

Reseña de las estancias de trabajo paleomagnético en Nicaragua y México: adiestramiento para la resolución de problemas en tectónica de placas

Luis Manuel Alva-Valdivia*
Bernardo Ignacio García-Amador**
Greybin Josué Borge-Castro***
Elliet Pérez-Romero***
Xochilt Esther Zambrana-Areas***

Recibido en octubre de 2017; aceptado en noviembre de 2017

Abstract

This work describes the short stays training for field and laboratory work developed as part of a project with the objective of teaching about the solution of tectonic problems based on paleomagnetic and rock magnetic studies, both in Nicaragua and Mexico. This part of the project was performed with researchers from two pioneering geosciences institutions in each country: Instituto de Geofísica, UNAM, Mexico, and Instituto de Geología y Geofísica, UNAN Nicaragua. During the stays several activities of training, integration and exchange of knowledge were proposed and deployed, starting from field work, experimentation in laboratory and discussion of the first results obtained. The academic shared experience of the short stays has resulted in the current collaboration between both institutions and their researchers, as well as the approach of future stays addressing new challenges in geosciences.

Key words: Academic stays, paleomagnetism, rock magnetism, tectonics, Nicaragua, México.

Resumen

Este trabajo describe las estancias cortas de trabajo de campo y laboratorio desarrolladas como parte de un proyecto con el objetivo de enseñar la solución de problemas tectónicos, con base en estudios de paleomagnetismo y magnetismo de rocas tanto en Nicaragua como en México. El proyecto se llevó a cabo con investigadores de dos instituciones de geociencias pioneras en cada país: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México; e Instituto de Geología y Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN), Nicaragua. Durante las estancias se plantearon y desplegaron diversas actividades de adiestramiento, integración e intercambio de conocimiento, desde trabajo de

.....
* Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

** Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

*** Instituto de Geología y Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (IIGG-CIGEO, UNAN).

campo, experimentación en laboratorio y discusión de los primeros resultados obtenidos. La experiencia académica compartida de las estancias ha resultado en la actual colaboración entre ambas instituciones y sus investigadores, así como el planteamiento de futuras estancias abordando nuevos retos en las geociencias, esta etapa fue patrocinada por el proyecto “Estudio Paleomagnético de Nicaragua: evolución tectónica y geodinámica del Cretácico al Mioceno” (Luis Alva Valdivia).

Palabras clave: Estancias académicas, paleomagnetismo, magnetismo de rocas, tectónica, Nicaragua, México.

Introducción

Los estudios de paleomagnetismo y magnetismo de rocas, representan algunas de las herramientas por excelencia para la resolución de problemas en la “tectónica de placas” (Schettino, 2015). El entendimiento de la tectónica en una región definida, involucra el conocimiento de sus causas y consecuencias, como pueden ser la observación probabilística de los fenómenos geológicos naturales, también conocidos como riesgo geológico (la actividad volcánica y sísmica, los deslizamientos de talud, etc.), hasta la ubicación estratégica de los recursos naturales (yacimientos de hidrocarburos, fuentes geotérmicas, yacimientos minerales, etc.), por mencionar algunos aspectos relevantes.

En México y Nicaragua ha sido imprescindible reconocer los rasgos tectónicos regionales a través del tiempo y del espacio, debido a que existen diversas problemáticas sin resolver en ambos países y áreas circundantes (Morán-Zenteno *et al.* 2017; Rogers *et al.* 2007). Entre algunas de estas incógnitas se observan aspectos primordiales como es, el entender la deformación intraplaca o ahondar en la evolución cinemática de los fragmentos de corteza que ahora constituyen ambos países, así como la relación espacio-temporal que existe entre estas dos porciones de territorio tomando en cuenta sus causas y consecuencias. Por otro lado, la escasez de estudios paleomagnéticos en Nicaragua como fuente de información cuantitativa sobre la evolución tectónica de la región, representa una oportunidad para el entendimiento de dicha problemática.

