

Variaciones geomagnéticas de origen ionosférico en días de calma

J. Miquel TORTA

Observatori de l'Ebre, CSIC-URL, Horta Alta 38, 43520
Roquetes, Tarragona, España

RESUMEN

En este artículo se examinan los avances recientes en el estudio de las variaciones geomagnéticas que tienen su origen en la ionosfera en situaciones de ausencia de perturbaciones magnéticas. Éste es un antiguo tema en la historia del Geomagnetismo y la Aeronomía, y como el artículo pretende proporcionar una visión de conjunto de su conocimiento actual, sin importar si una disciplina en particular se ha investigado o no en la última década, el grado de actualización es variable a lo largo de la revisión. Se pone una atención especial en las técnicas de modelización y en las posibles explicaciones a la variabilidad día a día del sistema de corrientes ionosférico en latitudes medias.

Palabras clave: Variaciones geomagnéticas, Sq, Corrientes ionosféricas, Región dinamo, SHA, SCHA.

ABSTRACT

Recent progress in the study of the quiet-day geomagnetic field variations having the ionosphere as a source is reviewed. This represents an old topic in the history of Geomagnetism and Aeronomy, and since the purpose of the paper is to provide the reader with an overall description of its present understanding, no matter whether a particular subtopic has been revisited in the last decade or not, the degree of updating is variable throughout the review. Special attention is paid to the advances in the modelling techniques and to the possible explanations to the variability of the mid-latitude ionospheric current system.

Key words: Geomagnetic variations, Sq, Ionospheric currents, Dynamo region, SHA, SCHA.

1. INTRODUCCIÓN

La existencia de la ionosfera se dedujo de la observación de determinadas variaciones en los registros del campo geomagnético. Sin embargo, tuvieron

que pasar muchos años desde el descubrimiento de tales variaciones en 1722 por George Graham en Londres y alrededor de 1741 por Celsius en Uppsala (quienes observaban cuidadosamente los movimientos de la aguja con un microscopio), hasta que en 1822 Stewart propusiera la existencia de una capa eléctrica conductora en la alta atmósfera, responsable de las variaciones diarias del campo geomagnético.

El movimiento del aire a través las líneas de fuerza del campo geomagnético es el que induce las fuerzas electromotrices que conducen las corrientes. Estas corrientes afectan la magnitud del campo magnético registrado en el suelo, originando la variación regular más suave observada en los magnetogramas en días de calma magnética. El movimiento de las partículas cargadas se origina principalmente por el efecto térmico periódico que el Sol ejerce en la alta atmósfera, cuando sus oscilaciones se extienden hasta alturas ionosféricas; aunque parte del efecto es debido también a las mareas provocadas por la atracción solar. Esta variación regular es conocida como «variación solar tranquila», o simplemente como Sq (*Solar quiet variation*). La diferencia entre este término y los términos S o S_R es a veces un tanto subjetiva, siendo estos últimos generalmente reservados para la variación resultante de análisis sobre todos los días excepto aquéllos clasificados como perturbados, mientras que el anterior tiende a asignarse cuando se utilizan únicamente días de calma (o clasificados como de calma). Las variaciones geomagnéticas de pequeña amplitud que se originan a partir de las mareas provocadas por la influencia de la Luna en la alta atmósfera se denominan mareas magnéticas lunares, o L .

Schuster (1989) fue el primero en aplicar el análisis armónico esférico, introducido por Gauss cincuenta años antes, a la Sq , confirmando las ideas de Stewart y deduciendo que el campo magnético producido por las corrientes ionosféricas induce corrientes eléctricas adicionales en la Tierra.

Aunque los sistemas de corriente reales que producen las variaciones del campo magnético son complejos, pueden aproximarse por dos sistemas bidimensionales que fluyen en capas esféricas a distancias específicas, una externamente a la superficie terrestre y otra bajo ella. Se denominan corrientes equivalentes, en el sentido de que su efecto en el campo magnético registrado en superficie es equivalente a aquél producido por las corrientes reales. Los sistemas están esencialmente formados por dos vórtices, uno en cada hemisferio con sus focos en latitudes medias y alrededor de una hora antes del mediodía local (figura 1). En verano la posición del foco generalmente se adelanta con respecto al foco del hemisferio invernal (e.g., Takeda, 1999). El vórtice externo en el hemisferio norte circula en sentido antihorario mientras que el vórtice externo en el hemisferio sur lo hace en sentido horario; los vórtices internos inducidos circulan en direcciones opuestas.

Entre ambos sistemas hemisféricos, coincidiendo con el ecuador geomagnético y con una amplitud latitudinal de unos pocos grados, encontramos una zona donde se concentra un intenso sistema de corriente fluyendo hacia el este, conocido como *electrojet* ecuatorial (ver, p.e., Rastogi, 1989). Su origen es

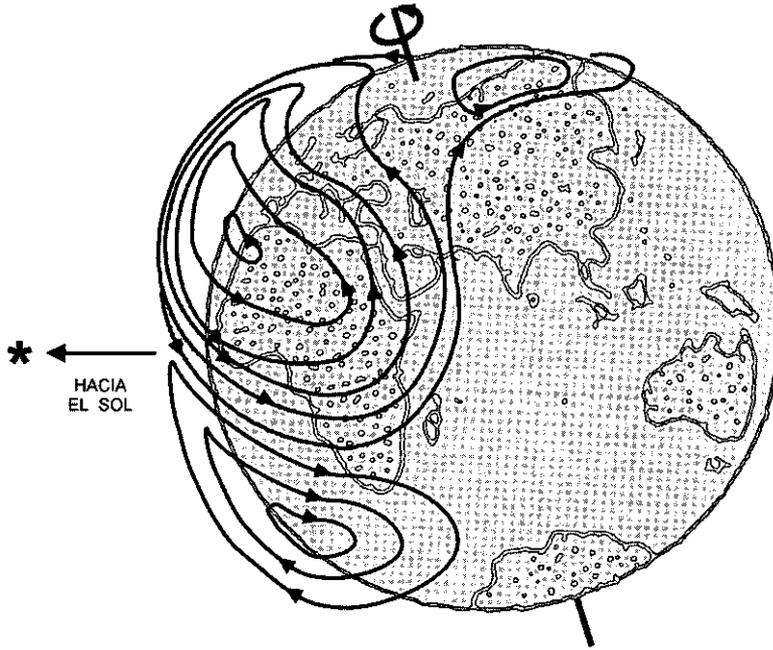


Figura 1. Representación esquemática de los sistemas de corriente ionosféricas en la región dinamo que generan la variación geomagnética S_q .

debido a un incremento de la conductividad Cowling cerca del ecuador, y su resultado en el campo magnético es una fuerte amplificación de la variación diurna en la componente horizontal.

