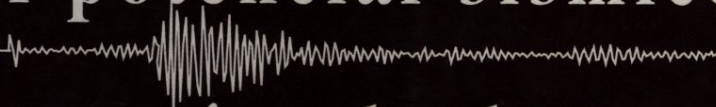


# Evaluación

del potencial sísmico

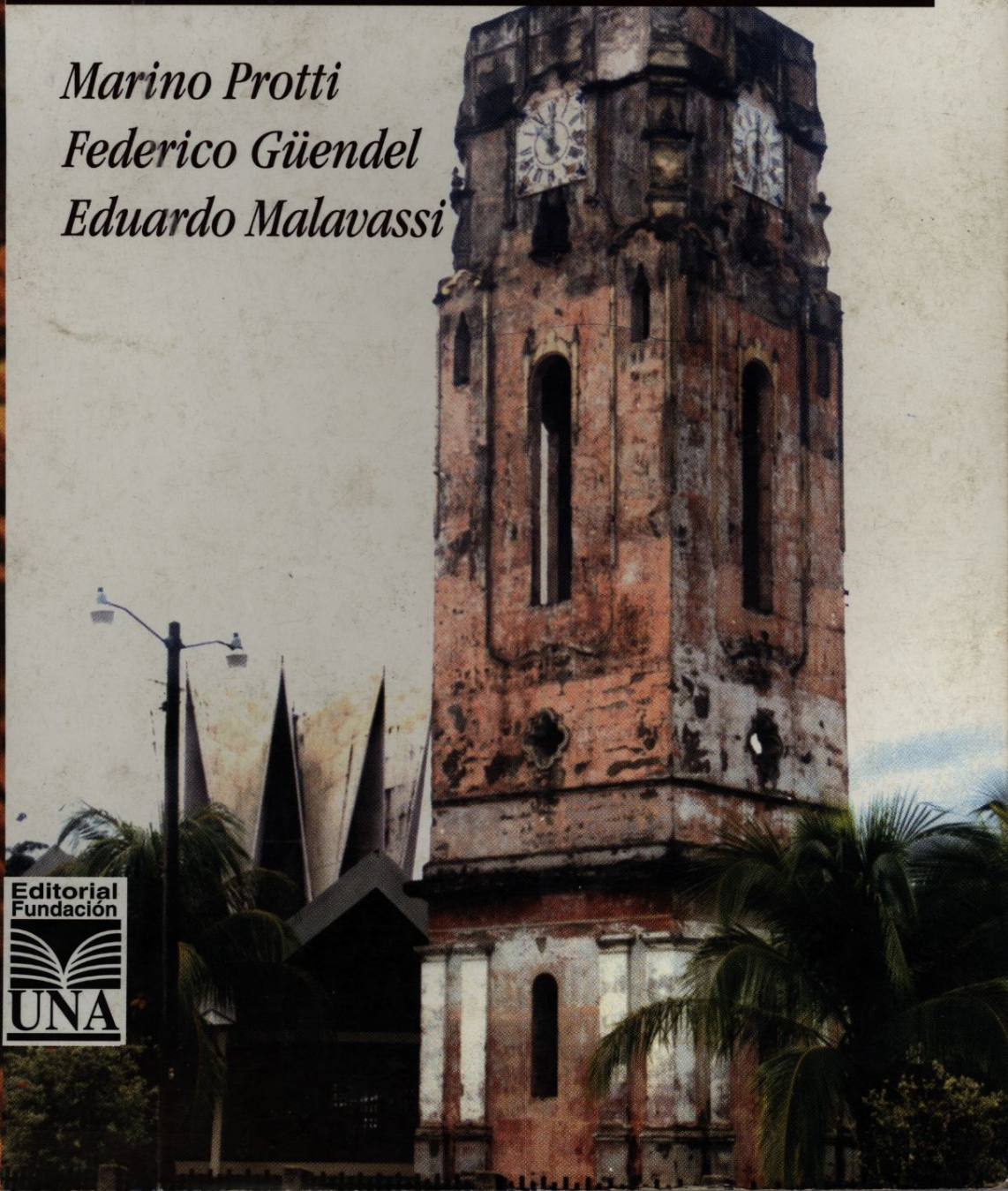


de la Península de Nicoya

*Marino Protti*

*Federico Güendel*

*Eduardo Malavassi*





## Sobre los autores

Los Drs. Protti, Güendel y Malavassi son investigadores del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), han contribuido con abundantes artículos científicos sobre Vulcanología, Sismología y Tectónica y juntos acumulan más de 70 años de experiencia en esas disciplinas. El Dr. Jorge Marino Protti Quesada nació en Heredia, Costa Rica, el 7 de noviembre de 1960. Cursó los estudios primarios en la Escuela Laboratorio de Heredia y los estudios secundarios en el Liceo de Heredia. Obtuvo su Bachillerato en Geología en la Universidad de Costa Rica en 1983, su Maestría en Ciencias de la Tierra en 1991 y el Doctorado en Geofísica en 1994, ambos en la Universidad de California en Santa Cruz. El Dr. Protti fue distinguido con el Premio Nacional en Ciencia y Tecnología "Dr. Clodomiro Picado" en 1996, y ha sido el Director del OVSICORI-UNA desde 1997. El Dr. Federico Güendel Umaña nació en San José, Costa Rica, el 15 de noviembre de 1952. Cursó los estudios primarios en la Escuela Buenaventura Corrales y los estudios secundarios en el Colegio Seminario. Obtuvo su Bachillerato en Física en la Universidad de Costa Rica en 1975, su Maestría en Ciencias de la Tierra en la Universidad de Texas en Austin en 1978 y el Doctorado en Ciencias de la Tierra en la Universidad de California en Santa Cruz en 1986. El Dr. Güendel fue distinguido con el Premio "Roberto Brenes Mesén" en 1997 y ocupó la dirección del OVSICORI-UNA en 1988 y 1989. El Dr. Eduardo Malavassi Rojas, nació en Tres Ríos, Costa Rica, el 3 de mayo de 1951. Cursó los estudios primarios en la Escuela José Ana Marín y los secundarios en el Colegio Saint Francis. Obtuvo su Bachillerato en Geología en la Universidad de Costa Rica en 1973, su Maestría en Geología y Geofísica en la Universidad de Hawái en Manoa en 1979 y su Doctorado en Ciencias de la Tierra en la Universidad de California en Santa Cruz en 1991. El Dr. Malavassi fue Director del OVSICORI-UNA entre 1991 y 1997.





# Evaluación

del potencial sísmico

de la Península de Nicoya



La brecha sísmica de Nicoya

21

• Introducción

*Marino Protti*

*Federico Güendel*

*Eduardo Malavassi*

CAPÍTULO II

Sismicidad histórica y reciente  
en la brecha sísmica







Créditos

©Editorial Fundación UNA  
Hecho el depósito de ley  
Derechos reservados  
©2001

Este libro fue aprobado por el Consejo Editorial Fundación UNA

Diseño y diagramación: Ileana Ondoy/Proyectos Creativos S.A.  
Edición: 1000 ejemplares

551.22  
P967e

Protti, Marino

Evaluación del potencial sísmico de la Península  
de Nicoya/ Marino Protti, Federico Güendel,  
Eduardo Malavassi.--1a. ed. --Heredia, C.R.:

EFUNA, 2001.

144p.; 26 x 19 cm.

ISBN 9968-14-086-4

1. Sismología-Costa Rica. 2. Sismología-  
Investigaciones. I. Güendel, Federico. II. Malavassi,  
Eduardo. III. Título.

©Editorial Fundación UNA

Apartado: 2441-3000 Heredia, Costa Rica, América Central

Teléfono: (506) 262-0505

Fax: (506) 237-8936

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, sin el consentimiento  
expreso por escrito de la EFUNA.



IMPRESO EN LA IMPRENTA NACIONAL  
LA URIUCA, SAN JOSE COSTA RICA / TELEFONO 231-5222



## TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos	7
Prólogo	11
Resumen	17
Abstract	19

### CAPÍTULO I

#### La brecha sísmica de Nicoya 21

- Introducción 21
- Marco tectónico regional 26
- Segmentación de la zona de subducción en el Pacífico Sur de América Central 30
- Definición de la brecha sísmica de Nicoya 35
- Estimación del tamaño de la brecha sísmica de Nicoya en función de la sismicidad posterior a 1976 37
- Evaluaciones previas del potencial de la brecha sísmica de la Península de Nicoya 43

### CAPÍTULO II

#### Sismicidad histórica y reciente en la brecha sísmica de Nicoya 47

- Sismicidad histórica en la brecha sísmica de Nicoya 47
- El último gran terremoto de la Península de Nicoya (Mw=7.8) del 5 de octubre de 1950 48
- Parámetros sísmicos e impacto del terremoto de 1950 48
- El sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978 52



- Secuencia sísmica de marzo de 1991 53
- Actividad microsísmica en la brecha desde 1984 54

### CAPÍTULO III

#### Información que sustenta el potencial sísmico de la Península de Nicoya 57

- Deficiencia de deslizamiento sísmico 57
- Sismicidad y acople elástico 58
- Sismicidad intraplaca subducente 59
- Deformación cortical 60
- Fluidos de subducción 65
- Niveles de agua en pozos 65

### CAPÍTULO IV

#### Posibles características y consecuencias de un futuro sismo por debajo de la Península de Nicoya 67

- Magnitud y momento sísmico 67
- Evolución de la ruptura cosísmica 71
- Deformación cortical y tsunami 73
- Intensidades sísmicas 76
- Sismicidad superficial inducida 76
- Impacto del sismo en la población e infraestructura 80



## CAPÍTULO V

### Lo que se ha hecho y aún queda por hacer

85

- Redes de control geodinámico existentes en la Península de Nicoya y alrededores 85
- Otras investigaciones científicas realizadas en el segmento de subducción de Nicoya 88
- Investigaciones necesarias para complementar la información sobre el segmento de subducción de Nicoya 99
- Recomendaciones para la documentación del próximo terremoto de Nicoya y sus deformaciones presísmicas, cosísmicas y postsísmicas 93
- Recomendaciones para la reducción del impacto y preparación de la población 96

### Conclusiones

101

### Apéndices

103

- I. Sismicidad histórica en la región norte de Costa Rica 1644-1916 103
- II. El experimento de la zona de sismogeneración (SEIZE) 115
- III. Propuesta para la implantación de un sistema de alerta temprana al Valle Central de Costa Rica por sismos fuertes de subducción en la brecha sísmica de Nicoya 119

### Glosario

125

### Referencias bibliográficas

135



CAPÍTULO V

Lo que se ha hecho  
y aun queda por hacer

CAPÍTULO VI

Respecto a los trabajos realizados en la Península de  
Yucatán, en el período de 1901 a 1904, se puede decir  
que, en general, han sido satisfactorios. En el primer  
año se hizo un estudio de las condiciones de vida de  
los indígenas, se levantó un censo de la población y se  
realizó un estudio de las enfermedades que padecen.  
En el segundo año se continuó con el estudio de la  
población y se hizo un estudio de las enfermedades  
que padecen. En el tercer año se continuó con el  
estudio de la población y se hizo un estudio de las  
enfermedades que padecen. En el cuarto año se  
continuó con el estudio de la población y se hizo un  
estudio de las enfermedades que padecen.

CAPÍTULO VII

Conclusiones

Los trabajos realizados en la Península de Yucatán  
durante el período de 1901 a 1904, han sido  
satisfactorios. En general, se ha obtenido una  
gran cantidad de datos que servirán para el estudio  
de las condiciones de vida de los indígenas y de las  
enfermedades que padecen.



## A g r a d e c i m i e n t o s y r e c o n o c i m i e n t o s

Los autores deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a todo el personal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, de la Universidad Nacional con sede en Heredia, Costa Rica (OVSICORI-UNA) por su esmerado y dedicado trabajo en la instalación y mantenimiento de la red sismográfica y en el procesamiento de la información registrada por dicha red. Una parte importante de los resultados presentados aquí son basados en dicha información.

La red sismográfica del OVSICORI-UNA fue instalada y se mantiene en operación, gracias al esfuerzo de su personal y al apoyo incondicional que ha mantenido la Dra. Karen McNally, de la Universidad de California en Santa Cruz (UCSC). Esta red fue posible gracias a una propuesta que presentaron la Dra. McNally y funcionarios académicos del OVSICORI-UNA ante la Agencia de Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID) a través de su Oficina para la Asistencia de Desastres en el Extranjero (OFDA). Desde el inicio de la operación de la red sismográfica, el OVSICORI-UNA ha contado también con el incondicional apoyo del Dr. Gerry Simila de la Universidad Estatal de California en Northridge.



