

## LAS VARIACIONES GEOMAGNÉTICAS TRANQUILAS (SQ) Y SU RELACIÓN CON EL VÓRTICE DE CORRIENTES IONOSFÉRICAS EQUIVALENTES

### GEOMAGNETIC QUIET VARIATIONS (SQ) AND ITS RELATION WITH THE VORTEX OF THE EQUIVALENT IONOSPHERIC CURRENTS

María Andrea Van Zele

IGEBA (CONICET-UBA) en Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

#### RESUMEN

Aún en días de similar actividad geomagnética y solar, o época del año, se encuentra que las variaciones geomagnéticas registradas en días tranquilos (Sq) en un mismo observatorio pueden diferir en su forma. Si bien la intensidad no es grande comparada con la debida a las perturbaciones, su determinación es importante pues para el estudio de las mismas se supone que en los registros subyace Sq, que debe ser sustraída. Estas variaciones son generadas por corrientes ionosféricas diurnas que forman dos casquetes (discos en la aproximación plana) cuyos vórtices (focos) se encuentran en los hemisferios sur y norte a latitudes medias, abarcando desde el ecuador hasta altas latitudes. Con un simple modelo este trabajo esboza motivos por los que las variaciones registradas pueden diferir, teniendo en consideración la posición relativa entre el observatorio y los vórtices, y movimientos de estos últimos, no así la dimensión de los discos o la intensidad de las corrientes; sugiere también una forma de estimar la posición del vórtice.

**Palabras clave:** variaciones geomagnéticas tranquilas Sq; posición del vórtice de corrientes ionosféricas;

#### ABSTRACT

Even during days with similar geomagnetic and solar activity, or season, it is found that the geomagnetic variations recorded during quiet days (Sq) can differ in its shape at the same observatory. Though the intensity is smaller than in those days with perturbations, its determination is important because it is supposed that Sq is underlying the records from where it must be removed. These variations are generated by diurnal ionospheric currents which form two caps from the equator to high latitudes, whose vortex (focus) are at the south and north hemispheres at mid latitudes. With a simple model this work sketches causes for the differences in the records, considering the position between observatories and vortex and the movements of them, but not the intensity or dimensions of the caps; it also suggests a way to estimate the position of the vortex.

**Key words:** Sq quiet geomagnetic variations; ionospheric currents vortex position

#### INTRODUCCIÓN

La radiación solar en la longitud de onda del ultravioleta extremo (EUV) crea iones y electrones en la ionosfera, y la conductividad es una función de la densidad del número de electrones; el viento neutro ionosférico es conducido por el calentamiento solar local y las ondas que se propagan desde debajo de la ionosfera; de ello resulta una dínamo eléctrica ionosférica en latitudes medias (Richmond and Roble, 1987). La existencia de corrientes en la ionosfera a unos 100-120 km de altura ha sido confirmada por mediciones in situ (Burrows and Hall, 1965). El movimiento de estas lentas corrientes ionosféricas equivalentes y las que ellas inducen en la corteza terrestre (que de práctica se suponen proporcionales a las anteriores) explican las variaciones geomagnéticas que se registran en días tranquilos (Chapman and Bartels, 1940). Estas corrientes ionosféricas diurnas forman dos casquetes (discos, en una aproximación plana) de corrientes, cuyos vórtices (V, focos) se encuentran en los hemisferios sur y norte a latitudes medias, abarcando desde el ecuador (donde el sentido es hacia el este y la rotación en sentido horario en el hemisferio sur, y antihorario en el norte) hasta altas latitudes

Estas corrientes ionosféricas producen variaciones regulares diarias del campo geomagnético que se registran en la superficie de la tierra (SR) (Mayaud, 1965); su promedio en días geomagnéticamente tranquilos se denomina Sq (Chapman and Bartels, 1940). Chapman and Bartels (1940) estudiando las variaciones diarias solares tranquilas en días quietos (Sq) encuentran que en latitudes entre 40° y 50° la variación en la componente X (suavizada) no muestra un extremo marcado próximo al mediodía local, y el vórtice de las corrientes equivalentes se sitúa para los equinoccios a 40°. El análisis en armónicos esféricos (Malin, 1973; Winch, 1981) permite separar las contribuciones de las corrientes ionosféricas (externas) de las internas que ellas inducen debajo de la superficie. Aunque se supone que los focos entre las corrientes externas e internas no difieren significativamente, Hasegawa (1960) muestra un ejemplo en que el foco interno está desplazado 15° hacia el polo respecto del externo, posiblemente debido a corrientes oceánicas.

Diferentes estudios y metodologías se han hecho para un mayor conocimiento de las corrientes ionosféricas y variaciones geomagnéticas Sq:

Torta et al. (1989) han estudiado el sistema de corrientes ionosféricas equivalentes en días magnéticamente tranquilos deducidas de variaciones diarias del campo geomagnético registradas en Europa durante un mínimo de manchas solares. Ellos determinaron una fuerte variabilidad de un día a otro en la posición del foco, y que ello puede deberse al desplazamiento del sistema de corrientes hacia el norte o sur (meridionales), este u oeste (zonales) debido a un cambio en las condiciones dinámicas de la termosfera baja (Manson et al., 1985, 1989; Forbes, 1985; Killeen et al., 1992).

La dependencia longitudinal de la variación diaria de las componentes H y D del campo geomagnético en intervalos tranquilos próximos a los equinoccios en observatorios africanos y americanos han sido estudiados por Le Sager y Huang (2002), y explicadas por diferencias en la latitud geomagnética.

En 2003 Takeda et al. estudiaron las relaciones entre el campo geomagnético Sq, el campo eléctrico, la conductividad y las corrientes ionosféricas, a partir de la correlación entre la amplitud de Sq en la componente Y con el campo eléctrico ionosférico y las corrientes de Hall. Se determinó que la amplitud de Sq es causada principalmente por la conductividad ionosférica local y tiende a ser menor en invierno.

La latitud del foco de los sistemas de corrientes Sq sobre Australia y Japón fueron determinadas a partir de registros diarios en el intervalo diciembre 1989 y junio 1990 por Stening et al. (2005a), y sus movimientos latitudinales se compararon con la intensidad del electrochorro ecuatorial, encontrando que por lo general un incremento en la intensidad del electrochorro está acompañado por un movimiento del foco hacia el polo, especialmente en Japón. También se estableció que los cambios latitudinales pueden ser debidos a cambios en el sistema de mareas (Stening, 1991). Stening et al. (2005b) estudiaron diferentes métodos para determinar automáticamente el foco del sistema de corrientes Sq comparando los resultados con los obtenidos a partir de registros en observatorios australianos, concluyendo que el más preciso es el que considera que la longitud del foco queda establecida cuando la variación de Y (dY) es nula, ajustando por la variación de las componentes norte en ese instante para hallar la latitud a la cual se anula.

En el trabajo de Gen-Xiong Chen et al. (2007) se analizan valores medios horarios de la componente H registrados durante 2001 en 4 observatorios chinos para estudiar la variabilidad de la variación geomagnética Sq. Las variaciones día a día en estaciones al norte (o al sur) del foco (norte) se correlacionan positivamente entre sí, mientras que las que están a distinto lado del foco lo hacen negativamente. Por ello concluyen que el movimiento latitudinal del foco es más importante que la variación de la intensidad de la corriente para la variabilidad día a día de Sq.

Según Yamazaki et al. (2011a) la intensidad total de la corriente en el sistema de corrientes equivalentes Sq a lo largo del meridiano magnético de 210° entre 2000 y 2002 muestra variaciones debidas a la actividad solar, variaciones estacionales y variaciones día a día; los resultados muestran que la intensidad total de la corriente varía un 14% de día en día luego de eliminar las otras 2 contribuciones.

También ha sido determinada la variación longitudinal y estacional del sistema de corrientes ionosféricas en intervalos tranquilos (2006-2008) a partir de observaciones de satélites (Pedatella et al., 2011)

Takeda (2013) estudia la contribución del viento y la conductividad ionosférica usando un modelo IRI, y del campo magnético principal sobre Sq usando Sq(Y), determinando que la actividad solar controla la conductividad ionosférica, y que los campos eléctricos de la dínamo y los vientos neutros tienden a decrecer cuando la actividad solar aumenta.

