

# CÁLCULO DE COMPONENTES LOCALES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE EN HONDURAS, EMPLEANDO EL MODELO DE TSYGANENKO y SITNOV 2005

Yvelice Soraya Castillo Rosales<sup>1,\*</sup>, Allan Calderini<sup>1,†</sup>, Carmen Díaz<sup>1,‡</sup>, Daysi Gómez<sup>1,§</sup>,  
Misael Espinal<sup>1,¶</sup>, Oscar García<sup>1,||</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Astronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de Honduras

**Recibido:** 01/junio/2022

**Aceptado:** 04/noviembre/2022

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v14i1.15635>

## RESUMEN

La Universidad Nacional Autónoma de Honduras instalará el Primer Observatorio Magnético de Honduras, para capturar las fuentes naturales del vector de campo magnético local. Proponemos una metodología para analizar sus datos, comparándolos con datos de observatorios cercanos, con el Modelo de Campo Geomagnético de Referencia Internacional, con el modelo semi-empírico de magnetosfera terrestre de Tsyganenko, N. y Sitnov, M., 2005. La componente geomagnética local horizontal ( $H-$ ) es calculada para las coordenadas del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa, Tegucigalpa, Honduras (TEG- $H_{TSY}$ ), en el intervalo temporal 2010 – 2013, utilizando los modelos. Para el mismo intervalo temporal, se extrae la componente  $H-$  local del Observatorio Chiripa, Costa Rica (CRP- $H$ ), y su variación diaria en días calmos (Sq- $H$ ), empleando los días calmos internacionales. Se calculan los coeficientes de correlación de Pearson entre TEG- $H_{TSY}$  y CRP- $H$ . Las mejores correlaciones se obtienen en días con índice planetario  $Kp < 4$ , cuando Sq- $H$  y la variación diurna son removidas de CRP- $H$  y de TEG- $H_{TSY}$ , respectivamente. Un modelo (NOCSq) es elaborado a partir del Sq- $H$  de Chiripa, empleando funciones ortogonales empíricas (EOF). Al proyectar sobre los EOF las matrices de corrientes magnetosféricas de Tegucigalpa en días calmos, estas representan porcentajes considerables de los EOF, en el intervalo 12,00 – 24,00 hora local.

**Palabras clave:** Observatorio Magnético de Honduras, Corrientes magnetosféricas, Sq, Tsyganenko y Sitnov 2005, Campo magnético local.

## ABSTRACT

The National Autonomous University of Honduras is installing the First Magnetic Observatory of Honduras, in order to capture the natural sources of the local magnetic field vector. We propose a methodology to analyze its data, comparing with near observatories data, with the International Geomagnetic Reference Field, with the Earth's magnetospheric semi-empirical model of Tsyganenko and Sitnov 2005. The local horizontal geomagnetic component ( $H-$ ) is computed for the Suyapa Central

\*[yvelice.castillo@unah.edu.hn](mailto:yvelice.castillo@unah.edu.hn)  <https://orcid.org/0000-0003-3119-6512>

†[allan.calderini@unah.hn](mailto:allan.calderini@unah.hn)

‡[cgdiazr@unah.hn](mailto:cgdiazr@unah.hn)

§[daysi.gomez@unah.hn](mailto:daysi.gomez@unah.hn)

¶[misael.espinal@unah.edu.hn](mailto:misael.espinal@unah.edu.hn)

||[ogarciam@unah.hn](mailto:ogarciam@unah.hn)

American Astronomical Observatory, Tegucigalpa, Honduras coordinates ( $TEG-H_{TSY}$ ), in the temporal interval 2010 – 2013, using the models. For the same time interval, the local  $H$ – component of Chiripa Observatory, Costa Rica ( $CRP-H$ ), and its quiet daily variation ( $Sq-H$ ) obtained from the international quiet days are extracted from data. Pearson correlation coefficients are computed between  $TEG-H_{TSY}$  and  $CRP-H$ . Better correlations are obtained in days with planetary index  $K_p < 4$ , when  $Sq$  and diurnal variation are removed from  $CRP-H$  and  $TEG-H_{TSY}$ , respectively. A model (NOCSq) is computed from the Chiripa  $Sq-H$ , using empirical orthogonal functions (EOFs). When Tegucigalpa's magnetospheric currents quietest days matrices are projected into EOFs, they represent EOF's significative percentages in the 12,00 – 24,00 local time interval.

