

¿PUEDE OCURRIR UN MEGATERREMOTO EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN CENTROAMERICANA?

Aarón Moya¹

Resumen: Los terremotos que han ocurrido producto de la subducción de la Placa Cocos bajo la Placa Caribe a lo largo de la región centroamericana han tenido siempre una magnitud inferior a M 8.0. El registro histórico no muestra que eventos mayores se hayan producido. Sin embargo, esto no significa que la zona no tenga el potencial de generar un evento de esa magnitud a la luz de los recientes acontecimientos de los terremotos de Sumatra-Andaman del 2004 y de Tohoku, Japón, del 2011. En este estudio, se hace una revisión de los conceptos sismológicos que se han utilizado para descartar la ocurrencia de un megaterremoto frente a las costas de América Central. Se llama la atención para que se realicen estudios paleosismológicos que den claves sobre el comportamiento de eventos pasados en la región.

Palabras clave: América Central, fosa mesoamericana, megaterremoto, subducción, teoría de la brecha sísmica.

CAN A MEGATHRUST EARTHQUAKE OCCUR IN THE CENTRAL AMERICAN SUBDUCTION ZONE?

Abstract: Earthquakes of magnitude lower than M8.0 have commonly occurred along the Mesoamerican Trench where the Cocos plate subducts under the Caribbean plate. The historical record shows that no major events have occurred in the region. However, this does not mean that the area does not have the potential to generate an earthquake of this magnitude or greater in the light of recent events in the Sumatra-Andaman earthquake of 2004 and Tohoku, Japan, in 2011. In this study, we have done a review of seismological concepts that have been used to rule out the possibility for the occurrence of such an event off the coast of Central America and call for the attention to conduct paleoseismology studies in the region in order to find out clues from past events.

Keywords: Central America, megathrust earthquake, Mesoamerican trench, seismic gap theory, subduction.

INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de los megaterremotos de Sumatra del 26 de diciembre del 2004 (M 9.1), Maule en Chile del 27 de febrero del 2010 (M 8.8) y Tohoku en Japón del 11 de marzo del 2011 (M 9.0) se han caracterizado por el enorme grado de destrucción a la infraestructura y el cuantioso número de víctimas que han cobrado. La percepción general de la población es de que en estos años la actividad sísmica se ha incrementado.

En un estudio por Shearer y Stark (2012), se muestra que esa percepción no corresponde con la realidad. Según los autores, los análisis estadísticos del catálogo mundial no respaldan la existencia de grupos de megaterremotos en el tiempo. Además de ello, señalan que no se ha propuesto un mecanismo físico convincente que pudiera favorecer la ocurrencia de grupos de megaterremotos a nivel global. Los sismos suceden de una forma más o menos aleatoria (Rajendran, 2013) y esta aleatoriedad se ha mantenido inalterable, aún con los recientes megaterremotos. Es decir, los sismos pequeños ocurren en mayor número que los grandes. La percepción de que estos sismos son de alguna manera anómalos se debe a dos razones principales según lo explica Beroza (2012):

1. La ocurrencia de los sismos en zonas densamente pobladas y sumamente vulnerables, genera un mayor impacto en la sociedad civil que si un evento ocurriera en un sitio escasamente habitado. Beroza (2012) cita el caso de Haití en el que a pesar de ser un sismo de magnitud 7.0, causó la muerte de más de 200.000 personas primero porque el epicentro del sismo se encontraba cerca de la capital y segundo porque la

¹ Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Email: cesar.moya@ucr.ac.cr

mayoría de las edificaciones eran sumamente vulnerables.

2. El impacto social y económico de un sismo en un mundo globalizado como el presente. En este caso, Beroza (2012) pone de ejemplo las repercusiones que ocasionó el problema de la planta nuclear de Fukushima en Japón al haber hecho que en muchos países que usan también energía nuclear decidieran cerrar sus fábricas o ajustar sus políticas hacia medios alternativos. Todo esto fue generado luego del sismo, impactando el quehacer y pensamiento de las personas y por tanto haciéndolas más conscientes de estos fenómenos.

El mapa de la Figura 1 fue creado usando los datos del registro del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) a partir del año 1900. En la figura aparecen los sismos con magnitudes mayores a los 8.0 grados a nivel mundial. Los sismos mayores a 9.0 han sido tan solo cuatro en poco más de 100 años: Chile en 1960, Alaska en 1964, Sumatra-Andaman en 2004 y Tohoku, Japón en 2011. El número de terremotos mayores a 8.0 ha sido de 92. Si consideramos un valor de incertidumbre de 0.1 grado en la estimación de la magnitud de estos megaterremotos (o sea, si incluimos como sismos de 8.0 aquellos que tuvieron magnitud entre 7.9 y 8.1), el número que nos da es de 122 eventos. En ambos casos, se tiene que un sismo de grado 8.0 o superior sería esperable en alguna parte del mundo en al menos el transcurso de un año (Kanamori y Brodsky, 2004).

