

EVIDENCIA PALEOMAGNÉTICA DE LA DEFORMACIÓN INTRA-ARCO DEBIDO AL SISTEMA DE FALLAS VERACRUZ-ACTOPAN: NEOTECTÓNICA DE LA PORCIÓN ESTE DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANS-MEXICANA.

Juan Jesús Torres Solano^{1*}, Luis Manuel Alva Valdivia², Fernando Gómez Ceballos¹,
Bernardo Ignacio García Amador³

¹ Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

² Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad de México, México.

³ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad de México, México.

*e-mail: juan.j.torres.s@gmail.com

ABSTRACT

This work reports the integral study of 100 previous paleomagnetic sites, as well as of 32 new sites in volcanic rocks with ages between 0.7 and 17 Ma, within the eastern portion of the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), also known as the Eastern Alkaline Province (EAP). The results were grouped into 11 different regions, according to their spatial and temporal relationship, as well as the quality of paleomagnetic data. They show a counterclockwise rotation of the order of -21° to -8° , in at least 7 regions. The latter, according to their position, are consistent with the hypothesis of a regional scale transverse left-lateral fault system (Veracruz-Actopan Fault System) in the eastern portion of TMVB, evidencing a process of intra-arc neotectonic deformation that has affected volcanic units with ages greater than 1.7 Ma.

Keywords: Paleomagnetism, intra-arc deformation, neotectonic, Trans-Mexican Volcanic Belt, Eastern Alkaline Province.

RESUMEN

Este trabajo reporta el estudio integral de 100 sitios paleomagnéticos previos, así como de 32 nuevos sitios en rocas volcánicas con edades entre 0.7 y 17 Ma, dentro de la porción oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (TMVB, por sus siglas en inglés), también conocida como Provincia Alcalina del Este (EAP, por sus siglas en inglés). Los resultados agrupados en 11 regiones distintas, de acuerdo a su relación espacial y temporal, así como de la calidad de los datos paleomagnéticos, muestran una distribución de rotaciones antihorarias del orden de -21° a -8° , en al menos 7 regiones. Estas últimas, conforme a su posición, son concordantes con la hipótesis de un sistema de fallas lateral-izquierdas de escala regional (Sistema de Fallas Veracruz-Actopan) en la porción este de la TMVB, evidenciando un proceso de deformación neotectónica intra-arco que ha afectado unidades volcánicas con edades mayores a 1.7 Ma.

Palabras Clave: Paleomagnetismo, deformación intra-arco, neotectónica, Faja Volcánica Trans-Mexicana, Provincia Alcalina del Este.

1. Introducción.

La Faja Volcánica Trans-Mexicana o *Trans-Mexican Volcanic Belt* (TMVB, por sus siglas en inglés) se caracteriza particularmente por presentar un ángulo abierto con respecto a la trinchera mesoamericana de aproximadamente 22° . De acuerdo con Ferrari *et al.* (2012) la TMVB presenta rasgos característicos, tanto morfológicos, petrológicos y tectónicos, que varían de acuerdo al periodo de emplazamiento al igual que a la profundidad y ángulo de subducción de la placa de Cocos y Rivera debajo de la placa Norteamericana. Estas distintas características han sido el reflejo de una evolución de complejas migraciones del arco volcánico de W-E y viceversa, y una distribución al este en la porción sur del arco, especialmente debido a la dinámica de la subducción en la margen convergente (Ferrari *et al.*, 2012; Manea *et al.*, 2013), lo que le otorga su



característica distribución tectónica con orientación NNW-ESE; y siendo así todas estas condiciones un factor en la variaciones en su composición. Esto ha permitido distinguir de manera particular para este estudio a la Provincia Alcalina del Este o *Eastern Alkaline Province* (EAP, por sus siglas en inglés) que conforma un cinturón de campos volcánicos máfico alcalinos paralelos a la costa del Golfo de México (Robin, 1976; Ferrari *et al.*, 2005; Gómez-Tuena *et al.*, 2007), y que a su vez se ve afectada por un conjunto de fallas normales y fallamiento lateral-izquierdo (Andreani *et al.*, 2008), el cual es interpretado como la consecuencia del movimiento e interacción de los bloques corticales a lo largo de la trinchera mesoamericana (Ego y Ansan 2002; Andreani *et al.*, 2008).

