

Análisis de la actividad sísmica en el Golfo de Tehuantepec (Fosa Mesoamericana, México): terremotos de magnitudes elevadas en relación con fallas normales, réplicas e implicaciones sismotectónicas

Analysis of the seismic activity in the Tehuantepec Gulf (Middle America Trench, Mexico): high-magnitude earthquakes related to normal faults, aftershocks and seismotectonics implications

David Amador Luna, Francisco M. Alonso-Chaves, Carlos Fernández y Encarnación García-Navarro

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Bulevar de las Artes y las Ciencias, s/n. 21007, Huelva.
davidamadorluna@gmail.com, alonso@uhu.es, fcarlos@uhu.es, navarro@uhu.es

ABSTRACT

This work describes the seismic series occurred between September 2017 and February 2018 in Mexico, which includes an earthquake of $M_w=8.2$, and another two of magnitude greater than 7.0. The detailed study of their focal mechanisms, and the spatial distribution of the main earthquakes and their aftershocks, allow a seismotectonic interpretation of this seismic activity. It is here suggested that, in the general setting of the subduction of the Cocos Plate under the North America Plate, close to their triple junction with the Caribbean Plate, the subducting slab is subjected to a strong stretching below the Tehuantepec Gulf (probably due to a slab roll back process or to a great activity of the slab pull force), which gave rise to the main event. The subsequent seismic activity that affected the North America Plate would have been triggered by that main event.

Key-words: seismic activity, subduction zone, seismotectonics, Tehuantepec Gulf, Mexico.

RESUMEN

En este trabajo se describe la serie sísmica producida entre septiembre de 2017 y febrero de 2018 en México, que incluye un terremoto de $M_w=8.2$ y otros dos de magnitud superior a 7.0. El estudio detallado de los mecanismos focales de los eventos analizados, de la distribución espacial de los focos de los terremotos principales y de sus réplicas permite una primera interpretación sismotectónica. Se sugiere que, en el contexto de la subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, cerca de la unión triple con la placa Caribe, el slab subducente estaría sometido en la zona del Golfo de Tehuantepec a un fuerte estiramiento (quizá debido a un proceso de slab roll-back o a una gran actividad de la fuerza de slab pull), dando lugar al evento principal. La actividad sísmica producida posteriormente en la placa Norteamericana habría estado desencadenada por dicho evento principal.

Palabras clave: actividad sísmica, zona de subducción, sismotectónica, Golfo de Tehuantepec, México.

Geogaceta, 64 (2018), 23-26
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de febrero de 2018
Revisión: 20 de abril de 2018
Aceptación: 25 de abril de 2018

Introducción

Terremotos de grandes magnitudes ocurren en las zonas de subducción (Ambraseys y Adams, 1996), siendo frecuente que dicho parámetro alcance valores superiores a 8 (McNally *et al.*, 1986). En la zona de subducción de América Central al oeste de México, desde principios del siglo XX hasta la actualidad, se han registrado 5 terremotos con magnitudes superiores a 8.0, incluido el ocurrido recientemente (8 de septiembre de 2017, horario UTC). Posteriormente, se han producido en México dos nuevos terremotos con magnitudes superiores a 7 (Fig. 1). A principios del siglo XX, de abril de 1902 a enero

de 1903, ocurrieron tres eventos con magnitudes comprendidas entre 7.5 y 7.7. Otros terremotos con magnitudes comprendidas entre 7.2 y 7.3 se han producido en México en 1970, 1993 y 2012. Además del terremoto de Guatemala de 1976 con $M_s=7.5$ (White y Harlow, 1993).

