

Sismicidad de Costa Rica, Evaluación y Monitoreo de la Brecha Sísmica de Nicoya

Marino Protti y Víctor González
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional
Y
Grupo Académico Informal OBCÍKORY Provisional

Resumen

Eventos sísmicos superficiales se presentan en Costa Rica: a) asociados con la subducción de la Placa del Coco bajo la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá; b) a lo largo de la zona de fracturas de Panamá; c) como fallamiento intraplaca de esas tres unidades tectónicas; d) como actividad interplaca entre la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá, tanto a lo largo del Cinturón Deformado del Norte de Panamá como a lo largo de la zona de fallas que atraviesa la parte central de Costa Rica; y e) asociada al arco volcánico. Sismos de profundidad intermedia (40 a 220 Km.) ocurren como deformación interna de la Placa del Coco.

La brecha sísmica de Nicoya es un segmento de la zona de subducción en el noroeste de Costa Rica. Las últimas tres rupturas produjeron grandes sismos en 1853, 1900 y 1950. Las evidencias que indican la existencia de un fuerte acople sísmico en el segmento de Nicoya son: a) un bajo nivel de sismicidad de fondo; b) el cese repentino de la propagación de las réplicas de los sismos de 1990 y de 1992 justo en los bordes de la brecha sísmica de Nicoya; y c) el rápido movimiento hacia el NE de la Península de Nicoya.

Marco tectónico regional

La tectónica regional de América Central está controlada principalmente por el choque de las Placas del Coco y del Caribe (Fig. 1). Como consecuencia de esta colisión la placa oceánica del Coco se subduce por debajo de la Placa del Caribe a velocidades que van desde 70 mm por año frente a Guatemala hasta poco más de 90 mm por año frente a la Península de Osa [Protti-Quesada, 1994, calculado a partir de De Mets et al., 1990] (Fig. 2). A lo largo de este límite de placas es donde ocurren, en Costa Rica, la mayoría de los terremotos de gran magnitud.

En el extremo suroeste de la Placa del Caribe las condiciones locales de esfuerzos tectónicos han provocado la fracturación de la misma y la creación de una microplaca, denominada Bloque de Panamá. El límite norte del Bloque de Panamá con la Placa del Caribe es un margen convergente, conocido como el "Cinturón Deformado del Norte de Panamá" [Silver et al., 1990], el cual se extiende desde las costas del Caribe de Colombia hasta Limón, Costa Rica (Fig. 1 y 2). Fue en el extremo oeste de este límite de placas donde ocurrió el terremoto del Valle de la Estrella, Limón, de abril de 1991. Hacia el noroeste, el contacto entre

el Bloque de Panamá y la Placa del Caribe consiste en una zona de fallamiento que corre desde Limón hasta la Fosa Mesoamericana a través de la parte central de Costa Rica. El Bloque de Panamá comprende la parte sur de Costa Rica y todo Panamá.



Figura 1. Marco tectónico regional de Costa Rica.

Al sur de la Península de Burica se encuentra la zona de fracturas de Panamá. Este sistema de fallas constituye el límite entre las Placas del Coco y de Nazca (Fig. 1). Al oeste de la zona de fracturas de Panamá se encuentra la cordillera submarina del Coco la cual se subduce bajo la Península de Osa. La cordillera del Coco, es la cicatriz formada en la Placa del Coco como resultado de su paso sobre el punto caliente de las islas Galápagos.

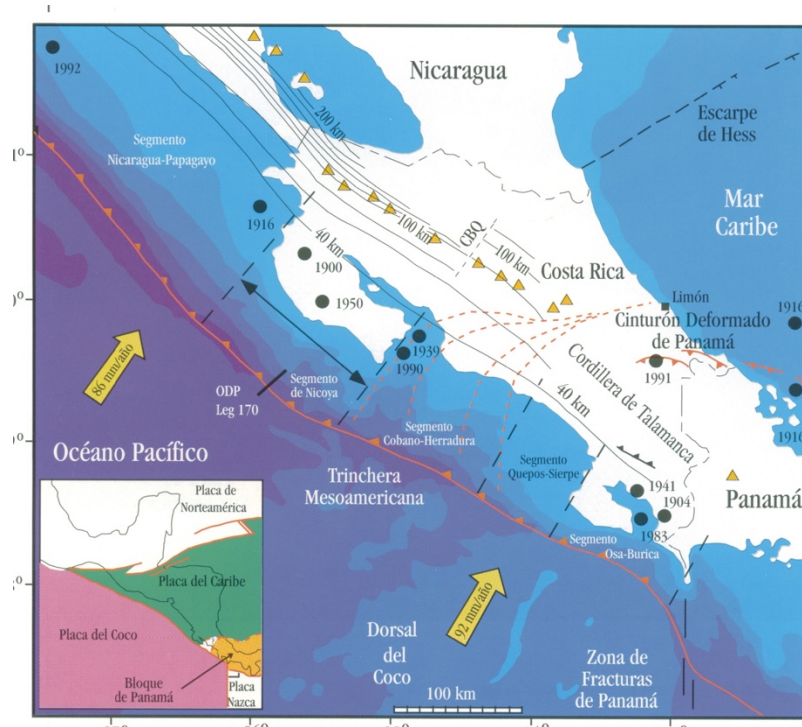


Figura. 2. Detalle de la tectónica local de Costa Rica y geometría de la zona Wadati-Benioff. Los contornos de profundidad de la placa del Coco bajo Costa Rica están dados a intervalos de 20 Km., comenzando con el de 40 Km. Los triángulos rellenos representan volcanes activos y los círculos rellenos muestran la ubicación de los terremotos con magnitudes mayores que 7 grados durante el siglo XX. CBQ señala la Contorsión Brusca de Quesada.