Es decir que aún en días de similar actividad geomagnética y solar o época del año, se encuentra que las variaciones geomagnéticas registradas en días tranquilos (Sq) en un mismo observatorio pueden diferir en su forma (Van Zele, 2013a). Si bien la intensidad no es grande (excepto bajo el electrochorro ecuatorial) comparada con la debida a las perturbaciones, su determinación es importante pues para el estudio de perturbaciones se supone que en los registros subyace Sq, que debe ser sustraída; para ello se utiliza la registrada el día Q más próximo, o la más habitual para esa latitud, o el promedio de las Sq de los días más tranquilos de ese mes, o el promedio de las Sq de días cuyos índices satisfacen determinadas condiciones, o alguna otra variante. En este trabajo se esbozan motivos por los que las variaciones registradas pueden diferir, teniendo en consideración las variaciones de la posición de los vórtices, no así la dimensión de los discos o la intensidad de las corrientes. Para

ello se consideran las variaciones geomagnéticas de la componente norte  $X(t)$ , este  $Y(t)$  y vertical hacia el centro de la tierra  $Z(t)$  registradas en observatorios africanos y europeos a longitudes próximas a las de Greenwich ( $0^\circ$ ) durante días tranquilos aislados. Se seleccionan dos días muy tranquilos según los índices de actividad geomagnética  $K_m$  (Menvielle and Berthelier, 1991) en [2006, 2009], años de baja actividad solar, pues entonces la radiación incidente es más estable (medida por ejemplo con el índice F10.7 o sus derivados) (Yamazaki et al., 2011b; Van Zele, 2013b), las fulguraciones solares son menos numerosas (Van Zele and Meza, 2011) y el número de manchas solares (indicador de la eyección de partículas solares que alcanzan la magnetosfera, ingresarían en ella y la perturbarían) es menor. Se descartan influencias de perturbaciones aurorales verificando que los índices de actividad AL y AE (Mayaud, 1980) son mínimos. En cada día universal, son registrados 1440 valores (cada minuto del día universal:  $t \in [0, 1439]$ ). Los índices  $\text{symH}$  y  $\text{symD}$  (Iyemori et al., 2010), medida de la corriente anillo ecuatorial simétrica, son utilizados para descartar esta influencia y la de las corrientes de Chapman-Ferraro (Parks, 1991). Se calculan  $\text{symX}(t)$  y  $\text{symY}(t)$  a partir de los índices  $\text{symH}(t)$  y  $\text{symD}(t)$ :

$$\text{symX}(t) = \text{symH}(t) \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}(\text{symD}(t)) \quad ; \quad \text{symY}(t) = \text{symH}(t) \cdot \cos\theta \cdot \cos(\text{symD}(t));$$

el factor  $\cos\theta$  considera la influencia de la corriente anillo (supuesta en el ecuador geomagnético) en la latitud del observatorio. Los valores de la medianoche local ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), se calculan como  $X_0 = X(0) - \text{symX}(0)$ ,  $Y_0 = Y(0) - \text{symY}(0)$ ,  $Z_0 = Z(0)$ . Las variaciones diarias sin la contribución de la corriente anillo simétrica o de la magnetopausa, y medidas a partir del valor de la medianoche local resultan:

$$dX(t) = X(t) - \text{symX}(t) - X_0; \quad dY(t) = Y(t) - \text{symY}(t) - Y_0; \quad dZ(t) = Z(t) - Z_0, \quad (1).$$

En todos los casos el error considerado en los datos es de 1 nT.

En este trabajo se comparan estos registros con las variaciones que produciría una corriente ionosférica equivalente circular (ver modelo) y con ello se estimaría la localización del observatorio respecto del foco V de las corrientes.

## EL MODELO

El objetivo de este modelo es estimar y caracterizar la morfología de las variaciones geomagnéticas debidas a corrientes ionosféricas de disco (planas). Para ello se estudia el campo magnético que genera una espira de corriente plana (en la ionosfera) de vórtice en V, radio "a" y de intensidad "i" que circula en sentido negativo (horario, vista por encima de la ionosfera, como en el hemisferio sur), situada a una altura "h" sobre una superficie plana (la tierra) y paralela a la corriente, a lo largo de una recta en la superficie (trayectoria del observatorio a lo largo de un paralelo) situada a una distancia "d" de V' (V' es la proyección de V sobre la superficie), en posiciones "l" sobre ella. Adimensionalizando las longitudes, siendo  $A = a/h$ ,  $D = d/h$  y  $L = l/h$ , se obtiene que la contribución a la componente X (DX) de un diferencial de arco  $d\phi$  es:

$$DX(\phi) = (h^2/\mu) \Delta X(\phi) = i \cdot \cos\phi / \lambda(\phi), \text{ siendo } \lambda(\phi) = [1 + D^2 + L^2 + A^2 - 2 \cdot A \cdot (D \cdot \cos\phi + L \cdot \text{sen}\phi)]^{3/2}$$

$$DY(\phi) = (h^2/\mu) \Delta Y(\phi) = i \cdot \text{sen}\phi / \lambda(\phi)$$

$$DZ(\phi) = (h^2/\mu) \Delta Z(\phi) = i \cdot (A - L \cdot \text{sen}\phi - D \cdot \cos\phi) / \lambda(\phi)$$

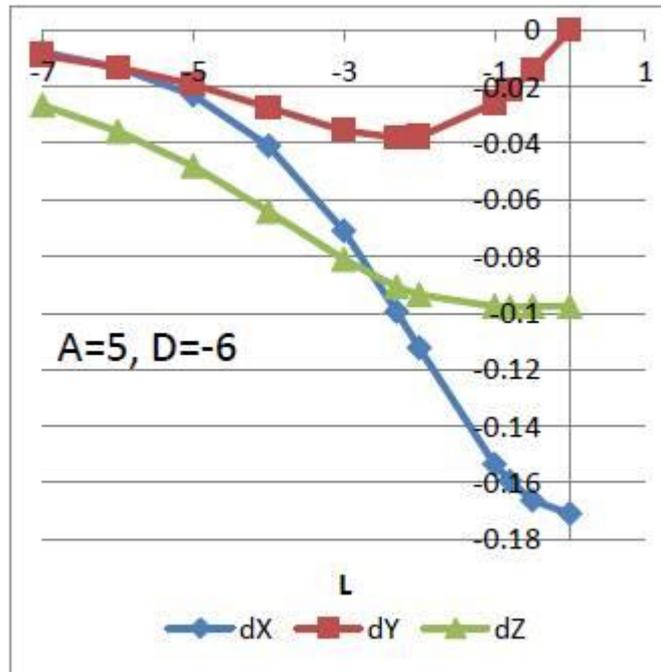
Se han calculado con Wolfram Mathematica ([www.wolframalpha.com](http://www.wolframalpha.com))

$$dX = \int_0^{2\pi} DX(\phi) d\phi \quad dY = \int_0^{2\pi} DY(\phi) d\phi \quad dZ = \int_0^{2\pi} DZ(\phi) d\phi \quad (i=1),$$

variaciones proporcionales a las geomagnéticas que registraría un observatorio ubicado en un paralelo a una distancia D al sur del vórtice V' en el hemisferio sur ( $D < 0$ ).

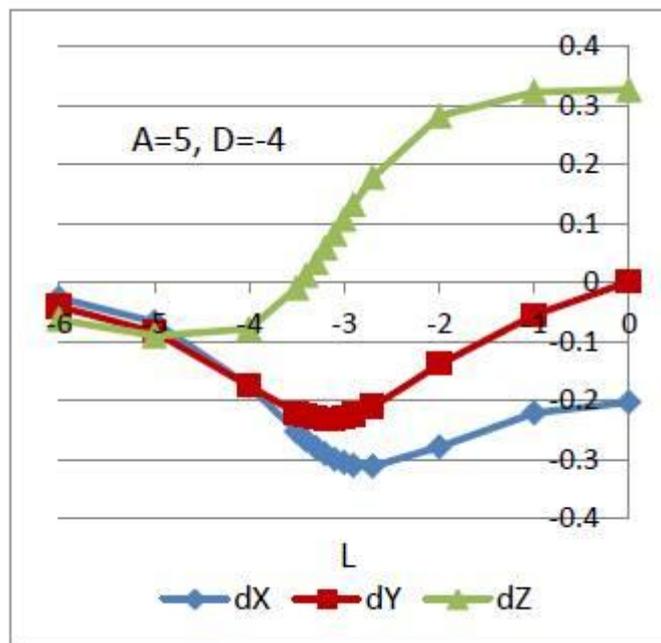
Un observatorio que recorriera un paralelo al sur de V' sur pero no pasara por debajo de la corriente en este trabajo se lo referirá como polar (SP); si se encontrara al sur de V' sur pero pasara por debajo de la corriente se referirá como tropical (ST); y si se encontrara entre V' sur y el ecuador (pasando por debajo de la corriente) como ecuatorial (SE). Las Figuras 1, 2 y 3 muestran las variaciones debidas a una corriente circular ionosférica de radio  $A=5$  para  $L \leq 0$ ; la Fig.1 para un observatorio SP ( $|D| > A$ , D fija y negativa; la Fig. 2 para un observatorio ST ( $-5 < D < 0$ , D fija) y que pasa por debajo de la corriente en  $L = (A^2 - D^2)^{1/2}$ . La Fig.3 muestra las variaciones que registraría un observatorio ST pero considerando que V (y V') varía linealmente su posición hacia el sur del observatorio según  $D(L) = (6/7) \cdot L + 2$ ; ( $D(-7) = -4$ ;  $D(0) = 2$ ; cruza al norte de V' sur en  $L = -7/3$  y pasa por debajo de la corriente en  $L = -4,61$  (STM: observatorio en hemisferio sur, tropical con foco móvil). En todos los casos  $dX, dY$  y  $dZ \rightarrow 0$  para  $L \rightarrow \pm\infty$ ;  $dY(L, D, A) = 0$  identifica la longitud del V' ( $L=0$ ). Las curvas  $dX$  y  $dZ$  son funciones pares respecto de  $L=0$  y  $dY$  es una función impar. Para un foco móvil la simetría mencionada se conserva si V invierte el movimiento a partir de  $L=0$ .

