

Estudio espacial del sismo (Mw=6.4) del 20 de noviembre del 2004 en Costa Rica

Ronnie Quintero Q.^{*}
Floribeth Vega S.^{**}
Juan Segura T.^{***}
Walter Jiménez U.^{****}

Abstract

The Costa Rica seismic network OVSICORI-UNA located a Mw=6.4 (Harvard CMT) earthquake that occurred on November 20, 2004 at 08:07 UTC. The seismic event was located in the central Pacific part of Costa Rica with a focal depth of 25 km and about 100 km inland from the Middle America trench. The seismic event occurred in the deepest part of the crust, with aftershocks distributed to the surface. The seismic activity was relocated using a double difference technique and a probabilistic non-linear global search method. The local fault delineated by the seismic sequences is part of the fault system that delineates the boundary between the Caribbean plate and Panama Block.

Keywords: *Costa Rica, principal seismic, replic, continental, CMT.*

Resumen

La red sismológica del OVSICORI-UNA ubicada en Costa Rica, localizó un sismo de magnitud Mw=6.4 (Harvard CMT), que ocurrió el 20 de noviembre del 2004 a las 08:07 UTC. El sismo fue localizado en el Pacífico Central de Costa Rica, con una profundidad de 25 km y a 100 km de la Fosa Mesoamericana. El sismo ocurrió en la parte más profunda de la corteza y con réplicas distribuidas hacia la superficie.

* Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Apartado Postal 2346-3000, Heredia, Costa Rica, correo electrónico: rquinter@una.ac.cr

** *Ibidem*, correo electrónico: fvega@una.ac.cr

*** *Ibidem*, correo electrónico: jsegura@una.ac.cr

**** *Ibidem*, correo electrónico: wjimen@una.ac.cr

La actividad sísmica fue relocalizada usando la técnica de la doble diferencia y un método probabilístico de búsqueda global no-lineal. La falla delimitada por la secuencia sísmica es parte de un sistema de fallas que marcan el límite Oeste entre la placa Caribe y el Bloque de Panamá.

Palabras claves: *Costa Rica, sismo principal, réplicas, continental, CMT.*

Introducción

En Costa Rica la mayoría de los sismos son producto de la interacción de 4 placas tectónicas, estas placas son: la placa Coco, la placa Caribe, el Bloque de Panamá y la placa Nazca. La mayoría de sismos que se dan en las afueras de la costa del Pacífico central de Costa Rica son producto de la colisión y subducción de la placa del Coco por debajo de la placa Caribe y Bloque de Panamá. Los sismos de subducción en esta parte del país se encuentran a 100 km de la Fosa Mesoamericana y tienen de 40 a 60 km de profundidad (Protti *et al.*, 1994; Guendel & Protti, 2001; Husen *et al.*, 2003). El sismo del 20 de noviembre del 2004 a las 08:07 UTC con magnitud $M_w=6.4$ (Harvard CMT, <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>) ocurrido cerca de la ciudad de Parrita, Costa Rica, fue sentido en todo el territorio nacional y produjo daños estructurales. El sismo ocurrió en una falla normal en la parte cortical a 25 km de profundidad y una distancia de 100 km de la Fosa Mesoamericana. Las réplicas asociadas a este sismo se encuentran entre 10 y 30 km de profundidad.

El sismo del 20 de noviembre del 2004 a las 08:07 (hora UTC) fue sentido fuertemente en la zona epicentral, causando rupturas superficiales, licuefacción local y daños en casas y edificios pequeños. Con base en el análisis, documentación y observación en el campo, se pudo constatar que el evento tuvo una intensidad en la escala Modificada de Mercalli (VII) en Parrita y Damas, (V-VI) en Jacó y Quepos, (IV-V) en Puntarenas y el Valle Central del país. La mayoría de los daños ocurrieron en Parrita y Damas, donde la carretera que une a estas dos comunidades se vio afectada, pero sin causar interrupción del paso vehicular. También se reportaron daños en la zona de los Santos, ubicada 30 km NE de la zona epicentral. En años anteriores al 2004, la sismicidad continental de la zona se concentró al Oeste y noreste del sismo del 20 de noviembre del 2004 y de sus réplicas. El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) registró 177 sismos corticales entre abril de 1984 y octubre del 2004, en el área cercana al epicentro del sismo del 20 de noviembre del 2004 (08:07 UTC). En este trabajo analizaremos la sismicidad cortical continental registrada por el OVSICORI-UNA en un área cercana al sismo del 20 de noviembre del 2004 ($M_w=6.4$).

Datos y método de estudio

El conjunto de datos usados en este trabajo está confinado al área 9.3-9.8 grados latitud Norte y 84.0-84.6 grados longitud Oeste y en un rango de profundidad de 0 a 30 km y abarcan el período entre el mes de abril de 1984 hasta el mes de diciembre 2004.