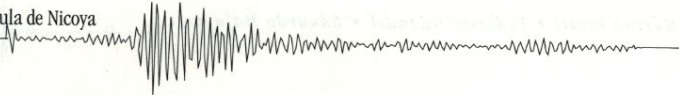


La selección del segmento de subducción de Nicoya como uno de los dos únicos sitios en el mundo para el Experimento de Zonas Sismogénicas (SEIZE) realizada en 1997, no hubiera sido posible sin el apoyo económico y académico del Dr. Eli Silver de UCSC, del Dr. Paul Lundgren del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Agencia Espacial de Estados Unidos (JPL-NASA) y de la Dra. Miriam Kastner de la Universidad de California en San Diego (UCSD), que financiaron la participación del Dr. Marino Protti para presentar y defender nuestra propuesta ante el taller de MARGINS en el que se hizo la selección. El proyecto SEIZE ha venido a satisfacer lo que el OVSICORI-UNA vio, desde principios de la década pasada, como una oportunidad histórica para la documentación de una brecha sísmica madura. El Dr. Silver fue pieza fundamental en la agrupación de científicos y preparación del taller que propició las propuestas al Programa MARGINS de la Fundación de Ciencias de los Estados Unidos (NSF) para el financiamiento del proyecto SEIZE en Costa Rica.

El proyecto SEIZE que en estos momentos está ejecutando el OVSICORI-UNA, es una investigación multidisciplinaria que involucra a científicos de muchas instituciones. Por esta razón queremos manifestar nuestro agradecimiento a los líderes en esas instituciones: la Dra. Susan Schwartz de UCSC, el Dr. Timothy Dixon de la Universidad de Miami (UM), el Dr. Paul Lundgren de JPL-NASA y el Dr. LeRoy Dorman de UCSD. Un agradecimiento especial a la Dra. Schwartz por la experiencia de un trabajo académico fructífero con el OVSICORI-UNA y por su apoyo incondicional. La red sismográfica de Nicoya no podría haber recogido la información tan valiosa y completa sin el apoyo logístico del MSc. Daniel Sampson, el Dr. Andy Newman y el MSc. Víctor González. Agradecemos también a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UNA por facilitar las instalaciones para operar un Laboratorio Sismológico en la estación marino-costera de Punta Morales.

La información geodésica recolectada en Costa Rica, durante la década pasada (1990-2000) ha sido fundamental en la evaluación del potencial sísmico de la brecha de Nicoya; queremos brindar un agradecimiento especial al Dr. Paul Lundgren por hacer posible la recolección y procesamiento de dicha información. Agradecemos también al grupo de geodesia del OVSICORI-UNA y a los estudiantes de la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia de la UNA por su participación activa en las campañas de GPS. Durante el último año han





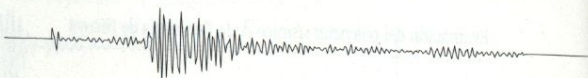
contribuido también en esta tarea el Dr. Dixon y el MSc. Edmundo Norabuena de UM. Además de la información recolectada en "tierra firme", durante los últimos años, varios cruseros geofísicos han trabajado en mares de Costa Rica y han contribuido con información muy valiosa para el entendimiento de los procesos de subducción. Deseamos agradecer a los científicos e instituciones que han liderado esas investigaciones: Dr. Silver de UCSC, Dr. Kirk McIntosh de la Universidad de Texas en Austin, Dr. Mark Langseth (q.e.p.d.) y Dr. Ernst Flueh del Centro Alemán de Investigaciones para las Geociencias Marinas (GEO-MAR). Agradecemos también a las tripulaciones de los barcos geofísicos R.V. Maurice Ewing, R.V. Atlantis II, R.V. Joides Resolution y R.V. Sonne.

La Fundación W. M. Keck financió una campaña geológica en la parte sur de la Península de Nicoya en la que estudiantes de Costa Rica y de Estados Unidos recolectaron información muy valiosa para la interpretación de la historia de la deformación de la Península y su relación con el ciclo sísmico. Agradecemos a los Drs. Thomas Gardner de la Universidad de Trinity, Dorothy Merritts, Edward Beutner y Jeffrey Marshall de la Universidad Franklin y Marshall, por liderar dicha campaña. Los Drs. Gardner y Marshall además, junto con el Dr. Donald Fisher de la Universidad Estatal de Pensylvania y sus estudiantes graduados, han recolectado además, información muy valiosa sobre la deformación del arco externo y sus manifestaciones geomórficas como producto de la subducción en el Pacífico de Costa Rica.

El Dr. Marshall también contribuyó, junto con el Geol. Jorge Brenes, al rescate, por medio de entrevistas, de información sobre los daños causados por el terremoto de Nicoya del 5 de octubre de 1950. Agradecemos a las personas entrevistadas y en general, a los habitantes de la Península de Nicoya por todo el apoyo brindado al OVSICORI-UNA durante nuestras investigaciones en la región, particularmente a aquellos que nos han permitido la instalación de instrumentos en sus propiedades.

Parte del tiempo dedicado a esta investigación por el Dr. Federico Güendel se efectuó mientras se encontraba haciendo su sabático en la Universidad de Uppsala como parte del proyecto Regionalización Sismotectónica de América Central (SERCA) financiado por la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI).





Agradecemos al Dr. Oscar Aguilar Bulgarelli, Presidente de la Sección Nacional de Historia del Instituto Panamericano de Geografía e Historia por el apoyo al proyecto Temblores, Terremotos y otros Desastres Naturales, presentado por el OVSICORI-UNA y ejecutado por la Lic. Brumilda Hilge y el Lic. Francisco Álvarez, de la Escuela de Historia de la Universidad Nacional.

Deseamos agradecer al Centro Japonés de Ciencias Marinas y Tecnología (JAMSTEC) por el interés mostrado en nuestro trabajo en Nicoya y por sus ofrecimientos de colaboración futura para continuar el monitoreo y estudio de la brecha sísmica de Nicoya. La Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) ha sido fundamental para establecer esta relación.

La versión final de este libro ha recibido el beneficio de la meticulosa revisión y recomendaciones del Geol. Gregorio Escalante, del Ing. Franz Sauter, de la Ing. Ma. Auxiliadora Protti y del periodista Juan Carlos Cruz. A ellos nuestro más profundo agradecimiento. El Geol. Escalante ha aportado información muy valiosa sobre la subsidencia de la costa oeste de la Península de Nicoya. Al Ing. Sauter le agradecemos también por escribir el Prólogo de este libro. Agradecemos además al Msc. Víctor González, al Lic. Fernando Ureña, al Lic. Carlos Montero y al Lic. Douglas Salgado, por aportar, muy gentilmente, las Figuras 3, 18, 19 y 21, respectivamente.

Finalmente agradecemos a la Editorial de la Fundación Pro Ciencia, Arte y Cultura de la Universidad Nacional, EFUNA por el apoyo que hizo posible la publicación de este libro y especialmente a la Universidad Nacional por haber contribuido a construir el ambiente académico que permitió la concepción de este libro y del OVSICORI-UNA.

## P r ó l o g o

La predicción sísmica es un tema que fascina a científicos y legos por igual. La razón es simple: todos detestan la incertidumbre, sobre todo si se trata de fenómenos naturales que pueden desatar catástrofes y causar víctimas y grave impacto a la sociedad.

No obstante, la predicción sísmica, en el sentido estricto de pronosticar la fecha, sitio de ocurrencia y magnitud del evento, no es posible hoy día. Aún países con extensas redes de sofisticados instrumentos de medición amparadas por conexiones satelitales, no han podido predecir la ocurrencia de eventos sísmicos catastróficos, tal el caso de Northridge, California (1994) y Kobe, Japón (1995).

Al margen del contexto de la predicción, interesa a la comunidad científica, profesional e institucional evaluar el potencial sísmico de determinada región o país con el objeto de cuantificar la intensidad de las acciones y prever los efectos derivados de los terremotos, como requisito para la adopción de medidas adecuadas para prevenir y mitigar las consecuencias de estos fenómenos naturales.





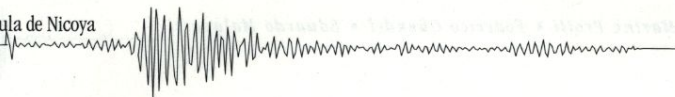
Para la evaluación de la amenaza sísmica y el riesgo inherente a un sitio o zona, se recurre a metodologías que se basan en la información disponible sobre la sismicidad histórica, los registros instrumentales, la geología local y la tectónica regional. Dos modelos o enfoques han dominado la investigación de las últimas tres décadas: el determinista y el probabilístico.

Hasta la fecha, el enfoque determinista de predecir los fenómenos sísmicos, fijando lugar, magnitud y fecha de ocurrencia, método que convencionalmente llamamos *predicción sísmica*, ha resultado infructuoso e imposible. En cambio, los métodos estadísticos y probabilísticos permiten determinar, para determinado período, las probabilidades de ocurrencia de los eventos y las probabilidades de excedencia de los parámetros de intensidad y de las pérdidas. Sin bien es cierto que, los parámetros utilizados en los modelos probabilísticos y las hipótesis adoptadas sobre la sismicidad y leyes de atenuación introducen factores de incertidumbre, los estudios probabilísticos bien interpretados en relación con la sismicidad histórica e instrumental y con las condiciones geológicas y tectónicas, son valiosos para evaluar el potencial y riesgo sísmico futuros.

Existe, sin embargo, otro enfoque para anticipar la ocurrencia y magnitud de futuros terremotos, basado en el estudio científico de los procesos tectónicos que dan origen a la deformación y ruptura de los límites de placas y fallas y a la acumulación y liberación de energía sísmica en las mismas. En ese sentido, el pronóstico sísmico basado en la brecha sísmica es una metodología válida y factible y representa hoy en día un reto científico.

Las zonas de conocida sismicidad en las cuales se presenta una quietud sísmica prolongada se denominan *brechas sísmicas*. Algunas brechas han evidenciado períodos de calma de varias décadas, otras en el orden de uno o varios siglos. Así, los investigadores al estudiar determinados segmentos de falla o de zonas de contacto entre placas, se han encontrado con la existencia de períodos prolongados de quietud sísmica que son seguidos de una reiniciación de la actividad, la cual culmina generalmente con la ocurrencia de un gran terremoto. Esta particularidad es característica de zonas de subducción y la hipótesis de la brecha sísmica ha permitido pronosticar exitosamente la ocurrencia de eventos mayores en las zonas de subducción del Cinturón Circum-Pacífico. De





los tres parámetros necesarios para una predicción exitosa de un sismo: localización, magnitud y tiempo, la hipótesis de la brecha sísmica ha tenido éxito en predecir los dos primeros parámetros: sitio y magnitud. No obstante, el último parámetro, el tiempo esperado de ocurrencia, continúa escapando a una determinación científica y determinista.

Lo importante, sin embargo, no es determinar cuándo va a ocurrir el próximo terremoto, sino determinar qué estructuras debemos diseñar y construir para sobrevivir la violenta sacudida del terreno y qué medidas de prevención y de mitigación deben adoptar el Gobierno y la sociedad.

Las brechas sísmicas se consideran y analizan como zonas de relativa peligrosidad en fallas locales, pero sobre todo se prestan para evaluar los períodos de recurrencia de grandes terremotos y el potencial sísmico de las zonas de contacto entre placas litosféricas. La metodología es sustentada por los datos científicos sobre la razón de convergencia de las placas y las características de las rocas en las zonas de contacto, asimismo por la información disponible sobre la sismicidad histórica e instrumental de la zona objeto de estudio,

La hipótesis de la brecha sísmica fue adoptada por los investigadores Marino Protti, Federico Güendel y Eduardo Malavassi, todos integrantes del Observatorio Vulcanológico y Sismológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), Costa Rica, para la realización de un interesante trabajo de investigación sobre el potencial sísmico de una importante región del país: la Península de Nicoya, estudio que se resume en la presente obra.

Los autores han seleccionado un segmento de la Trinchera Mesoamericana, donde la placa del Coco se subduce por debajo de la placa Caribe, específicamente el segmento de Nicoya, para un riguroso estudio científico. Se trata del segmento localizado frente y por debajo de la Península de Nicoya, Costa Rica, que en tiempos históricos ha sufrido tres rupturas documentadas - en 1853, 1900 y 1950 - acompañadas de grandes terremotos.

La baja sismicidad de fondo, la ausencia de sismos importantes durante las últimas cinco décadas y la rápida convergencia de las placas del Coco y Caribe, permiten considerar el segmento correspondiente a Nicoya como una





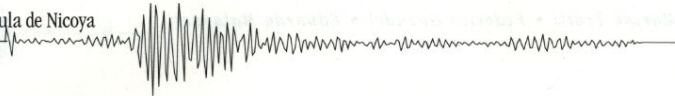
brecha sísmica con alto potencial para generar, en un futuro cercano, un sismo de gran magnitud. Se tiene, así, un segmento de la zona de subducción que no ha liberado energía sísmica importante desde 1950, bordeado por dos segmentos que han sufrido ruptura generando sismos fuertes en 1990 y 1992. El objetivo del estudio, cuyos resultados y conclusiones se plasman en la presente obra, es determinar el comportamiento del segmento seleccionado antes, durante y después de la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud (períodos presísmico, cosísmico y postsísmico).