Para un observatorio SP (ver Fig.1):  $A < |D|$  (el observatorio nunca pasa por debajo de la única corriente):  $A=5$  y  $D=-6$ ,  $L \leq 0$ . Puede observarse que en  $L < 0$ : i) las variaciones son negativas; ii)  $dZ(L) < 0$ , alcanza un mínimo absoluto en  $L(Z_{mi}) < 0$  ( $L = -0,8$ ) y un máximo relativo en  $L=0$ ; iii)  $dX(L)$  alcanza el mínimo absoluto en  $L=0$ .



**Figura 1:** variaciones geomagnéticas, proporcionales a las correspondientes a una circunferencia de corriente ionosférica (de radio  $A=5$ ), calculadas para un observatorio SP que recorre un paralelo en  $D=-6$ . Sólo se grafica para  $L \leq 0$ .  $dZ$  alcanza el mínimo en  $L < 0$ .

**Figure 1:** geomagnetic variations, proportional to those corresponding to an ionospheric current circumference (radius  $A=5$ ), calculated for a SP observatory, which travel a parallel with  $D=-6$ . It is represented only for  $L \leq 0$ .  $dZ$  reaches its minimum at  $L < 0$ .



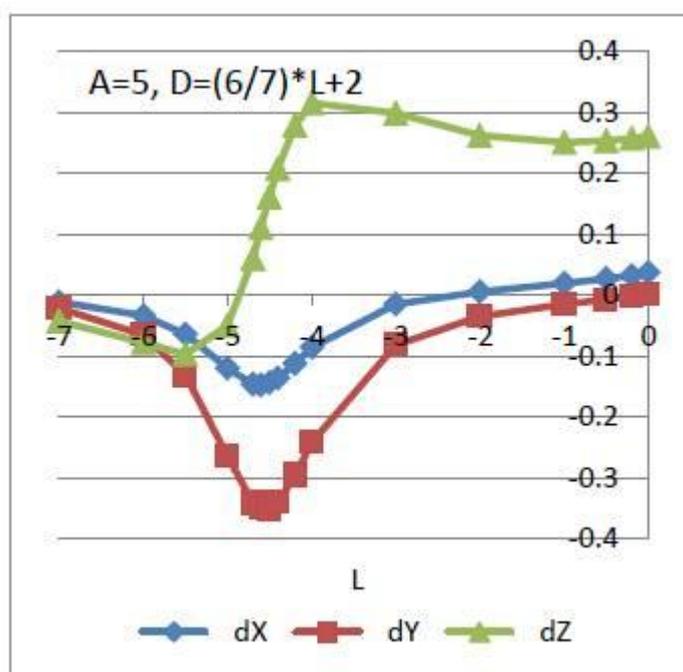
**Figura 2:** variaciones geomagnéticas, proporcionales a las correspondientes a una circunferencia de corriente ionosférica (de radio  $A=5$ ), calculadas para un observatorio ST, para  $D=-4$ .

**Figure 2:** geomagnetic variations, proportional to those corresponding to a circumference of ionospheric current (with radius  $A=5$ ), calculated for an observatory ST, for  $D=-4$ .

Para un observatorio ST (ver Fig.2):  $A > |D|$ :  $A=5$  (circunferencia (o disco muy estrecho) de corriente ionosférica de radio  $a=5 \cdot h$ ),  $D=-4$ , de modo que en  $L=-3$  el observatorio pasa por debajo de la corriente: ( $A^2 = D^2 + L^2$ ). Puede observarse que: i)  $dX(L) < 0$ , alcanza un mínimo absoluto negativo en  $[-5, 0]$  y un máximo relativo negativo en  $L=0$ ; ii)  $dZ(L)$  alcanza un mínimo absoluto negativo ( $L(Z_{mi}) < 0$ ) y un máximo absoluto positivo en  $L=0$ .

Para un observatorio STM:  $V$  (y  $V'$ ) se desplaza linealmente hacia el sur del observatorio según  $D(L) = (6/7) \cdot L + 2$  ( $D(-7) = -4$ ;  $D(0) = 2$ ;  $D(-7/3) = 0$ ) y radio  $A=5$ . Se observa que: i)  $dX(L)$  alcanza un mínimo absoluto negativo en  $L(X_{mi}) < 0$  y un máximo relativo positivo en  $L=0$ ;  $D(-7/3) = 0$  indica, cuando  $L < 0$ , que el observatorio y el foco se encuentran a la misma latitud, pero el observatorio a menor longitud que el foco; ii)  $dZ(L)$  alcanza un mínimo absoluto negativo en  $L(Z_{mi}) < -5$ , un máximo absoluto positivo en  $-5 < L(Z_{Ma}) < 0$ , un mínimo relativo positivo, y un máximo relativo positivo en  $L=0$ . Si  $V$  (y  $V'$ ) se moviera hacia el norte, alejándose del observatorio  $dX(0) < 0$ .

Aquí se denominarán NE ( $D > 0$ ) a los observatorios ubicados simétricamente a SE respecto del ecuador, NT a los simétricos a ST y NP a los simétricos a SP, respecto de  $D=0$ . Como  $dY(L) < 0$  si  $L < 0$ ,  $dY(0) = 0$ , y  $dY(L) > 0$  si  $L > 0$  en el sur y viceversa en el norte, el signo de  $dY$  en  $L < 0$  define (en muchos casos) si el observatorio se encuentra en el hemisferio sur o norte; además las otras 2 componentes ayudan a clasificar la ubicación del observatorio,



**Figura 3:** variaciones geomagnéticas calculadas para un observatorio STM, proporcionales a las correspondientes a una circunferencia de corriente ionosférica (de radio  $A=5$ ), con un vórtice que varía linealmente su posición hacia el sur del observatorio según  $D(L) = (6/7) \cdot L + 2$  ( $D(-7) = -4$ ;  $D(0) = 2$ ;  $D(-7/3) = 0$ ). Sólo se grafica para  $L \leq 0$ .

**Figure 3:** geomagnetic variations calculated for an observatory STM, proportional to those corresponding to a circumference of ionospheric current (with radius  $A=5$ ), with a vortex changing its position to the south after  $D(L) = (6/7) \cdot L + 2$ , so ( $D(-7) = -4$  and  $D(0) = 2$ ). It is only represented for  $L \leq 0$ .

SP	ST	SE	NE	NT	NP
$dx_{SP}$	$dX_{ST}$	$dX_{SE} = -dX_{ST}$	$dX_{NE} = -dX_{ST}$	$dX_{NT} = dX_{ST}$	$dX_{NP} = dX_{SP}$
$dZ_{SP}$	$dZ_{ST}$	$dZ_{SE} = dZ_{ST}$	$dZ_{NE} = -dZ_{ST}$	$dZ_{NT} = -dZ_{ST}$	$dZ_{NP} = -dZ_{SP}$

**Tabla 1:** relación entre las componentes geomagnéticas norte y vertical de observatorios S y N respecto de SP y ST (graficadas en las Fig. 1, 2 y 3).

**Table 1:** relations between south and north geomagnetic components from S and N observatories in relation with SP and ST drawn at Fig. 1, 2 and 3.

El modelo sólo muestra la variación debida a una circunferencia de corriente, aunque en realidad la ionosfera está constituida por un disco de corrientes alrededor de V.

## LOS DATOS

Los observatorios considerados figuran en la Tabla 2, donde se indican las coordenadas (lat.geog. $\theta$ ; long.geog. $\varphi$ , latitud geomagnética) y  $t_m$ (TU): la hora del mediodía (TU=12- $\phi$ /15°).

Obs.	lat.geog. $\theta$	lon.geog. $\varphi$ (°)	lat.geom.	$t_m$ (TU)
HER	-34,42°	19,23	33,91° S	10,72
KMH	-26,54°	18,11	26,17° S	10,79
HBK	-25,88°	27,71	27,03° S	10,15
TSU	-19,20°	17,58	18,75° S	10,83
ASC	-7,88°	-14,38	2,36° S	12,96
BNG	4,33°	18,57	4,10° N	10,76
MBO	14,38°	-16,97	19,81° N	13,13
TAM	22,79°	5,53	24,41° N	11,63
GUI	28,32°	-16,44	32,42° N	13,1
SFS	36,46°	-6,20	39,76° N	12,41
SPT	39,55°	-4,35	42,46° N	12,29
AQU	42,35°	13,32	42,18° N	11,11
BFO	48,3°	8,32	48,81° N	11,45
BFE	55,62°	11,67	55,24° N	11,22
UPS	59,9°	17,35	58,35° N	10,84
KIR	67,8°	20,42	62,25° N	10,64
HRN	77,0°	15,55	73,9° N	10,96

**Tabla 2:** siglas IAGA de los observatorios, coordenadas (°), y hora  $t_m$  (TU) del mediodía.  
**Table 2:** IAGA code for the observatories, coordinates, and  $t_m$  (UT) at noon

