

Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México

J. J. Campos Enríquez*, J. O. Campos Enríquez** y J. Urrutia Fucugauchi**

* *Subdirección de Cartas Básicas, DGG-INEGI;*

** *Depto. de Geomagnetismo y Exploración Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM.*

Recibido: 13 de noviembre, 1990; aceptado: 13 de mayo, 1991.

RESUMEN

Se presentan cartas sintéticas de los elementos del campo magnético en el territorio nacional, elaboradas con base en el Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF). Las cartas incluyen inclinación, declinación e intensidades vertical, horizontal y total, así como sus variaciones seculares correspondientes. Se hace también una presentación breve de los conceptos matemáticos en que está fundamentado el IGRF y de sus aplicaciones en geofísica (exploración, geodinámica y geomagnetismo). Se dispone de datos observacionales de las variaciones temporales del campo geomagnético del Observatorio Magnético de Teoloyucan para el período de 1923 a 1987. Estos datos permiten analizar la variación secular de período corto en la porción central de México y evaluar el ajuste de los parámetros del IGRF en una región extensa con poca contribución al análisis global de armónicos esféricos. En el período analizado, la intensidad total ha decrecido con una tasa aproximada (regresión lineal) de 48.07 nT por año y la dirección ha variado de este a oeste y hacia inclinaciones más altas. La comparación de los datos del Observatorio con los estimados del IGRF para el período 1945-1990 muestra que el modelo global provee una estimación adecuada para esta región. Esta correlación indica además la ausencia de anomalías significativas de variación secular en la porción central de México en las últimas décadas. Los datos correspondientes del Observatorio Magnético de Teoloyucan demuestran que el IGRF proporciona una excelente representación del campo geomagnético en la parte central de México.

PALABRAS CLAVE: geomagnetismo, variación secular, Campo Magnético Internacional de Referencia, México.

ABSTRACT

We present a series of synthetic maps of the elements of the geomagnetic field in Mexico prepared from the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) values. The synthetic maps include inclination, declination, vertical, horizontal and total intensities and their corresponding secular variations. Observational data of temporal variations of the geomagnetic field for central Mexico (Magnetic Observatory of Teoloyucan) are analyzed for 1923 to 1987. Total intensity has decreased at a rate of 48.07 nT per year and the direction has been shifting from east to west and towards higher inclinations. Comparisons of the Observatory data with IGRF-derived values for the period 1945-1990 suggest that IGRF provides an excellent estimation of geomagnetic parameters in this low latitude region. The good fit of IGRF to observed variations of geomagnetic parameters indicates an absence of significant anomalies of the geomagnetic secular variation in central Mexico.

KEY WORDS: geomagnetism, secular variation, International Geomagnetic Reference Field, Mexico.

INTRODUCCION

Como parte de un proyecto de cooperación entre el Instituto de Geofísica, UNAM (Departamento de Geomagnetismo y Exploración Geofísica) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI-DGG) se han elaborado cartas sintéticas de las variaciones espacio-temporales del campo magnético estimadas a partir del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF). Considerando la utilidad potencial de esta información (Campos Enríquez y Campos Enríquez, 1986) para los diversos grupos que realizan estudios sobre exploración magnetométrica, geomagnetismo y geodinámica, se presenta este reporte. Sólo se dispone de datos observacionales sobre las variaciones temporales del campo geomagnético en el país en forma incompleta para el centro de México, a partir de los registros del Observatorio Magnético de Teoloyucan (Instituto de Geofísica, UNAM). La ausencia de observaciones geomagnéticas disponibles para la mayor

parte de México constituye una de las justificaciones que motivaron el inicio de este proyecto de cooperación UNAM-INEGI. Por otro lado, existen varios proyectos de investigación sobre exploración geofísica, análisis regional de aeromagnetometría relacionado con estudios corticales y geodinámicos, elaboración de la carta de anomalías magnéticas para México, correlaciones con los datos de MAGSAT y sobre geomagnetismo (variación secular, modelos del geodínamo, etcétera), en los cuales se requiere la determinación de las variaciones espacio-temporales del IGRF en México.

CAMPO GEOMAGNETICO INTERNACIONAL DE REFERENCIA (IGRF)

El campo magnético es la suma de 1) el campo magnético "principal", 2) el campo de anomalías y, 3) de variaciones pseudoperiódicas y transitorias. El campo magnético "principal" constituye aproximadamente el 99% del campo geomagnético. Su origen se encuentra en el

interior del planeta, particularmente en el núcleo externo líquido. El origen del campo de anomalías se encuentra en la corteza terrestre. Está relacionado principalmente con la distribución de minerales ferromagnéticos. Las variaciones tanto periódicas como transitorias son originadas directa o indirectamente por corrientes eléctricas en la ionosfera, inducidas por la actividad solar.

El campo magnético "principal" ha sido objeto de numerosos estudios. Desde que Gauss (1839) obtuvo la primera representación analítica del campo magnético "principal" basada en un desarrollo en funciones armónicas esféricas, se han preparado otros modelos matemáticos del campo magnético. Gauss basó su modelo en datos referentes a 84 puntos situados sobre 12 meridianos y 7 paralelos equidistantes. Los modelos actuales toman en cuenta observaciones por tierra, mar y aire de millones de puntos, además de la información acumulada por los observatorios magnéticos y las observaciones efectuadas desde satélites a diferentes alturas (POGO2, POGO4, POGO6, Cosmos 49, MAGSAT, etcétera).

Los estudiosos del geomagnetismo, agrupados en la Asociación Internacional de Aeronomía y Geomagnetismo (IAGA), decidieron en 1960 proponer un modelo que sería adoptado por la comunidad científica internacional y que sería llamado IGRF (International Geomagnetic Reference Field).

El IGRF es una serie de modelos matemáticos del campo geomagnético principal y de su variación secular; los modelos consisten en un conjunto de coeficientes esféricos armónicos. Se muestran detalles de la derivación del IGRF original en Zmuda (1971). En Peddie (1982) y en Barraclough (1987, 1988) se describen desarrollos posteriores. La necesidad de un campo de referencia para estudios del campo principal, separación del campo de anomalías superficiales y los campos regionales en estudios de corrientes ionosféricas y magnetosféricas ha sido el principal motivo del desarrollo del modelo.

La IAGA escogió en 1968 el IGRF para 1965, cuyo período de validez estricta estaría comprendido entre 1965 y 1967. Desde esta fecha el IGRF ha sido revisado cuatro veces (IGRF 1975, 1980 y 1985). El IGRF de la quinta generación (1985) consiste en: 1) 8 modelos IGRF que cubren el intervalo de 1945 a 1980, designados como definitivos del IGRF (DGRF 1945, DGRF 1950, DGRF 1955, DGRF 1960, DGRF 1965, DGRF 1970, DGRF 1975, DGRF 1980), 2) un IGRF para el intervalo 1985.0 a 1990.0 (IGRF 1985), 3) un IGRF provisional (PGRF 1980) definido mediante interpolación lineal entre los coeficientes del DGRF 1980 y el IGRF 1985. Los coeficientes del desarrollo en funciones esféricas armónicas para cada uno de los constituyentes del IGRF se muestran en la Tabla 1. Los nueve modelos del campo principal tienen 120 coeficientes cada uno, extendiéndose hasta el grado y orden 10. El modelo de la variación secular tiene 80 coeficientes y cubre hasta el grado y orden 8.

