



## ESTUDIO DE VARIACION PALEOSECULAR DEL CAMPO GEOMAGNETICO EN LA ZONA VOLCANICA DE COLIMA-JALISCO (OESTE DE MÉXICO)

Rafael García Ruiz<sup>1\*</sup>, Avto Goguichaishvili<sup>1</sup>, Miguel Cervantes Solano<sup>2</sup>, Abel Cortés Cortés<sup>3</sup>,  
Rafael Maciel<sup>4</sup>, Juan Julio Morales Contreras<sup>1</sup> y José Luis Macías<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica-Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México.

<sup>2</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores, UNAM, Morelia, México.

<sup>3</sup> Universidad de Colima, P.T.C. Observatorio Vulcanológico, Colima, México.

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, División de Investigación y Estudios Profesionales, Av. Tecnológico 201, Tacámbaro, Michoacán 61650, México.

<sup>5</sup> LIAR. Instituto de Geofísica-Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México.

\* e-mail: [asrael.rafael@gmail.com](mailto:asrael.rafael@gmail.com)

### ABSTRACT

We present new rock-magnetic and paleomagnetic results obtained from the Colima volcanic field located in the western Trans-Mexican Volcanic Belt, as an additional contribution to the present database for the time average geomagnetic field. Paleomagnetic directions were obtained on twenty one lava flows. All sites analyzed in this study were previously dated by conventional radiometric methods  $^{14}C$  or  $^{40}Ar/\beta^{39}Ar$ , and spans from 34 to 370 ka. The analysis of thermomagnetic curves provided: (i) Most samples contain magnetite and are characterized with reversible behaviour; (ii) other samples show evidence for Low-Ti titanomagnetite for a less reversible cooling and heating curves. Nineteen lava-flows yielded normal polarity and the other two correspond to a transitional geomagnetic regime.

**Keywords:** Geomagnetic Secular Variation, Colima Volcanic Field, Quaternary.

### RESUMEN

Se presentan los resultados paleomagnéticos y de magnetismo de rocas correspondientes al Campo Volcánico de Colima localizada al oeste del cinturón volcánico Transmexicano, como una contribución a la base de datos actual del campo geomagnético promediado en el tiempo. Las direcciones paleomagnéticas se obtienen de veintiún flujos de lava. Todos los sitios analizados en este estudio fueron previamente datados por los métodos radiométricos convencionales  $^{14}C$  y  $^{40}Ar/\beta^{39}Ar$ , que cubren 34 hasta 370 ka. El análisis de las curvas térmomagnéticas proporciona: (i) La mayoría de las muestras contiene magnetita y se caracteriza por un comportamiento reversible; (ii) otras muestras tienen poca titanomagnetita con un comportamiento menos reversible de las curvas de enfriamiento y calentamiento. Diecinueve flujos de lava produjeron polaridad normal y los otros dos corresponden a un régimen de transición geomagnética.

**Palabras Clave:** Variación geomagnética secular, Campo volcánico de Colima, Cuaternario

### Introducción.

El campo magnético actual de la Tierra es bien conocido gracias a los diversos estudios que se han realizado a través del tiempo y recientemente con los datos obtenidos por medio de observatorios magnéticos y satélites. Mediante dichos datos se sabe que el campo magnético de la Tierra no es estático, ya que la dirección y magnitud del campo varían con el tiempo. El conocimiento de la variación a largo plazo del campo magnético de la Tierra se conoce como variación paleosecular, la cual es un área de gran importancia



