

EL MODELO DEL CAMPO GEOMAGNETICO, LA ANOMALIA MAGNETICA DEL ATLANTICO SUR Y LA ACTIVIDAD SOLAR.

Julio César Gianibelli.
Departamento de Geomagnetismo y Aeronomía
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata – Argentina.
e-mail: jcg@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los modelos del Campo Magnético Terrestres se conocen desde 1550 y están basados en un desarrollo en esféricos armónicos que representan los efectos de campos magnético multipolares de la dínamo autoexcitada residente en el Núcleo Externo de la Tierra. Una evaluación de la energía de los efectos dipolares muestran su decrecimiento y mientras que los cuadrupolares crecen temporalmente. Los modelos Internacionales del Campo Geomagnético de Referencia (IGRF por International Geomagnetic Reference Field) se determinan a partir del año 1900. Cada 5 años sus coeficientes son recalculados. En el presente trabajo se analiza la intensidad total F del Campo Geomagnético evaluada en un perfil desde el Polo Norte al Polo Sur Geomagnéticos para el intervalo temporal 1900 a 2010. Dicho perfil atraviesa América y llega hasta la Antártida abarcando 23 observatorios magnéticos. Para cada Observatorio se tiene una serie temporal de valores de F . Se calcula la variación de F cada 5 años y luego es analizada por medio de análisis espectral no lineal para determinar los períodos predominantes. Los resultados muestran que se detectaron períodos comprendidos en las bandas de 80 años, 30 años y un aporte del ciclo solar en la banda de los 12 años. Se concluye que las dos primeras bandas corresponden a fenómenos generados en el geodínamo, mientras que la onda solar corresponde a una inducción sobre el geodínamo por los sistemas de corrientes equivalentes residentes en la magnetósfera e ionósfera que se intensifican con el ciclo solar. El comportamiento del perfil polo norte-polo sur de los observatorios permanentes demuestra que en el análisis predictivo hasta el año 2100 de los valores medios anuales estiman un crecimiento de la Anomalia Magnética del Atlántico Sur.

Palabras Claves: Geomagnetismo, IGRF, variaciones, Observatorios, ciclo solar.

INTRODUCCION

Los Modelos Geomagnéticos Internacionales de Referencia (IGRF por International Geomagnetic Reference Field) del Campo Magnético Terrestre (CMT) consisten en un desarrollo en esféricos armónicos hasta el orden 10 basados principalmente en la información provista por la Red de Observatorios Magnéticos Permanentes (OMP) en la superficie terrestre y que representan el campo generado por el efecto magnetohidrodinámico de una geodínamo residente en el núcleo externo de la Tierra (Langel, 1987[1]; Barraclough, 1978[2]). Estos modelos son actualizados cada 5 años a partir de 1900.0. Sus coeficientes son provistos por la IAGA (International Association for Geomagnetism and Aeronomy) y la determinación de los elementos geomagnéticos D , I , X , Y , Z , H y F , se obtienen on-line conociendo la latitud y longitud geográficas, altura y fecha, del punto geográfico a calcular, por medio de la facilidad web, entre otras,

provista por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): <http://ngdc.noaa.gov/geomagmodels/IGRFWMM.jsp>. La energía de los efectos dipolares y multipolares hasta el orden 10 fueron estudiados por Gianibelli 2006[3]. La Figura 1 muestra las energías de cada orden del desarrollo en esféricos armónicos desde 1900 hasta el 2005. Este modelo muestra que la energía de dipolo tiene decrecimiento menor al crecimiento de los ordenes multipolares 2 a 5. El orden 6 decrece mientras que los ordenes 7 a 10 crecen a partir de 1965. Estos cambios temporales provenientes de un modelo matemático no implican la existencia de “dipolos y multipolos” en alguna región de núcleo externo de la Tierra si no el efecto de cambio de una geodínamo y las propiedades geodinámicas del medio donde reside.

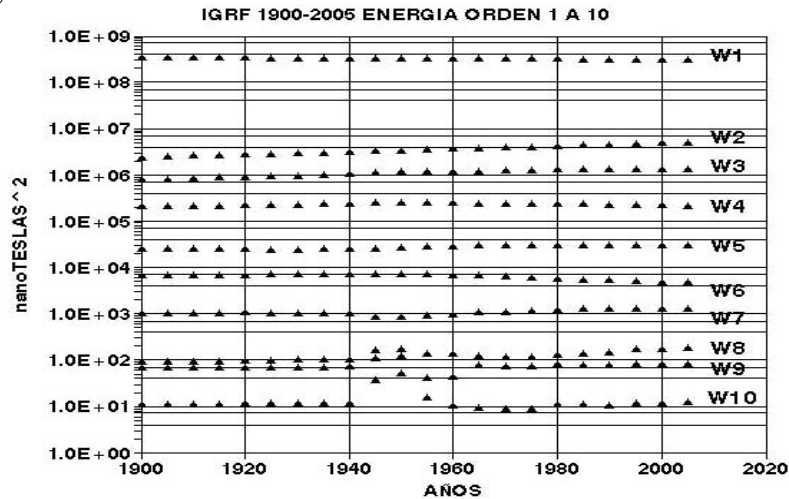


FIGURA 1.

El objetivo de este trabajo es analizar la variación de la intensidad total F en nT del CMT, desde 1900.0 hasta 2010.0 cada 5 años y observar su estructura espectral. A este respecto se utilizaron los OMP que se encuentran distribuidos desde el Polo Norte al Polo Sur Geomagnéticos a través del Continente Americano atravesando la denominada Anomalía Magnética del Atlántico Sur (AMAS). En estos OMP se determinó la intensidad total F del campo geomagnético por medio del modelo IGRF-11 desde 1900 hasta el 2010. La Figura 2 muestra la distribución de los OMP, las líneas isodinámicas de F y la AMAS representada en color azul indicando valores mucho menores que los esperados en la región ecuatorial si el campo fuera solamente dipolar.