Los autores parten de la hipótesis propuesta en 1982 por K. McNally y F. Güendel, según la cual la actividad sísmica en Costa Rica ocurre en ciclos con períodos de recurrencia de 40 a 50 años. Los ciclos de alta liberación de energía se caracterizan por la ocurrencia de sismos de subducción con magnitud superior a 7, iniciándose el ciclo con un evento mayor por debajo de la península de Osa y concluyendo con otro por debajo de la península de Nicoya. Entre los dos grandes eventos, la actividad sísmica se caracteriza por eventos generados en fallas locales en el interior del país con magnitudes entre 5 y 6.5. Dos de estos ciclos ocurrieron entre 1900 y 1916 y el otro entre 1941 y 1950. K. McNally y F. Güendel consideran que el tercer ciclo se inició con el sismo de Golfito en 1983, ha continuado con la alta actividad sísmica registrada en el interior del país, sobre todo entre los años 1990 a 1991, y debiera concluir con otro evento de subducción de gran magnitud que se espera ocurra por debajo la Península de Nicoya.

El muy limitado deslizamiento sísmico que se ha producido en el segmento de Nicoya desde 1950, la rápida tasa de convergencia entre las placas del Coco y del Caribe de cerca de 88 mm/año, y el área del segmento que se estima entre 4 600 y 9 600 Km<sup>2</sup>, sugieren que la brecha sísmica de Nicoya ha alcanzado el potencial para generar un sismo de magnitud momento cercana a 7.5.

El segmento de subducción de la placa oceánica frente a la Península de Nicoya está caracterizado por un fuerte acople elástico entre las placas de Coco y Caribe, evidenciado por el bajo nivel de sismicidad de fondo, el cese de las réplicas de sismos grandes ocurridos en segmentos adyacentes justo en los bordes del segmento mencionado, y un movimiento rápido (cerca de 30 mm) de la Península de Nicoya hacia el NE. Los autores comparan el fuerte acople de





este segmento, con bajo nivel de sismicidad de fondo, con el acople débil y el alto nivel de sismicidad de fondo de los segmentos adyacentes: el segmento de Nicaragua al noroeste y el segmento central de Costa Rica.

Dadas las características mencionadas, el segmento de subducción correspondiente a la Península de Nicoya, ha sido seleccionado por un grupo asesor de científicos a nivel mundial, como uno de los sitios sismogénicos que merece ser objeto de instrumentación y observación y cuyos resultados permitirán avanzar en el difícil arte de pronosticar eventos de gran magnitud.

Con base en la historia sísmica, se han establecido para la región del Circumpacífico períodos de recurrencia y las probabilidades de ocurrencia de grandes eventos. También para el segmento de Nicoya se han asignado probabilidades de ocurrencia de un sismo de magnitud cercana a 7.4, datos que son mencionados en el presente trabajo.

No obstante, los autores abordan el problema desde una perspectiva más física que estadística y probabilística. Para ello han evaluado el área potencial de ruptura, las tasas de convergencia de las placas, el deslizamiento sísmico y asísmico y las características de terremotos anteriores ocurridos en el segmento estudiado y en los segmentos adyacentes de la Fosa Mesoamericana.

Basados en las evidencias físicas, el historial sísmico de la región y en la interpretación de los procesos de deformación y de convergencia, los autores llegan a la conclusión de que la discusión no se centra ya en si ocurrirá o no el gran sismo por debajo de la Península de Nicoya; afirman: el sismo debe y va ocurrir! Pero fieles a su formación y criterio científico, no ahondan en el tema de cuándo ocurrirá el gran sismo, pues no se cuenta con la información suficiente para contestar dicha pregunta. Lo cierto es que las estimaciones probabilísticas indican que un terremoto de magnitud 7.4 tiene una alta probabilidad de ocurrir en cualquier momento dentro de los próximos años.

El estudio emprendido, como lo aclaran los autores, no trata de una predicción, sino de una evaluación del potencial sísmico de la península de Nicoya, de una hipótesis fundada en consideraciones de la tectónica regional y la historia sísmica de la región, en especial en los modelos físicos de subducción





del segmento de Nicoya. Como tal, se trata de una hipótesis y de un pronóstico válidos.

Debemos considerar la presente obra como un llamado, un reto que lanzan los autores al medio científico e institucional para instrumentar la Península de Nicoya y documentar así un sismo de gran magnitud en Costa Rica. Una oportunidad única para registrar instrumentalmente los cambios que ocurren antes, durante y después de un gran sismo. Los resultados de esta empresa serán sin duda una valiosa contribución hacia el perfeccionamiento del pronóstico sísmico.

Con la presente obra, los autores no pretenden crear pánico ante la posible ocurrencia de un gran terremoto, sino tratan de crear conciencia en las autoridades públicas, en el medio científico y profesional, asimismo en el público en general, sobre la imperiosa necesidad de adoptar medidas de prevención y mitigación de los efectos catastróficos del gran evento que han pronosticado. Se trata, por lo tanto, de una advertencia al sector público y a la sociedad en general para prevenir las consecuencias de un gran terremoto en la Península de Nicoya y para reducir el impacto negativo, social y económico, de una catástrofe sísmica.

La comunidad científica y profesional debe reconocer el riguroso trabajo de investigación de los autores y su valiosa contribución al conocimiento de la peligrosidad sísmica de Costa Rica y al avance en el campo del pronóstico sísmico.

San José, Costa Rica, mayo del 2001

**Franz Sauter F.**

Ingeniero Consultor



## R e s u m e n

La brecha sísmica de Nicoya es un segmento de la zona de subducción ubicado costa afuera y por debajo de la Península de Nicoya en el noroeste de Costa Rica, región Chorotega. Este segmento de la Trinchera Mesoamericana, donde la placa del Coco se subduce por debajo de la placa del Caribe, ha sufrido tres rupturas, documentadas en tiempos históricos, produciendo grandes sismos en 1853, 1900 y 1950. El fuerte acople de este segmento contrasta con el acople débil de los segmentos adyacentes: el segmento de Nicaragua hacia el NO y el de Costa Rica central hacia el SE. El segmento de Nicaragua tiene un nivel muy alto de sismicidad de fondo, con ocurrencia anual de muchos sismos que sobrepasan la magnitud de 5.0 grados; su más reciente gran evento fue un sismo anormalmente lento con magnitud de momento ( $M_w$ ) de 7.6 grados y que generó un tsunami destructivo en 1992. El segmento central de Costa Rica, también tiene un alto nivel de sismicidad de fondo con eventos muy frecuentes que alcanzan magnitudes superiores a 4.5 grados; su más reciente evento de importancia ( $M_w=7.0$ ) ocurrió en marzo de 1990 en la zona de contacto entre este segmento y la brecha sísmica de Nicoya. Las réplicas de los sismos de Costa Rica en 1990 y de Nicaragua en 1992, ocurridos en los segmentos adyacentes, permitieron demarcar la posición geográfica de la brecha sísmica de Nicoya.





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 mencionados de 1990 y de 1992 justo en los bordes de la brecha sísmica de Nicoya; y c) el rápido movimiento (de cerca de 30 mm/año) hacia el NE (en dirección paralela a la convergencia entre las placas del Coco y del Caribe) de la Península de Nicoya observado con sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS), según fueron reportados por Lundgren et al., 1999. El fuerte acoplamiento elástico entre las placas del Coco y del Caribe puede ser causado por la carga litostática (peso de la columna de rocas) que ejerce la Península de Nicoya sobre la interface de las dos placas.

El muy limitado deslizamiento sísmico que se ha producido en el segmento de Nicoya desde 1950, la rápida tasa de convergencia entre las placas del Coco y del Caribe de alrededor de 88 mm/año y considerando que el área de este segmento de la zona de subducción oscila entre 4600 y 9600 Km<sup>2</sup>, sugieren que la brecha sísmica de Nicoya ha alcanzado ya el potencial para producir un sismo con una magnitud de momento cercana a los 7.5. La presencia de la Península de Nicoya sobre el área de ruptura (lo cual facilita la instrumentación y observación) y su alto potencial sísmico fueron las dos características más importantes que hicieron que este segmento fuera seleccionado, por un panel de científicos a nivel mundial, como uno de los dos sitios sismogénicos en los que se está realizando el "experimento de zonas sismogénicas", SEIZE: Seismogenic Zone Experiment (el otro sitio seleccionado es Nankai, en Japón). Este experimento es una iniciativa conjunta de universidades de tres continentes (América, Europa y Asia) y cuya contrapartida en Costa Rica es el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), entidad estatal con sede en Heredia.



## A b s t r a c t

The Nicoya seismic gap is a subduction segment located under the Nicoya Peninsula in northwestern Costa Rica. This subduction segment of the Middle American Trench, where the Cocos plate subducts under the Caribbean plate, has ruptured with large earthquakes in 1853, 1900 and 1950. Its strong coupling contrasts with the immediately adjacent weak segments: Nicaragua to the NW and central Costa Rica to the SE. The Nicaragua segment has a very high level of background seismicity with several earthquakes per year with magnitudes above 5.0; its most recent large event was an anomalously slow earthquake ( $M_w=7.6$ ) that generated a destructive tsunami in 1992. The central Costa Rica segment also has a high level of background seismicity with very frequent events with magnitudes above 4.5; its last large event ( $M_w=7.0$ ) occurred in 1990 just at the boundary with the Nicoya seismic gap. The aftershock areas of the Costa Rica, 1990 and Nicaragua, 1992 earthquakes allowed the geographic extent of the Nicoya seismic gap to be clearly defined.

Evidences that support a strong coupling for the Nicoya segment are: a) anomalously low background seismicity; b) the sudden end of aftershocks of the 1990 and 1992 earthquakes at its boundaries; and c) the fast NE motion (parallel to convergence) of the Nicoya Peninsula (nearly 30mm/yr) observed with GPS [Ludgren et al., 1997]. The strong coupling between the Cocos and





Caribbean plates might be caused by the lithostatic load (weight of the rock column) applied by the peninsula to the plate interface.

Without significant seismic slip since 1950, with a convergence rate around 88 mm/yr and an area ranging from 4600 to 9600 Km<sup>2</sup>, the Nicoya seismic gap has attained already the potential to produce an earthquake with moment magnitude above 7.5. The presence of the peninsula over the rupture area (which facilitates the instrumentation) and its high seismic potential were two of the most important features considered when this subduction segment was selected by an international group of scientists, as one of the two Seismogenic Zone Experiment (SEIZE) sites, an initiative sponsored by universities from three continents (America, Europe and Asia). (The another zone is Nankai, Japan). The costarrican counterpart for the SEIZE project is the "Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, at the Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), a federal institution located in Heredia.



## CAPÍTULO I

# La brecha sísmica de Nicoya

### Introducción

A principios de la década de 1980 la Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos (US-AID), a través de su Oficina para Desastres en el Extranjero (OFDA), financió la instalación en Costa Rica de una red sismográfica de cobertura nacional. La justificación para la operación de dicha red estaba basada en una hipótesis de trabajo propuesta en 1982 por Karen McNally y Federico Güendel (McNally & Güendel, 1982), según la cual la actividad sísmica en Costa Rica ocurre en ciclos con períodos de recurrencia de 40 a 50 años. Durante estos ciclos ocurren sismos de subducción con magnitudes superiores a 7 grados por debajo de las Penínsulas de Nicoya y Osa y sismos en fallas locales del interior del país con magnitudes entre 5 y 6.5 grados. Dos de esos ciclos habían ocurrido en ese siglo: uno entre 1900 y 1910 y el otro entre 1941 y 1950. Como otro ciclo podría comenzar en los años ochenta, era importante contar con una buena red sismográfica que documentara esa actividad potencial. La instalación de dicha red comenzó en 1984, a tiempo para documentar el esperado ciclo sísmico que comenzó en 1983. Desde entonces, esta red ha sido operada por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), con sede en Heredia.





## CAPÍTULO

Contrario a lo ocurrido con las redes sismográficas de muchos países, la propuesta de instalación en Costa Rica de la red sismográfica del OVSICORI-UNA, no fue precedida por un gran terremoto; su operación comenzó muy poco después que se iniciara en el país un período de alta liberación de energía. La Dra. McNally con la asesoría de científicos costarricenses y del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América y con el apoyo de autoridades de la Oficina para la Asistencia de Desastres en el Extranjero de la Agencia Internacional para el Desarrollo (AID), recibió recursos para financiar la instalación en Costa Rica, de una red sismográfica con equipos estandarizados, con parámetros muy altos en cuanto a control de calidad de los datos. Esas personas tuvieron además una gran visión al reconocer el impacto social, además del científico, que una red de este tipo puede tener para la comunidad nacional e internacional.

Otro logro importante de este esfuerzo fue permitir que científicos y personal técnico del OVSICORI-UNA recibieran becas para estudiar en centros universitarios de primer orden o fueran capacitados en su trabajo por autoridades en la materia. Este proyecto resultó ser uno de los más exitosos de su

clase financiado por la Agencia Internacional para el Desarrollo. En gran parte su éxito se dio por el énfasis dado a esta capacitación y formación de recursos humanos a nivel técnico, científico y académico.

