

SOBRE LA EVOLUCION TEMPORAL DEL DIPOLO Y CUADRUPOLO DEL CAMPO GEOMAGNETICO

Julio César Gianibelli

Departamento de Geomagnetismo y Aeronomía de la Fac. de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
geofisicogianibelli@yahoo.com.ar

RESUMEN

Los antecedentes de los desarrollos en esféricos armónicos del Campo Magnético Terrestre se remontan al año 1550 con desarrollo hasta el sexto orden. A partir de 1900 se dispone de modelos de desarrollos hasta el orden 10, dados por los IGRF (Campo Geomagnético Internacional de Referencia) y DGRF (Campo Geomagnético de Referencia Definitivo) editados por la IAGA. En el 2005 el orden del desarrollo se extendió para el modelo IGRF 2005 hasta el orden 14. En el presente trabajo se recopilieron los coeficientes del orden 1 y 2 desde 1550 a la actualidad. Se ajusta la variación temporal de cada coeficiente g_i^j, h_i^j para los órdenes 1 y 2 mediante funciones polinómicas en el intervalo 1550-1900. Desde 1900 hasta 2005 se toman los coeficientes del IGRF e DGRF para generar un conjunto de series temporales en intervalos de 5 años para cada coeficiente. Estas series temporales de cada coeficiente $g_i^j(t), h_i^j(t)$ fueron analizados por medio de un análisis espectral no lineal habiéndose previamente sustraído la tendencia lineal. Se reconstruyen los coeficientes g_i^j, h_i^j de orden 1 y 2 en el intervalo 1550-2005 y se simula desde el año 2010 al 2500 mediante un modelo aditivo anarmónico compuesto por la tendencia y los períodos detectados en el análisis espectral. Los resultados muestran que la energía de la componente cuadrupolar crece notablemente para las épocas posteriores al año 2005 y la estimación del campo observado en superficie posee un aporte del orden del 18 % de la energía correspondiente al efecto cuadrupolar respecto del dipolar. Se concluye que el Campo Geomagnético inicia un proceso de transición de efectos principalmente dipolar a procesos de efectos no dipolares (cuadrupolo) con posibles cambios de posición de los Polos Geomagnéticos.

Palabras clave: Geomagnetismo, variación secular, dipolo, cuadrupolo, IGRF.

ABSTRACT

The antecedents of the spherical harmonics analysis of the Earth's Magnetic Field dates from 1550, with a development to the 6th order. From the year 1900 are available models with a development to the 10th order, given by the International Geomagnetic Reference field (IGRF) and the Definitive Geomagnetic Reference Field (DGRF), edited by the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). In the year 2005 the order of spherical harmonics analysis extends to the 14th order for the IGRF model. In the present work are compiled the coefficients g_i^j, h_i^j for the 1st and 2nd order, from 1550 to the present time. To the temporal variation of each coefficient g_i^j, h_i^j from the 1st and 2nd order are adjusted by means of polynomial functions in the interval 1550-1900. From 1900 to 2005 the coefficients of IGRF and DGRF are taken to generate a set of temporal series in intervals of 5 years length for each coefficient. For this temporal series of each coefficient, are analyzed by means of a non linear spectral analysis after subtracted the lineal tendencies. The coefficients, of 1st and 2nd order in interval 1550-2005 are reconstructed and then simulated from the year 2010 to 2500 by means

of anharmonic additive model composed by the tendencies and the period detected with the spectral analysis. The results shows that the energy of the quadrupolar component grows notably from the epoch posterior to year 2005 and the estimation of the surface observed field hold a contribution of the order of 18 % of the energy corresponding to the quadrupolar effect with respect to the dipolar effect. It is conclude that the geomagnetic field start a process of transition from effects principally dipolar to effects of processes mainly non dipolar with possible change of the positions of the Geomagnetic Poles. **Keywords:** Geomagnetism, Secular variation, Dipole, Cuadrupole, IGRF.

INTRODUCCION

El Campo Magnético de la Tierra determinado en su superficie, contiene los aportes de las fuentes situadas en el Núcleo externo de la Tierra, en la corteza y en la cavidad magnetosférica, incluyendo los procesos de inducción que esta última produce sobre la Tierra solida e hidrósfera.