Teniendo en cuenta la variación de la densidad electrónica en la capa E (máxima en verano, mínima en invierno), la densidad de corriente (y consecuentemente la variación magnética diaria) es máxima en el solsticio de verano y desvanece progresivamente durante los equinoccios hasta el solsticio de invierno. Y teniendo en cuenta el cambio de la densidad electrónica con la latitud (varía de acuerdo con el ángulo cenital solar), el foco del sistema de corrientes diario se espera que se encuentre en su posición más septentrional en el solsticio de verano. Se detectan, sin embargo, desviaciones a esa conducta esperada, especialmente durante los equinoccios (Torta *et al.*, 1997).

Las corrientes en los dos hemisferios están conectadas por corrientes alineadas con el campo magnético cuando los efectos en los dos hemisferios están descompensados (Richmond, 1998). Esta circunstancia tiene poco o nulo efecto durante los equinoccios (cuando la densidad de corriente es similar en ambos hemisferios) pero puede producir un efecto magnético notable durante los solsticios (Stening, 1989; Fukushima, 1994), que puede resolverse mediante

una descomposición de las observaciones magnéticas en partes toroidales y poloidales (Olsen, 1997). Este método aparece igualmente válido para la determinación de corrientes alineadas con el campo en latitudes polares a alturas de satélite y del sistema meridional de corrientes en latitudes bajas conectado con el *electrojet* ecuatorial.

En latitudes altas los campos eléctricos y las corrientes se generan por la interacción entre el plasma del viento solar cruzando las líneas de fuerza del campo geomagnético en la cavidad en la que queda confinado ese campo geomagnético, conocida como magnetosfera. Son mucho más fuertes que los de la dinamo ionosférica, y son altamente variables en el tiempo (Richmond, 1998).

Revisar completamente el estado actual del conocimiento sobre todos y cada uno de los efectos sobre el campo magnético terrestre que pueden describirse teniendo la ionosfera como fuente o como resultado de la interacción de la misma con la magnetosfera requeriría un estudio más exhaustivo. Es más, tópicos como las variaciones geomagnéticas resultado de la interacción magnetosfera-ionosfera en latitudes altas, o las relacionadas con los efectos del *electrojet* ecuatorial, merecen un *review* por sí mismos. De esta forma, en esta introducción y en los capítulos que siguen a continuación se ha puesto el énfasis en los avances recientes sobre la descripción y el origen de las variaciones regulares en latitudes medias y su intrínseca variabilidad, así como sobre las técnicas utilizadas para estudiarlas. Aquéllos que requieran más detalles introductorios acerca de las variaciones geomagnéticas durante condiciones de calma solar pueden consultar, p.e., Campbell (1989a, 1989b, 1997).

2. MÉTODOS DE ANÁLISIS

La mayoría de autores que modelizan las variaciones en días de calma primero ajustan una serie de Fourier en el tiempo local, en cada observatorio, a la variación vertical del campo y a una o ambas componentes de la variación horizontal. Luego, técnicas de suavizado en la latitud geomagnética y extrapolaciones lineales entre las longitudes originales de las estaciones, pueden ser suficientes para estimar las amplitudes de la variación *Sq* para cualquier posición mundial y en cualquier instante (Campbell *et al.*, 1989). Este modelo fue obtenido a partir de una red mundial de observatorios geomagnéticos durante 1965, el Año Internacional del Sol en Calma (*Year of the Quiet Sun*, IYQS). Un año que tuvo el porcentaje más alto de días de calma geomagnética y del que se dispone de grandes cantidades de datos digitales de alta calidad. El modelo puede resultar valioso para obtener curvas tipo (de referencia) de la variación diaria del campo total durante campañas magnéticas (Hitchman *et al.*, 1998)

Sin embargo, para el estudio de la dinámica ionosférica asociada o la conductividad del manto terrestre, se necesita un método que permita separar el campo debido a las fuentes externas primarias del campo debido a las fuentes internas inducidas por las primarias, que varían en el tiempo. El método utili-

zado tradicionalmente para analizar variaciones geomagnéticas en su escala global ha sido el Análisis Armónico Esférico (*Spherical Harmonic Analysis*, SHA), que permite separar el potencial en partes externa e interna. Se ha utilizado también un método de análisis alternativo, basado en una formulación en integrales de superficie (Price and Wilkins, 1963; Hobbs and Price, 1970), aunque en este caso es necesario interpolar de las observaciones a una malla uniforme antes del análisis.

Winch (1981) revisó hasta diecisiete formas matemáticas elegidas por los diversos autores para los análisis armónicos esféricos de Sq y L , desde el primer análisis global de la marea magnética solar por Schuster (1889), al trabajo de Suzuki (1979) que enfatizaba las variaciones con el tiempo universal y las variaciones día a día. Como se verá más adelante, se han publicado muchos nuevos estudios desde entonces, principalmente acerca de nuevas técnicas de análisis o enfocándolos hacia las irregularidades de las variaciones.

La iniciativa reciente más ambiciosa para modelar campos debidos no sólo a las fuentes ionosféricas en días de calma, sino también a las magnetosféricas y a las del núcleo terrestre y la litosfera, se conoce como el modelo íntegro del campo magnético próximo a la Tierra (Langel et al., 1996, Purucker *et al.*, 1997). Incluye alrededor de 430.000 datos de los satélites POGO y MAGSAT (para los que los campos de origen ionosférico son internos), y valores medios horarios y anuales de observatorios magnéticos desde 1960 hasta 1985, resultando en cerca de 6800 parámetros. Sabaka y Baldwin (1993) ensayaron por primera vez la determinación de un modelo del campo Sq a partir de medidas de satélite y valores horarios de observatorios. En el modelo íntegro el campo de origen ionosférico se modela con cuatro armónicos temporales diarios, cada uno de los cuales se ajusta con un semi-número de onda latitudinal máximo de siete para los términos en tiempo local y de tres para los correspondientes a tiempo no-local. Además, varía linealmente con el flujo solar $F_{10.7}$ y se incluye la variación estacional. Sus resultados son susceptibles de mejorar durante los próximos años con los datos de alta precisión provenientes de los nuevos satélites que se encuentran en órbita en la actualidad (Olsen, 1999).

