

Universidad Nacional Autónoma de Honduras
Facultad de Ciencias Espaciales
Departamento de Astronomía y Astrofísica
Asignatura AAF-551 Seminario de Investigación



***Cálculo de componentes locales del
campo magnético terrestre en
Honduras, empleando el modelo de
Tsyganenko y Sitnov 2005***

Propuesta de tesis elaborada por:
Allan Calderini, Carmen Díaz, Daysi Gómez,
Misael Valladares, Oscar García

Tutora: Ph.D. Yvelice Castillo

Tegucigalpa, M.D.C., 18 de agosto de 2021

A. Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a John Riddick, ideólogo del proyecto INDIGO, a Christopher Turbitt, Gerente de los Observatorios Magnéticos del Servicio Geológico Británico (BGS) y a Natalia Gómez-Pérez (BGS), por brindarnos su apoyo para la instalación y operación del Primer Observatorio Magnético de Honduras; a Martha Talavera, Jefa del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Facultad de Ciencias Espaciales de la UNAH; a Vilma Lorena Ochoa, Decana de la Facultad de Ciencias Espaciales, por su incondicional apoyo; a Manuel Rodríguez, Lidia Torres Bernhard y Elizabeth Espinoza, del Departamento de Física de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la UNAH; a Javier Mejuto, del Departamento de Arqueoastronomía y Astronomía Cultural de la Facultad de Ciencias Espaciales de la UNAH, por su valiosa participación como colaboradores de este proyecto; a Iván Monge, por su colaboración con los datos del Observatorio de Chiripa, Costa Rica.

B. Resumen

La Universidad Nacional Autónoma de Honduras y el Servicio Geológico Británico pretenden instalar un Observatorio Magnético por primera vez en Honduras, para capturar las fuentes del vector de campo magnético natural en la superficie de la Tierra, libre de interferencia artificial, grabando series de tiempo continuas, de banda ancha, absolutas y a largo plazo. Como contribución a este proyecto, proponemos una metodología para analizar los datos de este nuevo observatorio, mediante comparación con datos de observatorios cercanos y con modelos de campo magnético principal y de magnetosfera, y empleando técnicas estadísticas. Como primer paso, se computan las componentes geomagnéticas locales en Tegucigalpa, Honduras (TEG), para el intervalo temporal 2010–2013, utilizando el modelo semi-empírico de magnetosfera terrestre de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05) y el Modelo de Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF). La variación diaria en días calmos (Sq) de la componente horizontal (H -) del campo magnético local, se extrae de los datos del Observatorio Chiripa, Costa Rica, empleando los días calmos internacionales y el análisis de componentes ortogonales normales. Se calculan los coeficientes de correlación de Pearson entre la componente H - calculada con el modelo TS05 en las coordenadas de Tegucigalpa y la componente H - del Observatorio Chiripa. Las mejores correlaciones se obtienen en días con índice planetario $K_p < 4$, cuando Sq y la variación diurna son removidas de los datos CRP- H y de los valores de TEG- H , respectivamente. Las corrientes magnetosféricas calculadas para Tegucigalpa parecen contribuir significativamente al Sq local, en el intervalo de tiempo de 12,00–24,00 hora local.

Abstract

The National Autonomous University of Honduras and the British Geological Survey intend to install a Magnetic Observatory for first time in Honduras, in order to capture the sources of the natural magnetic field vector at the earth's surface, free of artificial interference, recording a continuous, broadband, absolute, long-term time series (Turbitt, 2018). As a contribution to this project, we propose a methodology to analyze this new observatory data, comparing with nearby observatories data, main field model, magnetosphere model, and using statistic techniques. As a first step, local geomagnetic components are computed in Tegucigalpa, Honduras (TEG), for the temporal interval 2010–2013, using the Tsyganenko and Sitnov 2005 semi-empirical magnetospheric model (TS05) and the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). The quiet daily variation (Sq) of the local geomagnetic field horizontal component (H -) is extracted from the Chiripa Observatory (Costa Rica) data, using the International Quiet Days and the Normal Orthogonal Component Analysis. Pearson's correlation coefficients are calculated between the H -component computed with the TS05 model in the Tegucigalpa coordinates and the H - component of the Chiripa Observatory. The best correlations are obtained in days with planetary index $K_p < 4$, when the Sq and the quiet daily variation are removed from the CRP- H data and the TEG- H values respectively. The magnetospheric currents computed for Tegucigalpa seem to contribute significantly to local Sq, in the time interval 12,00–24,00 local time.

C. Objetivos

1. Objetivo general

Analizar los datos del Primer Observatorio Magnético de Honduras, comparándolos con datos de observatorios cercanos, así como con las componentes del campo magnético local calculadas para el sitio del observatorio, empleando el Modelo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) y el modelo de corrientes magnetosféricas de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05), con el auxilio de técnicas estadísticas, para futuros estudios geofísicos y de amenazas de clima espacial en Honduras.

2. Objetivos específicos

- Comparar las componentes del campo magnético local calculadas en Tegucigalpa, mediante el IGRF y el TS05, con los datos del Observatorio de Chiripa, Costa Rica, para el intervalo 2010–2013, validando así la metodología con la que se analizarán los datos del Primer Observatorio Magnético de Honduras.
- Contar con análisis estadísticos y físicos para realizar las primeras mediciones del Observatorio Magnético y para futuros estudios geofísicos y de clima espacial.
- Modelar la variación diaria en días calmos y las contribuciones de cada una de las corrientes de la magnetosfera terrestre a la misma.
- Publicar en eventos y en revistas nacionales e internacionales los resultados de los análisis del campo magnético regional.

Tabla de contenidos

	Página
A. Agradecimientos	2
B. Resumen	3
C. Objetivos	4
1. Objetivo general	4
2. Objetivos específicos	4
D. Introducción	6
1. Observatorios magnéticos	6
2. Ionosfera	7
a. Corrientes ionosféricas	8
3. Magnetosfera	9
a. Corrientes magnetosféricas	10
4. Campo magnético local	10
5. Clima espacial	11
a. Eventos severos de clima espacial	12
b. Consecuencias observadas de corrientes inducidas geomagnéticamente	17
6. Modelo de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05)	19
a. Características generales del modelo	20
E. Contribución de tesis	24
F. Metodología	24
1. Cómputo de componente H - para Tegucigalpa	24
2. Variación S_q	24
3. Corrientes magnetosféricas	26
4. Pruebas estadísticas	26
a. Correlaciones de Pearson	26
b. Transformada z -Fisher	27
c. Prueba t de Welch	27
G. Resultados y discusión	29
1. Análisis de corrientes magnetosféricas	29
2. Análisis de correlaciones de Pearson	29
3. Análisis de la prueba t de Welch	30
H. Conclusiones	36
I. Plan de trabajo	37
J. Referencias bibliográficas	41

D. Introducción

1. Observatorios magnéticos

Un observatorio magnético tiene como objetivo principal registrar las fuentes naturales de las componentes del vector de campo magnético terrestre, de manera continua, precisa y sin interferencias artificiales. De esta manera se tiene conocimiento preciso de la actividad magnética del sitio en el que se encuentra el observatorio. Para realizar una medida del campo magnético terrestre se emplea instrumentación de varios tipos. Por ejemplo, un grupo lo forman los variómetros, que registran de forma continua y automática las variaciones alrededor del cero de las componentes del campo geomagnético y que requieren de una instalación en entornos controlados térmicamente y sobre una plataforma completamente estable. También se emplean instrumentos para mediciones absolutas, que miden el vector total de campo magnético terrestre con observaciones periódicas, y que permiten dar escala a los valores medidos por los variómetros. En la figura 1 podemos ver la vista en planta de la propuesta para las casetas del Observatorio Magnético. Procesando los datos obtenidos en los observatorios se

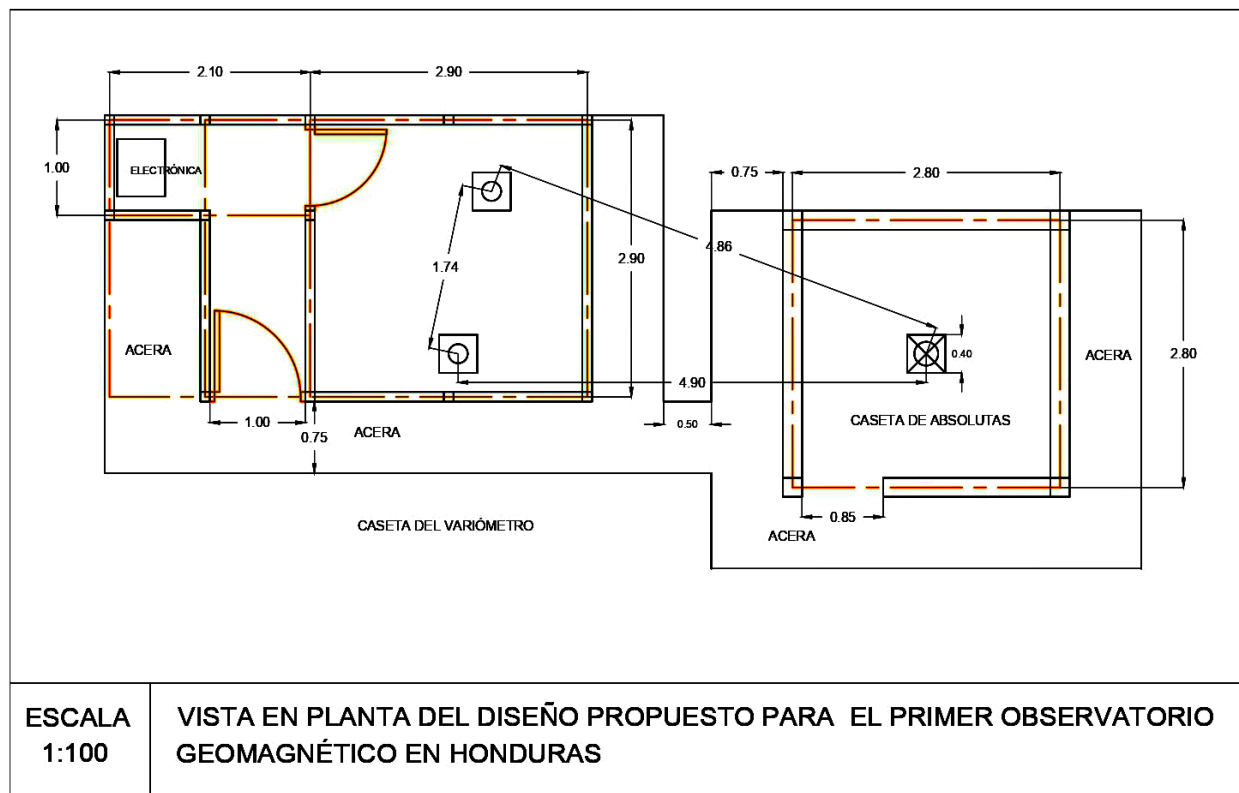


Figura 1: Vista en planta de la propuesta para las casetas del Observatorio Magnético. Izquierda: cuarto de variómetro. Derecha: cuarto de mediciones absolutas. Diseño: Ing. Daysi Gómez.

pueden determinar los índices de actividad geomagnética, los valores medios horarios, dia-

rios, mensuales y anuales, así como la variación anual de las componentes geomagnéticas. La curva semanal de la componente H - del Observatorio de Chiripa, para los días 1 a 7 de enero de 2010 se muestra en la figura 2. Los datos de los observatorios magnéticos registran

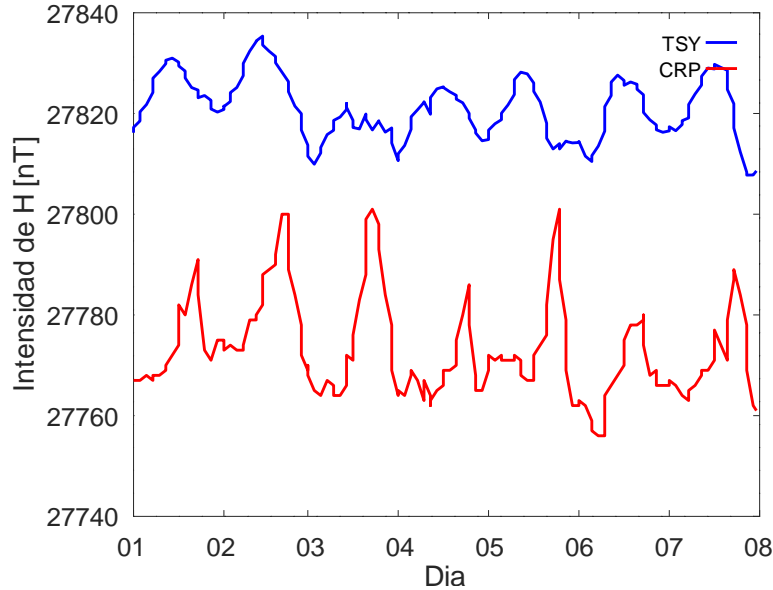


Figura 2: Intensidad de CRP- H - y de TEG- H_{TSY} -, para los días 1 a 7 de enero de 2010.

una superposición de señales dependientes del tiempo, relacionadas con una diversidad de fenómenos físicos en el núcleo de la Tierra, el manto, la ionosfera, la magnetosfera e, incluso, el Sol y el viento solar. Estos datos se utilizan a menudo para la investigación científica; además son cada vez más importantes para aplicaciones prácticas, para la vigilancia del clima espacial y la mitigación de riesgos. Hoy en día, los observatorios magnéticos de todo el mundo son operados por una variedad de instituciones gubernamentales y académicas, a veces en colaboración con empresas privadas.