**Keywords:** Magnetic Observatory of Honduras, magnetospheric currents,  $Sq$ , Tsyganenko and Sitnov 2005, local magnetic field.

## 1 Introducción

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 (Turbitt, 2018). Los datos de los observatorios magnéticos registran 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, el Sol y el medio interplanetario. Estos datos son necesarios para la investigación en geomagnetismo a nivel mundial. En América Central hay muy pocos observatorios, por tanto, muy pocos datos. Un observatorio en Honduras podría mejorar esta situación y es de mucho interés para la comunidad de geomagnetismo internacional (Borodin *et al.*, 2011). Agregar datos magnéticos de Centroamérica al modelo de campo de referencia geomagnético internacional (IGRF) es valiosísimo para la navegación marítima. Los barcos utilizan este modelo para guiarse en largas travesías por el Atlántico, y actualmente hace falta una medición precisa y continua del campo magnético en esta región del mundo. Los datos pueden ser empleados para un amplio rango de trabajos de investigación en geofísica, para prevención de riesgos sísmicos (Proyecto KUK'ÁHPÁN, 2021), de amenazas de clima espacial (Hapgood y Thomson, 2010), trabajos de prospección, estudios de suelo y otras aplicaciones de ingeniería y geofísica. Una aplicación es la medición del fuerte impacto que los eventos de clima espacial, las tormentas eléctricas y los huracanes tienen sobre las redes primarias de transformadores y generadores de potencia, sobre antenas de telecomunicaciones y otras tecnologías, provocado por corrientes geomagnéticas inducidas (Alves Ribeiro *et al.*, 2021) y que puede representar pérdidas de miles de millones a nivel mundial (Hapgood y Thomson, 2010). El observatorio puede involucrar a la UNAH en cooperaciones con institutos geomagnéticos internacionales, en investigaciones de campo magnético principal y de clima espacial, como la red de observatorios magnéticos INTERMAGNET o el World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh, quienes están apoyando este proyecto (Borodin *et al.*, 2011).

## 2 Objetivo general

Analizar un modelo de las componentes geomagnéticas locales, calculadas para las coordenadas del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa ( $14^{\circ} 5' N$ ,  $87^{\circ} 9' O$ ), 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, como fase preliminar para la instalación del primer Observatorio Magnético de Honduras, con el que se realizarán estudios geofísicos, de amenazas sísmicas y de clima espacial.

### 3 *Objetivos específicos*

- Comparar las componentes del campo magnético local calculadas en el OACS/UNAH, 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 de amenazas naturales.
- Modelar la variación diaria en días calmos para las coordenadas del OACS/UNAH, así como las contribuciones de cada una de las corrientes de la magnetosfera terrestre a la misma.
- 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 tormentas geomagnéticas.

## 4 *Metodología*

### 4.1 *Cómputo de componente horizontal (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 \(2005\)](#). 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 1 muestra estas series junto con los datos del Observatorio Chiripa (CRP- $H$ ) para el intervalo de tiempo 2010 – 2013.