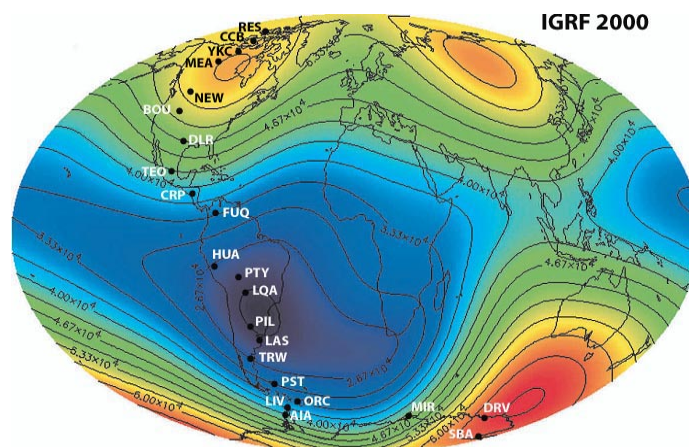


FIGURA 2

En la tabla 1 se tienen la nomenclatura y las coordenadas de colatitud norte, longitud este y altura sobre el nivel medio del mar.

NOMBRE	CODIGO	COLATITUD	LONGITUD	ALTURA en m
RESOLUTE BAY	RES	15.317	43.166 W	30
CAMBRIDGE BAY	CBB	20.883	105.033 W	20
YELLOWKNIFE	YKC	27.567	114.483 W	198
MEANOOK	MEA	35.383	113.350 W	700
NEWPORT	NEW	41.733	117.116 W	770
BIULDER	BOU	49.867	105.233 W	1650
DEL RIO	DLR	60.517	100.916 W	355
TELOYUCAN	TEO	70.250	99.183 W	2280
CHIRIPA	CRP	80.083	84.916 W	1030
FUQUENE	FUQ	84.033	76.733 W	2543
HUANCAYO	HUA	102.050	75.333 W	3312
PATACAMAYA	PTY	107.250	67.950 W	3789
LA QUIACA	LQA	112.100	65.600 W	3450
PILAR	PIL	121.667	63.883 W	336
LAS ACACIAS	LAS	125.000	57.683 W	20
TRELEW	TRW	133.250	65.316 W	30
PORT STANLEY	PST	141.700	57.883 W	135
ORCADAS DEL SUR	ORC	150.733	44.783 W	30
ISLAS LIVINSTON	LIV	152.667	60.333 W	19
ISLAS ARGENTINAS	AIA	155.250	64.250 W	10
MIRNY	MIR	156.550	93.016 E	20
DUMOND D'URVILLE	DRV	156.667	140.016 E	30
SCOTT BASE	SBA	167.850	166.783 E	10

TABLA 1

ANALISIS DE LOS DATOS Y RESULTADOS.

El primer resultado es el obtenido por la diferencia de F determinado por el modelo IGRF11 entre el año 2010.0 y el 1900.0 para el perfil seleccionado (Figura 3). Los cambios en este intervalo de tiempo muestran regiones con variaciones importantes.

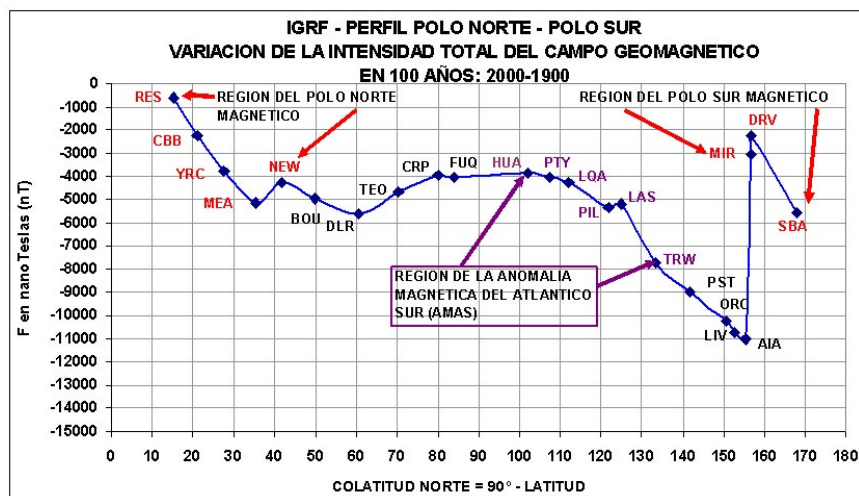


FIGURA 3

Estas variaciones quinquenales constituyen para cada OMP una serie temporal compuesta por una tendencia lineal más variaciones inarmónicas. Para su análisis y determinación de su estructura periódica se aplicó el Análisis Espectral por Máxima Entropía (AEME) (Ulrych and Bishop 1975[4], Wu 1977[5]) a cada serie temporal habiendo previamente quitado la tendencia. La figura 5 muestra el diagrama del proceso de cálculo.



Donde la Longitud del Filtro Predictor de Error (LFPR) aplicado entre el 15% y el 90% de la cantidad total de muestras o datos (N), es un parámetro importante en la determinación de las bandas de frecuencias o períodos (Ulrych and Bishop 1975[6], Wu 1977)[7]. La determinación de las amplitudes y de las fases y sus errores se efectuó mediante el sistema de mínimos cuadrados donde se resolvió el sistema lineal (Ecuación 1 de la Figura 5) habiendo propuesto un sistema aditivo de períodos detectados (Ecuación 2 de la Figura 5). Las Ecuaciones 3 y 4 de la Figura 5 indican los errores de cada componente de la amplitud y el cuadrado del error medio cuadrático del ajuste para el conjunto de N datos. Las Tabla 3A y 3B muestran los resultados

