloz, el suministro de energía confiable y el fácil acceso. La tabla 4.1 muestra la localización de las estaciones geomagnéticas de EMBRACE con la ciudad, código, latitud, longitud y altura de cada estación. Luego la figura 4.1 muestra la distribución geográfica de las estaciones sobre Sudamérica

Tabla 4.1: Localización de las estaciones geomagnéticas de EMBRACE)

Ciudad/estado/provincia	código	Latitud	Longitud	Altura (m)
Boa Vista, RR	BOA	02°02'33"N	60°33'W	+09.4
Manaus, AM	MAN	02°18'11"S	59°11'W	+04.4
Porto Velho, RO	PVE	08°49'23"S	63°23'W	08.4
Belém, PA	BLM	01°28'40"S	48°40'W	00.4
São Luís, MA	SLZ	02°39'35"S	44°35'W	03.6
Alta Floresta, MT	ALF	09°13'15"S	56°15'W	03.7
Araguatins, TO	ARA	01°01'02"S	48°02'W	05.6
Eusébio, CE	EUS	03°48'28"S	38°28'W	08.2
Palmas, TO	PAL	10°50'41"S	48°41'W	08.3
Cuiabá, MT	CBA	15°17'10"S	56°10'W	08.5
São João do Cariri, PB	CRR	07°21'21"S	36°21'W	–
Jataí, GO	JAT	17°55'05"S	51°05'W	12.3
Campo Grande, MS	CGR	20°24'04"S	54°04'W	13.7
Tucumán, TU	TCM	26°20'40"S	65°40'W	15.8
Medianeira, PR	MED	25°43'38"S	54°38'W	–
Cachoeira Paulista, SP	CXP	22°07'52"S	45°52'W	18.9
São José dos Campos, SP	SJC	23°31'49"S	45°49'W	19.1
Vassouras, RJ	VSS	22°07'08"S	43°08'W	19.7
São Martinho da Serra, RS	SMS	29°37'22"S	53°22'W	21.6
Chillán, CO	CHI	36°15'57"S	71°57'W	–
Aiguá, MA	AIG	34°16'38"S	54°38'W	–
Bahía Blanca, BA	BBA	38°00'37"S	62°37'W	–
Rio Grande, TF	RGA	53°09'42"S	67°42'W	39.9
Estação Cmte. Ferraz, AC	ECF	62°06'12"S	58°12'W	58.4

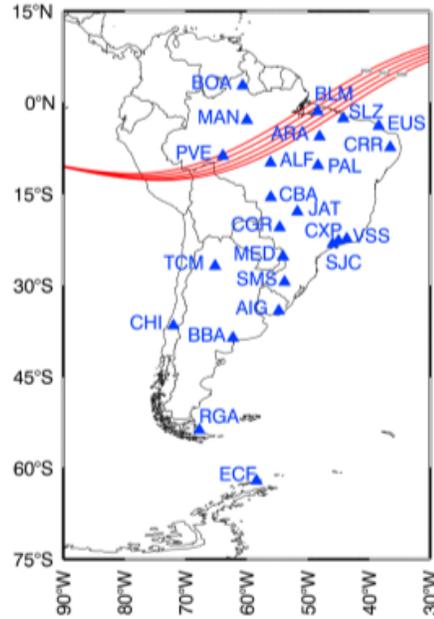


Figura 4.1: Distribución geográfica de las estaciones de Embrace.

4.2. *Recopilación de los datos*

En este trabajo se analizaron datos temporales de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) de la red de magnetómetros Embrace en tiempos definidos para realizar un estudio y caracterización de IRGs. Además se tomaron los datos del satélite ACE de la componente del campo magnético, la densidad de partículas y la velocidad de partículas, según Denardini(2018b) a partir de estas últimas dos propiedades se puede calcular la presión dinámica del viento solar a través de la siguiente ecuación:

$$P_{sw} = 1,6726 \times 10^{-6} * n_e * V_{sw}^2 \quad (4.1)$$

dónde:

P_{sw} : Presión dinámica del viento solar (en nanopascuales, nPa).

n_e : Densidad del plasma del viento solar (en partículas por centímetro cúbico, cm^{-3}).

V_{sw} : Velocidad del viento solar (en kilómetros por segundo, km/s).

Estas propiedades del viento solar se obtuvieron para poder analizar los tiempos de retardo entre los eventos registrados en el satélite ACE con los mismos eventos registrados en los magnetómetros en superficie (Denardini et al., 2018b).

El trabajo se dividió en dos partes, la primera seleccionando un evento SI y un evento SC bien definidos y estudiar sus características principales. Posteriormente, nos enfocamos en un evento más complejo para poder compararlo con los anteriores y, así, obtener conclusiones relevantes. La idea fue observar los eventos de ejemplo y contrastarlos con el evento complejo para identificar posibles patrones y características que nos permitan comprender mejor el comportamiento de los fenómenos en estudio.

Por lo tanto, para la primera parte del análisis se recopilaron en simultaneo, los datos del satélite ACE, a través de la página:

"<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html> los datos de la red Embrace a partir de la siguiente página:

"<https://embracedata.inpe.br>". Se decidió estudiar dos SCs, el primero se clasificó como SI ocurrido el 3 de julio del año 2017 y el segundo se clasificó como SCC ocurrida el 16 de julio del mismo año. Las estaciones marcadas para analizar estos dos eventos fueron Vassouras (VSS); Cachoeira paulista (CXP); Araguatins(ARA); Cuiabá(CBA); Alta Floresta (ALF). Como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.2: Distribución geográfica de las estaciones de Embrace utilizadas para nuestro estudio.

Por otra parte recopilamos los días quietos para el mes de julio a partir de la página: Internatinal Q-Days and D-Days (kyoto-u.ac.jp). Estos se definen como los días de actividad geomagnética más tranquilos del mes. Luego, para cada estación, se realiza el cálculo de su QDC promediando los 5 días más estables del mes con la siguiente fórmula, de acuerdo con Chen et al. (2020):

$$H_{QDC}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 H_{Qdi}(t), \quad (4.2)$$

donde H_{QDC} es la media de la variación calma del mes de la componente horizontal del campo geomagnético o QDC, H_{Qdi} es la variación diaria de la componente horizontal del día calmo del i -ésimo día calmo del mes, t es el tiempo (en tiempo universal) y N es el número de días utilizados en el cálculo. En general, el número de días utilizados para calcular la QDC es $N = 5$, pero puede ser menor, depen-

diendo de la disponibilidad de datos. Luego, se calcula la perturbación del campo geomagnético de la estación magnética con base en ecuación:

$$\Delta H(t) = H(t) - H_{QDC} \quad (4.3)$$

donde ΔH es la perturbación de la componente horizontal del campo geomagnético, H es la variación diaria de la componente horizontal del campo geomagnético y H_{QDC} es el QDC de la componente horizontal del campo geomagnético.