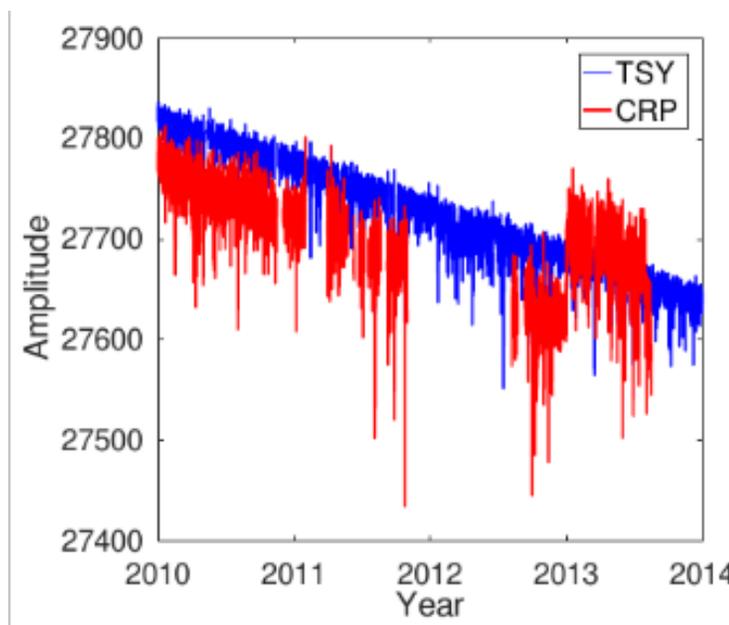


Figura 1: Valores de TEG-HTSY (azul) y datos de CRP-H (rojo) obtenidos del Centro Mundial de Datos para Geomagnetismo de Edinburgo (World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh).

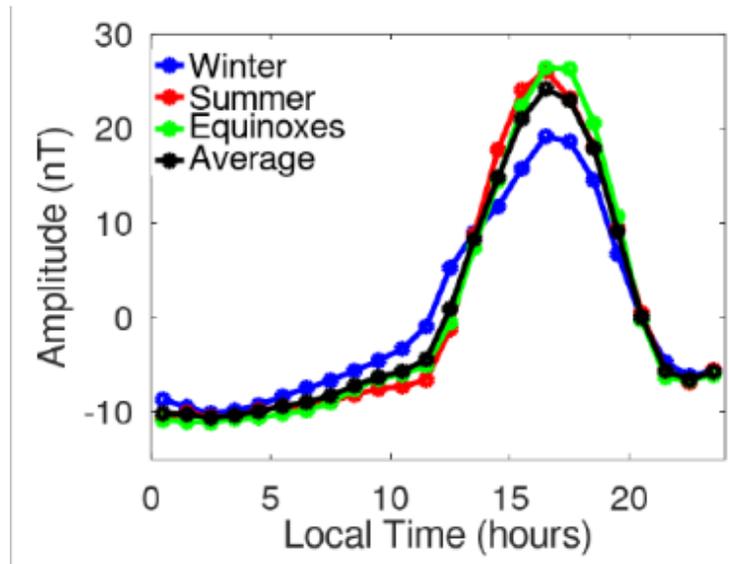


Figura 2: Las curvas de Lloyd representan las medias de los días calmos internacionales de los datos de un observatorio (en este caso, del Observatorio de Chiripa, para el intervalo temporal 2010 – 2013), agrupados por estaciones: invierno corresponde a los meses de noviembre a febrero; verano a los meses de mayo a agosto; equinoccios comprende los meses de marzo, abril, septiembre y octubre. La curva negra es el promedio anual.

## 4.2 Variación 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 (Castillo, 2018). La Figura 2 muestra las curvas de Lloyd para los días calmos internacionales del Observatorio Chiripa, promediadas por meses y años.

Primero se extraen los datos de CRP en los días calmos internacionales y se colocan 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 remueven las filas en donde existían vacíos de datos. En total, se obtuvieron 147 días con datos completos. A la matriz filtrada se le aplica el análisis de descomposición de valores singulares, factorizando la matriz original en tres matrices.

$$S_q = USV^T$$

donde  $S_q$  es la matriz de datos de los días calmos internacionales, con dimensiones  $147 \times 24$ ;  $U$  es una matriz  $147 \times 147$ , con los autovectores normalizados de la matriz  $S_q \otimes S_q^T$ ;  $V$  es una matriz  $24 \times 24$ , con los autovectores normalizados de la matriz  $S_q^T \otimes S_q$ , o EOF;  $S$  es una matriz de tamaño  $147 \times 24$  matriz, con 24 valores singulares de  $S_q$ .