PERIODOS						PERIODOS					
	PER. años	AMP. nT.	ERR. nT.	FASE rad.	ERR. rad.		PER. años	AMP. nT.	ERR. nT.	FASE rad.	ERR. rad.
RES	70.2	162.9	22.9	2.2	0.1	LQA	91.5	56.6	10.9	0.5	0.1
	32.2	45.3	20.7	0.3	0.2		41.3	32.0	11.0	2.1	0.3
	24.6	53.5	16.6	1.6	0.3		21.4	17.0	10.2	4.4	0.3
	12.9	36.0	18.1	3.1	0.5		15.3	35.0	10.2	5.0	0.3
	10.9	36.2	22.3	4.4	0.3		12.7	29.0	8.1	6.2	0.3
RMS	53.7nT					RMS	25.8nT				
CCB	74.2	193.9	28.1	2.4	0.1	PIL	98.5	43.9	6.7	1.2	0.1
	27.6	37.1	25.4	3.5	0.3		39.4	16.7	6.4	1.3	0.2
	17.0	38.3	24.2	5.0	0.6		22.2	13.1	6.2	5.0	0.5
	11.5	32.5	21.4	0.1	0.6		15.3	29.0	6.3	4.9	0.2
RMS	65.2nT					RMS	16.6nT				
YRC	76.4	190.4	21.6	2.4	0.1	LAS	96.6	42.8	8.1	1.3	0.1
	33.7	30.9	21.2	1.1	0.2		30.5	15.3	8.0	0.2	0.3
	24.8	25.0	16.6	1.5	0.6		18.7	9.2	7.1	1.6	0.8
RMS	50.6nT						14.9	20.3	7.2	4.7	0.3
MEA	78.8	187.8	21.3	2.6	0.1		12.2	15.6	9.4	5.4	0.6
	32.6	30.3	18.9	0.2	0.4	RMS	21.5nT				
	23.4	32.3	22.2	1.0	0.1	TRW	85.4	52.5	15.8	1.2	0.1
	12.9	22.1	21.3	2.6	1.0		31.1	25.0	12.9	0.1	0.4
RMS	51.6nT						19.1	20.5	13.2	6.1	0.7
NEW	78.8	149.6	20.2	2.7	0.1	RMS	38.7nT				
	33.9	27.4	17.4	0.2	0.5	PST	94.8	65.9	13.2	1.6	0.2
	22.6	36.3	20.6	0.4	0.2		30.3	53.2	15.5	6.0	0.3
	13.1	24.5	16.9	3.0	0.7		20.8	44.0	16.8	0.4	0.1
RMS	50.0nT						17.4	32.6	15.9	4.4	0.3
BOU	78.8	150.0	22.7	2.8	0.2		14.6	32.5	13.6	6.2	0.4
	41.0	37.0	25.0	0.7	0.1	RMS	41.2nT				
	22.4	35.9	19.6	6.2	0.6	ORC	91.5	77.2	15.5	1.5	0.2
	16.5	41.4	23.4	5.1	0.6		53.9	49.1	18.9	0.5	0.1
	12.0	28.9	19.1	1.5	0.5		30.1	32.8	15.7	0.2	0.4
RMS	57.2nT						18.6	33.7	19.0	3.8	0.1
DLR	82.6	96.4	15.0	2.9	0.2		14.2	66.7	16.3	4.5	0.2
	47.0	46.3	14.8	1.4	0.2		11.6	60.0	19.1	5.4	0.3
	27.4	44.6	17.7	5.2	0.4	RMS	43.8nT				
	16.8	33.9	17.1	5.2	0.5	LIV	89.8	86.2	20.5	1.5	0.2
							30.5	74.7	23.3	6.0	0.3
RMS	41.4nT						20.2	68.2	19.0	6.3	0.3
TEO	96.6	37.0	10.9	3.5	0.1		14.6	44.4	23.3	6.0	0.5
	43.1	34.0	12.1	0.9	0.0	RMS	61.6nT				
	28.6	57.6	11.5	5.8	0.2		10.8	30.5	27.0	0.7	0.1
	21.4	20.5	11.3	0.5	0.2						
	11.5	27.0	11.5	5.6	0.4						
RMS	27.2nT										

TABLA 3A

PERIODOS						PERIODOS					
	PER.	AMP.	ERR.	FASE	ERR.		PER.	AMP.	ERR.	FASE	ERR.
	años	nT.	nT.	rad.	rad.		años	nT.	nT.	rad.	rad.
CRP	98.5	23.9	11.4	0.3	0.2	AIA	89.8	90.6	21.0	1.5	0.2
	54.5	64.6	10.8	3.4	0.1		30.3	77.7	23.9	6.0	0.3
	26.3	49.4	9.5	4.8	0.2		20.0	73.6	19.9	6.2	0.3
	13.8	22.7	12.6	4.1	0.1		14.7	48.4	19.1	6.3	0.4
	11.3	24.5	10.5	4.8	0.4		10.8	45.0	27.1	0.7	0.1
RMS	29.5nT					RMS	61.7nT				
FUQ	67.4	93.7	12.3	4.8	0.1	MIR	70.2	228.0	57.1	3.6	0.1
	24.5	37.8	14.7	4.3	0.2		35.8	154.8	59.4	4.2	0.1
	17.5	23.7	14.0	4.5	0.3		24.1	128.7	55.6	5.9	0.4
	14.9	19.1	13.6	0.2	0.5		17.4	99.6	53.9	1.3	0.3
RMS	37.5nT						14.0	123.7	55.8	3.5	0.2
HUA	74.2	68.5	8.6	5.7	0.1	RMS	11.8	116.5	55.7	5.9	0.5
	42.7	36.5	8.8	2.2	0.2		135.2nT				
	22.4	20.8	8.9	4.1	0.1	DRV	72.1	147.5	27.2	4.5	0.1
	14.8	21.5	8.8	4.2	0.1		45.7	52.0	29.9	1.3	0.3
	12.1	25.5	6.7	4.7	0.2		34.4	66.0	28.8	0.3	0.3
RMS	20.6nT						24.0	82.8	32.1	2.4	0.4
PTY	84.0	65.8	7.9	0.0	0.1		17.8	52.6	29.9	4.3	0.2
	41.3	35.2	10.9	2.1	0.3	RMS	11.7	50.1	25.8	2.9	0.5
	22.2	16.0	10.5	4.3	0.2		71.1nT				
	15.1	31.1	8.3	4.7	0.3	SBA	74.2	148.5	35.0	5.0	0.2
	12.4	27.2	11.3	5.6	0.4		36.6	116.6	37.6	0.5	0.1
RMS	25.9nT						24.8	112.3	34.4	2.9	0.3
							18.3	100.3	27.7	4.7	0.3
							14.2	75.6	36.0	5.8	0.5
						RMS	87.2nT				