En este trabajo se analiza la actividad sísmica en el Golfo de Tehuantepec (Océano Pacífico, México) y en las áreas de alrededor, a lo largo del mes de septiembre de 2017 y febrero de 2018. Las series sísmicas estudiadas se inician con un terremoto de alta magnitud ($M_w=8.2$) con epicentro cercano al límite entre las placas Norteamericana y Caribe. Dicho sismo está asociado a la propa-

gación de una fractura (falla normal de alto ángulo de buzamiento) en el bloque de muro de una zona de subducción (*slab* de la placa de Cocos). Terremotos posteriores -de magnitudes superiores a 7- como los registrados en Puebla y Oaxaca (Fig. 1), así como erupciones volcánicas coincidentes en el tiempo con el incremento de la actividad sísmica asociada a grandes eventos sísmicos se producen en la vertical de la placa Norteamericana. La distribución heterogénea de la actividad sísmica entre las placas Norteamericana y Caribe permite inferir la geometría arqueada de un límite tectónico de orden mayor que separa dichas placas hasta una profundidad mínima de 70 km.

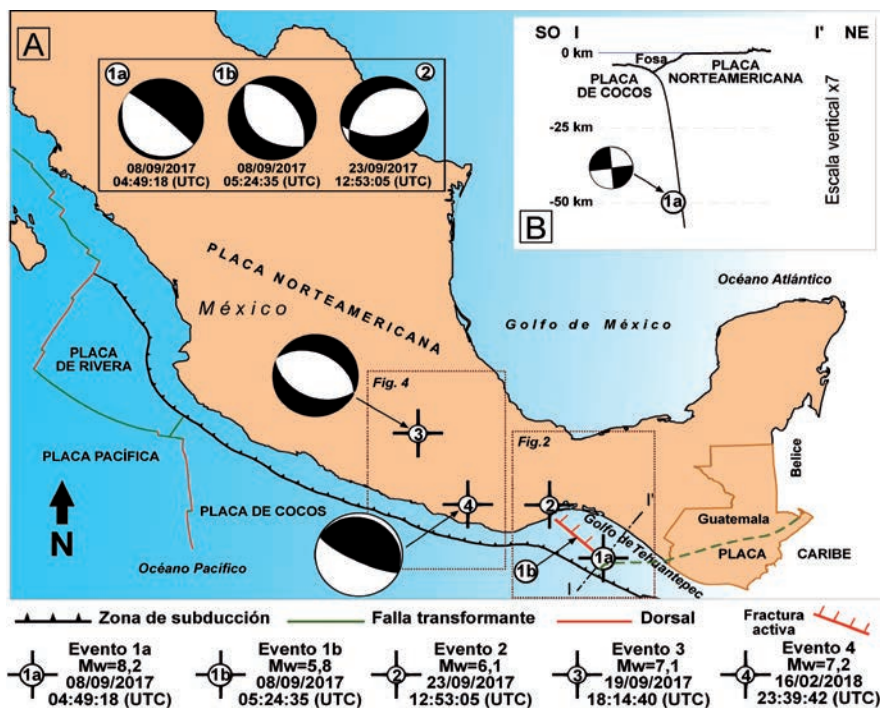


Fig. 1.- A) Esquema tectónico regional de América Central y parámetros focales de los eventos sísmicos de mayor magnitud de septiembre-2017 a febrero-2018. B) Sección transversal a la zona de subducción (localización en A, sección I-I', sección vertical del corte). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- A) General tectonic sketch of Central America and focal mechanisms of the earthquakes with largest magnitudes from the period September, 2017 to February, 2018. B) Cross-section of the subduction zone (location in A, section I-I', in vertical section). See color figure in the web.