En 1983, pocos meses después de haber sido presentada la propuesta de McNally y Güendel, comenzó el ciclo sísmico esperado con los terremotos de Golfito del Sábado Santo (2 de abril) ( $M_w=7.4$ ) y de Pérez Zeledón (3 de julio) ( $M_w=6.3$ ). Este ciclo sísmico continuó con los sismos de 1990 a la entrada del Golfo de Nicoya (25 de marzo) ( $M_w=7.0$ ), de Puriscal (22 de diciembre) ( $M_w=5.9$ ) y con el sismo del Valle de la Estrella, Limón ( $M_w=7.6$ ) en 1991. De acuerdo con la hipótesis de McNally y Güendel (1982) todavía falta por ocurrir un terremoto por debajo de la Península de Nicoya antes que termine el último ciclo iniciado a finales del siglo XX.

La historia sísmica de una región con eventos sísmicos fuertes e intermitentes se conoce como ciclo sísmico. Cada ciclo sísmico se cierra una vez que ocurre uno de esos eventos de gran magnitud y su secuencia temprana de réplicas (primeros meses después del evento principal). El intervalo de





tiempo entre dos de esos eventos fuertes se le llama período **intersísmico**. Cuando se hace referencia al período **presísmico** se habla de un tiempo de pocos años a meses antes del evento principal; el período **cosísmico** se refiere al momento de ocurrencia del sismo y por período **postsísmico** se refiere a pocos meses después del evento principal. La ocurrencia de un sismo representa el rompimiento de una sección o parche fuerte en una falla. A ese parche fuerte se le conoce en sismología como aspereza sísmica. Dependiendo de las condiciones particulares de ese parche, la ruptura puede ser muy repentina, relajando los esfuerzos acumulados en el tiempo, de una forma muy rápida, o la ruptura podría propagarse lentamente a lo largo de la falla. La velocidad de ruptura proporciona información adicional sobre el grado de acoplamiento elástico entre los dos bloques que son separados por una falla.

La ocurrencia de los terremotos del 25 de marzo de 1990 a la entrada del Golfo de Nicoya y de Nicaragua del 1° de setiembre de 1992, al SE y NO de la Península de Nicoya, respectivamente, han contribuido no solo a la delimitación geográfica de la brecha sísmica de Nicoya, sino también a recargarla

aumentando así su potencial sísmico. Se tiene así, un segmento de la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya que no ha liberado energía sísmica importante desde 1950, rodeado por segmentos que se han deslizado con sismos fuertes en 1990 y 1992.

Nishenko (1985) utiliza la historia sísmica del Circumpacífico para establecer períodos de recurrencia y con base en un análisis estadístico obtiene probabilidades para la ocurrencia de futuros terremotos en esa región. Nishenko (1989) asigna a la brecha sísmica de Nicoya, en Costa Rica, un potencial del 93% de probabilidad para la ocurrencia de un terremoto de magnitud 7.4 durante el período comprendido entre los años 1989 y 2009. Basado en un modelo probabilístico que predice la fecha y magnitud, Panagiotopoulos (1995) sugiere que un terremoto de magnitud 7.4 puede ocurrir en la brecha sísmica de Nicoya con una probabilidad de 53% entre 1993 y 2002.

Hasta la fecha, todas las evaluaciones del potencial sísmico de la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya han sido basadas en períodos de recurrencia (intervalo de tiempo entre la ocurrencia de eventos fuertes en una determinada región). Como no se cuenta





con todos los detalles deseables sobre la ocurrencia de terremotos en el siglo XIX, por debajo de la Península de Nicoya y dado que los catálogos de Nishenko (1989) y Panagiotopoulos (1995) son muy diferentes y ambos contienen varias omisiones e inclusiones erróneas, esas estimaciones probabilísticas podrían variar considerablemente según los datos utilizados (Nishenko vrs Panagiotopoulos). Por consiguiente, en el presente estudio se enfrenta el problema desde una perspectiva más física y menos estadística. Para lograr esto, se han estimado y evaluado el área potencial de ruptura, las tasas de convergencia, el deslizamiento sísmico y asísmico y los parámetros sísmicos de los terremotos anteriores. Un primer intento para estimar físicamente los parámetros sísmicos de un futuro terremoto de Nicoya fue presentado por Protti *et al.* (1994b) ante el Noveno Simposio Internacional Sobre Pronóstico de Terremotos, celebrado en San José, Costa Rica, en septiembre de 1994.

Los investigadores del OVSICORI-UNA, incluidos los autores de este trabajo han superado ya la etapa de discusión sobre si va o no va a ocurrir un sismo por debajo de la Península de Nicoya. Las evidencias físicas indican que el sismo debe ocurrir y por lo tanto han avanzado a la etapa de análisis de posibles escenarios y al entendimiento,

monitoreo e interpretación de los procesos y deformaciones que se presentan antes del evento. Por otro lado, los autores de este trabajo no ahondan mucho en cuándo ocurriría el sismo, ya que no se cuenta con la información suficiente para contestar dicha pregunta y una respuesta precisa a esta interrogante está fuera del alcance de la ciencia en el momento actual. De las estimaciones probabilísticas, a pesar de los errores apuntados, se puede rescatar que el sismo tiene una alta probabilidad de ocurrir en cualquier momento dentro de los próximos años. En consonancia a su acción estrictamente científica, el OVSICORI-UNA ha difundido a la comunidad nacional e internacional, sus conclusiones con miras a patrocinar la ejecución de aquellas medidas de prevención, mitigación y atención de la emergencia que provocará el sismo y las eventuales medidas de reforzamiento que logren minimizar el impacto económico y social del evento.

En este trabajo, se presenta un análisis extensivo del marco tectónico regional que justifica el carácter particular del segmento de la zona de subducción bajo la Península de Nicoya. Este análisis hace énfasis en las diferencias de acople elástico a lo largo de la zona de subducción en la parte SO de la Trincheras Mesoamericana. Además, se utiliza toda



la información disponible para caracterizar espacial y temporalmente la brecha sísmica de Nicoya y su verdadero potencial sísmico. Se presenta una recopilación de evidencias que apuntan hacia la ocurrencia de un terremoto con magnitud superior a 7.5 grados y los posibles escenarios de este terremoto. Se dan además algunas recomendaciones para aprovechar la oportunidad histórica de documentar un evento sísmico de esta magnitud y se aprovecha para fomentar en la sociedad civil costarricense el hábito de la prevención.

Diferentes partes de la información contenida en este trabajo han sido presentadas ante congresos científicos tanto en Costa Rica como en otras partes del mundo: Simposio Internacional sobre Prognosis de Terremotos, San José, Costa Rica, setiembre de 1994 (Protti et al., 1994b); Reunión anual de la Unión Geofísica Americana (AGU), San Francisco, California, diciembre de 1997 (Protti, 1997); Conferencia Internacional sobre Sistemas de Alerta Temprana, Potsdam, Alemania, setiembre de 1998 (Protti et al., 1998); Reunión Hemisférica del Decenio Internacional de Reducción de Desastres Naturales, San José, Costa Rica, junio de 1999 (Protti, 1999a); Taller Regional México-Centroamérica sobre Riesgos Geológicos, Ciudad de México, México, julio de

1999 (Protti, 1999b); Simposio Internacional sobre Aplicaciones de GPS a Ciencias de la Tierra e Interacción con otras Técnicas Geodéticas Espaciales, Tsukuba, Japón, octubre de 1999 (Protti et al., 1999); Congreso de Investigación en Universidades Estatales, San José, Costa Rica, 2000 (Lundgren et al., 2000 y Protti et al. 2000a).

La predicción sísmica es difícil, pero no imposible. Requiere de mucha observación y registro de información que permita afinar los modelos físicos para acelerar el entendimiento de los procesos naturales que se conjugan en la generación de terremotos. La ciencia surgió de la observación de los procesos naturales y el registro instrumental es una forma de observación. Existe así, una oportunidad histórica para documentar un sismo de gran magnitud en Costa Rica y contribuir al desarrollo y perfeccionamiento de la predicción sísmica. Estamos no solo relativamente cercanos en el tiempo a la ocurrencia de un sismo de magnitud importante, sino que somos además privilegiados al contar con una península de fácil acceso, ubicada justo sobre la potencial área de ruptura. Esto permite la instalación de instrumentos directamente sobre la zona de ruptura, situación sumamente ventajosa que no se encuentra en ninguna otra zona de subducción del mundo.





Los autores tienen la responsabilidad de aclarar que este trabajo en sí mismo no debe de considerarse una predicción, sino primordialmente, una evaluación del potencial sísmico bajo la Península de Nicoya. En otras palabras, no se pretende predecir el futuro sismo de Nicoya (ya que no se cuenta con toda la información requerida para hacerlo), pero sí hay un gran compromiso histórico, prioritario, de advertir a la sociedad costarricense para que se prepare con el fin de reducir al máximo el impacto de este sismo. Como segundo compromiso y obligación está registrar, con la mayor cantidad de instrumentos posibles, el más amplio espectro de cambios que ocurren con anterioridad, durante y después de un sismo de esta magnitud. La información recogida será fundamental para la predicción sísmica en el futuro, no sólo en Costa Rica, sino en el resto del Circumpacífico.

Este estudio se concentra en la Península de Nicoya porque se tiene muy claro su potencial sísmico, pero no se quiere decir con esto que la Península de Nicoya sea el lugar en donde ocurrirá el próximo gran terremoto en el país. Existen otros lugares dentro del territorio nacional, el Valle Central por ejemplo, en donde han ocurrido sismos devastadores en el pasado y que podrían generar terremotos en el futuro, no obstante, no se conocen bien las fallas que

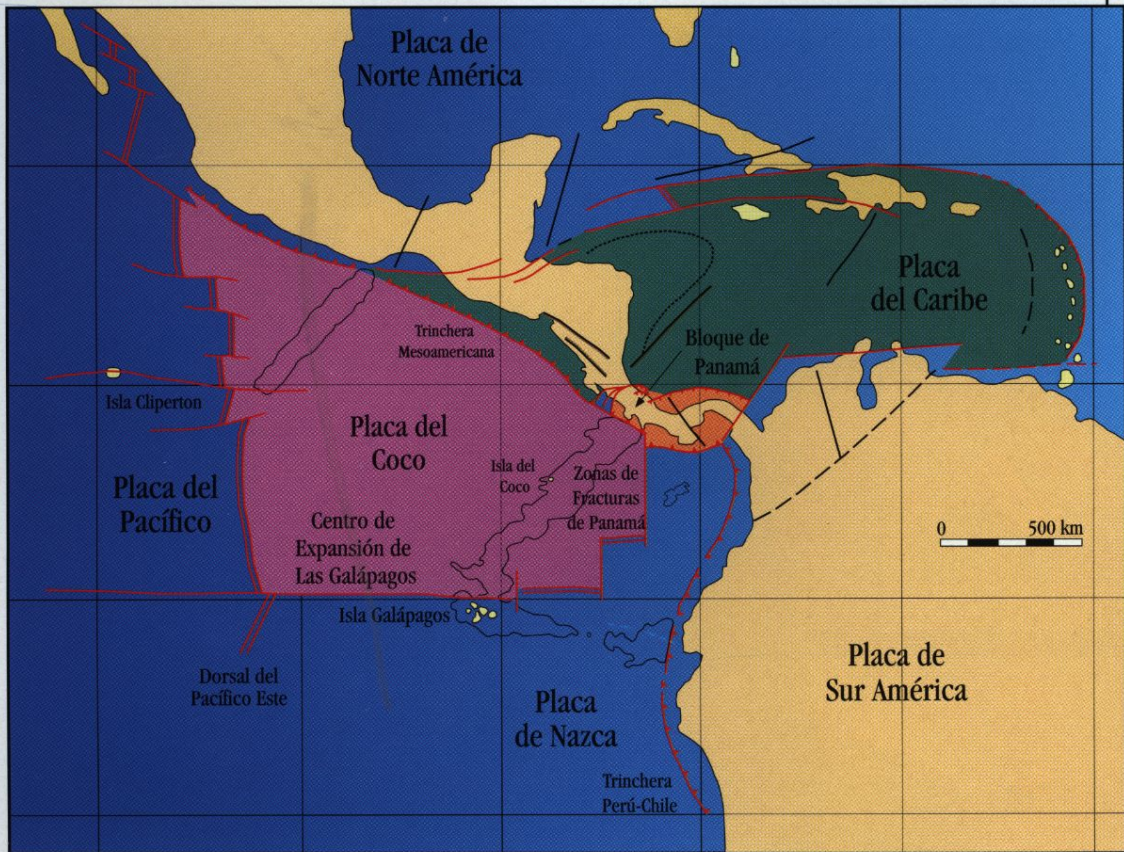
los podrían generar y no se cuenta tampoco con suficiente información para evaluar su potencial sísmico. Lo que las instituciones y las personas hagan para reducir el impacto de futuros terremotos es lo que eventualmente salvará vidas humanas y reducirá el impacto económico y social. La predicción sísmica, por sí misma, no lo logrará.