TABLA 3B

Estos resultados muestran que la banda de 11.0 ± 2 años correspondiente al ciclo de manchas solares se detecto en casi todos los OMP excepto en YRC, FUQ, TRW, PST Y SBA. Por otra parte una onda centrada en 16.0 ± 2 años aparece en gran parte de los OMP y estaría vinculada con la actividad magnética determinada con el índice aa. Una onda de 18.6 ± 0.5 años es detectada en LAS, TRW, ORC y SBA estaría en correspondencia con la onda lunar de periodo similar correspondiente al intervalo de tiempo que posee el nodo ascendente de la Luna. Las ondas mayores de 30 años tendrían origen interno, relacionadas también con posibles fenómenos de inducción tanto en el manto como en el núcleo externo de la Tierra por fuentes de origen externo. Gianibelli y Cabassi (2002)[8] realizaron un análisis sobre la actividad magnética y variaciones en la velocidad de la rotación terrestre utilizando AEME. En este trabajo se presenta una tabla de resultados y la simulación o reconstrucción del índice aa para el intervalo 1844-1995 el cual sigue la marcha del número de manchas solares (Figura 6). La similitud de las bandas de periodos detectados sobre la actividad magnética sugiere una interacción posible entre las variaciones de los sistemas de corrientes residentes en la Magnetosfera e Ionósfera con los medios de muy alta conductividad residentes en el interior terrestre. Los periodos en las bandas de 15.3 y 17.6 años que aparecen en las variaciones quinquenales de los OMP del perfil también están en el estudio del índice aa. De la misma forma se puede apreciar con los periodos a las ondas mayores de 30 años. Este análisis comparativo y discusión aporta un elemento más al entendimiento de la geodinámica del interior terrestre.

La simulación o reconstrucción de la variación de la intensidad total F en cada OMP se realizó mediante el modelo matemático dado por la formula siguiente:

$$\delta F / \delta T = (A + B \cdot T) + \sum C_k \cdot \exp(i\omega_k T + \phi_k), \text{ donde } \omega_k = 2\pi / T_k \quad \text{Ecuación 6}$$

donde C_k es la amplitud, T_k y ϕ_k son el periodo y la fase detectados que se encuentran en la tabla 3A y 3B. Por otra parte el término $A+B \cdot T$ es la tendencia que se quitó previamente.

INDICE aa

PERIODO	AMPLITUD	ERROR	FASE	ERROR
Años	nT	nT	°	°
132,1	2,5	0,3	79,17	4,5
80,3	1,6	0,3	12,91	6,9
45,0	0,7	0,3	338,51	25,1
30,3	1,6	0,3	234,79	2,0
23,5	1,5	0,4	55,37	2,4
21,6	1,4	0,4	50,60	1,8
17,6	0,9	0,3	251,48	10,0
15,3	0,8	0,3	253,84	12,0
12,9	0,9	0,3	78,39	11,5
12,1	1,5	0,3	349,37	10,7
10,9	3,0	0,3	152,68	6,0
10,0	1,0	0,3	194,02	9,9
9,5	0,8	0,3	63,36	7,0

TABLA CON PERIODOS DETECTADOS

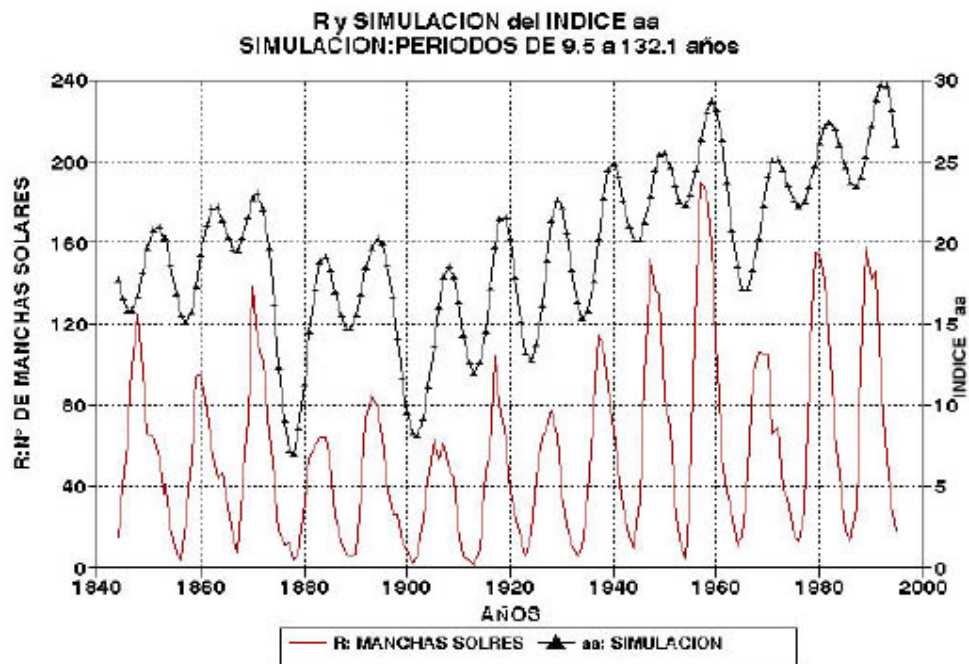


FIGURA 6

Las figuras 7 y 8 muestran la reconstrucción de la variación cada 5 años en el intervalo 1900 – 2010 y la predicción hasta el 2100. Se tienen comportamientos notablemente diferenciados para los OMP entre el Polo Geomagnético Norte y el Ecuador

Geomagnético (RES a HUA) y desde la región adyacente al sur del Ecuador Geomagnético hasta la región del el polo Sur Geomagnético. (PTY a SBA) (Ver Fig. 2).