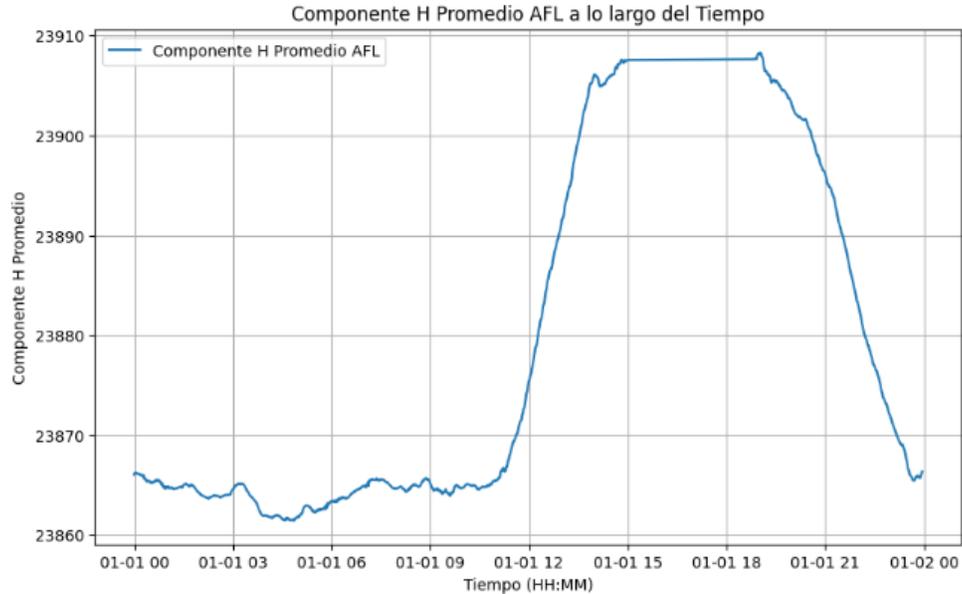


Figura 4.3: QDC para la estación AFL Julio 2017.

Este valor se utiliza para sustraerlo de la componente H, lo que permite obtener la componente de campo magnético sin la variación diaria. De esta manera, se obtiene un residuo que es causado principalmente por eventos externos. Para así poder ver con mejor claridad los eventos SC y SI estudiados. Para el estudio graficamos

el residuo de la componente H en función del tiempo superpuestas en cada estación para los tiempos de cada evento por separado, y lo comparamos con los datos provenientes del satélite ACE. Luego para la segunda parte del análisis realizamos el mismo procesamiento de datos pero tomamos un evento complejo ocurrido desde el 6 de septiembre al 9 de septiembre del año 2017 y subdividimos a partir de una comparación con nuestros datos, los datos del satélite ACE y el análisis del trabajo de Werner(2019). El cual analizó este evento a partir de datos satelitales ubicados en L1. Según Werner, el evento complejo se puede subdividir en cuatro estadios, los cuales se dan a partir de dos ondas de choques y dos CMEs que acompañaban estas, como se muestra la Figura 4.4.

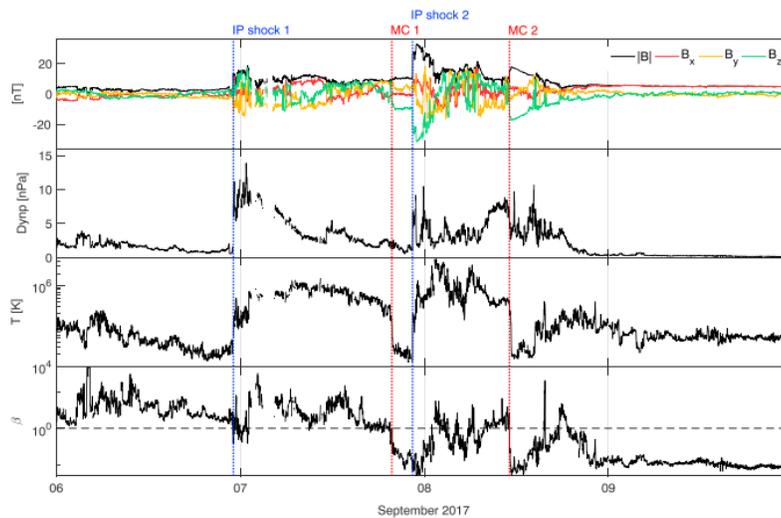


Figura 4.4: Subdivisión de los cuatro eventos ocurridos en los primeros días del mes de septiembre del año 2017 a partir de datos satelitales de L1, viendo en azul las ondas de choque y en rojo las CMEs. Fuente: Werner 2019

4.3. Descripción de los distintos fenómenos en las distintas estaciones

4.3.1. Evento del 3 de Julio de 2017

El primer evento se trata de una CME que llegó a comprimir la magnetosfera, esa compresión se detectó en los magnetómetros de la red a la hora 03:15 UTC,

apreciando un salto importante en la componente H del campo magnético medido en cada estación. Luego de este salto, se observa un decaimiento en la componente horizontal de aproximadamente 50 nT hasta. Lo cual nos indica que estamos en presencia de un evento tipo SCC ya que las fases nombradas posterior al comienzo repentino son las características de una tormenta magnética. Además se puede notar el retardo temporal en el evento entre los datos satelitales y los datos medidos en superficie, marcando con línea punteada gris la llegada del evento al satélite y con línea punteada negra la llegada del evento a los magnetómetros como se indica en la figura 4.5.