Tomando como premisa la escasez de estudios paleomagnéticos (y de magnetismo de rocas) en Nicaragua (Elming *et al.* 2001); se ha desarrollado un proyecto entre dos instituciones de geociencias y sus respectivos investigadores: Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IGF-UNAM), e Instituto de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (IGG-UNAN); con el principal objetivo de aprender el uso del paleomagnetismo y magnetismo de rocas como herramientas fundamentales para la resolución de problemas geológicos en ambos países. Para lograr esto, se diseñó un plan de trabajo integral que incluyó el planteamiento de la problemática y su metodología de investigación, previa al trabajo de campo, hasta la obtención directa de muestras en campo, tanto en Nicaragua como en México, así como un

posterior análisis en el laboratorio. Sin dejar de mencionar la interacción académica y cultural que los investigadores de ambos países lograron a lo largo del proyecto, gracias también apoyo del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH).

Cabe mencionar que las estancias de trabajo paleomagnético tuvieron como fundamento el planteamiento para la resolución de problemas enfocados en la tectónica regional y local; sin embargo, también se buscó ahondar en otras aplicaciones del paleomagnetismo, como las variaciones temporales del campo geomagnético, realizando estudios de paleointensidad e incluso aplicaciones en arqueología, conocida como arqueomagnetismo.

Tomando en cuenta los objetivos planteados. A continuación, se da una breve descripción de las problemáticas abordadas en cada país.

Problemática en Nicaragua

Entender la evolución tectónica previa al Eoceno de la porción occidental de la actual placa del Caribe, esto es, la porción de Centroamérica; que actualmente representa uno de los mayores retos para la reconstrucción de la tectónica de placas a nivel global (Boschman *et al.* 2014, Keppie 2013, Pindell y Kennan 2012, Ratschbacher *et al.* 2009). La complejidad de esta región de la Tierra, parte de la carencia de indicadores cinemáticos previos al Eoceno para reconocer el desplazamiento de los bloques corticales, por ejemplo, anomalías magnéticas del piso oceánico, registro de fallas transformantes y laterales, registro extensional y compresional del continente, paleomagnetismo. Sin embargo, existen evidencias de unidades geológicas de composición y edad afin a la parte sur de México, como se presenta en la estratigrafía y estructuras estudiadas en Honduras (Rogers *et al.* 2007). Estos estudios han provocado la propuesta de varias hipótesis acerca de la correlación geológica de las unidades tanto en Centroamérica como en el sur de México sobre la evolución tectónica y cinemática del fragmento de corteza continental que representa Centroamérica (Silva-Romo 2008).

La región comprendida dentro de los límites geográficos de Nicaragua, tema central de este estudio, contiene un interesante registro de la evolución tectónica de Centroamérica, esto debido a que existen unidades geológicas sin deformación y con edades entre el Cretácico hasta el Mioceno (Hodgson 2000), como es el caso del Batolito de Dipilto; representando así un área potencial para estudios paleomagnéticos, mismos que permitirán añadir información cinemática del fragmento cortical de Centroamérica.

Problemática en México

La región comprendida entre los estados de Oaxaca y Puebla, en el sureste-centro de México, contienen un rico registro geológico que define la evolución tectónica y paleogeográfica del pre-Paleozoico al Mesozoico temprano, y que principalmente constituyen los bloques corticales (i.e. basamentos) que componen gran parte de México (Keppie y Ortega-Gutiérrez 2010, Nance *et al.* 2006, Ortega-Gutiérrez *et al.* 1999).

La definición de la paleoposición de las unidades geológicas en esta región ha implicado un gran reto en las últimas décadas; sin embargo, los estudios geológicos más recientes han abierto posibilidades para el entendimiento de la evolución tectónica de esta región de México.