2. Ionosfera

La ionosfera es una capa que se superpone en la parte superior de la atmósfera y el comienzo del espacio. Lo que sucede en la ionosfera es que el Sol calienta los gases que se encuentran en esa capa y hace que estos pierdan electrones, por lo que en esta capa se crea un mar de partículas cargadas. La ionosfera se extiende aproximadamente de 80 km a 644 km sobre la superficie de la Tierra. La ionosfera está en constante cambio debido a que se forma cuando sus partículas son ionizadas por el Sol, causando que su tamaño varíe en los períodos diurnos y nocturnos. En los periodos nocturnos esta capa se adelgaza cuando las partículas ionizadas se recombinan, formando partículas neutras (e.g. Frazier y Tran, 2019).

La ionosfera tiene tres regiones o capas: E, D y F. Estas capas no tienen límites bien definidos porque varían durante el transcurso del día, ensanchándose o adelgazándose. La capa D es

la más baja y se encuentra a 60 km del suelo y se extiende hacia arriba hasta uno 90 km. La capa E comienza de 90 km hacia arriba y se extiende hasta uno 150 km. La capa F que es la más alta de la ionosfera y se extiende de 150 km hasta a veces 500 km sobre la superficie de la Tierra (Atmospheric Research, 2014).

La ionosfera es muy diferente durante el día y la noche. Durante el día, tanto los rayos X como la luz ultravioleta del Sol suministran continuamente la energía que golpea a los electrones para liberarlos de los átomos y las moléculas, lo que proporciona un suministro continuo de iones y electrones libres. Algunos de estos iones y electrones chocan y se vuelven a combinar para formar átomos y moléculas eléctricamente neutros. Durante el día, se crean más iones de los que se destruyen, por lo que aumenta el número de iones en las tres regiones. Por la noche, el proceso de recombinación comienza debido a la ausencia de la luz solar, lo que provoca que el número de iones disminuya en las tres capas. (Atmospheric Research, 2014).

a. Corrientes ionosféricas

Cuando la radiación solar impacta la atmósfera, en particular en la ionosfera, se producen vórtices de corriente, que son mayores del lado en el que incide la luz del Sol; del otro lado se tendrán pocas corrientes o ninguna. A estas se les conoce como corrientes ionosféricas. En la figura 3 se observa que se dividen en dos hemisferios, cuya dirección de giro es diferente. En el hemisferio norte, giran en sentido anti-horario; en el hemisferio sur, giran en sentido horario.

Se conoce como corrientes Sq a las causadas por vientos de marea en la atmósfera, es decir, son las oscilaciones diurnas y semi-diurnas, que son excitadas por el calentamiento solar de la atmósfera debido a la radiación solar. Tienen una fuerte variación estacional: son más fuertes en verano, cuando el calentamiento solar y la ionización de la atmósfera son mayores. Estas corrientes crean variaciones magnéticas diarias, cuyos registros se obtienen en observatorios magnéticos distribuidos por todo el mundo (Baumjohann y Nakamura, 2007).

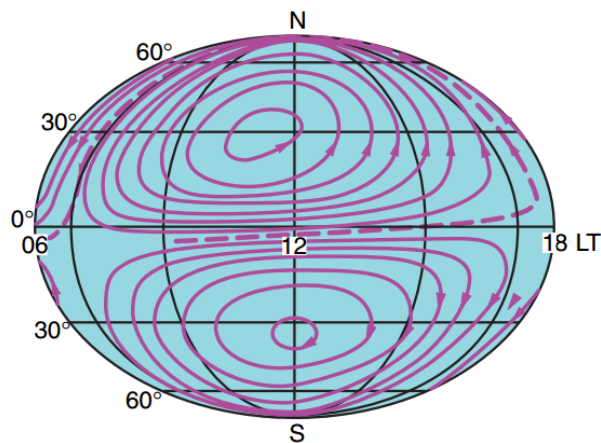


Figura 3: Vista diurna de los sistemas de corriente Sq. Imagen adaptada de (Baumjohann y Nakamura, 2007)

Las variaciones Sq que son medidas en la superficie de la Tierra, contienen señales no solo de las corrientes ionosféricas, sino también de las corrientes secundarias inducidas en el interior de la Tierra. La fuerza de las corrientes inducidas es de alrededor de un tercio de la de las corrientes ionosféricas. Estas corrientes inducidas tienden a estar en la dirección opuesta a las corrientes ionosféricas de origen y, por lo tanto, actúan para reducir las variaciones de Sq en la componente vertical y aumentar las variaciones de Sq en la componente horizontal en el suelo. Además del efecto de la inducción electromagnética en el manto superior, la presencia del océano conductor tiene un impacto medible en las variaciones de Sq, especialmente alrededor de la costa (ver Yamazaki y Maute, 2017).

Diversos estudios han demostrado que las variaciones de Sq en el suelo podrían estar contaminadas por el efecto de varias corrientes magnetosféricas. Se cree que las corrientes de cola producen un patrón diurno similar a Sq en el campo geomagnético. Según el modelo de campo geomagnético CHAOS-5 las corrientes de cola pueden causar una perturbación magnética de ± 5 nT en la superficie de la Tierra en latitudes medias (Yamazaki y Maute, 2017).

Las variaciones geomagnéticas de Sq pueden observarse en cualquier lugar del mundo. Una característica importante de la distribución latitudinal de las Sq es la amplificación en la componente x cerca del ecuador magnético. Normalmente, la amplitud de las Sq en x en una estación magnética que esta dentro del rango de $\pm 3^\circ$ del ecuador magnético es de 2 a 3 veces mayor que en una estación de baja latitud de la misma longitud (Yamazaki y Maute, 2017).

3. Magnetosfera

Cuando nos referimos a la magnetosfera nos referimos a la región del espacio que rodea a la Tierra donde el campo magnético que domina es el campo magnético de la Tierra, en lugar del campo magnético del espacio interplanetario. La magnetosfera está modelada por la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra. La magnetosfera de la Tierra tiene forma de una gran burbuja con forma de cometa y que se extiende hasta 57.936 km en el espacio. La importancia de la magnetosfera radica en que protege nuestro planeta de la radiación de partículas cósmicas y solares, así como de la erosión de la atmósfera por el viento solar, que es el flujo constante de partículas cargadas que salen del Sol (NASA, 2021).

La magnetosfera terrestre es generada por el movimiento convectivo de hierro fundido que está por debajo de la superficie en el núcleo exterior de la Tierra. El bombardeo constante del viento solar comprime el lado de nuestro campo magnético que mira hacia el Sol. Este lado se extiende una distancia de aproximadamente seis a diez veces el radio de la Tierra. El lado de la magnetosfera que mira en dirección opuesta al Sol, se extiende en una inmensa cola magnética, que fluctúa en longitud y que puede medir cientos de radios terrestres (NASA, 2021).

La magnetosfera depende de varias variables: la naturaleza de las fuentes de plasma y el momento, el período de giro, la naturaleza del eje, el eje del dipolo magnético y la magnitud y dirección del flujo del viento solar. La distancia planetaria donde la magnetosfera pueda

resistir la presión del viento solar se llama distancia Chapman-Ferraro (Hussey, 2014).

a. Corrientes magnetosféricas

La magnetosfera es un sistema complejo, de corrientes interconectadas, que se agrupan espacialmente en los siguientes sistemas de corrientes (ver figura 4).

- Chapman–Ferraro: Son las corrientes que se mueven sobre la superficie de la magnetosfera. Son producidas por la circulación de partículas cargadas en la magnetopausa y sostienen la presión causada por el viento solar (Castillo, 2018).
- Cola transversal: Son sistemas de corriente que se encuentran en el lado opuesto al Sol. Circulan en los hemisferios norte y sur del ecuador magnético, en sentido anti-horario el primero y en sentido horario el segundo, visto desde el Sol, uniéndose en el extremo del amanecer. El conjunto toma la forma de la letra griega θ (Castillo, 2018).
- Hoja neutral de corriente: Son corrientes que circulan en el plano del ecuador magnético, en dirección amanecer–atardecer. Es aquí donde desembocan las corrientes del hemisferio norte y las corrientes del hemisferio sur de la cola (Castillo, 2018).
- Birkeland o corrientes alineadas con el campo (FAC): Son corrientes poloidales, que transportan energía entre el ecuador magnético y la ionosfera.
- Corrientes de anillo: Son producidas por una región anular que contienen una gran cantidad de protones y electrones atrapados a la altura del ecuador magnético. Son los indicadores de actividad magnética más significativos. A estas corrientes se les conoce como corrientes de anillo simétrico o completo (SRC). Las corrientes de anillo parcial (PRC) abarcan principalmente la zona ecuatorial que va poco después del atardecer hasta la medianoche. Las corrientes de Birkeland transportan energía de este anillo a la ionosfera, a la altura de los casquetes polares (Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003).

4. Campo magnético local

De acuerdo a Jankowski y Sucksdorff, 1996, el campo magnético local es un campo vectorial, que se puede describir o representar por un vector o por sus tres componentes; a este vector se le representa con la letra F . Estas componentes cartesianas son x , y y z , donde x representa la componente norte-sur del vector, y representa la componente este-oeste y z representa la componente vertical, llamada intensidad vertical, positiva cuando apunta hacia abajo (ver figura 5).

Entonces el modulo del vector F se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$F^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

De acuerdo a Jankowski y Sucksdorff, 1996, hay otra forma para calcular el módulo del vector F , utilizando la componente H . Esta, a su vez, se calcula al sumar vectorialmente las componentes x y y de la ecuación anterior. La componente H es la componente horizontal del vector F a lo largo del meridiano magnético local y se le conoce como intensidad horizontal,

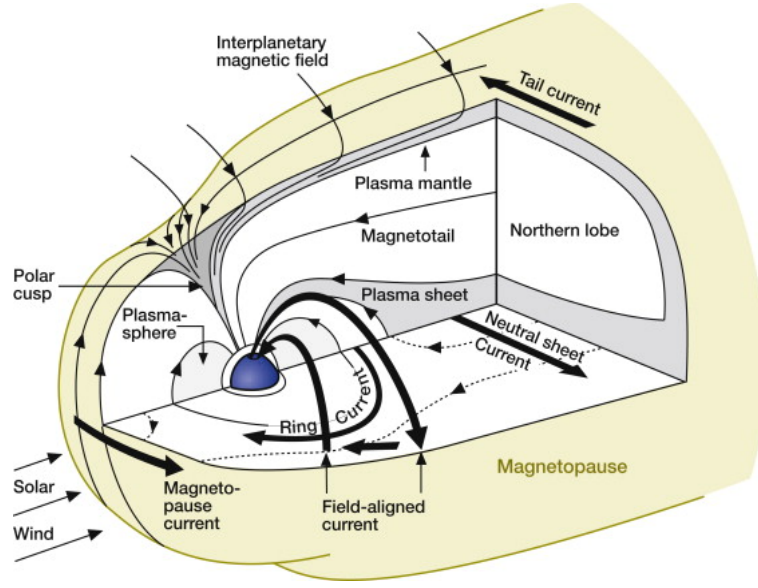


Figura 4: Ilustración detallada de la magnetosfera, que muestra las características de sus diferentes corrientes. Imagen adaptada de Luhmann y Solomon, 2014

siendo positiva cuando apunta hacia al norte. Entonces el modulo del vector F también se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$F^2 = H^2 + z^2 \quad (2)$$

El campo magnético terrestre se genera a partir de las corrientes eléctricas debidas al movimiento de los iones de los metales que se funden en el interior de la tierra principalmente hierro y níquel. Esto sucede esencialmente en la región del núcleo externo. De acuerdo a Finlay y col., 2010. En cuanto a la intensidad del campo magnético terrestre, oscila entre 25.000 a 65.000 nT. Las coordenadas esféricas para medir el campo magnético local son la declinación y la inclinación.

La declinación magnética es el ángulo que se encuentra entre el norte geográfico y el meridiano magnético. Este ángulo resulta ser positivo para una desviación hacia el este del campo con respecto al norte verdadero Jankowski y Sucksdorff, 1996. La declinación magnética se calcula con la siguiente formula:

$$D = \arctg(y/x) \quad (3)$$

La inclinación magnética en cambio es el ángulo entre el vector H y la dirección del vector de intensidad total F . Jankowski y Sucksdorff, 1996 La inclinación magnética se calcula de la siguiente forma:

$$I = \arctg(Z/H) \quad (4)$$

5. Clima espacial

El clima espacial se refiere a las condiciones en el Sol y en el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera que pueden influir en el rendimiento y la confiabilidad de los

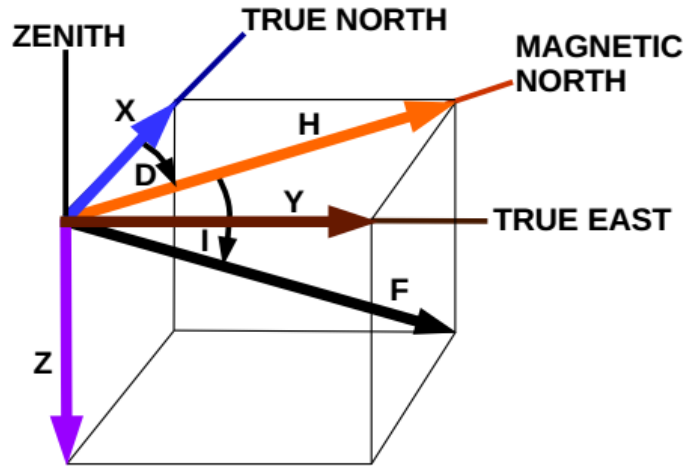


Figura 5: Componentes del campo geomagnético en sistema de coordenadas cartesiano, cilíndrico y esférico. Imagen adaptada de Castillo, 2018

sistemas tecnológicos espaciales y terrestres y pueden poner en peligro la vida o la salud humana ((Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research), 1995). El Sol siempre está arrojando partículas al espacio. Esta corriente de partículas se conoce como viento solar y proviene de la atmósfera exterior caliente del Sol llamada corona. Estas partículas de la corona están cargadas eléctricamente. El viento solar lleva estas partículas hacia la Tierra a una gran velocidad, y son muchos los efectos negativos que pueden tener sobre nuestro planeta.