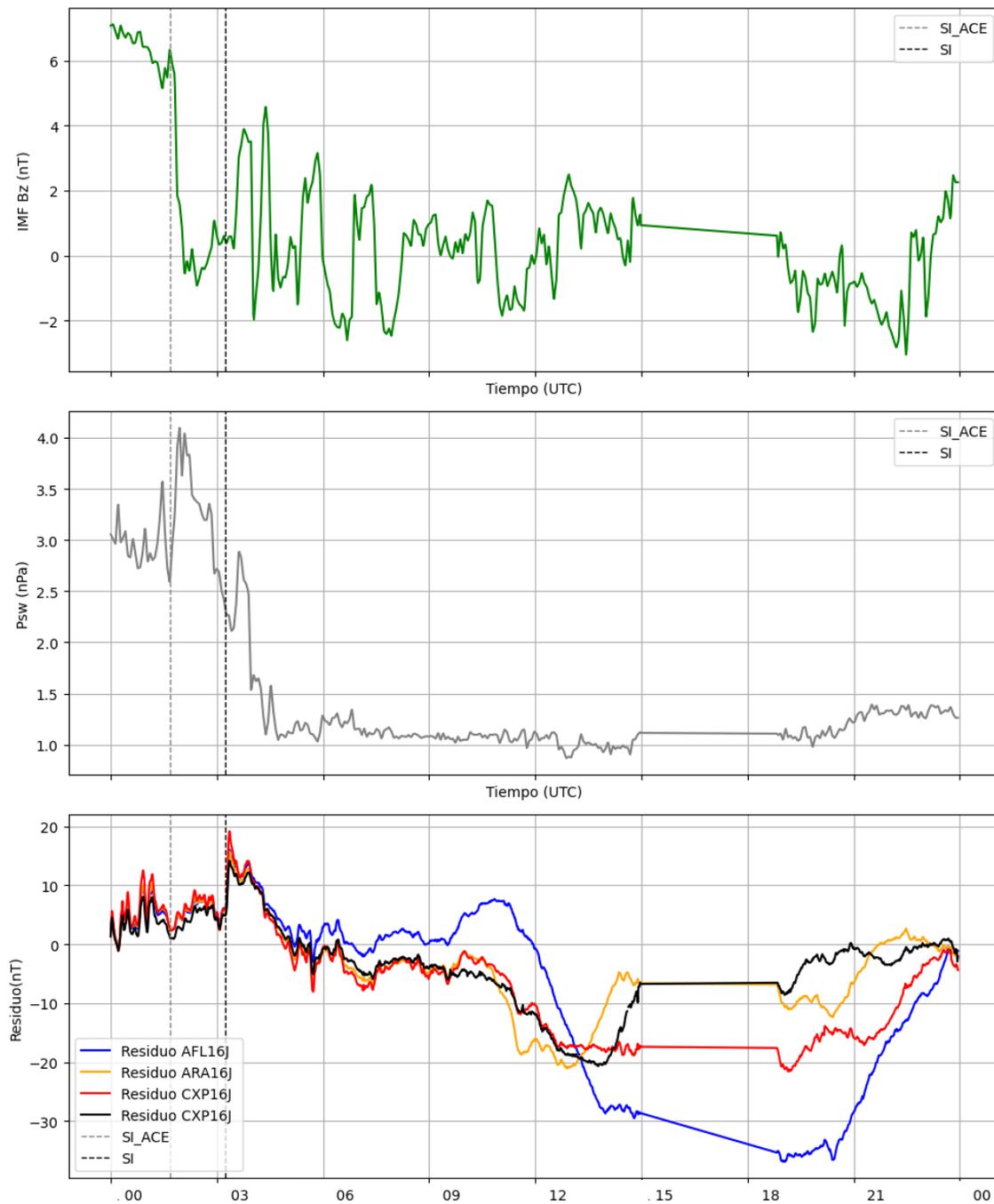


Figura 4.5: a) Componente del campo magnético interplanetario (IMF Bz). b) Presión dinámica(Psw) en dato satelital. c) Residuo de la componente H del campo magnético terrestre para las estaciones de la red Embrace analizadas para el día 3 de julio de 2017 escalado a la estación AFL.

Tabla 4.2: Detalles del Evento del 3 de Julio

	AFL	ARA	CBA	CXP	VSS
Comienzo del evento(UTC)	03:15	03:15	03:15	03:15	03:15
Final del evento(UTC)	03:21	03:21	03:21	03:21	03:21
Tiempo total del evento (min)	00:06	00:06	00:06	00:06	00:06
Amplitud pico a pico (nT)	9.99	10.28	13.20	8.82	9.21

4.3.2. Evento del 16 de Julio de 2017

El segundo evento ocurrido el 16 de julio del año 2017 trata de una CME la cual comprimió la magnetosfera, y el efecto de la compresión se detectó en los magnetómetros de la red a la hora 05:59 UTC, apreciando un salto importante en la componente H del campo magnético medido en cada estación. Luego de este salto, se observa un decaimiento en la componente horizontal de aproximadamente 150 nT hasta las 16:00 UTC donde comienza su fase de recuperación. Lo cual nos indica que estamos en presencia de un evento tipo SCC ya que las fases nombradas posterior al comienzo repentino son las características de una tormenta magnética, pudiendo observarse la fase principal además de su fase de recuperación. Este evento además se detecto anteriormente en los datos satelitales pudiendo comparar el retardo temporal de estos, marcando con línea punteada roja la llegada del evento al satélite y con línea punteada gris la llegada del evento a los magnetómetros como se indica en la figura 4.6 .