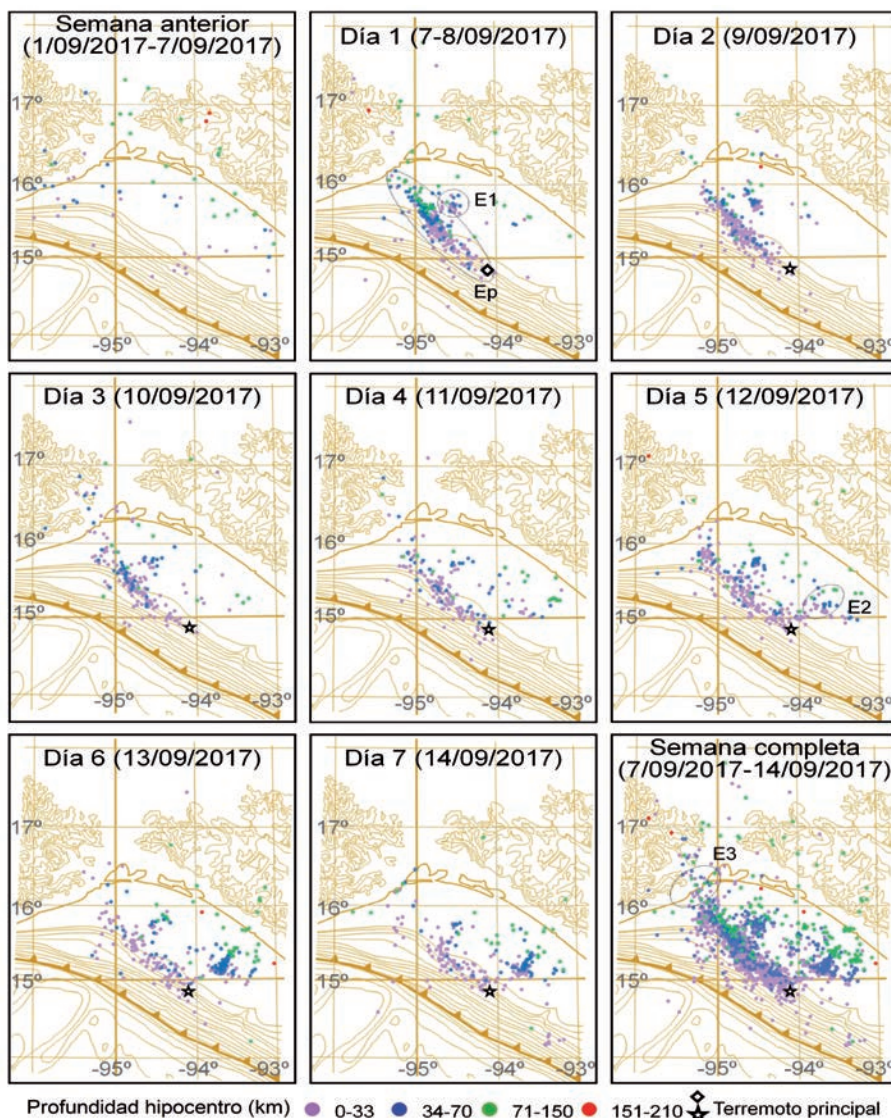
oceánica. En la zona de abombamiento externo de la propia fosa (placa de Cocos) la litosfera oceánica está en extensión y se han identificado fallas normales que buzanan hacia la fosa. La profundidad de la fosa oceánica varía según las secciones transversales que se consideren, si bien alcanza las máximas profundidades en el extremo suroriental. En concreto, el fondo oceánico de la fosa en su parte más occidental está a 5100 m de profundidad, y en el extremo oriental

La zona de subducción Mesoamericana

Una zona de subducción con más de 3500 km de longitud se extiende desde el sur del Golfo de California hasta las costas de Panamá (LeFevre, 1990). En este trabajo se ha investigado la actividad sísmica regional de México, entre los meridianos 93°O y 100°O (Fig. 1A), posterior a uno de los eventos sísmicos de mayor magnitud registrados instrumentalmente (véanse las figuras 2, 3 y 4). La sismicidad regional está relacionada con la subducción de la placa de Cocos dirigida hacia el NE hundiéndose simultáneamente debajo de las placas de América del Norte y Caribe (Figs. 1 A y B). La placa de Cocos desaparece en superficie en la Fosa de América Central. La deflexión (sinistrorsa) de la fosa oceánica llega a ser del orden de 30°. Dicha fosa oceánica tiene un perfil topográfico transversal asimétrico con una mayor pendiente en el margen interno (Fig. 1B). En el bloque de techo de la zona de subducción (placa Norteamericana) se concentra una importante actividad sísmica superficial, relacionada con fallas inversas de bajo ángulo. La dirección de dichas fallas es aproximadamente paralela a la fosa