De acuerdo a Portillo, 2020 son varias las razones por las que el campo magnético es importante. Una fundamental es que el campo magnético es responsable de que tengamos nuestra atmósfera, puesto que ayuda a que se den las condiciones para que los humanos podamos sobrevivir, y contribuye a que el planeta tenga una temperatura habitable. Hay que mencionar que la ionosfera puede ser afectada tanto por el clima espacial como por el clima terrestre. Un ejemplo son los huracanes, que pueden crear ondas de presión que se expanden hacia la ionosfera, provocando cambios en la misma. De aquí surge la necesidad de conocer como es el clima espacial y las condiciones climáticas para tener registros y monitorear la actividad magnética en la Tierra. La figura 6 es una representación artística de la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre.

a. Eventos severos de clima espacial

Tormentas Geomagnéticas. Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, que duran desde varias horas hasta incluso algunos días. Su origen es externo y se producen por un aumento brusco de las partículas cargadas emitidas en las erupciones solares que alcanzan la magnetosfera. Las tormentas geomagnéticas tienen un carácter global, comenzando simultáneamente en todos los puntos de la Tierra. No obstante,

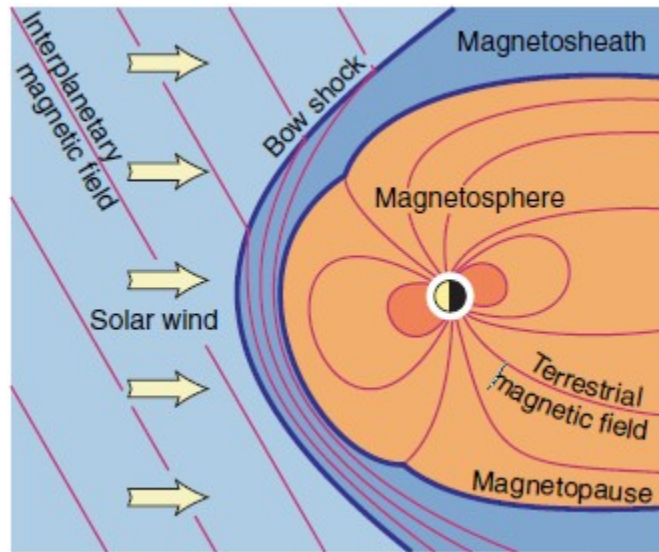


Figura 6: Interacción del viento solar con la magnetosfera de la Tierra. Imagen adaptada de Castillo, 2018

las amplitudes con que se observan las tormentas en distintos lugares son diferentes, siendo mayores cuanto más altas son las latitudes. La tabla 1 muestra algunos ejemplos de tormentas geomagnéticas severas.

Apagón de radio. En condiciones normales, las ondas de radio de alta frecuencia (HF) pueden soportar la comunicación a largas distancias por refracción a través de las capas superiores de la ionosfera. Cuando ocurre una llamarada solar lo suficientemente fuerte, la ionización se produce en las capas inferiores y más densas de la ionosfera (la capa D), y las ondas de radio que interactúan con los electrones en las capas pierden energía debido a las colisiones más frecuentes que ocurren en el entorno de mayor densidad de la capa D. Esto puede hacer que las señales de radio HF se degraden o se absorban por completo. Esto da como resultado un apagón de radio: la ausencia de comunicación de HF, que afecta principalmente a la banda de 3 a 30 MHz. El producto D-RAP (predicción de absorción de la región D) correlaciona la intensidad de la llamarada con la fuerza de absorción y propagación de la capa D (NOAA, 2011a). Este rango de frecuencia puede degradarse o incluso perderse por completo durante épocas de alta actividad (Lanzerotti, 2000). La figura 7 es una infografía de los efectos del clima espacial sobre la Tierra. En la tabla 2 se describen algunos ejemplos de efectos adversos debidos al clima espacial.

Tormenta de radiación. Las tormentas de radiación solar ocurren cuando una erupción magnética a gran escala, que a menudo causa una eyección de masa coronal y una llamarada solar asociada, acelera las partículas cargadas en la atmósfera solar a velocidades muy altas. Las partículas más importantes son los protones que pueden acelerarse a grandes fracciones de la velocidad de la luz. A estas velocidades, los protones pueden atravesar los 150 millones de kilómetros desde el sol hasta la Tierra en tan solo decenas de minutos o menos. Cuando

llegan a la Tierra, los protones que se mueven rápidamente penetran en la magnetosfera, que protege a la Tierra de las partículas cargadas de menor energía (NOAA, 2011b).

Tabla 1: Ejemplos de tormentas geomagnéticas severas. Adaptado de Eastwood y col., 2017.

Fecha	Comentario
Septiembre, 1959	El evento “Carrington” es la referencia mas utilizada para estudios de clima espacial extremo. La erupción solar, la tormenta geomagnética y el flujo de partículas energéticas asociado con este evento, lo convierten en uno de los más grandes registrados. Muchos parámetros cruciales no se midieron directamente, por lo que sus propiedades precisas están sujetas a incertidumbre. En particular, la estimación de la fuerza de la tormenta geomagnética asociada con el evento de Carrington ha suscitado cierto debate.
Mayo, 1921	Se ha estimado que esta tormenta geomagnética es comparable en tamaño a la mejor estimación actual del evento Carrington. Se observaron auroras cerca del ecuador en Samoa, y las corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC) provocaron incendios en varias estaciones de telégrafo en Suecia.
Mayo, 1967	Una erupción solar extrema y una eyección de masa coronal causaron apagones de radio muy importantes, tormentas de radiación solar y una gran tormenta geomagnética. Esto provocó una interrupción particularmente significativa de las comunicaciones, específicamente a las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos de América, y marcó el inicio de una importante inversión estadounidense en el monitoreo del clima espacial, que continúa hasta el día de hoy.
Marzo, 1989	La tormenta geomagnética más grande de la era espacial, que causó la falla de toda la red eléctrica de Quebec y dañó dos transformadores en el Reino Unido.

Daños a satélites

Satélites:

En un solo evento, pueden ocurrir alteraciones en los componentes electrónicos, cuando una partícula cargada (por ejemplo, un ion pesado) ioniza una parte sensible de un circuito y hace que el circuito cambie de estado. Estos posibles daños son considerados en la construcción del modulo principal del Satélite Morazán (primer satélite hondureño). Morazán es un proyecto de integración de las naciones centroamericanas a través de la colaboración en el sector Espacio. El proyecto consiste en el desarrollo de un CubeSat por profesionales de Honduras, con la colaboración de profesionales de Costa Rica, desarrolladores del primer satélite de Centroamérica, y profesionales de Guatemala (Monge y col., 2018). En la actualidad se ha desarrollado software de corrección para reducir los daños (Pulkkinen, 2007). El exceso de carga negativa aumenta las diferencias de potencial, provocando intensas descargas de voltaje y sobrecargas de energía dentro de los circuitos, dañando sus sistemas. Tanto la intensidad máxima del flujo de electrones como la duración de la exposición determinan la cantidad de exceso de carga acumulada, lo que significa una enorme amenaza para todas las redes satelitales del mundo. De ahí la importancia de conocer con precisión las componentes magnéticas, que registran las perturbaciones del viento solar sobre el campo magnético terrestre.

Aeronaves a gran altura:

Por encima de los 10 km de altitud el blindaje atmosférico de los aviones se reduce considerablemente. Las tripulaciones de las aeronaves y los pasajeros en rutas transpolares están sujetos a mayores dosis de radiación de las partículas energéticas. Estos problemas son mayores durante los máximos de manchas solares.

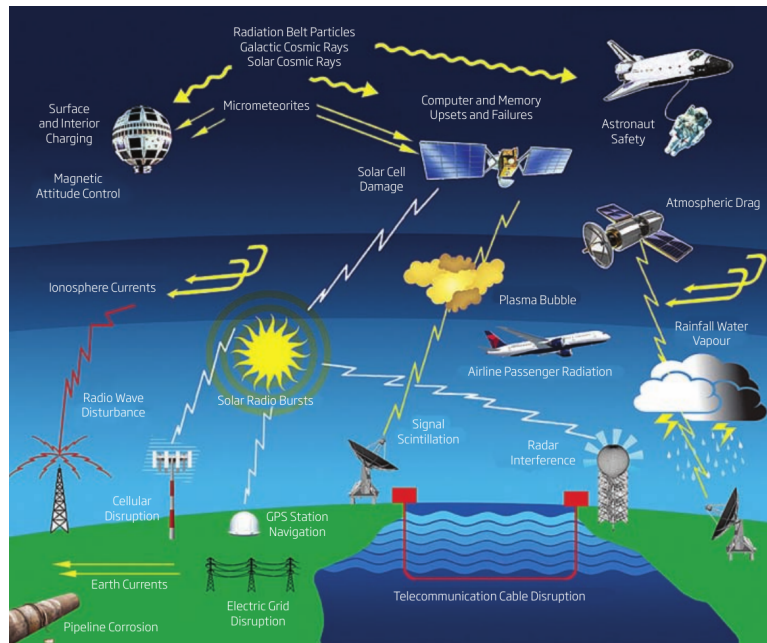


Figura 7: Efectos del clima espacial sobre la Tierra. Adaptado de Cannon y col., 2013

Tabla 2: Efectos adversos provocados por eventos severos de clima espacial sobre la Tierra.
Adaptado de Oughton y col., 2016

Evento extremo primario	Tiempo de advertencia	Duración	Impacto sobre la Tierra
Tormenta Geomagnética	17 a 90 horas	1 a 2 días	<ul style="list-style-type: none"> ■ Posible colapso del voltaje de la red eléctrica a granel y daño a transformadores eléctricos. ■ Interferencia o pérdida de radio satelital y de ondas de comunicaciones, debido a centelleo. ■ Operaciones satelitales afectadas. Posible pérdida de satélites.
Apagón de radio	Ninguno	Minutos a 3 horas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pérdida de comunicaciones de radio de alta frecuencia (HF) en el lado de día de la Tierra. ■ Pérdida de GPS de corta duración (minutos a una hora). ■ Interferencia en sistemas de radar civiles y militares.
Tormenta de radiación	30 minutos a varias horas	Horas a días	<ul style="list-style-type: none"> ■ Apagón de HF en las regiones polares. ■ Mayor exposición a la radiación de los pasajeros y de la tripulación en aviones a altas latitudes.

Alteraciones a las cadenas de suministro global debido al clima espacial

La gran dependencia de la sociedad moderna a las redes de suministro nacionales e internacionales aumenta nuestra susceptibilidad a un evento meteorológico espacial severo. Para un evento al estilo de Quebec de 1989, los impactos económicos actualmente oscilarían entre 2,4 y 3,4 miles de millones de dólares en más de un año. De este choque económico total, alrededor del 50 % se hace sentir en países fuera de la zona de impacto directo, lo que da una pérdida en el Producto Interno Bruto (PIB) global de 3,9 a 5,6 % (Bäumen y col., 2014). En la tabla 3 se puede observar algunas de las áreas mas afectadas y las pérdidas económicas estimadas a consecuencia de un clima espacial severo.

b. Consecuencias observadas de corrientes inducidas geomagnéticamente

Las corrientes y campos eléctricos asociados con una mayor precipitación de partículas pueden inducir corrientes masivas en redes eléctricas globales que podrían resultar en cortes de energía a gran escala, apagones y daños permanentes a los transformadores eléctricos (Pirjola y col., 2000). La fuerza de las corrientes inducidas geomagnéticas (GIC) depende de varios factores. Suelen aumentar con la latitud geomagnética, la longitud y el voltaje de la línea de transmisión, pero disminuyen con la distancia al océano y una mayor resistividad del suelo (Wei, Homeier y Gannon, 2013).

Las GIC producen daños a tuberías y cables de telecomunicaciones, corrosión acelerada, daños físicos y eléctricos a los satélites e interrupciones de la navegación por radio, que pueden afectar particularmente a los sectores del transporte y la aviación (Cannon y col., 2013). En un estudio de Homeier y Wei, 2013 se estima que las pérdidas económicas en América del Norte y Europa por un apagón durante 5 meses, causado por un evento similar a Carrington, estaría entre 0,5 y 2,6 miles de millones de dólares. En el mismo estudio se estimó que un apagón de la red eléctrica en el norte estadounidense resultaría en una pérdida del PIB en los EE.UU. de aproximadamente 30 mil millones de dólares por día, acumulando a más de 10 mil millones de dólares por año, sin tomar en cuenta las variaciones globales debidas al comercio.

Las áreas de riesgo están relacionadas con las bandas actividad auroral. Los dos factores geofísicos clave que afectan la producción de GIC son, latitud geomagnética y la estructura de conductividad de la tierra profunda. En general, las áreas de riesgo son las de mayor latitud geomagnética, ya que están más cerca de la banda de actividad auroral.