Generalmente se asume que en condiciones regulares la forma del sistema de corrientes ionosféricas permanece aproximadamente constante durante un día dado, fijo con respecto al Sol, lo que es equivalente a asumir que las variaciones solamente dependen de la latitud y del tiempo local. Como la variación longitudinal de la morfología y magnitud del campo magnético de la Tierra es un factor importante, generalmente se tienen en cuenta parte de las variaciones longitudinales mediante el uso de latitudes geomagnéticas en lugar de latitudes geográficas. Pero, en cualquier caso, para analizar rigurosamente si existen variaciones con el tiempo universal, el SHA debe aplicarse a datos obtenidos simultáneamente sobre todo el globo, lo que, dada la irregular distribución de observatorios, resulta difícil en la mayoría de los casos. Takeda (1999) reunió, sin embargo, una cantidad suficiente de medias horarias en los años 1964 y 1980 para poder realizar un análisis armónico esférico hasta gra-

do y orden 4, y analizar las variaciones con el tiempo universal y día a día del sistema de corrientes S_q .

Una forma de aislar la particular variación sobre una región restringida (como por ejemplo un continente) consiste en considerar que, como la Tierra gira 360° alrededor de un sistema fijo, una estación observa las 24 horas de esa variación regular. Por tanto, en principio, con datos de únicamente un grupo de observatorios distribuidos en latitud sobre un estrecho sector de la superficie terrestre es posible realizar un análisis esférico (Campbell, 1983; Campbell and Anderssen, 1983; Campbell and Schiffmacher, 1985, 1986, 1987, 1988a, 1988b; Campbell et al., 1992, 1993, 1998; Arora *et al.*, 1995). Además, en esos estudios, ese estrecho sector solamente ocupa un hemisferio, el otro se cubre utilizando el primero como espejo, teniendo en cuenta las inversiones del campo esperadas y las diferencias estacionales. Es un modo de «rellenar» el resto de la esfera basándose en suposiciones bastante realistas, e imponiendo que el comportamiento distintivo de la variación sobre dicho continente sea el mismo alrededor de todo el globo. Sin embargo, los rasgos detallados de esos campos solamente pueden representarse determinando un número excesivamente grande de coeficientes armónicos esféricos que, a su vez, están limitados por el número de datos disponibles. Como señaló Malin (1973) eso significa que en regiones como Europa, donde se dispone de muchos observatorios, gran parte del detalle se pierde.

Una alternativa reciente para el análisis regional de las variaciones geomagnéticas fue propuesto por Haines and Torta (1994). Utilizando la técnica del análisis armónico de un casquete esférico (*Spherical Cap Harmonic Analysis*, SCHA) (Haines, 1985), mostraron cómo incorpora la separación externa-interna, y puede usarse cuando los datos no son disponibles sobre la esfera entera, o se requiere un estudio especialmente detallado sobre una región particular. Incluye la dependencia longitudinal y el modelo proporciona valores de las componentes del campo, las corrientes equivalentes asociadas, o las funciones de corriente, en cualquier punto del casquete y en cualquier instante. Se debe tener un especial cuidado, sin embargo, cuando el casquete es pequeño, porque entonces el contenido espectral espacial del fenómeno y el de las funciones base son muy distintos, y eso puede perjudicar la correcta separación externa-interna (Torta and De Santis, 1996; Lowes, 1995, 1999) (figura 2). Este problema no es único en el SCHA, sino que puede darse con cualquier método que trate de analizar campos con longitudes de onda intrínsecas mucho mayores que el área cubierta por las medidas. En cualquier caso, como los campos separados reales y modelados están aproximadamente en fase, los análisis para casquetes relativamente pequeños todavía pueden aportar información válida acerca de la dinámica del sistema de corrientes ionosféricas, como se ha mostrado para la región europea en un mínimo del ciclo solar (Torta *et al.*, 1997).

Aparentemente existen algunas condiciones en la que es posible realizar un SCHA de ciertas variaciones geomagnéticas y rigurosamente separar los campos externos e internos (Torta and De Santis, 1996). Esos son los casos en que

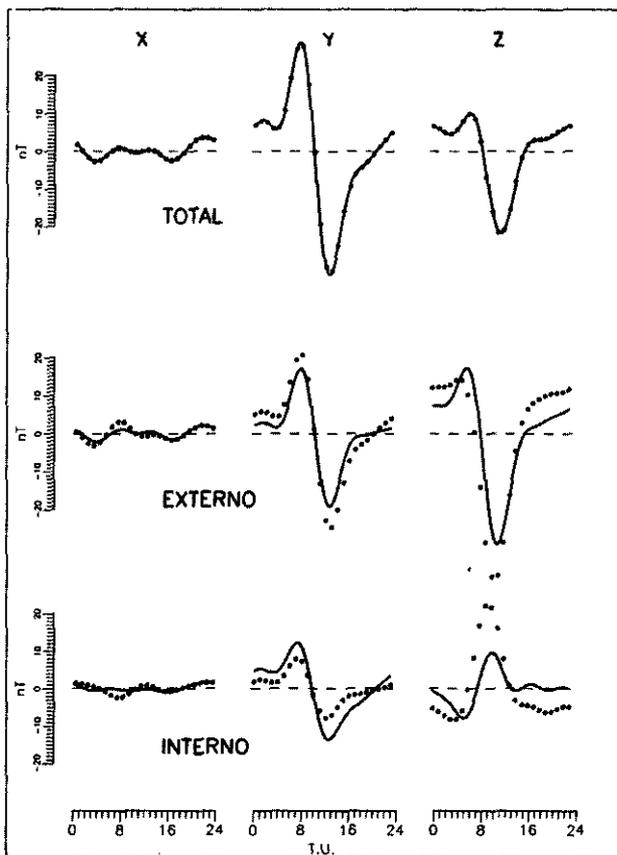


Figura 2. Arriba: valores de las tres componentes del campo magnético sintetizados a partir de un modelo global para la variación *S_q* en Almería (puntos), y valores obtenidos a partir de un SCHA en un casquete de semi-ángulo 18° sobre una malla de puntos sintetizados a partir de dicho modelo global (líneas continuas). Centro: valores para la parte externa del campo a partir de los mismos modelos. Abajo: valores para la parte interna del campo. Nótese la falta de ajuste en las partes externa e interna, a pesar de que es excelente para el campo total (suma de las partes externa e interna). La separación externa-interna del modelo regional mejora a medida que el casquete se hace mayor.

el área de existencia de la variación coincide de alguna manera con la del casquete esférico que define el análisis; o cuando alguna parte del campo fuente global puede separarse, por su independencia o simetría, del resto de la fuente que origina la variación. De esa forma, el método puede aplicarse a campos en el casquete polar o zonas aurales que, a su vez, presenten estructuras complejas, y por tanto más adecuadas para ser ajustadas por funciones base con lon-

gitudes de onda inherentemente cortas. Walker (1989) ensayó la modelización de la actividad magnética en latitudes altas sobre un casquete polar de 40° centrado en el dipolo excéntrico. Este estudio se extendió más adelante (Walker, 1992; Walker *et al.*, 1997) para proporcionar una serie de modelos horarios para todo el año 1980, de forma que el vector campo perturbador y las corrientes equivalentes ionosféricas e inducidas pueden calcularse a partir de los coeficientes en cualquier punto del casquete, o sobre o por debajo del mismo, para cualquier hora del año. Amm (1998) aplicó el SCHA a una situación conocida como discontinuidad de Harang, utilizando datos de la Red de Magnetómetros Escandinavos.