Al estudiar la formación La Mora, en las cercanías de Huajuapán de León, Oaxaca (Silva-Romo *et al.* 2015), encontraron que esta unidad sedimentaria de planicie de inundación tiene una edad máxima de depósito de 210 ± 12 Ma, la cual posiciona a estas rocas en el Triásico tardío a Jurásico temprano. Por otro lado, los autores proponen que dicha formación representa un paleo-río que conectaba el microcontinente Oaxaquia-Acatlán con el bloque cratónico de Amazonia, previa a la apertura de Pangea, y que este representaría un cauce del abanico submarino Tolimán, observado en México (Ortega-Flores *et al.* 2014). La oportunidad de obtener datos paleomagnéticos de La Mora, unidad contenida dentro del microcontinente de Oaxaquia-Acatlán, representa información de gran importancia para definir la paleo-posición de este bloque cortical con respecto al cratón Amazonia, así como su evolución geodinámica a partir del Triásico tardío. Asimismo, algunas unidades geológicas aledañas y estratigráficamente relacionadas con la formación La Mora, como la formación Diquiyú y el intrusivo de Chilixtlahuaca, de edad Jurásica (Campos-Madrigal *et al.* 2013, Morán-Zenteno *et al.* 1993), también representan un registro potencial para entender más sobre la temporalidad y geodinámica de la región.

Actividades realizadas

Del trabajo realizado en Nicaragua, con el apoyo del IGG-UNAN, se obtuvieron muestras de siete flujos de lava, de composición basáltica y andesítica, provenientes del volcán Masaya y Momotombo, así como del cráter de Asososca; 16 sitios de rocas intrusivas, de composición granodiorítica, tonalítica y gabrónica, provenientes de la región de Nueva Segovia; y dos sitios de muestreo a detalle en rocas sedimentarias, específicamente en calciturbiditas de grano fino, en la región de Rivas al sur de Nicaragua. Los especímenes fueron perforados usando una nucleadora con motor a gasolina, y una barrena de 2.5 cm de diámetro con una corona de diamante industrial, enfriada con agua (Figura 1b). Con la cual se obtuvieron 292 especímenes de entre ocho y 12 cm de largo, orientados en campo, usando una brújula tipo Brunton azimutal, y un orientador de precisión modelo Pomeroy, obteniendo la orientación magnética, y solar cuando fue posible. Las muestras que no fueron orientadas se tomaron de bloques provenientes de flujos de lava de tipo AA, los cuales fueron cortados en el IGG-UNAN, con una cortadora de roca de disco de corona de diamante, y perforados al tamaño estándar de 2.5 cm de diámetro, para el análisis de paleointensidad. Asimismo, se colectaron muestras de depósitos piroclásticos en los alrededores de las ciudades de Managua y Masaya, obteniendo muestras en 11 sitios; las cuales fueron colectadas siguiendo los datos reportados en la literatura (i.e. Geilert *et al.* 2012; Kutterolf *et al.* 2007). Cada muestra se obtuvo directamente, de diferentes niveles de cada capa encontrada,

procurando descubrir cada estrato con una pala y una espátula a fin de coleccionar una zona con menos intemperismo, el tamaño de las capas oscila de los 0.2 a los 1.9 metros. Se seleccionaron capas que presentaban una granulometría superior a los 4 mm (Figura 1a).

El trabajo de campo en colaboración con los investigadores del IGG-UNAN jugó un papel importante en el desarrollo del proyecto paleomagnético en Nicaragua, debido a que se lograron abordar y discutir temas geológicos y geofísicos de ambas partes, que, al ser tratados directamente en campo, permitieron un entendimiento y resolución de parte de la problemática geocientífica que se propone y visualiza en el proyecto que está en marcha. Asimismo, la convivencia interpersonal durante el trabajo de campo con los investigadores reforzó la enseñanza del paleomagnetismo con sus distintas aplicaciones para el desarrollo de las geociencias en Nicaragua.



