

## **LA ASIMETRIA DE LAS VARIACIONES GEOMAGNETICAS DE TORMENTA REGISTRADAS EN LATITUDES BAJAS Y MEDIAS**

*María Andrea Van Zele*

CONICET y Facultad de Cs Exactas y Naturales (UBA), Dto de Cs Geológicas.  
1428 Buenos Aires, Argentina - [avanzele@gl.fcen.uba.ar](mailto:avanzele@gl.fcen.uba.ar)

### **RESUMEN**

El objetivo del trabajo es mostrar que corrientes asociadas a la fase de expansión de las subtormentas contribuyen con la variación geomagnética de tormenta registrada en latitudes bajas y medias. El índice AL de actividad geomagnética se utiliza como expresión de las subtormentas. Se cuantifica el comienzo de la fase principal de una tormenta en la que los parámetros del viento solar (densidad, velocidad, campo magnético) son constantes por lo que lo es su contribución a la corriente anillo ecuatorial; entonces ésta debería producir un decaimiento exponencial de la variación geomagnética norte de tormenta, lo que no se observa. Los resultados del modelo propuesto muestran que las variaciones geomagnéticas de tormenta registradas en bajas y medias latitudes en la tarde y la noche dependen de AL. Se interpreta que 1) la corriente ascendente de la cuña de corriente responsable de la fase de expansión de la subtormenta contribuye a la corriente anillo; 2) a través de la corriente descendente de la cuña la corriente anillo colabora con la ionosfera auroral; 3) la rápida recuperación de la subtormenta se manifiesta como una rápida recuperación de la variación norte a la medianoche en latitudes bajas y medias cuya intensidad excede al modelo, lo que contribuye a la interpretación de que durante la recuperación la cuña se cierra a través de la corriente anillo, como ya se ha sugerido. De ello se deduce que las variaciones geomagnéticas utilizadas para calcular el índice Dst resultan de la intensificación de la corriente anillo ecuatorial por el viento solar, y por otras corrientes asociadas a la expansión de las subtormentas las que no son opuestas en longitud.

**Palabras claves:** tormenta magnética, subtormenta, corriente anillo ecuatorial, ecuación de diferencias

### **ABSTRACT**

The aim of this paper is to show that currents related to substorms contribute to the storm geomagnetic variations recorded at mid and low latitudes. The auroral geomagnetic activity AL index is used as the substorm measure. The main phase of a storm with constant solar wind parameters (density, velocity, interplanetary magnetic field) is modeled. It is shown that the geomagnetic variations recorded in the afternoon, evening and at night depend on AL due to the relation between the auroral ionosphere and the equatorial ring current through the currents of the current wedge, and that the quick recovery of the expansion phase of the substorm can be explained if the wedge closes by the plasmasphere, as it has been proposed. So, the geomagnetic variations used to compute the Dst index are the result of the enhancement of the equatorial ring current by the solar wind and by other ones associated with the current wedge which are not opposite in longitude.

**Keywords:** geomagnetic storm, substorm, equatorial ring current, difference equations.

## INTRODUCCION

El campo permanente, la variación secular, la estacional y la solar regular (Sq), y durante una tormenta geomagnética la variación de tormenta X<sub>t</sub>, contribuyen a las componentes geomagnéticas norte X u horizontal H registradas en observatorios de latitudes bajas y medias. Las tormentas y otras perturbaciones geomagnéticas son manifestaciones de la intensificación del acoplamiento viento solar-magnetosfera. Las variaciones del viento solar y del campo magnético interplanetario (IMF) orientado hacia el sur energizan la corriente anillo que resulta de la deriva en dirección azimutal de partículas atrapadas en la plasmasfera debido a la inhomogeneidad del campo magnético terrestre; fluye toroidalmente hacia el oeste, centrada en el plano ecuatorial, a altitudes entre 10000 y 60000 km. Su mayor densidad se encuentra entre 3 y 5 radios terrestres. La mayor parte de estas partículas atrapadas que pueblan la plasmasfera provienen del viento solar y de la ionosfera; la forma en que son atrapadas y aceleradas es aún incierta, pero probablemente involucra el acceso directo de las primeras o un almacenamiento temporario en la cola magnética próxima a la tierra; el decrecimiento de la componente norte (X) u horizontal (H) sobre la superficie terrestre es el principal efecto de esta deriva hacia el oeste.

Una subtormenta magnética es un proceso transitorio iniciado del lado nocturno de la tierra, en el cual una fracción de la energía producida por la interacción viento solar-magnetosfera es depositada en la ionosfera auroral y en la magnetosfera (McPherron, 1991). Su fase de expansión se produce cuando parte de la corriente este-oeste de la cola magnética que atraviesa la zona más próxima a la tierra (Akasofu, 1970), y aún de la misma corriente anillo plasmasférica (Lui, 2001) es desviada hacia la tierra; fluye alineada a las líneas de

campo magnético hacia la ionosfera auroral en la pos-medianoche (tramo descendente a la ionosfera auroral de la cuña de corriente); recorre hacia el oeste la ionosfera auroral nocturna (sumándose al electrochorro al oeste existente desde la fase de crecimiento de la subtormenta); y fluye desde la ionosfera auroral del lado del atardecer (tramo ascendente); este último tramo alcanza a la corriente anillo y/o regresa a la corriente que atraviesa la cola, ahora del lado del atardecer (Kan, 1992). La variación geomagnética que esta cuña de corriente produce en observatorios de baja latitud durante horas nocturnas puede justificarse también asignándolo a un sistema de corrientes eléctricas ionosféricas formado por un electrochorro auroral nocturno hacia el oeste y el flujo de retorno a través de la ionosfera de bajas latitudes (sistema equivalente) (Kamide y Fukushima, 1970), en virtud del teorema de Fukushima (Fukushima, 1969). Los índices AE (Auroral Electrojet) se calculan a partir de las variaciones de H registradas en observatorios elegidos de la región auroral boreal (Mayaud, 1980); el índice AL es la envolvente inferior de las variaciones registradas simultáneamente en ellos y pretende representar la máxima densidad de corriente del electrochorro auroral al oeste (Berthelier y Menvielle, 1992). La fase de expansión queda manifiesta por un decrecimiento intenso y abrupto de AL.