La red compleja e interconectada del mundo actual hace difícil determinar los efectos exactos de un evento meteorológico espacial severo en la economía y en la infraestructura mejoradas. El impacto económico más importante de tales eventos en la historia es la interrupción de la distribución en redes eléctricas y las fallas de los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Por lo que se debe dar una especial atención al clima espacial y a sus efectos negativos sobre múltiples factores humanos. Los observatorios magnéticos permiten tener más información del comportamiento del clima espacial, lo que se puede aprovechar para predecir otro fenómeno de clima espacial a gran escala, tomar las precauciones posibles y evitar daños en la red

Tabla 3: Ejemplos de clientes, impactos y pérdidas en datos meteorológicos espaciales. Fuente: William Murtagh, NOAA Space Weather Prediction Center, “Current Space Weather Services Infrastructure”, presentación en el Taller de Clima Espacial de NOAA, Mayo 22, 2008.

Área de impacto	Cliente	Ejemplos de acciones	Ejemplos de pérdidas (US\$)
Astronave (Sistemas individuales para completar la falla de la nave espacial; comunicaciones y efectos de radiación)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lockheed Martin ▪ Orbital ▪ Boeing ▪ Space Systems Loral ▪ NASA, DoD 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posponer Lanzamiento. ▪ En órbita: reiniciar los sistemas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdida de naves espaciales US\$ 500 millones. ▪ Tormenta en el peor de los casos: US\$ 100 mil millones. ▪ La pérdida comercial supera los \$mil millones.
Energía eléctrica Falla de la red y apagón (daño del equipo a las condiciones eléctricas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comisión Reguladora Nuclear de EE. UU. ▪ N. America Electric Reliability Corp. ▪ Allegheny Power. ▪ Autoridad de Energía de Nueva York. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ajustar / reducir la carga del sistema. ▪ Desconectar componentes. ▪ Posponer el mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdida estimada US\$ 400 millones, debido a tormentas geomagnéticas inesperadas. ▪ Pérdida de US\$ 3–6 miles de millones en el PIB (apagón).
Aerolíneas (comunicaciones) (Pérdida de comunicación HF en vuelo y dosis de radiación para la tripulación y los pasajeros)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ United Airlines ▪ Lufthansa ▪ Continental Airlines ▪ Korean Airlines ▪ NavCanada (control de tráfico aéreo) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desviar vuelos polares. ▪ Cambiar planes de vuelo. ▪ Cambiar altitud. ▪ Seleccionar comunicaciones alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo US\$ 100.000 por vuelo desviado. ▪ US\$ 10.000 – US\$ 50.000 para cambios de ruta. ▪ Riesgos a la salud.
Topografía y navegación (el uso de campo magnético o GPS podría verse afectado)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FAA-WAAS ▪ Departamento de Transporte ▪ BP Alaska y Schlumberger 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posponer actividades. ▪ Rehacer encuesta. ▪ Utilizar sistemas de respaldo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ De US\$ 50.000 a US\$ 1 millón por día para una sola empresa

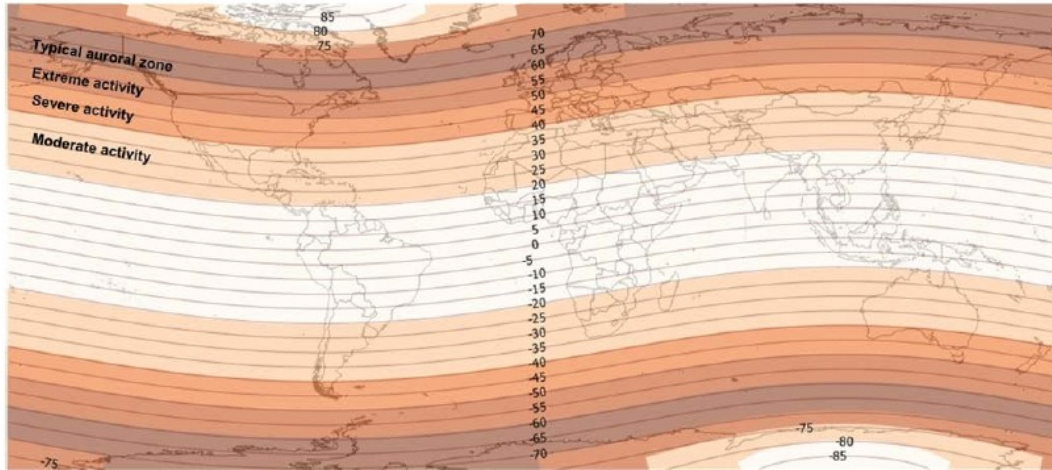


Figura 8: Mapa de amenazas por latitud geomagnética después de un cambio en el óvalo auroral. Adaptado de Oughton y col., 2016

eléctrica, para evitar sufrir pérdidas económicas globales y demás consecuencias.

En la actualidad, el mayor riesgo planteado de la actividad geomagnética es en la red eléctrica. Allí, hay varios factores que influyen en la gravedad de los efectos de los GIC por el aumento de la carga en transformadores de extra-alto voltaje (EHV). La probabilidad de daño inducido que provoquen interrupciones en el cliente depende, en primer lugar, de factores geofísicos que determinan el tamaño de los campos eléctricos en el sistema y, en segundo lugar, las características tecnológicas que afectan cómo un sistema responde al campo eléctrico generado.

6. Modelo de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05)

“El modelo de Tsyganenko es una representación semi-empírica de mejor ajuste para el campo magnético, basada en un gran número de observaciones satelitales.” Este modelo está conformado por sistemas a gran escala de corrientes alineadas con el campo, corrientes de cola magnética, de magnetopausa y de anillo, es decir, las fuentes magnetosféricas externas del planeta Tierra. Se auxilia del código GEOPACK-2008 para calcular las fuentes internas (Tsyganenko, 2021).

Los sistemas de coordenadas utilizados por TS05 son los sistemas de coordenadas geocéntrico solar magnético (GSM) (ver figura 9) y geocéntrico de viento solar (GSW). La diferencia entre ellos es que en el primero el componente positivo X_{GSM} se dirige desde el centro de la Tierra al centro del Sol, y en el sistema GSW, el componente x_{GSW} es la dirección anti-paralela al vector de flujo del viento solar. Este es un sistema dinámico que cambia con la dirección del vector de flujo del viento solar (para mas detalles, ver Tsyganenko, 1998).

La figura 10 muestra la dinámica de tormenta magnética solar utilizando el modelo semi-empírico de campo geomagnético y las técnicas avanzadas de extracción de datos de Sitnov y col., 2008. La distribución de los vectores de densidad de corriente ecuatorial y sus di-

recciones se muestran mediante el código de colores y las flechas, respectivamente. La fase correspondiente de la tormenta está marcada por el rombo rojo en el gráfico del índice SYM-H en el recuadro.

La figura 11 muestra la distribución ecuatorial de los datos de los satélites Polar (rojo), GOES-12 (amarillo), CLUSTER (magenta), Geotail (azul) e IMP-8 (negro). Los datos de las 37 tormentas empleadas para calcular los parámetros del modelo TS05 (142.787 en total) se distribuyen espacialmente de la siguiente forma:

- $\approx 23 \%$, $7 \leq R \leq 20 R_E$
- $\approx 68 \%$, $6 \leq R \leq 7 R_E$ (GOES 8, 9, 10)
- $\approx 5.3 \%$, $4 \leq R \leq 6 R_E$
- $\approx 3.7 \%$, $2.5 \leq R \leq 4 R_E$

Donde R_E es el radio del planeta Tierra.

El modelo TS05 incluye la energía en la magnetosfera e IMF, los tiempos de desintegración, escala de tiempo de cada componente, procesos de carga y descarga y disipación de partículas energéticas. De tal forma que permitirá calcular las corrientes magnetosféricas.

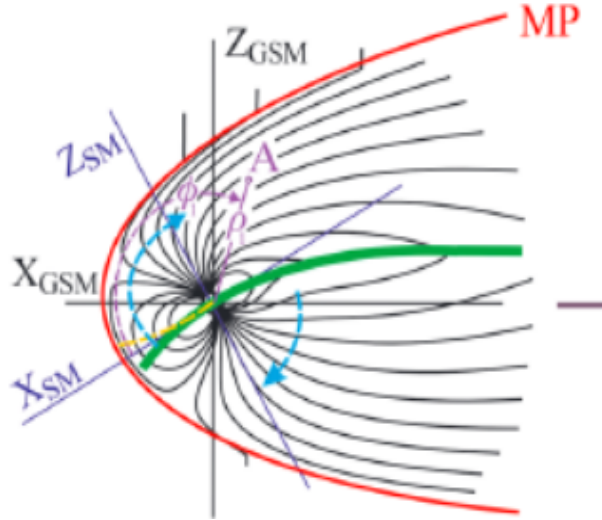


Figura 9: En esta figura, adaptada de Tsyganenko, 2014, se muestran los sistemas de coordenadas magnético solar geocéntrico (GSM) y magnético solar (SM).

a. Características generales del modelo

“El modelo asume que la magnetosfera interior es una función predecible del estado del viento solar, corriente arriba, que impulsa y da forma al campo, significando que en condiciones iniciales similares y con la misma historia del exterior, puede esperarse casi la misma respuesta de la magnetosfera y la misma evolución temporal de configuración del campo” (ver Castillo, 2018).

Módulos

El modelo TS05 está conformado por las contribuciones de siete campos vectoriales:

1. B_{CF} : Campo de las corrientes Chapman-Ferraro.
2. B_{SRC} : Corriente del anillo simétrico.
3. B_{PRC} : Corrientes de anillo parcial.
4. B_{T1} : Corriente transversal de la cola, región 1 (la mas cercana a la Tierra).
5. B_{T2} : Corriente transversal de la cola, región 2 (mas alejada de la Tierra).
6. B_{FAC1} : Sistema de corrientes de Birkeland, región 1 (mas alejada de la Tierra).
7. B_{FAC2} : Sistema de corrientes de Birkeland, región 2 (la mas cercana a la Tierra).
8. B_{INT} : Penetración del campo magnético interplanetario en la magnetosfera o término de interconexión.

Cada sistema cuenta con un ajuste de viento solar y de campo magnético interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés), ligados a los ciclos de tormentas solares (Castillo, 2018). El campo magnético interplanetario (IMF) en este modelo representa el parámetro físico del campo magnético solar, el cual es transportado por corrientes de partículas cargadas compuestas principalmente por partículas alfa, protones y electrones (viento solar), entre los planetas del sistema solar.

El cálculo de la parte externa del dipolo magnético terrestre es la suma de las siete fuentes de campo magnetosférico:

$$B_E = B_{CF} + B_{SRC} + B_{PRC} + B_{T1} + B_{T2} + B_{FAC1} + B_{FAC2} + B_{INT} \quad (5)$$

En los modelos empíricos clásicos de campo geomagnético, este se presenta como una suma del campo interno (IGRF) y algunos módulos que representan los principales sistemas de corriente magnetosférica: La corriente Chapman-Ferraro confina el campo dipolo dentro de la magnetopausa; la corriente de cola se cierra a través de la magnetopausa; la corriente de anillo simétrica; corriente de anillo parcial; Corrientes de Birkeland, conectando la ionosfera con el viento solar (corrientes Región 1) o con la corriente de anillo parcial (Región 2). La geometría de cada módulo es fija y se basa en particular en algunos principios físicos. Por ejemplo, el sistema de corriente Chapman-Ferraro debe cancelar la componente del campo dipolo normal a la magnetopausa, mientras que el sistema de corriente de cola debe ubicarse cerca del plano ecuatorial, teniendo en cuenta los efectos, torsión y deformación de la hoja de corriente de la cola magnética. Cada sistema de corriente magnetosférica está blindado de forma independiente (tiene su propio subsistema de corrientes de tipo Chapman-Ferraro en la magnetopausa). Las contribuciones individuales de los módulos al campo magnético total se determinan mediante los coeficientes de amplitud correspondientes y se encuentran ajustando el modelo a las medidas disponibles del campo geomagnético. Los coeficientes de

amplitud están agrupados por el nivel de actividad o son algunas funciones predefinidas de los parámetros del plasma del viento solar (densidad y velocidad) y el campo magnético interplanetario.

También es importante mencionar que se utiliza la ley de Biot-Savart, una ley fundamental de la magnetostática. Se asume una densidad de corriente y por medio de su integral se obtiene el vector de potencial, que representa la contribución del dipolo magnético externo. Esta se representa como:

$$A = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{j(r')}{|r - r'|} dV \quad (6)$$

Donde A es el potencial vectorial, μ_0 es la permeabilidad del vacío, j la densidad de corriente eléctrica volumétrica, dV es el diferencial de volumen, r es un radio cualquiera y r' es el radio del planeta Tierra.

El campo magnético se obtiene de $\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$.

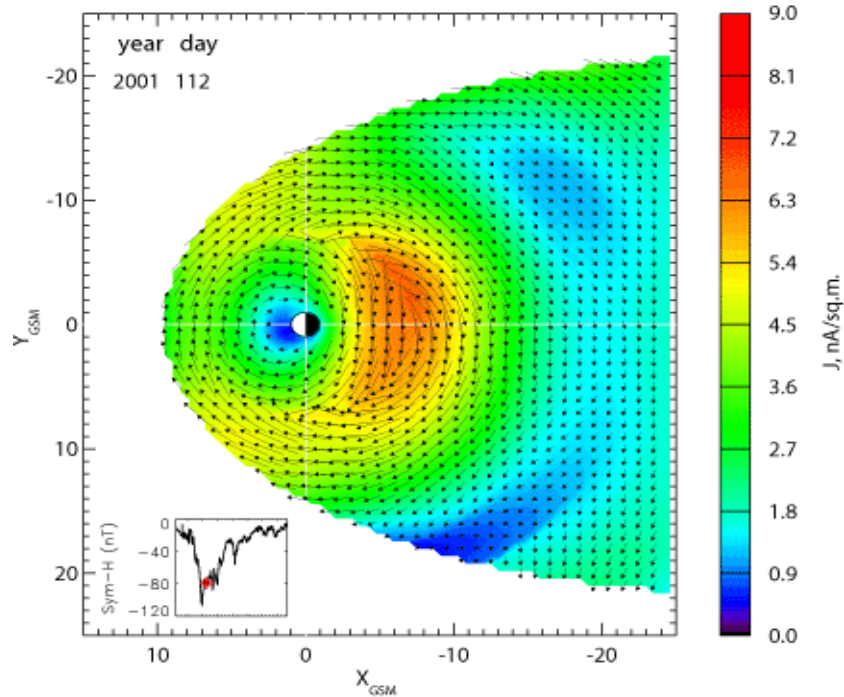


Figura 10: Resultados de la reconstrucción dinámica de la tormenta magnética de abril de 2001 (Sitnov, 2011).