CARTAS SINTÉTICAS, DATOS DEL OBSERVATORIO GEOMAGNETICO DE TEOLUYUCAN Y EL IGRF

El Departamento de Geomagnetismo y Exploración Geofísica del Instituto de Geofísica viene desarrollando actividades de exploración, estudios de paleomagnetismo y de geomagnetismo. Uno de los estudios actualmente en progreso es el análisis de los datos aeromagnéticos y magnéticos terrestres regionales de diversas partes del país (por ejemplo, Campos-Enríquez *et al.*, 1990; Alva-Valdivia *et al.*, 1991; Alvarez Sánchez y Urrutia Fucugauchi, en revisión). En diferentes etapas del procesamiento de los datos se requiere emplear información sobre la variación secular del campo geomagnético y sobre el campo geomagnético principal. Otro de los estudios en que se requiere esta información es el relacionado con el análisis de las observaciones geomagnéticas realizadas en diferentes localidades del país (por ejemplo, el Observatorio Magnético de Teoloyucan; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 1986; Godínez Luna, 1990). Como parte de estos estudios, se lleva a cabo una revisión detallada para cuantificar las divergencias existentes entre el IGRF y los datos de observatorios magnéticos (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, en preparación). En las figuras 1 y 2 se presenta, para el período comprendido entre 1923 y 1987 la variación secular observada en la inclinación, declinación e intensidad total del campo geomagnético. Nótese la ausencia de datos para el período 1980-1985.

La dirección del campo geomagnético varió hacia el oeste y hacia inclinaciones más altas, desde valores de declinación de $9^{\circ} 13.4'$ y de inclinación de $46^{\circ} 29'$ en 1923 hasta valores de declinación de $7^{\circ} 22.9'$ y de inclinación de $47^{\circ} 26.8'$ (figura 1). En el período temprano (aproximadamente de 1923 a 1938-1942) la variación secular fue predominantemente en inclinación. Posteriormente, la variación secular se ha manifestado principalmente (hasta aproximadamente 1977) en cambios de declinación (figura 1). En el período 1923 a 1987 la intensidad media anual ha estado disminuyendo, de un valor de 46 076 nT en 1923 hasta 42 832 nT en 1987 (figura 2a). El decremento es de 3 244 nT, correspondiente a una tasa de disminución aproximada de 48.09 nT/año (estimado a partir de una regresión lineal a los datos (figura 2b)). En las figuras 3 y 4 se incluyen ejemplos de la variación de intensidad total, declinación e inclinación durante un año (para 1977 y 1987, respectivamente), en promedios mensuales de estos elementos del campo geomagnético (Godínez Luna, 1987, 1990).

Las cartas sintéticas de los elementos del campo magnético principal para México se incluyen en los planos 1 a 5. En estos se incluyen: intensidad total (Plano 1), declinación (Plano 2), inclinación (Plano 3), variación anual de la declinación (Plano 4) y variación anual de la inclinación (Plano 5). La escala de las cartas es de 1:4 000 000, y están basadas en el IGRF 1985 (Barraclough, 1981). Como se comentó anteriormente (figuras 1 y 2), para este período no están aún disponibles las observaciones magnéticas respec-

IGRF Revision 1987

Table 1. The International Geomagnetic Reference Field—fifth generation. Spherical harmonic coefficients of the 9 main-field models, in nT, and of the predictive secular-variation model (SV) for 1985–90, in nT yr⁻¹.

	<i>m</i>	<i>n</i>	DGRF						IGRF			
			1945	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	SV
g	0	1	-30594	-30554	-30500	-30421	-30334	-30220	-30100	-29992	-29877	23.2
g	1	1	-2285	-2250	-2215	-2169	-2119	-2068	-2013	-1956	-1903	10.0
h	1	1	5810	5815	5820	5791	5776	5737	5675	5604	5497	-24.5
g	0	2	-1244	-1341	-1440	-1555	-1662	-1781	-1902	-1997	-2073	-13.7
g	1	2	2990	2998	3003	3002	2997	3000	3010	3027	3045	3.4
h	1	2	-1702	-1810	-1898	-1967	-2016	-2047	-2067	-2129	-2191	-11.5
g	2	2	1578	1576	1581	1590	1594	1611	1632	1663	1691	7.0
h	2	2	477	381	291	206	114	25	-68	-200	-309	-20.2
g	0	3	1282	1297	1302	1302	1297	1287	1276	1281	1300	5.1
g	1	3	-1834	-1889	-1944	-1992	-2038	-2091	-2144	-2180	-2208	-4.6
h	1	3	-499	-476	-462	-414	-404	-366	-333	-336	-312	5.3
g	2	3	1255	1274	1288	1289	1292	1278	1260	1251	1244	-0.6
h	2	3	186	206	216	224	240	251	262	271	284	2.3
g	3	3	913	896	882	878	856	838	830	833	835	0.1
h	3	3	-11	-46	-83	-130	-165	-196	-223	-252	-296	-10.8
g	0	4	944	954	958	957	957	952	946	938	937	0.1
g	1	4	776	792	796	800	804	800	791	782	780	-0.6
h	1	4	144	136	133	135	148	167	191	212	233	3.8
g	2	4	544	528	510	504	479	461	438	398	363	-7.8
h	2	4	-276	-278	-274	-278	-269	-266	-265	-257	-250	2.2
g	3	4	-421	-408	-397	-394	-390	-395	-405	-419	-426	-1.4
h	3	4	-55	-37	-23	3	13	26	39	53	68	2.5
g	4	4	304	303	290	269	252	234	216	199	169	-6.8
h	4	4	-178	-210	-230	-255	-269	-279	-288	-297	-298	0.9
g	0	5	-253	-240	-229	-222	-219	-216	-218	-218	-215	1.3
g	1	5	346	349	360	362	358	359	356	357	356	0.1
h	1	5	-12	3	15	16	19	26	31	46	47	0.1
g	2	5	194	211	230	242	254	262	264	261	253	-1.5
h	2	5	95	103	110	125	128	139	148	150	148	-0.2
g	3	5	-20	-20	-23	-26	-31	-42	-59	-74	-94	-3.2
h	3	5	-67	-87	-98	-117	-126	-139	-152	-151	-155	-0.1
g	4	5	-142	-147	-152	-156	-157	-160	-159	-162	-161	0.1
h	4	5	-119	-122	-121	-114	-97	-91	-83	-78	-75	0.6
g	5	5	-82	-76	-69	-63	-62	-56	-49	-48	-48	-0.1
h	5	5	82	80	78	81	81	83	88	92	95	0.0
g	0	6	59	54	47	46	45	43	45	48	52	1.4
g	1	6	57	57	57	58	61	64	66	66	65	-0.3
h	1	6	6	-1	-9	-10	-11	-12	-13	-15	-16	-0.4
g	2	6	6	4	3	1	8	15	28	42	50	1.7
h	2	6	100	99	96	99	100	100	99	93	90	-1.1
g	3	6	-246	-247	-247	-237	-228	-212	-198	-192	-186	0.6
h	3	6	16	33	48	60	68	72	75	71	69	-0.8
g	4	6	-25	-16	-8	-1	4	2	1	4	4	0.0
h	4	6	-9	12	-16	-20	-32	-37	-41	-43	-50	-2.3
g	5	6	21	12	7	-2	1	3	6	14	17	0.9
h	5	6	-16	-12	-12	-11	-8	-6	-4	-2	-4	-0.5
g	6	6	-104	-105	-107	-113	-111	-112	-111	-108	-102	1.2
h	6	6	-39	-30	-24	-17	-7	1	11	17	20	-0.1
g	0	7	70	65	65	67	75	72	71	72	75	0.2
g	1	7	-40	-55	-56	-56	-57	-57	-56	-59	-61	-0.6
h	1	7	-45	-35	-50	-55	-61	-70	-77	-82	-82	0.2
g	2	7	0	2	2	5	4	1	1	2	2	-0.5
h	2	7	-18	-17	-24	-28	-27	-27	-26	-27	-26	1.0
g	3	7	0	1	10	15	13	14	16	21	24	0.8
h	3	7	2	0	-4	-6	-2	-4	-5	-5	-1	1.1
g	4	7	-29	-40	-32	-32	-26	-22	-14	-12	-6	1.0
h	4	7	6	10	8	7	6	8	10	16	23	1.9
g	5	7	-10	-7	-11	-7	-6	-2	0	1	4	0.4
h	5	7	28	36	28	23	26	23	22	18	17	0.3