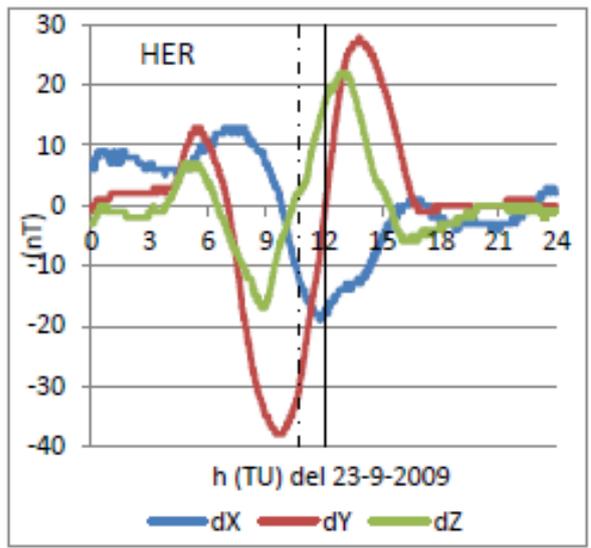
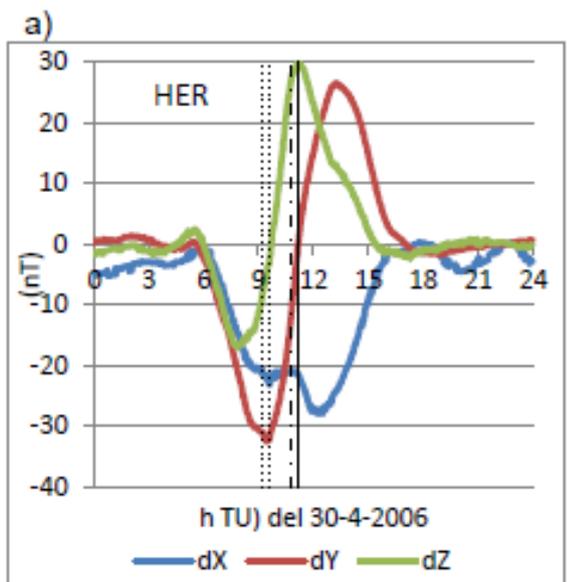
Las variaciones dX, dY y dZ calculadas según la ecuación (1) pueden observarse en la Fig. 4a)...q) para el 30-4-2006 (columna izquierda) y el 23-9-2009 (columna derecha). En ambos días la presión del viento solar sobre la magnetosfera es baja. La posición de V' equivalente a L=0 en el modelo es  $t_0 / dY(t_0)=0$ , y corresponde al instante en que el observatorio y V' comparten el meridiano (indicado en línea entera en las Fig.4). La columna izquierda de las Fig.4 puede en varios casos asociarse a las variaciones calculadas analíticamente y representadas en las Fig.1, 2 o 3, o similares según la Tabla 1; sin embargo se observa falta de simetría respecto de  $t_0$  significando que para  $t > t_0$  las variaciones pueden estar modificadas por asimetría, causas térmicas o de conductividad en la alta atmósfera.

De las Fig.4 se observa que:

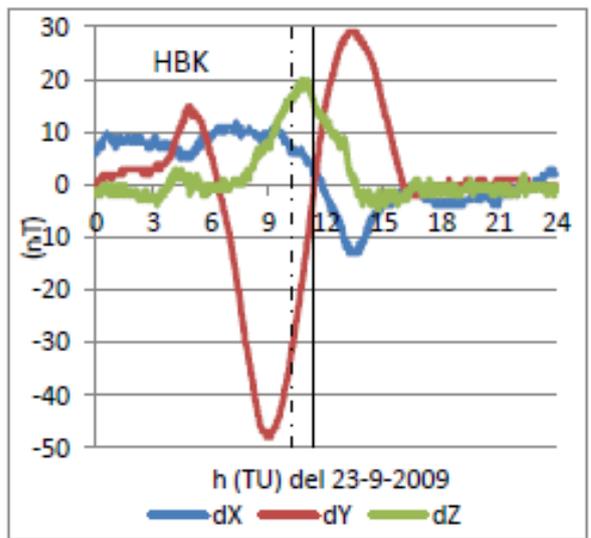
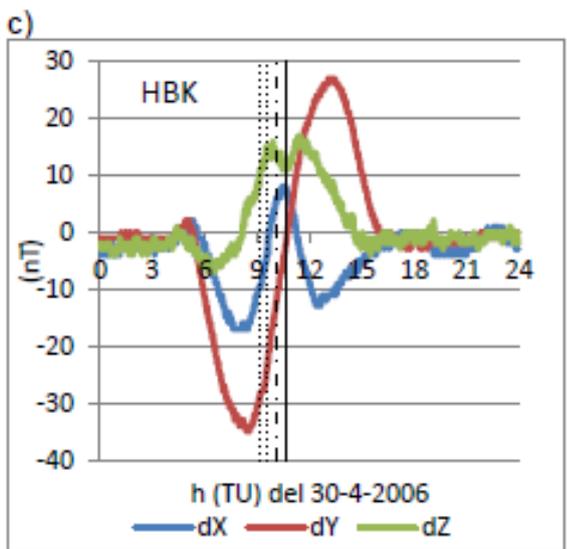
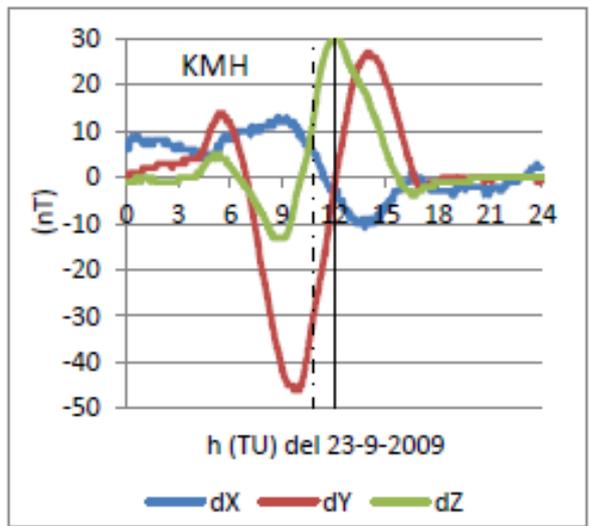
- i) dX no muestra siempre un extremo marcado próximo al mediodía local
- ii) la componente dY muestra claramente que  $dY < 0$  para  $t < t_0$  en TSU, HBK, KMH y HER, localizados en el hemisferio sur, mientras que  $dY(t) > 0$  para  $t < t_0$  en TAM, GUI, SFS, SPT, AQU, BFO, BFE, UPS y KIR del hemisferio norte;
- iii) la componente dY registrada en ASC, BNG y MBO no tiene el comportamiento esperado de acuerdo al modelo sino que muestra variaciones más complejas por lo que no se puede aseverar en qué hemisferio se encuentran; en particular parecería que a lo largo del día son influidos por corrientes de ambos hemisferios;
- iv) las variaciones registradas en HER y KMH el 23-9-2009 (sin datos de KMH el 30-4-2006) son similares, dada su localización geográfica (Tabla 2).

En la Tabla 3 se indica  $t_0$  (TU/TL) definida tal que  $dY(t_0)=0$  según la ec.1 y se define la posición de los observatorios (S sur o N norte) según las variaciones registradas hasta  $t_0$  de acuerdo a las calculadas por el modelo. A partir de dX y dZ se estima si la posición del observatorio es ecuatorial (E, entre el ecuador y V'), tropical (T, de V' hacia los polos, pero bajo las corrientes), o polar (P, hacia los polos, más allá de las corrientes); la forma de las variaciones cuando V' no es fijo sino que se desplaza hacia el polo y revierte a partir de  $t_0$  está indicada con M; si no detiene su desplazamiento se indica con M\*; también se indica el instante  $t_v \leq t_0$  tal que  $dX(t_v)=0$  es decir donde el observatorio y el foco se encuentran a la misma latitud.

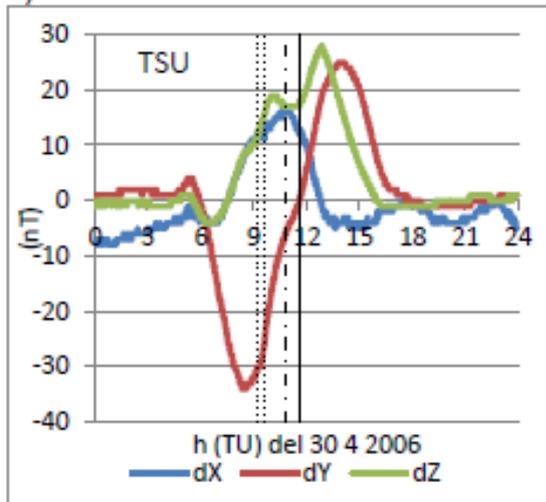
En la Tabla 3 existen casilleros vacíos pues la determinación de  $t_v$  no puede hacerse dado que la curva dX no se corresponde con las del modelo.