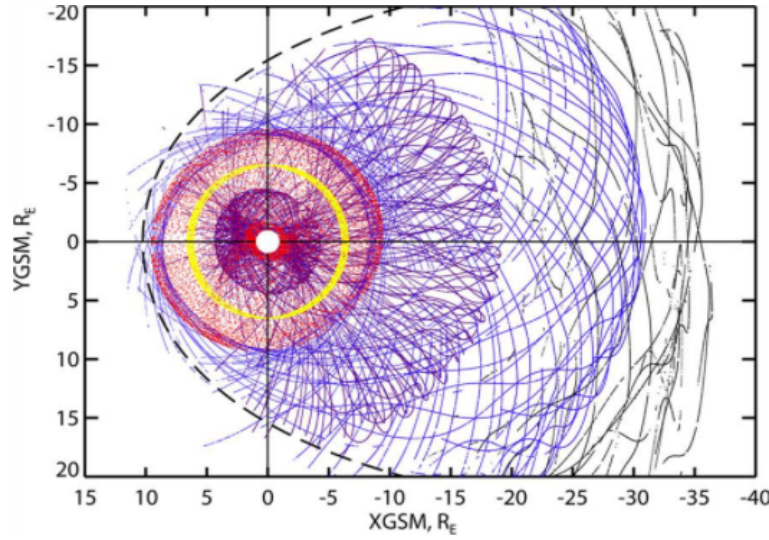


Figura 11: En esta imagen adaptada de (Sitnov, 2011) se muestra la distribución de las mediciones de datos del campo magnético en la magnetosfera y las proyecciones en el plano ecuatorial de ubicaciones de medición para subconjuntos de datos tomados de los satélites Polar (rojo), GOES-12 (amarillo), CLUSTER (magenta), Geotail (azul) e IMP-8 (negro).

Parámetros

Los parámetros de entrada del modelo TS05 se obtienen de la base de datos OMNI de NASA <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> y se listan a continuación (Castillo, 2018):

- Año, día del año, hora del día y minuto de la hora: datos y hora de la medición.
- Magnitudes de los componentes x , y , z del campo magnético interplanetario.
- Magnitudes de los componentes x , y , z del viento solar.
- Densidad de protones del viento solar: número de protones por centímetro cúbico.
- Temperatura del viento solar: temperatura del medio interplanetario.
- Índice SYM-H: magnitud del índice de perturbación longitudinalmente simétrico para H , con una resolución de un minuto, desde diferentes conjuntos de estaciones y en un sistema de coordenadas ligeramente diferente.
- Indicadores de disponibilidad de datos de campo magnético interplanetario y viento solar: indican si los datos se midieron, se interpolaron o si no existen.
- Ángulo de inclinación del dipolo: ángulo del eje geomagnético de la Tierra en el momento de la medición;
- Presión ram del viento solar: $p = \rho v^2$, donde p es la presión, ρ es la densidad de protones y v la velocidad relativa entre el objeto y el viento solar.

- Seis variables de conducción del modelo, W1, W2, W3, W4, W5, W6.

E. Contribución de tesis

1. Evaluar la precisión del modelo TS05 para calcular las componentes geomagnéticas locales en Honduras.
2. Validar una metodología para analizar los efectos de las corrientes magnetosféricas en el sitio del Primer Observatorio Magnético de Honduras y determinar cuales de esas corrientes contribuyen más a la señal local.
3. Evaluar la eficiencia del modelo TS05 para realizar estudios geomagnéticos y de clima espacial a futuro, i.e., análisis de corrientes inducidas en transformadores de la red primaria hondureña y otros efectos adversos tanto de las tormentas atmosféricas como de las geomagnéticas.

F. Metodología

1. Cómputo de componente H - para Tegucigalpa

Las componentes x , y y z del IGRF se calculan utilizando el código Geopack-2008 de Nicolai Tsyganenko. Las mismas componentes cartesianas se calculan para la magnetosfera, utilizando el código TS04 de Tsyganenko y Sitnov. De estas componentes obtenemos la suma de componente H - de IGRF más la componente H - de la magnetosfera, formalmente denominada $TEG-H_{TSY}$. La figura 12 muestra estas series junto a los datos del Observatorio Chiripa (CRP- H) para el intervalo temporal 2010–2013.

2. Variacion Sq

La variación Sq- H se calcula de dos formas: a) utilizando los datos de días calmos internacionales (IQD) del observatorio CRP para el intervalo 2010–2013; b) aplicando el análisis de descomposición de valores singulares a los datos de CRP-IQD. (Castillo et al, 2017)

El primer paso es extraer los datos de CRP en los días calmos internacionales y colocarlos en una matriz donde las filas representan los días (240 días) y las columnas los datos horarios (24 por día), en el periodo 2010–2013. Seguidamente, se removieron las filas en donde existían vacíos de datos, ya que el modelo no puede utilizarse si hay vacíos. En total, se obtuvieron 147 días sin vacíos. A la matriz filtrada se le aplica el análisis de descomposición de valores singulares, factorizando la matriz original en tres matrices.

$$\mathbf{Sq} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \text{ donde :}$$

- \mathbf{Sq} es la matriz de datos de los días calmos internacionales, con dimensiones 147 x 24.
- \mathbf{U} es una matriz 147 x 147, con los autovectores normalizados de la matriz $\mathbf{Sq} \otimes \mathbf{Sq}^T$.

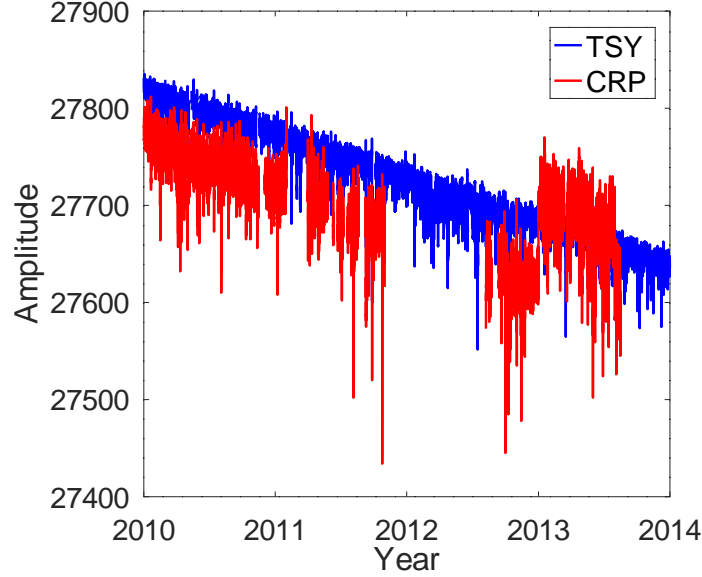


Figura 12: TEG- H_{TSY} values (blue) versus CRP- H data (red) obtained from World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh.

- \mathbf{V} es una matriz 24 x 24, con los autovectores normalizados de la matriz $\mathbf{Sq}^T \otimes \mathbf{Sq}$, o EOF.
- \mathbf{S} es una matriz de tamaño 147 x 24 matriz, con 24 valores singulares de \mathbf{Sq} .

La expansión de coeficientes representan las coordenadas no estandarizadas de los datos a lo largo de los ejes principales y se calculan utilizando la matriz \mathbf{A} que es una matriz $n \times m$ cuyas columnas son los coeficientes de expansión, o series de tiempo de la evolución de los EOF. Cada columna representa las variaciones en la amplitud de cada modo a lo largo de 147 días calmos. La matriz \mathbf{A} se calcula mediante el producto matricial $\mathbf{A} = \mathbf{U} \otimes \mathbf{S}$ con un tamaño de 147 x 24. Para poder calcular el modelo, se extraen las amplitudes y se multiplican por los EOF, que son modos de variabilidad o funciones ortogonales empíricas, mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{NOCSq}_l = \sum_{i=1}^{l} \mathbf{a}_i \otimes \mathbf{v}_i^T, \text{ donde :}$$

- \mathbf{a}_i es la i -ésima columna (i -ésimo vector) de la matriz \mathbf{A} .
- \mathbf{v}_i es la i -ésima columna (i -ésimo vector) de la matriz \mathbf{V} .
- donde l es el numero de modos(vectores) utilizados para construir el modelo.

Respecto al modelo hay que recordar que cada \mathbf{NOCSq}_l es una matriz de 147 filas x 24 columnas que representan un porcentaje de señal. La suma de los 24 modos devuelve los datos originales. En este trabajo se emplearon uno, dos, tres y cuatro modos para el modelo

NOCS_{q1}, ya que estos representan alrededor del 80 % de la señal original. El siguiente paso es restar **NOCS_{q1}** de los datos crudos de las observaciones, para así obtener la serie corregida $\hat{\mathbf{H}}$:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H} - \mathbf{NOCS}_{q1} \quad (7)$$

3. Corrientes magnetosféricas

Se calcularon seis sistemas de corrientes magnetosféricas con el modelo TS05, para las coordenadas de Tegucigalpa: Birkeland (FAC), Chapman-Ferraro (CF), transversal de la cola región 1 (TAIL-1), transversal de la cola región dos (TAIL-2), anillo parcial (PRC), anillo simétrico (SRC). De estas corrientes se extrajeron sus respectivas matrices de días calmos internacionales. Seguidamente, se proyectó cada matriz de días calmos internacionales sobre los EOF del modelo NOCS_q de Chiripa, para evaluar la contribución de cada corriente magnetosférica a la variación diaria de días calmos en Chiripa.

4. Pruebas estadísticas

Se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson, que son útiles cuando se busca una relación lineal entre variables y cuando ambas variables tienen una distribución normal bivariada. La distribución de los coeficientes de correlación de Pearson puede tener una curva de probabilidad muy sesgada. Por eso se aplica la transformación de Fisher para convertirla en una distribución aproximadamente normal. Además se hizo uso de las pruebas t de significancia de Welch para evaluar si dos distribuciones normales eran significativamente diferentes.

a. Correlaciones de Pearson

Esta prueba estadística se realizó para comparar los datos de Chiripa y el modelo de Tsyganenko en Tegucigalpa, y así encontrar los valores de correlación de Pearson r con valores-p menores a 0,05. Entre mayor sea la cantidad de valores con ese nivel de significancia, nos dará como resultado una mejor correlación.

La fórmula para los coeficientes de correlación de Pearson, está dada por:

$$r(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (A^i - \bar{A})(B^i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (A^i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (B^i - \bar{B})^2}} = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

En donde $A = \text{CRP-}H$ y $B = \text{TEG-}H_{TSY}$, \bar{A} y \bar{B} son las medias de A y B, $cov(A, B)$ es la covarianza entre $\text{CRP-}H$ y $\text{TEG-}H_{TSY}$, σ_A y σ_B son sus desviaciones estándar respectivamente. Un $r=0$ indica que no hay relación lineal entre ambas series de tiempo. Si se obtiene un $r=1$ indica que hay una fuerte relación lineal entre ambas series de datos. Por último, un $r=-1$ indica que hay una fuerte relación lineal negativa entre ambas series de datos.

Esta correlación se aplicó para los datos crudos del observatorio de Chiripa y el modelo de Tsyganenko mas IGRF (en adelante, Tsyganenko total). También se comparó la serie de datos de Chiripa sin la señal de la corriente Sq, contra el modelo de Tsyganenko total sin variación diurna. Por último, para obtener una mejor correlación de los datos, se comparó la serie de datos de Chiripa, removiendo de ella el NOC-Sq para los casos de 1, 2, 3 y 4 modos, con el modelo de Tsyganenko total sin variación diurna. Este procedimiento se hizo tanto para los días con $Kp < 4$ como para los días con $Kp \geq 4$. Los gráficos más significativos de estas correlaciones con $Kp < 4$ se describen en la sección de resultados.

b. Transformada z-Fisher

La transformación z-Fisher se utiliza para convertir histogramas de r a histogramas aproximadamente normales, es decir, z-Fisher es útil para transformar un histograma sesgado a la izquierda a una gaussiana, lo cuál es buen indicativo de que existen pocas anti-correlaciones (valores negativos). Esto se logra con el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

$$z = (0,5)\ln[(1+r)/(1-r)] \quad (8)$$

c. Prueba t de Welch

La prueba t de Welch es una prueba paramétrica muy similar a la t-student, que se emplea cuando las muestras tienen varianzas distintas. En este caso comparamos las correlaciones de valores crudos contra las correlaciones de valores sin variación diurna, normalizadas y transformadas a distribuciones aproximadamente gaussianas. Se usan tres parámetros: cantidad de datos, medias y desviaciones estándar. La hipótesis nula de referencia es: las dos distribuciones son iguales. Se usa un intervalo de confianza de 95 %.