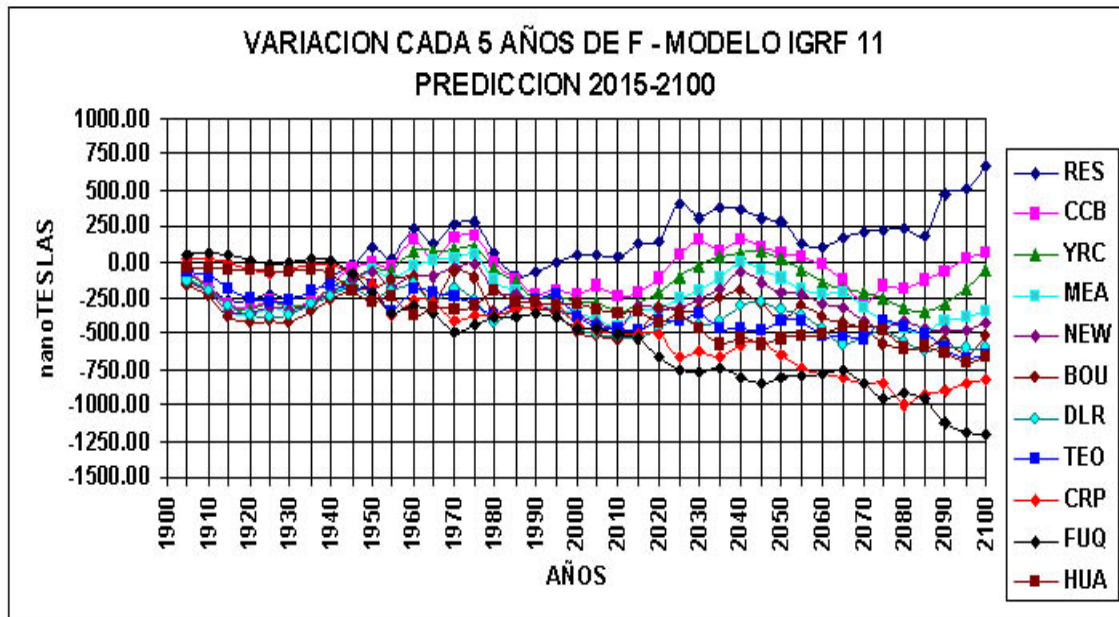


FIGURA 7

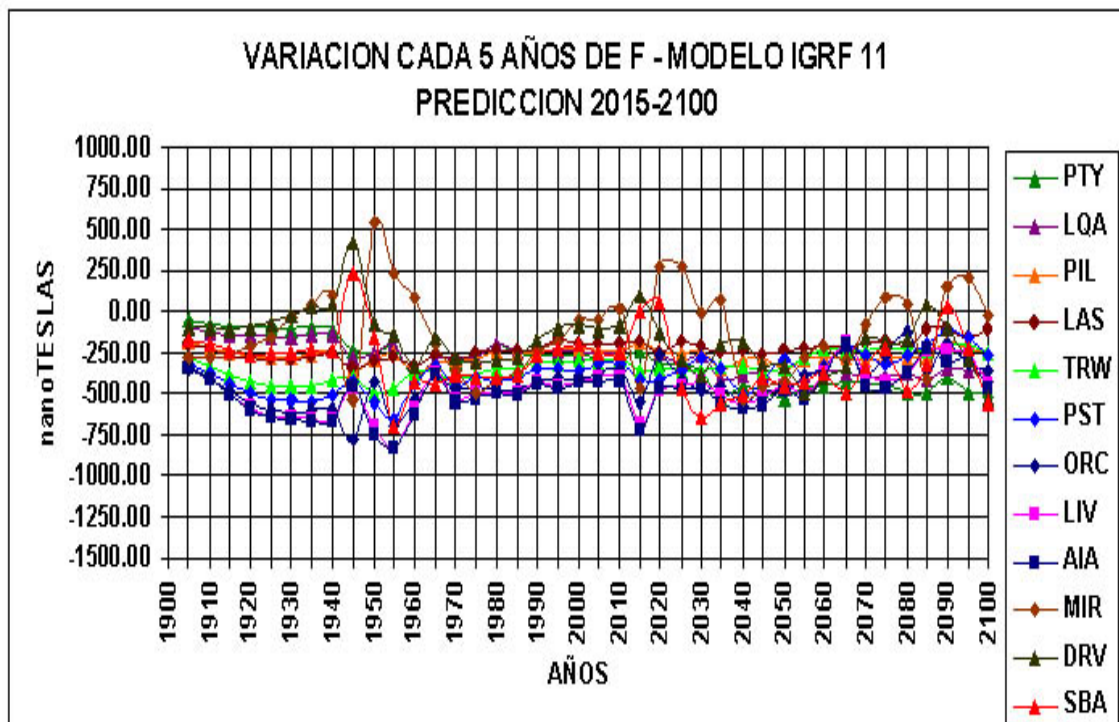


FIGURA 8

Los resultados obtenidos en la predicción para el año 2100 en la Figura 7 muestran que para la región del Polo Geomagnético Norte el OMP de RES tiene cambios positivos importantes desde el año 2020, indicando que el valor de CMT en esa región tendrá valores mayores a los de la actualidad. De la misma manera el OMP de FUQ tiene

valores de variación que llegan a -1200nT en el año 2100. Los valores de F obtenidos para los OMP del perfil y su proyección con el modelo de variación quinquenal se muestran en las Figuras 9, 10 y 11.