Figura 1. Fotos que muestran la obtención de muestras para estudios paleomagnéticos, a) Colección de muestra de depósitos piroclásticos, b) Obtención de muestras de rocas intrusivas con perforadora de combustión.

Durante la estancia realizada por los colegas nicaragüenses en México se realizaron múltiples actividades, como: participación en clases con estudiantes del posgrado de Ciencias de la Tierra; aprendizaje para el uso de equipos del laboratorio de paleomagnetismo y magnetismo de rocas; análisis de resultados; y participación en trabajos de campo (técnicas de campo para la identificación de afloramientos geológicos con fines de estudio paleomagnético y el muestreo de los mismos), como se muestra en la Figura 1. En dicho trabajo de campo, se recolectaron muestras de tres formaciones geológicas ubicadas en Huajuapán de León en el estado de Oaxaca, entre el complejo Acatlán y la formación Ayuquila, donde se muestrearon 19 sitios de la formación sedimentaria La Mora (muestreo paleomagnético a detalle), dos sitios para la formación volcánica Diquiyú, así como ocho sitios del intrusivo granítico Chilixtlahuaca. Asimismo, se realizó el muestreo

en algunos flujos del campo volcánico Chichinautzin ubicados en la faja volcánica Trans-Mexicana, específicamente al sur de la Ciudad de México, dentro del estado de Morelos.

Las muestras fueron recolectadas y transportadas al Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica (UNAM). De dichas muestras se pretenden obtener resultados de propiedades magnéticas, análisis de paleodirecciones (i.e. paleolatitud y rotaciones) y estudios de paleointensidad (de ser factible); con la finalidad de entender la dinámica cortical de las unidades geológicas más antiguas (Triásico–Jurásico), reconociendo así la evolución tectónica de la región. Cabe mencionar que dichas metas también han sido planteadas para las muestras colectadas en Nicaragua. Asimismo, las muestras volcánicas obtenidas de Chichinautzin, serán objeto de análisis para estudiar las variaciones del campo geomagnético menores a 5 Ma.

Entre las actividades realizadas por los investigadores nicaragüenses durante su estancia en México se pueden mencionar:

1. Charlas presenciales del curso de Paleomagnetismo con estudiantes del Posgrado en Ciencias de la Tierra impartidas por el doctor Luis M. Alva Valdivia del Instituto de Geofísica.
2. Lectura y discusiones de artículos científicos de la geología de México y Centroamérica con el maestro en ciencias Bernardo Ignacio García Amador.
3. Procesamiento y análisis de muestras Paleomagnéticas en el Laboratorio de Paleomagnetismo con el maestro en ciencias José Antonio González Rangel, lo que incluyó:
 - a. Marcar y cortar muestras paleomagnéticas.
 - b. Medición de magnetización remanente natural (NRM) con el magnetómetro de giro JR5 y JR6 de AGICO.
 - c. Desmagnetización por campos magnéticos alternos para muestras de origen sedimentario, plutónico y volcánico, tanto de México como de Nicaragua.
 - d. Mediciones de susceptibilidad magnética con altas y bajas frecuencias.
 - e. Observaciones de desmagnetización por temperatura con el desmagnetizador térmico TD-48 y TD-24.
 - f. Procesamiento e interpretación paleomagnética de los resultados.
4. Muestreo de rocas en campo en las inmediaciones de Huajuapán de León, Oaxaca, con la enseñanza práctica de:
 - a. El equipo de campo que se utiliza en paleomagnetismo y su manejo (nucleadora de motor de gasolina, brújula tipo Brunton azimutal, y un orientador de precisión modelo Pomeroy).
 - b. Perforar con la nucleadora y la parte del afloramiento donde perforar en las rocas.
 - c. Orientación magnética y solar cuando fue posible.
 - d. Marcado de muestras en campo.

- e. Registro de todos los datos mencionados, así como detalles del afloramiento en la libreta de campo.