Sismicidad de Costa Rica

Este ambiente tectónico, en el que interactúan cuatro placas tectónicas a lo largo de cinco límites de placas, hace que Costa Rica sea una región sumamente activa en términos de sismicidad, con fuentes sísmicas de diverso origen y profundidad, dispersas por todo el país. Eventos sísmicos superficiales, con profundidades menores que 40 Km. se presentan: a) asociados con la subducción de la Placa del Coco bajo la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá; b) a lo largo de la zona de fracturas de Panamá; c) como fallamiento intraplaca de esas tres unidades tectónicas; d) como actividad interplaca entre la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá, tanto a lo largo del Cinturón Deformado del Norte de Panamá como a lo largo de la zona de fallas que atraviesa la parte central de Costa Rica; y e) asociada al arco volcánico (Protti-Quesada, 1994). Sismos de profundidad intermedia (40 a 220 Km.) ocurren como deformación interna de la porción subducida de la Placa del Coco (Protti-Quesada, 1991; Protti et al., 1994). De abril de 1984 a junio del 2004, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) ha registrado actividad en todas estas fuentes sísmicas y ha localizado cerca de 70 000 sismos en poco más de 20 años.

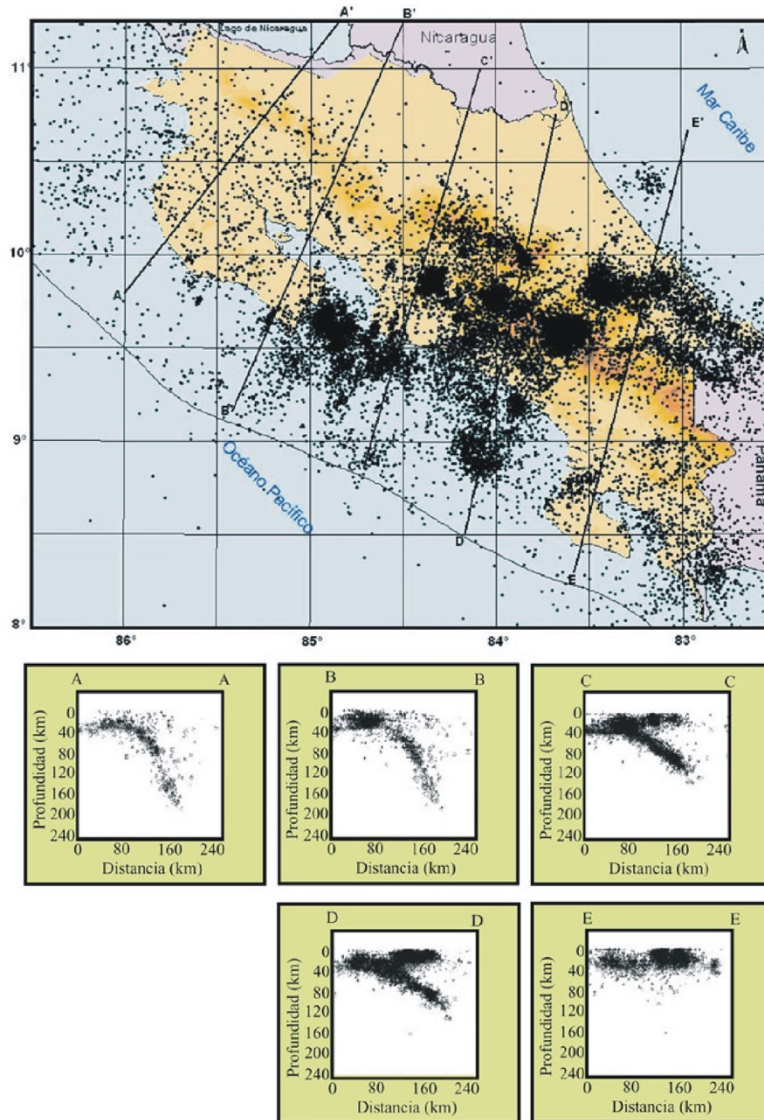


Figura 3. Sismicidad de Costa Rica y secciones transversales de sismicidad. Cada símbolo en el mapa y los perfiles representa un sismo.

La actividad sísmica de profundidad intermedia por debajo de Costa Rica revela características intrínsecas de la Placa del Coco. Un aspecto que destaca es la existencia de una rasgadura en la Placa del Coco por debajo de la parte central de Costa Rica (la Contorsión Brusca de Quesada (CBQ) [Protti-Quesada, 1991]) observable a profundidades mayores de 70 Km. (Fig. 2). Al noroeste de esta rasgadura, o falla tipo tijera, la Placa del Coco se inclina hasta 80 grados y alcanza profundidades que varían desde 220 Km. por debajo de la frontera de Costa Rica con Nicaragua, hasta 135 Km. justo en la rasgadura. Hacia el sureste de la Contorsión Brusca de Quesada, la Placa del Coco se inclina 60 grados y la sismicidad no se extiende a más de 125 Km. de profundidad detrás del arco volcánico, ni a más de 50 Km. de profundidad al noreste de Quepos (Fig. 3) [Protti et al., 1995a].

Segmentación de la zona de subducción en el Pacífico Sur de América Central

La subducción bajo Nicaragua y Costa Rica de litósfera de la Placa del Coco, con génesis y características geomórficas diferentes, produce cambios importantes en la zona de interacción con la Placa del Caribe. El acople de la Placa del Coco tanto con la Placa del Caribe como con el Bloque de Panamá cambia a lo largo de la zona de subducción desde Nicaragua hasta el sur de Costa Rica (Protti-Quesada, 1991, Protti et al., 1994, Protti et al., 1995a). Estos cambios correlacionan muy bien con las características batimétricas del fondo oceánico que se subduce y están directamente relacionadas con la génesis y la edad de la Placa del Coco. La edad de la Placa del Coco controla el ángulo de subducción, la profundidad máxima del área de acople y la profundidad máxima de la sismicidad intraplaca. Así mismo, las características del fondo oceánico influyen en el tamaño y continuidad de las asperezas en la zona de acople.

A pesar que la Contorsión Brusca de Quesada es la única segmentación física comprobada mediante información sismológica, se ha dividido la zona de subducción en el Pacífico sur de América Central en cinco segmentos, con base en las diferencias mencionadas anteriormente y en los registros de sismicidad tanto histórica como instrumental. Estos segmentos (Fig. 2) son: 1) Nicaragua-Papagayo, 2) Nicoya, 3) Cóbano-Herradura, 4) Quepos-Sierpe y 5) Osa-Burica. Litósfera de la Placa del Coco creada en la Dorsal del Pacífico se subduce por debajo de la Placa del Caribe en los dos primeros segmentos, mientras que placa del Coco creada en la Dorsal de Galápagos se subduce por debajo del Bloque de Panamá en los dos últimos segmentos y por debajo de una transición entre la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá en el segmento Cóbano-Herradura.