Pese a ser la TMVB un laboratorio natural para el estudio de las geociencias y un constante sitio de investigación, la porción oriental de la misma, no muestra el mismo nivel de detalle tanto en estudios paleomagnéticos, al igual que estructurales, como se presenta en sus contrapartes del centro y occidente (p. ej. Urrutia-Fucugauchi, Böhnell, 1987; Ruiz-Martínez *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2012). Considerando lo anterior, son aún menos los trabajos enfocados en comprender la evolución y desarrollo de la EAP (p. ej. Suter *et al.*, 2001; Gómez-Tuena *et al.*, 2007; Andreani, *et al.*, 2008; 2014), representando un área de trabajo muy atractiva y de interés para estudios paleomagnéticos. Tomando como punto de partida y motivación la propuesta de Andreani *et al.* (2008), donde se presenta evidencia de la existencia de una falla hipotética lateral-izquierda transpresiva de escala regional, renombrada en este trabajo como el Sistema de Fallas Veracruz-Actopan (SFVA), y que afecta unidades volcánicas relativamente recientes en la TMVB, la región se vuelve de especial interés paleomagnético, dadas las condiciones para observar rotaciones de bloques corticales que se presentan en los márgenes de deformación transpresiva (o transtensiva) asociado a las fallas de rumbo o *Strike-slip fault* (SSF, por sus siglas en inglés), tal como se puede observar en los distintos SSF distribuidos en distintas partes del mundo (*e.g.* Sonder *et al.*, 1994; Piper *et al.*, 1997; Randall *et al.*, 2011; Hernandez-Moreno *et al.*, 2014, por mencionar algunos de los principales estudios).

2. Objetivos.

2.1. Objetivos generales.

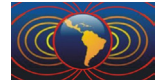
- Caracterizar rotaciones sobre el eje vertical de bloques corticales con base en las direcciones paleomagnéticas de distintos campos volcánicos en los alrededores del SFVA, dentro de la porción oriental de la TMVB.
- Analizar e identificar un patrón de deformación a lo largo del hipotético SFVA al este de la TMVB, a fin de confirmar tanto su cinemática como su máxima prolongación septentrional.

2.2. Objetivos particulares.

- Analizar y establecer las diferentes relaciones entre los paleoesfuerzos dominantes, la evolución tectónica del área de estudio, y los resultados paleomagnéticos obtenidos y recopilados.
- Realizar una comparación espacio-temporal, entre las direcciones paleomagnéticas próximas al SFVA y su relación con unidades geológicas-estructurales de la región occidental del TMVB.

3. Metodología.

Se estableció una recopilación de distintos trabajos paleomagnéticos cuya base de datos se centra en la EAP o en una porción de la misma (*e.g.* Alva-Valdivia *et al.*, 2001., Goguitchaichvili *et al.*, 2007., Mejia *et al.*, 2005, Ruiz-Martínez *et al.*, 2000), a modo de abarcar la mayor extensión de la EAP en su totalidad; de los cuales se extrajeron la posición geográfica de los sitios, declinación e inclinación magnética, alfa 95, kappa, datación radiométrica o por correlación geológica (si fuera el caso) y el número de muestras por sitio. Posteriormente se calcularon los polos virtuales geomagnéticos (VGPs) de todos los sitios, y de igual forma se calcularon las rotaciones con respecto a los polos paleomagnéticos de la curva de deriva polar



aparente global (GAPWaP, por sus siglas en inglés; Torsvik *et al.*, 2012). Para este último procedimiento se realizó una calibración de las dataciones radiométricas previas en las unidades volcánicas mediante la GTPS (*Geomagnetic Polar Time Scale*; Cande *et al.*, 1995), comparando las direcciones medias y polaridad correspondiente de cada sitio con respecto a su edad radiométrica y su desviación estándar, obteniendo así un ajuste de la edad (en algunos casos significativo), a fin de realizar una interpolación precisa de los polos paleomagnéticos de la GAPWaP para el cálculo de las rotaciones en cada sitio y para cada región agrupada, previamente definidos bajo criterios espaciales y temporales.