Los datos usados en esta investigación han sido recogidos por la red sismográfica del OVSICORI-UNA y analizados en su totalidad por los autores.

La mayoría de las estaciones de esta red sismográfica opera en forma analógica; y es hasta 1992 que comienza a funcionar un sistema paralelo de registro digital, SEISLOG (Havskov, J. and Utheim, T., 1992) que entró a operar con un muestreo de 50 Hz. En el 2003 el sistema de registro digital SEISLOG es cambiado por el sistema Earthworm y se comienza a usar un muestreo de 100 Hz.

Los sismómetros de la red son Rangers SS-1 (1 HZ), componente vertical. Para el evento del 20 de noviembre del 2004 y sus réplicas se contaba con cinco estaciones digitales GURALP CMG-6TD (muestreo de 100 Hz) y una estación con STS2 (muestreo de 40 Hz). La estación STS2 está ubicada en Juntas de Abangares (JTS), donde también se encuentra una estación STS1. Las estaciones están distribuidas dentro de Costa Rica, pero, con una concentración en la parte central del país (Figura 1).

Todos los datos de las estaciones analógicas y digitales son recogidos por el sistema Earthworm, usándose aquí un sistema de disparo, para luego analizar los datos usando el paquete de análisis SEISAN (Lienert, B. and Havskov, J., 1995; Havskov, J., 1997). Para la localización del evento principal se utilizaron 10 estaciones con datos de acelerógrafos, estando el acelerógrafo más cercano a la fuente a una distancia epicentral de 12 km y mostrando una aceleración moderada en la componente transversal de 231 cm/s^2 en la estación de QPS (Figura 2). Los datos de los acelerógrafos fueron proporcionados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR) (<http://www.fing.ucr.ac.cr/~lis>).

La estación sísmica convencional más cercana del OVSICORI-UNA que registró el sismo del 20/11/2004 se encuentra a una distancia de 17 km del epicentro. La Figura 3, nos muestra algunas formas de onda para este evento sísmico.

Para la secuencia sísmica de noviembre del 2004, se localizaron un total de 536 eventos durante todo el mes de noviembre, con un rango de profundidad de 0 a 30 km (Figura 4).

También, se hace un análisis de los sismos de la zona con profundidades menores a 30 km y que ocurrieron antes de noviembre del 2004 y localizados por el OVSICORI-UNA, en total 177 sismos corticales que ocurrieron antes de noviembre del 2004 fueron escogidos.

Los eventos que ocurrieron durante la secuencia sísmica de noviembre del 2004 son relocalizados usando un método de localización global no-lineal (Lomax *et al.*, 2000), el cual permite el uso de un modelo tridimensional de velocidad para la región en estudio. En nuestro caso usamos un modelo de velocidad tridimensional obtenido para Costa Rica (Husen *et al.*, 2003). La solución obtenida usando este método de localización provee una descripción de la incertidumbre de la solución espacial.