El **segmento Nicaragua-Papagayo** se caracteriza por un acople débil. Los sismos generados en este segmento son de moderada magnitud y muy frecuentes o de gran magnitud pero con velocidades de ruptura lentas (i.e. sismo de 1992). La Placa del Coco que colisiona ahí es relativamente vieja, de batimetría suave y se subduce con un ángulo muy fuerte, reduciendo así tanto el área de acople con la Placa del Caribe, como los esfuerzos normales al plano de subducción. Según información histórica y reciente, sismos de diferentes magnitudes han ocurrido en este segmento en 1750, 1840, 1844, 1863, 1881, 1889, 1901, 1916, 1921, 1956 y 1992. En este segmento ocurren más de 5 sismos al año con magnitudes M_w superiores a 5.2 grados.

Bajo el **segmento de Nicoya** la Placa del Coco que se subduce es también relativamente vieja, de batimetría suave y el ángulo de subducción es muy similar al del segmento Nicaragua-Papagayo. Sin embargo, a diferencia del segmento Nicaragua-Papagayo,

la existencia de la Península de Nicoya en este segmento ejerce una importante carga litostática sobre el plano de subducción aumentando así los esfuerzos normales e incrementando, por lo tanto, el acople entre las dos placas. Debido a este fuerte acople el segmento de Nicoya se caracteriza por la generación de sismos de gran magnitud (superior a 7 grados) y por una baja actividad sísmica de fondo en los períodos intersísmicos. En este segmento han ocurrido sismos de gran magnitud en 1826, 1853, 1900 y 1950. El sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978, de 6.9 grados de magnitud, rompió solo una pequeña porción del segmento de Nicoya (Güendel, 1986). Con base en el tamaño del área de ruptura y la magnitud del evento, se estima que este sismo liberó alrededor del 6% de la energía total acumulada, hasta esa fecha, bajo la Península de Nicoya.

La Placa del Coco que se subduce bajo los **segmentos de Cóbano-Herradura y Quepos-Sierpe** se caracteriza por ser relativamente joven y de batimetría rugosa, compuesta por una serie de pequeñas montañas submarinas. Al ser subducidas, estas montañas submarinas reducen el área de acople entre las placas a una serie de pequeñas asperezas, sin capacidad para acumular mayores esfuerzos y rompen, por lo tanto, con sismos frecuentes de moderada magnitud (Protti-Quesada, 1991). El segmento **Cóbano-Herradura** ha tenido sismos con magnitudes alrededor de los 7 grados en 1882, 1939 y 1990. El segmento **Quepos-Sierpe** es el más débil y solo presenta sismos de magnitud M_w inferior a 7 grados; algunos de estos sismos ocurrieron en 1940, 1941, 1952, 1974, 1982, 1990, 1996, 1999. Una característica importante de estos dos segmentos es que, dado su acople tan débil, tienden a romper también cada vez que ocurre un sismo fuerte (superior a 7 grados) en los segmentos aledaños de Nicoya al NO y de Osa-Burica al SE. Otra característica de estos segmentos del Pacífico central es presentar un modo de rompimiento en pares, como los más recientes pares de eventos ocurridos el 28 de agosto y el 4 de setiembre de 1996 y el par del 10 y 20 de agosto de 1999 (Güendel y Protti, 2000).

La Placa del Coco que se subduce bajo el **segmento Osa-Burica**, no solo es muy joven, sino también de mayor espesor dado que arrastra consigo la cordillera submarina, o dorsal asísmica, del Coco. El efecto flotante, tanto de la litósfera joven, como de la cordillera del Coco hace que el área de contacto entre las placas sea más uniforme y por lo tanto de mayor acople. Además, la carga litostática sobre el plano de subducción causada por el peso de la Península de Osa, contribuye a incrementar el acople en este segmento. Por esta razón este segmento ha presentado sismos de magnitud superior a 7 grados, entre los que se pueden mencionar los de 1867, 1904, 1941 y 1983.

Definición de la brecha sísmica de Nicoya

Las brechas sísmicas han sido definidas como aquellos segmentos, a lo largo de límites activos de placas, que no han experimentado la repetición de un sismo de gran magnitud por varias décadas y que por lo tanto son considerados como sitios potenciales para la ocurrencia de terremotos futuros (Nishenko, 1985). Las brechas sísmicas representan así tanto un intervalo en el tiempo como un espacio geográfico donde no se ha liberado grandes cantidades de energía sísmica en límites de placas que sí han generado en el pasado grandes terremotos.

La ausencia de un terremoto importante desde octubre de 1950 en el segmento de Nicoya y la ocurrencia de los sismos ocurridos en 1990, a la entrada al Golfo de Nicoya al SE, y en 1992, frente a Nicaragua al NO, han permitido determinar la extensión geográfica de lo que definieron Protti et al., 2001 como la "brecha sísmica de Nicoya" (Fig. 4). Tanto la magnitud de los terremotos ocurridos en este segmento, como su actividad sísmica anormalmente baja durante el período intersísmico, brindan información adicional sobre las características de un futuro terremoto que pueda ocurrir por debajo de la Península de Nicoya.