4. Resultados.

Con base en las distintas magnitudes de rotación obtenidas, ha sido posible notar un mismo comportamiento a lo largo del SFVA (Fig. 1). Al NW en la región de Tlalnchinol-Pachuca, se observan rotaciones antihorarias de -15° y -8° , para periodos de 2.4 y 5.1 Ma, respectivamente; mientras que en la porción central del SFVA, esto es: Los Humeros, Xalapa (i.e. Alva-Valdivia *et al.*, 2017) y Palma Sola, se presenta un amplio rango de magnitud de rotaciones que van de -16° a 3° , con edades de 7.7, 2.2 y 3.2 Ma, respectivamente. Por otro lado, en el campo volcánico de Los Tuxtlas al SE del SFVA, se distingue una compleja distribución de los resultados de las rotaciones con respecto a su temporalidad y posición, encontrándose la región representada por valores de rotación del orden de 4° , -3° y -21° , con una edad correspondiente de 1.7, 1.7 y 2.2 Ma, respectivamente (Tab. 1), lo que representa una marcada dinámica local. Las regiones correspondientes a Huichapan y Tantima-Poza Rica, ambas aproximadamente a 100 km al W y NE del área de estudio, respectivamente, arrojan rotaciones significativas; sin embargo, no hay forma de relacionar este comportamiento con el SFVA dada su distalidad y estructuras observadas en la zona. Empero, a pesar de esta condición pueden considerarse como límites en donde interactúan otros factores tectónicos, remarcando que ambas regiones presentan deformación neotectónica y con una ventana de tiempo similar.

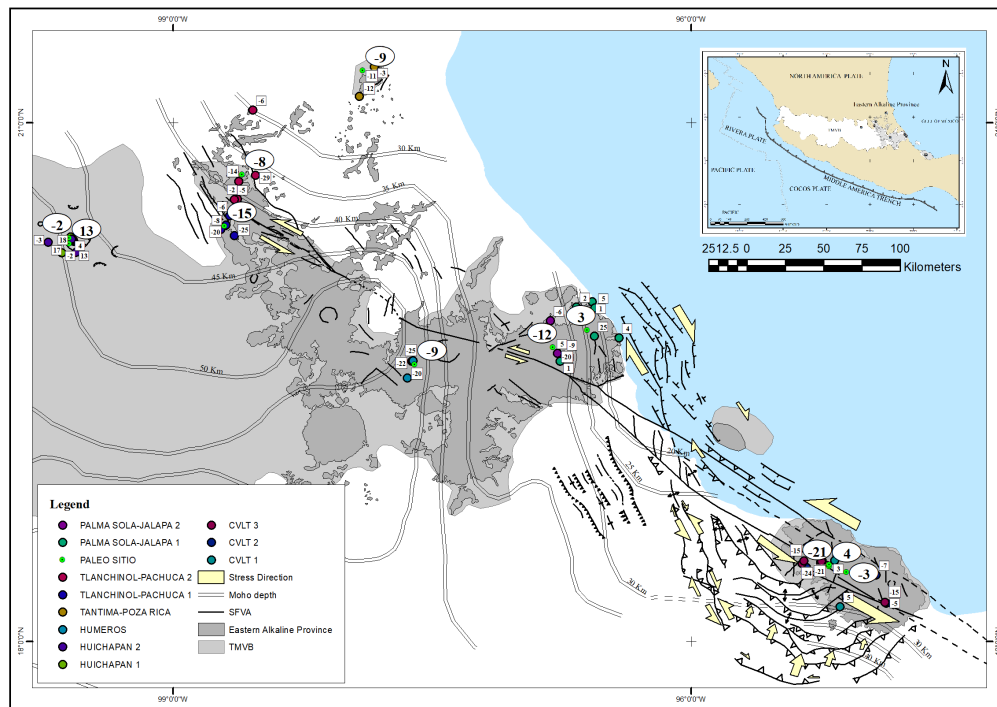


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, mostrando la ubicación de las rotaciones por sitio y grupos de regiones con respecto a rasgos estructurales previamente reportados en la región del SFVA, así como la profundidad del Moho. Modificado de: Andreani *et al.* (2008); Ferrari *et al.*, 2012; Jannette *et al.* (2003); Gómez-Tuena *et al.* (2007).