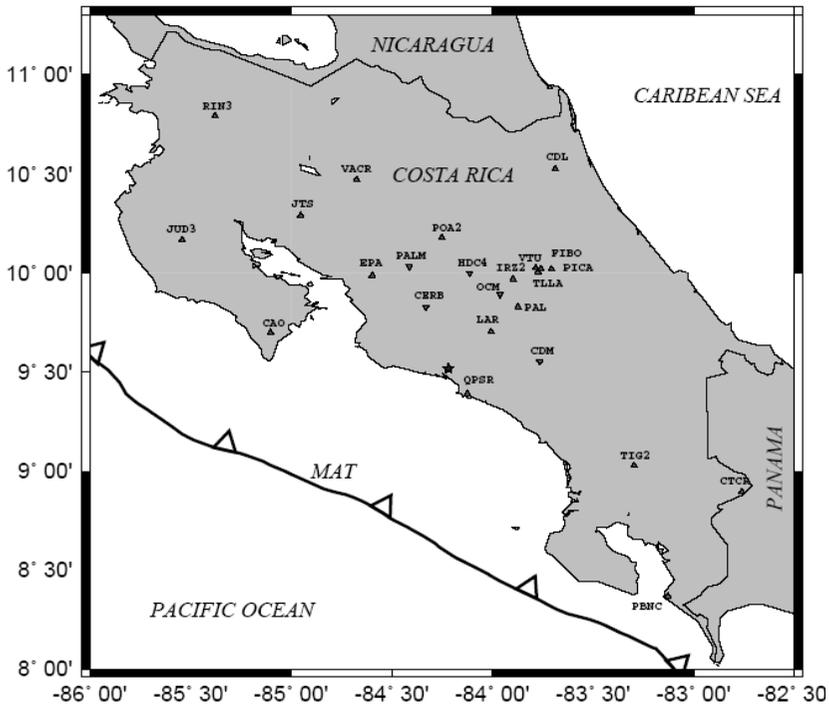


Figura 1. En este mapa se muestran las estaciones usadas en este estudio; las cuales están indicadas por triángulos rellenos. El epicentro del sismo del 20/11/2004 ($M_w=6.4$) está indicado por una estrella y localizado cerca de la estación QPSR. MAT=Fosa de América central (MAT por sus siglas en inglés). Las estaciones GURALP CMG-6TD son HDC4, PLMA, OCM, CERB y CDM están indicadas por triángulos invertidos. La estación JTS pertenece a la corporación IRIS y es administrada por el OVSICORI-UNA, esta estación cuenta con instrumentos STS-1 y STS-2, con muestreo de 20 y 40 HZ, respectivamente. La estación más cercana al epicentro es QPSR, ubicada 17 km al Sur-Este. Para la localización del evento principal se utilizaron 10 registros de acelerómetros.

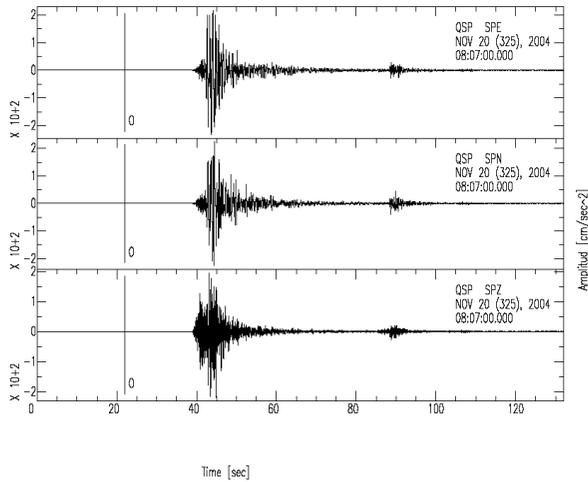


Figura 2. Aceleración registrada por el acelerógrafo de QPS, ubicado a 12 km del epicentro del sismo del 20/11/2004. Se indica con O el tiempo de origen del sismo. Las componentes de arriba hacia abajo son: EW, NS y vertical. Las estaciones de LIS-UCR solo se utilizaron en la localización del sismo principal. Estas estaciones son: QSP, ISD, FRA, PCL, CDN, SLG, RAL, HTO, ECA y ALJ. La mayoría están ubicadas en la parte central del país.

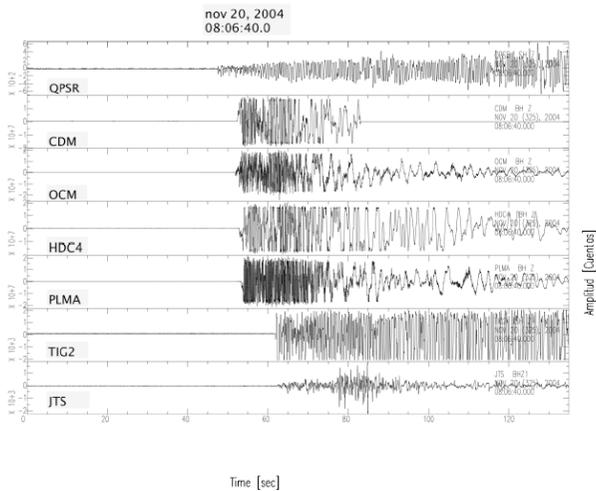


Figura 3. Forma de ondas de siete estaciones de la red permanente del OVSICORI-UNA que registraron el sismo del 20/11/2004. Se muestran las estaciones de componente vertical QPSR, CDM, OCM, HDC4, PLMA, TIG2 y JTS. En total, 33 estaciones registraron el sismo. El inicio del registro es 08 h: 06': 40.0".