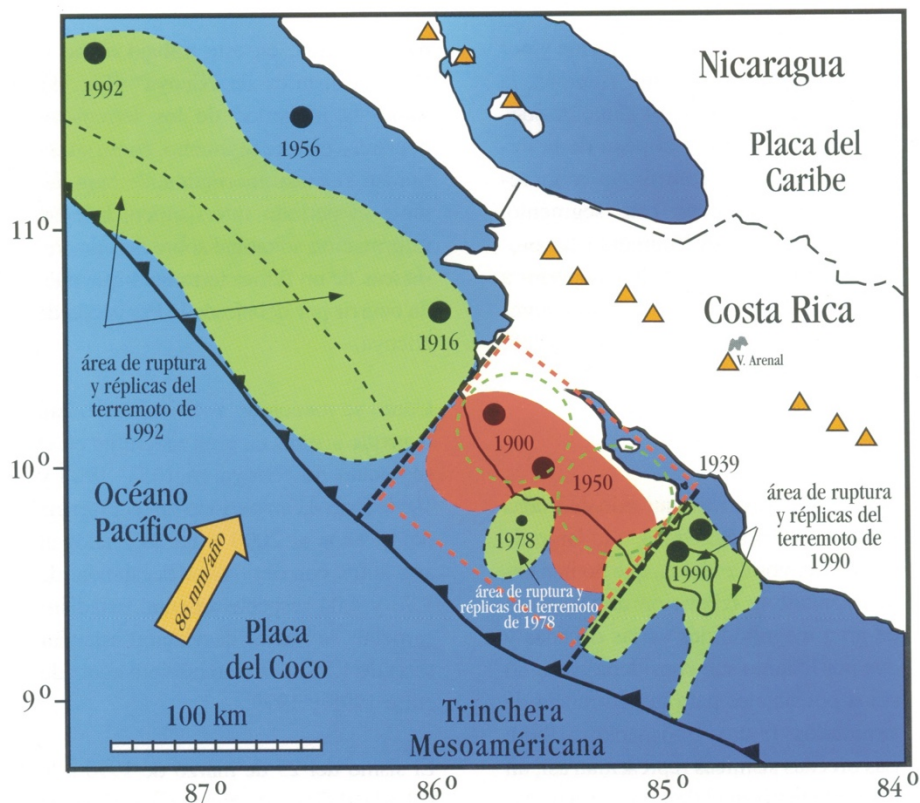


Figura 4. Definición geográfica de la brecha sísmica de Nicoya. El rectángulo y los círculos en líneas interrumpidas marcan el límite máximo y mínimo del área de ruptura del próximo terremoto; el área en rojo marca la interpretación de Protti et al., 2001 de la forma de la aspereza sísmica. Los triángulos negros marcan la ubicación de los volcanes activos y los círculos negros la ubicación de sismos importantes en la región.

El sismo del 25 de marzo de 1990 a la entrada al Golfo de Nicoya ocurrió en el extremo NO del segmento Cóbano-Herradura (Fig. 2) y su ruptura, tanto cosísmica como durante las réplicas, se propagó únicamente hacia el SE (Protti et al., 1995b). Este evento además de marcar claramente el límite SE de la brecha sísmica de Nicoya, da información sobre el contraste brusco, en acople elástico de la zona sismogénica, que existe entre los segmentos de Nicoya y Cóbano-Herradura. Esto último por cuanto ni siquiera este sismo de magnitud 7.0, justo en el límite, fue capaz de iniciar la ruptura de la brecha sísmica por debajo de la Península de Nicoya (Protti et al., 1995b). El límite SE de la brecha sísmica de Nicoya corresponde con la proyección hacia la trinchera de la Contorsión Brusca de Quesada.

El límite NO de la brecha sísmica de Nicoya lo marca el comportamiento de la secuencia de réplicas del sismo de Nicaragua del 2 de setiembre de 1992. Este sismo ocurrió en la parte NO del segmento Nicaragua-Papagayo y sus réplicas se propagaron hacia el SE deteniéndose súbitamente en el extremo NO de la Península de Nicoya, en el Golfo de Papagayo.

Hacia el arco volcánico, esta brecha sísmica se extiende hasta el eje del Golfo de Nicoya (Protti-Quesada, 1991), donde la superficie del plano de subducción (falla) se encuentra casi a los 40 Km. de profundidad. Con base en la información obtenida del sismo de 1990 y en las relocalizaciones de las réplicas del sismo de 1950 (Güendel, 1986), hacia la trinchera, el área de acople elástico comienza a unos 15 Km. de ésta, sobre el plano de subducción a profundidades cercanas a los 5 Km. Sin embargo, dada su magnitud potencial, el futuro terremoto en este segmento podría llegar a propagar la ruptura hasta la trinchera.

En resumen, se define aquí la brecha sísmica de Nicoya como el intervalo transcurrido desde 1950 y la superficie de la zona de subducción ubicada por debajo de la Península de Nicoya. Esta área se muestra gráficamente en la Figura 4.

Redes de monitoreo en la Península de Nicoya y alrededores

Para el monitoreo tectónico de la Península de Nicoya y sus alrededores, el OVSICORI-UNA opera, conjuntamente con otras instituciones, redes de control geodinámico sísmicas y geodésicas. La red sísmica permanente en los alrededores de la Península de Nicoya consiste de 5 estaciones de período corto y componente vertical. Además de estas estaciones de período corto, el OVSICORI-UNA opera cinco estaciones de banda ancha y tres componentes. De diciembre de 1999 a julio del 2001 los autores de este trabajo e investigadores de la Universidad de California en Santa Cruz (UCSC) operaron una red sísmológica digital de 20

estaciones en la península de Nicoya. Dicha red se instaló para detallar la geometría de la zona sísmogénica por debajo de la península de Nicoya. Resultados de esa red y otra que operamos entre Quepos y Osa, se presentan en la Figura 5.