A partir de estas determinaciones es posible separar los campos producidos en el interior de la Tierra y los producidos en la cavidad magnetosférica, por procesos de movimientos colectivos de partículas, electrones y protones, en diferentes escenarios tales como la ionósfera, plasmaesfera, cola de la magnetósfera, magnetopausa, y casquetes polares (Campbell, 1997; Pröls, 2004; Kallenrode, 2004).

La magnitud de los campos de origen externo frente al campo producido en el núcleo externo de la Tierra (denominado campo principal) y la corteza, es menor que el 5% de la magnitud total observada. (Gauss, 1839) mostró que la distribución del campo geomagnético sobre la superficie de la Tierra podía ser representado por un desarrollo en términos de funciones armónicas (Chapman y Bartels, 1940). Este desarrollo está caracterizado por una serie de coeficientes de las funciones armónicas esféricas, cuyo valor es obtenido a partir del análisis de los valores observados de los elementos del campo geomagnético en diferentes puntos de la superficie terrestre, y en la actualidad

incluyendo relevamientos aeromagnéticos, marinos y satelitales.

Este conjunto de coeficientes constituye un modelo matemático y es una aproximación del campo geomagnético para una época de referencia del análisis.

Desde 1839 se determinaron una gran cantidad de modelos para diferentes épocas a partir de 1550. Barraclough (1978) los compila hasta 1970 incluyendo diferentes modelos para la determinación del Campo Internacional de Referencia provisto por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) desde 1945 hasta 1970 cada 5 años. En la página web de la IAGA 2005 se presentan los modelos desde 1900 hasta el 2005. El modelo para el campo principal está dado por la expresión para el potencial magnético en la superficie de la Tierra de la siguiente manera en la ecuación (1):

$$V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \left(g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi \right) P_n^m(\cos\theta) \quad (1)$$

donde a es el radio medio de la Tierra (6371,2 Km.) y r , ϕ , θ son las coordenadas geocéntricas, r la distancia respecto del centro de la Tierra, la longitud al este a partir del meridiano de Greenwich y la colatitud.

$P_n^m(\cos\theta)$ son los polinomios cuasinormalizados de Schmidt (Barraclough, 1978; Langel, 1987; Merrill *et al.*, 1996). El campo geomagnético en la superficie de la Tierra esta dado por la ecuación (2)

Sobre la evolución temporal del dipolo y cuadrupolo del campo geomagnético

$$B_{r=a} = -[\text{grad}V]_{r=a} \quad (2)$$

Las características del campo geomagnético en superficie están dadas en la Figura 1, donde se tiene las isolíneas de la intensidad total del campo para el año 2000. En dicha figura se observan dos máximos en el Hemisferio Norte: el máximo “B” corresponde al Polo Geomagnético Boreal, y un máximo “C”, de carácter secundario, en la región del noroeste Asiático, ambos con valores de 60000 nT (1 Tesla = 1 Weber/m²). También se observa en el Hemisferio Sur un máximo “A”, correspondiente al Polo Geomagnético Austral, con valores de 65000 nT, y la gran Anomalía del Atlántico Sur, cubriendo las regiones del Continente Sudamericano y el Océano Atlántico Sur, con un mínimo sobre la región del Río de La Plata de 23000 nT, intensidad que en el presente sigue disminuyendo. Estas anomalías son la expresión de comportamientos no dipolares crecientes en el tiempo producido por la intrincada forma de difundirse el campo generado en el núcleo externo de la Tierra, denominado como geodínamo, y por los

posibles procesos magnetohidrodinámicos que lo generaron.

El ajuste de los modelos del campo geomagnético con las observaciones realizadas en observatorios permanentes son reportados por Gianibelli y Kohn. (2004) y utilizando satélites por Mandea y Lenglais (2002) y Sabak *et al.* (2002). Langel *et al.* (1995) propone efectuar un análisis de la distribución irregular de los observatorios permanentes y propone una mejor distribución, teniendo en cuenta especialmente las regiones oceánicas.