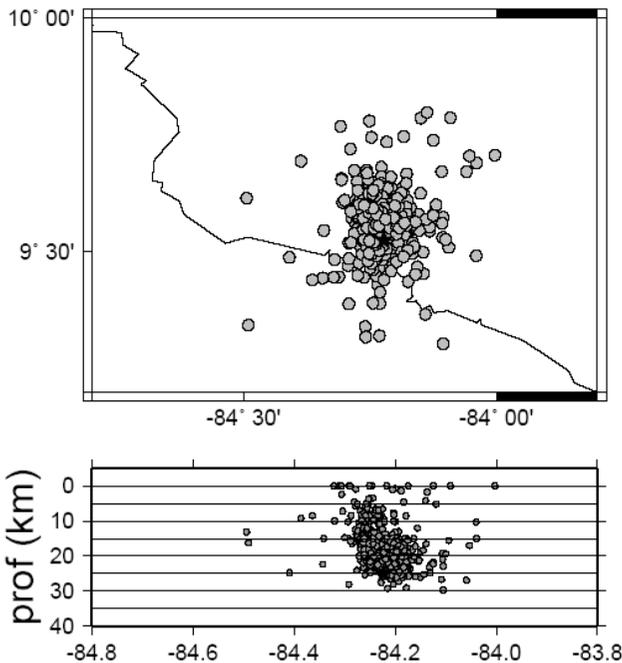


Figura 4. Sismicidad correspondiente al mes de noviembre del 2004, registrada por el OVSI-CORI-UNA. En total se registraron 536 eventos sísmicos para este mes y están indicados por círculos rellenos. El sismo principal está indicado por una estrella de color negro. Estos sismos fueron localizados usando el programa HYPOCENTER. En la parte de abajo se muestra una proyección de la profundidad de los sismos a lo largo del eje EW. Aquí, se nota que los sismos ocurren principalmente a una profundidad de 20 km y el sismo principal se origina en la parte más profunda de la corteza con réplicas migrando hacia la superficie.

Los eventos relocalizados usando esta técnica fueron seleccionados del total de 536 sismos localizados usando un gap menor o igual a 180 grados y un residuo menor o igual a 0.5 sec, en total seleccionamos 208 eventos sísmicos con estas características.

Realizamos una tercera relocalización, usando la técnica de la doble diferencia (Waldhauser and Ellsworth, 2000). Esta relocalización se dividió en dos grupos. El primero con los eventos antes de noviembre del 2004, que se usaron en su totalidad y los de noviembre del 2004. Los sismos del segundo grupo fueron seleccionados con gap menor o igual a 180 grados, residuo menor o igual a 0.5 sec y que hayan sido registrados por la estación QPSR; los sismos con estas características suman un total de 52.

Resultados

Utilizamos el método de la doble diferencia (Waldhauser and Ellsworth, 2000) en la relocalización de los sismos que ocurrieron antes de noviembre del 2004, el cual es un método de localización relativo. Este método se basa en la consideración de que la distancia hypocentral entre dos sismos localizados en una misma estación es pequeña comparada con la distancia eventos sísmico – estación y la heterogeneidad de la velocidad; entonces el camino del rayo entre la fuente sísmica y una estación común es similar a lo largo del rayo. De aquí, la diferencia en el tiempo de propagación para dos eventos registrados en una misma estación puede ser atribuida a la variación espacial entre los eventos. HYPODD usa un modelo unidimensional para calcular los tiempos de propagación de las ondas de la fuente a la estación, o sea no necesitamos del conocimiento de un modelo de velocidad tridimensional ni un conocimiento bien definido del modelo de velocidad unidimensional.

En esta relocalización usamos las ondas S y una razón de Poisson $V_p/V_s=1.78$; usamos un modelo de velocidad unidimensional obtenido por Quintero & Kissling (2001), para Costa Rica. La localización rutinaria nos muestra una sismicidad en toda el área de estudio, concentrándose al Oeste y noreste de donde ocurrió el sismo de noviembre. La relocalización nos muestra dos clusters (Figura 5), el primer grupo con 63 sismos que están al Oeste de la zona de estudio, muestran un alineamiento con sentido NE; el segundo grupo consta de 26 sismos ubicados al noreste del sismo del 20 de noviembre y de sus réplicas; la relocalización no produce un alineamiento bien definido. El alineamiento observado sería una falla perteneciente al sistema de fallas que atraviesan el centro de Costa Rica y que representa el límite entre el Bloque de Panamá y la placa Caribe.

En la relocalización de la secuencia sísmica de noviembre del 2004, usamos primero un método probabilístico no lineal (Lomax *et al.*, 2000); las localizaciones obtenidas con este método no cambian radicalmente comparado al método de doble diferencia y a la localización rutinaria usando SEISAN; lo único que se nota es un pequeño desplazamiento de los epicentros hacia el Sur, indicándonos que las localizaciones son consistentes no importando el método utilizado (Figura 6).

Usando la técnica de la doble diferencia Waldhauser and Ellsworth (2000) y el programa HYPODD, procedimos a relocalizar los sismos que fueron registrados por ocho estaciones incluyendo QPSR y con un gap ≤ 180 , en total tenemos 52 sismos; que son localizados primeramente usando el programa HYPOCENTER. El programa HYPODD determina la localización relativa dentro de grupos o clusters. Los parámetros de este programa fueron ajustados usando eventos sintéticos a los cuales se les incorporó ruido aleatorio. La Figura 8 nos muestra la relocalización para los sismos seleccionados. Por su profundidad seleccionada de menos de 30 km y ubicación, esta actividad sísmica es el resultado de la ruptura en una falla local