dentro de Ciencias de la Tierra. La determinación del campo paleomagnético es necesario para expandir el conocimiento global y regional, así como para desarrollar modelos de campo geomagnético antiguo y obtener una mejor comprensión para el campo geomagnético actual. Sus aplicaciones son diversas, como la reconstrucción de la geometría del campo gracias a la datación, investigaciones del proceso interno del geodinamo, el cual es el proceso que genera el campo magnético que cubre a la Tierra, así como aplicaciones tectónicas y estratigráficas. La reconstrucción de la variación del campo geomagnético se realiza gracias al análisis de diversos materiales que tengan una buena datación, para después realizar las respectivas mediciones instrumentales. Para este trabajo se utilizaron flujos de lavas, que por lo general alojan una termoremanencia estable, que proporciona información puntual pero discontinua en el tiempo, del paleo-campo, debido a que los flujos están atados a las erupciones volcánicas las cuales son discretas y discontinuas en el tiempo. A las lavas se les considera los mejores registros del campo geomagnético para obtener direcciones. El presente trabajo se realizó en la zona volcánica de Colima y Jalisco, que son parte de la faja Volcánica Transmexicana y que se localiza en el sector sudoccidental, de donde se obtienen las direcciones y variaciones del campo antiguo correspondientes al Pleistoceno medio; por medio de los métodos paleomagnéticos convencionales de laboratorio, además del efecto que toma en los materiales y el análisis de los resultados. Los flujos volcánicos utilizados dentro de este trabajo tienen datación radiométrica por los métodos convencionales de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Esta investigación contribuye a la base de datos global y a las investigaciones de la variación paleosecular a bajas latitudes así como a inestabilidades en la escala temporal geomagnética para los últimos 5 Ma, con base en estudios sobre rocas magnéticas y estudios paleomagnéticos para la Faja Volcánica Transmexicana.

**Marco geológico y zona de muestreo.**

Los flujos de lava volcánica seleccionados para este estudio se localizan en el complejo volcánico Colima (CVC), la cual es una cadena volcánica orientada de N-S, que está compuesta por tres estrato volcanes andesíticos: El Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima. El CVC se desarrolló sobre un basamento de edad cretácico-terciaria, compuesto principalmente por rocas sedimentarias, en su mayoría del tipo carbonatado y volcániclastico. El CVC se encuentra ubicado en la porción occidental de la faja Volcánica Transmexicana (Fig. 1A), localmente está situado dentro del Graben de Colima que representa la extensión sur del punto triple formado por los rifts de Tepic-Zocalco, Chapala y Colima (Luhr *et al.*, 1985). El CVC empezó su actividad con la formación de “El Cantaro” hace 1.5Ma (Allan *et al.*, 1986); después la actividad continuó 15 km hacia el sur con “El Nevado de Colima” con tres periodos eruptivos entre 530 y 150ka

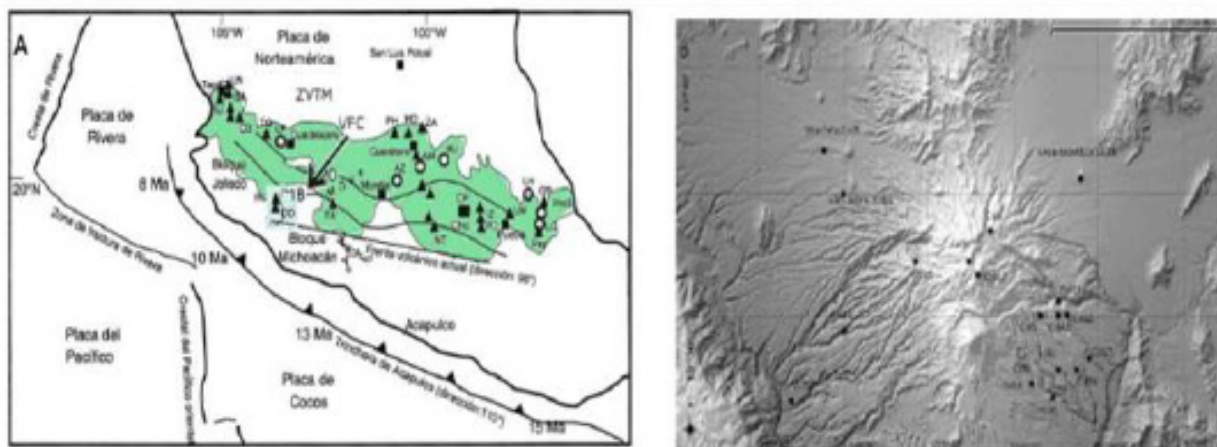
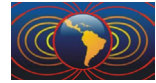


Figura 1. A. Campo volcánico de Colima. B. Zona de muestreo y sitios muestreados.