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar la energía de los dos primeros ordenes (dipolo y cuadrupolo) de los desarrollos en esféricos armónicos desde 1550 hasta el 2005 basándose en los desarrollos realizados para las épocas 1550 a 1970 normalizados y los modelos internacionales de referencia provistos por la IAGA desde 1900 hasta el 2005. Estimar por otra parte funciones no lineales de ajuste para predecir la evolución temporal de cada coeficiente de los ordenes 1 y 2 (dipolo y cuadrupolo respectivamente) para el intervalo 2005-2500.

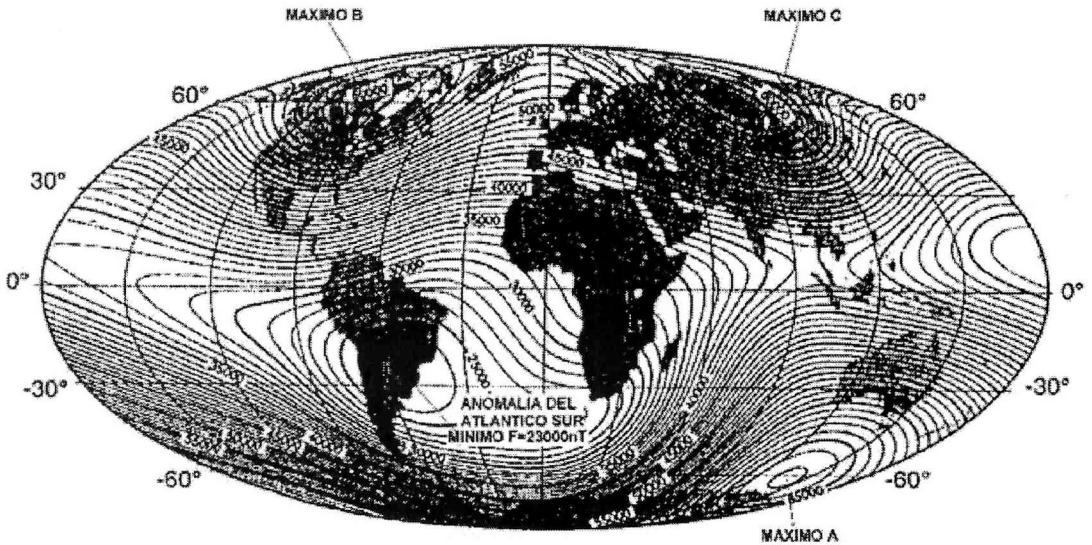


Figura 1. Intensidad Total del Campo Geomagnético. Epoca 2000.0.

ANALISIS DE LOS DATOS

Para $n = 1$ y 2 y $m = 0, 1, 2$ los coeficientes g_i^j y h_i^j son representados por funciones no lineales que representen su evolución en el intervalo 1550-2005. Se reconstruye entonces una nueva base de datos cada 5 años en el mismo intervalo de tiempo. Se efectúa un análisis espectral no lineal para cada serie de coeficientes en función del tiempo. Los períodos detectados son utilizados para reconstruir las series de datos g_i^j , h_i^j en el intervalo 1550-2500 mediante el siguiente modelo no armónico dado por las ecuaciones (3) y (4):

$$g_i^j(t) = G_1 + G_2 t + \sum_{k=1}^k [(a_k)_i^j \cos(\omega_k t) + (b_k)_i^j \text{sen}(\omega_k t)] \quad (3)$$

$$h_i^j(t) = H_1 + H_2 t + \sum_{l=1}^l [(c_l)_i^j \cos(\omega_l t) + (d_l)_i^j \text{sen}(\omega_l t)] \quad (4)$$

con $\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}$ y $\omega_l = \frac{2\pi}{T_l}$,

y para $i = 1, 2$ y $j = 0, 1, 2$

Donde k y l es el número máximo de períodos detectados. En este estudio no superaron a 6, resultando ser no armónicos.