### 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 lo largo de la Fosa Mesoamericana, 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, con límites que



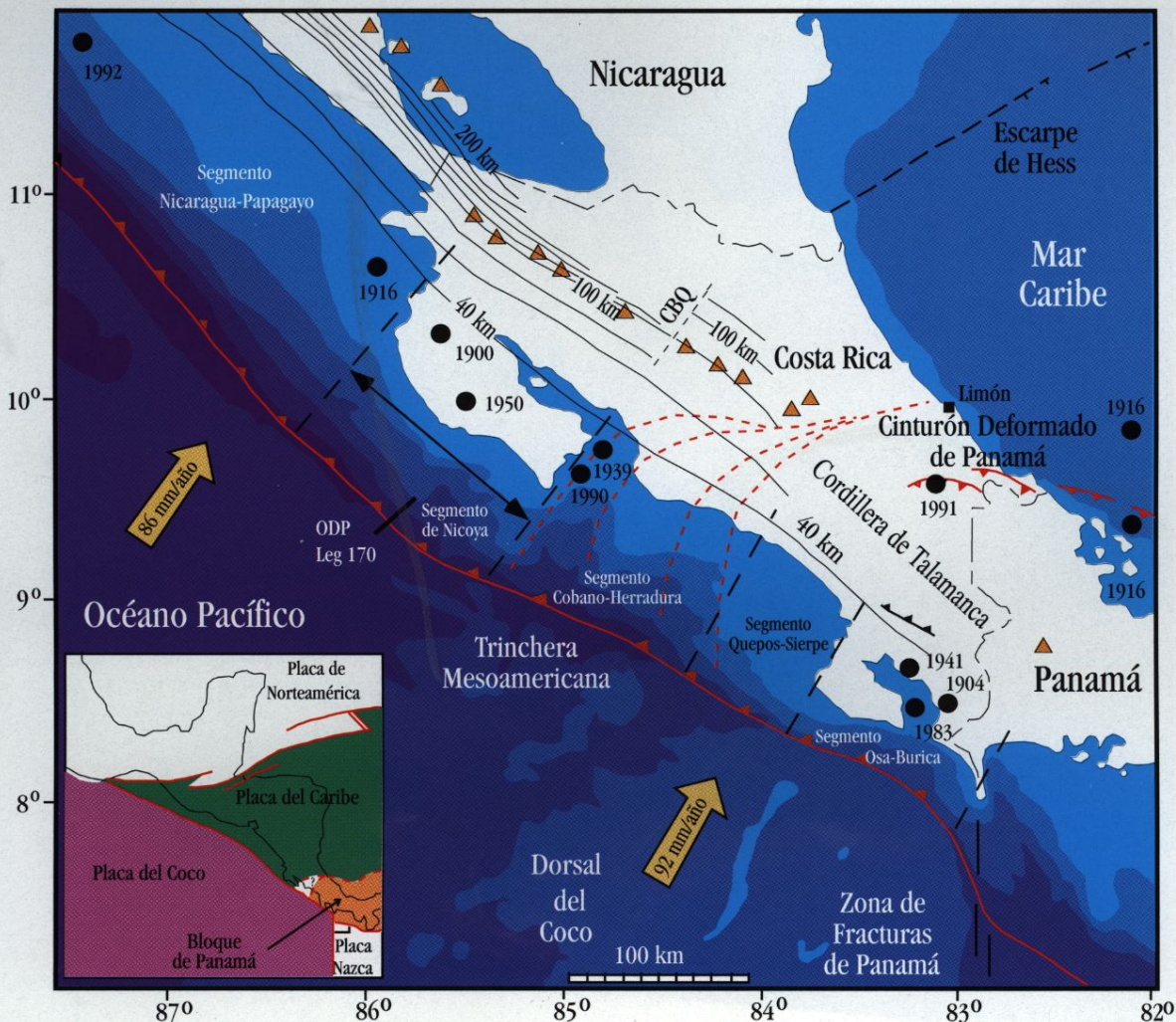


**Figura 1.** Marco tectónico regional de Centroamérica.

aún no están muy bien desarrollados ni definidos. 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 difusa de fallamiento de corrimiento lateral izquierdo, que corre desde Limón hasta la Fosa Mesoamericana a través de la parte central de Costa Rica

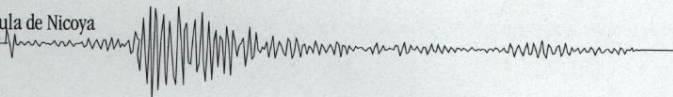




**Figura 2.**

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.





[Ponce y Case 1987, Jacob y Pacheco 1991, Güendel y Pacheco 1992, Goes *et al.*, 1993, Fan *et al.*, 1993, Marshall *et al.*, 1993, Fisher *et al.*, 1994, Protti y Schwartz 1994]. El bloque de Panamá comprende la parte sur de Costa Rica y todo Panamá.

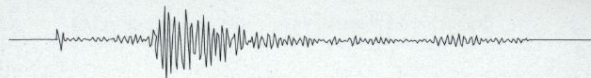
Al sur de la Península de Burica se encuentra la zona de fracturas de Panamá. Este sistema de fallas de corrimiento lateral derecho constituye el límite entre las placas del Coco y de Nazca (Fig. 1). Al oeste de la zona de fracturas de Panamá se encuentra la cordillera submarina del Coco la cual se subduce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

Este ambiente tectónico 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) co-

mo 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.*, 1994a). De abril de 1984 a diciembre de 1999, 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 50000 sismos en poco más de 15 años.

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.*, 1995].

"La Contorsión Brusca de Quesada" divide además las formaciones de rocas volcánicas recientes de Costa Rica en dos provincias petrogénicas (Malavassi, 1991). Los magmas al NO de esta rasgadura tienen una fuente toleítica, representan porcentajes más altos de fusión parcial del manto y reciben aportes de agua y elementos alcalinos y alcalinotérreos de la porción subducida de la placa del Coco. En contraste, los magmas al SE de la rasgadura tienen una fuente de basaltos de islas oceánicas, representan porcentajes más bajos de fusión parcial del manto y reciben un aporte reducido o casi nulo de elementos alcalinos y alcalinotérreos de la placa del Coco (Malavassi, 1991).

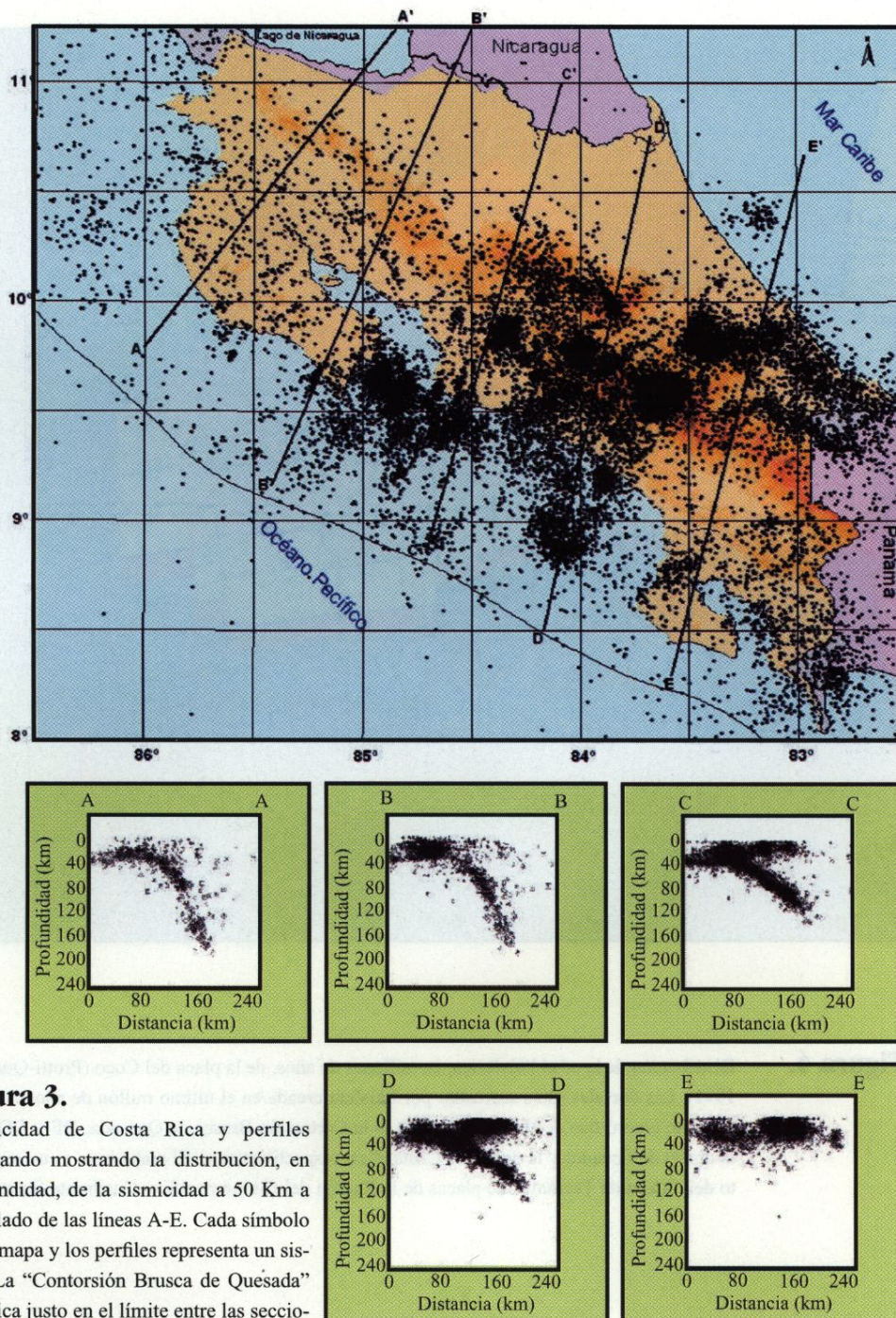
La proyección hacia la trinchera de la "Contorsión Brusca de Quesada" coincide con un cambio abrupto en la topografía del fondo oceánico (batimetría) de la placa del Coco, a lo largo de una alineación con dirección noreste. Esta alineación se extiende desde el punto triple de conjunción de

las placas del Coco, de Nazca y del Pacífico, en la "Dorsal del Pacífico Este", hasta la entrada al Golfo de Nicoya (Fig. 4). Este cambio batimétrico (el "límite áspero-liso" norte de Hey [1977]) marca la frontera entre la litósfera de la placa del Coco creada en la "Dorsal del Pacífico Este" y la litósfera de la placa del Coco creada en la "Dorsal de las Galápagos". La extensión noreste del límite áspero-liso, que al subducirse se convierte en la Contorsión Brusca de Quesada, es un relicto de la fractura original a lo largo de la cual la antigua placa de Farallón se partió para crear las placas del Coco y Nazca hace unos 25 a 27 millones de años atrás [Hey, 1977; Lonsdale y Klitgord, 1978]. Esta sección del límite áspero-liso, delineado aproximadamente por el contorno batimétrico de 3000 m de profundidad, refleja un contraste en la edad de la placa del Coco de hasta 10 millones de años (Protti-Quesada, 1991) y por lo tanto un contraste en la densidad de la placa, estando presente una litósfera más joven, caliente y liviana hacia el sureste.