Estudiando relaciones causa-efecto entre subtormentas y la fase principal de tormentas magnéticas se ha especulado acerca de si la ocurrencia sucesiva de subtormentas intensas juega un rol directo en la energización de la corriente anillo, dado que las observaciones realizadas por los satélites muestran la presencia de iones ionosféricos en ella (Kamide *et al.*, 1998), con acuerdo más o menos exitoso, pero no siempre cuantificado. Durante el desarrollo de una tormenta el decrecimiento H<sub>t</sub> (o X<sub>t</sub>) en observatorios de baja y media latitud no es simétrico en longitud,

sino más intenso del lado del atardecer pero en la fase de recuperación tiende a la simetría cilíndrica (Akasofu S.-I., 1966). El promedio de variaciones calculadas a partir de registros en 4 o 6 observatorios de latitudes bajas representa a la intensidad de la variación debida a la corriente anillo ecuatorial simétrica; se expresa por los índices de actividad geomagnética Dst (horario) y symH (a minuto). Se ha propuesto que la asimetría de la perturbación es debida a corrientes alineadas al campo que cierran en la ionosfera auroral con una corriente hacia el este (Cummings, W.D., 1966; Boström, 1968; Kamide y Fukushima, 1971); también se propone (Kan, 1992) la existencia de una corriente anillo parcial nocturna hacia el este superpuesta a la corriente simétrica, cerrando la cuña de corriente. Friedrich *et al.* (1999) modelan la influencia de la cuña de corriente sobre el índice Dst, e interpretan que su efecto depende de la distancia entre los pies de las corrientes alineadas de la cuña (de la extensión longitudinal de la porción ionosférica de la cuña) y de la vecindad a los observatorios que lo determinan cuando este sistema y el anillo ecuatorial simétrico no interactúan. Wu *et al.* (2004) usan la ruptura de auroras como el indicador más confiable de subtormentas, cuestionando los índices AL o AE como indicadores pues se determinan a partir de registros de una inadecuada red de observatorios geomagnéticos; sin embargo no cuestionan que un promedio de variaciones sirva para definir a los Dst como la intensidad de una corriente anillo simétrica real. Los estudios estadísticos de Wu *et al.* (2004) sobre la existencia de relaciones entre tormentas y subtormentas los llevan a concluir que la ocurrencia de subtormentas no afecta la intensidad de una tormenta.

La variación geomagnética en tiempo de tormenta registrada durante una tormenta magnética es considerada tradicionalmente como el resultado de la energización de una

corriente anillo ecuatorial simétrica; la energía del sistema dinámico corriente anillo ecuatorial ha sido representada por una ecuación diferencial a primer orden (Burton *et al.*, 1975) (llamado sistema dinámico a primer orden)

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{T} = E(t) \quad (1)$$

donde  $U$  es la energía cinética total de las partículas,  $T$  la constante temporal de decaimiento de la solución del sistema homogéneo ( $k=1/T > 0$  es la constante de decaimiento), y  $E(t)$  la función de entrada, generalmente referida al campo eléctrico inducido por el viento solar.

La variación en tiempo de tormenta  $Xt$  muestra que la corriente anillo ecuatorial simétrica es una simplificación de una corriente plasmasférica no simétrica cuya energización implica la consideración de otras contribuciones (Van Zele y Schneider, 1999; Van Zele, 2002), o que registra la superposición de dos sistemas de corrientes independientes: la corriente anillo ecuatorial simétrica y la de subtormenta. La presencia de iones ionosféricos en la primera hace suponer que los sistemas interactúan.

El objetivo del trabajo es mostrar que las variaciones geomagnéticas de tormenta registradas en latitudes medias y bajas no son simétricas alrededor del eje del dipolo geomagnético, y que las corrientes asociadas con las subtormentas también colaboran con ellas, y de modo no despreciable.

## EL MODELO

Se supone que la componente norte ( $Xt$ ) de una tormenta geomagnética muestra superpuestos el decrecimiento debido a la corriente anillo plasmasférica a la que ha contribuido la cuña de corriente de subtormenta, o muestra la superposición de dos sistemas de corrientes no interactuantes: la

corriente anillo plasmasférica y corrientes ionosféricas.

1- En este trabajo el primer caso se esquematiza por la siguiente secuencia:

I) cuando la componente perpendicular a la eclíptica del campo magnético interplanetario torna hacia el sur ( $B_z(\text{IMF}) < 0$ ) la magnetosfera se abre, y si perdura por varias horas permite la energización de la corriente anillo ecuatorial debido al incremento de partículas cargadas en la plasmasfera; el decrecimiento de la variación de tormenta  $X_t$  (o  $H_t$ ) depende de la intensidad de  $B_z(\text{IMF})$  y de la velocidad y densidad del viento solar; la velocidad de decrecimiento no es la misma en todas las longitudes; cuando  $B_z(\text{IMF})$  torna hacia el norte la magnetosfera se cierra y  $X_t$  recupera (crece) en observatorios de cualquier longitud;

II) durante las subtormentas:

a) al atardecer se produce transferencia de partículas cargadas de la cuña de corriente (de la ionosfera auroral) a la corriente anillo ecuatorial, medida por un mayor decrecimiento de  $X_t$  en esos observatorios respecto de los ubicados a otra hora local;

b) observatorios ubicados después de la medianoche y antes del amanecer registran un crecimiento de  $X_t$  durante la subtormenta debido a la pérdida de energía de la corriente anillo plasmasférica.