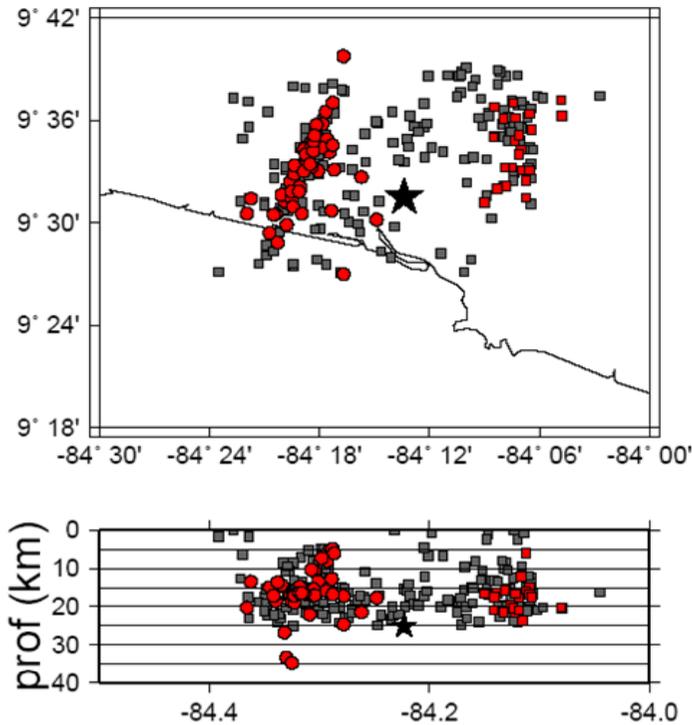


Figura 5. Se muestran los epicentros en color negro para los sismos continentales registrados por el OVSICORI-UNA antes de noviembre del 2004. Se registraron 177 sismos desde abril de 1984 hasta octubre del 2004. Estos sismos tienen magnitud entre 2.0 y 3.0 y residuo menor o igual a 0.4 sec y una profundidad máxima de 24 km, por lo que se localizan dentro de la placa continental. Usando el método de la doble diferencia podemos encontrar dos agrupaciones de sismos, las cuales están indicadas por círculos y cuadrados rellenos en rojo. La sismicidad de noviembre del 2004 no se muestra en esta figura, sólo se muestra con una estrella el epicentro del evento principal del 20/11/2004 ($M_w=6.4$). Los dos grupos encontrados se encuentran al Oeste (primer grupo) y al Noreste (segundo grupo) del sismo principal. El primer grupo encontrado consiste de 47 eventos con profundidad entre 27 y 5 km, y el segundo grupo consiste de 22 eventos con profundidad entre los 24 y 5 km. Los otros eventos registrados no fueron agrupados a ningún otro grupo. En la parte de abajo se muestra la proyección hypocentral a lo largo del eje EW. Las localizaciones mostradas en cuadrado negro fueron obtenidas usando HYPOCENTER y las mostradas por círculos y cuadrados en rojo se obtuvieron usando HYPODD. La proyección del sismo principal se muestra por una estrella de color negro.