Fig. 2.- Sismicidad en el Golfo de Tehuantepec del 1 al 14 de septiembre de 2017. Obsérvese la aparición progresiva de diversos enjambres sísmicos a partir del terremoto principal de Mw=8.2. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Seismicity in the Tehuantepec Gulf. Note the progressive occurrence of various seismic swarms from the main shock with Mw=8.2. See color figure in the web.



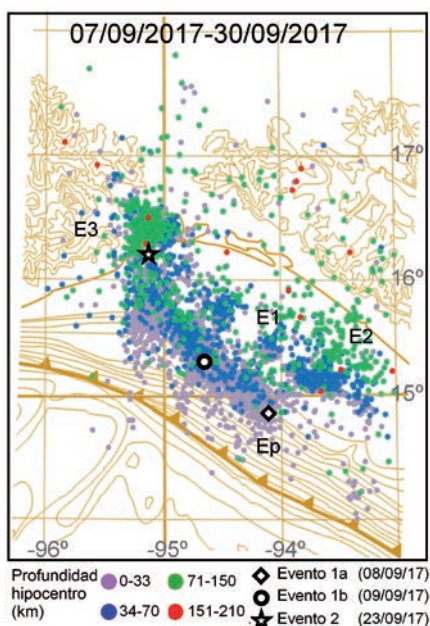


Fig. 3.- Actividad sísmica en el Golfo de Tehuantepec del 7 al 30 de septiembre de 2017. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Seismic activity in the Tehuantepec Gulf from September 7 to 30, 2017. See color figure in the web.

de la misma el fondo se encuentra a 6400 m de profundidad. La dirección de desplazamiento de la placa de Cocos respecto a las placas del bloque de muro es hacia el NNE y la velocidad de convergencia es superior a 60 mm/año.

Actividad sísmica y parámetros focales

El terremoto del 8 de septiembre de 2017 tuvo su epicentro en el Océano Pacífico, en el Golfo de Tehuantepec (al SO de Chiapas), a las 04:49:18 h del 8 de septiembre (UTC) (a las 23:49:18 h, hora local en México, del día 7 de septiembre). El epicentro está a 55 km al NE de la fosa (véase evento 1a en la Fig. 1). El hipocentro ha sido establecido por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de México a una profundidad de 45.9 km. El mecanismo focal del sismo ha permitido identificar dos planos nodales, que nombrados según la regla de la mano derecha son: $311^{\circ}/84^{\circ}$ y $171^{\circ}/7^{\circ}$ (Fig. 1); interpretándose el primero de ellos como la fractura responsable del evento principal (evento 1a). Se trata de una falla normal con un desplazamiento casi en buzamiento (-95°) y hundimiento del bloque noreste. La dirección del plano de la falla activa es subparalela a la traza de la fosa, con una diferencia angular entre ambos elementos de 8° . Destaca el fuerte buzamiento de la falla normal de 84° NE, que hunde en el