A partir de las aplicaciones de estos modelos fue posible determinar entonces la energía del campo dipolar y cuadrupolar en el intervalo 1550-2005 y su predicción 2010-2500. La expresión de la energía (Merril *et al.*, 1996) está dada por la siguiente ecuación (5):

$$W_n(t) = \frac{1}{2n+1} \sum_{m=1}^n \left\{ g_n^m(t) \right\} + \left[h_n^m(t) \right] \quad (5)$$

con $n = 1, 2$

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra la evolución de las energías correspondientes a la expresión dipolar y cuadrupolar del efecto del geodinamo residente en el núcleo externo de la Tierra.

Puede observarse que la tendencia lineal de las energías W_1 y W_2 en el intervalo 1900-2005 donde se tomaron los coeficientes de los modelos internacionales de referencia (Fig. 2), podría conducir a valores de la energía dipolar para la época 2500 menores que los determinados en este estudio. Asimismo energías mayores se estimarían para el cuadrupolo en el 2500. Esto podría ser objeto de un estudio particular usando solo esa ventana temporal 1900-2005 de información, pero con los coeficientes de todos los órdenes del desarrollo en esféricos armónicos (IAGA 2005).

Puede observarse que el cambio temporal desde 1550 hasta el 2500 es bastante pronunciado para el campo cuadrupolar respecto del dipolar. La relación porcentual se observa en la Figura 3. Cabe observar de esta figura que la relación porcentual en la actualidad no llega al 2%, teniendo una distribución de la intensidad de campo como se muestra en en la Figura 1.

La Figura 4 muestra el cambio temporal de las energías W_1 y W_2 observándose procesos de intermitencia en W_1 , mientras que los cambios en W_2 aparecen a partir del año 2015 y más pronunciadamente a partir del año 2330. Para el intervalo 2000-2070 es esperable un aumento de la difusión del campo dipolar que en apariencia podría estimular una hipótesis de recuperación de su intensidad, ya que dW_1/dt tiene valores positivos. Los máximos y mínimos en W_1 podrían estar relacionados con pulsos detectados en los Observatorios Permanentes. El último pulso fue reportado por De Michelis *et al.* (2000).

CONCLUSIONES

El campo dipolar responsable de la mayor parte del campo principal observado en superficie tiene un cambio decreciente con intermitencias observables claramente en el intervalo 1550-2005 y estimables hasta el 2500.

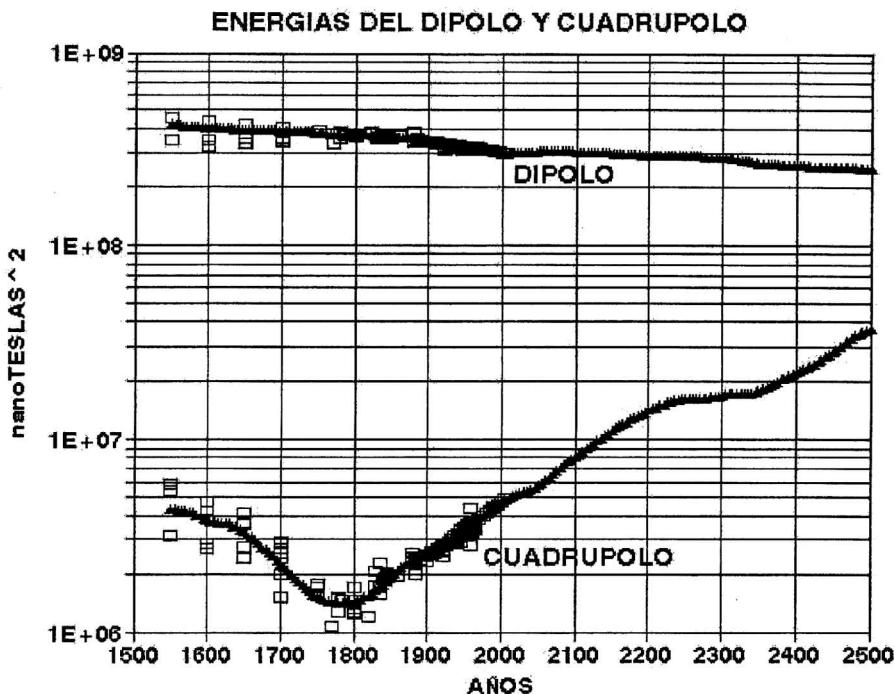


Figura 2. Evolución temporal de la energía correspondiente al orden 1 (dipolo) y orden 2 (cuadrupolo) de los desarrollos en esféricos armónicos del Campo Magnético Terrestre realizados desde 1550 hasta el 2005. En cuadrados vacíos se marcan los resultados de las energías de los desarrollos. En triángulos llenos la reconstrucción y predicción temporal hasta el 2500.