### Expresión Matemática

I) Supóngase que la variación geomagnética en tiempo de tormenta  $R$  de la componente norte del campo geomagnético en un observatorio de baja latitud es proporcional a la energía de la corriente anillo ecuatorial (denominada  $U$  en la ecuación (1)) (Skopke, 1966) cuya variación depende linealmente del número de iones presentes en la plasmasfera, y que éstos son provistos únicamente por el viento solar; supóngase que en el intervalo considerado el viento solar tiene sus parámetros

constantes y  $B_z(\text{IMF}) < 0$ , por lo que la contribución a la plasmasfera es  $K$  ( $K < 0$ , constante) pues la energía depende de los parámetros del viento solar que alimenta a la corriente anillo. Entonces, la variación  $R$  (proporcional a  $U$ ) según la ecuación (1) puede expresarse como

$$\frac{dR}{dt} + \frac{R}{T} = K_1 \quad (2)$$

si el estado inicial del sistema es  $R_0$ , la solución es una exponencial decreciente a la asíntota  $T.K$  si  $T.K < R_0$  o creciente a la asíntota  $T.K$  si  $T.K > R_0$ . Los observables  $K_1$  y  $R$  están disponibles en intervalos discretos (cada minuto) si bien ambos son esencialmente continuos. La ecuación diferencial (2) puede transformarse en una ecuación de diferencias que expresa a un sistema dinámico discreto (Box and Jenkins, 1976) como

$$R_i - R_{i-1} + k_1 R_i = K_1 \quad (3)$$

siendo  $k_1$  la constante de decaimiento definida para (1) y  $K_1$  la contribución del viento solar, constante para esta tormenta; de (3), reordenando, resulta

$$R_i = a_1 R_{i-1} + C_1 \quad (4)$$

siendo  $a_1 = 1/(k_1 + 1)$ ,  $C_1 = K_1/(k_1 + 1)$ , y los parámetros  $a_1$  y  $C_1$  pueden ajustarse por cuadrados mínimos considerando  $R_i = X_t$ .

II) Supóngase que además un aporte de iones  $L(t)$  de la ionosfera auroral a la corriente anillo es provisto por el electrochorro al oeste y que éste es proporcional al índice AL de actividad geomagnética. Entonces, la variación  $R$  (proporcional a  $U$ ) según la ecuación (1) puede expresarse, si existiese un retraso temporal  $\hat{t}$ , como

$$\frac{dR}{dt} + \frac{R}{T} = K + L(t - \hat{t}) \quad (5)$$

**La asimetría de las variaciones geomagnéticas de tormenta...**

En este caso la contribución de los iones de la ionosfera auroral a la plasmasfera ( $LH'' g.AL, g > 0$ ) no se expresa como una función analítica, sino que son valores tabulados a intervalos regulares ( $L$  es una función discreta), la ecuación diferencial (2) sólo puede resolverse transformándola en una ecuación de diferencias que expresa a un sistema dinámico discreto (Box y Jenkins, 1976)

$$R_i - R_{i-1} + k_2 R_i = K_2 + G_2 AL_{i-n} \quad (6)$$

de donde

$$R_i = a_2 R_{i-1} + C_2 + b_2 AL_{i-n} \quad (7)$$

siendo  $a_2 = 1/(k_2 + 1)$ ,  $C_2 = K_2/(k_2 + 1)$ ,  $b_2 = g_2/(k_2 + 1)$ , y los parámetros  $a_2$ ,  $C_2$  y  $b_2$  pueden ajustarse por cuadrados mínimos considerando  $R_i = X_t$ . El parámetro  $a_2$  informa sobre  $k_2$  que es la constante de decaimiento de  $R$  y es supuesta constante en el intervalo;  $K_2 = C_2(k_2 + 1)$  es la energía dependiente de los parámetros del viento solar que alimenta a la corriente anillo, y  $g_2 = b_2(k_2 + 1)$  la fracción de electrochorro auroral al oeste transferida a la corriente anillo. El parámetro  $n$  es el número de intervalos de retraso.

2- Es también posible pensar que a la variación de tormenta  $R$  colaboran en forma independiente tanto la corriente anillo ecuatorial ( $R_e$ ) como un sistema asociado a la corriente de electrochorro auroral al oeste ( $R_a$ ); donde  $R = R_e + R_a$  y  $R_e$  satisface la ecuación (2) y  $R_a = g.AL$  (variación debida por ejemplo, a una corriente ionosférica asociada al electrochorro al oeste); en ese caso la ecuación de diferencias se transforma en

$$R_i = a_3 R_{i-1} + C_3 + G_3 AL_{i-n} \quad (8)$$

siendo  $a_3 = g_3/(k_3 + 1)$ ,  $C_3 = K_3/(k_3 + 1)$  y  $g_3$  la

parte de electrochorro auroral al oeste que contribuye a  $R_a$ . La ecuación (8) es muy similar a la ecuación (7) de modo que, al ajustar por cuadrados mínimos para determinar los coeficientes, resultan  $a_3 = a_2$ ,  $C_3 = C_2$  y  $g_3 = b_2$ .

De la ecuación (6) se deduce que en el intervalo  $[1, M]$  las sumatorias

$$S_k = \sum_1^M K_2 \quad \text{y} \quad S_g = \sum_1^M G_2 AL_{i-n} \quad (9)$$

contribuyen a la variación de tormenta  $X_t$  proporcionalmente al viento solar y a la subtormenta. El cociente  $S_2 = S_g/S_k$  mide la contribución relativa a la energía entregada, que en la ecuación (2) es provista únicamente por el viento solar.