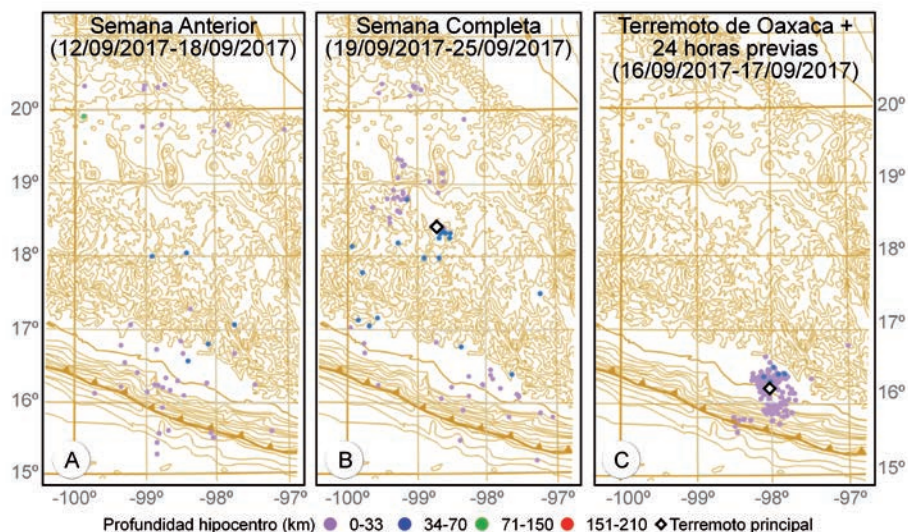


Fig. 4.- A y B) Sismicidad previa y posterior al terremoto de Puebla (México) de $M_w=7.1$, ocurrido el 19/09/2017. C) Sismicidad en relación con el terremoto de fecha 16/02/2018 de Oaxaca (México) con $M_w=7.2$. Sólo se representan sismos con $M>3$. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- A) and B) Seismic activity before and after the Puebla (Mexico) earthquake of $M_w=7.1$, occurred on 09/19/2017. C) Seismicity associated with the Oaxaca (Mexico) earthquake of $M_w=7.2$, occurred on 02/16/2018. Only earthquakes with $M>3$ are plotted. See color figure in the web.

mismo sentido que la zona de subducción. El buzamiento de la zona de subducción varía progresivamente en los primeros 50 kilómetros de profundidad, llegando a alcanzar un valor próximo a los 40° . La distribución de la actividad sísmica inmediatamente posterior, ha permitido establecer las dimensiones del segmento activo de la falla, con una longitud de ruptura del orden de 150 km a lo largo de la dirección del plano de falla (Figs. 1 y 2). El máximo desplazamiento de la falla ha sido del orden de 9 m, de acuerdo con las estimaciones realizadas por el USGS (United States Geological Survey: 8 de septiembre de 2018). Desde el epicentro (en las proximidades de la falla transformante que limita las placas Norteamericana y Caribe) la fractura se propagó hacia el NO (Figs. 1, 2 y 3). Al evento principal (evento 1a) le siguieron numerosas réplicas en las horas posteriores, llegando a alcanzar en algunos casos profundidades próximas a los 210 km (Figs. 2 y 3). Varias réplicas, ocurridas algo más de 30 minutos después, tuvieron magnitudes de 5.8 y 6.1 (es el denominado en este trabajo como evento 1b, por la proximidad temporal al evento principal). Dichas réplicas también se produjeron en fallas normales con planos de cizalla que buzaban hacia el NE; si bien, la inclinación del plano de fractura fue menor (véase el mecanismo focal correspondiente en la figura 1). En la figura 2 se puede observar que en los días siguientes las réplicas definieron varios enjambres sísmicos: el principal de ellos tiene

una dirección NO-SE (identificado con las siglas Ep en la figura 2), y simultáneo con éste, se localiza un nuevo enjambre al norte del anterior (E1). El cuarto y quinto día posterior al evento principal se empieza a formar un nuevo enjambre al NE del foco principal. Y finalmente, un tercer enjambre se produce en el extremo noroccidental de la zona de fractura principal. Este último enjambre se inicia el 23 de septiembre de 2017 después de que se produzca un nuevo sismo en el estado de Oaxaca de $M_w=6.1$. Dicho sismo (evento 2) está relacionado con el movimiento de una falla normal de dirección NE-SO y buzamiento medio hacia el SE (Figs. 1 y 3). Paralelamente a la actividad sísmica en el Golfo de Tehuantepec se producen otros terremotos de magnitud >7 . El primero de ellos, de $M_w=7.1$ y a una profundidad de 57 km, ocurre el día 19 de septiembre de 2017, con epicentro en las proximidades del límite entre los estados de Puebla y Morelos (Figs. 1 y 3). Dicho terremoto reactivó el vulcanismo en la zona cercana al epicentro. El mecanismo focal establecido por el SSN (Servicio Sismológico Nacional de México) permite interpretar tal sismo (evento 3) como debido a una falla normal de dirección NO-SE. Finalmente, un terremoto superficial de $M_w=7.2$ ocurrió en la parte occidental del estado de Oaxaca el 16 de febrero de 2018 (evento 4). A partir de los datos facilitados por el SSN se ha podido relacionar dicho evento con una falla inversa de bajo ángulo, la cual es interpretada como una fractura pa-