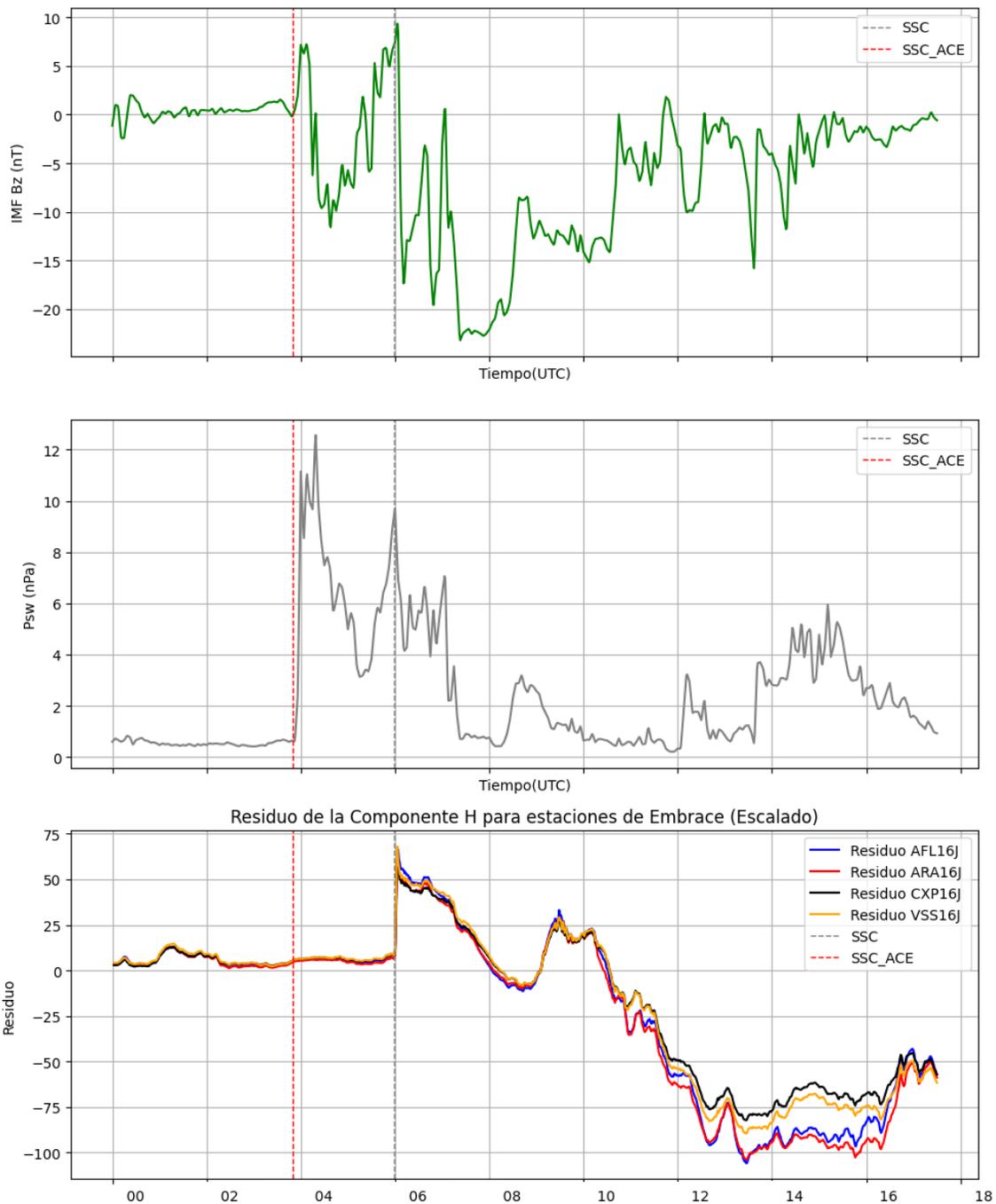


Figura 4.6: a) Componente del campo magnético interplanetario (IMF Bz). b) Presión dinámica(Psw) en dato satelital. c) Residuo de la componente H del campo magnético terrestre para las estaciones de la red Embrace analizadas para el día 16 de julio de 2017 escalado a la estación AFL..

	AFL	ARA	CXP	VSS
Comienzo del Evento	05:59	05:59	05:59	05:59
Final del Evento	06:04	06:03	06:03	06:03
Tiempo Total del Evento(min)	00:05	00:04	00:04	00:04
Amplitud Pico a Pico (nT)	51.75	56.31	56.54	59.39

Tabla 4.3: Detalles del Evento del 16 de Julio

Rasgos principales de ambos eventos:

En principio se puede notar que la componente residual del campo geomagnético es estable y muy similar entre cada estación antes de cada evento. Luego de los eventos, se puede observar una diferencia generada por las perturbaciones en el campo debido a cada evento. Cuando se estabilizan las estaciones, vuelven a tener residuos similares. Con respecto a los datos satelitales el evento del 3 de julio al estar perturbado antes de que ocurra el evento no permitio reconocer con claridad el comienzo de este en los datos satelitales, distinto ocurre en el evento del 16 de julio donde hay un claro comienzo repentino tanto en datos satelitales como en los magnetómetros terrestres.

4.3.3. Evento complejo del 6 al 9 de septiembre de 2017

A partir de los rasgos característicos de los eventos mencionados se realizó un estudio para un evento complejo, tratando de adjudicar características que acompañen los rasgos de los SI o SSC mencionados. Para esto, decidimos separar el evento en estadios como lo propuso Werner (2019) y analizar estos por separado.

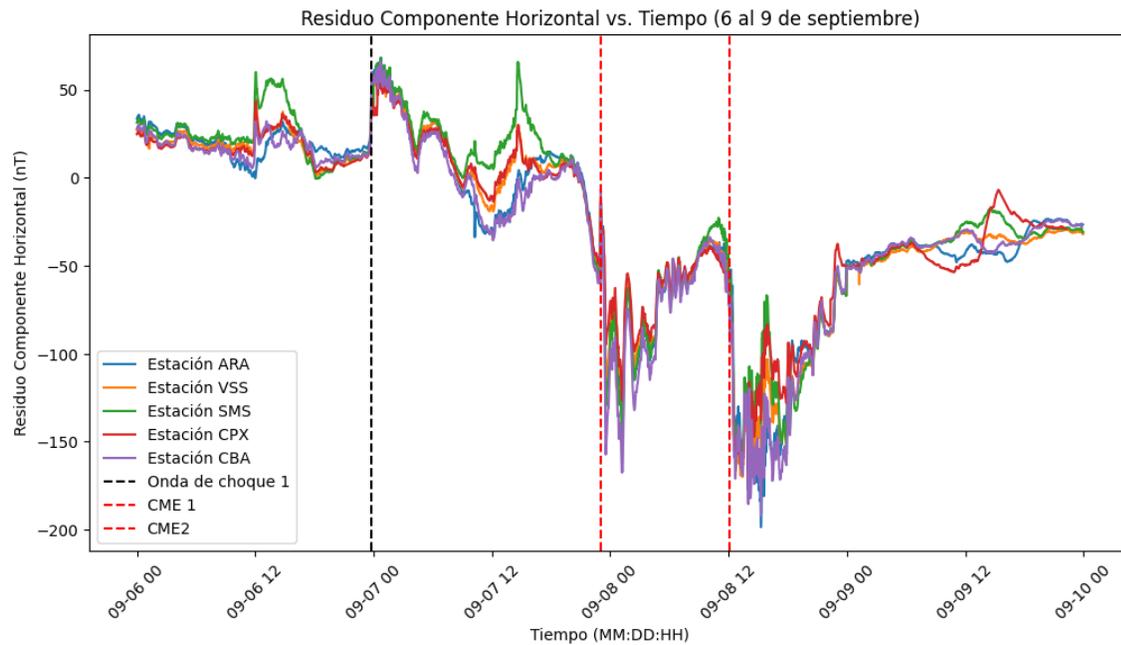


Figura 4.7: Residuos de la componente horizontal del campo magnetico entre el día 6 y el día 9 de septiembre de 2017.

Onda de choque 1:

Comenzando con el primer evento encontrado para las fechas de estudio, se trata de una onda de choque generada por la alta velocidad de una CME la cual se detectó a partir de los registros satelitales para la hora 23:05 UTC del día 6 de septiembre de 2017. A partir de esta hora y la distancia entre L1 (ubicación del satélite) y la superficie terrestre, estimamos la hora de llegada de la onda de choque, la cual registramos en nuestros magnetómetros para la hora 23:44 UTC del día 6 de septiembre.