Para probar si dos distribuciones normales son significativamente diferentes, una prueba de Welch se les puede aplicar la prueba t. El parámetro del estadístico t para probar la hipótesis de que dos medias \bar{z}_1 y \bar{z}_2 de dos conjuntos diferentes son iguales es:

$$t = \frac{\bar{z}_1 - \bar{z}_2}{\sigma_{1,2}} \quad (9)$$

donde \bar{z}_1 y \bar{z}_2 son los valores medios de los gaussianos ajustados a los histogramas de z y

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{\sigma_{z_1}^2}{N_1} + \frac{\sigma_{z_2}^2}{N_2}} \quad (10)$$

donde σ_{z_1} y σ_{z_2} son las desviaciones estándar ajustadas, N_1 y N_2 son el número de valores z para calcular cada histograma. El número de grados de libertad (*d.f.*) requeridos para

calcular la distribución t de Student viene dada por

$$d.f = \frac{\sigma_{1,2}^4}{\frac{1}{N_1-1}(\frac{\sigma_{z_1}^2}{N_1})^2 + \frac{1}{N_2-1}(\frac{\sigma_{z_2}^2}{N_2})^2} \quad (11)$$

La hipótesis nula es que las dos distribuciones son iguales. El valor p da la confianza en nuestra decisión, y se calcula a partir del problema de distribución t de Student función de densidad de capacidad (pdf):

$$p = 1 - F(x|d.f.) = 1 - \int_{-\infty}^x \frac{\Gamma(\frac{d.f.+1}{2})}{\sqrt{(d.f.)\pi}\Gamma(\frac{d.f.}{2})(1 + \frac{t^2}{d.f.})^{\frac{d.f.}{2}}} dt \quad (12)$$

donde F es la función de distribución acumulativa y

$$\Gamma(d.f.) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{d.f.-1} dx \quad (13)$$

es una integral impropia convergente definida para todos los números complejos excepto los enteros no positivos, denominada función Gamma (ver, por ejemplo, Weatherburn, 1961). Si d.f. es un entero positivo, $\Gamma(d.f.) = (d.f. - 1)!$

Comparamos el estadístico t con un valor t-crítico, que se calcula a partir de la inversa de la función de distribución acumulativa t de Student (cdf):

$$t_c = F^{-1}(1 - \alpha|d.f.) \quad (14)$$

donde t_c es t-crítico y α el nivel de significancia.

Para un intervalo de confianza (IC) del 95 %, $\alpha = 0.05$. El criterio es:

- Si $t < t_c$, entonces $p > 0.05$ y no podemos rechazar la hipótesis nula (las dos las distribuciones son las mismas).
- Si $t > t_c$, entonces $p < 0.05$ y consideramos que las dos distribuciones son diferentes.

G. Resultados y discusión

1. Análisis de corrientes magnetosféricas

Al proyectarse cada una de las matrices de corrientes magnetosféricas en días calmos sobre los EOF del modelo NOCSq de Chiripa (CRP-NOC-Sq- H), la mayoría de las corrientes magnetosféricas presentan contribuciones significativas a los EOF en el intervalo de mediodía a medianoche (ver figuras 13, 14 y 16). En cambio, en el intervalo medianoche a mediodía, las contribuciones de todas las corrientes a los EOF son bajas (ver figuras 13 y 15). Esto está en correspondencia con la asimetría de la magnetosfera que han reportado Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003, donde las contribuciones de Birkeland y PRC son mayores en lado del atardecer.

Las corrientes de Birkeland son proporcionales al seno de la longitud magnética, por lo que en altitudes bajas alcanzan su punto máximo al amanecer y al anochecer. No obstante, en el lado del amanecer, las corrientes PRC cancelan a las corrientes de Birkeland (Tsyganenko y Sitnov, 2005).

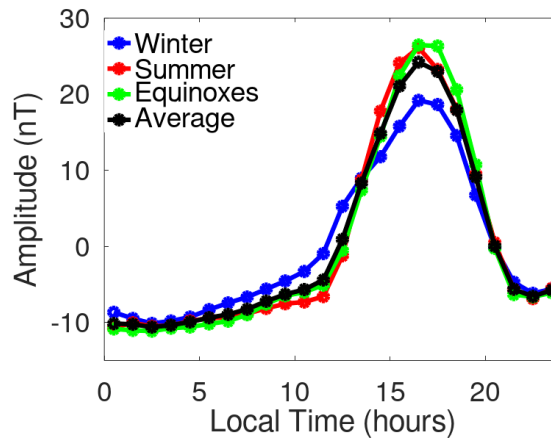


Figura 13: Las curvas de Lloyd representan las medias de los días calmos internacionales de los datos de un observatorio (en este caso, del Observatorio de Chiripa, para el intervalo temporal 2010–2013), agrupados por estaciones: invierno corresponde a los meses de noviembre a febrero; verano a los meses de mayo a agosto; equinoccios comprende los meses de marzo, abril, septiembre y octubre.

2. Análisis de correlaciones de Pearson

Primero tenemos la comparación de los datos crudos de CRP- H y TEG- H_{TSY} , tanto para $K_p < 4$ como para $K_p \leq 4$ (ver figura 17). Vemos que para los días calmos, la correlación entre ambas series de tiempo no es tan mala, ya que hay una buena cantidad de valores altos de r con valores $p \leq 0.05$. En cambio, para los días de tormenta geomagnética, se obtuvieron pocos datos; pero la mayoría de estos, son valores de r arriba de 0.5, con valores $p \leq 0.05$.

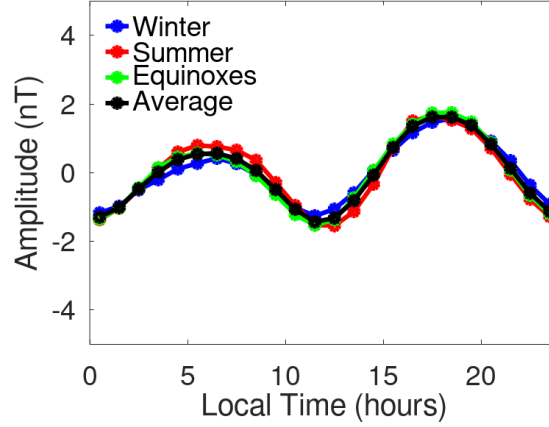


Figura 14: Curvas de Lloyd para las corrientes de Birkeland.

Luego se puede ver en la figura 18, hay un incremento de correlaciones r con valores $p \leq 0,05$, cuando se remueve el Sq de CRP- H y cuando se remueve la QDV de TEG- H_{TSY} , para días con $Kp < 4$ (panel izquierdo). Esto sucede porque el modelo TS05 no incluye la señal ionosférica. Entonces al quitar las corrientes Sq de los datos de Chiripa (CRP- H -wo-Sq), estos se correlacionan mejor con los valores del modelo sin variación diaria en días calmos (TEG- H_{TSY} -wo-QDV). En cambio, para días con $Kp \geq 4$ (panel derecho), no se aprecia mejoría significativa en las correlaciones (ver Castillo, 2018).

Una buena correlación se obtuvo cuando se restó el NOC-Sq de dos modos a los datos de Chiripa (CRP-wo-NOCsq₂- H) y se comparó con la serie de tiempo de TEG- H_{TSY} -wo-QDV. Observamos en la figura 19 un aumento de los valores de r con $p \leq 0,05$, para $Kp < 4$, respecto a la correlación de datos crudos.

En todas las figuras observamos que existe un sesgo hacia la izquierda y para lograr una distribución normal de estos valores, se recurrió a otros métodos estadísticos, tal como veremos a continuación.

3. Análisis de la prueba t de Welch

La Figura 20 muestra los valores resultantes de la prueba t-Welch que compara CRP- H versus TEG- H_{TSY} con CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD en días con $Kp < 4$, obteniéndose un valor de t mayor que el t -crítico. Esto significa que las distribuciones semi-normales entre ambas correlaciones no son iguales. De nuevo, se aprecia una mejora en la distribución z-Fisher de las correlaciones CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD, respecto a las correlaciones CRP- H versus a TEG- H_{TSY} , con una media de z-Fisher de 0,56 para el primer caso.

Para los días activos, cuando se resta la variación diaria, no hay un cambio significativo cuando comparamos las mismas correlaciones (ver Figura 21), porque la variación diaria es mucho menor que los valores de H - en estos casos (media de z-Fisher = 0,55).

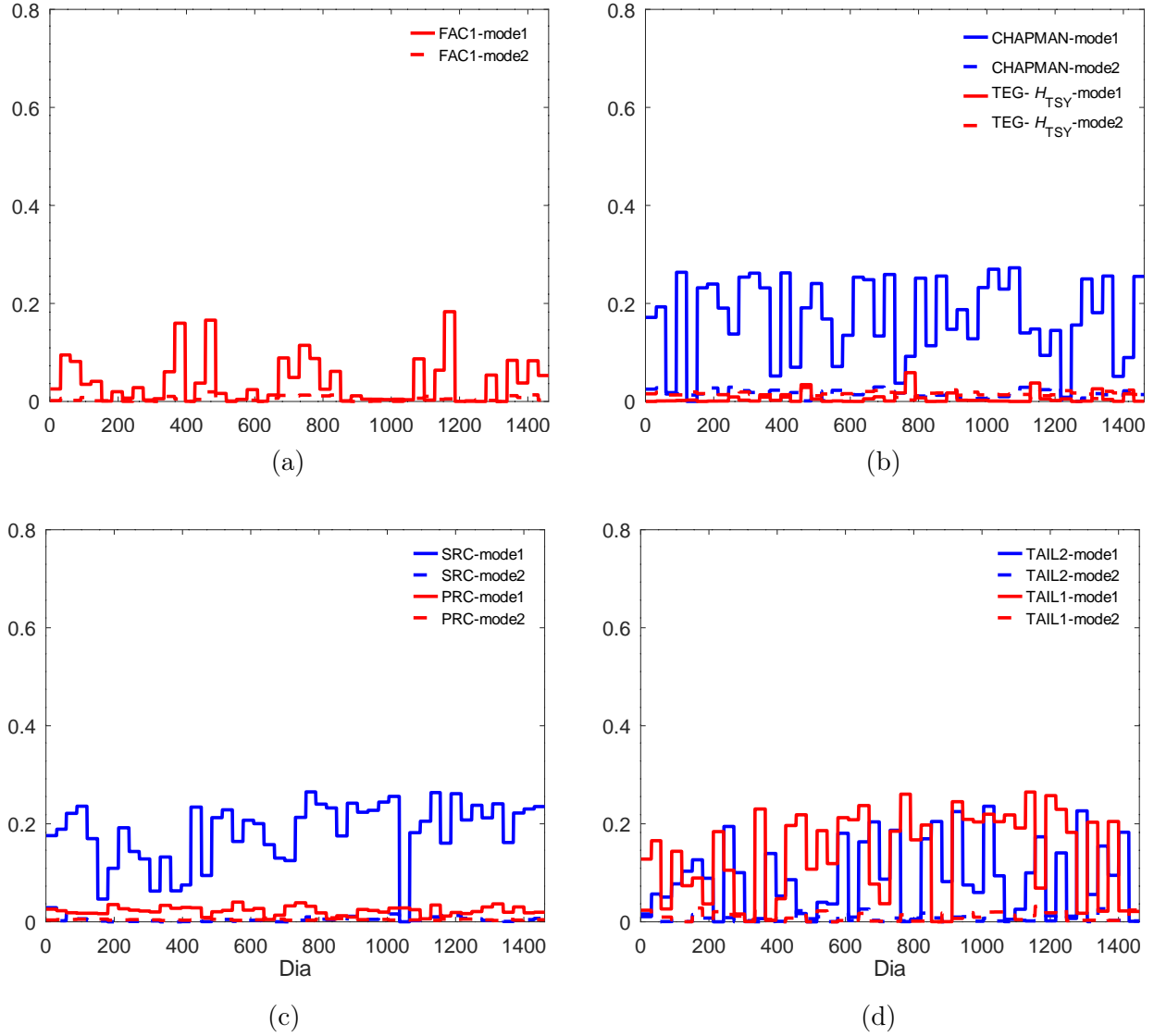


Figura 15: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H - de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 0,00 a 12,00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