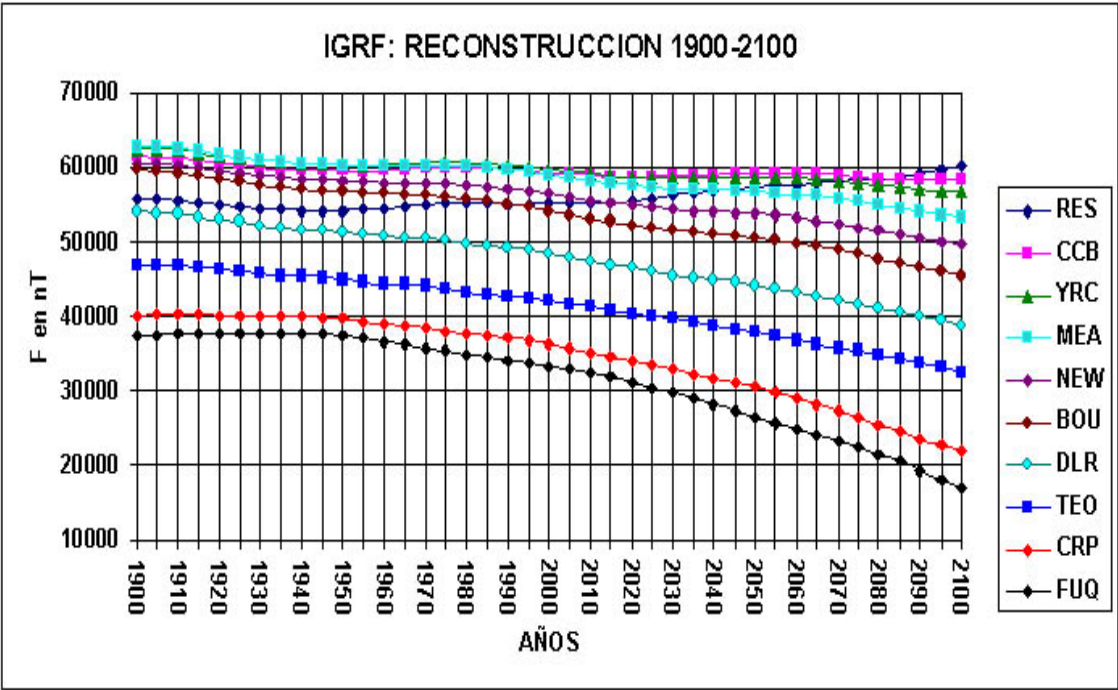


FIGURA 9

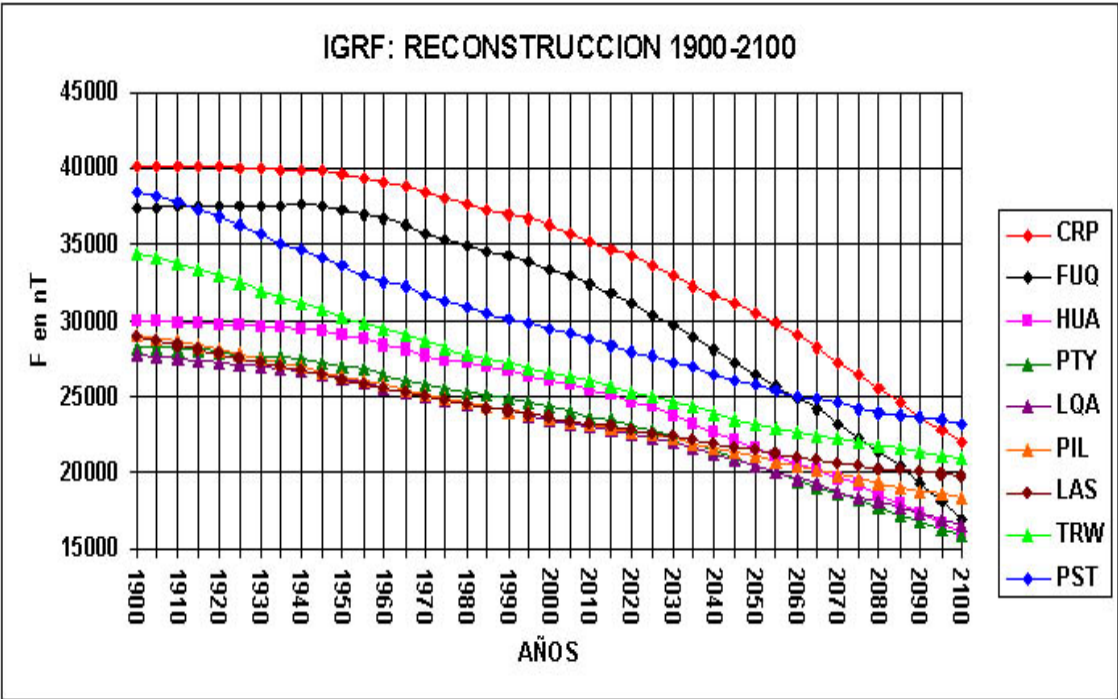


FIGURA 10

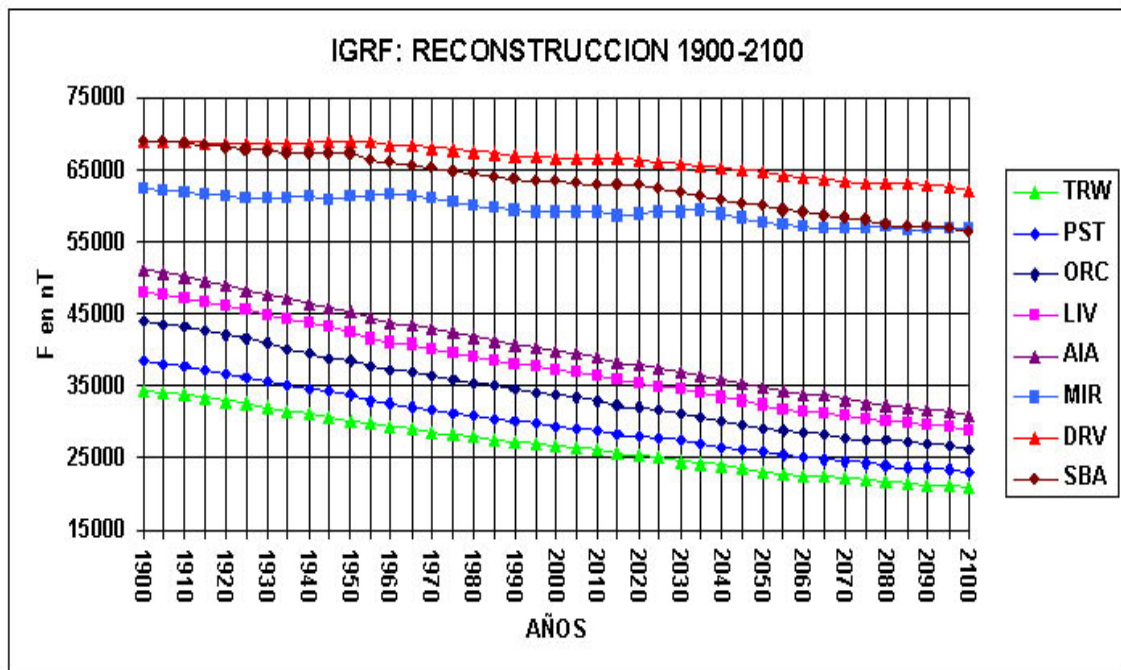


FIGURA 11

Esta reconstrucción y pronóstico esta realizada mediante los valores calculados de $\delta F/\delta T$ utilizando la ecuación 6 mediante el cálculo recurrente siguiente:

$$F(T+5\text{años}) = F(T) + \delta F(T+5\text{años})/\delta T \quad \text{Ecuación 7}$$