Table 1. (Continued)

		DGRF								IGRF	
<i>m</i>	<i>n</i>	1945	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	SV
g	6 7	15	5	9	17	13	13	12	11	9	-0.5
h	6 7	-17	-18	-20	-18	-23	-23	-23	-23	-21	0.2
g	7 7	29	19	18	8	1	-2	-5	-2	0	-0.1
h	7 7	-22	-16	-18	-17	-12	-11	-12	-10	-6	0.9
g	0 8	13	22	11	15	13	14	14	18	21	0.7
g	1 8	7	15	9	6	5	6	6	6	6	0.0
h	1 8	12	5	10	11	7	7	6	7	7	0.1
g	2 8	-8	-4	-6	-4	-4	-2	-1	0	0	0.3
h	2 8	-21	-22	-15	-14	-12	-15	-16	-18	-21	-1.0
g	3 8	-5	-1	-14	-11	-14	-13	-12	-11	-11	0.4
h	3 8	-12	0	5	7	9	6	4	4	5	0.1
g	4 8	9	11	6	2	0	-3	-8	-7	-9	-0.3
h	4 8	-7	-21	-23	-18	-16	-17	-19	-22	-25	-0.8
g	5 8	7	15	10	10	8	5	4	4	2	-0.3
h	5 8	2	-8	3	4	4	6	6	9	11	0.2
g	6 8	-10	-13	-7	-5	-1	0	0	3	4	0.1
h	6 8	18	17	23	23	24	21	18	16	12	-0.8
g	7 8	7	5	6	10	11	11	10	6	4	-0.5
h	7 8	3	-4	-4	1	-3	-6	-10	-13	-16	-0.1
g	8 8	2	-1	9	8	4	3	1	-1	-6	-0.8
h	8 8	-11	-17	-13	-20	-17	-16	-17	-15	-10	1.3
g	0 9	5	3	4	4	8	8	7	5	5	
g	1 9	-21	-7	9	6	10	10	10	10	10	
h	1 9	-27	-24	-11	-18	-22	-21	-21	-21	-21	
g	2 9	1	-1	-4	0	2	2	2	1	1	
h	2 9	17	19	12	12	15	16	16	16	16	
g	3 9	-11	-25	-5	-9	-13	-12	-12	-12	-12	
h	3 9	29	12	7	2	7	6	7	9	9	
g	4 9	3	10	2	1	10	10	10	9	9	
h	4 9	-9	2	6	0	-4	-4	-4	-5	-5	
g	5 9	16	5	4	4	-1	-1	-1	-3	-3	
h	5 9	4	2	-2	-3	-5	-5	-5	-6	-6	
g	6 9	-3	-5	1	-1	-1	0	-1	-1	-1	
h	6 9	9	8	10	9	10	10	10	9	9	
g	7 9	-4	-2	2	-2	5	3	4	7	7	
h	7 9	6	8	7	8	10	11	11	10	10	
g	8 9	-3	3	2	3	1	1	1	2	2	
h	8 9	1	-11	-6	0	-4	-2	-3	-6	-6	
g	9 9	-4	8	5	-1	-2	-1	-2	-5	-5	
h	9 9	8	-7	5	5	1	1	1	2	2	
g	0 10	-3	-8	-3	1	-2	-3	-3	-4	-4	
g	1 10	11	4	-5	-3	-3	-3	-3	-4	-4	
h	1 10	5	13	-4	4	2	1	1	1	1	
g	2 10	1	-1	-1	4	2	2	2	2	2	
h	2 10	1	-2	0	1	1	1	1	0	0	
g	3 10	2	13	2	0	-5	-5	-5	-5	-5	
h	3 10	-20	-10	-8	0	2	3	3	3	3	
g	4 10	-5	-4	-3	-1	-2	-1	-2	-2	-2	
h	4 10	-1	2	-2	2	6	4	4	6	6	
g	5 10	-1	4	7	4	4	6	5	5	5	
h	5 10	-6	-3	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4	
g	6 10	8	12	4	6	4	4	4	3	3	
h	6 10	6	6	1	1	0	0	-1	0	0	
g	7 10	-1	3	-2	1	0	1	1	1	1	
h	7 10	-4	-3	-3	-1	-2	-1	-1	-1	-1	
g	8 10	-3	2	6	-1	2	0	0	2	2	
h	8 10	-2	6	7	6	3	3	3	4	4	
g	9 10	5	10	-2	2	2	3	3	3	3	
h	9 10	0	11	-1	0	0	1	1	0	0	
g	10 10	-2	3	0	0	0	-1	-1	0	0	
h	10 10	-2	8	-3	-7	-6	-4	-5	-6	-6	