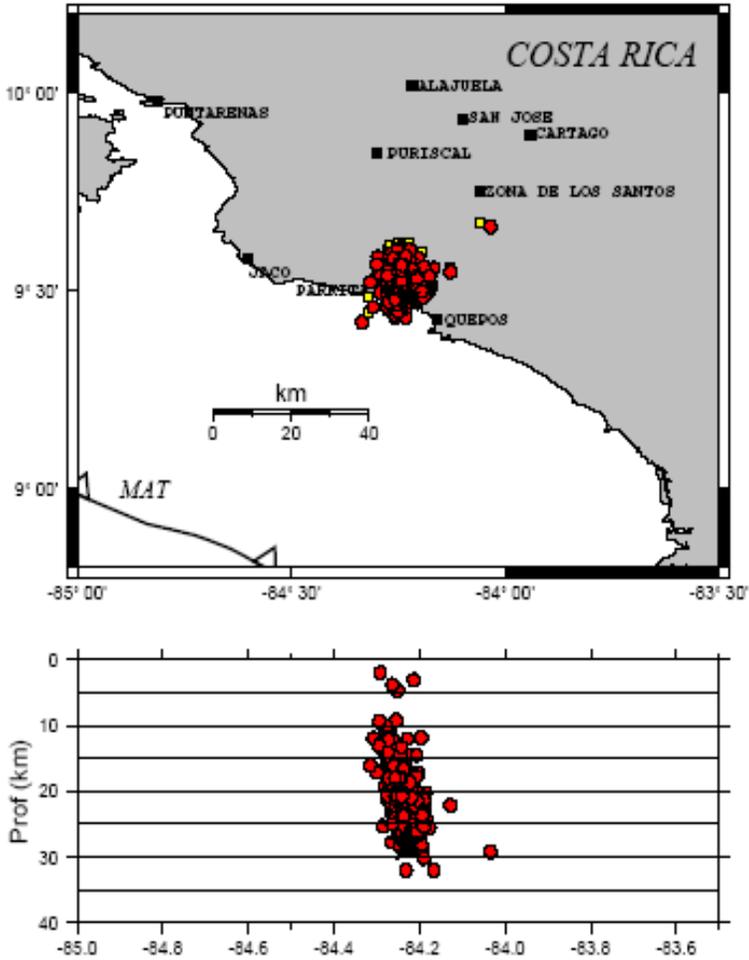


Figura 6. Mapa mostrando con círculos rojos los sismos de todo el mes de noviembre del 2004 que fueron relocalizados usando un método probabilístico de búsqueda no-lineal global y un modelo de velocidad tridimensional. Además se muestra la localización del evento principal usando el método de Lomax *et al.* (2000). En amarillo y por cuadrados están representados los sismos localizados rutinariamente usando HYPOCENTER. Las ciudades principales donde se sintió el sismo del 20/11/2004 están representadas por un cuadrado negro con sus respectivos nombres. En la parte de abajo se muestra un perfil de profundidad proyectado sobre el eje EW, para los sismos relocalizados usando el método de Lomax *et al.* (2000). El sismo principal se muestra por una estrella en color negro.

Costa Rica (Nov/20/04) Earthquake Mw=6.2

OT: 2004 11 20 08:07:22.1854 Lat: 9.484 Long: -84.228 Depth: 27.87km RMS: 0.20s

PDF scatter sample

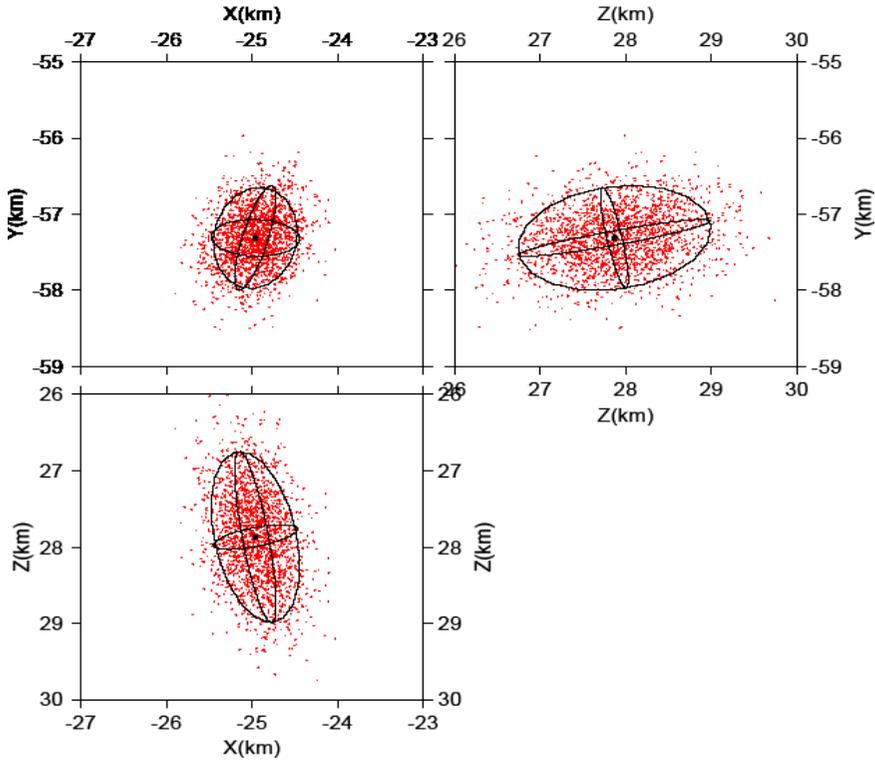


Figura 7. Se muestra la localización del evento del 20/11/2004 usando el método de búsqueda Oct-Tree de Lomax *et al.* (2000) con un modelo de velocidad tridimensional de la onda. Por medio de puntos rojos se muestra el gráfico de la función posterior de densidad. La elipse representa el 68% del elipsoide de confianza. El método de Lomax *et al.* (2000) nos da una mejor descripción de los errores de localización comparado a la localización tradicional usando HYPOCENTER. Con un punto negro se representa el probable hypocentro para el sismo principal. La profundidad del evento principal presenta más incertidumbre que los errores horizontales, pero siendo pequeña y alrededor de ± 1 km desde el hypocentro.