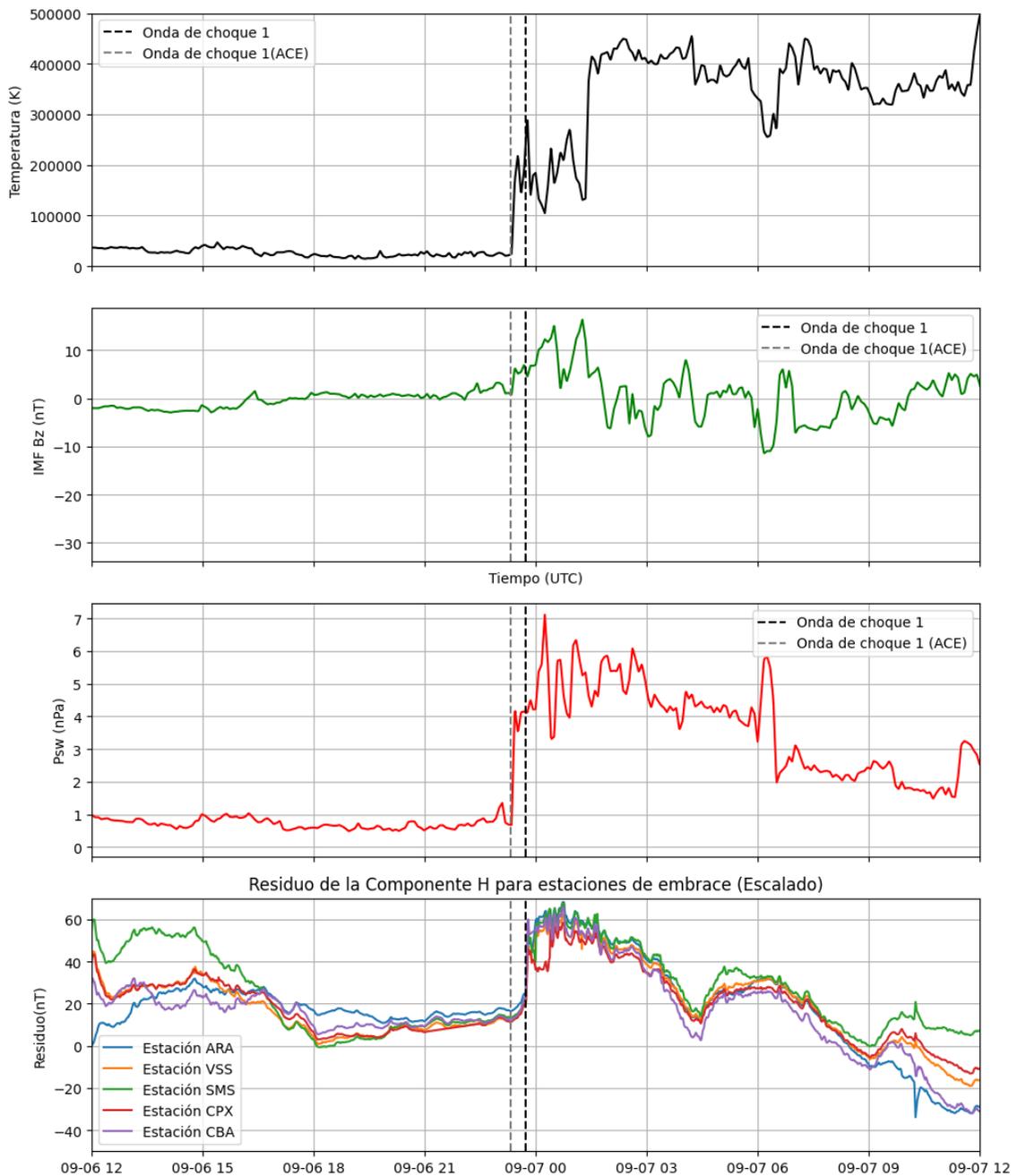


Figura 4.8: En la primera imagen vemos la onda de choque en línea punteada gris en la temperatura medida en ACE, en la segunda muestra la misma onda de choque en gris en la componente del campo magnético interplanetario (IMF Bz) en el ACE, la tercera imagen muestra la misma onda de choque en gris en la componente de la presión dinámica (Psw) del viento solar en ACE y la cuarta imagen muestra en línea punteada negra la llegada de la primera onda de choque a las estaciones de Embrace

Onda de choque 1	ARA	VSS	SMS	CXP	CBA
Comienzo del Evento	23:44	23:44	23:44	23:44	23:44
Final del Evento	23:48	23:48	23:48	23:48	23:48
Tiempo Total dep evento(min)	00:04	00:04	00:04	00:04	00:04
Amplitud Pico a Pico (nT)	26.29	26.97	30.31	26.9	36.46

Tabla 4.4: Detalles del Evento Onda de Choque 1 para diferentes estaciones

Eyección de masa coronal 1:

Luego del paso de la primera onda de choque llegó la CME 1, la cual se registró en todas las estaciones para las 23:00 hs UTC del día 7 de septiembre de 2017. Si comparamos con el evento del SSC del 16 de julio tiene características muy similares como la variación en la amplitud de la componente H del campo magnético con el tiempo muy pronunciada, además de que es acompañada de una tormenta geomagnética con un decaimiento de la componente H mayor a 200 nT en valor absoluto.