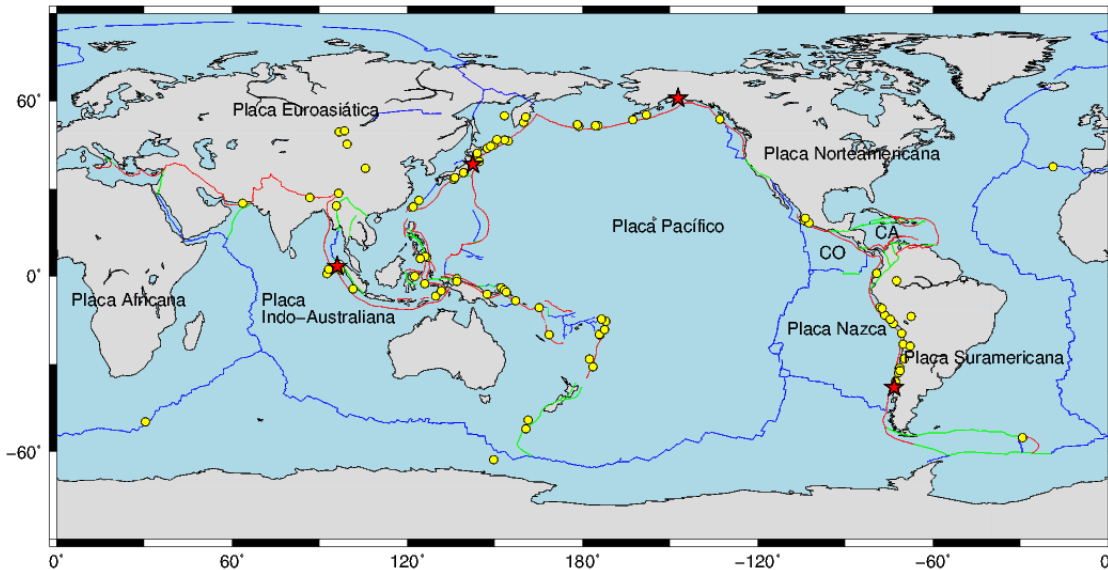


Figura 1: Distribución mundial de los eventos sísmicos de magnitud mayor a 8.0 (círculos amarillos) y 9.0 (estrellas rojas) entre los años 1900 al 2015 según el USGS. Las líneas de color muestran la ubicación de los bordes de las principales placas tectónicas. Las zonas de subducción muestran como trazas de color rojo, las zonas de las dorsales en color azul y las zonas de transformación con color verde. Se muestran las principales placas tectónicas. CO: Placa Cocos, CA: Placa Caribe.

Según la Figura 1, con algunas excepciones, estos eventos de magnitud superior a 8.0 son mucho más frecuentes en las zonas de choques de placas asociados al proceso de subducción, proceso del cual la región centroamericana como un todo, y Costa Rica en particular, forma parte.

A pesar de que no existe ningún tipo de documentación histórica sobre la ocurrencia de algún evento de M 8.0 en la región centroamericana, diversas teorías que trataban de explicar la ausencia de estos eventos en entornos como el centroamericano se han tenido que replantear en los últimos años. A la luz de los nuevos descubrimientos, particularmente del sismo de Sumatra-Andaman en el 2004 y Tohoku, Japón, en el 2011, se hace necesario analizar con mayor detenimiento el entorno de tectónico de la región. Paralelo a esto, los estudios paleosismológicos en los últimos años han develado sismos de gran magnitud en zonas que se consideraban asísmicas como Cascadia al oeste de Estados Unidos y Canadá (Atwater et al., 2003; Sawai et al., 2012, Stein et al., 2012) e incluso sectores de la Falla de San Andrés que se consideraban de bajo potencial sísmico (Akciz et al., 2010).