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

La subducción bajo Nicaragua y Costa Rica de la litósfera de la placa del Coco, con génesis y características

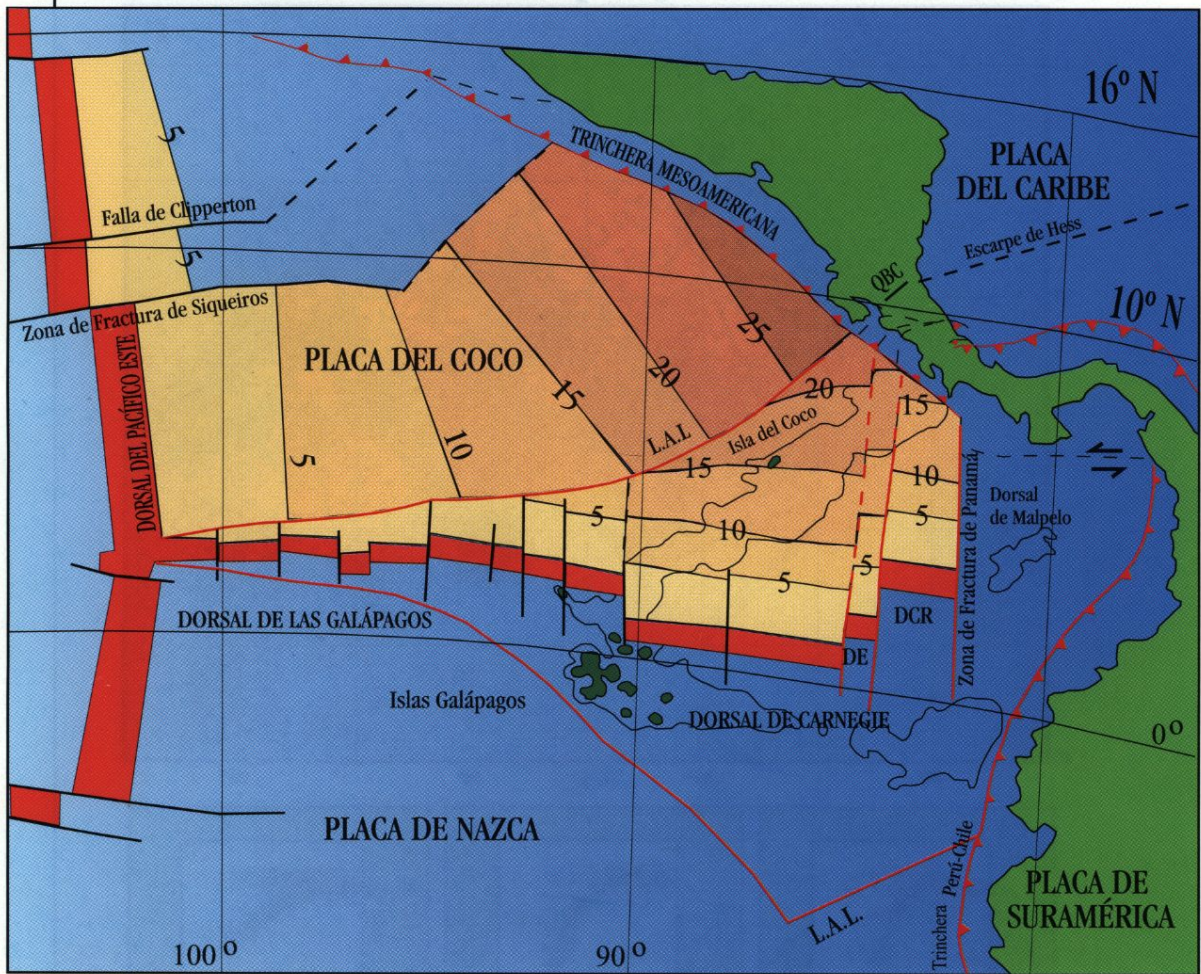




**Figura 3.**

Sismicidad de Costa Rica y perfiles mostrando la distribución, en profundidad, de la sismicidad a 50 Km a cada lado de las líneas A-E. Cada símbolo en el mapa y los perfiles representa un sismo. La "Contorsión Brusca de Quesada" se ubica justo en el límite entre las secciones B-B' y C-C'.






**Figura 4.**

Distribución de la edad litósferica, en millones de años, de la placa del Coco (Protti-Quesada, 1991). Las dorsales están marcadas por litósfera creada en el último millón de años. LAL es el límite áspero-liso de Hey, 1977; CBQ es la Cortorsión Brusca de Quesada; DE y DCR son la dorsal de Ecuador y la dorsal de Costa Rica, respectivamente. El mapa base es un segmento del "Mapa de Tectónica de placas de la Región del Circumpacífico, Cuadrante Sureste".





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.*, 1994a, 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. La 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 (Fig. 2 y Fig.4).

**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 adyacentes 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; Güendel *et al.*, 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, un intervalo tanto 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.

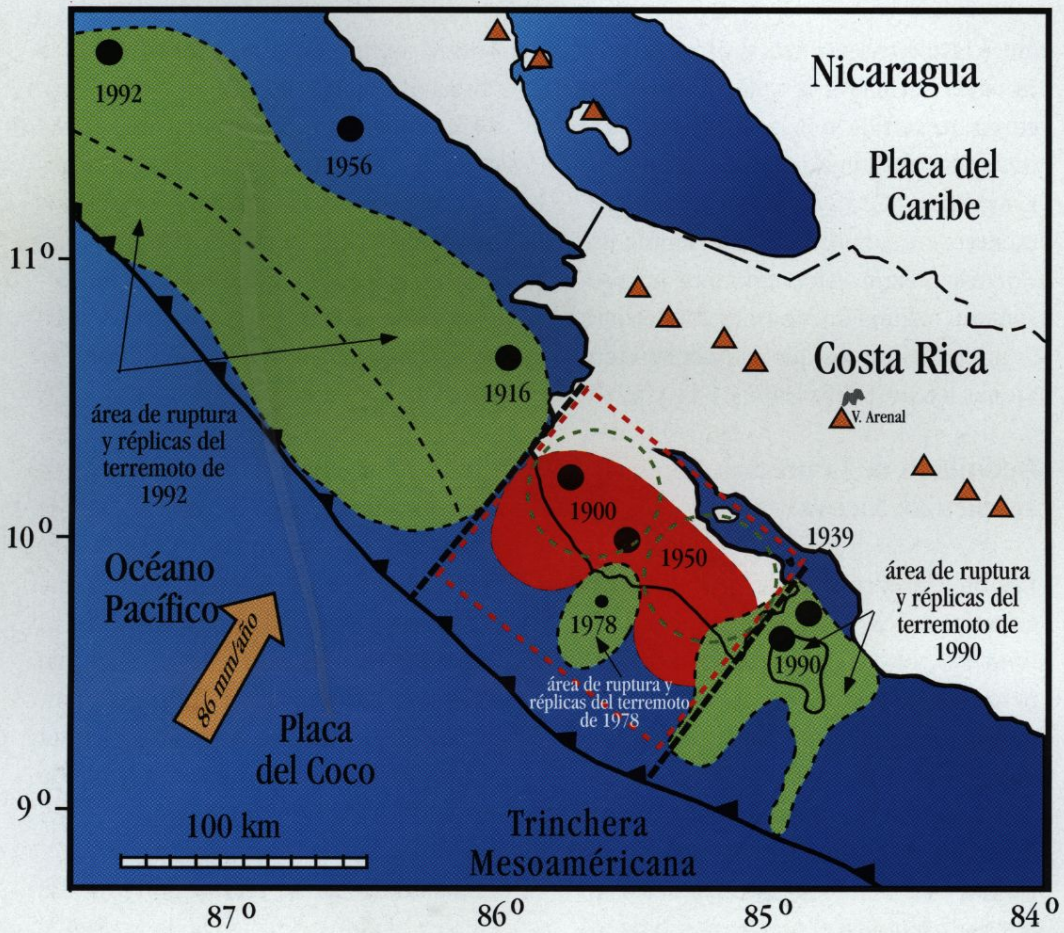
La ausencia de un terremoto importante desde octubre de 1950 en el segmento de Nicoya y la ocurrencia de los sismos de 1990, a la entrada al Golfo de Nicoya al SE y de 1992, frente a Nicaragua al NO, han permitido determinar la extensión geográfica de lo

que se define en este trabajo como la "brecha sísmica de Nicoya" (Fig. 5). 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.

Como se mencionó anteriormente, han ocurrido sismos de gran magnitud en el segmento de Nicoya en 1853, 1900 y 1950. Esto da un período de recurrencia de 49 años al 2000 y de 50.7 años al año 2005, con desviaciones estándar de 1.73 y 4.04 respectivamente. Estadísticamente, la menor desviación estándar sería de 1.5 si el sismo hubiera ocurrido entre 1998 y 1999.

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,





**Figura 5.**

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, en este trabajo, 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 mencionados en el texto.

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" (i.e. la porción subducida del límite asperoliso de Hey, 1977).





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.

El sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978 ( $M_w=6.9$ ) ocurrió en la parte central del segmento de la Península de Nicoya (Güendel, 1986), dentro de lo que aquí se define como la brecha sísmica de Nicoya y rompió un área hacia la trinchera de alrededor del 20% del

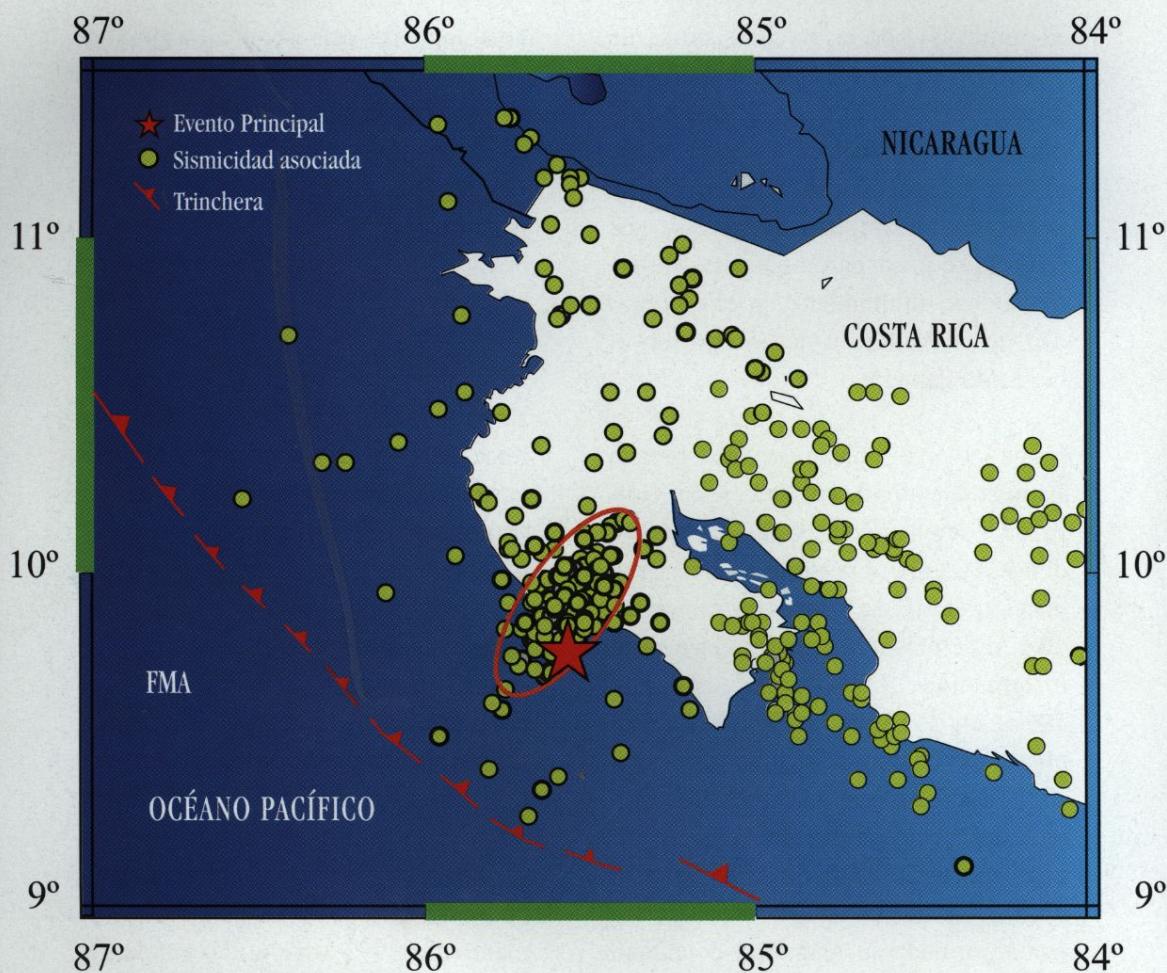
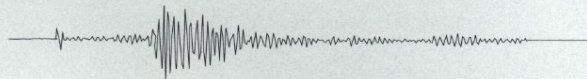
área total de este segmento (Fig. 6). Dada la magnitud relativamente baja de este evento, comparado con el potencial total de la brecha sísmica de Nicoya, se considera que dicho sismo no rompió completamente la brecha sísmica y que el área de ruptura de ese evento representa apenas una porción menor y más débil dentro de la brecha.

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 graficamente en la Figura 5.