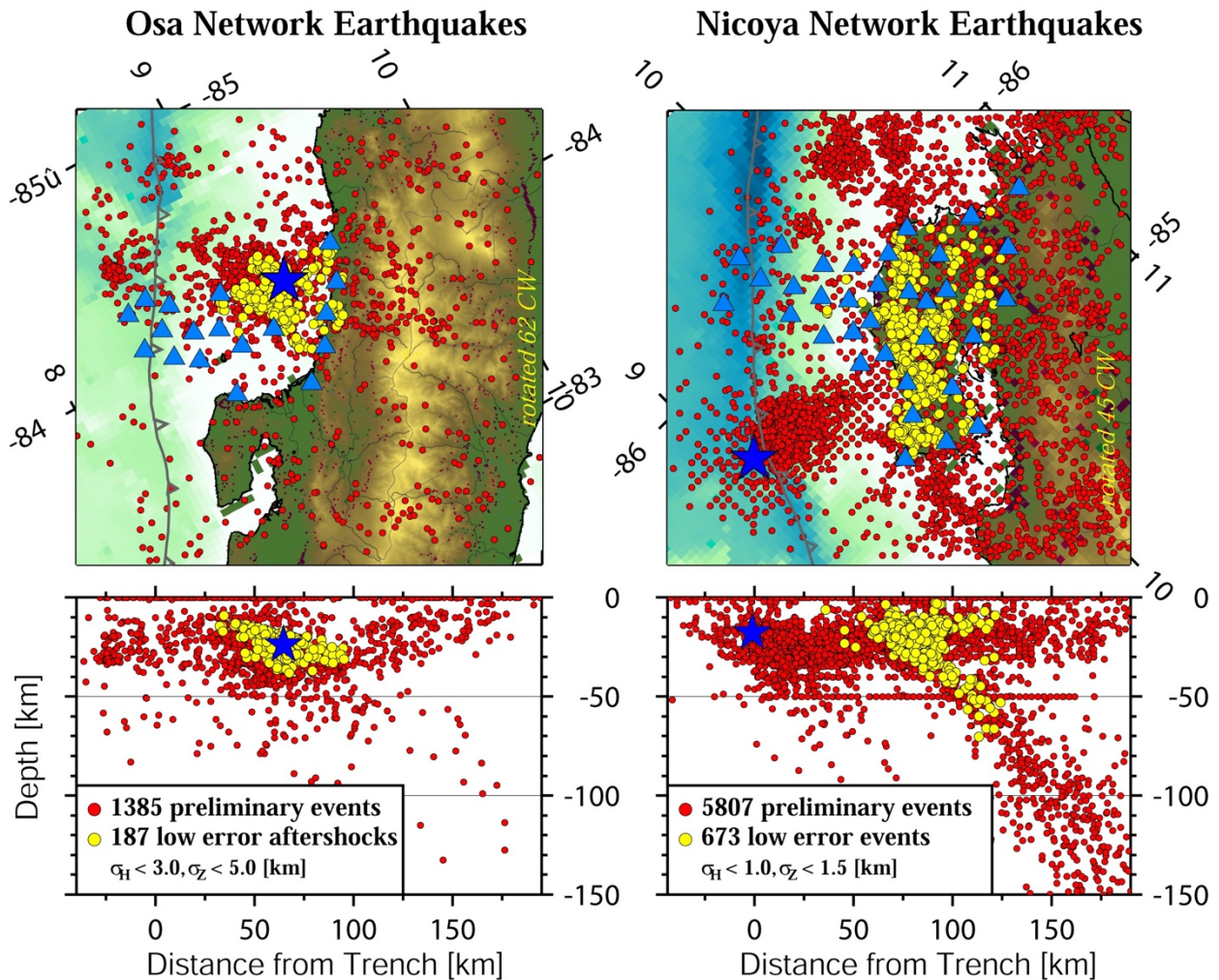


Figura 5. Localizaciones más recientes de sismos registrados con redes temporales de alta resolución en los segmentos de Quepos-Sierpe y de Nicoya (DeShon et al., 2003). Figura tomada de Norabuena et al., 2004)

Junto con el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Agencia Nacional de Aeronáutica Espacial de los Estados Unidos (JPL-NASA), el OVSICORI-UNA ha participado en la ocupación de monumentos geodésicos de una red de GPS en y alrededor de la Península de Nicoya. Dicha red, que fue diseñada por el OVSICORI-UNA específicamente para el seguimiento de la brecha sísmica de Nicoya, ha sido ocupada en 1994, 1996, 1997 y más recientemente, con participación de la Universidad de Miami y 20 monumentos más, en el 2000 y 2003. Resultados de esta red geodésica se presentan en la Figura 6.