SUMATRA-ANDAMAN Y TOHOKU

Según el registro del USGS, desde 1964 hasta el 2004, no se presentaba ningún sismo de magnitud superior a los 8.6 grados. Sin embargo, luego del 2004 sucedieron los eventos de Sumatra-Andaman 2004, M 9.1 seguido por otro gran sismo en el 2005 de M 8.6 y en el 2007 de 8.5 frente a la isla de Sumatra. Luego en el año 2010 sucedió el sismo de Maule en Chile de M 8.8 seguido en el 2011 por el de Tohoku, Japón, de M 9.0 y en el Océano Indico en el 2012 de M 8.6 y réplica de M 8.2. La ocurrencia de estos eventos a la luz del conocimiento actual en sismología, ha hecho que se cuestionen ciertas teorías que se tenían sobre los mismos. Por ejemplo, aunque los sismos mayores a M 8.0 ocurren en promedio una vez al año (Kanamori y Brodsky, 2004), en el 2004, previo al gran terremoto de Sumatra, un evento de 8.1 ya había ocurrido tan solo 3 días antes (Kennet et al., 2014). En el 2007 ocurre un evento de M8.0 frente a Perú, un mes después el de 8.5 en Sumatra. Los eventos de Chile del 2014-2015 de Iquique de M 8.2 e Illapel de M 8.3 ocurrieron tan solo 18 meses aparte, pero a lo largo de una misma zona de subducción.

En un estudio por Ruff y Kanamori (1983), se planteaba la hipótesis de que los megaterremotos sucedían en zonas en las cuales la edad geológica de la corteza tenía que ser joven y también la velocidad de movimiento de las placas debía ser alta. Es decir, se correlacionaba la ocurrencia de megaterremotos con la edad de la corteza oceánica y la velocidad a que esta se subducía. Se pensaba que la corteza oceánica vieja, al ser más gruesa que la joven, pesaba más y por tanto, se subduciría más fácilmente. Una consecuencia de esta suposición es que existiría entonces poca área de contacto o acople entre las placas. El poco acople evitaría que se generara un terremoto gigante ya que a mayor área de contacto, mayor el momento sísmico (Aki, 1966).

La corteza joven, por el contrario, era más boyante por lo que se dificultaba su inserción en el manto y esto ocasionaría que el área de contacto entre las placas fuera más grande. El acople por tanto sería mayor que en el caso de la corteza oceánica vieja y esto unido a una alta velocidad de convergencia, resultaría en la generación de megaterremotos.

Sin embargo, el terremoto de Sumatra-Andaman del 2004 ocurrió precisamente en una zona donde la edad de la corteza oceánica en la zona de ruptura hacia el sur era relativamente joven, unos 50 millones de años, pero bastante mayor al norte, unos 90 millones de años (Kanamori, 2006). Por otro lado, el terremoto de Tohoku del 2011 ocurrió en una región que también se ubicaba en una zona donde la corteza oceánica era vieja (Stein y Okal, 2011) con lo cual nuevamente se cuestionaba lo propuesto por Ruff y Kanamori (1983).

Stein y Okal (2011) hacen referencia a que con los modernos equipos de medición de movimiento de la corteza por GPS y de datos paleosísmicos de grandes eventos del pasado, ha sido posible tener un panorama más claro que muestra que no hay relación entre la edad de la corteza oceánica y la velocidad de convergencia de las placas. Rajendran (2013) indica que la ocurrencia de los grandes sismos parece más bien ser irregular y que lo sucedido con los eventos del 2004 y 2011 refleja nuestra falta de comprensión sobre el pasado sísmico de las zonas de subducción.

OCEANO INDICO

Otro de los últimos eventos sorprendentes fue el doblete del Océano Indico del 2012. Ese año, un sismo de M 8.6 ocurrió dentro de la Placa Indo-Australiana. Este evento fue seguido en tan solo 2 h por otro de 8.2 a lo largo del mismo sistema de fallas (Duputel et al., 2012). Estos sismos son importantes por dos razones principales: 1- ocurrieron dentro de una placa tectónica, cuando por lo general estos megaterremotos se creían que estaban asociados a zonas de choques entre placas, 2- porque están dentro de los más grandes registrados instrumentalmente en fallas de rumbo (Gahalaut, 2012).

Meng et al. (2012) calcularon la zona de ruptura en unos 500 km de largo por 40 km de profundidad. Sin embargo, Gahalaut (2012) señala que el espesor de la corteza oceánica en la región es de escasos 10 km, por lo que probablemente la ruptura de estos megaterremotos se pudo haber extendido al manto superior (Singh et al., 2008) o también que la fuerza del material en la región fuera muy alta para poder almacenar tales esfuerzos en la corteza oceánica. La zona podría más bien marcar el límite en el que a largo plazo la placa Australiana se separe de la placa Indica (Delescluse et al., 2012; Yue et al., 2012). El tamaño extraordinario de estos eventos parece haber sido originado por la ruptura de al menos cuatro segmentos de fallas, algunas de ellas ortogonales (Meng et al., 2012; Yue et al., 2012).