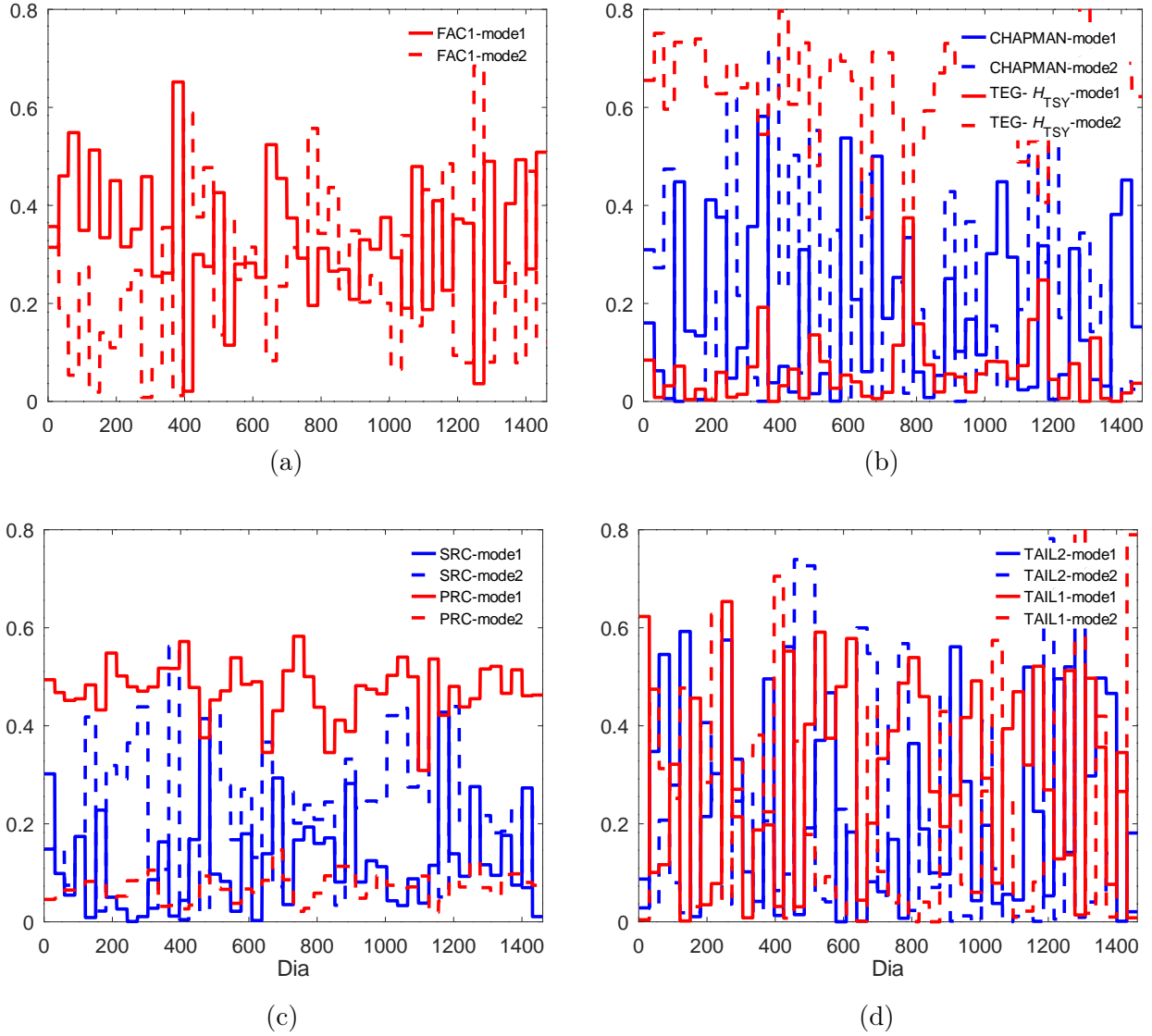


Figura 16: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H - de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 12,00 a 0,00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

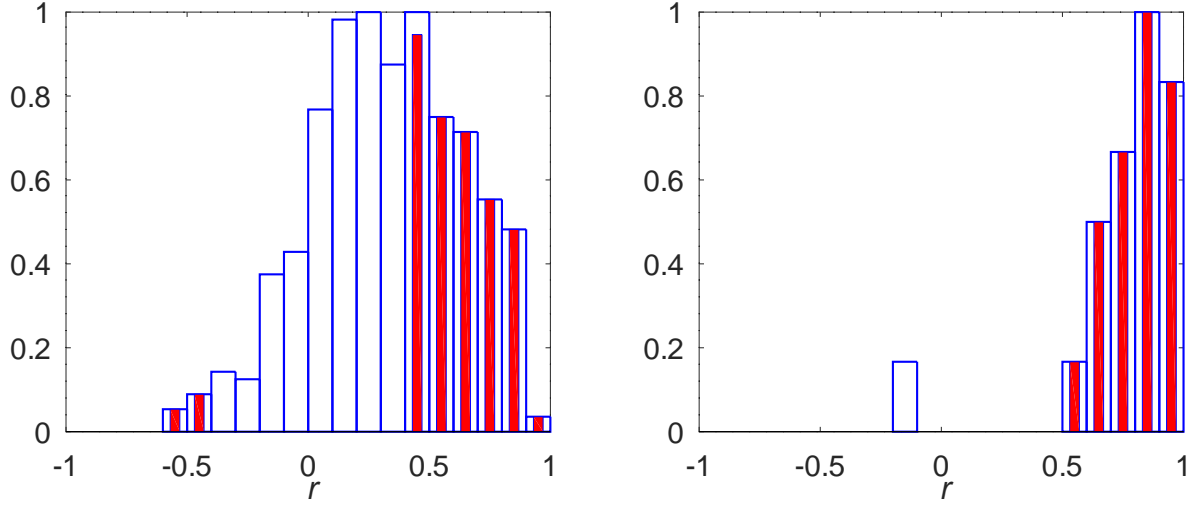


Figura 17: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP- H y TEG- H_{TSY} para $K_p < 4$. Derecha: Igual que el panel izquierdo para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

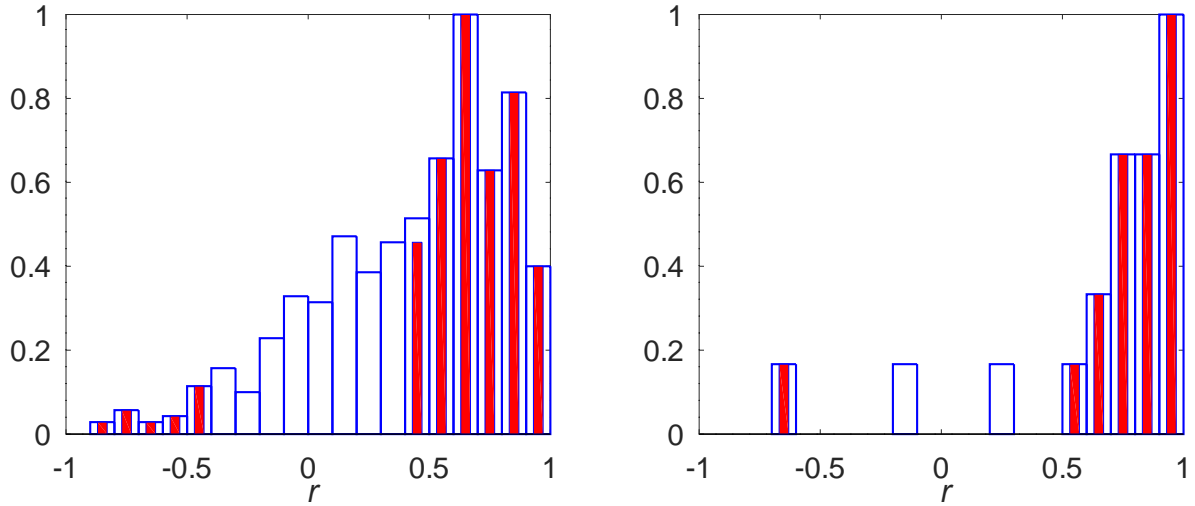


Figura 18: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP- H -wo-Sq y TEG- H_{TSY} -wo-QDV para $K_p < 4$. Derecha: Igual que el panel izquierdo, para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son los recuentos de todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

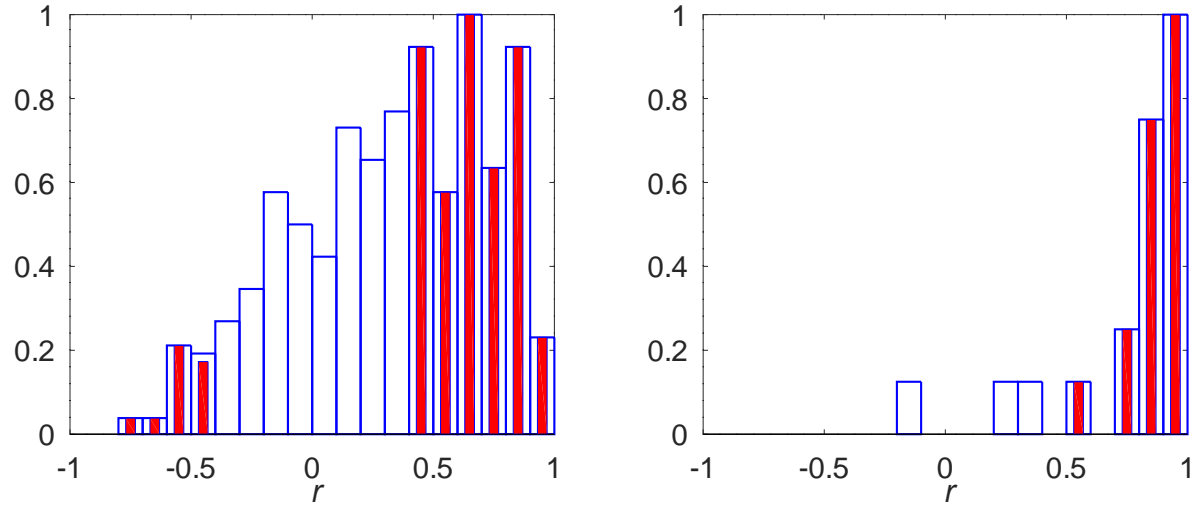


Figura 19: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP-wo-NOCSq₂- H y TEG- H_{TSY} -wo-QDV para $K_p < 4$. Derecha: Igual al panel izquierdo, para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

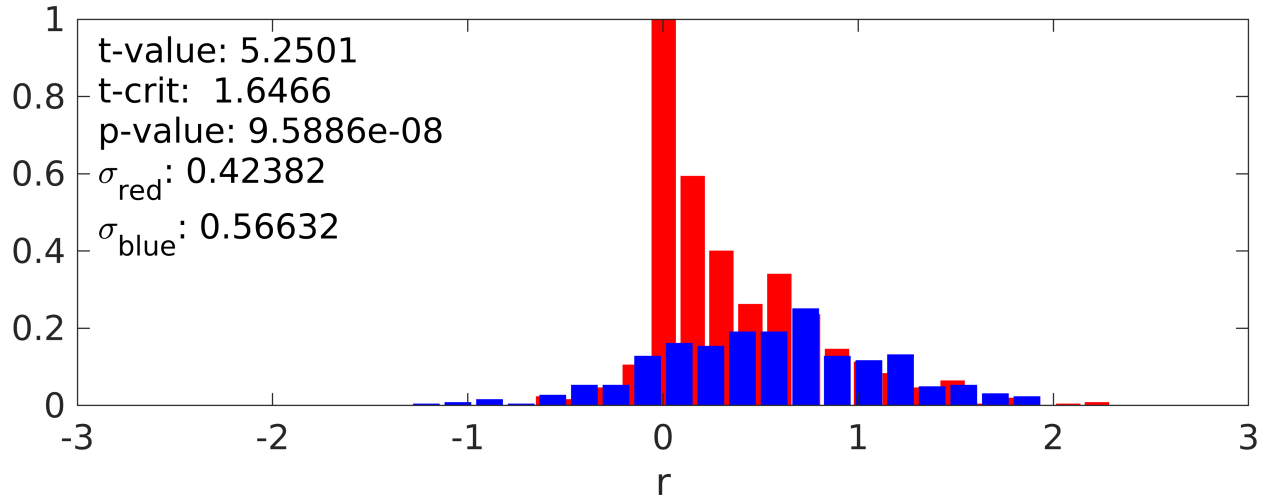


Figura 20: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP- H versus TEG- H_{TSY} (rojo) y el correspondiente CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QDV (azul), en días con $K_p < 4$

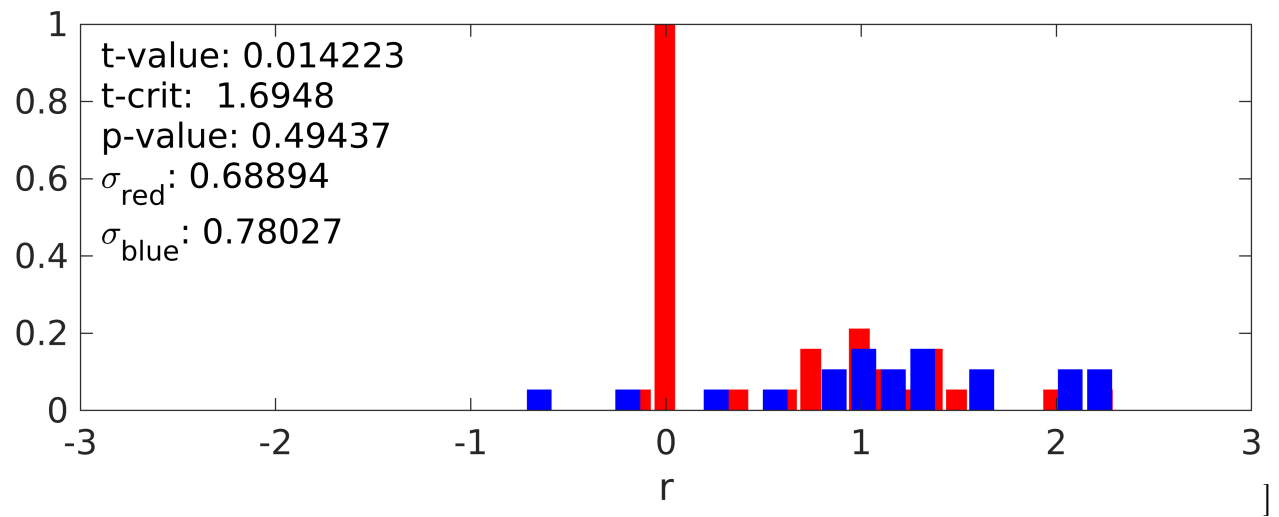


Figura 21: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP- H versus TEG- H_{TSY} (rojo) y el correspondiente CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QDV (azul), en días con $Kp \geq 4$.