Los resultados alcanzados en la estancia realizada en México muestran que los investigadores lograron conocer los principios básicos del paleomagnetismo y discutir sobre su importancia e impacto en las Ciencias de la Tierra y su aplicación en otras áreas del conocimiento, por ejemplo, la arqueología. Asimismo, mantuvieron espacios de relación académica con estudiantes de maestría y doctorado que les permitieron adquirir nuevas experiencias en las diversas aplicaciones del paleomagnetismo y magnetismo de rocas en las geociencias.

Por otro lado, a través de los trabajos de muestreo en campo en las inmediaciones de Huajuapán de León, Oaxaca, se logró fortalecer el conocimiento de las estrategias del paleomagnetismo para el trabajo de campo a fin de resolver problemas geológicos, como el planteado para la formación La Mora y Diquiyú, de edad Triásico-Jurásico y de origen aluvial y volcánico (respectivamente), o del intrusivo de Chilixtlahuaca, de edad Jurásica; esto a través de la preparación y discusión de las áreas de trabajo, con bibliografía previa, elaboración de mapas de muestreo, así como del planteamiento de las hipótesis del problema para el área de estudio; aspectos que no se habían podido concretar en las campañas de campo en Nicaragua. No obstante, y con la finalidad de abarcar todas las estrategias de muestreo en cada tipo de roca, el trabajo realizado en el campo volcánico de Chichinautzín, incorporó la experiencia de trabajar con la obtención de muestras de flujos volcánicos, enriqueciendo así el adiestramiento de las metodologías paleomagnéticas para el trabajo de campo.

Resultados esperados

De las muestras obtenidas en las rocas volcánicas (i.e. flujos de lava y depósitos piroclásticos), intrusivas y sedimentarias, se pretende llevar a cabo diversos experimentos de laboratorio que se pueden subdividir en dos secciones, dependiendo del tipo de roca y área de estudio:

1. Estudios de propiedades magnéticas, que tienen la finalidad de conocer los rasgos termomagnéticos, tamaño de grano y dependencia del mismo con su estado de dominio magnético, así como relaciones estratigráficas y regionales en función de la susceptibilidad magnética, las diferentes fases mineralógicas y su relación con la mineralogía magnética, el análisis del aporte coercitivo de cada componente mineralógica, entre otros estudios.
2. Los estudios de paleodirecciones y paleointensidad, que con base en pruebas experimentales se seleccionarán especímenes adecuados para llevar cabo los procesos de desmagnetización por campos alternos y temperatura ("lavado magnético"), a fin de obtener las direcciones de la magnetización remanente característica (ChRM) para cada sitio de estudio, y proceder al estudio de la paleointensidad de acuerdo a los criterios establecidos en cada metodología,

(i.e. Thellier-Thellier y el protocolo de Multi-espécimen). Lo anterior en conjunto permitirá elaborar un marco para la evolución tectónica de la región, así como establecer datos para el registro de variación secular del campo geomagnético en la zona.



Figura 2. a) Mediciones en Magnetómetro de giro JR5 en el Laboratorio de Paleomagnetismo, b) Obteniendo muestras con la perforadora de rocas en campo, Huajapan de León, c) Corte de muestras en el laboratorio, d) Orientación de las muestras en campo, Huajapan de León.

Los resultados del trabajo de campo realizado en México y Nicaragua, están principalmente enfocados a la realización del análisis de datos de las mediciones de laboratorio, así como de su interpretación y discusión. Esto es, tanto del paleomagnetismo como de las propiedades magnéticas, y específicamente de las muestras obtenidas de las rocas tanto sedimentarias (formación La Mora, Rivas y Brito), volcánicas (formación Diquiyú, piroclastos de los volcánes Momotombo y Masaya) e intrusivos (granito Chilixtlahuaca, batolito de Dipilto). Además, se plantea estudiar la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) tanto de la formación La Mora como del intrusivo Chilixtlahuaca, a fin de reconocer las direcciones de las paleocorrientes en las rocas sedimentarias y la posible deformación en el intrusivo. Lo anterior en conjunto permitirá elaborar un marco geológico de la evolución tectónica para esta región de México.