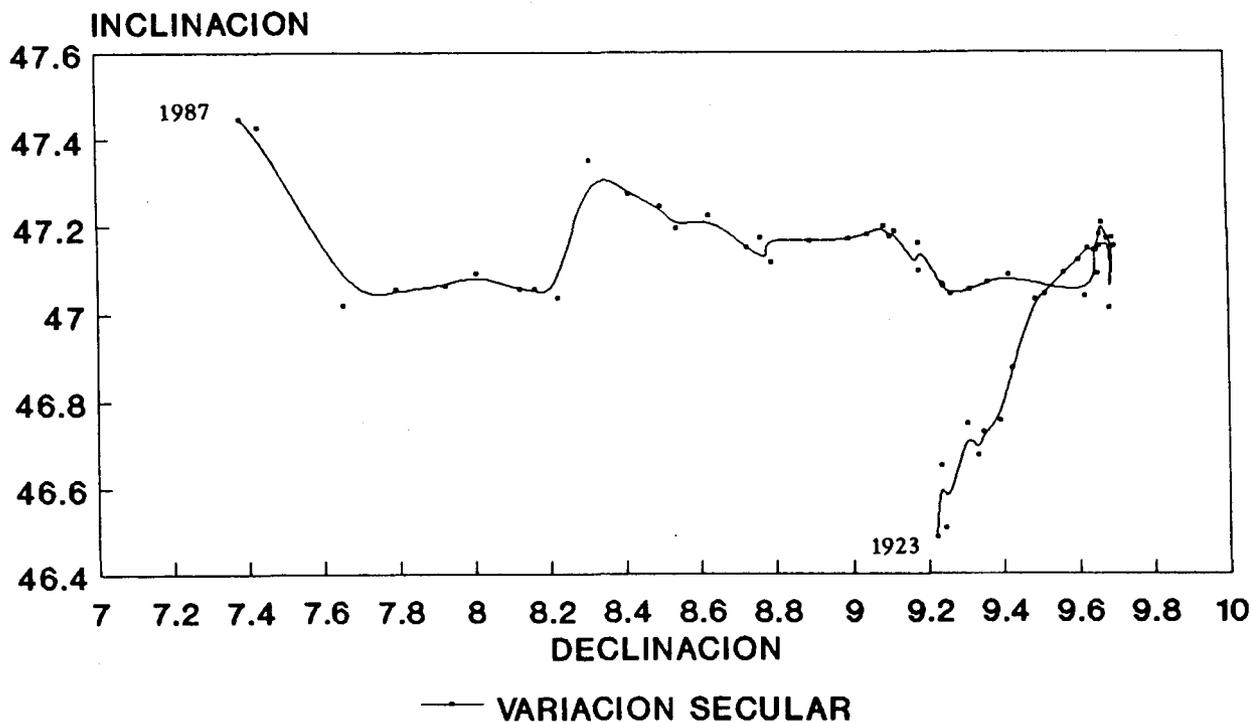


Fig. 1. Variación secular 1920-1990. Observatorio Geomagnético de Teoloyucan.

tivas del Observatorio Magnético de Teoloyucan. También es posible proporcionar esta información de una manera más detallada (mediante tablas) para cualquier área de interés y referida a cualquier época comprendida entre 1945 y 1990. (Mapas anexos en la contrapasta posterior.)

Se ha realizado una comparación de los valores de los distintos elementos del campo geomagnético basados en el IGRF y de los valores de los respectivos elementos registrados en el Observatorio Magnético de Teoloyucan durante el período de 1945 a 1990. Se pudo observar que los valores de 1) declinación (figura 5), 2) inclinación (figura 6), y 3) intensidad total (figura 7) basados en el IGRF son muy similares a los datos respectivos del observatorio. Esto significa que el IGRF constituye una excelente representación de los elementos del campo geomagnético principal en México. El resultado de esta comparación no es trivial si se tiene en cuenta que la información registrada en el Observatorio Magnético de Teoloyucan no ha sido utilizada en la elaboración de los diferentes modelos del IGRF. Otros lugares donde se ha podido comparar la representatividad del IGRF son: 1) Pathé (Estado de Hidalgo) y 2) Los Azufres (Estado de Michoacán). En estos lugares, en el contexto de estudios magnetométricos, se han medido las variaciones del campo magnético en 1982 durante 8 meses, y en 1988 durante 3 meses, respectivamente. El IGRF proporciona en cada caso valores muy similares a los respectivos valores promedio del campo magnético en dichas localidades y épocas (Campos-Enríquez, 1982; Campos-Enríquez y Herrera-Barrientos, 1988).

APLICACIONES

El conocimiento del campo magnético "principal" (de cualquiera de sus elementos: componente total, componentes vertical y horizontal, inclinación y declinación), así como de su variación secular, es muy importante en las ciencias de la Tierra (exploración geofísica, geomagnetismo) y en las ciencias del espacio (estudios de la ionosfera y magnetosfera, física de la radiación cósmica, etcétera), así como en la navegación aérea y marítima.

Recientemente, la elaboración de la carta de anomalías magnéticas para Norteamérica (Canadá, Estados Unidos y México) ha enfatizado la necesidad de contar con información detallada sobre las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético. Hasta esta fecha se ha reportado ya la carta de anomalías magnéticas para Estados Unidos y Canadá (Hinze y Zietz, 1985; Hinze *et al.*, 1988). La publicación de esta información ha generado un número cada vez mayor de investigaciones sobre diversos aspectos de geodinámica, estructura cortical y exploración geofísica (por ejemplo Arkani-Hamed y Urquhart, 1990; Arkani-Hamed y Hinze, en prensa), además de permitir investigaciones sobre geomagnetismo y estudios de mediciones a partir de satélites (MAGSAT, etcétera, por ejemplo, estudios en la porción continental de Estados Unidos por Schnetzler *et al.*, 1985).

Dada la relevancia que en particular tienen para nuestra economía, abundaremos un poco más en detalles de sus aplicaciones en la exploración geofísica.