(Robin *et al.*, 1986); el volcán “Paleofuego” comenzó su actividad aproximadamente 50 ka con muchos colapsos, el último de ellos hace 2500 años (Cortes *et al.*, 2005, 2010). El volcán “Fuego de Colima”, debe su formación a los colapsos del volcán Paleofuego (Luhr *et al.*, 1988; Robin *et al.*, 1987). El volcán Colima es uno de los más activos en México y cuenta con un amplio registro histórico de su actividad así como ha sido el centro para estudios geológicos y de estratigrafía, por lo cual cuenta con una amplia gama de datación por los métodos convencionales en su mayoría por K-Ar y  $^{14}\text{C}$ . La historia eruptiva de los volcanes El Cántaro y El Nevado de Colima, cuenta con un menor registro histórico.

La estrategia de muestreo dentro de este estudio está restringida a 30 sitios que cuentan con su respectiva edad los cuales fueron proporcionados por el Dr. Avel Cortes (Tesis de Doctorado), de los cuales se tuvo acceso a 21 sitios (Fig. 1B) debido a los constantes derrumbes que se ocasionan en la temporada de lluvia, bloqueando los accesos directos a los sitios restantes. Todas las muestras se obtuvieron haciendo uso de un taladro portátil de gasolina y fueron orientados mediante un inclinómetro en conjunto con una brújula Brunton.

### **Mediciones Magnéticas.**

Se realizaron experimentos de magnetismo de rocas sobre muestras representativas para cada flujo de lava; esto identifica los portadores magnéticos y nos proporciona información con respecto a los componentes mineralógicos que conforman dichas muestras. Todas las mediciones magnéticas de roca se realizaron en el Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA, Geofísica Unidad Michoacán). Las curvas de susceptibilidad contra temperatura muestran que los núcleos analizados contienen magnetita, maghemita así como titanomagnetita, con curvas que son completamente reversibles, poco reversibles y nada reversibles. El análisis de estas curvas nos proporciona puntos de Curie que van desde  $330^\circ$  hasta  $640^\circ\text{C}$ . Como es sabido que la mayoría de los flujos volcánicos contiene un poco de titanio, se realizaron análisis mediante microscopía de barrido y rayos X, en los cristales de interés de las curvas más representativas para afirmar las premisas realizadas mediante los puntos de Curie obtenidos. Mediante dichos análisis se confirmó que la mayoría de las muestras poseen un pobre contenido de titanio como portador magnético principal, así como hierro y aluminio, hasta muestras que no contienen titanio dentro de los análisis realizados, las cuales corresponden a magnetita y maghemita.

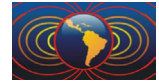
### **Propiedades de remanencia.**

La magnetización remanente de los 21 flujos de lava muestreados se midieron con un magnetómetro de giro JR-6 (AGICO Ltd, de sensibilidad nominal  $\sim 10.9\text{AM}^2$ ) dentro de LIMNA en Morelia (México), mediante desmagnetización por campos alternos (AF, con un Molspin AF) utilizando 4 muestras por sitio y desmagnetización térmica por etapas hasta una temperatura final de  $560^\circ\text{C}$  (Utilizando un horno TD ASC-48) con tres muestras por sitio, para obtener las componentes magnéticas del NRM de los pilotos.