### **Estimación del tamaño de la brecha sísmica de Nicoya en función de la sismicidad posterior a 1976**

Con excepción de la secuencia sísmica de Sámara de 1978 y de Nosara de marzo de 1991 (discutidas adelante), la carencia de actividad en el período intersísmico demuestra la capacidad de resistencia que tiene la zona de contacto entre las placas del Coco y del Caribe en este segmento de la zona de subducción bajo la península de Nicoya. Graficando la sismicidad reportada, a partir de 1976, en el Catálogo CMT de Harvard (Fig. 7), utilizando, a partir de 1984, las ubicaciones epicentrales obtenidas con datos de la





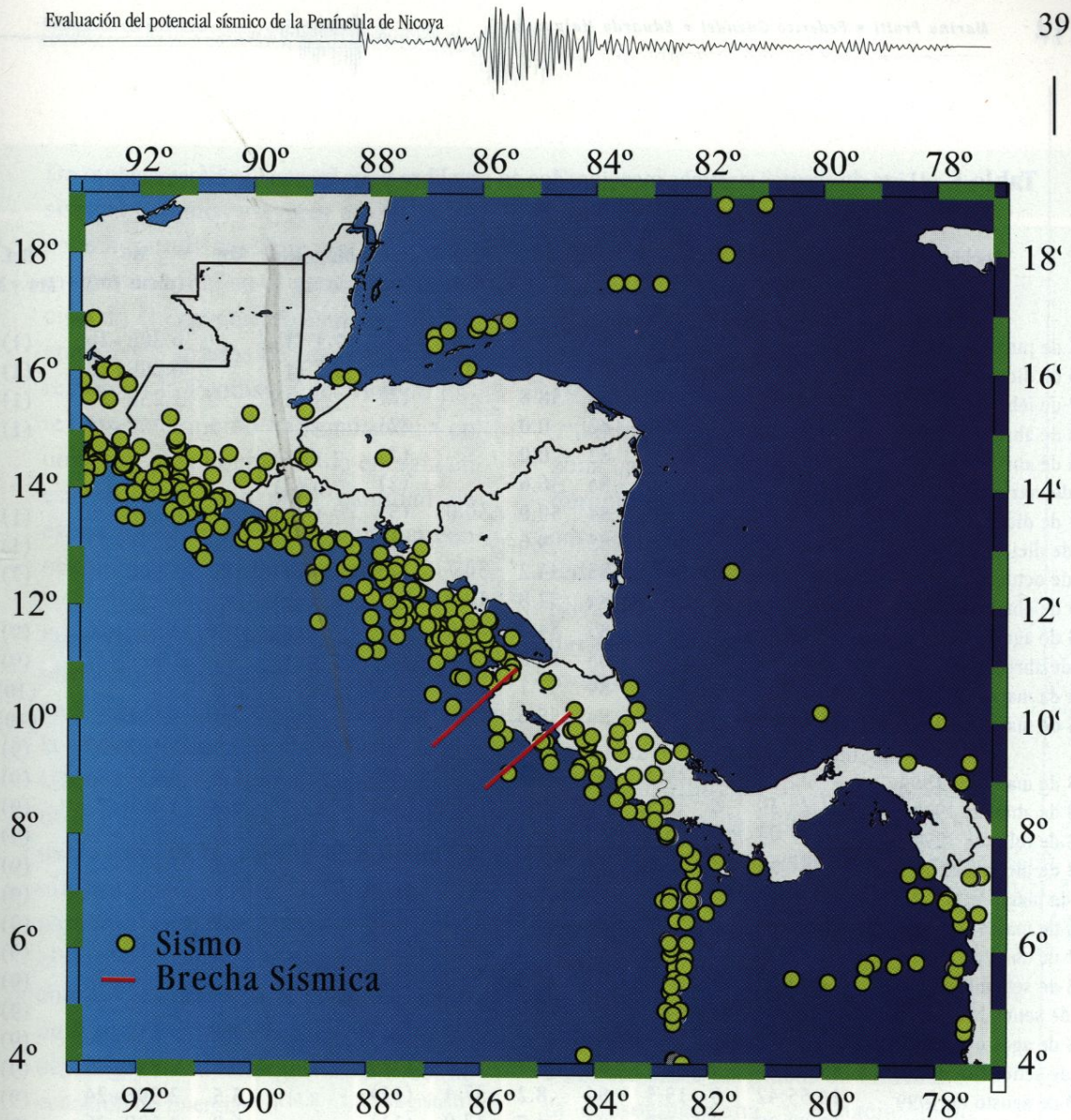
**Figura 6.**

Ubicación del sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978 ( $M_w=6.9$ ) y distribución de sus réplicas según Güendel 1986. El elipse marca la interpretación en este trabajo de la aspeza que dio origen a este sismo. FMA: Fosa mesoamericana.

red sismográfica del OVSICORI-UNA (Tabla I), se puede notar que, para eventos con magnitud superior a los 5 grados, la zona definida como la

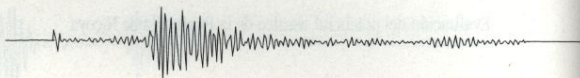
brecha sísmica de Nicoya, muestra una carencia casi absoluta de liberación de energía.





**Figura 7.** Sismicidad en Centroamérica reportada en el Catálogo de Harvard con ubicaciones para Costa Rica corregidas según Tabla I y el catálogo de sismos del OVSICORI-UNA a partir de 1984.




**Tabla I.** Lista de eventos sísmicos mencionados en este libro y sus fuentes de información.

Fecha	Hora (UTC)	Latitud	Longitud	Prof. (Km)	Ref. (loc.)	Magnitud Ms	Mw	Mo (dinas cm)	Ref. Mw y Mo
21 de junio de 1900	20:52:00	10 0.0	85 30.0		(1)	7.1 (1)		6.20E+26	(1)
20 de diciembre de 1904	5:44:18	8 18.0	83 0.0	25.0	(1)	7.1 (1)		6.20E+26	(1)
27 de febrero de 1916	20:20:48	10 40.2	85 58.8		(2)	7.3 (1)		1.23E+27	(1)
24 de abril de 1916	8:02:08	10 0.0	82 0.0		(2)	7.2 (1)		8.70E+26	(1)
26 de abril de 1916	2:21:30	9 20.0	82 0.0		(2)	7.1 (3)			
4 de marzo de 1924	10:07:42	9 43.8	84 36.6		(2)	7.0 (4)			
21 de diciembre de 1939	20:54:47	9 45.0	84 50.0	30.0	(5)	7.1 (1)		6.20E+26	(1)
5 de diciembre de 1941	20:46:58	8 40.2	83 9.6		(6)	7.3 (1)		1.23E+27	(1)
5 de octubre de 1950	16:09:30	10 6.0	85 34.2	30.7	(2)	7.7 (1)	7.8	5.30E+27	(7)
14 de abril de 1973	8:34:00	10 21.0	84 52.8	10.0	(2)	6.5 (8)			
23 de agosto de 1978	0:38:27	9 45.6	85 34.2	25.6	(2)	7.0 (8)	6.9	3.31E+26	(9)
3 de abril de 1983	2:49:57	8 25.8	83 10.8	24.9	(2)	7.3 (1)	7.4	1.82E+27	(9)
25 de marzo de 1990	13:16:06	9 36.4	84 57.1	22.4	(10)		6.0		(10)
25 de marzo de 1990	13:22:56	9 38.5	84 55.6	20.0	(10)		7.0	3.55E+26	(10)
							7.3	1.10E+27	(9)
25 de marzo de 1990	21:35:21	9 24.2	84 48.8	32.0	(11)		5.7	3.99E+24	(9)
28 de abril de 1990	1:23:10	8 43.5	83 36.5	28.7	(11)		6.4	4.19E+25	(9)
23 de julio de 1990	5:27:04	9 16.4	84 46.2	27.4	(11)		5.5	1.88E+24	(9)
22 de diciembre de 1990	17:27:54	9 52.0	84 20.0	19.0	(11)		5.9	1.03E+25	(9)
1 de marzo de 1991	17:30:28	10 42.3	84 49.8	180.0	(11)		6.1	1.81E+25	(9)
16 de marzo de 1991	6:02:05	9 37.9	85 42.5	25.0	(11)		6.3	3.22E+25	(9)
22 de abril de 1991	21:56:52	9 38.3	83 6.3	22.0	(11)		7.6	3.31E+27	(9)
13 de setiembre de 1991	1:34:13	9 56.7	85 43.3	30.0	(11)		5.2	7.79E+23	(9)
2 de setiembre de 1992	0:16:00	11 12.0	87 48.6	15.0	(9)		7.6	3.40E+27	(9)
28 de agosto de 1996	17:16:14	9 13.3	84 14.9	35.7	(11)		5.9	8.11E+24	(9)
4 de setiembre de 1996	19:06:46	9 7.3	84 18.2	33.2	(11)		6.2	2.35E+25	(9)
10 de agosto de 1999	14:55:42	9 15.5	84 8.2	37.4	(11)		5.5	2.59E+24	(9)
20 de agosto de 1999	10:02:22	9 7.5	84 4.7	32.0	(11)		6.9	2.60E+26	(9)

**Referencias**

- |                            |                                    |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| (1) Pacheco y Sykes, 1992. | (5) Este trabajo.                  | (9) Harvard                        |
| (2) Güendel, 1986.         | (6) Kelleger <i>et al.</i> , 1973. | (10) Protti <i>et al.</i> , 1995b. |
| (3) Abe y Noguchi, 1983a.  | (7) Abe, 1979.                     | (11) OVSICORI-UNA, 1984-1999.      |
| (4) Abe, 1981.             | (8) NEIS                           |                                    |





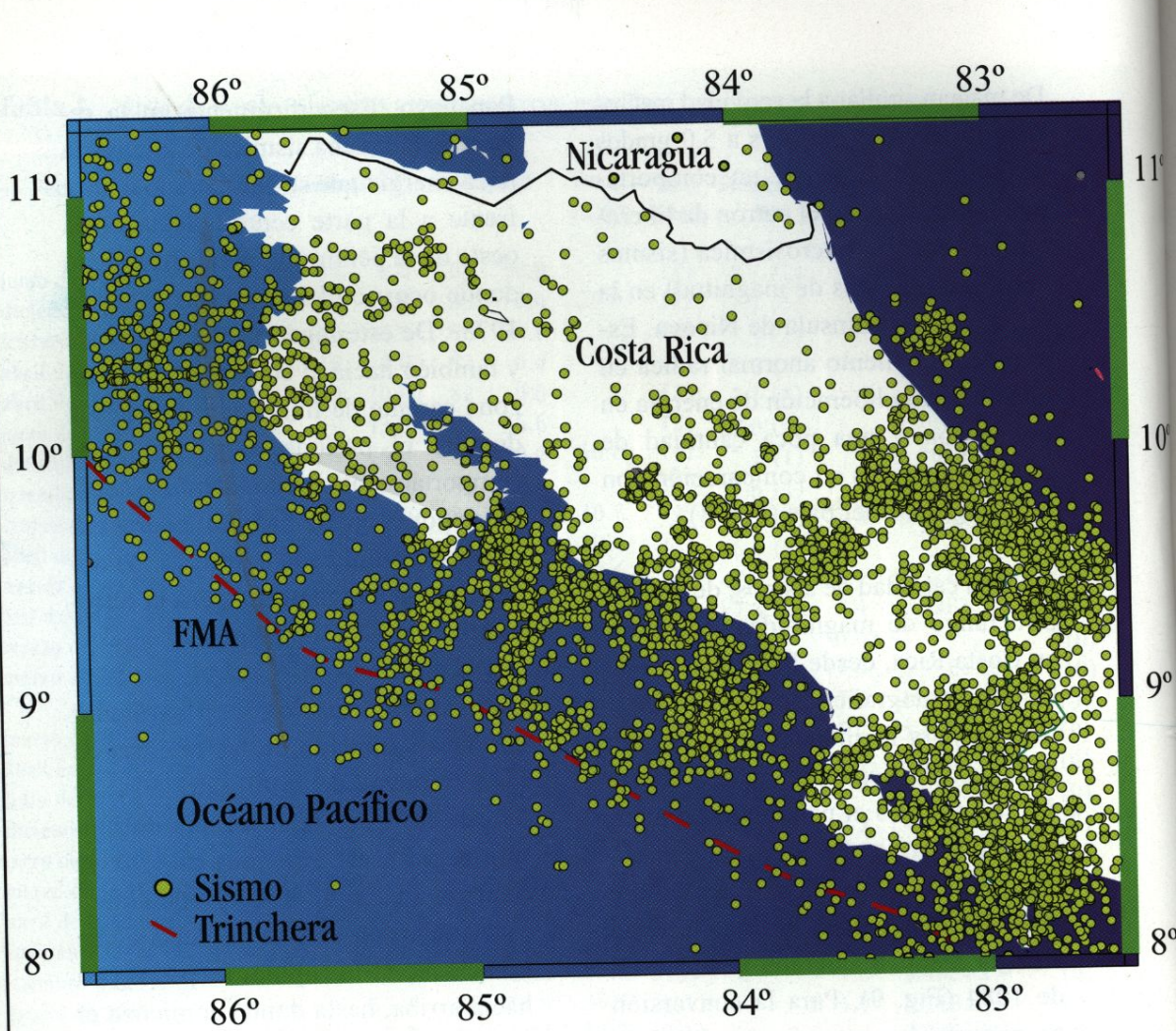
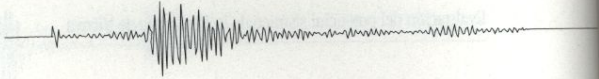
De manera similar a la actividad macrosísmica (eventos mayores a 5.0 grados en magnitud) se tiene un comportamiento anormal en el patrón de liberación de energía microsísmica (sismos entre 2 y 5 grados de magnitud) en la región de la Península de Nicoya. Este comportamiento anormal radica en una muy baja liberación de energía en esa región y una poca cantidad de eventos sísmicos en comparación con otras regiones del país (Fig. 8).