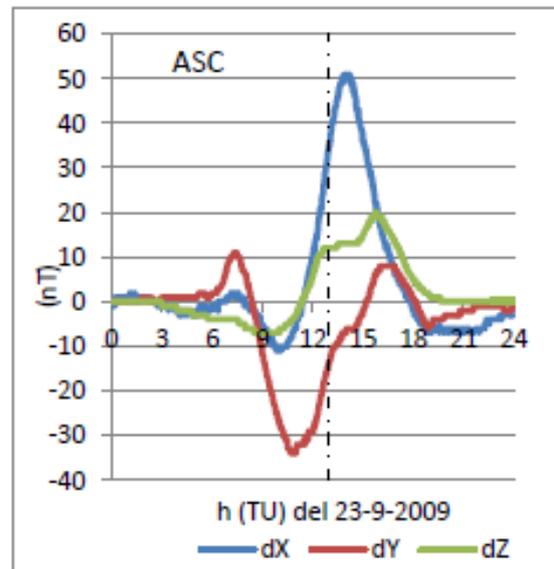
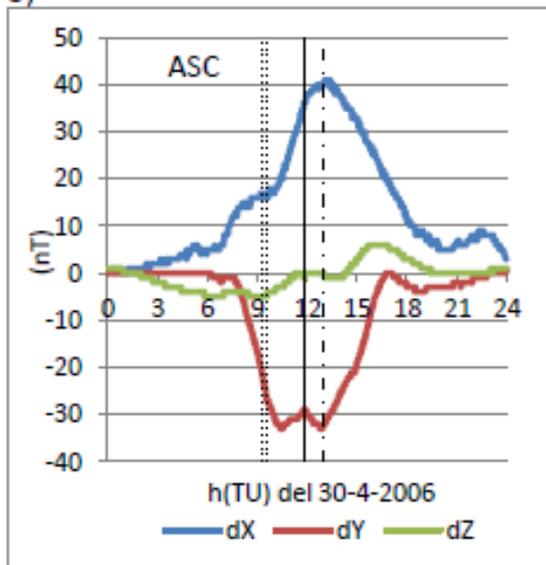
b)



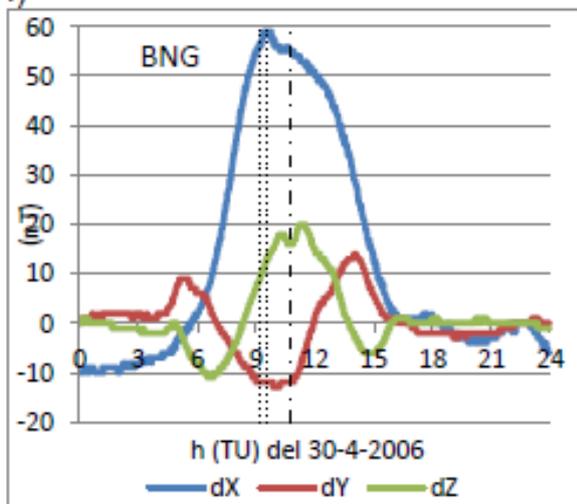
d)



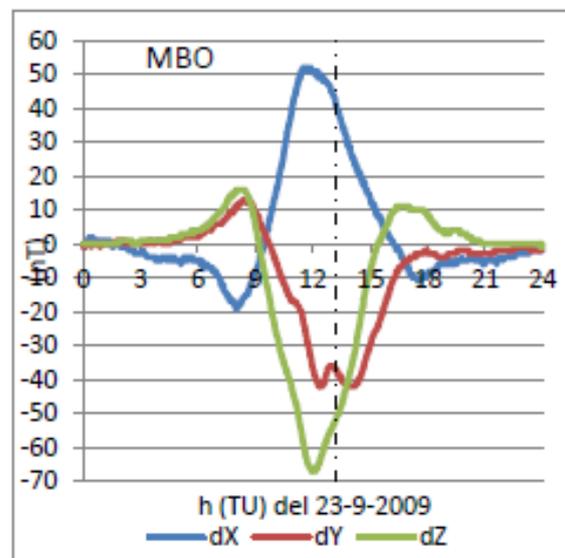
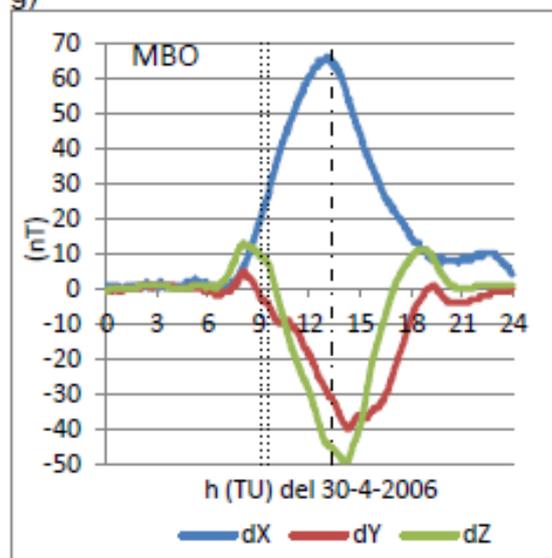
e)



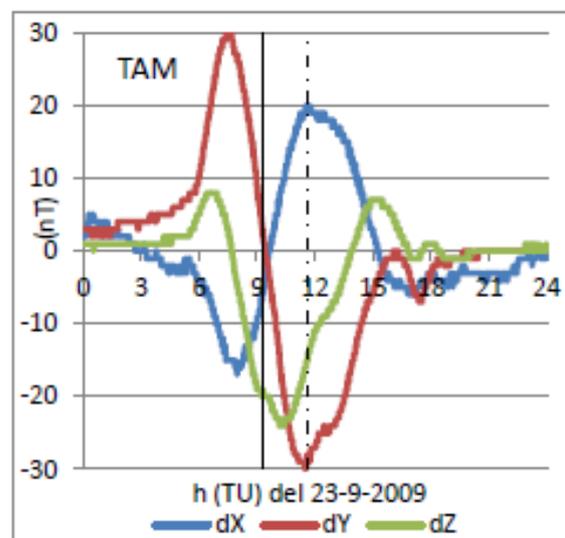
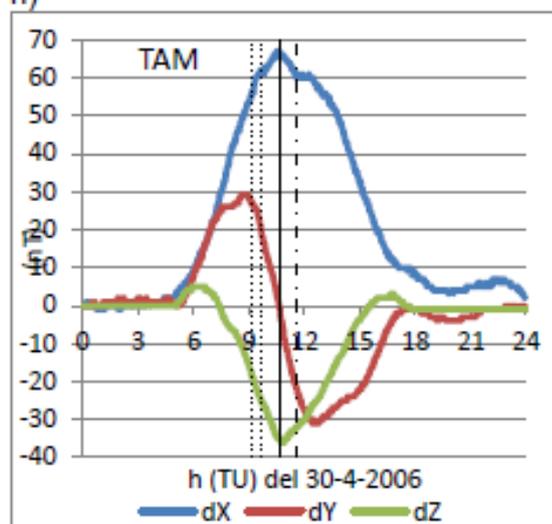
f)



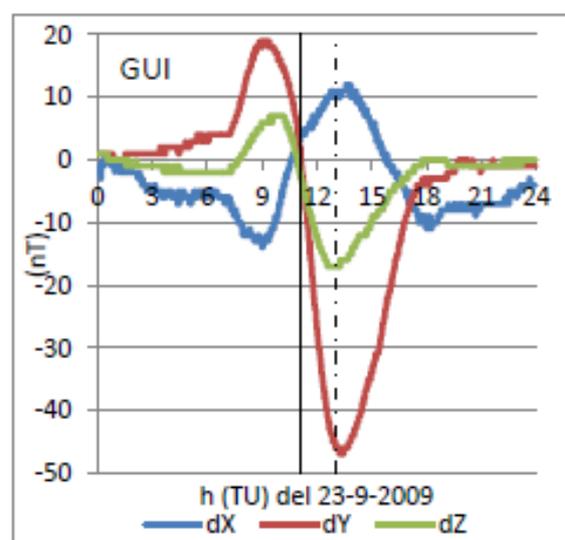
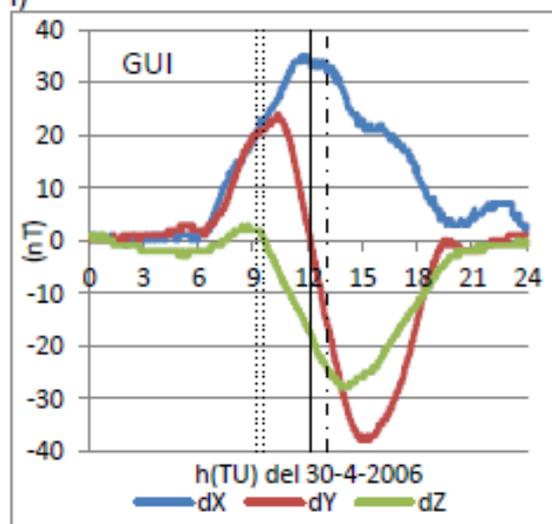
g)