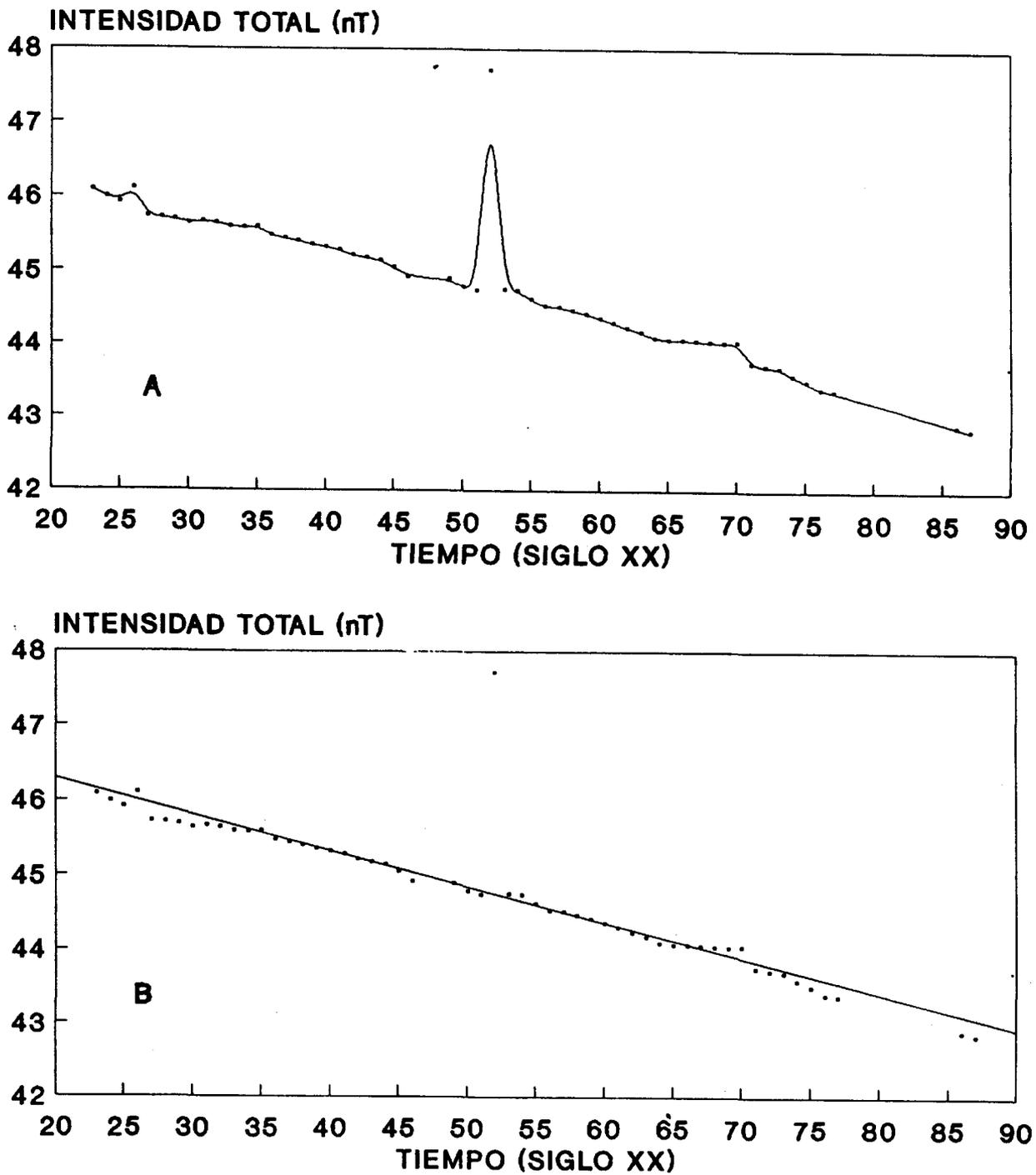


Fig. 2. - a) Variación secular de la intensidad total del campo geomagnético en el Observatorio Magnético de Teoloyucan.
b) Análisis de regresión lineal de los datos de la variación secular de la intensidad total del campo geomagnético en el Observatorio Magnético de Teoloyucan.

El análisis del campo magnético terrestre aporta información útil sobre la estructura de la corteza terrestre. Esto explica que el método geofísico de exploración conocido como magnetometría sea ampliamente utilizado en la exploración de energéticos, materias primas y materiales estratégicos (yacimientos de hidrocarburos; reservorios geotérmicos, uranio y otros minerales), así como en estu-

dios previos a la construcción de grandes obras de ingeniería civil (presas, centrales nucleoelectricas, puentes, etcétera).

En los estudios de magnetometría (terrestre, marina, aeroportada), el geofísico busca aislar de sus observaciones el efecto debido a fuentes localizadas en la corteza terrestre.

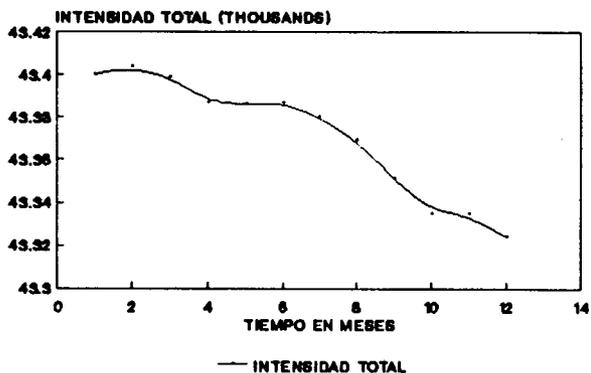
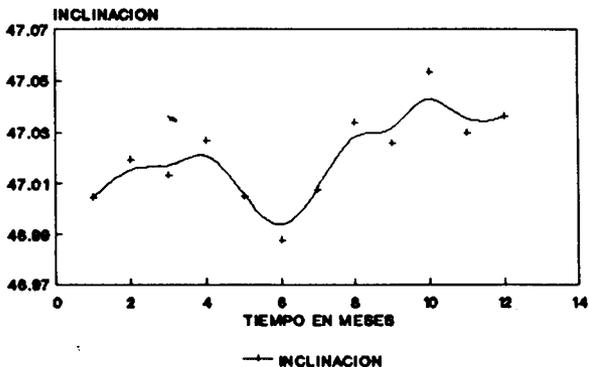
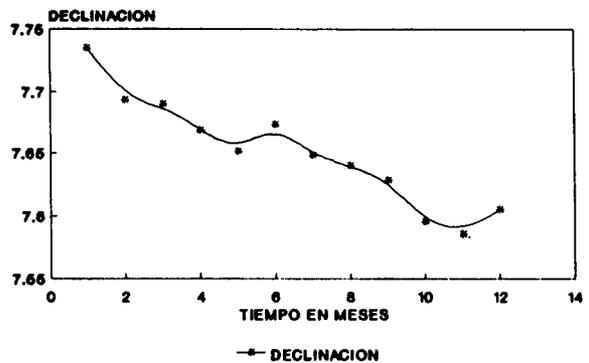


Fig. 3. Observatorio Geomagnético de Teoloyucan. Variación mensual para 1977: a) declinación, b) inclinación, c) intensidad total.

Esto se logra 1) eliminando los efectos de las variaciones pseudoperiódicas y transitorias mediante técnicas especiales de observación; 2) sustrayendo el campo, cuyo origen se encuentra en el núcleo fluido del planeta: el campo geomagnético "principal".

La última tarea venía realizándose mediante la aplicación de técnicas basadas, por ejemplo, en el método de mínimos cuadrados. *A priori*, se suponía que el campo magnético "principal" podía ser representado aproximadamente por superficies polinomiales de bajo grado (debido a su carácter relativamente suave) y con el resultado del ajuste

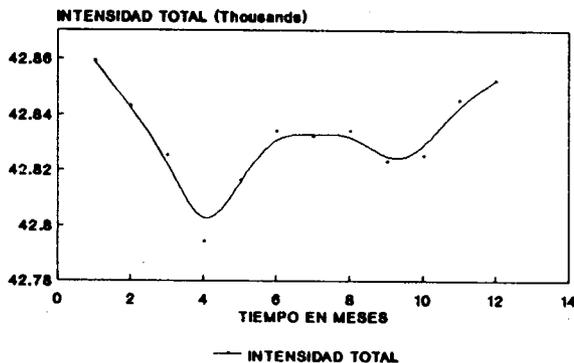
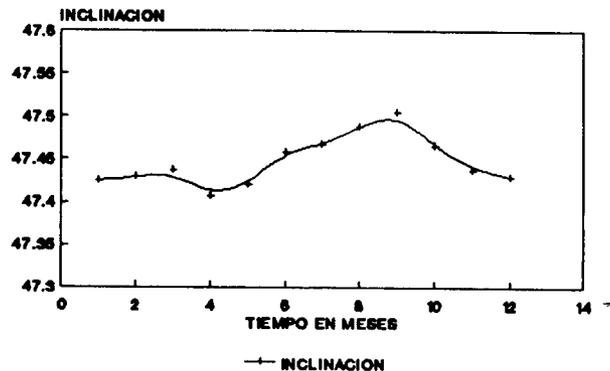
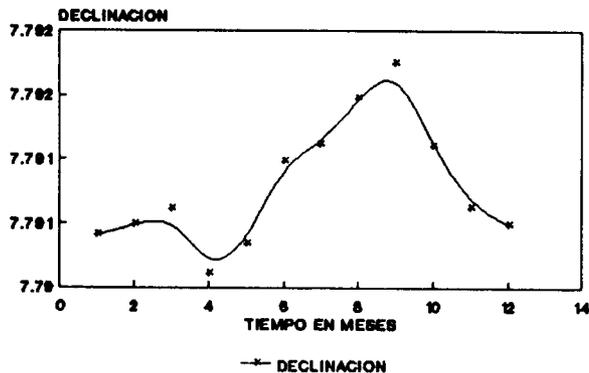


Fig. 4. Observatorio Geomagnético de Teoloyucan. Variación mensual para 1987: a) declinación, b) inclinación, c) intensidad total.

polinomial se podía efectuar esta separación. El gran inconveniente de esta técnica reside, además de la poca precisión inherente, en la dificultad para integrar estudios alcañados, cuando las observaciones respectivas fueron efectuadas en épocas distintas.