3- Es habitual suponer que las variaciones  $X_t$  registradas en las latitudes aquí consideradas contienen dos efectos de naturaleza planetaria: la inducción de corrientes en la corteza y la compresión magnetosférica por el viento solar. La primera señala (Price, 1967) que la componente externa es  $5/7$  de la registrada ( $X_{t_{ext}} = (5/7) X_t$ ); su consideración indicaría que los valores de  $K_p$ , o de  $g_2$  y  $K_p$ , o de  $g_3$  y  $K_3$  deben ser multiplicados por el factor  $5/7$ , resultando la contribución relativa de energía ( $S_2$ ) independiente de él; la constante de decaimiento no se vería afectada por esta consideración. La compresión magnetosférica  $p = b \cdot (\tilde{n} \cdot v^2)^{(1/2)}$  (con  $b = 0.2 \text{ nT}/(\text{ev} \cdot \text{cm}^{-3})^{(1/2)}$ ) que debe ser descontada de  $X_{t_{ext}}$  (Burton *et al.*, 1975) depende de la densidad de masa  $\tilde{n}$  y la velocidad  $v$  del viento solar; en el intervalo considerado en este trabajo  $p$  resulta constante ya que ambas lo son. Y como la variación se mide a partir del instante de inicio del decrecimiento de  $X_t$ , la consideración de una constante no varía los parámetros calculados.

**LOS DATOS**

Se considera la variación geomagnética norte de tormenta X<sub>t</sub> calculada a partir de valores registrados en los observatorios de baja latitud geomagnética (menor que 30°) que figuran en la Tabla 1, los que están disponibles en el centro mundial WDC de Kyoto (Japón) (<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/>); en la sexta columna se indica aproximadamente, para cada observatorio, en tiempo local (TL) el intervalo [13,18] TU aquí estudiado.

Los observatorios cuyo nombre figura en cursiva colaboran con sus registros en el cálculo del índice Dst. Los observatorios BNG, AAE, GUA y ASC están próximos al ecuador geomagnético; sus variaciones serán consideradas para una mejor interpretación de las de

bajas y medias latitudes; HUA no ha sido considerado pues se encuentra a 1° de latitud de inclinación, sometido al electrochorro ecuatorial.

Los valores de tormenta X<sub>t</sub> son el resultado de restar a la componente norte X del día de tormenta la misma componente del día más tranquilo (X<sub>q</sub>) que diste menos de un mes; ésta es una manera simplificada de eliminar el campo principal, la variación secular, estacional y diaria solar regular (S<sub>q</sub>); no coincide, pero para este estudio es equivalente, con la que se utiliza en los observatorios que contribuyen al cálculo del índice Dst (en <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>); las componentes han sido registradas por los observatorios cada 1 minuto; se los promedia cada u=5 minutos, resultando valores promedios de 0:00 a 0:04, de 0:05 a 0:09,... TU.

**Tabla 1.** Nombre y sigla IAGA del los observatorios cuyos datos se utilizan en este trabajo, sus coordenadas, e intervalo en tiempo local en el que se estudian las variaciones

Observatorio	lat. geog.	sigla (°)	long. geog. (°)	lat. geom. (°)	[13, 18] TU (h)
Tamanrasset	TAM	22.8	5.5	24.9	[13, 18] TL
Bangui	BNG	4.3	18.6	4.3	[13:30, 18:30] TL
Tsumeb	TSU	-19.2	17.7	-18.6	[14, 19] TL
Lourenço Marquez	LMM	-25.9	32.6	-28.0	[15, 20] TL
Tananarive	TAN	-18.9	47.6	-23.9	[16, 21] TL
Alibag	ABG	18.6	72.9	9.6	[18, 23] TL
Phu Thuy	PHU	21.0	105.9	10.0	[20, 1] TL
Lumping	LNP	25.0	121.2	14.2	[21, 2] TL
Kanoya	KNY	31.4	130.9	21.7	[22, 3] TL
Kakadu	KDU	-12.7	132.5	-22.8	[22, 3] TL
Chichijima	CBI	27.1	142.2	17.7	[22:30, 3:30] TL
Guam	GUA	13.6	144.9	4.6	[22:30, 3:30] TL
Charters Towers	CTA	-20.1	146.2	-28.7	[23, 4] TL
Midway	MID	28.2	182.6	24.6	[1, 6] TL
Apia	API	-13.8	188.2	-15.6	[1:30, 6:30] TL
<i>Honolulu</i>	HON	21.3	202.0	21.5	[2:30, 7:30] TL
Papeete	PPT	-17.6	210.4	-15.1	[3, 8] TL
<i>San Juan</i>	SJG	18.4	293.9	29.4	[8:30, 13:30] TL
Kourou	KOU	2.2	307.3	12.7	[9:30, 14:30] TL
Vassouras	VSS	-22.4	316.3	-12.5	[10, 15] TL
M'Bour	MBO	14.4	343.0	20.7	[12, 17] TL
Ascensión I.	ASC	-7.9	345.6	-1.8	[12, 17] TL

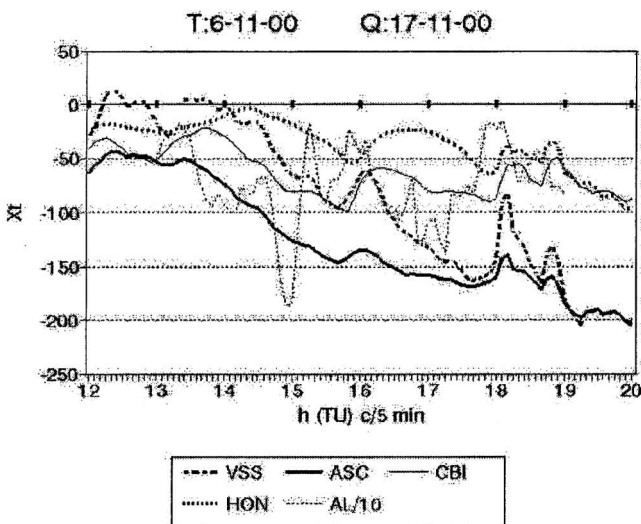
## La asimetría de las variaciones geomagnéticas de tormenta...