Los resultados obtenidos de los experimentos, cálculos e interpretación de los datos, serán analizados en conjunto con los colegas nicaragüenses, tanto de las unidades en México como en Nicaragua, permitiendo fortalecer la transmisión de conocimiento del método de paleomagnetismo, a fin de enriquecer esta rama de las geociencias en el desarrollo de problemas geocientíficos en Nicaragua.

Conclusiones

El trabajo de campo realizado en Nicaragua, en colaboración con los investigadores del IGG-UNAN, resultó en una campaña fructífera de enseñanza-aprendizaje. Las muestras obtenidas en campo son potencialmente de gran utilidad para estudios geocientíficos de la región. Sin embargo, aún es necesario completar el análisis de resultados de esta primera campaña de muestreo, a fin de concluir con los estudios paleomagnéticos y de propiedades magnéticas. Para esto sugerimos se realice este análisis final por medio de trabajo conjunto de los dos grupos participantes, compartiendo y discutiendo los resultados de las rocas muestreadas en ambos países. Esto permitirá completar la enseñanza para los investigadores del IGG-UNAN, específicamente en la interpretación final de la problemática del paleomagnetismo para el estudio de la evolución tectónica de las regiones en estudio.

La estancia realizada en México por los colegas nicaragüenses tanto en las campañas de campo, el trabajo de laboratorio, así como en las charlas presenciales, fue fructífera y enriquecedora, sin dejar de mencionar que las muestras obtenidas son potencialmente de gran utilidad para estudios geocientíficos en ambas regiones.

La experiencia de trabajo e intercambio académico dentro de este proyecto financiado por el IPGH (Estudio Paleomagnético de Nicaragua: evolución tectónica y geodinámica del Cretácico al Mioceno), ha sido valiosa tanto para la parte nicaragüense como para la mexicana, la interacción académica y cultural ha permitido fortalecer y estrechar los lazos de colaboración científica entre ambas instituciones, fomentando el desarrollo para la resolución de problemas geocientíficos.

Referencias

- Boschman, L.M.; van Hinsbergen, D.J.J.; Torsvik, T.H.; Spakman, W. and Pindell, J.L., 2014. Kinematic reconstruction of the caribbean region since the early jurassic, *Earth-Science Reviews*, no. 138, pp. 102–136, doi:10.1016/j.earscirev.2014.08.007.
- Campos-Madriral, E.; Centeno-García, E.; Mendoza-Rosales, C.C. y Silva-Romo, G., 2013. "Sedimentología, reconstrucción paleoambiental y significado tectónico de las sucesiones clásticas del Jurásico Medio en el área de Texcalapa, Puebla-Huajuapán de León, Oaxaca: Revisión de las formaciones Ayuquila y Tecamazúchil", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, núm. 30, pp. 24–50.