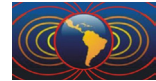


Tabla 1. Resultados paleomagnéticos del Mioceno medio al Pleistoceno inferior dentro de la región comprendida del SFVA en la EAP. Definiciones: Lat N/Long E, localización geográfica promedio de cada región; N/n, número de VGPs tomados para el cálculo y número de sitios por zona, respectivamente; Edad, edad promedio de los sitios en Ma; Dec/Inc, declinación e inclinación medias de las regiones mediante la estadística de Fisher (1953); Lat/Long paleo polo, polo paleomagnético de cada región con su respectivo A95 y k (Fisher, 1953); $R \pm \Delta R$, rotación promedio con su desviación estándar.

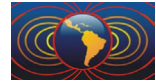
ZONA	Lat. °N	Long. °E	N/n	Edad (Ma)	Dec	Inc.	Lat.	Long	A95	K	R ± ΔR (°)
							paleopolos				
CVLT 1	18.4	264.8	4/7	1.7	1.9	26.5	82.5	65.9	6.1	227.6	4±7
CVLT 2	18.4	264.9	4/5	1.7	355.6	36.1	85.5	200.5	8.5	117	-3±10
CVLT3	18.4	264.8	9/9	2.26	337.9	21.0	67.5	158.9	6.4	65.9	-21±7
TLANCHINOL-PACHUCA 1	20.4	261.3	4/6	2.43	343.7	33.0	74.2	165.6	10.8	73.9	-15±12
TLANCHINOL-PACHUCA 2	20.7	261.4	5/12	5.15	350.3	38.6	80.9	182.4	13.6	32.7	-8±16
HUMEROS	19.6	262.4	3/4	7.69	347	45.4	76.3	215	41	10.1	-9±52
HUICHAPAN 1	20.3	260.4	4/4	2.49	0.5	44.6	83.9	263.4	8.2	127.1	-2±10
HUICHAPAN 2	20.3	260.4	5/9	2.49	11.1	41.6	79.0	328.5	5.4	201.1	13±6
PALMA SOLA-JALAPA 1	19.8	263.4	7/12	3.23	1.7	21.7	81.4	69.6	8.6	50.6	3±10
PALMA SOLA-JALAPA 2	19.7	263.2	3/6	3.14	346.5	31.0	76.8	162.7	11.9	108.9	-12±14
TANTIMA-POZA RICA	21.3	262.1	3/6	6.72	6.4	49.4	79.0	293.5	10	153.5	-9±12

5. Conclusiones.

El resultado de las rotaciones de todos los sitios dispuestos a lo largo del Sistema de Fallas Veracruz-Actopan, favorecen la hipótesis de un fallamiento regional lateral-izquierdo, relativamente reciente (Andreani *et al.*, 2008). Asimismo, se aprecia un congruente cese de la rotación antihoraria alrededor de ~1.7 Ma tanto para la región de Tlanchinol-Pachuca al NW, la porción SE con el campo volcánico de Los Tuxtlas, y la parte central del área de estudio: Los Humeros, Palma Sola y Xalapa, esta última región estudiada por Alva-Valdivia *et al.* (2017), y con resultados concordantes con los aquí analizados. Por otro lado, las rotaciones antihorarias en esta zona de la EAP, representan la evidencia cinemática de deformación neotectónica al oriente de la TMVB, implicando una oportunidad de estudio para entender las causas y consecuencias de los fenómenos de deformación de la corteza superior en esta región de México.

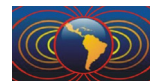
Agradecimientos

El autor agradece a todos los integrantes del Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica, UNAM, en Ciudad Universitaria, quienes han dado soporte tanto con sus observaciones como su infraestructura para este proyecto de investigación.