Amm and Viljanen (1999) han mostrado como las corrientes ionosféricas, fuente de las variaciones geomagnéticas en el suelo, pueden modelizarse situando polos de sistemas de corriente elementales en la ionosfera; poniendo el énfasis en cómo se comporta el método para problemas regionales. Este planteamiento fue introducido por Amm (1997) y es similar al empleado para la representación del campo principal en términos de dipolos o corrientes circulares (ver, e.g., Langel, 1987, p. 482-489). En las áreas donde se precisa una mayor resolución para describir detalles con longitudes de onda más pequeñas, sitúan un mayor número de corrientes elementales, con resultados similares a los del TOSCA (*Translated Origin Spherical Cap harmonic Analysis*) (De Santis, 1991) utilizando el SCHA, al mover el origen del sistema de coordenadas desde el centro de la Tierra hacia su superficie.

3. VARIABILIDAD DÍA A DÍA

Puesto que la amplitud de la Sq cambia de forma bastante sistemática se pueden generar pronósticos a partir de observaciones pasadas en un observatorio particular (Bhardwaj and Rangarajan, 1998) a través del análisis espectral singular (Vautard *et al.*, 1992; Rangarajan and Araki, 1997). Los valores medios mensuales pronosticados para H para cada hora en Alibag son reconocidos como realistas por sus autores, como mínimo para los seis primeros meses, aunque el porcentaje de acierto no viene dado. La mayor parte de la discrepancia se espera que sea debida a la fuerte e impredecible variabilidad día a día.

Como ya sugirió Hibberd (1981) la variabilidad día a día es todavía un fenómeno poco entendido. En primer lugar, nunca se puede saber con certeza cuanta perturbación está presente incluso en días aparentemente muy calmados. Es bien conocido que la definición de Días Internacionales de Calma (*International Quiet Days, IQD's*) es muy relativa: son sencillamente los cinco días de más calma de cada mes de acuerdo con el índice Kp , de manera que parte de la aparente variabilidad día a día en la Sq puede fácilmente ser debida a la presencia de perturbación geomagnética, más que a una verdadera variabilidad. Así pues, las corrientes magnetosféricas provocan una contribución significativa a la variabilidad, pero es difícil asegurar con precisión qué fracción de la

estructura Sq observada es producida por esas corrientes (Olson, 1989). Se ha descubierto recientemente, en un análisis sobre variaciones magnéticas diarias (Olsen, 1996), que la contribución magnetosférica en algunos coeficientes armónicos esféricos es mayor del 20%, especialmente cuando se consideran términos en tiempo no-local y condiciones solsticiales. Sin embargo, es imposible separar las contribuciones ionosféricas y magnetosféricas a partir de únicamente datos en el suelo. La solución aparente reside en la combinación de éstos con datos de satélites a baja altitud.

Incluso en días de calma excepcional se pueden encontrar ejemplos durante los cuales perturbaciones residuales todavía causan cierta variación, contaminando la variación regular media obtenida para tales días. Esa variación contaminante suele tener signo negativo y ocurre generalmente en la tarde-noche (Mayaud, 1980). A partir de un análisis sobre un año de mínima actividad magnética, Torta *et al.* (1997) concluyeron que cuando esas perturbaciones de origen magnetosférico de corta duración (de 1 a 2 horas) sucedían cerca o alrededor de la medianoche local, pueden alterar los niveles de medianoche local a partir de los cuales se calcula la línea de base de la variación diaria. Como la perturbación ocurre en el mismo tiempo universal, solamente afecta a los niveles de medianoche de los observatorios en la parte este (o oeste) de la región y no en los otros, modificando caprichosamente el sistema de corrientes resultante. De hecho, parece ser que los rasgos anormales de la variación Sq se observan más frecuentemente durante mínimos del ciclo solar (Mayaud, 1980; Schlapp and Butcher, 1995).

Se han encontrado síntomas de corrientes superpuestas, sean de carácter meridional (Torta *et al.*, 1997) o causadas por un vórtice de corriente (Butcher *et al.*, 1993). Este último produce campos adicionales en un pequeño pero significativo número de días, que éstos y previos autores han llamado Días Anormalmente Tranquilos (*Abnormal Quiet Days* o AQDs). Esos rasgos anormales parecen tener su origen en el rol que juegan las mareas semidiurnas anti-simétricas.

En el desarrollo de la variabilidad del sistema de corrientes Sq , la variabilidad de las mareas atmosféricas y de los vientos predominantes puede jugar un papel tan importante como las perturbaciones geomagnéticas (Torta *et al.*, 1997). Resultados recientes a partir de modelizaciones numéricas y análisis de datos, así como un marco de discusión sobre los efectos de la penetración de ondas planetarias en la dinamo ionosférica, se dan en Forbes (1996). Ver también Kohsiek (1998) y Kohsiek *et al.* (1995). Se ha mostrado asimismo (Miyahara and Forbes, 1994) que la interacción entre mareas diurnas y ondas de gravedad en la baja termosfera puede suprimir la marea diurna por inestabilidad convectiva. Los resultados de otras investigaciones (Phillips and Briggs, 1991), parecen apoyar la tesis de que las variaciones de largo periodo de las ondas de las mareas atmosféricas están relacionadas con las variaciones de las fuentes que provocan las mareas o con las de las condiciones de propagación (interacciones onda-onda) en la atmósfera media, mientras que las fluctuaciones de cor-

to periodo pueden atribuirse a perturbaciones locales (Bernard, 1981). El resultado de Miyahara and Ooishi (1997), simulando corrientes dinamo y obteniendo las variaciones geomagnéticas inducidas por vientos neutros, sugiere que fluctuaciones en los vientos neutros propagadas desde estratos inferiores pueden inducir variaciones día a día, o en cualquier otra escala de tiempo, significativas en la Sq .