Evidencia paleosismológica recabada por Akciz et al. (2010) indica que los terremotos al sur de California han roto segmentos de falla que se pensaba que no contribuirían al tamaño de un eventual sismo debido a la ausencia de eventos fuertes en tiempos históricos. No ha sido entonces sorpresa que el Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3) haya señalado que la probabilidad de que California experimente un sismo de hasta magnitud 8.0 se haya incrementado de 4.7% a 7.0 %. Esto se ha debido a que ahora se considera que múltiples segmentos de distintos tamaños de fallas puedan llegar a formar parte de la ruptura ante un eventual sismo.

BRECHA SÍSMICA

La región centroamericana posee las dimensiones necesarias para que un rompimiento de varios cientos de kilómetros se pueda dar. Amparados al concepto de la teoría de la brecha sísmica (McCann et al., 1979), hemos supuesto que un terremoto tiene bajas probabilidades de romper una zona en la que la energía sísmica ya ha sido liberada por un evento anterior. También, a raíz de la misma teoría, se ha asumido que las zonas sísmicas se encuentran segmentadas. Esto es, que a lo largo del tiempo, todos los segmentos, por ejemplo en una zona de subducción, se deben haber movido en igual cantidad suponiendo un modelo predecible de comportamiento sísmico.

Sin embargo, el sismo de Sumatra del 2014 abarcó zonas que ya habían sido rotas por otros eventos anteriores en 1881 (M 7.9) y 1941 (M 7.7) (Shearer y Bürgmann, 2010; Rajendran, 2013). Lay (2011) señala que el sismo de Chile del 2010 rompió segmentos que se suponía debían tener poca energía acumulada porque ya antes habían sido rotos por sismos en 1928 y 1985. Lay (2012), señala que el terremoto de Tohoku rompió también en zonas donde en el 2005 otros terremotos ya habían ocurrido (y por tanto se suponía que habían liberado los esfuerzos), contribuyendo al tamaño del evento del 2011.

Más recientemente en Chile, Hayes et al. (2014) indican que el terremoto de Iquique del 2014 parece que no liberó toda la energía que se esperaba ya que en la zona se debía presentar un evento de M 8.8 similar al de 1877. Por tanto, indican que es probable que se presente un nuevo megaterremoto en la región norte del país.

Kanamori (2006) y Bilek (2009) mencionan que para el terremoto ocurrido en 1906 de M 8.8 a lo largo de Ecuador y Colombia, se presentaron otros tres eventos grandes en 1942, 1958 y 1979. Todos se ubican dentro de la zona que ya había sido rota por el terremoto de 1906. En Japón, a lo largo de la zona de subducción al sur del país, este comportamiento ya había sido observado por Ando (1975). El autor identifica cuatro segmentos que han generado grandes sismos a través de la historia, el mayor de estos terremotos sucede cuando los cuatro segmentos rompen de manera simultánea.

Kagan y Jackson (2011) sugieren que los grandes terremotos pueden romper dentro de la zona focal que ha sido rota con anterioridad y citan como ejemplo eventos de la secuencia del terremoto de Japón del 2011. Particularmente interesante es el caso del sismo de M 7.4 de 1978 frente a Sendai, Japón, cuya misma zona fue rota nuevamente en el 2011 (Normile, 2011).

Analizando la zona de ruptura del terremoto de Tohoku, Tormann et al. (2015) plantean la hipótesis de que la ocurrencia de ese evento puede no ser característico en el tiempo y el espacio. Señalan además que la zona parece haberse recuperado sorprendentemente rápido según el cálculo del valor de b y que esto haría que partes de la misma pudieran volver a romperse con nuevos terremotos, desafiando así la teoría de la brecha sísmica.

Goldfinger et al. (2013) sugieren que los megaterremotos podrían más bien presentarse en una especie de superciclos. Estos eventos podrían estar asociados a segmentos de fallas que en algún momento se conectarían formando una ruptura larga y en un tiempo que no es posible precisar. Si esos autores están en lo cierto, esto explicaría porque razón la ruptura de grandes terremotos abarcaría zonas en las que ya se habrían presentado otros eventos.