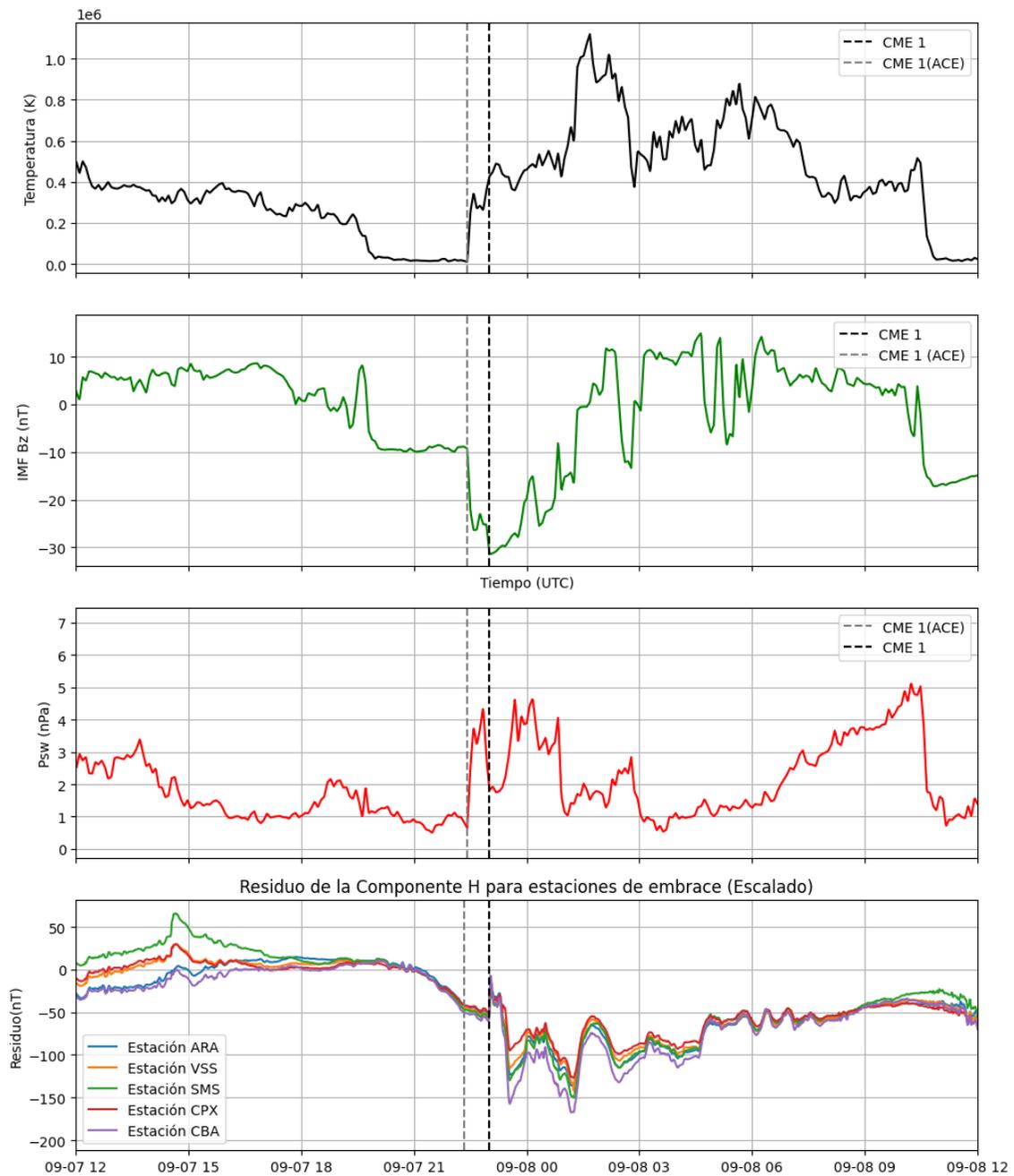


Figura 4.9: En la primer imagen se ve la primer CME en línea punteada gris en la temperatura medida en ACE, en la segunda muestra la CME en gris en la componente del campo magnético interplanetario (IMF Bz) en el ACE, la tercera imagen muestra la misma CME en gris en la componente de la presión dinámica (Psw) del viento solar en ACE y la cuarta imagen muestra en línea punteada negra la llegada de la primer CME a las estaciones de Embrace

CME 1	ARA	VSS	SMS	CXP	CBA
Comienzo del Evento	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00
Final del Evento	23:03	23:03	23:03	23:03	23:03
Tiempo Total del evento (min)	00:03	00:03	00:03	00:03	00:03
Amplitud Pico a Pico (nT)	38.03	37.76	37.03	35	65.64

Tabla 4.5: Detalles del Evento CME 1 para diferentes estaciones

Onda de choque 2:

La segunda onda de choque se registró en SOHO/LASCO según Werner para las 22:27 hs UTC. Realizamos un análisis a partir de la velocidad de la segunda CME y la distancia entre la ubicación del satélite (L1) y la superficie de la tierra. Lo cual nos indico que la segunda onda de choque debería llegar a los magnetómetros alrededor de las 23:15 hs UTC del día 7 de septiembre. Mirando los registros notamos que la componente H residual del campo magnético medidas en los magnetometros estaban perturbadas debido a la eyección de masa coronal anteriormente registrada lo cual no permitio observar la llegada de la segunda onda de choque. I

Eyección de masa coronal 2:

En este caso ocurre algo distinto a lo analizado anteriormente, ya que el impulso preliminar generado por la CME 2 se registró en todas las estaciones para las 12:09 hs UTC del 8 de septiembre con las estaciones perturbadas, esto se debe a que las estaciones no se recuperaron de la primera tormenta.