- Elming, S.A.; Layer, P. and Ubieta, K., 2001. A palaeomagnetic study and age determinations of tertiary rocks in Nicaragua, Central America, *Geophysical Journal International*, no. 147, pp. 294-309, doi:10.1046/j.0956-540X.2001.01526.x.
- Geilert, S.; Freundt, A.; Wörner, G. and Kutterolf, S., 2012. "Geochemical differences between along-arc and across-arc volcanics in west-central Nicaragua", *Journal South American Earth Sci.*, no. 35, pp. 38-50, doi:10.1016/j.jsames.2011.11.004.
- Hodgson, G., "Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua", inédito. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, pp. 1-184.
- Keppie, F., 2013. The Rationale and Essential Elements for the New "Pirate" Model of Caribbean Tectonics. *Geosci. Canada* 40, 9-16.
- Keppie, J.D. y Ortega-Gutiérrez, F., 2010. "1.3-0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): Remnant of an arc/backarc on the northern margin of Amazonia". *J. South Am. Earth Sci.*, no. 29, pp. 21-27, doi:10.1016/j.jsames.2009.07.001.
- Kutterolf, S.; Freundt, A.; Pérez, W.; Wehrmann, H. and Schmincke, H.U., 2007. "Late Pleistocene to Holocene temporal succession and magnitudes of highly-explosive volcanic eruptions in west-central Nicaragua". *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, no. 163, pp. 55-82, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.02.006.
- Morán-Zenteno, D.J.; Caballero-Miranda, C.; Silva-Romo, G.; Ortega-Guerrero, B. and González-Torres, E., 1993. Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, southern Mexico. *Geofísica Int.*, no. 32, pp. 453-473.
- Morán-Zenteno, D.J.; Martiny, B.M.; Solari, L.; Mori, L.; Luna-González, L. y González-Torres, E.A., 2017. "Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico". *Earth-Science Rev. In Press*, doi:10.1016/j.earscirev.2017.01.010.
- Nance, R.D.; Miller, B. V.; Keppie, J.D.; Murphy, J.B. and Dostal, J., 2006. Acatlán Complex, southern Mexico: Record spanning the assembly and breakup of Pangea, *Geology*, no. 34, pp. 857-860, doi:10.1130/G22642.1.
- Ortega-Flores, B.; Solari, L.; Lawton, T.F. y Ortega-Obregón, C., 2014. "Detrital-zircon record of major Middle Triassic–Early Cretaceous provenance shift, central Mexico: demise of Gondwanan continental fluvial systems and onset of back-arc volcanism and sedimentation". *Int. Geol. Rev.*, no. 56, pp. 237-261, doi:10.1080/00206814.2013.844313.
- Ortega-Gutiérrez, F.; Elías-Herrera, M.; Reyes-Salas, M.; Macías-Romo, C. and López, R., 1999. Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections, *Geology*, no. 27, pp. 719-722, doi:10.1130/0091-7613(1999)027<0719:LO ESCC>2.3.CO;2.
- Pindell, J.L., y Kennan, L., 2012. "Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update", in James, K.H.; Lorente, M.A. y Pindell, J.L. (eds.), Geological Society of London, Special Publications, pp. 1-55, doi:10.1144/SP328.1.

- Ratschbacher, L.; Franz, L.; Min, M.; Bachmann, R.; Martens, U.; Stanek, K.; Stübner, K.; Nelson, B.K.; Herrmann, U.; Weber, B.; López-Martínez, M.; Jonckheere, R.; Sperner, B.; Tichomirowa, M.; McWilliams, M.O.; Gordon, M.; Meschede, M. and Bock, P., 2009. "The North American-Caribbean Plate boundary in Mexico-Guatemala-Honduras", *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, no. 328, pp. 219-293, doi:10.1144/SP328.11.
- Rogers, R.D., Mann, P. and Emmet, P.A., 2007. "Tectonic terranes of the Chortis block based on integration of regional aeromagnetic and geologic data", in *Geological Society of America Special Paper*, pp. 65-88, doi:10.1130/2007.2428(04).
- Schettino, A., 2015. *Quantitative Plate Tectonics*, doi:10.1007/978-3-319-09135-8.
- Silva-Romo, G., 2008. Guayape-Papalutla fault system: A continuous Cretaceous structure from southern Mexico to the Chortis block Tectonic implications. *Geology*, no. 36, pp. 75-78. doi:10.1130/G24032A.1
- Silva-Romo, G.; Mendoza-Rosales, C.C.; Campos-Madrigal, E.; Centeno-García, E. and Peralta-Salazar, R., 2015. "Early Mesozoic Southern Mexico–Amazonian connection based on U–Pb ages from detrital zircons: The La Mora Paleo-River in the Mixteca Terrane and its paleogeographic and tectonic implications", *Gondwana Res.*, no. 28, pp. 689-701, doi:10.1016/j.gr.2014.06.005.