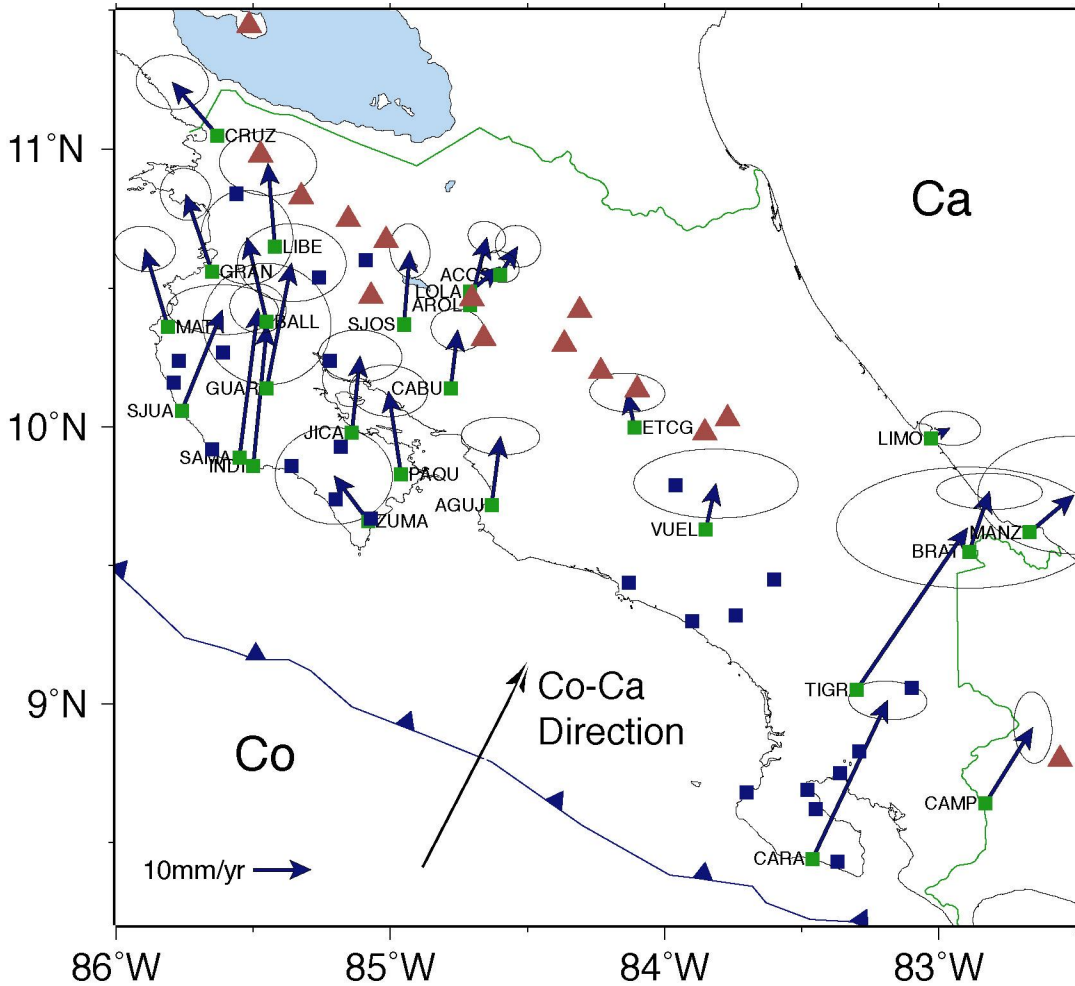


Figura 6. Vectores de desplazamiento cortical horizontal, con respecto a la placa del Caribe, obtenidos a partir de campañas de GPS. Figura tomada de Norabuena et al., 2004. Note el desplazamiento de la península de Nicoya hacia el NE. Los vectores de gran magnitud en la región sur de Costa Rica son el resultado del desplazamiento del Bloque de Panamá con respecto a la Placa del Caribe

Con el fin de incrementar la resolución de las mediciones de deformación y para modelar mejor la ubicación de los límites superior e inferior de la zona sismogénica por debajo de la Península de Nicoya, se construyó un perfil denso de monumentos de GPS a través de la península, perpendicular a la trinchera, para ocupaciones anuales (Fig. 7). Este perfil geodésico fue construido en el 2001 y ocupado en el 2001, 2002 y 2003, con el apoyo financiero de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y la asesoría técnica del Centro Japonés de Ciencias Marinas y Tecnología (JAMSTEC) de Japón y el Instituto de Investigación de Terremotos de la Universidad de Tokio (ERI). También con el apoyo de esas tres instituciones japonesas se obtuvo la instrumentación para la instalación de tres estaciones permanentes de GPS. Estas estaciones fueron instaladas en los sitios INDI, HUAC y PUJE del perfil geodésico antes descrito (Fig. 7).

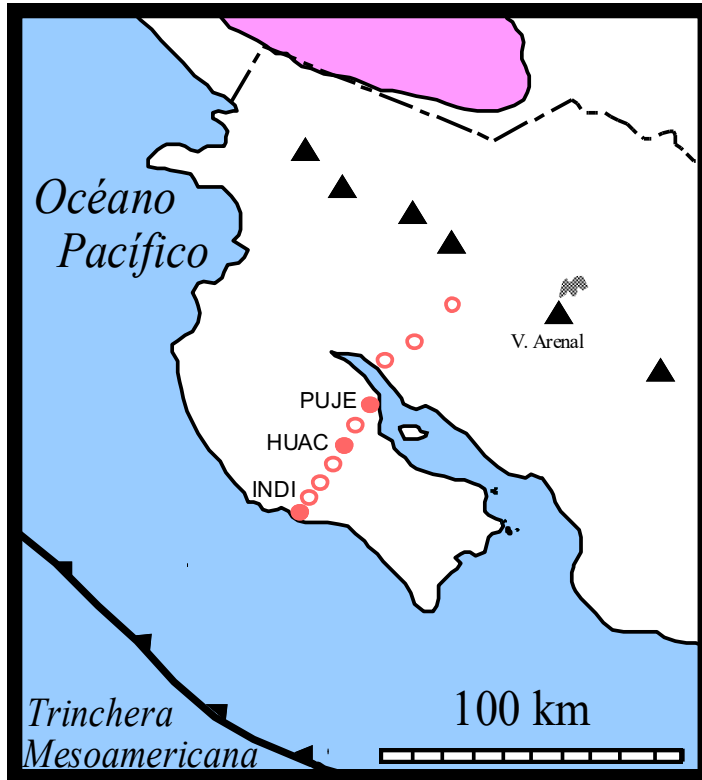


Figura 7. Ubicación de monumentos de GPS a lo largo de un perfil geodésico perpendicular a la trinchera Mesoamericana, a través de la Península de Nicoya. Círculos abiertos representan los monumentos ocupados en el 2001, 2002 y 2003; los círculos rellenos indican tres de esos sitios que se transformaron en estaciones permanentes de GPS.

Deformación cortical de la Península de Nicoya y sus alrededores

Los resultados de las campañas de GPS muestran que la Península de Nicoya está siendo desplazada hacia el NE con respecto a la Placa del Caribe a velocidades de hasta 30 mm/año y presenta una subsidencia de su costa oeste de hasta 20 mm/año (Lundgren et al., 1999 y Norabuena et al., 2004) (Fig. 6). Este empuje de la península hacia el NE y hacia abajo es una evidencia clara del fuerte acople existente entre las Placas del Coco y del Caribe a lo largo del segmento de subducción de Nicoya.

El terremoto de Nicoya de 1950 produjo un levantamiento cosísmico de alrededor de 1 m en la costa oeste de la península (Marshall y Anderson, 1995) y la mayor parte de ese levantamiento se ha recuperado como subsidencia durante el período intersísmico. Al final del período intersísmico, previo a la ruptura principal, ocurre, en zonas de subducción bien acopladas, una subsidencia rápida (deformación elástica) de las áreas donde cosísmicamente ocurrirá levantamiento (deformación visco-elástica). Como se mencionó anteriormente, la

subsistencia actual en la costa oeste de la península es del orden de 20 mm/año. Esta subsistencia presísmica es posible de observarla macroscópicamente en la región entre playa Guiones y Sámara y es la responsable de la erosión de la carretera costera en playa Carrillo por parte del oleaje durante mareas muy altas. En playa Guiones esta subsistencia ha causado la erosión de la playa y también variaciones importantes en el equilibrio entre erosión y depositación (Geol. Gregorio Escalante, comunicación personal, 1997, 1998, 1999). La inversión de los datos de GPS indica dos parches de la brecha sísmica de Nicoya con acoplamiento más fuerte; una frente a la costa a unos 10 km de profundidad y la otra por debajo del valle del Tempisque a unos 35 km de profundidad (Fig. 8) (Norabuena et al., 2004).