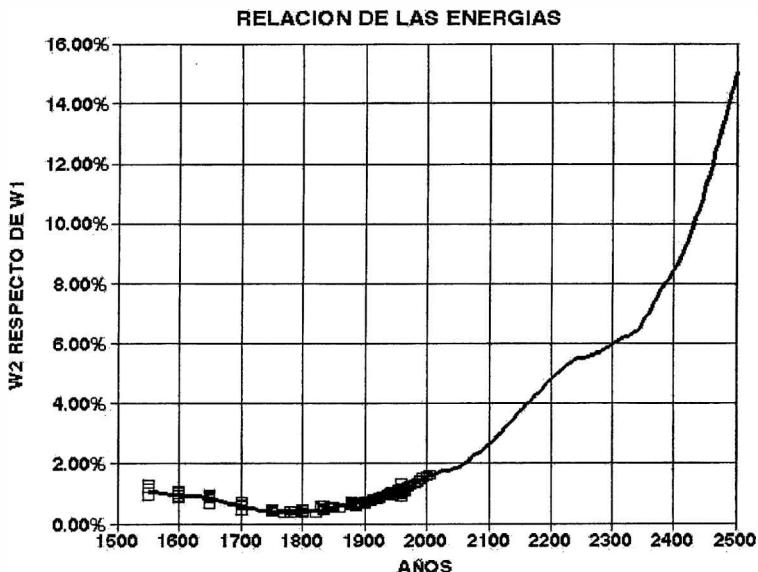


Figura 3. Relación de la energía del orden 2 (cuadrupolar) respecto del orden 1 (dipolo) del desarrollo en esféricos armónicos realizado desde el año 1550 hasta el año 2005 marcado en cuadrados vacíos. En línea llena se representa la evolución temporal de esta relación hasta el año 2500.

CAMBIO ANUAL PROMEDIO DE LAS ENERGIAS
W1:DIPOLO W2:CUADRUPOLO

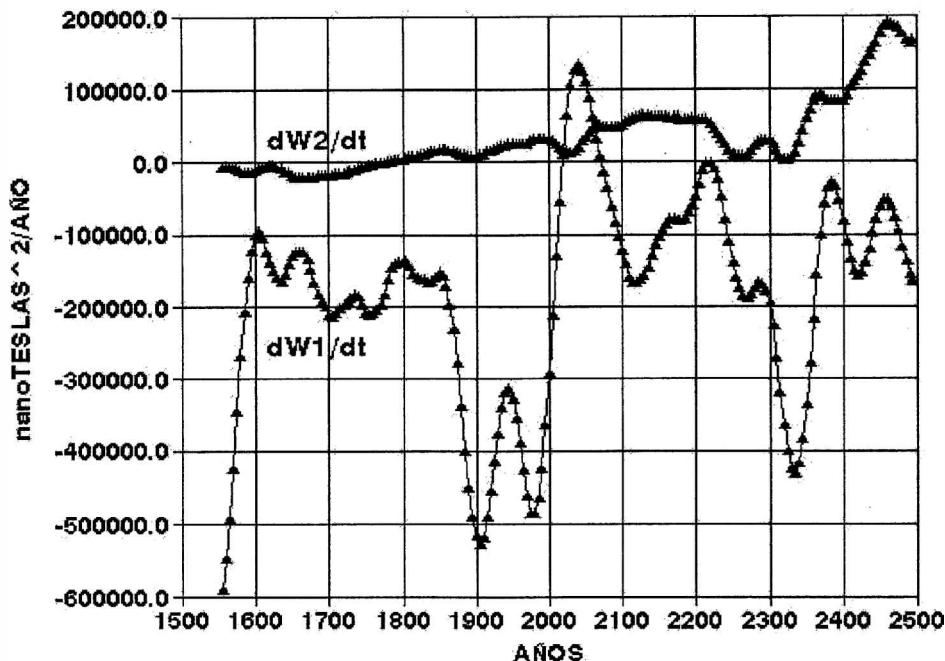


Figura 4. Derivada temporal de las energías de orden 1 (dipolo) y orden 2 (cuadrupolo) determinada cada 5 años a partir de la reconstrucción y predicción de las mismas en el intervalo 1550-2005 y 2010-2500 respectivamente.