H. Conclusiones

- Es conocido que la variación diaria en días calmos, Sq , contiene una contribución de las corrientes magnetosféricas (e.g., Xu, 1992; Yamazaki y Maute, 2017; Lühr y col., 2017) y que durante las tormentas geomagnéticas, la depresión en la componente horizontal H - se incrementa considerablemente en el sector del atardecer (e.g., Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003; Tsyganenko y Sitnov, 2005. En la latitud de Tegucigalpa, encontramos que también para días calmos, la influencia magnetosférica parece ser considerablemente mayor en el sector del atardecer (12,00 – 0,00 horas tiempo local), respecto al sector del amanecer (0,00 – 12,00 horas), para todas las corrientes magnetosféricas, especialmente el anillo parcial de corriente y las corrientes de Birkeland, cuya contribución siempre es positiva (ver figuras 15 y 16). Se requiere realizar un análisis mas detallado para identificar porqué son mas importantes las contribuciones de los modos 1 o 2 en cada caso (ver Xu y Kamide, 2004; De Michelis, Tozzi y Consolini, 2010; Castillo y col., 2017).
- La contribución del modo 2 de la suma de las corrientes magnetosféricas ($TEG-H_{TSY}$) en el sector del atardecer es considerablemente mayor (30 % a 80 %) que en el sector del amanecer (muy cercana a cero). Se debe analizar el porqué contribuye mas que el modo 1 (ver Xu y Kamide, 2004; De Michelis, Tozzi y Consolini, 2010).
- Las correlaciones entre datos de Chiripa y el modelo TS05 en días con $Kp < 4$ mejoran al remover de los datos de Chiripa la variación diaria en días calmos, debido a que así se remueve la contribución de la ionosfera, la contribución de la magnetosfera en días calmos y la contribución de litosfera, mientras que del modelo TS05 se remueve solo contribución magnetosférica en días calmos (ver Castillo, 2018).
- Por otro lado, las correlaciones en días con $Kp \geq 4$ (20 días) no mejoran significativamente cuando se remueven las respectivas variaciones diurnas en días calmos, porque la contribución de variación diaria es mucho menor a la intensidad de una tormenta. Esto se refleja en la prueba t de Welch, que nos indica que no hay mayor diferencia entre las correlaciones con datos crudos y las correlaciones corregidas. No obstante, la muestra es muy pequeña y se recomienda repetir el proceso para una muestra estadísticamente significativa (ver Castillo, 2018).
- Una vez obtenidos los datos del Observatorio Magnético, se propone replicar la metodología aquí desarrollada para analizar la influencia de las corrientes magnetosféricas en el sitio del observatorio y validar el uso del modelo TS05 para futuros estudios de geofísica y de amenazas de clima espacial, e.g., efectos de corrientes inducidas en transformadores de líneas primarias de potencia eléctrica (e.g., Alves-Ribeiro, Pinheiro y Pais, 2021), prevención de riesgos sísmicos (e.g., KUK-ÀHPÁN, 2021), etc.

I. Plan de trabajo

Nº	Actividad	Meses
1	Lectura de libros, tesis, papers y sitios Web.	may - jul 2021
2	Elaboración de la estructura inicial de la propuesta de tesis.	jun 2021
3	Cálculo de IGRF con GEOPACK-2008 para Fortran 95.	jun 2021
4	Limpieza de datos horarios Chiripa de 2010-2013.	jun 2021
5	Remoción de la media diurna de los datos de Chiripa.	jun 2021
6	Cálculo de modelo de variación diurna en días calmos.	jun 2021
7	Proyección de matrices de días calmos internacionales de las corrientes magnetosféricas sobre los EOF del modelo Sq.	jul 2021
8	Correlaciones de Pearson entre datos CRP y modelo Tsyganenko, tanto con valores crudos como con valores sin QDV.	jul 2021
9	Utilizar la transformada de z-Fisher para convertir histogramas sesgados a histogramas semi-gaussianos.	jul 2021
10	Hacer la prueba de t-Welch entre las correlaciones de valores crudos y las correlaciones de valores sin QDV.	jul 2021
11	Elaboración y selección de gráficos para propuesta de tesis.	jul 2021
12	Elaboración de póster para reunión de otoño de AGU 2021, con los resultados obtenidos a la fecha.	jul 2021
13	Corrección y revisión de propuesta de tesis.	ago 2021
14	Defensa de propuesta de tesis.	ago 2021
15	Desarrollo de la metodología con los datos del Observatorio Magnético de Honduras y el modelo TS05 en las mismas coordenadas del observatorio.	sep - oct 2021
16	Análisis de resultados, discusión y conclusiones.	nov - dic 2021
17	Revisiones del borrador de tesis.	ene - feb 2022
18	Defensa de tesis.	mar 2022

J. Referencias bibliográficas

- Alves-Ribeiro, J., F.J.G. Pinheiro y M.A. Pais (2021). «First estimations of geomagnetically induced currents in the South of Portugal». En: *Space Weather* 19. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020SW002546>.
- Atmospheric Research, University Corporation for (2014). *The Ionosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/ionosphere>.
- Baumjohann, W y R Nakamura (2007). «Magnetospheric contributions to the terrestrial magnetic field». En: 5, págs. 77-92.
- Bäumen, H.H. Schulte in dem, D. Moran, M. Lenzen, I. Cairns y A. Steenge (2014). «How severe space weather can disrupt global supply chains». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 2749–2759. DOI: <http://10.5194/nhess-14-2749-2014>.
- Cannon, Paul, Matthew Angling, Les Barclay, Charles Curry, Clive Dyer, Robert Edwards, Graham Greene, Michael Hapgood, Richard Horne, David Jackson, Cathryn Mitchell, John Owen, Andrew Richards, Christopher Rogers, Keith Ryden, Simon Saunders, Sir Martin Sweeting, Rick Tanner, Alan Thomson y Craig Underwood (2013). *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. last access: 9 September 2014. London. URL: <http://www.raeng.org.uk/spaceweather>.
- Castillo, Yvelice (2018). «The impact of solar activity on terrestrial ionosphere and magnetosphere using observational data of the Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra». Tesis doct. Universidade de Coimbra.
- Castillo, Yvelice, Maria Alexandra Pais, João Fernandes, Paulo Ribeiro, Anna L. Morozova y Fernando J.G. Pinheiro (2017). «Geomagnetic activity at Northern Hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using TS05 model». En: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 165-166, págs. 38-53. ISSN: 1364-6826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682617303668>.
- De Michelis, P., R. Tozzi y G. Consolini (2010). «Principal components' features of mid-latitude geomagnetic daily variation». En: *Annales Geophysicae* 28.12, págs. 2213-2226. DOI: 10.5194/angeo-28-2213-2010. URL: <https://angeo.copernicus.org/articles/28/2213/2010/>.
- Eastwood, J. P., E. Biffis, M. A. Hapgood, L. Green, M. M. Bisi, R. D. Bentley, R. Wicks, L.-A. McKinnell, M. Gibbs y C. Burnett (2017). «The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand?». En: *Risk Analysis* 37.2, págs. 206-218. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12765>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/risa.12765>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/risa.12765>.
- Finlay, C. C., S. Maus, C. D. Beggan, T. N. Bondar, A. Chambodut, T. A. Chernova, A. Chulliat, V. P. Golovkov, B. Hamilton, M. Hamoudi, R. Holme, G. Hulot, W. Kuang, B. Langlais, V. Lesur, F. J. Lowes, H. Lühr, S. Macmillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle, I. Michaelis, N. Olsen, J. Rauberg, M. Rother, T. J. Sabaka, A. Tangborn, L. Tøffner-Clausen, E. Thébaud, A. W. P. Thomson, I. Wardinski, Z. Wei y T. I. Zvereva (dic. de 2010). «International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation». En: *Geophysical Journal International* 183.3, págs. 1216-1230. ISSN: 0956-

- 540X. DOI: {10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x}. eprint: <https://academic.oup.com/gji/article-pdf/183/3/1216/1785065/183-3-1216.pdf>.
- Frazier, Sarah y Lina Tran (2019). *10 Things to Know About the Ionosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/news/1127/10-things-to-know-about-the-ionosphere/>.
- Homeier, Nicole y Lisa Wei (2013). *Solar Storm risk to the North American grid*. last access: 4 June 2014. URL: <https://www.lloyds.com/~media/lloyds/reports/emerging-risk-reports/solar-storm-risk-to-the-north-american-electric-grid.pdf>.
- Hussey, J. (2014). *Bang to Eternity and Betwixt: Cosmos*. John Hussey. URL: <https://books.google.cz/books?id=NhHvAwAAQBAJ>.
- Jankowski, Jerzy y Christian Sucksdorff (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice*. eprint: <http://www.iaga-aiga.org/data/uploads/pdf/guides/iaga-guide-observatories.pdf>.
- KUK-ÀHPÁN, Proyecto (2021). *KUK ÀHPÁN: Estudio regional integrado de la estructura y evolución 4D de la litosfera en América Central. Implicaciones en el cálculo de la amenaza y riesgo sísmico*. URL: <https://blogs.upm.es/proyektokukahpan/sobre-el-proyecto/>.
- Lanzerotti, L.J. (2000). «Space Weather Effects on Communications». En: *Space Storms and Space Weather Hazards* 18, págs. 313-334.
- Luhmann, J. G. y S. C. Solomon (2014). *Encyclopedia of the Solar System*. Tomado de ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/planetary-magnetosphere>.
- Lühr, Hermann, Chao Xiong, Nils Olsen y Guan Le (2017). «Near-Earth Magnetic Field Effects of Large-Scale Magnetospheric Currents». En: *Space Science Reviews* 206, págs. 521-545. DOI: 10.1007/s11214-016-0267-y.
- Monge, L., C. Alvarado Briceño, M. Molinac, F. Zorto, E. Gross, J. Mejuto, V. Hernández y M. Becker (2018). «MORAZÁN MRZ-SAT cubesat project for integration of the Central American Nations trough collaboration in space». En: URL: https://www.researchgate.net/publication/336889086_MORAZAN_MRZ-SAT_CUBESAT_PROJECT_FOR_INTEGRATION_OF_THE_CENTRAL_AMERICAN_NATIONS_TROUGH_COLLABORATION_IN_SPACE.
- NASA (2021). *Earth's Magnetosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://www.nasa.gov/magnetosphere>.
- NOAA (2011a). *radio blackout*. Last accessed 11 August 2021. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- NOAA (2011b). *Solar Radiation Storm*. Last accessed 11 August 2021. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-radiation-storm>.
- (Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research), OFCMS (1995). *The National Space Weather Program - Strategic Plan*.
- Oughton, E., J. Copic, A. Skelton, V. Kesaite, Z. Y. Yeo, S. J. Ruffle, M. Tuveson, A. W. Coburn y D. Ralph (2016). «Helios Solar Storm Scenario». En:
- Pirjola, R. J., A. Viljanen, A. Pulkkinen y O. Amm (2000). «Space weather risk in power systems and pipelines». En: 25 (4), págs. 333-337. DOI: <https://doi.org/10.1016/S1464->

- 1917(00)00027-1. eprint: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464191700000271>.
- Portillo, German (2020). *Campo Magnetico terrestre*. Last accessed 19 July 2021. URL: https://www.meteorologiaenred.com/campo-magnetico-terrestre.html#Importancia_del_campo_magnetico.
- Pulkkinen, T. (2007). «Space Weather: Terrestrial Perspective». En: *Space Storms and Space Weather Hazards* 4. accessed 27 May 2010. URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-1>.
- Sitnov, M. I. (2011). «Empirical Modeling of the Geomagnetic Field». En: Last accessed 11 August 2021. URL: https://rbspgway.jhuapl.edu/geomag_field/model/index.html.
- Sitnov, M. I., N. A. Tsyganenko, A. Y. Ukhorskiy y P. C. Brandt (2008). «Dynamical data-based modeling of the storm-time geomagnetic field with enhanced spatial resolution». En: *Journal of Geophysical Research* 113.A07218. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JA013003>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JA013003>.
- Tsyganenko (1998). «Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method». En: *Journal of Geophysical Research* 103.A4, 23551–23563. DOI: <https://doi.org/10.1029/98JA02292>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/98JA02292>.
- Tsyganenko, Dr. N. A. (2021). *Tsyganenko Magnetic Field Model and GEOPACK s/w*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/magnetos/tsygan.html>.
- Tsyganenko, N. A. (2014). «Data-based modeling of the geomagnetosphere with an IMF-dependent magnetopause». En: *J. Geophys. Res. Space Physics*, 335–354. DOI: 10.1002/2013JA019346.
- Tsyganenko, N. A., H. J. Singer y J. C. Kasper (2003). «Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get?». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 108.A5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JA009808>.
- Tsyganenko, N. A. y M. I. Sitnov (2005). «Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A3. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2004JA010798>.
- Turbitt, C. (2018). *Data Processing. IAGA-Workshop 2018 Summer School*. URL: <https://cobs.zamg.ac.at/iaga2018/index.php/downloads/summary/3-summer-school/3-lecture-chris-turbitt-dataanalysis>.
- Wei, L. H., N. Homeier y J. L. Gannon (2013). «Surface electric fields for North America during historical geomagnetic storms». En: 11, págs. 451-462. DOI: <https://doi.org/10.1002/swe.20073>.
- Xu, Wen-Yao (1992). «Effects of the Magnetospheric Currents on the Sq-Field and a New Magnetic Index Characterizing Sq Dynamo Current Intensity». En: *Journal of geomagnetism and geoelectricity* 44.6, págs. 449-458. DOI: 10.5636/jgg.44.449.

- Xu, Wen-Yao e Y. Kamide (2004). «Decomposition of daily geomagnetic variations by using method of natural orthogonal component». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 109.A5. DOI: 10.1029/2003JA010216. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2003JA010216>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003JA010216>.
- Yamazaki, Yosuke y Astrid Maute (2017). «Sq and EEJ—A review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents». En: *Space Science Reviews* 206.1-4, págs. 299-405. DOI: 10.1007/s11214-016-0282-z. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-016-0282-z>.