En la Figura 1 se muestran las variaciones  $X_t$  de tormenta correspondientes al 6 de noviembre de 2000 para algunos de los observatorios mencionados: VSS, ASC, CBI y HON; el índice AL ha sido digitalizado de <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae1/q/Rae.001106.html>; se ha elegido esta tormenta porque tanto el campo magnético interplanetario ( $B_z(\text{IMF}) \text{ H}'' -10 \text{ nT}$ ) como la velocidad y densidad del viento solar ( $v \text{ H}'' 810 \text{ km/seg}$ ;  $n \text{ H}'' 7./\text{cm}^3$ ) se registran constantes en el intervalo [12:45, 17:20] TU por el satélite ACE; en este intervalo ( $B_z(\text{IMF}) < 0$ ) la magnetosfera permanece abierta; dependiendo de la velocidad, transcurre entre media y 1 hora entre el paso del viento solar por el satélite y su llegada a la magnetosfera. El día tranquilo considerado es el 17 de noviembre de 2000.

### OBSERVACIONES

- 1) La tormenta se inicia con subtormenta;
- 2) el índice AL (AL/10 en Figura 1):

- i) a partir de las 13:20 TU comienza a decrecer (se intensifica) con una muy intensa fase de expansión hasta casi las 15 TU,
  - ii) una primera recuperación (crecimiento) se observa entre las 15 y las 15:15 TU, seguida por una nueva intensificación hasta las 15:30 TU;
  - iii) se observa la segunda recuperación de 15:30 a 16:05 TU, seguida por intensificaciones de AL hasta las 17:40 TU;
  - iv) de 17:40 a 18:10 TU AL muestra la tercera recuperación, juntamente con el cierre de la magnetosfera;
- 3) El comportamiento de  $X_t$  puede caracterizarse según la longitud (la hora local) del observatorio:
- i) los observatorios KOU, MBO, TAM, BNG, TSU, LMM, TAN y ABG muestran un comportamiento semejante a ASC (la tormenta inicia entre la mañana y el atardecer); los observatorios PHU, LNP, KNY, KDU, GUA, CTA muestran un comportamiento similar a CBI (la tormenta inicia antes de la me-



**Figura 1.** Variaciones  $X_t$  de tormenta correspondientes al 6 de noviembre de 2000 y valores del índice AL, digitalizado, para el intervalo en estudio, donde se observa que el decrecimiento de  $X_t$  no se inicia simultáneamente en todos los observatorios ni es una exponencial decreciente como lo sugeriría la ecuación (2). Los valores están graficados cada 5 minutos.

dianoche); los observatorios MID, API y PPT muestran un comportamiento similar a HON (la tormenta inicia antes del amanecer); VSS ve sus variaciones algo amplificadas por el electrochorro ecuatorial (la tormenta inicia a la mañana);

ii) el decrecimiento de  $X_t$  en los observatorios (Fig.1) no se registran simultáneamente con las intensificaciones de AL:

a) el primer decrecimiento se inicia a 13:25 TU en ASC (H<sup>o</sup>12:30 TL), a las 13:45 TU en CBI (H<sup>o</sup>23 TL) y VSS (H<sup>o</sup>10:30 TL), a las 14:20 TU en HON (H<sup>o</sup> 4 TL);

b) la primer recuperación no dura lo suficiente como para que  $X_t$  muestre una recuperación en ellos;

c) la segunda recuperación es registrada entre las 15:40 y las 16:05 TU en ASC (en [14:40, 15:00] TL) y VSS (en [12:40, 13:00] TL); y entre las 15:50 y las 16:20 en CBI (en [1:30, 2:00] TL);

d) la tercera recuperación se registra entre las 17:35 y las 18:10 TU en ASC (en [16:30, 17:00] TL aprox.), entre las 17:40 y las 18:10 TU en VSS (en [14:40, 15:10] TL) y entre las 17:55 y las 18:10 TU en CBI (en [3:25, 3:40] TL);

e) la variación de  $X_t$  en HON (observada también en MID, API y PPT, observatorios localizados antes del amanecer al inicio del intervalo estudiado), muestra un comportamiento diferente: si bien decrece a partir de las 14:20 TU, alcanza máximos valores durante mínimos de AL, es decir, parece corresponderse con contribuciones de  $-AL$ ; sin embargo, muestra la última recuperación de AL entre las 17:55 y las 18:10 TU (en [7:30, 7:45] TL aproximadamente);

## RESULTADOS

1) al inicio de la tormenta ( $B_z(IMF) < 0$ ,  $AL < 0$ ) el decrecimiento de  $X_t$  se observa más temprano en observatorios ubicados entre mediodía y el atardecer (TAM, BNG, TSU, LMM, TAN);

2) durante la tormenta ( $B_z(IMF) < 0$ ) y con subtormenta: i)  $X_t$  decrece pero se observa una variación sincrónica con AL en observatorios ubicados a la mañana, a la tarde y a la medianoche;  $X_t$  varía sincrónicamente con  $-AL$  en observatorios localizados próximos al amanecer

3) durante la tormenta, cuando  $AL' > 0$  (recupera) y no se intensifica rápidamente (segunda recuperación de AL a las 16 TU aproximadamente),  $X_t$  recupera en observatorios localizados a la mañana, mediodía, tarde y noche, pero antes del lado diurno que del nocturno; cerca de la medianoche (ABG, PHU, LNP, KNY, KDU, CBI, GUA, CTA, entre las 21 y las 2 TL) la recuperación tiene mayor amplitud, durante un intervalo mayor, y se observa unos pocos minutos antes en ABG que en CTA, sugiriendo que comienza antes de la medianoche y se propaga hacia el este;

4) cuando la magnetosfera se cierra ( $B_z(IMF) > 0$ ), y se observa la tercera recuperación de AL a las 17:40 TU),  $X_t$  crece, independientemente de la longitud del observatorio.