El IGRF como sistema internacional de referencia permite tomar en cuenta la variación secular y se constituye como el ente cuantitativo adecuado para integrar estudios efectuados a nivel nacional, por ejemplo, en diferentes épocas y a diferentes alturas sobre el nivel del mar.

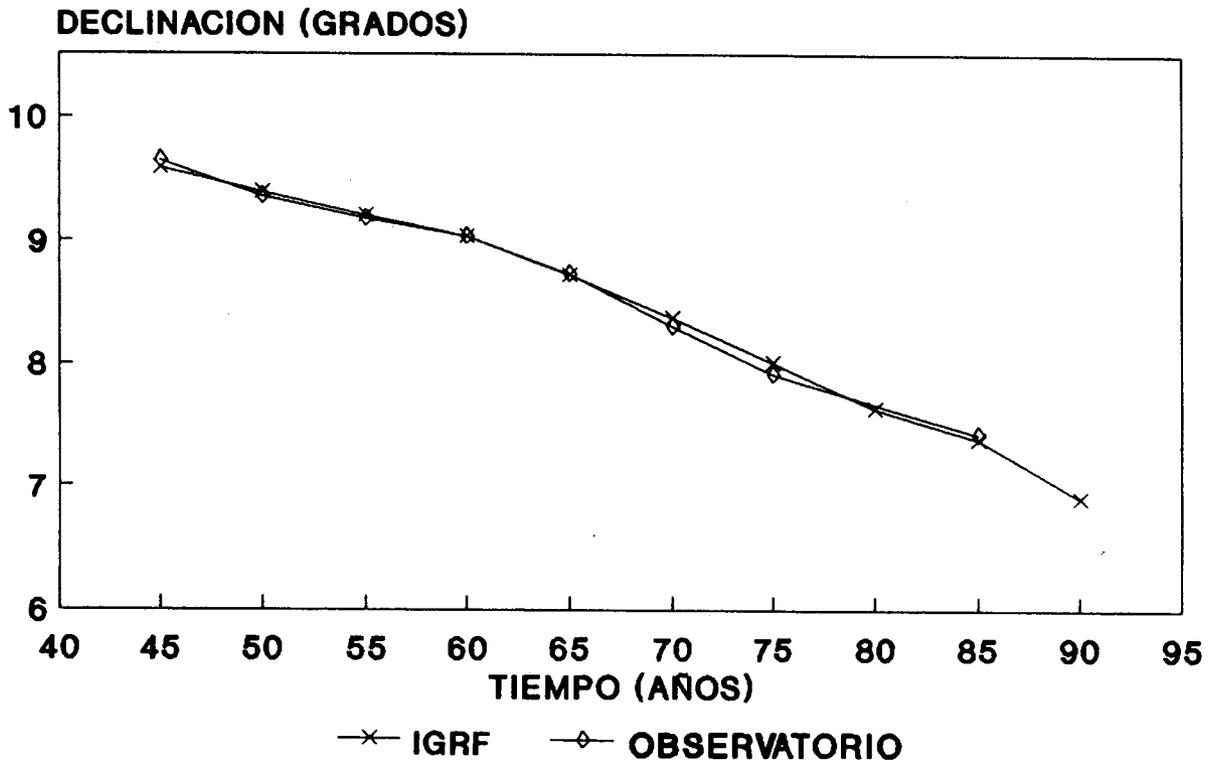


Fig. 5. Comparación de valores de la declinación, de acuerdo con el IGRF, y de los promedios anuales de los respectivos valores del Observatorio Magnético de Teoloyucan para el período 1923 a 1987.

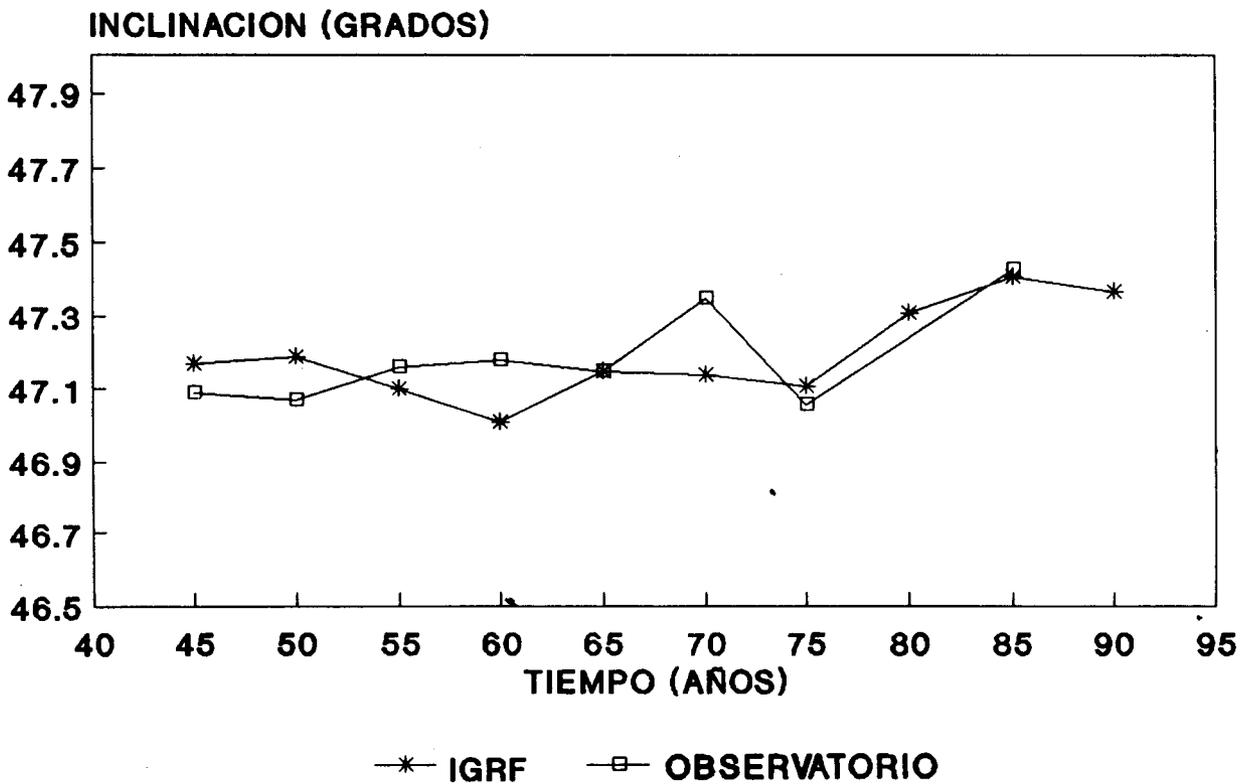


Fig. 6. Comparación de valores de la inclinación, de acuerdo con el IGRF y de los promedios anuales de los respectivos valores del Observatorio Magnético de Teoloyucan para el período 1923 a 1987.