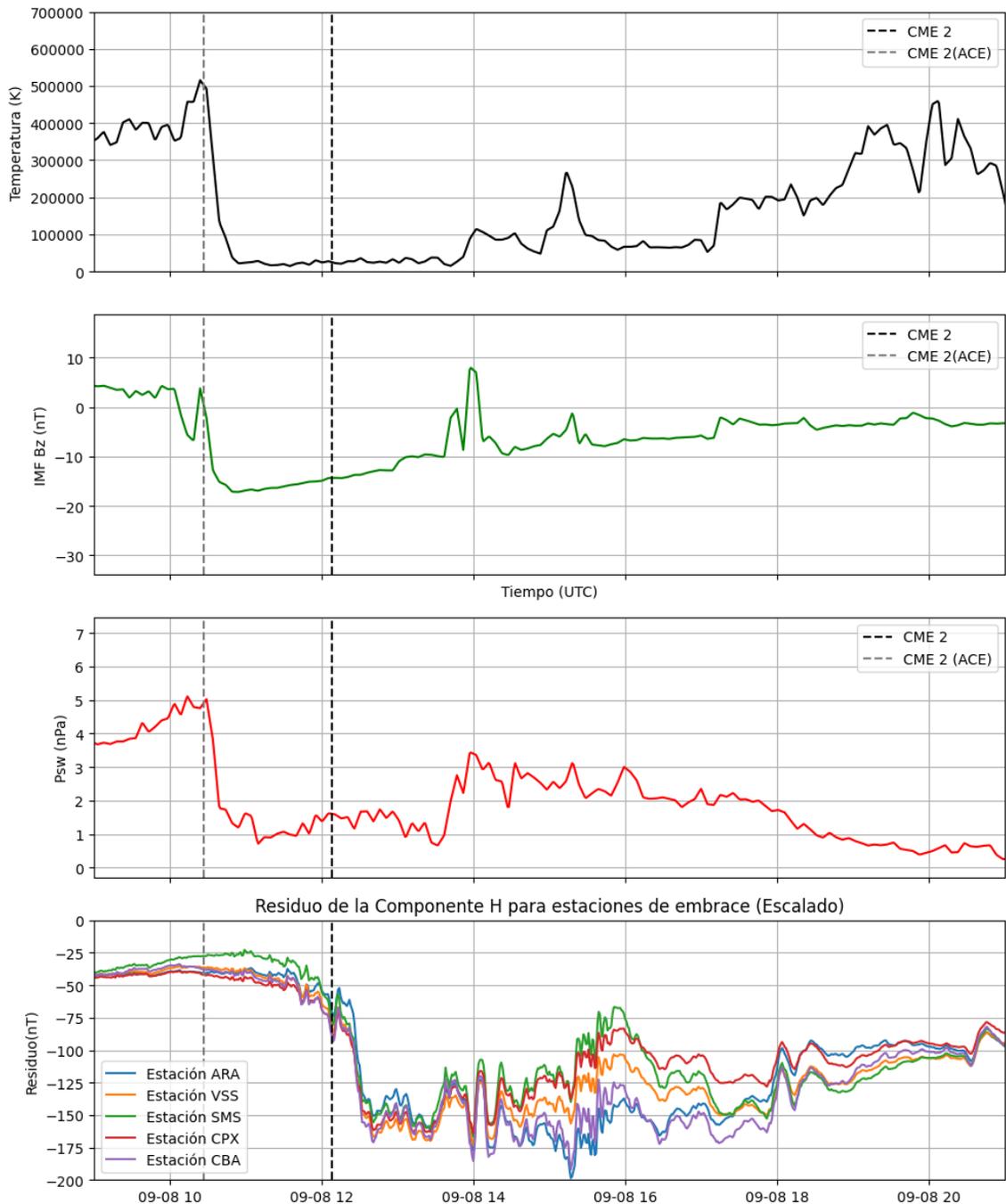


Figura 4.10: En la primer imagen se ve la segunda CME en línea punteada gris en la temperatura medida en ACE, en la segunda muestra la CME en gris en la componente del campo magnético interplanetario (IMF Bz) en el ACE, la tercera imagen muestra la misma CME en gris en la componente de la presión dinámica (Psw) del viento solar en ACE y la cuarta imagen muestra en línea punteada negra la llegada de la segunda CME a las estaciones de Embrace

Tabla 4.6: Detalles del evento CME 2 para las diferentes estaciones

	ARA	VSS	SMS	CXP	CBA
Comienzo del evento	12:09	12:09	12:09	12:09	12:09
Final del evento	12:13	12:13	12:13	12:13	12:13
Tiempo total del evento(min)	00:04	00:04	00:04	00:04	00:04
Amplitud pico a pico (nT)	20.03	19.01	23.54	18.82	25.97

4.3.4. *Comparación para los eventos de julio entre datos de Embrace y datos del ISGI*

En esta sección analizaremos nuestros datos comparando con los datos de las estaciones del ISGI (Servicio internacional de índices Geomagnéticos). Este servicio se encarga de la difusión de todos los Boletines de la IAGA (Asociación internacional de Geomagnetismo y Aeronomía) relativos a los índices geomagnéticos.

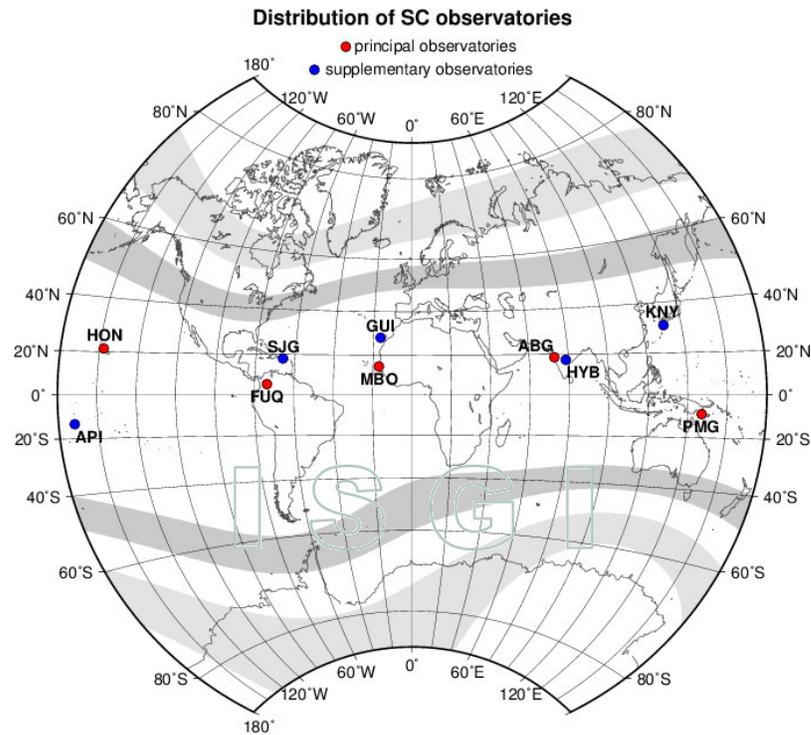


Figura 4.11: En la figura se muestra la ubicación de las estaciones del ISGI, la cual fue extraída de <https://isgi.unistra.fr/index.php>.

Para nuestro análisis utilizamos los datos de las estaciones: HON(Honolulu, Estados Unidos); SJI(San Juan, Estados Unidos); MBO(Mbour, Senegal); ABG(Alibag, India); KNY(Kanoya, Japon). La clasificación de los eventos se realizaron según: duración y amplitud, desde la primer perturbación hasta su pico máximo. Estos datos fueron extraídos del boletín de la IAGA para el mes de septiembre. Gracias a la comparación entre los eventos de julio para la red de Embrace y del ISGI, se detectaron tiempos de comienzo casi simultáneos como nos dice la teoría, y un rango de amplitudes en las medias de los registros de Abrace mas altos que las medias de los de registros de ISGI. Esto puede atribuirse a que las estaciones de Embrace se encuentran sobre la región del AMAS

Tabla 4.7: Detalles de los eventos para las estaciones del ISGI

FECHA	HORA	TIPO	ESTACIÓN	DURACIÓN(minutos)	AMPLITUD(nT)
2017-07-03	03:16	SSC	HON SJG MBO ABG KNY	4 5 5 5 4	7.7 8.5 10.2 13.1 11.9
2017-07-16	05:59	SSC	HON SJG MBO ABG KNY	5 4 4 5 5	45.9 40.7 46.7 64.2 58
2017-09-06	23:44	SSC	HON SJG MBO ABG KNY	5 4 4 3 3	21 19.3 28.6 18.8 13.6
2017-09-07	23:00	SSC	HON SJG MBO ABG KNY	2 3 3 3 2	27 32.9 59.9 35 4.8

Tabla 4.8: Detalles de los eventos para las estaciones de Embrace

FECHA	HORA	TIPO	ESTACIÓN	DURACIÓN(minutos)	AMPLITUD(nT)
2017-07-03	03:16	SSC	AFL ARA CBA CXP VSS	6 6 6 6 6	9.99 10.28 13.20 8.82 9.21
2017-07-16	05:59	SSC	AFL ARA CXP VSS —	5 4 4 4 -	51.75 56.31 56.54 59.39 —
2017-09-06	23:44	SSC	CBA ARA CXP VSS SMS	4 4 4 4 4	36.46 26.29 26.9 26.97 30.31
2017-09-07	23:00	SSC	CBA ARA CXP VSS SMS	3 3 3 3 3	65.64 38.03 35 37.76 37.03

4.3.5. Retardos temporales entre los eventos medidos en satelite y Embrace

Calculamos el tiempo de propagación desde la llegada de la ICME fuera de la magnetósfera, hasta entrar a la parte interna del sistema terrestre donde interactua con el campo magnético de la tierra. Este retardo nos va a dar una idea del tiempo de propagación de las ondas de presión que ocurren en la parte externa de la magnetósfera y llegan a los magnetómetros en la superficie terrestre. Estadísticamente los eventos suelen tener una diferencia del orden de decenas de minutos,