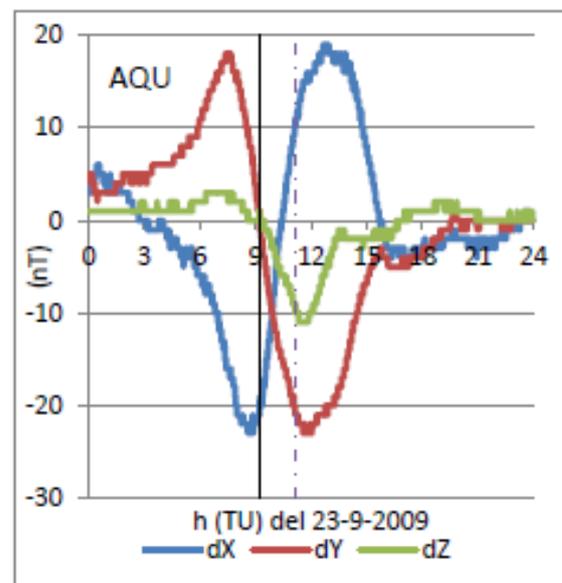
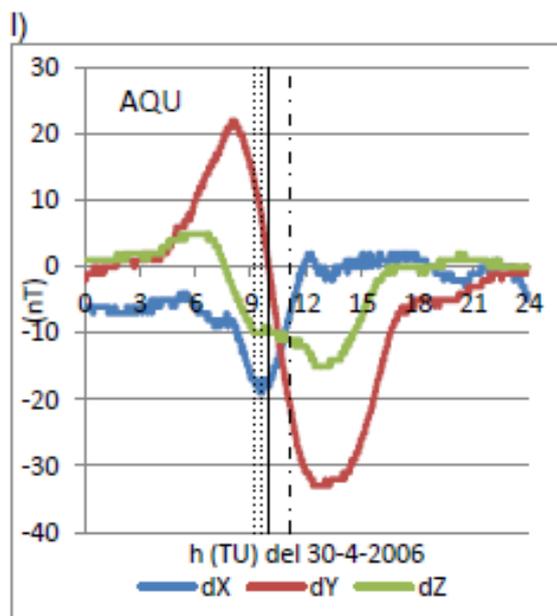
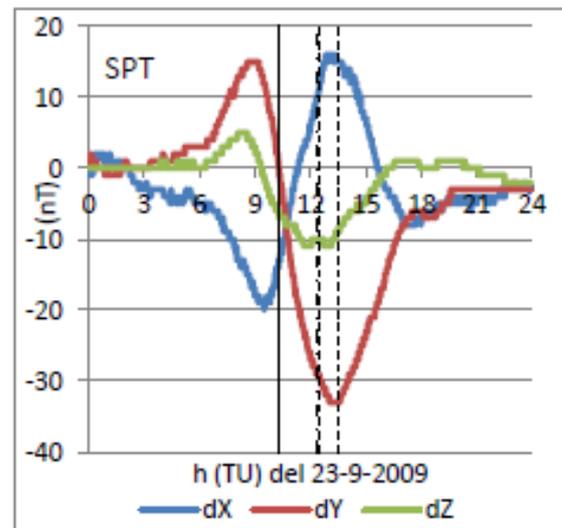
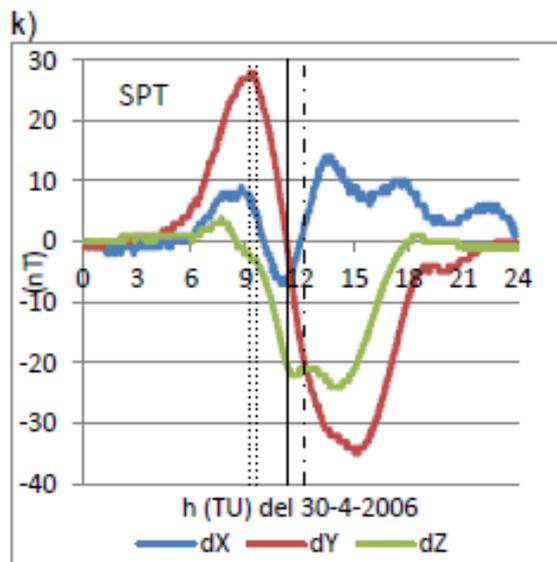
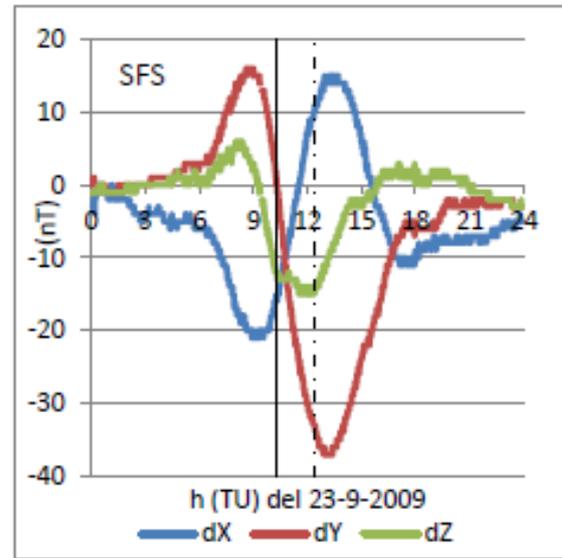
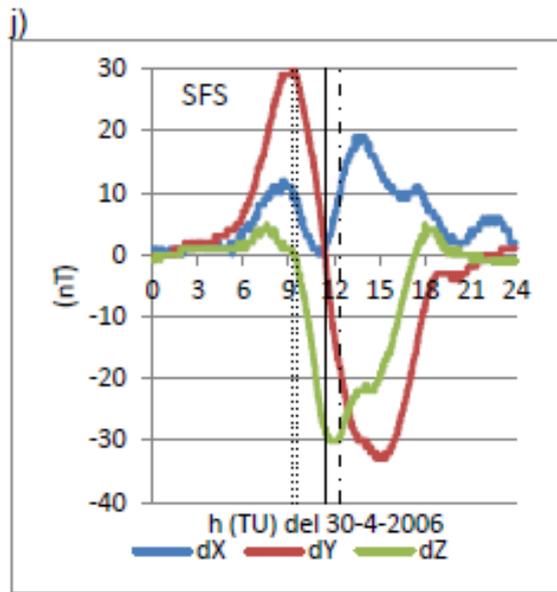


h)

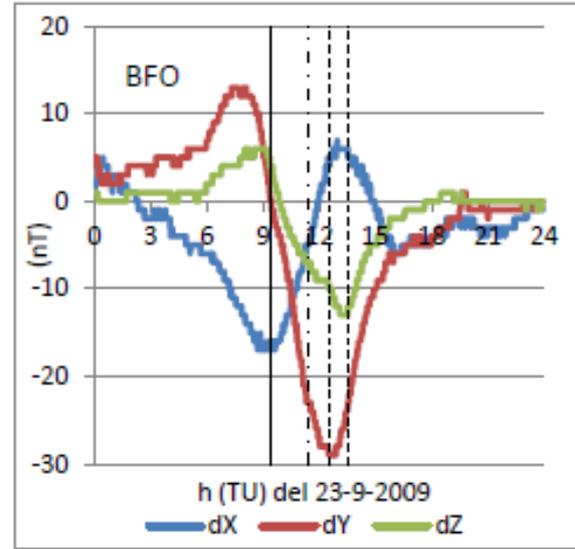
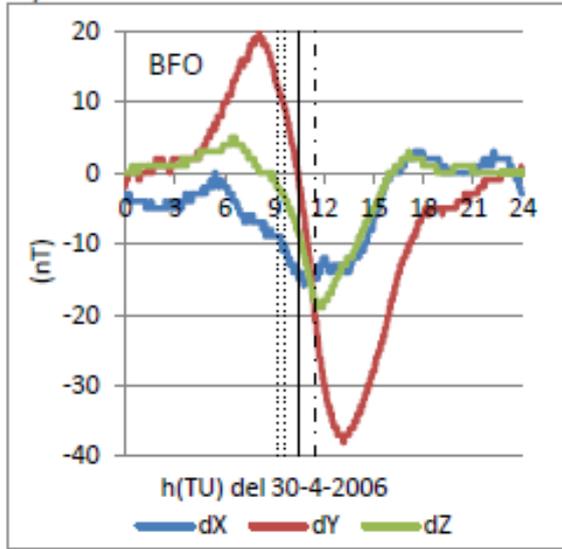


i)