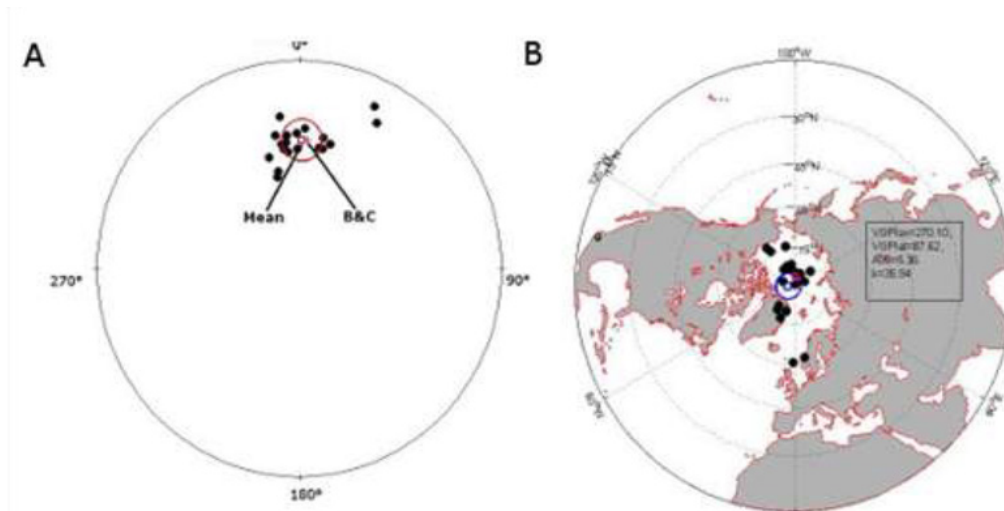
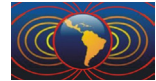
La mayoría de las muestras contienen de uno a dos componentes magnéticos. Los componentes magnéticos se aíslan de mejor manera mediante desmagnetización por AF, por lo cual se aplicó este proceso para la mayoría de las muestras.

De los 21 sitios (Tab. 1) se obtiene polaridades normales en 19 de ellos y los otros dos se toman como direcciones transicionales, encontrando en uno de ellos una dirección correspondiente a una excursión (hace  $300 \pm 90$  ka) localizada entre dos excursiones documentadas, Portuguese Margin de 290 ka (Nicola Thouveny *et al.*, 2002) y Calabrian Ridge1 ente 315-325 ka (C. Laj *et al.*, 2007). Estas dos direcciones de transición tienen un VGP de latitud por debajo de los  $45^\circ$ , por lo cual se descartan para cálculos posteriores. Solo se utilizan 19 direcciones que proveen una media de  $D = 1.19^\circ$ ,  $I = 38.2$ ,  $\alpha_{95} = 5.5$ ,  $k = 39.5$  (Fig. 2A) y con un VGP de longitud  $\phi = 270.1^\circ$ , latitud  $\lambda = 87.6$ ,  $\alpha_{95\%} = 5.3^\circ$ ,  $k = 35.9$  (Fig. 2B).

Se comparó el polo obtenido con el polo sintético correspondiente al Cratón de Norteamérica de Besse y