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  $A$  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  $A$  se calcula de la siguiente forma  $A = U \otimes S$  con un tamaño de  $147 \times 24$ . 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:

$$NOCS_{ql} = \sum_{i=1}^{i=l} a_i \otimes v_i^T$$

donde  $a_i$  es la  $i$ -ésima columna ( $i$ -ésimo vector) de la matriz  $\mathbf{A}$ ;  $v_i$  es la  $i$ -ésima columna ( $i$ -ésimo vector) de la matriz  $\mathbf{V}$ ;  $l$  es el numero de modos utilizados.

Respecto al modelo hay que recordar que cada  $NOCS_{ql}$  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  $NOCS_{ql}$ , ya que estos representan alrededor del 80% de la señal original. El siguiente paso es restar  $NOCS_{ql}$  de los datos crudos de las observaciones, para así obtener la serie corregida  $\hat{\mathbf{H}}$ :  $\hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{H}} - NOCS_{ql}$ .

### 4.3 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  $NOCS_{ql}$  de Chiripa, para evaluar la contribución de cada corriente magnetosférica a la variación diaria de días calmos en Chiripa.

### 4.4 Pruebas estadísticas

#### 4.4.1 Correlaciones de Pearson

Esta prueba estadística se realizó para comparar los datos del observatorio Chiripa (CRP- $H$ ) contra los valores generados por la suma de los modelos TS05 mas IGRF calculados para las coordenadas de Tegucigalpa (en adelante, TEG- $H_{TSY}$ ). Se seleccionaron coeficientes de correlación de Pearson  $r$  con nivel de significancia de 0.95 (valores- $p$  menores a 0.05).

También se comparó la serie de datos de Chiripa sin la señal de la corriente Sq (CRP- $H$ -wo-Sq), contra el modelo en Tegucigalpa sin variación diurna (TEG- $H_{TSY}$ -wo-QDV). Por último, 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 TEG- $H_{TSY}$ -wo-QDV (sin variación diurna). Se siguió este procedimiento tanto para los días con  $K_p < 4$  como para los días con  $K_p \geq 4$ . Los gráficos más significativos de estas correlaciones se describen en la sección de resultados.

#### 4.4.2 Transformada z-Fisher

La transformada 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.

$$z = 0.5 \ln \frac{(1+r)}{(1-r)}$$

### 4.4.3 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. 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:

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

donde  $\bar{z}_1$  y  $\bar{z}_2$  son los valores medios de los gaussianos ajustados a los histogramas de  $Z_1$  y  $Z_2$ .

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{\sigma_{z1}^2}{N_1} + \frac{\sigma_{z2}^2}{N_2}}$$

donde  $\sigma_{z1}$  y  $\sigma_{z2}$  son las desviaciones estándar ajustadas,  $N_1$  y  $N_2$  son el número de valores z para calcular cada histograma.

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. 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 iguales); si  $t > t_c$ , entonces  $p < 0.05$  y consideramos que las dos distribuciones son diferentes.

## 5 Resultados y discusión

### 5.1 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 Figura 4). En cambio, en el intervalo medianoche a mediodía, las contribuciones de todas las corrientes a los EOF son bajas (ver Figura 3). Esto está en correspondencia con la asimetría de la magnetosfera que han reportado Tsyganenko *et al.* (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 anoecer. No obstante, en el sector del amanecer, las corrientes PRC cancelan a las corrientes de Birkeland.