CONCLUSIONES

Al igual que otras zonas de subducción alrededor del mundo, la centroamericana presenta sismos de magnitudes superiores a 7.0 con bastante regularidad. La Figura 2 muestra los eventos de los últimos 100 años según los datos del USGS junto las placas tectónicas circundantes. El año 2012 ha sido el único en ese registro en el que tres eventos superiores a M 7.0 (El Salvador, M 7.3, Costa Rica, M 7.6 y Guatemala M 7.3) han ocurrido en un intervalo de tan solo cuatro meses.

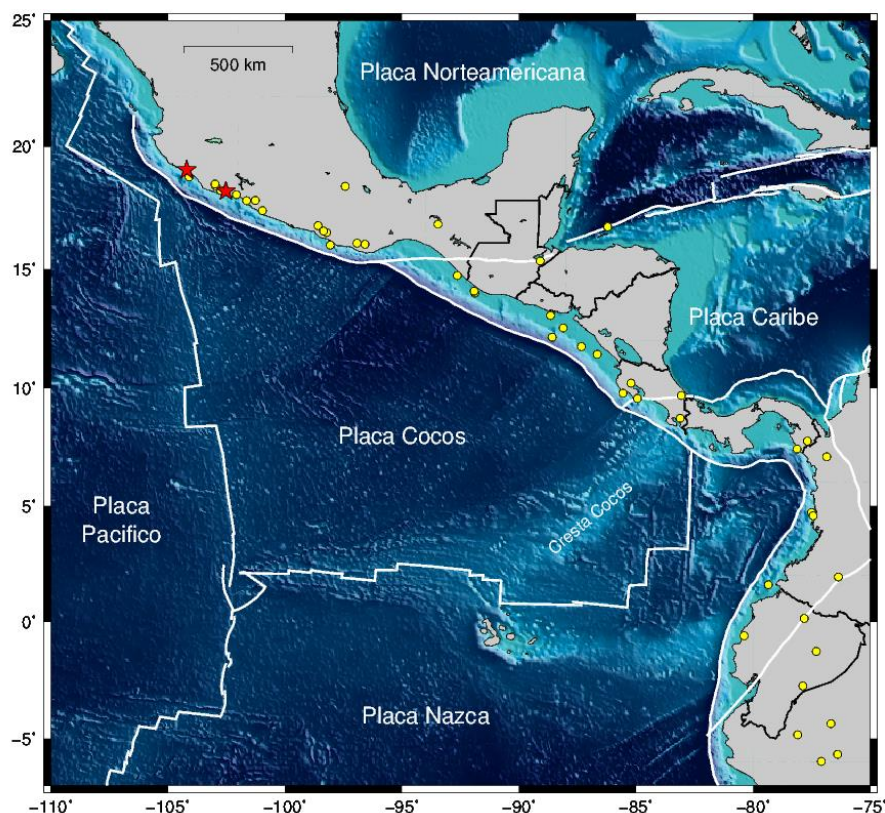


Figura 2: Ambiente tectónico de la región de la Placa Cocos. La Cresta Cocos es un sistema montañoso que tiene su origen cerca de las Islas Galápagos y que se subduce frente a las costas de Costa Rica. Los círculos amarillos muestran los eventos de magnitud superior a 7.0 y las estrellas rojas los eventos de magnitud mayor a 8.0 según el USGS del año 1900 al 2015.

Ye et al. (2013) indican que podrían haber sucedido eventos de gran magnitud en la región pero que no han sido documentados en el registro sísmológico. Estos eventos que no han sido documentados podrían haber superado los M 8.0 en algún momento. Esto es similar al escenario que se tenía de la zona de Andamán, al norte de Sumatra donde el registro sísmológico parecía no indicar la ocurrencia de eventos tan grandes y que eventualmente formó parte de la ruptura del sismo de M 9.1. También es el caso de Tohoku, donde el registro sísmológico era muchísimo más extenso y mucho más documentado que el nuestro. Desde el punto de vista de datos históricos y estudios de amenaza sísmica, la región de Tohoku podía producir un evento mayor a 8.0 – 8.5, pero no uno de M 9.0 (Geller, 2011; Lay et al., 2013; Stein et al., 2012). Ahora este sismo inesperado ha modificado la distribución de los esfuerzos en toda la zona norte de Japón y su ruptura se ha detenido cerca de la zona sísmica que involucraría el futuro terremoto de Tokio (Kerr, 2011).