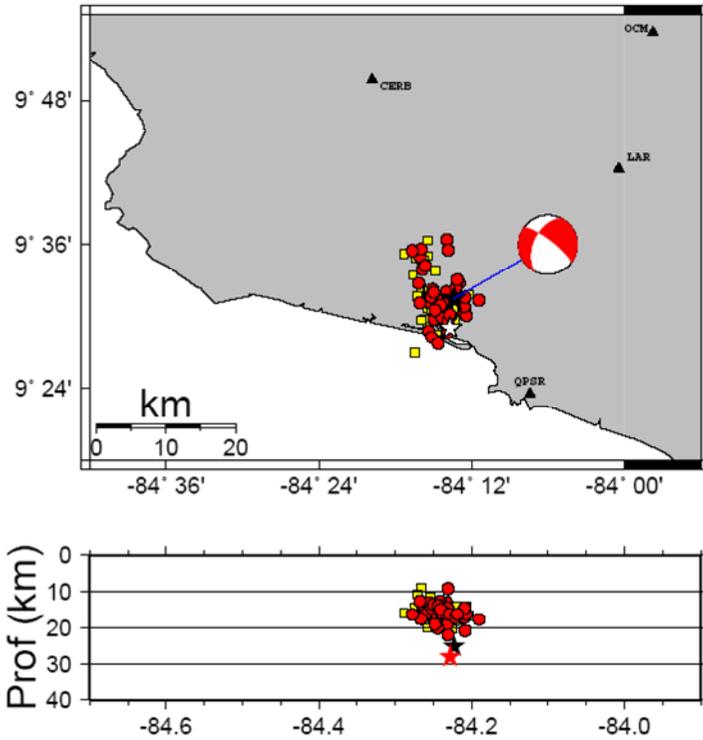
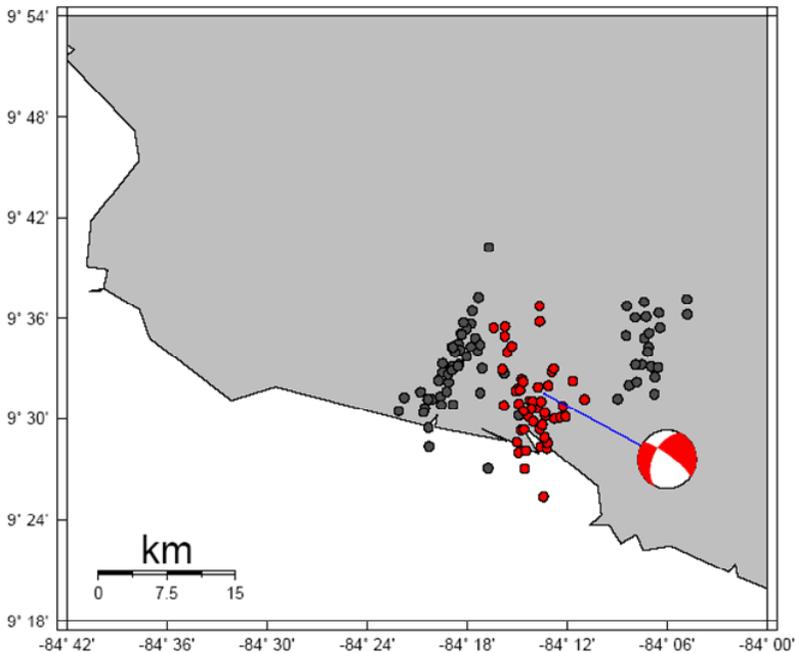


Figura 8. Localización de la secuencia sísmica de noviembre del 2004 en la parte continental de la parte central del Pacífico de Costa Rica. Con círculos rojos están los sismos relocalizados usando el método de la doble diferencia de Waldhauser and Ellsworth (2000). Los sismos se escogieron con $\text{gap} \leq 180$ grados y residuo menor o igual a 0.5 sec y que los eventos hayan sido registrados por la estación sismográfica QPSR, perteneciente a la red del OVSICORI-UNA. Con amarillo se representan las localizaciones originales hechas usando el programa HYPOCENTER. Con una estrella en color negro se representa el epicentro del sismo principal, localización obtenida usando HYPOCENTER y en blanco el epicentro obtenido usando HYPODD. Las estaciones más cercanas a la zona epicentral están representadas por triángulos en negro. En la parte de debajo de la figura se muestra el perfil de profundidad proyectado a lo largo del eje EW. En amarillos están las localizaciones realizadas usando HYPOCENTER y en rojo las localizaciones obtenidas usando HYPODD. Con una estrella negra y roja se muestra la profundidad obtenida para el sismo principal, la cual se obtuvo usando HYPOCENTER y HYPODD, respectivamente. La proyección del sismo principal en el perfil, nos muestra que este ocurre en la parte más profunda de la corteza.



GMT 2005 Jun 2 12:00:30

Figura 9. Usando el método de la doble diferencia se identificaron tres cluster en el área de estudio para la sismicidad registrada por el OVSICORI-UNA a partir de la instalación de la red sísmica en 1984. Estos eventos ocurrieron en la parte continental y a profundidades menores a 30 km. La secuencia sísmica más reciente está representada por círculos rojos. Se presenta el mecanismo focal dado por Harvard CMT.

ubicada en la parte continental. Los sismos de subducción para esta zona epicentral tienen profundidades entre los 40 y 60 km, descartándose que los sismos asociados al evento del 20 de noviembre del 2004, sea un sismo de subducción.