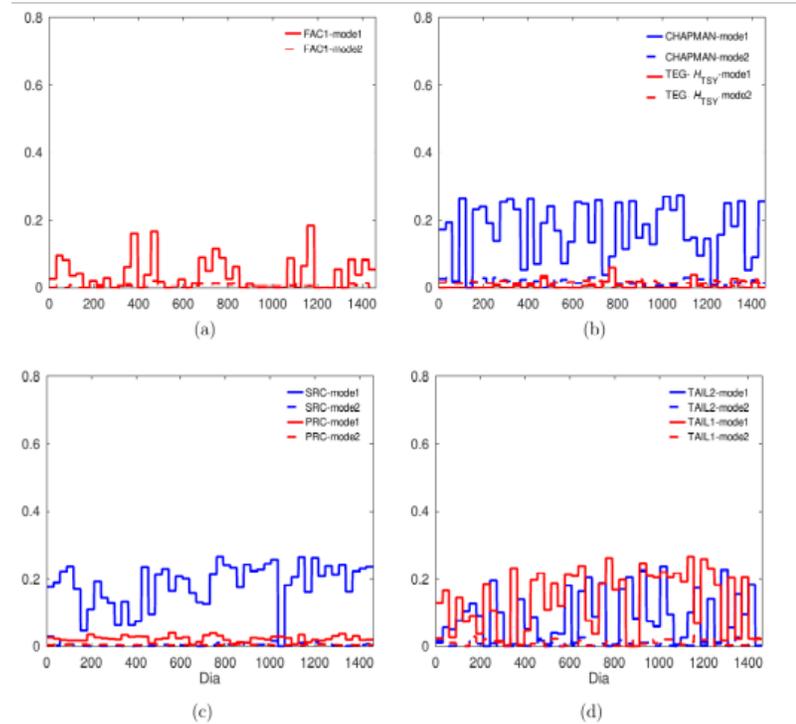


Figura 3: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H- de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 0.00 a 12.00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

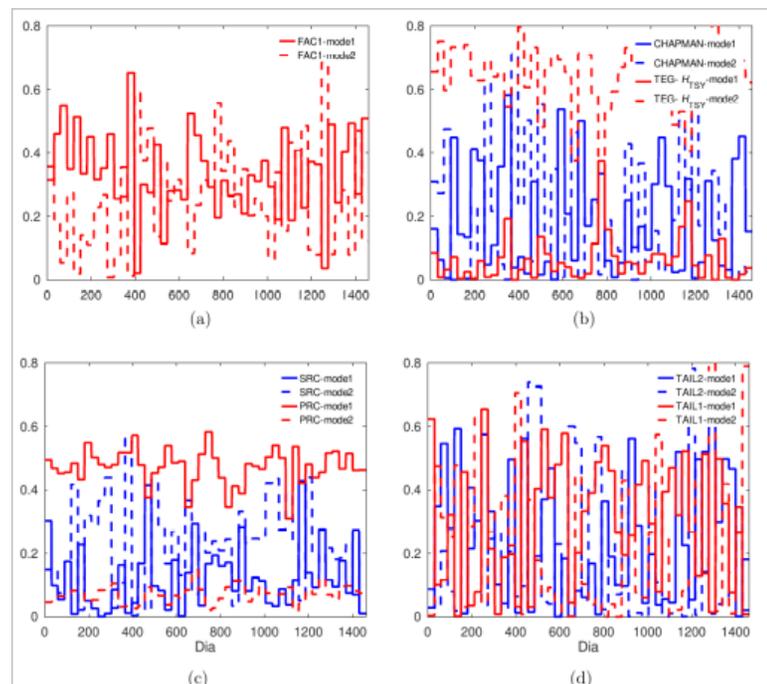


Figura 4: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H- de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 12.00 a 0.00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

## 5.2 Análisis de correlaciones de Pearson

Primero tenemos la comparación de los datos crudos de CRP-H y TEG- $H_{TSY}$ , tanto para  $K_p < 4$  (Figura 5, panel izquierdo). como para  $K_p \geq 4$  (Figura 5, panel derecho). Vemos que para los días calmos (izquierda), 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 (derecha), se obtuvieron pocos datos; pero la mayoría de estos, son valores de  $r$  arriba de 0.5, con valores  $p \leq 0.05$ .

También se puede apreciar en la Figura 6, que hay un incremento de correlaciones  $r$  con valores  $p \leq 0.05$ , cuando se remueve el  $S_q$  de CRP-H y cuando se remueve la variación diurna en días calmos (QDV) de TEG- $H_{TSY}$ , para días con  $K_p < 4$  (panel izquierdo). Esto sucede porque el modelo TS05 no incluye la señal ionosférica ni la litosférica. Entonces al quitar las corrientes  $S_q$  de los datos de Chiripa (CRP-H-wo- $S_q$ ), 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  $K_p \geq 4$  (panel derecho), no se aprecia mejoría significativa en las correlaciones.