Apostolov *et al.* (1996) (ver también Altadill, 1997) descubrieron la ocurrencia de oscilaciones casi-periódicas de 2 días en los índices de actividad geomagnética (figura 3), cuya explicación podría encontrarse en una oscilación casi-periódica de 4 días en las variaciones del campo geomagnético y/o una modulación casi-periódica de 2 días de las perturbaciones de periodo corto del campo geomagnético. La evidencia más reciente sobre la aparición de variaciones causadas ondas de casi 2 días del viento neutro en la baja termosfera ha sido encontrada por Kunitake (1999), quien analizó variaciones diarias en las

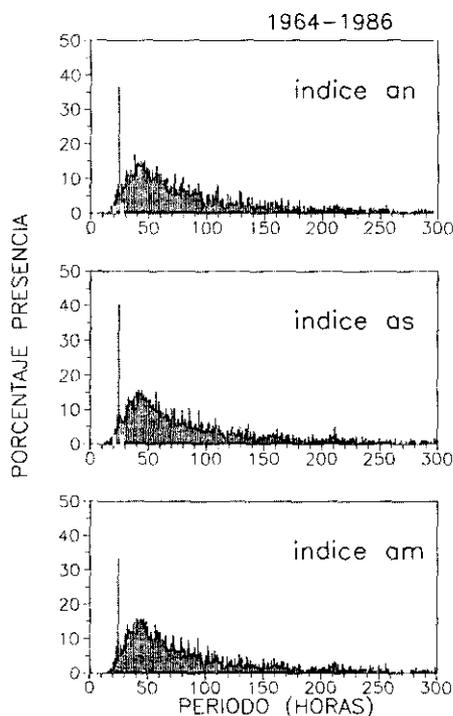


Figura 3. Porcentaje de existencia de la variabilidad de los índices magnéticos tri-horarios en el rango periódico entre 6 y 300 horas. Después del período residual de 1 día, el siguiente más significativo es el casi-período de 2 días. De Altadill (1997).

tres componentes en 20 estaciones distribuidas globalmente en Enero de 1993. Durante este evento en particular, la amplitud de la onda de casi 2 días resulta ser incluso mayor que la componente espectral de 24h, y las características de las variaciones geomagnéticas son consistentes con las características de la variación del viento neutro.

4. OSCILACIÓN CASI-BIENAL

Variaciones geomagnéticas resultado de la penetración termosférica de ondas planetarias se dan también con periodicidades mayores, como la de casi 16 días encontrada por Forbes y Leveroni (1992) y Kohsiek et al. (1995) en el ecuador y a 50°N. Capítulo aparte merece la periodicidad de alrededor de 27 meses, que podría estar relacionada con el cambio de signo de ese periodo en la dirección de los vientos predominantes en la estratosfera en la zona ecuatorial y conocida como oscilación casi-bienal (*Quasi-Biennial Oscillation* o *QBO*).

Esa oscilación podría explicar la periodicidad de 27 meses observada en la componente horizontal del campo magnético (con una amplitud de cerca de 0.5 nT) en latitudes bajas (Olsen, 1994). Olsen and Kiefer (1995) concluyeron que esas variaciones pueden ser producidas por una *QBO* en los vientos predominantes en latitudes bajas a alturas de entre 100 y 150 Km.

A partir de un análisis espectral de la variación Sq sobre medias horarias de H y D en 24 observatorios distribuidos globalmente y durante como mínimo dos ciclos solares, Jarvis (1997) encontró indicios de la presencia de *QBO* en la componente semidiurna de la variación regular de la componente horizontal, no sólo en zonas ecuatoriales, sino también alrededor de 60° de latitud en ambos hemisferios. Estos resultados son consistentes con los experimentos numéricos de Hagan et al. (1992), encaminados a demostrar como esas oscilaciones casi-bienales en la estratosfera pueden afectar a mareas semidiurnas que se propagan verticalmente.

Sin embargo Kane (1997), a partir de un análisis espectral sobre el índice de actividad geomagnética aa , sugiere que la mayor parte de las *QBO* y *QTO* (*Quasi-triennial oscillations*) observadas tienen su origen en variaciones similares en el viento solar. Y las que no se relacionan con actividad solar, tampoco lo hacen con las *QBO* en el viento zonal estratosférico en bajas latitudes; aunque algunas *QTO* concuerdan con oscilaciones meridionales del fenómeno El Niño.

5. VARIABILIDAD CON EL CICLO SOLAR

La variabilidad de las variaciones geomagnéticas diarias de origen solar y lunar con el ciclo solar fue examinada por Olsen (1993), quien revisó los trabajos previos sobre ese tópico (no obstante, ver también Gupta, 1980; Hibberd,

1985; o Kuznetsov and Ptitsyna, 1987) los cuales habían mostrado que durante los años de actividad las corrientes de S son alrededor del doble de intensas que en años de calma (resultado también encontrado por Takeda, 1999), su máximo ocurre entre 1/2-1 hora más tarde durante años activos, y que la dependencia con el número de manchas solares es más débil en L que en S . Olsen (1993) confirmó estos resultados utilizando diversos conjuntos de datos de hasta 75 años de duración y considerando la variabilidad con el ciclo solar de los ángulos de fase además de la de las amplitudes. No se mencionan cambios en la latitud del foco del sistema con el paso de máxima a mínima actividad en el ciclo solar. Shiraki (1973) estudió los cambios latitudinales debidos a la actividad solar en el Pacífico Oeste y en Norteamérica y llegó a la conclusión de que son mayores en invierno, y que el centro del foco está en latitudes más altas durante años de calma que en años de actividad solar.

Además de estudiar la variación estacional y con el ciclo solar del rango de la S_q y de la posición del foco, Schlapp and Butcher (1995) investigaron su influencia en la propia variabilidad día a día. Su conclusión fue que la variabilidad absoluta (o variación estándar del rango) crece desde un mínimo de manchas a un máximo, pero que el cociente entre la desviación estándar y el propio rango es generalmente más pequeña durante un máximo que durante un mínimo, un resultado que es consistente con los argumentos de Mayaud (1980).