El evento principal junto con algunas réplicas registradas y relocalizadas nos muestra un cierto patrón orientado hacia el NW; lo cual puede indicar de acuerdo al tensor de momento CMT Harvard (<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>), que el sismo del 20 de noviembre del 2004 ocurrió en una falla local con orientación NNW-SSE, con un ángulo de buzamiento de 77 grados hacia el NW. El sismo ocurrió en la parte más profunda de la zona sísmogénica y sus réplicas tuvieron una migración hacia la parte superior de la corteza. Los diferentes métodos de localización muestran una tendencia de los sismos asociados al evento del 20 de noviembre del 2004 con un alineamiento NW.

Conclusiones

La región del Pacífico Central de Costa Rica en su parte continental, ha experimentado actividad sísmica mucho antes del sismo del 20 de noviembre del 2004, teniendo registros desde el momento mismo que se instala la red sismográfica de OVSICORI-UNA, en el año 1984, pero con una frecuencia mayor durante los años de 1994 y 1995. La sismicidad muestra un alineamiento para los sismos antes de noviembre del 2004, indicándonos un fallamiento con sentido NE que pertenecen al sistema de fallas que delimitan el límite entre la placa Caribe y el Bloque de Panamá. En general los eventos en la zona antes del 2004, fueron de magnitud pequeña ($M_c \leq 3.0$), con una frecuencia de nueve sismos por año. El mecanismo focal (CMT Harvard) del evento del 20 de noviembre del 2004 nos indican dos posibles fallas una de ellas indica que el sismo está asociado a una falla normal con una pequeña componente de cizalla, con rumbo NNW, buzando al NE.

En general tenemos que los sismos registrados y localizados por la red sismográfica del OVSICORI, desde 1984, nos muestra alineamientos con dirección NNE para los eventos que ocurrieron antes de noviembre del 2004 en el área de estudio y esta nueva secuencia que indica una posible falla con rumbo NNW, esta zona forma parte del límite oeste del Bloque de Panamá, zona que se conoce como el cinturón deformado del centro de Costa Rica. En la zona se identificaron tres clusters de eventos que por sus hypocentros indican que se dan en la parte continental y son superficiales, ocurriendo cerca de zonas pobladas como es el caso de Damas, Parrita y Quepos, los agrupamientos de los sismos nos indican diferentes fallas en la zona. El método de localización de la doble diferencia evidencia el alineamiento de unos de estos grupos en forma clara, la cual esta localizada al oeste del sismo del 20 de noviembre del 2004 (Figura 9).

Agradecimientos

Este trabajo se logró usando todos los datos y equipo del OVSICORI-UNA, Universidad Nacional, Costa Rica. Los datos sísmicos colectados antes de noviembre del 2004 ha sido esfuerzo y colaboración del equipo de personas del OVSICORI-UNA, sin el cual esta contribución no hubiera sido posible. Las figuras fueron generadas usando el software GMT (Wessel and Smith, 1991, 1995). Nuestro agradecimiento al Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR) por permitirnos utilizar sus datos de acelerógrafos. Agradecemos a los referís por su notable aporte a la mejoría de este artículo.

Referencias

- Güendel, F., Protti, M., 2001. Actividad sísmica frente a las costas de Quepos Pacífico Central, Costa Rica, *Boletín Vulcanología, Sismología y Tectónica*, vol. XX, núm. XX, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional.
- Havskov, J., and Utheim, T., 1992. SEISLOG and SEISAN: A complete system for seismic data acquisition and analysis, *Cahier du Centre Europeen de Geodynamique et Seismologie*, 5, 67-74.
- Havskov, J., 1997. The SEISAN earthquake analysis software for the IBM PC and SUN version 6.0 manual, Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, 236 pp.
- Husen, S., Quintero, R., Kissling, E., and Hacker, B., 2003. Subduction zone structure and magmatic processes beneath Costa Rica constrained by local earthquake tomography and petrological modeling, *Geophys. J. Int.*, 155, 11-32.
- Lienert, B. R., and Havskov, J., 1995. A Computer Program for Locating Earthquakes both Locally and Globally, *Seism. Res. Let.* 66 (5), 26-36.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., and Thierry-Berge, C., 2000, Probabilistic earthquake location in 3-D and layered models. Advances in Seismic Event Location, pp. 101-134, eds Thurber, C. H. and Rabinowitz, N., Kluwer, Dordrecht.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, <http://www.ovsicori.una.ac.cr>.
- Protti, M., Güendel, F., McNally, K., 1994. The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: Results from a high-resolution local seismographic network, *Phys. Earth Planet. Int.*, 84, 271-287.
- Quintero, R., and Kissling, E., 2001. An improved P-wave velocity reference model for Costa Rica, *Geofis. Int.*, 40, 3-19.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F., 1991. Free software helps map and display data, *EOS* 72, 441, 445-446.
- , 1995. New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS* 76, 329.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.