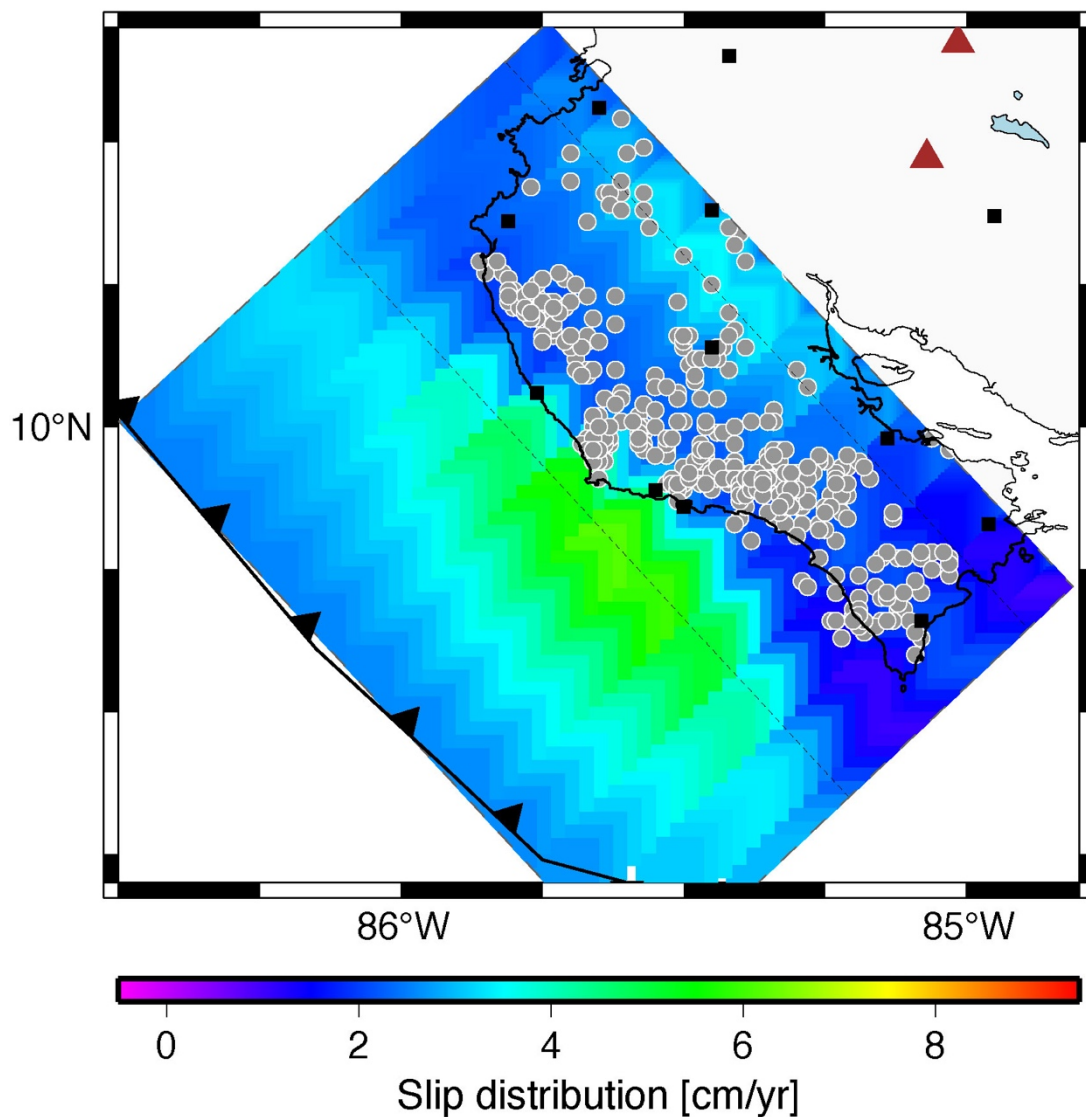


Figura 8. Resultados de la inversión de los datos de GPS indicando dos parches de la brecha sísmica de Nicoya con acoplamiento más fuerte; una frente a la costa a unos 10 km de profundidad y la otra por debajo del valle del Tempisque a unos 35 km de profundidad (Norabuena et al., 2004).

Los modelos viscoelásticos simples predicen, para sismos de subducción, un levantamiento cortical hacia la trinchera en la parte más superficial de la falla y subsidencia o hundimiento sobre la parte más profunda. La Figura 9 muestra el patrón de deformación esperado en y alrededor de la Península de Nicoya, para un sismo con 25% de deslizamiento sísmico en la parte más superficial y de menor ángulo (8°) de la zona de acople (de 6 a 12 Km. de profundidad, o sea, una ruptura que no se extendería hasta la trinchera) y 60% de deslizamiento en la parte más profunda y más inclinada (29°) de la falla (de 12 a 40 Km. de profundidad). Este modelo predice un levantamiento de la costa oeste de la península de casi un metro y un hundimiento en el Golfo de Nicoya y el valle del Tempisque de casi 20 centímetros. Dado el deslizamiento en dos fallas con diferente ángulo de inclinación, los modelos viscoelásticos de deformación sugieren, además, la ocurrencia de una subsidencia relativa (menor levantamiento) en la plataforma continental que involucra esfuerzos horizontales extensivos en esa región. Esto podría explicar la presencia de una cuenca sedimentaria y del fallamiento normal observados por medio de reflexión sísmica en la plataforma continental.