Tabla 4.9: Diferencias para los eventos de julio y septiembre

FECHA	TIPO	Hora(ACE)	HORA(Embrace)	Diferencia(Minutos)
2017-07-03	SSC	01:40	03:16	01:36
2017-07-16	SSC	03:50	05:59	02:09
2017-09-06	Onda de choque	23:21	23:44	00:22
2017-09-07	CME 1	22:25	23:00	00:35
2017-09-08	CME 2	10:27	12:08	01:41

Capítulo 5

Conclusiones

Se realizó la recopilación y el procesamiento de los datos registrados por las estaciones geomagnéticas Vassouras (VSS); Cachoeira Paulista (CXP); Araguatins (ARA); Cuiabá (CBA); Alta Floresta (ALF). En principio se registraron para julio de 2017 dos eventos, el primero fue un SSC que ocurrió el 3 de julio, asociado a un agujero coronal y el segundo fue una SSC que ocurrió el 16 de julio asociado a una CME. Estos eventos fueron usados como factores de comparación, para el estudio de un evento geomagnético complejo ocurrido el mismo año, en el mes de septiembre, asociados a un conjunto de CMEs.

Se logró identificar para los datos de septiembre tres eventos significativos, uno de ellos asociado a una onda de choque y los otros dos asociados a CMEs

A través de un análisis morfológico de cada evento, registramos la duración en tiempo de cada evento, con sus variaciones en amplitud, pudiendo así atribuir rasgos similares a los eventos ocurridos en julio de 2017 ya mencionados.

Podemos decir que las ondas de choque tienen rasgos similares a los SI en tiempo y amplitud y que las llegadas de las CME tienen rasgos similares a los SSC en tiempo y amplitud.

Otro aspecto que se pudo detectar en todos los eventos es que antes de que ocurran, las estaciones median la componente H del campo geomagnético con un variación de su residuo muy similar entre sí, pero luego de estos, las estaciones se

perturban generando grandes diferencias entre ellas.

Por otro lado gracias a la comparación entre los eventos de julio para la red de Embrace y del ISGI, se detectaron tiempos de comienzo de eventos iguales, con duración y amplitudes muy similares.

Los registros de Kanoya y Alibag tuvieron amplitudes mayores a las de el resto de la red para el evento del 16 de julio, esto puede estar relacionado con que ocurrieron cercanos al medio día (hora local) y son zonas costeras.

Para los eventos del 6 y 7 de septiembre en la estación MBO se registraron amplitudes mayores al resto de las estaciones de ISGI, esto puede estar relacionado con la hora local del evento ya que ocurrieron cercano a las 23hs y estadísticamente suelen tener mayor amplitud cerca de la media noche.

Por ultimo se calculó el tiempo de propagación para cada evento desde la llegada de la ICME fuera de la magnetósfera(ACE), hasta la superfice terrestre (magnetómetros de Embrace) y obtuvimos tiempos de propogación de las perturbaciones que no se reflejan con la estadistica de estos eventos y pueden estar asociados a errores en los relojes.

Bibliografía

Araki, T. (1994). *A physical model of the geomagnetic sudden commencement*. In M. J. Engebretson, K. Takahashi, & M. Scholer (Eds.), *Solar wind sources of magnetospheric ultra-low-frequency waves* (pp. 183–200). Washington, DC: American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM081p0183>

Banks, P. M., & Kockarts, G. (1973). *Aeronomy*. Academic Press, New York.

Chen, S. S., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Chagas, R. A. J., Moro, J., & Picanço, G. A. S. (2020). Development of an empirical model for estimating the quiet day curve (QDC) over the Brazilian sector. *Radio Science*, 55(12), e2020RS007105. <https://doi.org/10.1029/2020RS007105>

Chen, S. S., Denardini, C. M., Resende, L. C. A., Chagas, R. A. J., Moro, J., Silva, R. P., Carmo, C. S., & Picanço, G. A. S. (2021). Evaluation of the Solar Quiet Reference Field (SQRF) model for space weather applications in the South America Magnetic Anomaly. *Earth, Planets and Space*, 73(61). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01382-8>

Curto, J. J., Araki, T., & Alberca, L. F. (2007). Evolution of the concept of sudden storm commencements and their operative identification. *Earth, Planets and Space*, 59(11), 1–12. <https://doi.org/10.1186/BF03352059>

Denardini, C. M., Rockenbach, M., Gende, M. A., Chen, S. S., Fagundes, P. R., Schuch, N. J., et al. (2015). The initial steps for developing the South American K index from the Embrace Magnetometer Network. *Brazilian Journal of Geophysics*, 33(1), 79–88.

Denardini, C. M., Chen, S. S., Resende, L. C. A., Moro, J., Bilibio, A. V., Fagundes, P. R., et al. (2018). The embrace magnetometer network for South America: First scientific results. *Radio Science*, 53, 379–393. <https://doi.org/10.1002/2018RS006540>

Denardini, C. M., Chen, S. S., Resende, L. C. A., Moro, J., Bilibio, A. V., Fagundes, P. R., et al. (2018). The Embrace Magnetometer Network for South America: Network description and its qualification. *Radio Science*, 53, 288–302. <https://doi.org/10.1002/2017RS006477>

Ferraro, V. C. A., Parkinson, W. C., & Unthank, H. W. (1951). Sudden commencements and sudden impulses in geomagnetism. *Journal of Geophysical Research*, 56, 177–195.

Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.

Prölss, G. W. (2004). *Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction*. Springer.

Ripka, P. (1992). Review of fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A*, 33(3), 129–141. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80159-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80159-Z)

Scherer, K., Fichtner, H., Heber, B., Mall, U., et al. (2004). Space weather: The physics behind a slogan, 23-44.

Schrijver, C. J., Kauristie, K., Aylward, A. D., Denardini, C. M., Gibson, S. E., Glover, A., et al. (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745–2807. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>

Schutz, S., Adams, G. J., & Mozer, F. S. (1974). Electric and magnetic fields measured during a sudden impulse. *Journal of Geophysical Research*, 79(13), 2002–2004. <https://doi.org/10.1029/JA079i013p02002>

Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Tang, S., Akasofu, I., & Smith, E. J. (1988). Origin of interplanetary southward magnetic field responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978–1979). *Journal of Geophysical Research*, 93, 8519–8531.

Werner, A. L. E., Yordanova, E., Dimmock, A. P., & Temmer, M. (2019). Modeling the multiple CME interaction event on 6–9 September 2017 with WSA-ENLIL+Cone. *Space Weather*, 17. <https://doi.org/10.1029/2018SW001993>