**Tab1a 1.** Direcciones medias de los 21 sitios, con sus respectivos VGPS.

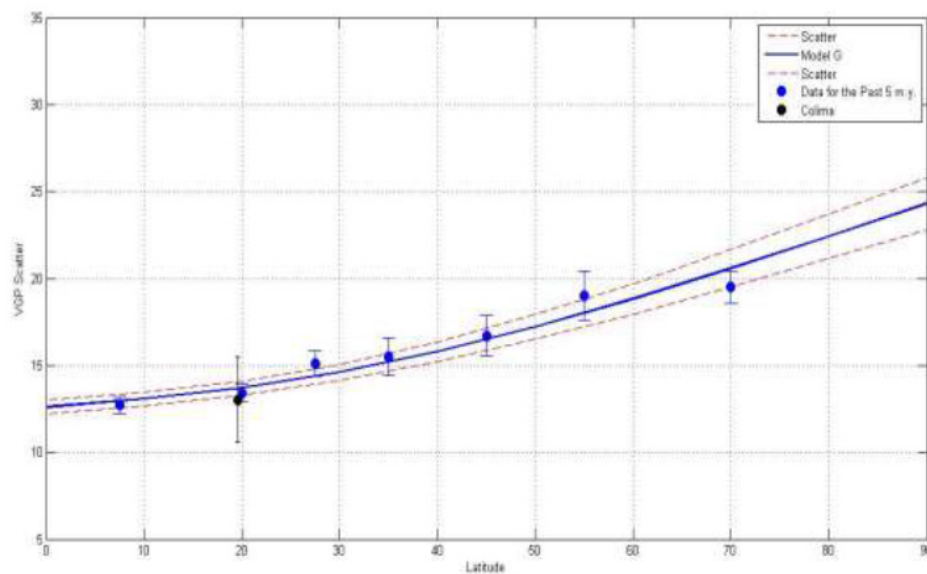
Site	Coord.		Age(ka)	n/N	Directions		k	$\alpha_{95}$	VGP's		Pol.
	(°N)	(°W)			In(°)	Dc(°)			$\lambda_v$	$\phi_v$	
Col6 (M10)	19.56	103.61	28 ± 8	10/10	36.2	10.8	25.96	9.7	79.8	341.5	N
Col8 (M13)	19.57	103.62	30 ± 12	4/9	8.8	313.7	95.6	7.2	42.49	154.1	T
Col7 (M11)	19.56	103.61	34 ± 7	10/10	41.0	11.4	39.5	7.8	78.7	324.0	N
Col13 (M6)	19.47	103.52	44 ± 15	8/10	43.9	344.2	656	2.8	74.2	192.5	N
Col14 (M18)	19.47	103.52	44 ± 15	9/10	39.4	351.4	166	3.6	81.5	187.5	N
Col2 (M2')	19.53	103.52	49 ± 22	6/9	21.3	28.8	35.5	9.6	60.9	359.2	N
Col3 (M6)	19.53	103.51	49 ± 22	7/9	14.8	25.6	38.6	8.5	66.4	8.7	N
Col5 (M15)	19.54	103.52	61 ± 8	8/9	27.4	352.6	74.7	5.8	81.3	132.2	N
Col18 (V.Ap.)	19.62	103.49	62 ± 14	10/10	50.6	347.3	77	5.4	73.6	215	N
Col19 (V.Ap.)	19.62	103.49	62 ± 14	9/9	52.6	346.3	224	3.4	71.7	217.2	N
Col11 (M32)	19.47	103.82	69 ± 5	7/9	33.2	2.5	36.1	10	84.6	154.1	N
Col17 (M4)	19.48	103.49	81 ± 8	9/10	41.4	352.3	46	7.7	81.6	198.9	N
Col12 (M7)	19.49	103.52	83 ± 5	9/9	40.9	9.6	66.7	6.4	80.2	321.1	N
Col1 (M3)	19.53	103.54	91 ± 7	9/9	41.9	359.1	39.9	7.4	85.3	246.5	N
Col4 (M19)	19.48	103.55	97 ± 13	5/9	35.2	349.4	48.1	9	85.4	114.2	N
Col9 (M9)	19.59	103.59	104 ± 9	8/9	43.2	354.3	66	7.4	82.34	213.9	N
Col20 (V.E)	19.62	103.76	172 ± 21	10/10	38.8	353.8	184	3.6	83.7	188.8	N
Col16 (M4)	19.49	103.5	184 ± 10	9/9	38.1	14.3	39.0	8.2	76.5	335.9	N
Col21 (Sn.I.)	19.64	103.75	215 ± 18	9/10	35.8	354.5	68	6.7	84.8	169.2	N
Col10 (M31)	19.52	103.76	300 ± 95	8/9	-42.9	333.9	32.0	8.6	-38.7	289.5	T
Col15 (M18)	19.57	103.68	372 ± 8	7/9	35.2	358.9	67.3	7.4	88.9	158.9	N
Mean				19/21	38.2	1.2	39.1	5.5	87.6	270.1	N
								$\alpha_{95}$ <b>7.4</b>	<b>K</b> <b>16.9</b>		



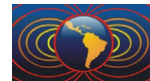
**Figura 2.** A. Proyección de las direcciones medias obtenidas junto con la media Fisheriana y la dirección media esperada. B. Polos geomagnéticos virtuales de los sitios con polaridad normal en conjunto con el polo correspondiente para el Cratón de Norteamérica.