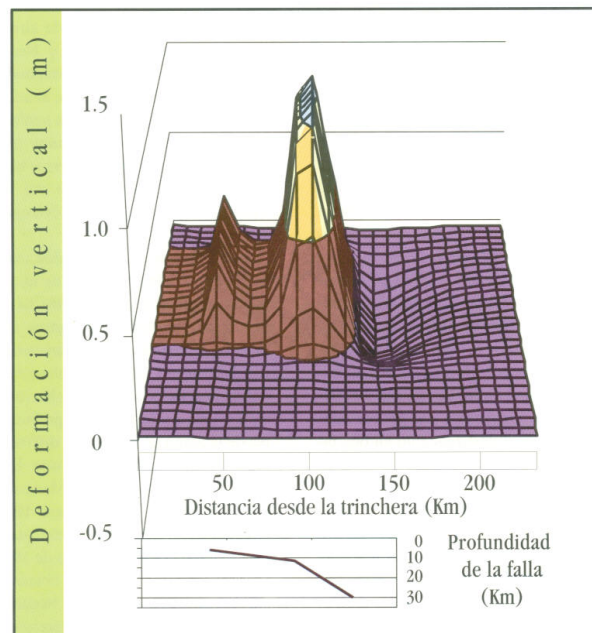


Figura 9. Patrón de deformación esperado en y alrededor de la Península de Nicoya para un sismo con 25% de deslizamiento sísmico en la parte más superficial y de menor ángulo (8°) de la zona de acople (de 6 a 12 Km. de profundidad) y 60% de deslizamiento en la parte más profunda y más inclinada (29°) de la falla (de 12 a 40 Km. de profundidad).

CONCLUSIONES

Se ha definido la extensión geográfica de la brecha sísmica de Nicoya y se ha ubicado en su contexto tectónico regional. Con base en su tamaño y tasas de deformación, se estima que esta brecha tiene a la fecha suficiente deslizamiento acumulado para generar un terremoto de magnitud cercana a los 7.5 grados. La magnitud del deslizamiento sísmico acumulado desde 1950 indica que el sismo de Nicoya debe ocurrir.

En el período presísmico hemos ya registrado deformaciones corticales elásticas compatibles con un fuerte acople en la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya. Es así como la metodología de los sistemas de posicionamiento global prueba nuevamente ser una herramienta efectiva en la documentación de los ciclos sísmicos y reafirman su potencial aplicación en la predicción sísmica.

Para el OVSICORI-UNA es un compromiso histórico documentar, lo mejor posible, la deformación en la banda de registro más ancha posible (de 100 Hz a decenas de años) y por el mayor tiempo posible, de tal forma que se pueda dejar registros de las fases presísmica, cosísmica y postsísmica del próximo sismo de Nicoya. Esta información será invaluable para la predicción sísmica en Costa Rica y la región del circumpacífico.

Agradecimientos

La información presentada aquí fue el resultado del trabajo de muchos investigadores e instituciones. Debemos dejar expreso nuestro agradecimiento a Rodolfo van der Laet, Enrique Hernández y Tomás Marino del OVSICORI-UNA, a Paul Lundgren del Laboratorio de Propulsión a Chorro, a Timothy Dixon de la Universidad de Miami, a Susan Schwartz y Daniel Sampson de la Universidad de California en Santa Cruz, a Edmundo Norabuena del Instituto Geofísico del Perú, a Yoshiyuki Kaneda y Koichiro Obana del Centro Japonés de Ciencias Marinas y Tecnología, y a Takeshi Inuma, Shin'ini Miyasaki y Teruyuki Kato del Instituto de Investigaciones de Terremotos de la Universidad de Tokio. Agradecemos además a la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) por el envío de expertos y la donación de tres estaciones continuas de GPS.

Referencias bibliográficas

- De Mets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus y S. Stein 1990 Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101:425-478.
- DeShon, H. R.; Schwartz, S. Y.; Bilek, S. L.; Dorman, L. M., González, V.; Protti, J. M.; Flueh, E. R.; Dixon, T. H.; Seismogenic zone structure of the southern Middle América Trench, Costa Rica; *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. B10, 2491-2505, 2003.
- Güendel, F. 1986 Seismotectonics of Costa Rica: an analytical view of the southern terminus of the Middle American Trench, doctoral dissertation, University of California, Santa Cruz, 1986.
- Guendel, F.; y Protti, M.; Actividad Sísmica Frente a las Costas de Quepos, Pacífico Central, Costa Rica; remitido a la Revista de Vulcanología, Sismología y Tectónica, 2000.
- Lundgren, P.; Protti, M.; Donnellan, A; Heflin, M.; Hernández, E. y D. Jefferson 1999 Seismic cycle and plate margin deformation in Costa Rica: GPS observations from 1994 to 1997; *Jour. Geophys. Res.*, 104- B12: 28915-28926.
- Marshall, J.S. y R. S. Anderson 1995 Quaternary uplift and seismic cycle deformation, Península de Nicoya, Costa Rica, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107- 4: 463-473.
- Nishenko, S.P. 1985 Seismic Potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal, *Jour. Geophys. Res.*, 90-B5: 3589-3615.
- Norabuena, E., Dixon, T. H.; Schwartz, S. Y.; DeShone, H.; Protti, M.; Dorman, L.; Flueh, E.R.; González, V.; Lundgren, P.; Newman, A.; Pollito, P.; Sampson, D.; Geodetic and Seismic Constrains on some Seismogenic Zone Processes in Costa Rica; submitted to the *Journal of Geophysical Research*; in press 2004.
- Protti-Quesada, J. M. 1991 Correlation between the age of the subducting Cocos plate and the geometry of the Wadati- Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica; MSc. dissertation, University of California, Santa Cruz, 66 p.
- Protti-Quesada, J. M. 1994 The Most Recent Large Earthquakes in Costa Rica (1990 Mw 7.0 and 1991 Mw 7.6) and Three-dimensional Crustal and Upper Mantle P-wave Velocity Structure of Central Costa Rica, Ph.D. dissertation, University of California, Santa Cruz, 116 p.
- Protti, M. Güendel, F. y K. McNally 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. of the Earth and Planet. Inter.*, 84: 271-287.
- Protti, M., Güendel, F. y McNally, K. 1995a Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica. In: *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, Mann, P. ed.: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 295: 309-326.
- Protti, M.; and 14 other co-authors 1995b The March 25, 1990 (Mw=7.0 MI=6.8) earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: its prior activity, foreshocks, aftershocks and triggered seismicity. *Jour. Geophys. Res.*, 100- B10: 20345-20358.
- Protti, M; F. Guendel, F.; E. Malavassi; 2001; Evaluación del potencial sísmico de la Península de Nicoya; 1ª ed.; Editorial Fundación Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 144 p.
- Silver, E. A., D.L. Reed, J.E. Tagudin y D.J. Heil 1990 Implications of the north and south Panama thrust belt for the origin of the Panama orocline. *Tectonics*, 9: 261-281.