## LA CUANTIFICACION

Las variaciones de tormenta  $X_t$  de los distintos observatorios a partir de los registros del 6 de noviembre de 2000 se modelan según las ecuaciones (2) y (5); para ello se calculan los parámetros de las ecuaciones (4) y (7), ajustándolos por cuadrados mínimos, suponiendo que se mantienen constantes en el intervalo estudiado. En la tabla que sigue se muestra para cada observatorio el intervalo considerado para el ajuste (segunda columna), el coeficiente de correlación lineal  $R$  entre los valores de tormenta  $X_t$  y los calculados ( $X_{tc}$ ) a partir del valor anterior al del inicio del intervalo, y los parámetros de las ecuaciones (3) y (6).

De la Tabla 2 se infiere que:

i) en general,  $R$  es mayor cuando se considera a AL como forzante del sistema, es decir, ajustando según la ecuación (7) u (8) (sexta



*La asimetría de las variaciones geomagnéticas de tormenta...*

columna) en lugar de la simplificada ecuación (4) (tercera columna);  
 ii) entre las 14 y las 16 TU, X<sub>t</sub> en los observatorios MID (de 2 a 4 TL), API (de 2:30 a 4:30 TL), HON (de 3:30 a 5:30 TL) y PPT (de 4 a 6 TL) no se ajustan al modelo propuesto; también se observa que X<sub>t</sub> se ajusta en todo el intervalo considerado en los observatorios de SJG (de 11:30 a 15:30 TL), KOU (de 12:30 a 16:30 TL) y MBO (15 a 19

TL). El ajuste de X<sub>t</sub> mejora si se efectúa hasta las 16 TU en ASC (15 TL), TAM (16 TL), BNG (16:30 TL), TSU (17 TL), LMM (18 TL), TAN (19 TL): comparar el coeficiente de correlación lineal entre X<sub>t</sub> y X<sub>tc</sub> para TAN entre las 14 y las 16 TU (**R** = 0.981) y entre las 14 y las 18 TU (**R** = 0.903); y en ABG, PHU, LNP, KNY, CBI, GUA y CTA; el ajuste entre X<sub>t</sub> y X<sub>tc</sub> para KDU se ha calculado considerando los valores para la unión de los

**Tabla 2.** intervalo considerado para el ajuste (segunda columna), coeficiente de correlación lineal **R** entre los valores de tormenta X<sub>t</sub> y los calculados (X<sub>tc</sub>) a partir del valor anterior al del inicio del intervalo, y los parámetros:  $k_1$ : constante de decaimiento de la variación geomagnética registrada en un observatorio cuando el único contribuyente es el viento solar (ec.3),  $K_1$ : contribución del viento solar a la variación registrada si fuera el único forzante del sistema (ec.3),  $k_2$ : constante de decaimiento de la variación geomagnética registrada en un observatorio para el modelo propuesto (ec.6),  $K_2$ : contribución del viento solar a la variación registrada para el modelo propuesto (ec.6),  $g_2$ : contribución de la cuña de corriente a la variación registrada para el modelo propuesto (ec.6),  $\pi$ : retardo de la contribución de la cuña de corriente a la variación geomagnética según el modelo propuesto; u = 5 minutos. Para LMM y TAN se han calculado los parámetros de ajuste para distintos intervalos; para KDU se han calculado los parámetros para la unión de dos intervalos, excluyendo aquél en que la recuperación no responde al modelo.

Obser.	Intervalo (TU)	R	$k_1$ (1/u)	$K_1$ (nT/u)	R	$k_2$ (1/u)	$K_2$ (nT/u)	$g_2$ (1/u)	n (u)
TAM	13:25-15:40	.993	.0626	-10.6	.995	.0602	-8.3	.0023	3
BNG	13:30-15:40	.992	.0509	-10.1	.995	.0477	-6.9	.0020	3
TSU	13:30-18:05	.959	.0718	-10.9	.950	.0587	-5.9	.0041	3
LMM	13:30-15:40				.988	.0450	-4.3	.0028	3
	13:30-18:05	.933	.0797	-8.9	.962	.0640	-4.1	.0041	3
TAN1	13:30-15:40	.975	.0703	-10.2	.981	.0686	-8.4	.0018	3
TAN2	13:30-18:00				.903	.0666	-6.6	.0030	3
ABG	13:50-15:50	.992	.0697	-13.2	.992	.069	-12.6	.0005	0
PHU	13:50-15:55	.992	.0781	-14.0	.993	.0709	-9.7	.0039	0
LNP	13:50-15:55	.991	.0777	-12.5	.991	.0642	-7.1	.0047	1
KNY	13:50-15:35	.985	.0567	-8.4	.991	.0564	-4.1	.0046	1
KDU	14:05-15:35	.981	.0973	-11.0	.991	.0724	-6.0	.0035	2
	U 16:40-18:05								
CBI	13:55-15:35	.984	.0490	-6.3	.993	.0487	-3.2	.0033	1
GUA	14:00-15:35	.983	.0468	-6.8	.992	.0477	-4.2	.0029	1
CTA	14:05-15:35	.944	.0679	-7.3	.993	.0632	-0.2	.0074	2
MID	14:25-15:35	.947	.1820	-7.6	.975	.1470	-8.7	-.0022	2
API	14:25-15:55		$k_1 < 0$			$k_2 < 0$			1
HON	14:25-15:55		$k_1 < 0$			$k_2 < 0$			2
PPT	14:30-15:50		$k_1 < 0$			$k_2 < 0$			2
SJG	14:30-18:05	.951	.1049	-9.5	.985	.0555	-3.3	.0024	1
KOU	14:30-18:05	.958	.0700	-10.2	.986	.0468	-3.7	.0046	1
VSS	14:30-18:05	.893	.0468	-7.7	.977	.0190	2.7	.0093	1
MBO	13:30-18:05	.985	.0539	-8.6	.992	.0456	-4.8	.0034	2
ASC	13:30-15:45	.995	.0103	-4.6	.998	.0097	-2.9	.0019	1

2 intervalos de decrecimiento de  $X_t$ , y no se observa una variación significativa en la correlación respecto de otros observatorios nocturnos;

iii) el ingreso de energía debido a la influencia del viento solar, es mayor entre las 14 y las 23 TL (de tarde hasta medianoche) en ambos modelos (TAM... KDU), según  $K_1$  y  $K_2$ ;

iv) la constante de decaimiento del sistema es menor cuando se considera la contribución de la subtormenta que cuando se supone que el viento solar es el único contribuyente a  $X_t$  ( $k_2 < k_1$ );

vi) los observatorios ecuatoriales ASC y BNG, a la tarde, o GUA, a la noche, no muestran en  $X_t$  diferencias con observatorios de latitudes medias; el observatorio VSS, próximo al ecuador de inclinación en la mañana estival, muestra amplias variaciones en  $X_t$ , por lo que se deduce una fuerte influencia de la ionosfera ecuatorial en ellas.