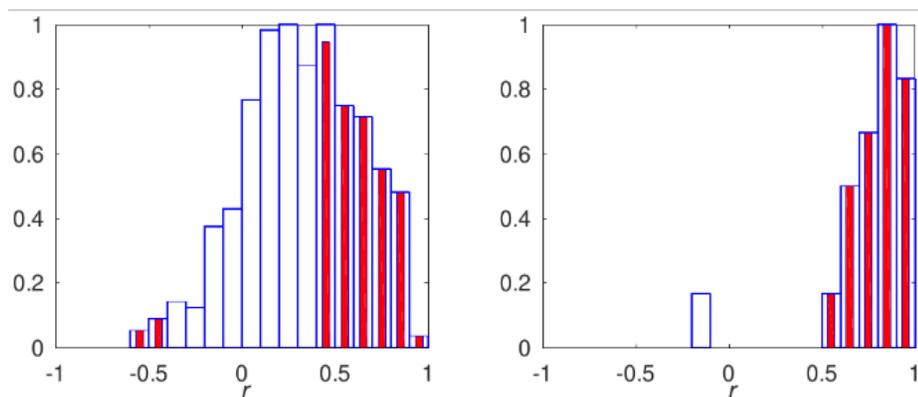


Figura 5: Izquierda: Histograma normalizado de  $r$  entre CRP-H y TEG- $H_{TSY}$  para  $K_p < 4$ . Derecha: Igual que el panel izquierdo para  $K_p \geq 4$ . En ambos, las barras blancas son todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor  $p \geq 0.05$ .

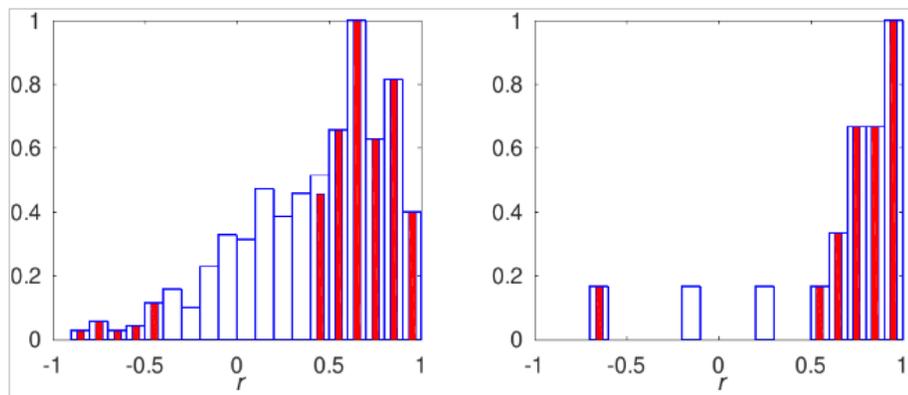


Figura 6: Izquierda: Histograma normalizado de  $r$  entre CRP-H-wo- $S_q$  y TEG- $H_{TSY}$ -wo-QDV para  $K_p < 4$ . Derecha: Igual que el panel izquierdo, para  $K_p \geq 4$ . En ambos, las barras blancas son los recuentos de todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor  $p \leq 0.05$ .

### 5.3 Análisis de la prueba t de Welch

El panel izquierdo de la Figura 7 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-QDV en días con  $K_p < 4$ , 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-QDV, 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 diurna, no hay un cambio significativo cuando comparamos las mismas correlaciones (ver panel derecho de la Figura 7), porque la variación diurna es mucho menor que los valores de  $H-$  en estos casos (media de z-Fisher = 0.55).