*Courtillot (2002)*, correspondiente a la ventana de 5 Ma (longitud de  $\phi = 270.1^\circ$  latitud  $\lambda = 86.2$ ,  $\alpha_{95} = 2.6$ ) con una distancia angular de  $\Delta = 4.5$ , por lo cual la desviación en los polos es mínima. Esto sugiere que no ocurrió rotación en el sitio de estudio, lo que se corrobora comparando la dirección esperada ( $D_{EX} = 3.8^\circ$ ,  $I_{EX} = 36.1$ ) con la dirección media, obteniendo la rotación de  $R = -2.6 \pm 5.9^\circ$  y un flattening  $F = -2.1 \pm 5.3^\circ$ , esto indica que no hay un aporte importante en la rotación y el flattening desde hace 1 Ma.

La estimación de la variación paleosecular se llevó a cabo por medio de la formulación de *McFadden et al. (1997)* y *Cox (1969)*, para obtener una dispersión angular de  $S_F = 13.0$ , con su límite de confianza superior  $S_U = 15.2$  y su límite inferior  $S_L = 12.7$ , los cuales están de acuerdo con el modelo G de *McFadden et al. (1988, 1991)*, como se observa en la Figura 3.



**Figura 3.** Comparación de la dispersión angular con respecto a la latitud haciendo uso del Modelo G.



## Principales Resultados

La remanencia característica proporciona diecinueve direcciones medias con polaridad normal y dos direcciones medias transicionales; una de ellas correspondiente con una excursión. La dirección media (de todos los datos con VGP de latitud mayor a  $45^\circ$ ), es  $D = 1.19^\circ$ ,  $I = 38.16^\circ$  ( $k = 39.5$ ,  $\alpha_{95} = 5.5^\circ$ ,  $N = 19$ ). Esta dirección es prácticamente indistinguible de la dirección esperada para el Pleistoceno medio. Esto sugiere que no ocurrió una rotación tectónica mayor en el área estudiada. El polo paleomagnético obtenido es  $\phi = 270.1^\circ$ ,  $\lambda = 87.6^\circ$  ( $k = 35.9$ ,  $\alpha_{95} = 5.3^\circ$ ) con una dispersión angular de  $S_F = 13.0$ , un límite superior de confianza  $S_U = 15.2$  e inferior de  $S_L = 12.7$ . Esta dispersión se ajusta muy bien al modelo G de McElhinny y McFadden (1997).

## Referencias

- Allan, J. F., Carmichael, I. S. E., 1984. Lamprophyric lavas in the Colima Graben, SW Mexico: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 88, p. 203–216.
- Besse, J., Courtillot V., 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr Reversals of the Earth's magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 107, B11, 2300
- Laj C., Channell J. E. T., 2007. *Geomagnetic Excursions*, Elsevier.
- Cortés, A., Garduño, V. H., Macías, J. L., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J. C., Saucedo, R., Gavilanes, J. C., 2010. Geologic mapping of the Colima volcanic complex (Mexico) and implications for hazard assessment. *The Geological Society of American Special Paper 46412*, p. 1-16
- Cortés, A., Garduño, V. H., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J. C., Saucedo, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., 2005. Carta geológica del Complejo Volcánico de Colima, con Geología del Complejo Volcánico Colima: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras 10, scale 1:100,000, 1 sheet, 37 text.
- Cox, A., Doell, R. R., Dalrymple, G. B. (1964). Reversals of Earth's magnetic field. *Science*, 144, 1537-1543.
- Luhr, J. F., 2002. Petrology and geochemistry of the (1991 and 1998-1999) lava flows from Volcán de Colima, México: Implications for the end of the current eruptive cycle. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 117, p. 169-194.
- McElhinny, M. W., McFadden, P. L., 1997. Paleosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database. *Geophys. J. Int.*, 131, 240-252.
- McFadden, P. L., McElhinny, M. W., 1990. Classification of the reversal test in Paleomagnetism. *Geophys. J. Int.*, 103, 725-729.
- Robin, J., Mossand, P., Camus, G., Cantagrel, J. M., Gourgaund, A., Vincent, P. M., 1987. Eruptive history of the Colima volcanic complex (Mexico). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 31, p. 99-113