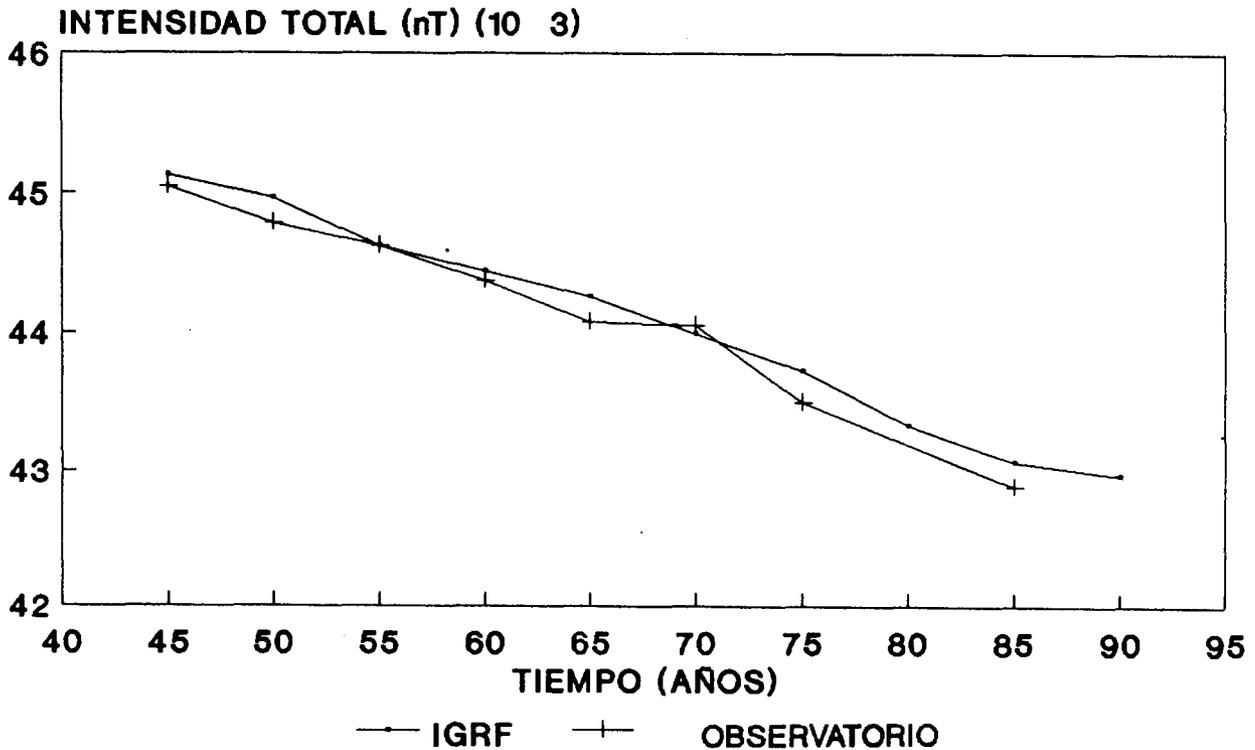


Fig. 7. Comparación de valores de la intensidad total del campo geomagnético, de acuerdo con el IGRF y de los valores promedio anuales de los respectivos valores del Observatorio Magnético de Teoloyucan para el período 1923 a 1987.

DISCUSION

La variación secular del campo magnético principal es compleja y aún no predecible a partir de modelos estadísticos o determinísticos. Los modelos incluidos en las sucesivas generaciones de IGRF constituyen simples aproximaciones lineales que especifican variaciones a una tasa constante de los coeficientes que representan al campo principal (Peddie, 1983). La comparación de datos del IGRF estimados para períodos separados por varios años indica discrepancias importantes. Por ejemplo, la comparación entre datos del IGRF 1965 extrapolados a 1975 revela diferencias significativas con el modelo IGRF 1975 (Dawson y Newitt, 1978). Los modelos de variación secular para períodos de cinco años (es decir, los empleados en las generaciones de IGRF) proporcionan, sin embargo, ajustes satisfactorios a las variaciones seculares de los elementos geomagnéticos (Dawson y Newitt, 1982).

Por otro lado, los estudios sobre variación secular del campo geomagnético (como los ilustrados en las figuras 1 a 4) son de particular interés para el desarrollo de modelos del dínamo terrestre y la comprensión del origen y evolución del campo magnético interno o principal. En estudios de la deriva al oeste, cambios de período largo como excursiones o cambios de polaridad, variación paleosecular con períodos de 10^3 a 10^6 (por ejemplo, Böhnell *et al.*, 1990). La documentación de estos cambios temporales del

campo geomagnético en observatorios y otras fuentes de medición son de importancia crítica en la generación de modelos de variación tales como los incluidos en los IGRF.

Los datos observacionales resumidos en este artículo y su comparación con los valores respectivos del IGRF permiten investigar si una anomalía de variación secular ha estado presente durante las últimas décadas en el centro de México. La aparente buena correlación entre los valores basados en el IGRF y los del Observatorio Magnético para el período 1945-1990 indican la ausencia de anomalías de variación secular significativas para las últimas décadas en la parte central de México.

AGRADECIMIENTOS

Una de las resoluciones de la Asociación Internacional de Aeronomía y Geomagnetismo (IAGA), cuya importancia deseamos enfatizar, es la relacionada con la necesidad de apoyo para una continua operación de los observatorios geomagnéticos. En el país, el Observatorio Magnético de Teoloyucan ha estado en operación por un largo período de tiempo gracias al esfuerzo y dedicación de un grupo de académicos, cuya labor ha resultado particularmente importante. Se agradece la colaboración de Alejandro Godínez en estos estudios.