La figura 12 muestra la evolución del perfil de OMP para la años 1900, 2000 y 2100.

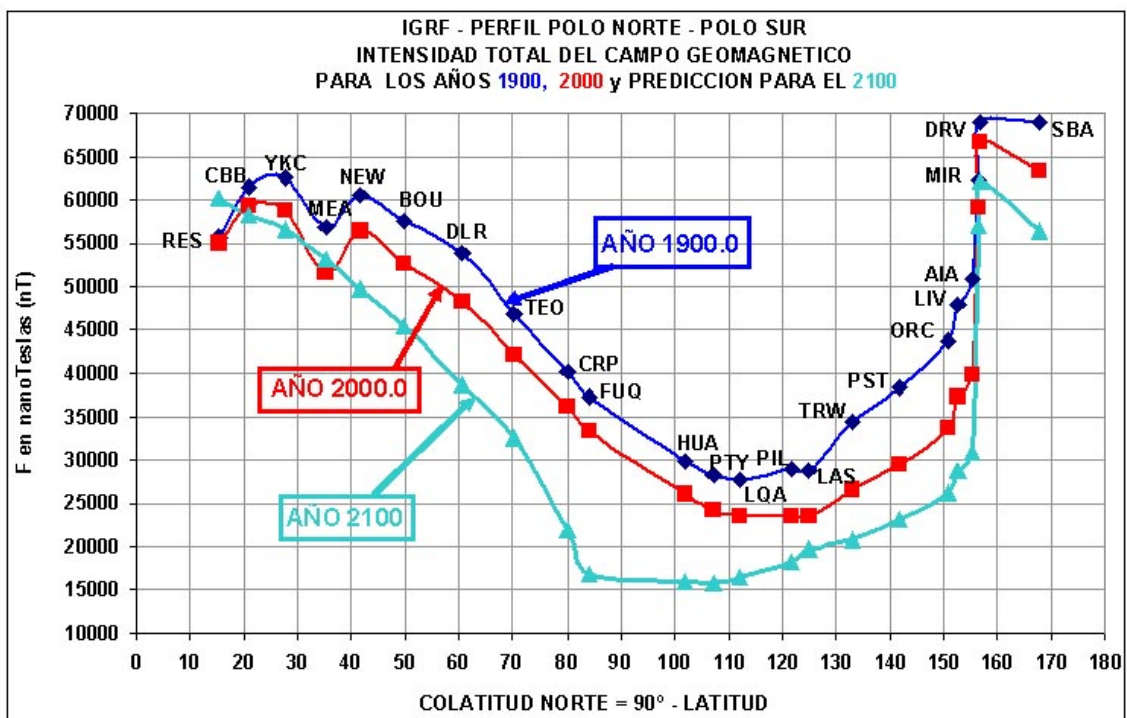


FIGURA 12

Se tiene de la Figura 12 que de la información provista por el modelo del IGRF11 entre los años 1900 y 2000 en los OMP de PIL, LAS, TRW, PST, ORC, LIV, y AIA, los dos primeros casi en el centro de la AMAS y los restantes en el límite sur y fuera de la AMAS, se observan cambios mayores que los determinados en DLR, TEO, CRP, FUQ, HUA, PTY, y LQA. En cambio para el pronóstico del año 2100 en comparación al año 2000, los OMP de LQA, PTY, HUA, FUQ, CRP, TEO y DLR son los que presentan cambios mucho mayores que los esperados si el modelo de variación quinquenal fuera solo lineal.

CONCLUSIONES

El estudio de la variación cada cinco años determinada por el modelo de IGRF11 muestra que existen ondas cuyas fuentes tendrían diferente origen, provenientes de la conexión Sol-Tierra, y otras de la actividad generada en los sistemas de corrientes equivalentes residentes en la Magnetopausa, en la cavidad de la Magnetosfera y en la Ionósfera, como lo muestra el análisis del índice “aa” (Figura 6). En este estudio previo también aparecen largos períodos (de 30 años o más) que estarían relacionados entonces a posibles fenomenologías de inducción, situación - ésta que se contrapone con el paradigma vigente hasta la actualidad en el que se supone que estas ondas de largo período están vinculadas a procesos propios del sistema de difusión del CMT proveniente de una Geodínamo Autosustentada residente en el Núcleo Externo de la Tierra. Los resultados que arroja el modelo IGRF11 corresponden a dicho campo difundido observado y modelado en la superficie de la Tierra y la energía determinada muestra aspectos diferentes de un comportamiento puramente dipolar. Esto queda comprobado con el crecimiento de la AMAS con valores de F que decrecen temporalmente. La AMAS tiene una evolución y movimiento que lo experimentan los OMP por medio de las observaciones absolutas del CMT y que el modelo del IGRF11 también la representa. Un aspecto concluyente es la variación de cambio cada 100 años donde se puede apreciar su expansión y movimiento hacia el observatorio de FUQ como uno de los que tiene mayor tasa de cambio como se muestra en las Figuras 12 y 13.