6. EFECTOS POR FULGURACIONES SOLARES

El incremento en la ionización atmosférica causado por la radiación de una erupción cromosférica es suficiente para provocar una modificación del sistema de corrientes S_x (de corta duración, en general menos de una hora) pero habitualmente detectable en los magnetogramas. Curto et al. (1994a) presentaron un estudio estadístico acerca de los efectos magnéticos de las fulguraciones solares (*Solar Flare Effects, SFE*) en el Observatorio del Ebro durante treinta años, que incluye, además, un análisis global a partir de datos de 67 observatorios para un día concreto. Se encontraron *SFE* inversos, que suponen una disminución en la amplitud de la variación diurna de la componente horizontal, frente a la creencia general que postulaba que un *SFE* representaba siempre un incremento en esa amplitud. Se evalúan sus dependencias horarias, estacionales y su correlación con la actividad solar. Se dibuja el sistema de corriente correspondiente la variación regular del campo y el generado por el efecto de la erupción solar para un caso concreto, detectándose que en el hemisferio norte, el sistema *SFE* se encuentra a una hora en tiempo local más al este que el sistema regular, y a unos 4° más al norte (figura 4). Finalmente, se presenta un modelo de corrientes ionosféricas de forma elíptica y se estiman con ello las condiciones más probables para la ocurrencia de los *SFE* inversos.

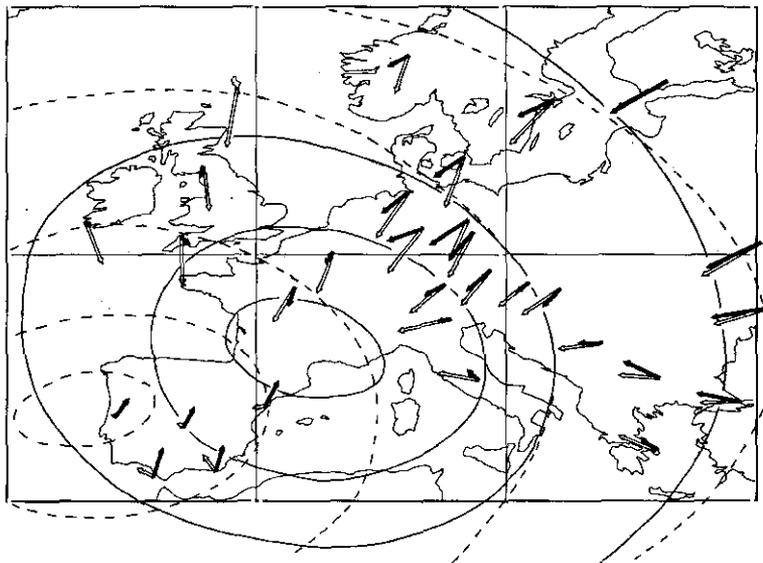


Figura. 4. Sistemas de corriente SFE (líneas continuas) y S_g (líneas a trazos) en Europa para la fulguración solar del 11 de julio de 1978. Las flechas negras representan los vectores SFE en el momento del máximo en los observatorios magnéticos y las blancas, la variación regular para ese mismo instante.

En un segundo artículo, Curto et al. (1994b) proporcionan un modelo físico integrado de los fenómenos SFE , combinando varios modelos semi-empíricos previos. Ello les permite explicar las observaciones descritas en Curto et al. (1994a).

Estudios recientes sobre estos efectos han proliferado también en la India, con datos del observatorio ecuatorial de Annamalainagar (Rastogi, 1996), con el uso de una cadena de observatorios indios localizados a lo largo de un estrecho sector alrededor del meridiano $75^\circ E$ (Rastogi et al., 1997), o extendiendo éste hasta latitudes medias con observatorios de estados de la antigua Unión Soviética (Rastogi et al., 1999).

7. CONCLUSIONES

Nuestro conocimiento de las variaciones geomagnéticas y de sus fuentes ionosféricas continuará expandiéndose con la aplicación de métodos bien establecidos a nuevas series de datos, o con los avances en el desarrollo de nuevas técnicas de análisis, tales como el análisis armónico de un casquete esférico, técnicas de fuente equivalente o separando el campo en partes toroidales y poloidales.

Como ha sugerido Stening (1999), para confirmar si los cambios día a día en la amplitud y forma de las variaciones magnéticas diarias son consecuencia de cambios en las condiciones de los vientos en la alta atmósfera, será preciso efectuar comparaciones entre los cambios en los sistemas de corriente globales y aquéllos en los regímenes globales de viento. Por tanto, los análisis de las variaciones geomagnéticas deberán incluir información contemporánea de mareas atmosféricas y vientos predominantes, y de las interacciones con ondas de gravedad y planetarias en la atmósfera media.

Serán necesarias nuevas investigaciones encaminadas a solucionar los inconvenientes matemáticos inherentes a los estudios regionales, ya que los análisis planetarios no son generalmente capaces de tener en cuenta los rasgos anormales. Por otro lado, las irregularidades tienden también a perderse en los promedios, porque los sistemas de corriente Sq se calculan habitualmente como una media para un cierto número de días de calma. Se necesitan pues análisis de las corrientes equivalentes para instantes fijos. A pesar de que la distribución de observatorios magnéticos es generalmente insuficiente para tales análisis, el advenimiento de nuevas medidas de satélite, preferiblemente en todas las horas locales, asegurará su consecución.

REFERENCIAS

- ALTADILL, D. (1997): *Oscilaciones casi-periódicas en la alta ionosfera relacionadas con la actividad de las ondas planetarias en la atmósfera media*. Tesis doctoral. Universitat Ramon Llull.
- AMM, O. (1997): Ionospheric elementary current systems in spherical coordinates and their application, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 49, 947-955.
- AMM, O. (1998): Method of characteristics in spherical geometry applied to a Harang-discontinuity situation, *Ann. Geophysicae*, 16, 413-424.
- AMM, O., and Viljanen, A. (1999): Ionospheric disturbance magnetic field continuation from the ground to the ionosphere using spherical elementary current systems, *Earth Planets and Space*, 51, 431-440.
- APOSTOLOV, E.; ALTADILL, D., and ALBERCA, L. (1996): Persistence of quasi-2-day oscillations in the geomagnetic activity indices (a_n , a_s , a_m), *J. Geomagn. Geoelectr.*, 48, 1233-1239.
- ARORA, B. R.; CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1995): Upper mantle electrical conductivity in the Himalayan region, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 47, 653-665.
- BERNARD, R. (1981): Variability of the semidiurnal tide in the upper mesosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 43, 663-674.
- BHARDWAJ, S. K., and RANGARAJAN, G. K. (1998): A model for solar quiet day variation at low latitude from past observations using singular spectrum analysis, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 107, 217-224.
- BUTCHER, E. C.; MCCREADIE, H., and SCHLAPP, D. M. (1993): A worldwide study of the H, D and Z variation on Abnormal Quiet Days (AQDs), *Geophys. J. Int.*, 114, 175-184.