Algunos investigadores piensan que todas las zonas de subducción con la suficiente longitud podrían ser fuentes de megaterremotos (Heuret et al., 2011). El grosor de la zona de contacto donde se presenta un megaterremoto parece no ser un factor determinante para que tal evento ocurra (Heuret et al., 2011). Esta puede ser tan grande como 250 km en el caso de Sumatra-Andaman o tan corta como 75 km como en el de Alaska (Heuret et al., 2011). Según Ye et al (2013) la longitud de la zona de subducción en Centroamérica es de aproximadamente 1300 km. Para que un evento de gran magnitud se pueda presentar, bastaría con que las asperezas rompieran de manera simultánea, quizás de forma análoga a lo sucedido con el terremoto de 1992 en Nicaragua (Ye et al., 2013).

Rong et al. (2014) llevan a cabo un análisis estadístico de la máxima magnitud probable en varias zonas de subducción. Ellos determinan que la mayoría de las mismas en la cuenca del Pacífico tienen el potencial de generar eventos de M > 8.5. En el caso particular de América Central, su resultado indica que un sismo de M 8.8 es posible. Señalan además que, aunque estudios de GPS (Correa-Mora et al., 2009) indican que hay un nivel de acoplamiento

bajo, este aspecto no impediría que se presentara un evento grande si se considerara el tiempo suficiente como lo indica Goldfinger et al., (2013). Ye et al (2013) también refieren al bajo acoplamiento que parece existir en la zona de subducción centroamericana, sin embargo, ellos notan que las mediciones han sido hechas en tierra firme que se encuentra lejos de la zona de interés. El caso particular que resaltan es el de Costa Rica, donde el acoplamiento es alto frente a la Península de Nicoya.

Feng et al., (2012) y Protti et al. (2014) señalan que la región de la Península de Nicoya se encuentra sobre la zona de subducción, lo que permite que las observaciones de GPS se puedan llevar directamente sobre la misma. Esto, junto con el registro sísmológico de eventos pasados (Protti et al, 2001), permitió a los investigadores determinar que un evento fuerte sucedería en esa parte del país como en efecto sucedió en el 2012 (Protti et al., 2014). Mediciones de GPS cerca de la zona de subducción podrían ayudar a verificar el nivel de acoplamiento con mayor claridad.

Por otro lado, la topografía submarina y la presencia de montículos subducidos podrían jugar un papel muy importante. Las irregularidades de la topografía submarina pueden actuar como asperezas sísmicas (Bilek et al., 2003; Pacheco et al., 2006; Ikari et al., 2013) en las cuales se generarían los terremotos. Pero también pueden actuar como barreras (Kodaira et al. 2000; Yang et al. 2013) que impedirían la expansión de la ruptura e incluso controlar el acoplamiento entre las placas (Geersen et al., 2015).

Eventualmente, también una barrera puede sufrir desplazamientos cosísmicos si llega a romperse (Yang et al., 2012), contribuyendo de esta manera a incrementar el tamaño de un posible evento. Evidencia de la ruptura de una barrera fue observada por Robinson y Watts (2006) con el terremoto de Perú del 2001 de M 8.4. Husen et al. (2002) indican que el comportamiento de una aspereza o una barrera, puede más bien estar relacionado con el nivel de esfuerzos que predomine en la zona al momento de la ruptura. Por esa razón, parece ser muy importante identificar cual pueda ser el verdadero nivel de acoplamiento que pueda haber entre las placas Cocos y Caribe.

Si el sistema montañoso, Cresta de Cocos, al sur de Costa Rica funcionara como una barrera, aún bajo esas circunstancias, un megaterremoto sería posible ya que la longitud de la subducción desde el sur de México hasta el norte de Costa Rica sería superior a los 500 km. La topografía marina sería favorable debido a la ausencia de accidentes de importancia. No se puede por tanto descartar que la región centroamericana que, al igual que otras del mundo donde no se pensaba que grandes terremotos se pudieran presentar (Lay, 2012), se halle acumulando energía para un eventual terremoto de gran magnitud. Cada zona de subducción podría ser igualmente peligrosa (McCaffrey 2007, 2008) por lo que es importante llevar a cabo estudios alternativos, principalmente en el campo de la paleosismología, que recientemente han ayudado a tener un panorama más claro del comportamiento sísmico en otras regiones del planeta.