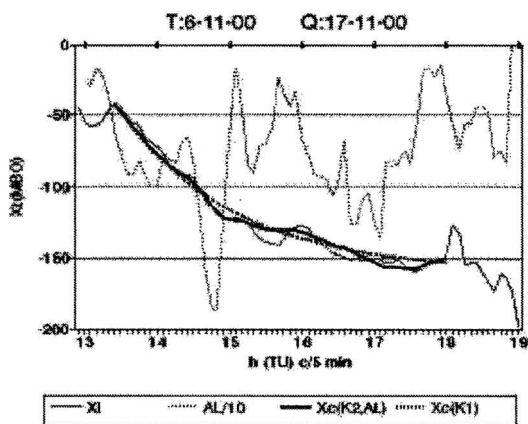


Figura 2.  $X_t$ (MBO) y valores modelados según los parámetros de las ec. (4) y (7) calculados por cuadrados mínimos a partir de la ecuación de diferencias. Se observa un mejor ajuste cuando se considera la influencia de la cuña de corriente; es de notar que durante la fase de recuperación (en [15:40,16:00] TU de la subtormenta las hipótesis del modelo no alcanzan para explicar la mayor recuperación registrada. Los valores están graficados cada 5 minutos.

En la Figura 2 se muestra  $X_t$ (MBO) y los valores modelados según los parámetros de las ecuaciones (4) y (7) calculados por cuadrados mínimos.

En la Figura 3 se muestra  $S_2$  calculado según los parámetros de la Tabla 2, para 3 observatorios, y AL, sin considerar el retardo  $n$  en su representación, ya que éste es diferente en cada caso.

## DISCUSION

En el intervalo estudiado [14,18] TU la variación  $X_t$  puede esquematizarse en función de la posición del observatorio:

i) observatorios que a las 16 TU se encuentran a la medianoche (ABG, PHU, LNP, KNY, KDU, CBI, GUA) muestran un muy buen ajuste en [14,16] TU entre  $X_t$  y  $X_{tc}$  según la ecuación (4), pero durante la siguiente media hora, que corresponde a una recuperación de

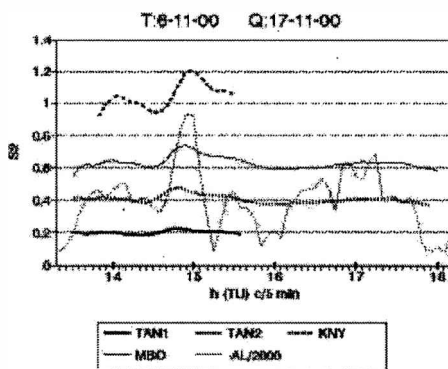


Figura 3.  $S_2$  calculado según los parámetros de la tabla, para 3 observatorios, y AL, sin considerar el retardo  $n$  en su representación, ya que éste es diferente en cada caso; puede observarse que la contribución de la subtormenta a la variación en tiempo de tormenta no es despreciable en observatorios de latitudes bajas o medias, siendo su contribución dependiente de la posición del observatorio. Para TAN se han graficado resultados según los parámetros hallados en el intervalo inicial y en todo el intervalo considerado. Los valores están graficados cada 5 minutos.

AL (AL<sub>0</sub>), la rápida recuperación de  $X_t$  de unos 50 nT no puede ser explicada por el modelo, sino que debería suponerse superpuesta una corriente en sentido contrario a la corriente anillo;

ii) observatorios que a las 16 TU se encuentran antes del amanecer (API, HON, PPT) registran una variación  $X_t$  que no puede ajustarse por la ecuación (4) pero reflejan una variación sincrónica con  $-AL$ ; tal comportamiento pareciera asociado a la corriente descendente de la cuña, de modo que parte de la energía de la corriente anillo sería transferida a la ionosfera auroral;

iii) observatorios que a las 16 TU se encuentran a mediodía alejados del ecuador de inclinación (SJG, KOU, MBO) pueden ajustar la variación  $X_t$  según la ecuación (4) en todo el intervalo, pues resulta poco afectada por la rápida pérdida de energía (recuperación) que se observa a la medianoche;

iv) observatorios que a las 16 TU se encuentran a la tarde (ASC, TAM, BNG, TSU, LMM, TAN) muestran que la correlación lineal entre  $X_t$  y  $X_{tc}$  mejora si sólo se considera en intervalo anterior a la segunda recuperación de AL, cuando se observa la rápida pérdida de energía que registran los observatorios de la medianoche a las 16 TU;

i) la constante de decaimiento  $k_2$  del sistema calculada para  $X_t$  en los observatorios que se encuentran después del mediodía y hasta la medianoche (TAM, ... , CTA) indica que el tiempo de decaimiento  $T$  varía entre 1 y 2 h ( $14 < T/5\text{min} < 22$ );

ii) el cociente  $S_2$  muestra que para grandes valores de AL, la contribución de la subtormenta a  $X_t$  (a la corriente anillo) puede igualar y aún superar a la del viento solar.