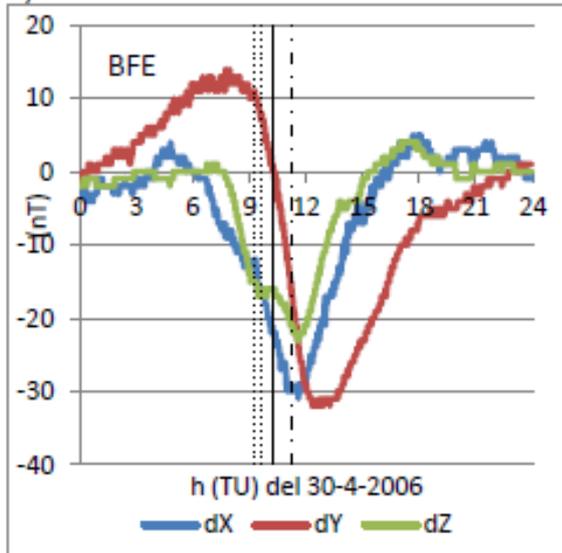




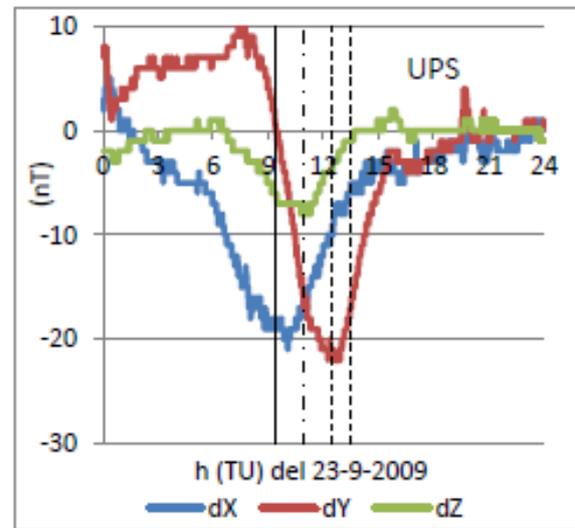
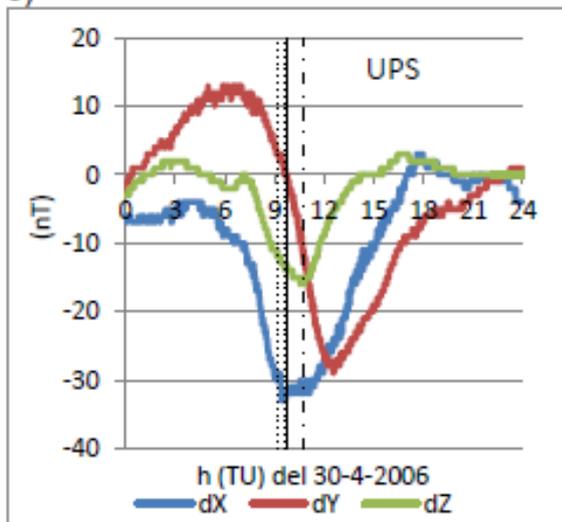
m)

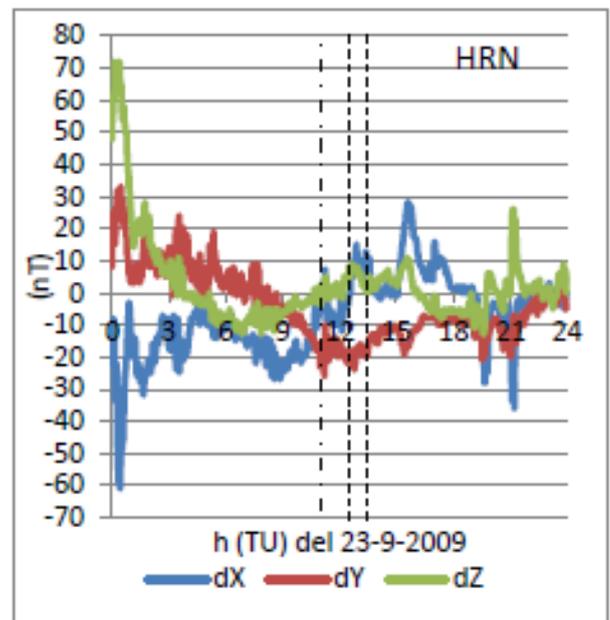
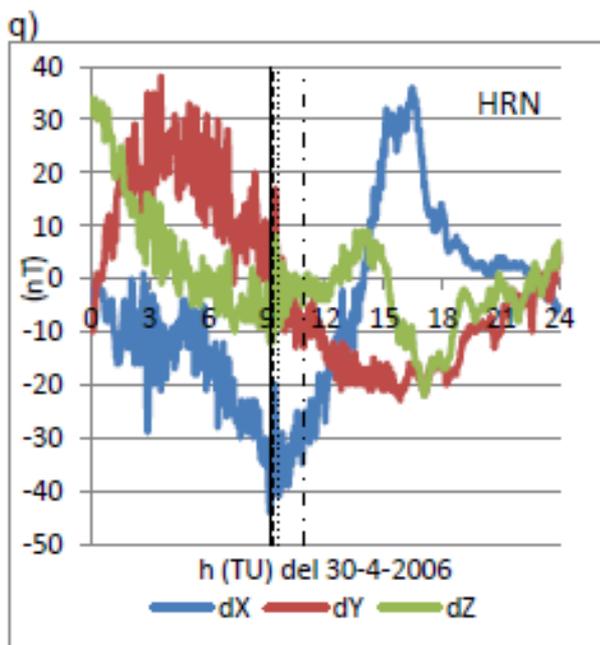
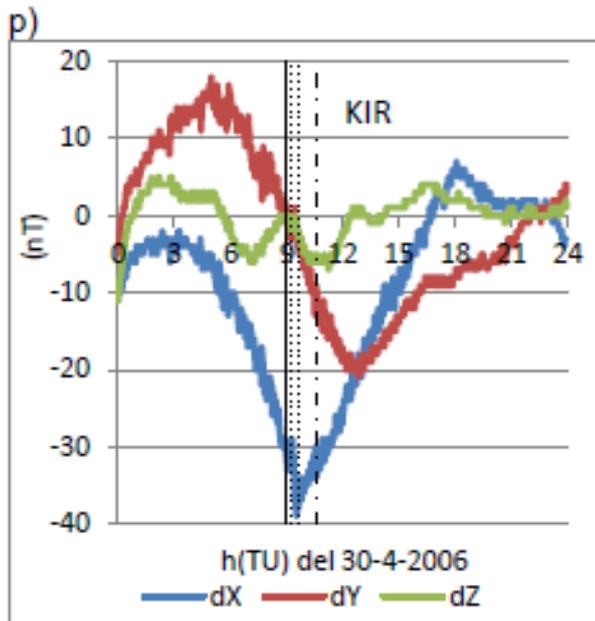


n)



o)





**Figura 4:** Sq para los observatorios elegidos del 30-4-2006 y del 23-9-2009, calculadas según la ec.(1); las líneas punteadas del primer día indican el horario de la fulguración solar, las del segundo un pequeño pero brusco decremento del índice AL ; la línea entera indica  $t_0 / dY(t_0)=0$ ; la línea combinada indica el mediodía local ( $t_m$ ).

**Figure 4:** Sq for April 30, 2006 and September 23, 2009, for the chosen observatories, calculated after ec.1; dotted lines show the presence of a solar flare the first day, at the second day they represent a small but sudden decrease of AL; dashed lines correspond to  $t_m$  and combined line to  $t_0$ .

De la Fig. 4 y los valores de la Tabla 3, a pesar de compararse con un modelo de una corriente unidimensional, se observa que

i)  $t_0$  (TL) (ver en la Tabla 3 o en la línea entera en las Fig.4) para observatorios del hemisferio sur es posterior a los del hemisferio norte;

ii) en el hemisferio sur  $t_0$  (aprox. a las 12,6 TL) es posterior al mediodía (de la Tabla 2, o de la línea punteada en las Fig.4), mientras que en el hemisferio norte es anterior al mediodía (aprox. a las 11 TL); es decir que el vórtice

precede al mediodía en el hemisferio norte y es posterior al mediodía en el hemisferio sur: a la longitud de Greenwich los vórtices de ambos hemisferios no necesariamente están alineados.

iii) el vórtice (definida su posición por  $t_0$ ), el 30-4-2006, está menos alejado del mediodía ( $t_m$ ) que el 23-9-2009 pues este día en el hemisferio sur  $t_0 \approx 13,3$ , y  $t_0 \approx 10$  en el norte; ambos días la longitud de  $V'$  dada por  $t_0$  se mantiene aproximadamente constante: los vórtices tienen en diferentes días diferentes posiciones respecto del mediodía.

iv) el 30-4-2006 muestra en HBK, muy claramente, variaciones semejantes a la Fig.3 (indicadas STM en la Tabla 3); lo mismo se observa en SFS y SPT, interpretándose que el vórtice se mueve hacia el norte y luego revierte su posición; la falta de variaciones en los demás observatorios denotando la movilidad de  $V$  indicaría que sólo hay un pequeño movimiento latitudinal;

v) el 23-9-2009 registra pequeñas perturbaciones en  $dX$  en HER, KMH y HBK lo que no facilita la clasificación;

vi) el 30-4-2006 BNG, MBO y TAM muestran una variación  $dX$  superior a las demás, probablemente debido a su proximidad al ecuador magnético, mientras que el 23-9-2009 se registra sólo en MBO (no hay registro en BNG);

vii) el 30-4-2006 las corrientes no alcanzan la latitud de KIR (comparar con Fig. 1);

viii) el 23-9-2009  $t_0 \approx t_v$  en TAM, pudiendo deducir que  $V'$  se encuentra próximo al observatorio; los demás valores de  $t_v$  mostrarían un alejamiento de  $V'$  hacia el norte;

ix) a pesar de que los índices de actividad geomagnética ( $\Sigma K_m=0$ ) y la baja presión del viento solar indicarían que las variaciones registradas deberían ser semejantes, se encuentra para el 23 de setiembre de 2009 una menor respuesta a este modelo geomagnético, tal vez debido a que si bien ambas fechas están próximas a equinoccios, los vientos neutros termosféricos difieren.