BIBLIOGRAFIA

- ALVA-VALDIVIA, L., J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, H. BOHNEL y D. J. MORAN-ZENTENO, 1991. Aeromagnetic anomalies and paleomagnetism in Jalisco and Michoacán, southern Mexico continental margin. *Tectonophysics*, 192.
- ARKANI-HAMED, J. y W. E. S. URQUHART, 1990. Reduction to the pole of the North American magnetic anomalies. *Geophysics*, 55, 218-225.
- ARKANI-HAMED, J. y W. J. HINZE, 1990. Limitations of the long wavelength components of the North American magnetic anomaly map. *Geophysics*, in press.
- BARRACLOUGH, D. R., 1981. The 1980 Geomagnetic Reference Field. *Nature*, 294, 91-93.
- BARRACLOUGH, D. R., 1987. International Geomagnetic Reference Field: the fourth generation. *Phys. Earth Planet. Int.*, 48, 279-292.
- BOHNEL, H., J. URRUTIA FUCUGAUCHI y E. HERRERO BERVERA, 1990. Paleomagnetic data for central Mexico and its use in paleosecular variation studies. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 64, 224-336.
- CAMPOS ENRIQUEZ, J. O., 1982. Estudio de magnetometría terrestre en la zona geotérmica de Taxido, Estados de Hidalgo y Querétaro, Reporte 38-82, Comisión Federal de Electricidad (México).
- CAMPOS ENRIQUEZ, J. O. y J. J. CAMPOS ENRIQUEZ, 1986. La carta de la declinación magnética sintética en el territorio nacional, *Boletín de la AMGE*, XXVI, 2-4, 22-34.
- CAMPOS ENRIQUEZ, J. O. y F. HERRERA-BARRIENTOS, 1988. Variación diurna del campo magnético terrestre en el área del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán., Reporte 4/88, Comisión Federal de Electricidad (México).
- CAMPOS ENRIQUEZ, J. O., M. A. ARROYO ESQUIVEL y J. URRUTIA FUCUGAUCHI, 1990. Basement, Curie isotherm and shallow crustal structure of the Trans-Mexican volcanic belt from aeromagnetic data. *Tectonophysics*, 97, 77-90.
- DAWSON, E. y L. R. NEWITT, 1978. IGRF comparisons. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 16, P1-P6.
- DAWSON, E. y L. R. NEWITT, 1982. Comparison of IGRF models with North American magnetic data. *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 393-400.
- GAUSS, C. F., 1839. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. In: Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins im Jahre 1838, edited by C. F. Gauss and W. Weber, pp. 1-57, Weidmann, Leipzig.
- GODINEZ LUNA, A., 1987. Valores magnéticos para el año 1977. *Observ. Mag. Teoloyucan, Datos Geof. Serie C, Inst. Geof., UNAM, México*, 61 pp.
- GODINEZ LUNA, A., 1990. Valores magnéticos para el año 1987. *Obs. Mag. Teoloyucan. Datos Geof. Serie C, Inst. Geof. UNAM, México*, 46 pp.
- HINZE, W. J. e I. ZIETZ, 1985. The composite magnetic anomaly map of the conterminous United States. *Soc. Expl. Geophys.*, 1-24.
- HINZE, W. J. y DNAG Committee, 1988. Magnetic anomaly map of North America. *The Leading Edge*, 7, 19-21.
- IAGA Division I working Group 1 (D. R. Barraclough, Chairman), 1988. International Geomagnetic Reference Field Revision 1987, *Geophys. J.*, 93, 187-189.
- PEDDIE, N. W., 1982. International Geomagnetic Reference Field: The third generation. *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 309-326.
- PEDDIE, N. W., 1983. International Geomagnetic Reference Field - its evolution and the difference in total field intensity between new and old models for 1965-1980. *Geophysics*, 48, 12, 1691-1696.
- SCHNETZLER, C. C., P. T. TAYLOR, R. A. LANGEL, W. J. HINZE y J. D. PHILLIPS, 1985. Comparison between the recent U. S. composite magnetic anomaly map and MAGSAT anomaly data. *J. Geophys. Res.*, 90, 2543-2548.
- URRUTIA FUCUGAUCHI, J., A. OROZCO TORRES y J. A. LOPEZ CRUZ-ABEYRO, 1986. Geomagnetism and paleomagnetism in Mexico. *IAGA News*, 25, 49-55.
- WON, I. J. y K. H. SON, 1982. A preliminary comparison of the Magsat data and aeromagnetic anomalies in the continental U. S. *Geophys. Res. Lett.*, 9, 296-298.
- ZMUDA, A. J., 1971. The International Geomagnetic Reference Field. Introduction. *Bull. Int. Ass. Geomagn. Aeron.*, 28, 148-152.

J.J. Campos Enríquez*, J. O. Campos Enríquez** y J. Urrutia Fucugauchi**

* Subdirección de Cartas Básicas, DGG-INEGI, Av. Héroe de Nacozari Sur 2301, Puerta 7, Mezzanine, Cd. Industrial, 20290, Aguascalientes, Ags.

**Departamento de Geomagnetismo y Exploración Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM, Del. Coyoacán, 04510, México, D. F., México.



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
CARTA DE LA VARIACION ANUAL
DE LA INCLINACION MAGNETICA

- ASENTAMIENTOS HUMANOS
- CARRTERAS PAVIMENTADAS
- FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO
- CORRIENTES DE AGUA
- CUERPOS DE AGUA
- LIMITE INTERNACIONAL

ESCALA 1:400 000

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA
GEOGRAFIA E INFORMATICA

Geofísica Internacional, Vol. 30, Num. 2, 1991

Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México

J. J. Campos Enríquez, J. O. Campos Enríquez y J. Urrutia Fucugauchi



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
CARTA DE LA VARIACION ANUAL
DE LA DECLINACION MAGNETICA

ASENTAMIENTOS HUMANOS 
 CARRTERAS PAVIMENTADAS 
 FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO 
 CORRIENTES DE AGUA 
 CUERPOS DE AGUA 
 LIMITE INTERNACIONAL 

ESCALA 1:4000 000

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA
 GEOGRAFIA E INFORMATICA

Geofísica Internacional, Vol. 30, Num. 2, 1991

Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México

J. J. Campos Enríquez, J. O. Campos Enríquez y J. Urrutia Fucugauchi



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
CARTA DEL CAMPO MAGNETICO TOTAL
 UNIDADES: GAMMAS (MILES).

ASENTAMIENTOS HUMANOS 
 CARRITERAS PAVIMENTADAS 
 FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO 
 CORRIENTES DE AGUA 
 CUERPOS DE AGUA 
 LIMITE INTERNACIONAL 

ESCALA 1:4000 000
 100 50 0 100 200 Kilometros

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA GEOGRAFIA E INFORMATICA

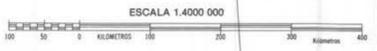
Geofísica Internacional, Vol. 30, Num. 2, 1991
Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México
 J. J. Campos Enríquez, J. O. Campos Enríquez y J. Urrutia Fucugauchi



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

CARTA DE DECLINACION MAGNETICA

- ASENTAMIENTOS HUMANOS
- CARRTERAS PAVIMENTADAS
- FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO
- CORRIENTES DE AGUA
- CUERPOS DE AGUA
- LIMITE INTERNACIONAL



INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA GEOGRAFIA E INFORMATICA

Geofísica Internacional, Vol. 30, Num. 2, 1991

Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México

J. J. Campos Enríquez, J. O. Campos Enríquez y J. Urrutia Fucugauchi



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
CARTA DE LA INCLINACION MAGNETICA

ASENTAMIENTOS HUMANOS
CARRTERAS PAVIMENTADAS
FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO
CORRIENTES DE AGUA
CUERPOS DE AGUA
LIMITE INTERNACIONAL

ESCALA 1:4000 000

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA GEOGRAFIA E INFORMATICA

Geofísica Internacional, Vol. 30, Num. 2, 1991
Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México
J. J. Campos Enríquez, J. O. Campos Enríquez y J. Urrutia Fucugauchi