- CAMPBELL, W. H. (1983): A description of the external and internal quiet daily variation currents at North American locations for a quiet Sun year, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 73, 5164.
- CAMPBELL, W. H. (1989a): The regular geomagnetic-field variations during quiet solar conditions, in *Geomagnetism Vol. 3*, ed. J.A. Jacobs, pp. 385-460, Academic Press, London.
- CAMPBELL, W. H. (1989b): An introduction to quiet daily geomagnetic fields, *Pageoph*, 131, 315-331.
- CAMPBELL, W. H. (1997): *Introduction to geomagnetic fields*, Cambridge University Press, Cambridge.
- CAMPBELL, W. H., and ANDERSSON, R. S. (1983): Conductivity of the subcontinental upper mantle: an analysis using quiet-day geomagnetic record of North America, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 35, 367-382.
- CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1985): Quiet ionospheric currents of the northern hemisphere derived from quiet field records, *J. Geophys. Res.*, 90, 6475-6486 (see also Correction, *J. Geophys. Res.*, 91, 9023-9024, 1986).
- CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1986): A comparison of upper mantle subcontinental electrical conductivity for North America, Europe and Asia, *J. Geophys.*, 59, 56-61.
- CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1987): Quiet ionospheric currents and earth conductivity profiles computed from quiet time geomagnetic field changes in the region of Australia, *Aust. J. Phys.*, 40, 7387.
- CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1988a): Upper mantle electrical conductivity for Seven Subcontinental regions of the Earth, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 40, 1387-1406.
- CAMPBELL, W. H., and SCHIFFMACHER, E. R. (1988b): Ionospheric currents of the Southern hemisphere derived from geomagnetic records, *J. Geophys. Res.*, 93, 933-944.
- CAMPBELL, W. H.; SCHIFFMACHER E. R., and KROEHL, H. W. (1989): Global quiet day field variation model WDCA/SQ1, *EOS*, 70, p. 66.
- CAMPBELL, W. H.; SCHIFFMACHER, E. R., and ARORA, B. R. (1992): Quiet geomagnetic field representation for all days and latitudes, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 44, 459-480.
- CAMPBELL, W. H.; ARORA, B. R., and SCHIFFMACHER, E. R. (1993): External *Sq* currents in the India/Siberia Region, *J. Geophys. Res.*, 98, 3741-3752.
- CAMPBELL, W.H.; C. E. BARTON; CHAMALAUN, F. H., and W. WELSH (1998): Quiet-day ionospheric currents and their application to upper mantle conductivity in Australia, *Earth Planets Space*, 50, 347-360.
- CURTO, J. J.; AMORY-MAZAUDIER, C.; TORTA, J. M. and MENVIELLE, M. (1994): Solar flare effects at Ebre: Regular and reversed solar flare effects, statistical analysis (1953 to 1985), a global case study and a model of elliptical ionospheric currents. *J. Geophys. Res.*, 99, 3945-3954.
- CURTO, J. J.; AMORY-MAZAUDIER, C.; TORTA, J. M. and MENVIELLE, M. (1994): Solar flare effects at Ebre: Unidimensional physical integrated model. *J. Geophys. Res.*, 99, 23289-23296.
- DE SANTIS, A. (1991): Translated origin spherical cap harmonic analysis, *Geophys. J. Inter.*, 106, 253-263.
- FORBES, J. M. (1996): Planetary waves in the thermosphere-ionosphere system. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 48, 91-98.

- FORBES, J. M., and LEVERONI, S. (1992): Quasi 16-day oscillation in the ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 981-984.
- FUKUSHIMA, N. (1994): Some topics and historical episodes in geomagnetism and aeronomy, *J. Geophys. Res.*, 99, 19113-19142.
- GUPTA, J. C. (1980): Harmonic coefficients of solar and lunar daily variations obtained from long series of hourly geomagnetic data, *Geomag. serv. of Canada, Geomag. ser.*, No. 18, 206 pp.
- HAINES, G.V. (1985): Spherical Cap Harmonic Analysis, *J. Geophys. Res.*, 90, 2583-2591.
- HAINES, G.V., and TORTA, J. M. (1994): Determination of equivalent current sources from spherical cap harmonic models of geomagnetic field variations, *Geophys. J. Inter.*, 118, 499-514.
- HIBBERD, F. H. (1981): Day-to-day variability of the Sq geomagnetic field variation, *Aust. J. Phys.*, 34, 81-90.
- HIBBERD, F. H. (1985): The geomagnetic Sq variation: annual, semiannual and solar cycle variations and ring currents effects, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 47, 341-352.
- HITCHMAN, A. P., LILLEY F. E. M., and CAMPBELL, W. H. (1998): The quiet daily variation in the total magnetic field: global curves, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2007-2010.
- HOBBS, B. A., and PRICE, A.T. (1970): Surface integral formulae for geomagnetic studies, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 20, 49-63.
- JARVIS, M. J. (1997): Latitudinal variation of quasi-biennial oscillation modulation of the semidiurnal tide in the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 27177-27187.
- KANE, R. P. (1997): Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in geomagnetic activity indices, *Ann. Geophys.*, 15, 1581-1594.
- KOHSIEK, A. (1998): Geomagnetic variations and atmospheric dynamics. *Proceedings of VII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, data Acquisition and Processing, Adolf Schmidt-Observatory for Geomagnetism Niemegk STR98/21*, ed. A. best and H.J. Linthe, p. 407-414, GeoForschungsZentrum, Postdam.
- KOHSIEK, A., GLASSMEIER, K. H. and HIROOKA, T. (1995): Periods of planetary waves in geomagnetic variations, *Ann. Geophysicae*, 13, 168-176.
- KUNITAKE, M. (1999): Geomagnetic variations caused by quasi-two-day wave of the neutral wind in the lower thermosphere, fields (Abstract), *IUGG 99 Abstract Book, XXII General Assembly of IUGG*, p. A106.
- KUZNETSOV, B. M., and PITTSYNA, N. G. (1987): Variation of the quiet level of the geomagnetic field at middle latitudes in the solar activity cycle and as a function of the intensity of ionospheric and magnetospheric current systems, *Geomagn. Aeron.*, 27, 535-538.
- LANGEL, R. A. (1987): The main field, in *Geomagnetism, Vol 1*, ed. by J.A. Jacobs, pp. 249-512, Academic Press, London.
- LANGEL, R. A., SABAKA, T. J.; BALDWIN J. A., and CONRAD (1996): The near-Earth magnetic field from magnetospheric and quiet-day ionospheric sources and how it is modeled, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 98, 235-267.
- LOWES, F. J. (1995): The application of Spherical Cap Harmonic Analysis to the separation of the internal and external parts of Sq type fields (Abstract), *IUGG 95 Abstract Book, XXI General Assembly of IUGG*, p. B133.
- LOWES, F. J. (1999): A problem in using Spherical Cap Harmonic Analysis to separate internal and external fields (Abstract), *IUGG 99 Abstract Book, XXII General Assembly of IUGG*, p. B324.