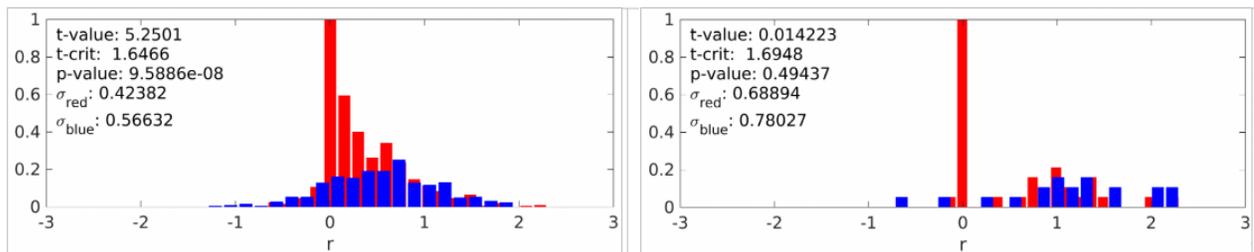


Figura 7: Izquierda: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP-H versus TEG- $H_{TSY}$  (rojo) y el correspondiente CRP-H-wo-Sq versus TEG- $H_{TSY}$ -wo-QDV (azul), en días con  $K_p < 4$ . Derecha: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP-H versus TEG- $H_{TSY}$  (rojo) y el correspondiente CRP-H-wo-Sq versus TEG- $H_{TSY}$ -wo-QDV (azul), en días con  $K_p \geq 4$ .

## 6 Conclusiones

- Es conocido que la variación diaria en días calmos, Sq, contiene una contribución de las corrientes magnetosféricas (Yamazaki y Maute, 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 et al., 2003)). En la latitud del OACS/UNAH, encontramos que también para días calmos, la influencia magnetosférica parece ser considerablemente mayor en el sector del atardecer (1.00 – 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 3 y 4). Se requiere realizar un análisis más detallado para identificar por qué son más importantes las contribuciones de los modos 1 o 2 en cada caso (ver Xu y Kamide, 2004; Castillo et al., 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 por qué contribuye más que el modo 1 (ver Xu y Kamide, 2004; Castillo et al., 2017).
- Las correlaciones entre datos de Chiripa y modelo TS05 en días con  $K_p < 4$  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.
- Por otro lado, las correlaciones en días con  $K_p \geq 4$  (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.

- 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, como ser, efectos de corrientes inducidas en transformadores de líneas primarias de potencia eléctrica.

## 7 Agradecimientos

Agradecemos al Servicio Geológico Británico, a la Cooperación Alemana, a la ENEE, al Departamento de Astronomía y Astrofísica (FACES/UNAH), al Departamento de Arqueoastronomía y Astronomía Cultural (FACES/UNAH), al Departamento de Física de la Tierra (Facultad de Ciencias de la UNAH).

## 8 Referencias

Alves Ribeiro, J., Pinheiro, F. J. G., y Pais, M. A. (2021). First estimations of geomagnetically induced currents in the south of portugal. *Space Weather*, 19(1).

Borodin, P., Brenes, J., Daudi, E., Efendi, N., Flower, S., Hidayat, M., Husni, M., Kampine, M., Kusonski, O., Lang, A., Monge, I., Mucussete, A., Nhatsave, A., Santika, I. K. O., Rasson, J., Riddick, J., Suharyadi, D., Turbitt, C., y Yusuf, M. (2011). Indigo: Better geomagnetic observatories where we need them. *Data Science Journal*, 10(30).

Castillo, Y. (2018). *Global and mid-latitude impact of ten years of solar activity using observational data of the Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra*. Tesis de doctorado en física especializado en astrofísica, Universidade de Coimbra. Disponible en: <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/79592>.

Castillo, Y., Pais, M. A., Fernandes, J., Ribeiro, P., Morozova, A. L., y Pinheiro, F. J. (2017). Geomagnetic activity at northern hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using TS05 model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 165-166:38–53.

Hapgood, M. y Thomson, A. (2010). *Space weather: Its impact on earth and implications for business*. lloyd's 360° risk insight. London, UK.

Proyecto KUK'ÁHPÁN (2021). Kuk'ahpán: 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. Consultado el 16 de agosto de 2021.

Tsyganenko, N. A., Singer, H. J., y Kasper, J. C. (2003). Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A5).

Tsyganenko, N. A. y Sitnov, M. I. (2005). Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A3).

Turbitt, C. (2018). Data Processing. IAGA-Workshop 2018 Summer School.

Xu, W.-Y. y Kamide, Y. (2004). Decomposition of daily geomagnetic variations by using method of natural orthogonal component. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A5).

Yamazaki, Y. y Maute, A. (2017). Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. *Space Science Reviews*, 206(1-4):299–405.