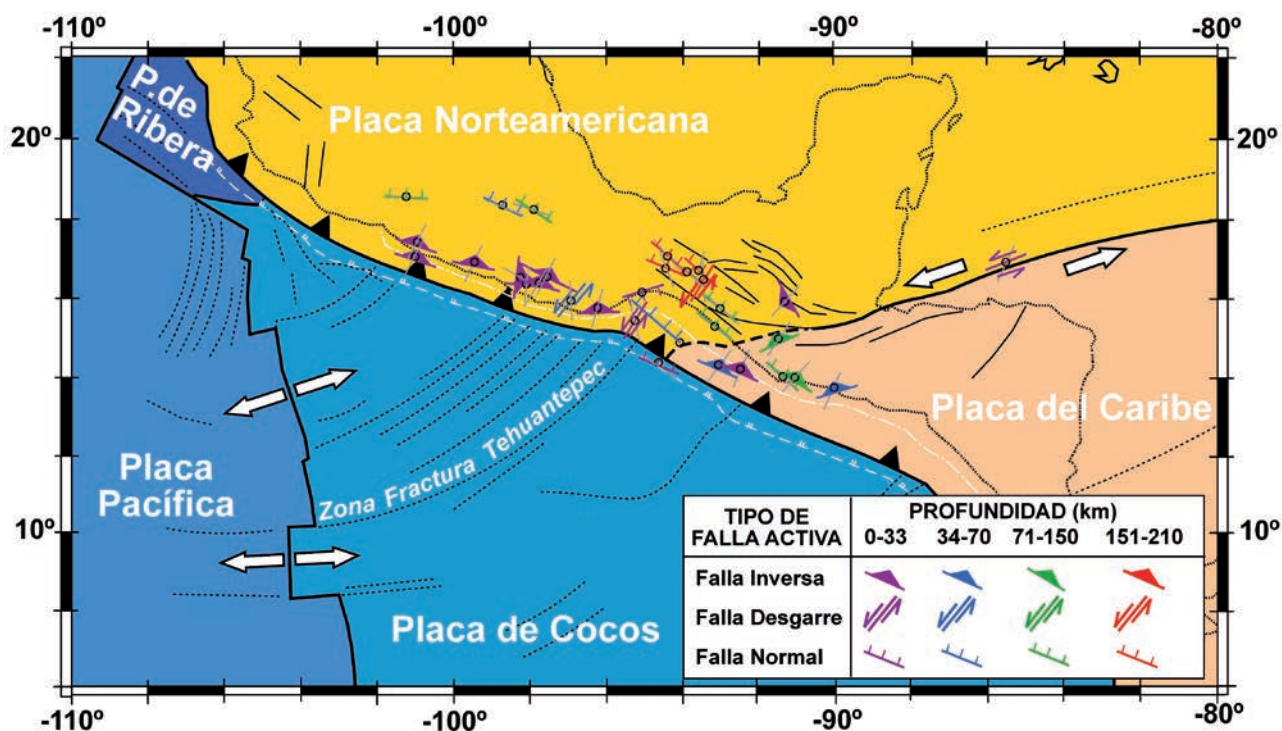


Fig. 5.- Mapa sismotectónico en relación con la subducción de la placa de Cocos. Fallas normales de alto ángulo acomodan el colapso gravitacional de la litosfera oceánica (Placa de Cocos). Fallas de desgarre sinistrorsas acomodan la deformación en el bloque de techo a distintos niveles de profundidad. La sismicidad superficial se relaciona con fallas inversas, la mayoría de ellas de bajo buzamiento. Ver figura en color en la web.