- MALIN, S. R. C. (1973): Worldwide distribution of geomagnetic tides, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A 274, 551-594.
- MAYAUD, P. N. (1980): Derivation, meaning and use of geomagnetic indices, *AGU Monogr. Ser.*, 22.
- MIYAHARA, I., and FORBES, J. M. (1994): Interactions between diurnal tides and gravity waves in the lower thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 1365-1373.
- MIYAHARA, S., and OOISHI, M. (1997): Variation of Sq induced by atmospheric tides simulated by a middle atmosphere general circulation model, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 49, 77-87.
- OLSEN, N. (1993): The solar cycle variability of lunar and solar daily geomagnetic variations, *Ann. Geophys.*, 11, 254-262.
- OLSEN, N. (1994): A 27-month periodicity in the low latitude geomagnetic field and its connection to the stratospheric QBO, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1125-1128.
- OLSEN, N. (1996): Magnetospheric contributions to geomagnetic daily variations, *Ann. Geophys.*, 14, 538-544.
- OLSEN, N. (1997): Ionospheric F region currents at middle and low latitudes estimated from Magsat data, *J. Geophys. Res.*, 102, 4563-4576.
- OLSEN, N. (1999): Recent progress in exploring the near-Earth magnetic field with low-altitude satellites (Abstract), *IUGG 99 Abstract Book, XXII General Assembly of IUGG*, p. B103.
- OLSEN, N., and KIEFER, M. (1995): Geomagnetic daily variations produced by a QBO in the thermospheric prevailing winds. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 1583-1589.
- OLSON, W. P. (1989): The contribution of magnetospheric currents to Sq, *Pure Appl. Geophys.*, 131, 447-462.
- PHILLIPS, A., and BRIGGS, B. H. (1991): The day-to-day variability of upper atmospheric tidal winds and dynamo currents, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 39-47.
- PRICE, A. T., and WILKINS, G. A. (1963): New methods for the analysis of geomagnetic fields and their application to the Sq field of 1932-3, *Phil. Trans. Roy. Soc. London (Ser. A)*, 256, 31-98.
- PURUCKER, M. E.; SABAKA, T. J.; LANGEL, R. A., and OLSEN, N. (1997): The missing dimension in Magsat and POGO anomaly studies, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2909-2912.
- RANGARAJAN, G. K., and ARAKI, T. (1997): Multiple timescales in the fluctuations of the equatorial Dst index through singular spectrum analysis, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 49, 3-20.
- RASTOGI, R. G. (1989): The equatorial electrojet: Magnetic and Ionospheric effects, in *Geomagnetism Vol. 3*, ed. J.A. Jacobs, pp. 461-525, Academic Press, London.
- RASTOGI, R. G. (1996): Solar flare effects on zonal and meridional currents at the equatorial electrojet station, Annamalainagar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1413-1420.
- RASTOGI, R. G.; RAO, D. R. K.; ALEX, S.; PATHAN, B. M., and SATRY, T. S. (1997): An intense SFE and SSC event in geomagnetic H, Y and Z fields at the Indian chain of observatories, *Ann. Geophys.*, 15, 1301-1308.
- RASTOGI, R. G.; PATHAN, B. M.; RAO, D. R. K.; SASTRY, T. S., and SATRI, J. H. (1999): Solar flare effects on the geomagnetic elements during normal and counter electrojet periods, *Earth Planets Space*, 51, 947-957.
- RICHMOND, A. D. (1998): The ionosphere and Upper Atmosphere, in *From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, ed. S.T. Suess and B.T. Tsurutani, pp. 35-44, American Geophysical Union, Washington.

- SABAKA and BALDWIN (1993): Modeling the Sq magnetic field from POGO and Magsat satellite and contemporaneous hourly observatory data, Phase I. *Contract Rep. HSTX /G&G9302* (Hughes STX Corp. for NASA/GSFC Contract NAS5-31760, Greenbelt, Maryland).
- SCHLAPP, D. M., and BUTCHER, E. C. (1995): Seasonal and sunspot-cycle changes in the day-to-day variability of Sq, *Geophys. J. Int.*, 120, 173-185.
- SCHUSTER, A. (1889): The diurnal variation of terrestrial magnetism, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 180, 467-518.
- SHIRAKI, M. (1973): Variation of focus latitude and intensity of overhead current system of Sq with the solar activity, *Memo. Kakioka Magnetic Obs.*, 15, 107-126.
- STENING, R. J. (1989): A calculation of ionospheric currents due to semidiurnal antisymmetric tides, *J. Geophys. Res.*, 94, 1525-1531.
- STENING, R. (1999): Day-to-day changes in the Sq ionospheric current system (Abstract), *IUGG 99 Abstract Book, XXII General Assembly of IUGG*, p. B336.
- SUZUKI, A. (1979): UT and day-to-day variations in equivalent current systems for world geomagnetic variations. *J. Geomagn. Geoelect.*, 31, 21-46.
- TAKEDA, M. (1999): Time variation of global geomagnetic Sq field in 1964 and 1980. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 61, 765-774.
- TORTA, J. M., and DE SANTIS, A. (1996): On the derivation of the earth's conductivity structure by means of spherical cap harmonic analysis, *Geophys. J. Int.*, 127, 441-451.
- TORTA, J. M.; CURTO J. J., and BENCZE, P. (1997): Behavior of the quiet day ionospheric current system in the European region, *J. Geophys. Res.*, 102, 2483-2494.
- VAUTARD, R., YIOU P. and GHIL, M. (1992): Singular spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals, *Physica*, D58, 95-126.
- WALKER, J. K. (1989): Spherical cap harmonic modelling of high latitude magnetic activity and equivalent sources with sparse observations, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51 No. 2, 67-80.
- WALKER, J. K. (1992): Regional and «global» parameters of high latitude magnetic activity, ionospheric and induced currents, *Proceedings of IV Solar-terrestrial predictions Workshop Vol. 3*, ed. J. Hruska, M.A. Shea, D.f. Smart and G. Heckman, p. 310, NOAA, Boulder.
- WALKER, J. K.; SEMENOV, V. Y. and HANSEN, T. L. (1997): Synoptic models of high latitude magnetic activity and equivalent ionospheric and induced currents, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 59, 1435-1452.
- WINCH, D. E. (1981): Spherical harmonic analysis of geomagnetic tides, 1964-1965, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A 303, 1-104.