REFERENCIAS

- Akciz, S., Ludwig, L., Arrowsmith, J y Zielke, O. (2010). "Century-long average time intervals between earthquake ruptures of the San Andreas fault in the Carrizo Plain, California". *Geology*, Vol 38, pp. 787-790.
- Aki, Keiiti (1966). "Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 14, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G wave spectrum". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol 44 pp. 73-88.
- Ando, M. (1975). "Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan". *Tectonophysics*, Vol. 27, pp 119-140.
- Atwater, B. F., Tuttle, M. P., Schweig, E. S., Rubin, C. M., Yamaguchi, D. K. y Hemphill-Haley, E. (2003). "Earthquake recurrence inferred from paleoseismology", en *The Quaternary period in the United States*, A. R. Gillespie, S. C. Porter, y B. F. Atwater (Editores), Vol. 1, Elsevier, 331-350.
- Beroza, G. C., (2012). "How many great earthquakes should we expect?". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol 109, pp. 651-652.

- Bilek, S. L., Schwartz, S. Y. y DeShon, H. R. (2003). "Control of seafloor roughness on earthquake rupture behaviour". *Geology*, Vol 31, No. 5, pp. 455–458
- Correa-Mora, F., DeMets, C., Alvarado, D., Turner, H., Mattioli, G., Hernandez, D., Pullinger, C., Rodriguez, M. y Tenorio, C. (2009). "GPS-derived coupling estimates for the Central America subduction zone and volcanic arc faults: El Salvador, Honduras and Nicaragua". *Geophysical Journal International*, Vol. 179, pp.1279-1291.
- Delescluse, M., Chamot-Rooke, N., Cattin, R., Feitout, L., Trubienko, O. y Vigny, C. (2012). "April 2012 intra-oceanic seismicity off Sumatra boosted by the Banda Aceh megathrust". *Nature*, Vol 490, pp. 240-245.
- Duputel, Z., Kanamori, H., Tsai, V., Rivera, L., Meng, L., Ampuero, J. y Stock, J. (2012). "The 2012 Sumatra great earthquake sequence". *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 351-352, pp, 247-257.
- Feng, L., Newman, A., Protti, M., González, V., Jiang, Y., y Dixon, T. (2012). "Active deformation near the Nicoya Peninsula, northwestern Costa Rica, between 1996 and 2010: Interseismic megathrust coupling". *Journal of Geophysical Research*. Vol 117(B6), B06407, doi:10.1029/2012JB009230.
- Gahalaut, V. (2012). "Great earthquakes as 'surprises' or our lack of understanding." *Current Science*, Vol. 102, No 11, pp. 1508-1509.
- Geersen, J., Ranero, C., Barckhausen, U. y Reichert, C. (2015). "Subducting seamounts control interplate coupling and seismic rupture in the 2014 Iquique earthquake area". *Nature Communications*. 6:8267, doi: 10.1038/ncomms9267.
- Geller, R. (2011). "Shake-up time for Japanese seismology." *Nature*, Vol 472, pp. 407–409
- Hayes, G., Herman, M., Barnhart, W., Furlong, K., Riquelme, S., Benz, H., Bergman, E., Barrientos, S., Earle, P. y Samsonov, S. (2014). "Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake." *Nature*, Vol 512, pp. 295-298, doi: 10.1038/nature13677.
- Heuret, A., Lallemand, S., Funicello, F., Piromallo, C., y Faccenna, C. (2011). "Physical characteristics of subduction interface type seismogenic zones revisited." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol 12, pp1-26.
- Husen, S., Kissling, E. y Quintero, R. (2002). "Tomographic evidence for a subducted seamount beneath the Gulf of Nicoya, Costa Rica: The cause of the 1990 Mw = 7.0 Gulf of Nicoya earthquake", *Geophysical Research Letters*, Vol 29, No 8, pp. 1238, doi:10.1029/2001GL014045.
- Ikari, M., A. Niemeijer, C. Spiers, A. Kopf y Saffer, D. (2013). "Experimental evidence linking slip instability with seafloor lithology and topography at the Costa Rica convergent margin." *Geology*, Vol 41, No 8, pp. 891-894.
- Kanamori, H. y Brodsky, E. E. (2004) "The physics of earthquakes". *Reports on Progress in Physics*, Vol 67, No 8, pp. 1429–1496.
- Kanamori, H. (2006). "Lessons from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake." *Philosophical Transactions The Royal Society A.*, Vol 364, pp. 1927-1945.
- Kennett, B., Gorbатов, A. y Spiliopoulos, S. (2014). "Tracking high-frequency seismic source evolution: 2004 Mw 8.1 Macquarie event", *Geophysical Research Letters*, Vol 41, pp 1187–1193, doi:10.1002/2013GL058935.
- Kerr, R. (2011). "New work reinforces megaquake's harsh lessons", *Science*, Vol 332, No. 6032, pp 911.