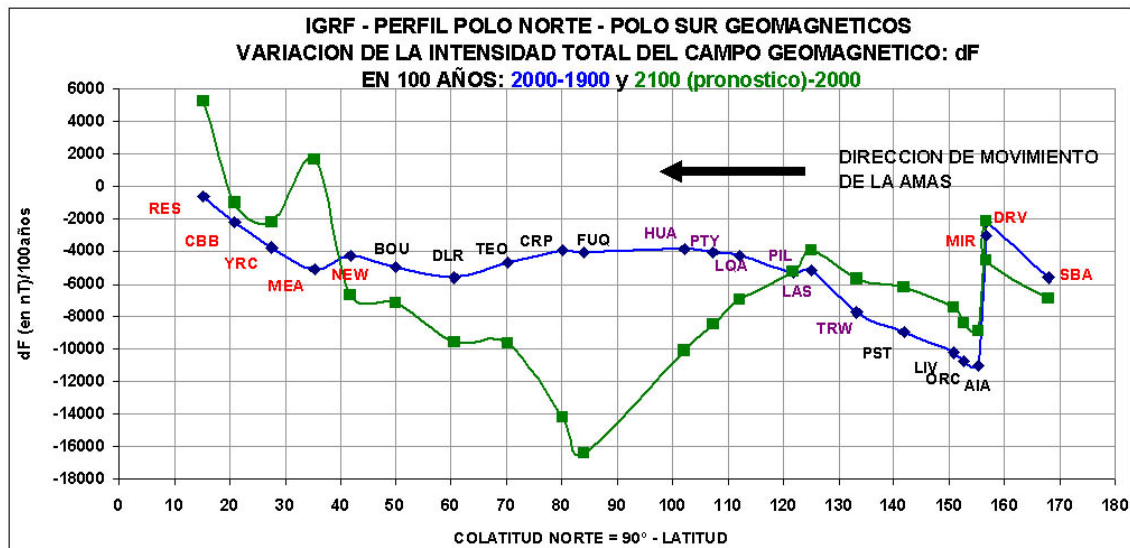


FIGURA 13

Otra variable importante en la conclusión y el análisis de esta situación de cambio lento y continuo, es la aceleración pronosticada, en valor medio, que tendría el CMT desde el año 2000 al 2100 en el proceso de difusión. Como se mencionó en la introducción la energía del campo

dipolar disminuye continuamente mientras que las componentes no bipolares lo hacen aumentando algunas y otras con cambios por intervalos. En este perfil Polo Norte – Polo Sur Geomagnético existen regiones donde hay aceleraciones positivas y otras negativas, donde la disminución de F aparecerá en la superficie de la Tierra con cambios importantes en nT/año en las negativas, mientras que las aceleraciones positivas frenarían la difusión del campo pero en menor intensidad. Esto se muestra en la Figura 14, donde los procesos en los OMP de aceleración es marcada con signo (+) y desaceleración marcada con signo (-), posiblemente debido a las componentes no-dipolares del representado en el desarrollo matemático del modelo IGRF11 por los ordenes mayores que 2.

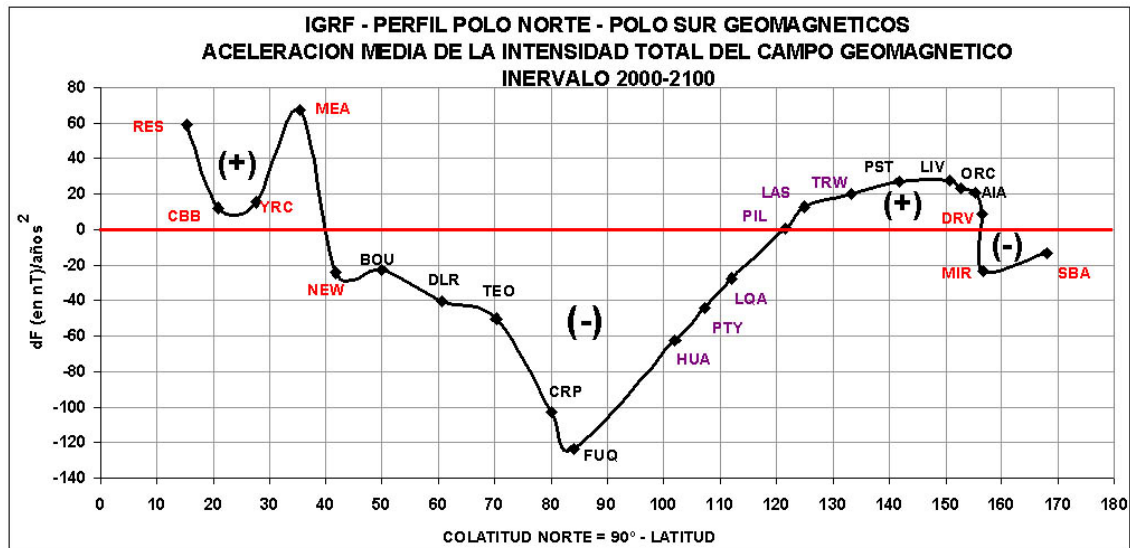


FIGURA 14

La metodología de análisis deja la posibilidad de proponer otros modelos matemáticos y analíticos para el análisis de las observaciones en la superficie terrestre y los resultados de estos modelos.

BIBLIOGRAFIA

- [2] Barraclough, D. R. 1978. Spherical Harmonic Models of the Geomagnetic Field. *Institute of Geological Sciences. Geomagnetic Bulletin* 8. Pp: 1-66.
- [3] Gianibelli J. C. 2006. Predicción Lineal de los Modelos de referencia Geomagnéticos 1900-2005. *Geoacta Vol 31*. Pp. 57-62.
- [8] Gianibelli J. C. y Cabassi I. R. 2002. Rotación Terrestre y Actividad magnética. *VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra. Santiago de Chile, Chile. Actas.*
<http://www.cartografia.cl/download/juliocesar.pdf>
- [1] Langel, R. A. 1987. *Main Field in Geomagnetism*. ED by Jacobs J. A. Academic Press N. Y., VOL I. Pp 249-512.
- [4] [6] Ulrych, T. J. and T. N. Bishop. 1975. Maximun Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol 13 N 1*. Pp: 183-200.
- [5] [7] Wu N., 1977. *The Maximum Entropy Method*. Springer. Pp 1 – 327.