Obs.	30 de abril de 2006			23 de setiembre de 2009		
	$t_0$ (TU/TL))	posic.	$t_v$ (TU/TL)	$t_0$ (TU/TL))	posic.	$t_v$ (TU/TL)
HER	11,18/12,46	ST		12,07/13,35	S	
HKM	s.d.			12,08/13,29	S	
HBK	10,77/12,62	STM	9,72/11,57	11,42/13,27	S	
TSU	11,60/12,77	SE		s.d.		
ASC						
BNG				s.d.		
MBO						
TAM	10,68/11,05	NE		9,27/ <b>9,79</b>	NTM*	9,62/ <b>9,99</b>
GUI	12,13/11,03	NE		11,11/10,02	NTM*	10,6 / 9,5
SFS	11,42/11,01	NEM	11,02/11,61	10,3 / 9,89	NTM*	11,53/11,12
SPT	11,27/10,98	NEM	10,02/ 9,73	10,28/ 9,98	NTM*	11,33/11,04
AQU	9,97/10,86	NT		9,23/10,12	NTM*	10,4 /11,29
BFO	10,42/10,97	NT		9,43/ 9,98	NTM*	11,95/12,5
BFE	10,30/11,08	NT		s.d.		
UPS	9,73/10,89	NT		9,43/10,59	NT	
KIR	9,05/10,41	NP		s.d.		
HRN	9,37/10,41	N			N	

**Tabla 3:** nombre del observatorio, hora a la que se produce su paso por el meridiano del vórtice de corrientes ( $t_0$ , en TU y TL), definido por  $dY(t_0)=0$ , clasificación dadas según el modelo, y  $t_v / dX(t_v)=0$ , con, para cada uno de los 2 días estudiados.

**Table 3:** observatories name, time  $t_0$  (at universal and local time) when the vortex is at the same meridian after  $dY(t_0)=0$ , the classification according to this model, and  $t_v / dX(t_v)=0$ , for both days considered.

## CONCLUSIONES

De las comparación de los gráficos de las Figuras 4 resulta que a pesar de la igualdad de requerimientos de actividad solar, geomagnética y de viento solar, la forma de las variaciones registradas varía apreciablemente entre los días estudiados, confirmándose la fuerte variabilidad de un día a otro en la posición del foco. De la

comparación con este modelo pueden atribuirse tales diferencias a otros movimientos de los vórtices a lo largo del día que los aquí considerados y que ello puede deberse al desplazamiento del sistema de corrientes hacia el norte o sur (meridionales), este u oeste (zonales) debido a un cambio en las condiciones dinámicas de la atmósfera baja. De la comparación entre los meridianos de localización del foco entre ambos días ( $t_0$ , Tabla 3) se observan diferencias en la posición longitudinal de los vórtices. No existen aún criterios para considerar el estado más o menos estacionario de la atmósfera neutra que permitan agregarse a los geomagnéticos y caracterizar un día tranquilo según las diferentes variaciones. De esta falta de uniformidad resulta la dificultad en la selección de días Q, y mucho más en decidir cual es el Sq indicado para sustraer el día de una tormenta dado que la atmósfera neutra estaría también perturbada.

**Agradecimientos.** La autora agradece al Departamento de Cs Geológicas de la Facultad de Cs. Exactas y Naturales y al CONICET por las facilidades brindadas para la realización del trabajo, al Centro Mundial de Datos de Kyoto (Japón) por la disponibilidad de los datos e índices geomagnéticos, a la NASA (EEUU) por la facilidad de datos espaciales y al ISGI (Francia) por la facilidad de los índices utilizados en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Burrows, K., and S. H. Hall, 1965. Rocket measurements of the geomagnetic field above, Woomera, South Australia, *J. Geophys. Res.*, 70, 2149–2158, doi:10.1029/JZ070i009p02149.
- Chapman, S. and J. Bartels; 1940. *Geomagnetism*, Oxford at the Clarendon press, vol. I, pp 542.
- Forbes, J.M., 1985. Middle atmosphere tides, *Handb. MAP*, 18, 50-56.
- Gen-Xiong Chen, Wen-Yao Xu, Ai-Min Du, Ying-Yan Wu, Bo Chen, and Xiao-Can Liu, 2007. Statistical characteristics of the day-to-day variability in the geomagnetic Sq field. *J. Geophys. Res.*, 112, A06320, doi:10.1029/2006JA012059.
- Hasegawa, M., 1960. On the position of the focus of the geomagnetic Sq system, *J. Geophys Res.*, 65, 1437–1447.
- Iyemori T., M. Takeda, M. Nose, Y. Odagi and H. Toh, 2010. Mid-latitude Geomagnetic Indices "ASY" and "SYM" for 2009 (Provisional). Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, Japan.
- Killeen, T.L., B. Nardi, P.N. Purcell, R.G. Robie, T.J. Fuller-Rowell, and D. Rees, (1992). Neutral winds in the lower thermosphere from Dynamic Explorer 2, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1093-1096.
- Le Sager P. and T. S. Huang, 2002. Longitudinal dependence of the daily geomagnetic variation during quiet time. *J. Geophys. Res.*, 107, A11, 1397, doi:10.1029/2002JA009287.
- Malin, S. R. C., 1973. Worldwide distribution of geomagnetic tides, *Phil. Trans. R. Soc. London*, 274, 551– 594.
- Manson, A.H., et al., Mean winds of the upper middle atmosphere (60–110 km), 1985. A global distribution from radar systems (M.F., Meteor, VHF), *Handb. MAP*, 18, 19-22.
- Manson, A.H., C.E. Meek, H. Teitelbaum, G.J. Fraser, M.J. Smith, R.R. Clark, R. Schindler, and D. Korschner, 1989. Global behavior of the height/seasonal structure of tides between 40° and 60° latitude, *Handb. MAP*, 27, 303-316.
- Mayaud, P. N., 1965. Analyse morphologique de la variabilité jour à jour de la variation "régulière" Sr du champ magnétique terrestre, II, Le système de courants Cm (régions non polaires), *Ann. Geophys.*, 21, 515–544.
- Mayaud P.N., 1980. Deviation, meaning and use of Geomagnetic Indices. *AGU Geophysical Monograph* 22, pp154.
- Menvielle M. and A. Berthelier, 1991. The K derived planetary indices. Description and availability. *Reviews of Geophysics* 30.
- Parks, G.K., 1991. *Physics of space plasma, an introduction*. Addison-Wesley publishing Company, pp 538.
- Pedatella N. M., J. M. Forbes, and A. D. Richmond (2011). Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (Sq) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations *J. Geophys. Res.*, 116, A04317, doi:10.1029/2010JA016289.
- Richmond, A. D., and R. G. Roble, 1987. Electrodynamic effects of the thermospheric winds from the NCAR thermospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 92, 12, 365–12,376.
- Stening, R. J., 1991. Variability of the equatorial electrojet: its relations to the Sq Current system and semidiurnal tides, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1979–1982.
- Stening R. T. Reztsova and Le Huy Minh, 2005a. Day-to-day changes in the latitudes of the foci of the Sq current system and their relation to equatorial electrojet strength. *J. Geophys. Res.*, 110, A10308, doi:10.1029/2005JA011219.
- Stening R., T. Reztsova, D. Ivers, J. Turner, and D. Winch, 2005b. A critique of methods of determining the position of the focus of the Sq current system. *J. Geophys. Res.*, 110, A04305, doi:10.1029/2004JA010784.

- Takeda M. (2013). Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field; *J. Geophys. Res.*, 118, 4516-4522, doi:10.1002/jgra.50386.
- Takeda M., T. Iyemori and A. Saito, 2003. Relationship between electric field and currents in the ionosphere and the geomagnetic Sq field. *J. Geophys. Res.*, 108, A5, 1183, doi:10.1029/2002JA009659.
- Torta J. M., J. J. Curto and P. Bencze, 1997. Behavior of the quiet day ionospheric current system in the European region *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. A2, pages 2483-2494, february 1, 1997
- Van Zele, M.A., 2013a. La elección de días geomagnéticamente tranquilos. *GEOACTA* 38 (2): 107-127.
- Van Zele, M.A., 2013b. Las variaciones geomagnéticas tranquilas Sq y su relación con parámetros solares. *GEOACTA* 38 (1): 30-47.
- Van Zele, M.A. and A. Meza, 2011. The geomagnetic solar flare effect identify by SIIG as an indicator of solar flare observed by GOES satellite. *Advances in Space Research* 48, 826-836.
- Winch, D. E., 1981. Spherical harmonic analysis of geomagnetic tides, 1964– 1965, *Phil. Trans. R. Soc. London*, 303, 1104.
- Yamazaki Y., K. Yumoto, T. Uozumi, and M. G. Cardinal, 2011a. Intensity variations of the equivalent Sq current system along the 210° magnetic meridian. *J. Geophys. Res.*, 116, A10308, doi:10.1029/2011JA016632.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, M. G. Cardinal, B. J. Fraser, P. Hattori, Y. Kakinami, J. Y. Liu, K. J. W. Lynn, R. Marshall, D. McNamara, T. Nagatsuma, V. M. Nikiforov, R. E. Otadoy, M. Ruhimat, B. M. Shevtsov, K. Shiokawa, S. Abe, T. Uozumi and A. Yoshikawa, 2011b. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation, *J. Geophys. Res.*, 116, A10312, doi:10.1029/2011JA016487.

Recibido: 22-08-2014  
Aceptado: 09-01-2015