## CONCLUSIONES

Durante las 4 primeras horas de la fase principal de esta tormenta geomagnética los parámetros del viento solar son constantes; de

ello se sigue que para la interpretación clásica estas variaciones calculadas para observatorios de bajas o medias latitudes deberían responder a un decrecimiento exponencial, lo que no se observa. Se las compara entonces con las subtormentas de ese intervalo, y se las correlaciona con los resultados de un modelo sencillo que considera que las subtormentas colaboran con las variaciones según ha sugerido la presencia de iones ionosféricos en la plasmasfera; la expansión y recuperación de las subtormentas se cuantifican con el índice AL. Este modelo supone que durante la fase de expansión de una subtormenta las corrientes alineadas al campo geomagnético relacionan la corriente anillo ecuatorial con la porción auroral de la cuña; se encuentra que el decrecimiento resulta sincrónico con el índice de actividad ionosférica auroral AL a la tarde, donde las corrientes ascendentes unen la parte auroral de la cuña de corriente con la plasmasfera; también se encuentra que durante la rápida recuperación de la subtormenta la cuña parece cerrarse a través de corrientes sumadas a la corriente anillo ecuatorial en sentido contrario, como ya había sido sugerido. Se evidencia entonces que las variaciones no son simétricas alrededor del eje dipolar, por lo que cuando se promedian las variaciones geomagnéticas en tiempo de tormenta las variaciones debidas a las subtormentas no son compensadas, y el índice de actividad geomagnética ecuatorial Dst (Mayaud, 1980) consuetudinariamente supuesto axialmente simétrico no representa una variación real sino idealmente simplificada. El índice Dst expresa la intensidad de la tormenta, pero no representa la variación debida a la corriente anillo a una longitud determinada. La contribución de la subtormenta a la variación en tiempo de tormenta en observatorios de latitudes bajas o medias no es despreciable.

**Agradecimientos.** La autora agradece al World Data Center C2 de Kyoto (Japón), a

D.J.McComas en SWRI y a CDAWeb (NASA, EEUU) por la facilidad del uso de los datos.

## REFERENCIAS

- Akasofu S.-I., 1966; Electrodynamics of the magnetosphere: geomagnetic storms; *Space Science Reviews* **6**, 21-143.
- Akasofu S.-I., 1970; Magnetospheric substorms: a model; *Solar Terrestrial Physics, Part III*, 131-151.
- Berthelier A. and M.Menvielle, 1992; Geomagnetic data 1986, IAGA Bulletin N° 32 q
- Boström R., 1968; Currents in the ionosphere and magnetosphere, *Ann.Géophys.*, **24** 681-694.
- Box G.E.P. and G.M.Jenkins, 1976; Time series analysis: forecasting and control; Holden Day
- Burton R.K., R.L.McPherron, C.T.Russell, 1975; An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst; *Journal of Geophysical Research* **80** (31), 4204-4214.
- Cummings W.D., 1966; Asymmetric ring currents and the low latitude disturbance daily variation; *Journal of Geophysical Research* **71**, 4495-4503.
- Friedrich E, G.Rostoker and M.G.Connors, 1999; Influence of the substorm current wedge on the Dst index; *Journal of Geophysical Research*, **104** (A3), 4567-4575
- Fukushima N., 1969; Equivalence in ground geomagnetic effect of Chapman-Vestine and Bierkeland-Alfvén's electric current-systems for polar magnetic storms; Report of Ionosphere and Space Research in Japan, **23**, 219-229.
- González W.D., B.T.Tsurutani, A.L.C.González, E.J.Smith, F.Tang and S.-I.Akasofu, 1989; Solar wind magnetosphere coupling during intense magnetic storms; *Journal of Geophysical Research* **94** (A7), 8835-8851.
- Iyemori T., T.Araki, T.Kamei and M.Takeda, 1999; Mid-latitude geomagnetic indices "ASY" and "SYM" for 1999 (Provisional); at <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>.
- Kamide Y. and N.Fukushima, 1971; Analysis of magnetic storms with DR indices for equatorial ring current field; Report of Ionosphere and Space Research in Japan, **25** (2), 125-162.
- Kamide Y., W.Baumjohann, I.A.Daglis, W.D.González, M.Grande, J.A.Joselyn, R.L.McPherron, J.L.Phillips, E.G.D.Reeves, G.Rostoker, A.S.Sharma, H.J.Singer, B.T.Tsurutani and V.M.Vasyliunas, 1998; Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships; *Journal of Geophysical Research*, **103** (A8), 17705-17728.
- Kamide Y. and N.Fukushima, 1970; Spatial extent of the return current of the auroral-zone electrojet; Report of Ionosphere and Space Research in Japan; **24**, (2), 115-126.
- Kan J.R., 1992; Unloading instability in the substorm current wedge; in *Substorms 1 Proceedings of the 1<sup>st</sup> Conference on substorms (Sweden)*, esa sp-335; 421-423.
- Lui A.T.Y., 2001; Current controversies in magnetospheric physics; *Reviews of Geophysics*, **39**, (4), 535-563.
- Mayaud P.N., 1980; Deviation, meaning and use of geomagnetic indices; AGU Geophysical Monograph **22**, AGU.
- McPherron R.L., 1991; Physical Processes Producing Magnetospheric Substorms and Magnetic Storms, in *Geomagnetism*, vol 4, ed.J.A.Jacobs, Academic Press.
- Price A.T., 1967; Electromagnetic Induction within the Earth; en *Physics of Geomagnetic Phenomena*, 235-295. Academic Press.
- Scokopke N., 1966; A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the Earth; *Journal of Geophysical Research*, **71**, 3125-3130.
- Van Zele M.A., 2002; Contributions to the ring current energy during geomagnetic storms; *Studia Geophysica et Geodetica*, **46**, 33-41.
- Van Zele M.A. and O.Schneider, 1999; The equatorial ring current as a part of a coupled system; *Studia Geophysica et Geodetica*, **43**, 284-288.
- Wu C.-C., K. Liou, R. P. Lepping and C.-I-Meng, 2004; Identification of substorms without storms; *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **66**, 125-132.