El cambio más importante está dado por el aporte cuadrupolar. Su estimación más allá del 2500 promueve o supone una intensificación de la anomalía del Atlántico Sur con valores cada vez menores a los observables a la fecha. Cabe preguntarnos si esta anomalía al intensificarse es una expresión superficial de importantes cambios en el campo, que hasta la fecha se comporta como dipolar a estados no dipolares, con aparición en otras regiones del hemisferio norte de más polos, y por consiguiente un comportamiento en la interacción Sol-Tierra con procesos más complicados, no observados en otros planetas del Sistema Solar. Esto sería una expresión temprana de lo que podríamos considerar como una excursión del Campo Magnético Terrestre, con estados de algunos cientos o miles de años y que podría fijarse en la época de 1880 el

inicio del crecimiento constante del efecto de un campo cuadrupolar.

Agradecimientos. Se agradece a los técnicos del Departamento de Geomagnetismo y Aeronomía de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP., Mónica Mac William y Nicolás Quaglino, por la preparación del trabajo en formato electrónico.

REFERENCIAS

Barraclough, D. R., 1978. Spherical Harmonic Models of the Geomagnetic Field. Institute of Geological Sciences. Geomagnetic Bulletin 8. 1-66.
Campbell W., 1997. Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press. Cambridge.

Sobre la evolución temporal del dipolo y cuadrupolo del campo geomagnético

- Chapman S. and J. Bartels, 1940. Geomagnetism Vol I, and Vol II Oxford University Press. London.
- De Michelis, P., L. Cafarella, and A. Meloni, 2000. A Global Analysis of the 1991 Geomagnetic Jerk Geophys. J. Int. 143, 545-556.
- Gauss C.F., 1839. General theory of terrestrial magnetism . pp 184-251 in scientific memoirs selected from the transactions of foreign academies and learned societies and from foreign journals , Vol. 2. Taylor R. (editor). Translation into English by Mr. Sabine, revised by Sir John Herschel .
- Gianibelli, J.C., y J. Kohn, 2004. Evolucion de los Modelos IGRF y DGRF para el Observatorio Geomagnetico de Trelew (Argentina). Actas de la XXII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 6-10 de Septiembre de 2004.
- Internacional Geomagnetic Reference Field 2000. IAGA (Internacional Association of Geomagnetism and Aeronomy) Div V. Geophysics International 141 pp. 259-262. IAGA (2005): <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/Vmod>
- Kallenrode M.B., 2004. Space Physics 3 rd ED. Springer-Berlin pp. 1-484.
- Langel R.A., 1987. Main Field in Geomagnetism. ED by Jacobs J. A. Academic Press N. Y., VOL I, pp 249-512.
- Langel R.A., A.R.T. Baldwin and A.W. Green. 1995. Toward and Improved Distribution of Magnetic Observatories for Modeling of the Main Geomagnetic Field and Its Temporal Change. J. Geomag. Geoelectr., 47, 475-508.
- Manda, M. and B. Langlais, 2002. Observatory Crustal Magnetism Biases During MAGSAT and OERSTED Satellite Mission. Geophysics Research Letter Vol 25 N° 15, 8003.
- Merril, R., M.W. Mc Elhinny and P.L. Mc Fadden. 1996. The Magnetic Field of the Earth, Academic Press. N. Y.
- Pröls, G.W., 2004. Physics of the Earth's Space. Environment Springer-Berlin pp. 1-533.
- Sabak, T.J., N. Olsen and A. Langel. 2002. A Comprehensive Model of the Quiet-Time , Near Earth-Magnetic Field: phase 3. Geophysics International 151, pp 32-68.