Referencias

- Aguirre-Díaz, G. J., López-Martínez, M., 2009. Geologic evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 179(1-2), 133-148. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.10.013
- Alva-Valdivia, L. M., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., 2001. Further constraints for the Plio-Pleistocene geomagnetic field strength: New results from the Los Tuxtlas volcanic field (Mexico). *Earth, Planets and Space* 53(9), 873-881. doi:10.1186/bf03351684
- Andreani, L., Rangin, C., Martínez-Reyes, J., Roy, C. L., Aranda-García, M., Pichon, X. L., Peterson-Rodríguez, R., 2008. The Neogene Veracruz fault: Evidences for left-lateral slip along the southern Mexico block. *Bulletin De La Societe Geologique De France* 179(2), 195-208. doi:10.2113/gssgfbull.179.2.195
- Andreani, L., Gattacceca, J., Rangin, C., Martínez-Reyes, J., Demory, F., 2014. Counterclockwise rotations in the Late Eocene–Oligocene volcanic fields of San Luis Potosí and Sierra de Guanajuato (eastern Mesa Central, Mexico). *Tectonophysics* 637, 289-304. doi:10.1016/j.tecto.2014.10.015
- Cande, S. C., Kent, D. V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100(B4), 6093-6095. doi:10.1029/94jb03098
- Ego, F., Ansan, V., 2003. Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°–99°W) in transtensive deformation? [Tectonophysics 359 (2002) 189–208]. *Tectonophysics* 361(3-4), 327. doi:10.1016/s0040-1951(02)00666-2
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522-523, 122-149. doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 217, 295-305.
- Goguitchaichvili, A., Petronille, M., Henry, B., Valdivia, L. A., Morales, J., Urrutia-Fucugauchi, J., 2007. Paleomagnetism of the Eastern Alkaline Province (Mexico): Contribution to the time-averaged field global database and geomagnetic instability time scale. *Earth, Planets and Space*. 59(7), 775-783. doi:10.1186/bf03352740
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2007. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Special Paper 422: Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México* 129-181. doi:10.1130/2007.2422(05)
- Hernandez-Moreno, C., Speranza, F., Chiara, A. D., 2014. Understanding kinematics of intra-arc transcurrent deformation: Paleomagnetic evidence from the Liquiñe-Ofqui fault zone (Chile, 38-41°S). *Tectonics* 33(10), 1964-1988. doi:10.1002/2014tc003622
- Jennette, D., Wawrzyniec, T., Fouad, K., Dunlap, D. B., Meneses-Rocha, J., Grimaldo, F., Escamilla-Herrera, A., 2003. Traps and turbidite reservoir characteristics from a complex and evolving tectonic setting, Veracruz Basin, southeastern Mexico. *AAPG Bulletin* 87(10), 1599-1622. doi:10.1306/05130302010
- Manea, V., Manea, M., Ferrari, L., 2013. A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America. *Tectonophysics* 609, 56-81. doi:10.1016/j.tecto.2012.12.039
- Mejia, V., Böhnell, H., Opdyke, N. D., Ortega-Rivera, M. A., Lee, J. K., Aranda-Gomez, J. J., 2005. Paleosecular variation and time-averaged field recorded in late Pliocene-Holocene lava flows from Mexico. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6(7). doi:10.1029/2004gc000871
- Piper, J., Tatar, O., Gürsoy, H. 1997. Deformational behaviour of continental lithosphere deduced from block rotations across the North Anatolian fault zone in Turkey. *Earth and Planetary Science Letters* 150(3-4), 191-203. doi:10.1016/s0012-821x(97)00103-9
- Randall, K., Lamb, S., Niocaill, C. M., 2011. Large tectonic rotations in a wide zone of Neogene distributed dextral shear, northeastern South Island, New Zealand. *Tectonophysics* 509(3-4), 165-180. doi:10.1016/j.



tecto.2011.05.006

- Robin, C., 1976. Presence simultanee de magmatismes de significations tectoniques opposees dans l'Est du Mexique. *Bulletin De La Societe Geologique De France S7-XVIII*(6), 1637-1645. doi:10.2113/gssgfbull.s7-xviii.6.1637
- Ruiz-Martínez, V., Osete, M., Vegas, R., Núñez-Aguilar, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Tarling, D., 2000. Palaeomagnetism of Late Miocene to Quaternary volcanics from the eastern segment of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics* 318(1-4), 217-233. doi:10.1016/s0040-1951(99)00313-3
- Sonder, L. J., Jones, C. H., Salyards, S. L., Murphy, K. M., 1994. Vertical axis rotations in the Las Vegas Valley Shear Zone, southern Nevada: Paleomagnetic constraints on kinematics and dynamics of block rotations. *Tectonics* 13(4), 769-788. doi:10.1029/94tc00352
- Suter, M., Martínez, M. L., Legorreta, O. Q., Martínez, M. C., 2001. Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Bulletin* 113(6), 693-703. doi:10.1130/0016-7606(2001)1132.0.co;2
- Torsvik, T. H., Voo, R. V., Preeden, U., Niocaill, C. M., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., Cocks, L. R., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews* 114(3-4), 325-368. doi:10.1016/j.earscirev.2012.06.007