Fig. 5.- Seismotectonic map depicting the subduction of the Cocos Plate. High-angle, normal faults accommodate the gravity collapse of the oceanic lithosphere (Cocos Plate). Sinistral strike-slip faults allow deformation of the overriding plates at distinct depths. Shallow seismicity is related to reverse faults, most of them shallowly dipping. See color figure in the web.

ralela al cinturón de cabalgamientos que se produce en el prisma de acreción (bloque de techo: Placa Norteamericana) en las proximidades de la fosa oceánica.

Interpretación y conclusiones

La actividad sísmica de finales de 2017 y principios de 2018 puede interpretarse en el marco sismotectónico regional en relación con la subducción de la litosfera oceánica de la placa de Cocos (Fig. 5). Dicha subducción, a cierta profundidad (alrededor de 45-50 km), implica la reactivación de discontinuidades mecánicas de grandes dimensiones. Fallas normales que existían en la zona externa de la fosa pueden haber rotado en profundidad (alrededor de 30-40°), junto con la litosfera oceánica que subduce. Así se puede explicar que fallas normales (algunas de ellas de alto ángulo, en ocasiones con buzamientos casi subverticales) paralelas a la fosa Mesoamericana se reactiven y acomoden el colapso gravitatorio de la litosfera oceánica, que podría estar reflejando un proceso de *slab roll-back* o gran intensidad de la fuerza de tirón de la placa (*slab pull*). Por otra parte, datos recientes basados en el análisis geomorfológico de la zona de Chiapas y en las

Montañas Mayas, así como de GPS, son compatibles con el marco sismotectónico expuesto en este trabajo (véase Andreani y Gloaguen, 2016). En definitiva, se sugiere la ruptura de una raíz orogénica que se desprende gravitacionalmente, dado el carácter extensional de las fallas analizadas. En este contexto, terremotos de magnitud excepcionalmente alta ($M_w=8.2$) asociados a fallas normales podrían explicarse.

La mayor parte de la actividad sísmica posterior, de una manera u otra, podría relacionarse con el evento principal, extendiéndose a centenares de kilómetros de distancia del evento principal que puede ser interpretado como el desencadenante de otros terremotos importantes en la región. Así se explicaría también el patrón de distribución temporal que ocurrió a principios del siglo XX en México. El resultado es una distribución heterogénea de la actividad sísmica que refleja las diferencias mecánicas de la litosfera, concentrándose preferentemente en la vertical de la placa Norteamericana. De manera tentativa, se sugiere como un posible criterio geofísico a considerar la diferente respuesta mecánica a uno y otro lado del límite transpresivo entre las placas Norteamericana y Caribe (Fig. 5).

Agradecimientos

Los autores agradecen la información facilitada por el Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) a través del catálogo sísmico de su web así como la información sísmica ofrecida por el United States Geological Survey (USGS).

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos así como la gestión de los editores.

Referencias

- Ambraseys, N.N. y Adams, R.D. (1996). *Geophysical Journal International* 127, 665-692.
- Andreani, L. y Gloaguen, R. (2016). *Earth Surface Dynamics* 4, 71-102.
- LeFevre, L.V. (1990). *I. A seismo-tectonic study of the Middle America Subduction Zone. II. Lithosphere and upper mantle structure of the Canadian Shield and Eastern North America*. Tesis Doctoral, California Institute of Technology.
- McNally, K.C., González Ruiz, J.R. y Stolte, C. (1986). *Geophysical Research Letters* 13, 585-588.
- White, R.A. y Harlow, D.H. (1993). *Bulletin of the Seismological Society of America* 83, 1115-1142.