- Kodaira, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Miura, S. y Kaneda, Y. (2000). "Subducted seamount imaged in the rupture zone of the 1946 Nankaido earthquake". *Science*, Vol. 289, pp 104–106.
- Lay, T. (2011) "Earthquakes: A Chilean surprise", *Nature*, Vol. 471, pp. 174-175.
- Lay, T. (2012). "Why giant earthquakes keep catching us out". *Nature*, Vol 483, pp. 149-150.
- Lay, T., Fujii, Y., Geist, E., Koketsu, K., Rubinstein, J., Sagiya, T. y Simons, M. (2013). "Introduction to the special issue on the 2011 Tohoku earthquake and tsunami". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 103, pp. 1165-1170.
- McCaffrey, R (2007). "The next great earthquake". *Science*, Vol 315, pp. 1675-1676.
- McCaffrey, R. (2008). "Global frequency of magnitude 9 earthquakes". *Geology*, Vol. 36, No. 3, pp. 263-266.
- McCann, W., Nishenko, S., Sykes, I y Krause, J. (1979). "Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 117, pp.1082-1147.
- Meng, L., Ampuero, J., Stock, J., Duputel, Z., Luo, Y. y Tsai, V. (2012) "Earthquake in a maze: compressional rupture branching during the 2012 Mw 8.6 Sumatra earthquake". *Science*, Vol. 337, pp. 724-726.
- Normile, D. (2011), "Devastating earthquake defied expectations", *Science*, Vol 331, pp. 1375 - 1376, doi:10.1126/science.331.6023.1375
- Pacheco, J., Quintero, R., Vega, F., Segura, J., Jiménez, W. y González, V. (2006). " The Mw 6.4 Damas, Costa Rica earthquake 20 November 2004: aftershocks and slip distribution". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, pp. 1332-1343.
- Protti, M., Güendel, F. y Malavassi, E. (2001), "Evaluación del Potencial Sísmico de la Península de Nicoya", Primera edición, 144 pp., Ed. Fund. Univ. Nac., Heredia, Costa Rica.
- Protti, M., González, V., Newman, A., Dixon, T., Schwartz, S., Marshall, J., Feng, L., Walter, J., Malservisi, R. y Owen, S. (2014). "Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface". *Nature Geoscience*, Vol 7, pp. 117-121
- Rajendran, K. (2013). "On the recurrence of great subduction zone earthquakes". *Current Science*, Vol. 104, pp. 880-892.
- Robinson, D. y Watts, A (2006). "Earthquake rupture stalled by a subducting fracture zone". *Science*, Vol 312, pp. 1203-1205.
- Ruff, L., and Kanamori, H., (1983), "Seismic coupling and uncoupling at subduction zones". *Tectonophysics*, Vol 99, pp. 99-117.
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. y Shishikura, M. (2012). "Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology". *Geophysical Research Letters*, Vol 39, doi: 10.1029/2012GL053692.
- Shearer, P. y Bürgmann, R. (2010). "Lessons learned from the 2004 Sumatra-Andaman megathrust rupture". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 38, pp. 103-131.
- Shearer, P. y Stark, P. (2012) "Global risk of big earth-quakes has not recently increased". *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, Vol. 109, pp. 717-721.

- Singh, S., Carton, H., Tapponnier, P., Hananto, N., Chauhan, A., Hartoyo, D., Bayly, M., Moeljopranoto, S., Bunting, T., Christie, P., Lubis, H. y Martin, J. (2008). "Seismic evidence for broken oceanic crust in the 2004 Sumatra earthquake epicentral region". *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 777-781.
- Stein, S. y Okal, E. (2011). "The size of the 2011 Tohoku earthquake need not have been a surprise". *EOS Earth and Space Science News*, Vol. 92, pp. 227-228.
- Stein, S., R. Geller y M. Liu (2012). "Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it". *Tectonophysics*, Vol. 562, pp. 1-25.
- Tormann, T., B Enescu, J. Woessner y S. Wiemer (2015). "Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake". *Nature Geoscience*, 8, 152-158.
- Yang, H., Liu, Y y Lin, J (2012). "Effects of subducted seamounts on megathrust earthquake nucleation and rupture propagation". *Geophysical Research Letters*, Vol 39, pp 1-6.
- Yang, H., Liu, Y. y Lin, J. (2013). "Geometrical effects of a subducted seamount on stopping megathrust ruptures". *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp 1-6.
- Ye, L, Lay, T. Y Kanamori, H. (2013). "Large earthquake rupture process variations on the Middle America megathrust". *Earth and Planetary Science Letters*. Vol 381, pp. 147-155.