Dada la cantidad de sismos, de un amplio rango de magnitudes, ocurridos en Costa Rica, desde la instalación de la red sismográfica del OVSICORI-UNA y para facilitar la visualización de la distribución de la energía liberada, se convirtió el parámetro de magnitud a energía. Se ha obtenido así, para una rejilla de 10 x 10 Km sobre el territorio nacional, la suma total de energía sísmica liberada desde abril de 1984 (Fig. 9). Para la conversión de magnitud a energía se utilizó la ecuación de  $Energía = 10^{(11.8 + 1.5 * magnitud)}$ . En la Figura 9 se muestra, para la región de la Península de Nicoya, un patrón que indica una menor cantidad de energía sísmica liberada con respecto al resto del país. El límite NO de la brecha sísmica de Nicoya está claramente marcado por el contraste con una liberación mucho más grande de energía en la región del Golfo de

Papagayo. Específicamente en la región de la brecha sísmica de Nicoya la poca energía que se ha liberado ocurre frente a la parte central de la costa oeste de la península, precisamente en donde ocurrió el sismo de Sámara de 1978. De este lugar hacia el noroeste y también hacia el sureste se nota una zona carente de liberación de energía durante el período estudiado. Este comportamiento en dos lóbulos, separados por el eje de Sámara, podría explicar el complicado patrón de las ondas sísmicas registradas para el terremoto de 1950.

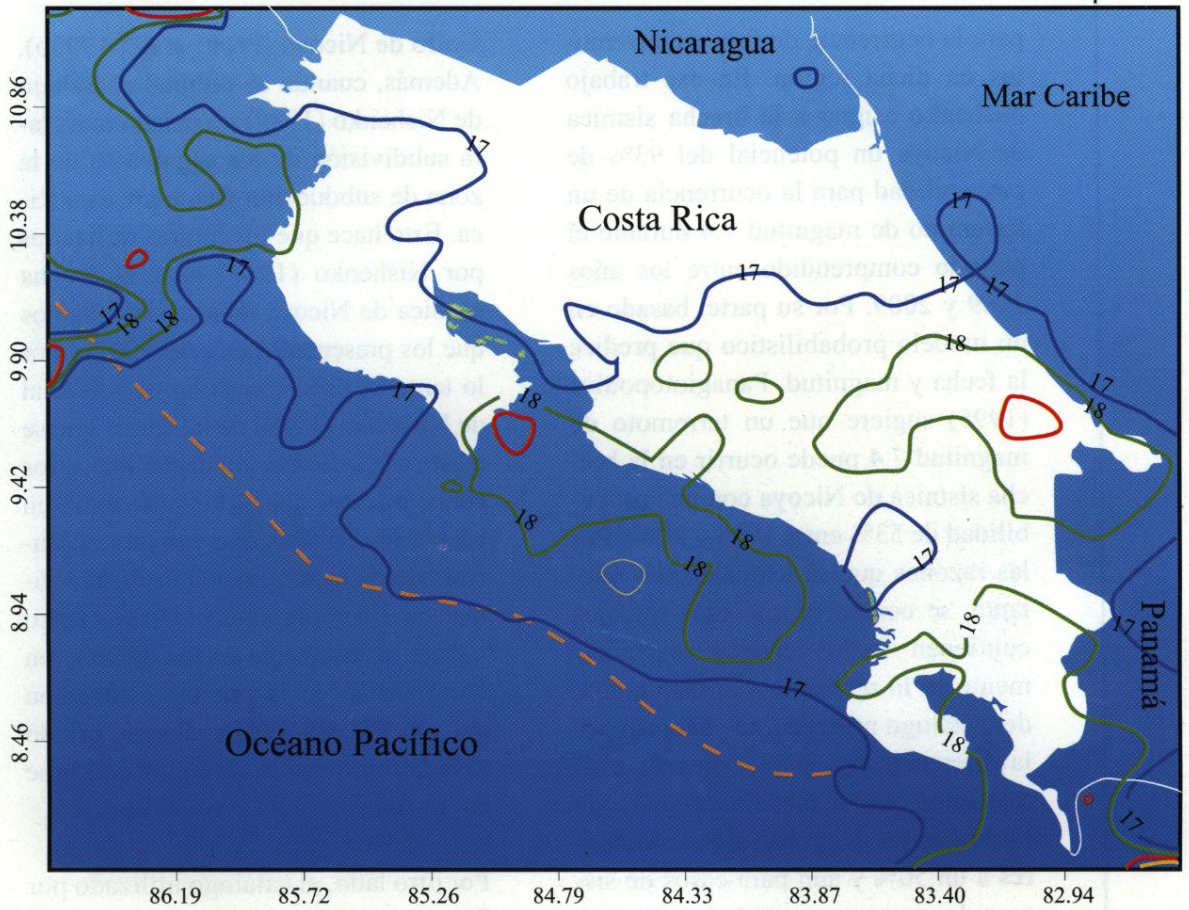
Con esta información y en particular con la distribución de las réplicas de los terremotos de 1990 y de 1992, se ha estimado que la superficie de ruptura de la brecha sísmica de Nicoya tiene un área entre 4600 y 9600 km<sup>2</sup>. Este rango tan amplio se debe a que no se sabe si la ruptura se propagará hacia arriba, hasta donde comienza el contacto entre las placas en la trinchera Mesoamericana, y/o hacia abajo hasta los 40 Km de profundidad, cerca de donde se da el desacople elástico entre las placas. La Figura 5 muestra la extensión máxima y mínima de la superficie de falla y la interpretación de la forma de la aspereza en la brecha sísmica de Nicoya.





**Figura 8.** Sismicidad superficial (profundidad menor de 40 Km) registrada en Costa Rica por el OVSICORI-UNA durante el período de 1984 a 1999. FMA: Fosa Mesoamericana.





**Figura 9.** Mapa con la distribución de la energía sísmica liberada en Costa Rica desde 1984 de acuerdo al Catálogo de sismos del OVSICORI-UNA. Las isolíneas representan el valor del exponente de la energía en ergios.

**Evaluaciones previas del potencial de la brecha sísmica de la Península de Nicoya**

Los estudios de Nishenko (1989) y Panagiotospoulos (1995) han determinado, de una forma probabilística, el nivel

de amenaza existente a lo largo de la brecha sísmica de Nicoya. Nishenko (1989) utilizó la historia sísmica del Circumpacífico para establecer períodos de recurrencia y con base en un análisis estadístico obtuvo probabilidades





para la ocurrencia de futuros terremotos en dicha región. En ese trabajo Nishenko asignó a la brecha sísmica de Nicoya un potencial del 93% de probabilidad para la ocurrencia de un terremoto de magnitud 7.4 durante el período comprendido entre los años 1989 y 2009. Por su parte, basado en un modelo probabilístico que predice la fecha y magnitud, Panagiotopoulos (1995) sugiere que un terremoto de magnitud 7.4 puede ocurrir en la brecha sísmica de Nicoya con una probabilidad de 53% entre 1993 y 2002. Por las razones que se exponen más adelante, se considera que esos trabajos contienen varios errores, especialmente en lo referente a lo incompleto del catálogo utilizado, lo cual provoca la diferencia tan grande en esas estimaciones. Cabe mencionar que con estimaciones de probabilidades menores a un 50% y aún para casos de sismos de menor magnitud al que se estima por debajo de la Península de Nicoya, países como Estados Unidos y Japón han iniciado la toma de medidas de prevención y mitigación de futuros daños.

Para el caso del trabajo de Nishenko (1989) hay que señalar un error pues se incluyó el sismo del 21 de diciembre de 1939 ( $M_w=7.1$ ) dentro del segmento de Nicoya, cuando en realidad este evento ocurrió a la entrada del

Golfo de Nicoya (Protti *et al.*, 1995b). Además, cuando se publicó el trabajo de Nishenko (1989) no existía una clara subdivisión de los segmentos de la zona de subducción frente a Costa Rica. Esto hace que los límites utilizados por Nishenko (1989) para la brecha sísmica de Nicoya no sean los mismos que los presentados en este trabajo. Por lo tanto se debe recalculer el potencial de Nishenko (1989) de tal forma que se ajuste a la información disponible, a los conocimientos actuales y que tome en cuenta los 10 años que ya han transcurrido desde la publicación de dicha estimación. En el presente, el Dr. Nishenko trabaja, a instancias de los autores, en una revisión de la primera estimación del año 1989, para lo cual se le brindó toda la información corregida con base en los registros del OVSICORI-UNA.

Por otro lado, el catálogo utilizado por Panagiotopoulos (1995) en sus estimaciones del potencial sísmico de origen interplaca para Centroamérica y el Caribe contiene tanto omisiones importantes, como inclusiones erróneas. Para el caso de Costa Rica, por ejemplo, se omitieron sismos importantes como los de 1904 ( $M_w=7.1$ ) y de 1983 ( $M_w=7.4$ ); además se consideró para el potencial del Pacífico el evento del 26 de abril de 1916 ( $M_s=7.4$ ) ocurrido en el Caribe (Güendel, 1986) y otros eventos que





son claramente de intraplaca como los del 4 de marzo de 1924 ( $M_s=7.4$ ) en Orotina y el del 14 de abril de 1975 ( $M_s=6.5$ ) en Tilarán. Dado que dichos eventos representan un porcentaje importante de la energía liberada durante ese siglo, los resultados obtenidos por Panagiotopoulos (1995) pierden validez en el contexto espacio-temporal de la "brecha sísmica de Nicoya" aquí definida. Los autores han facilitado el catálogo corregido al Dr. Panagiotopoulos y a su grupo con el fin de realizar una nueva estimación de las probabilidades. Ellos muy gentilmente han accedido a hacer una nueva corrida de su programa, a la fecha de publicación de este libro, se encuentra aún pendiente.



CAPÍTULO V

Lo que se ha hecho  
y aun queda por hacer

CAPÍTULO VI

Respecto a los trabajos realizados en la Penitencia  
de los años 1901 y 1902, el Sr. Jefe de la Penitencia  
señala que en el primer semestre de 1901 se  
realizaron los trabajos de saneamiento de la  
Penitencia, y en el segundo semestre se  
realizaron los trabajos de saneamiento de la  
Penitencia, y en el primer semestre de 1902  
se realizaron los trabajos de saneamiento de la  
Penitencia, y en el segundo semestre de 1902  
se realizaron los trabajos de saneamiento de la  
Penitencia.

CAPÍTULO VII

Conclusiones

Posible estado de los trabajos de saneamiento  
de la Penitencia en el primer semestre de 1902

En el primer semestre de 1902 se realizaron los  
trabajos de saneamiento de la Penitencia, y en  
el segundo semestre de 1902 se realizaron los  
trabajos de saneamiento de la Penitencia, y en  
el primer semestre de 1903 se realizaron los  
trabajos de saneamiento de la Penitencia, y en  
el segundo semestre de 1903 se realizaron los  
trabajos de saneamiento de la Penitencia.





## CAPÍTULO II

# Sismicidad histórica y reciente en la brecha sísmica de Nicoya

### Sismicidad histórica en la brecha sísmica de Nicoya

La fuente de información más apropiada para buscar referencias de eventos sísmicos históricos ocurridos en Costa Rica consiste en la obra publicada en 1910 por quien fue Presidente de Costa Rica en los períodos 1906-1910 y 1928-1932, el Lic. Cleto González Víquez, titulada "Temblores, Terremotos, Erupciones Volcánicas e Inundaciones en Costa Rica: 1608-1910". Otras fuentes de información sobre actividad sísmica histórica en Costa Rica son el libro de Miyamura (1980), el trabajo de Feldman de 1984, el catálogo de temblores históricos de Centroamérica de Rojas (1993), el libro de Peraldo y Montero (1994) y finalmente el reporte de Hilje y Alvarez (1994).

Se ha recolectado la mayor cantidad de información que indique o mencione reportes de actividad sísmica en la región de la Península de Nicoya. Al final del libro el lector podrá encontrar en el Apéndice I "Sismicidad histórica de la Península de Nicoya", la transcripción de información obtenida de las diferentes fuentes de referencia utilizadas. De esos trabajos se puede establecer claramente que han ocurrido eventos sísmicos por debajo de la Península de Nicoya a través de la historia reciente de Costa Rica y se destacan los eventos de 1853, 1900 y 1950 como eventos que deslizaron todo el segmento de subducción por debajo de dicha Península.





## El último gran terremoto de la Península de Nicoya (Mw=7.7) del 5 de octubre de 1950

Al ser las 10 horas con 9 minutos de la mañana del 5 de octubre de 1950, ocurrió bajo la Península de Nicoya, el terremoto de mayor magnitud registrado en Costa Rica durante el siglo XX. Este gran evento sísmico fue ubicado por Gutenberg y Richter (1954) cerca de las islas Solentiname en el lago de Nicaragua y fue relocalizado por Kelleher *et al.* (1973), utilizando el método de evento simple, cerca de la desembocadura del río Tempisque, en Costa Rica. Estas ubicaciones, sin embargo, no corresponden al nivel de daños observados. Güendel (1986) relocalizó el evento principal y varias de sus réplicas, utilizando para tal propósito el método del "evento maestro" de Dewey (1971). Como evento maestro para esas relocalizaciones se utilizó el sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978, registrado por una red sísmográfica local (Güendel, 1986) y descrito adelante. La ubicación así obtenida para el evento principal del 5 de octubre de 1950, lo localiza a 14 Km al SO de la ciudad de Nicoya (Fig. 10). Esta nueva ubicación corresponde más con la realidad de los daños observados.

El terremoto del 5 de octubre de 1950 estuvo asociado directamente con el

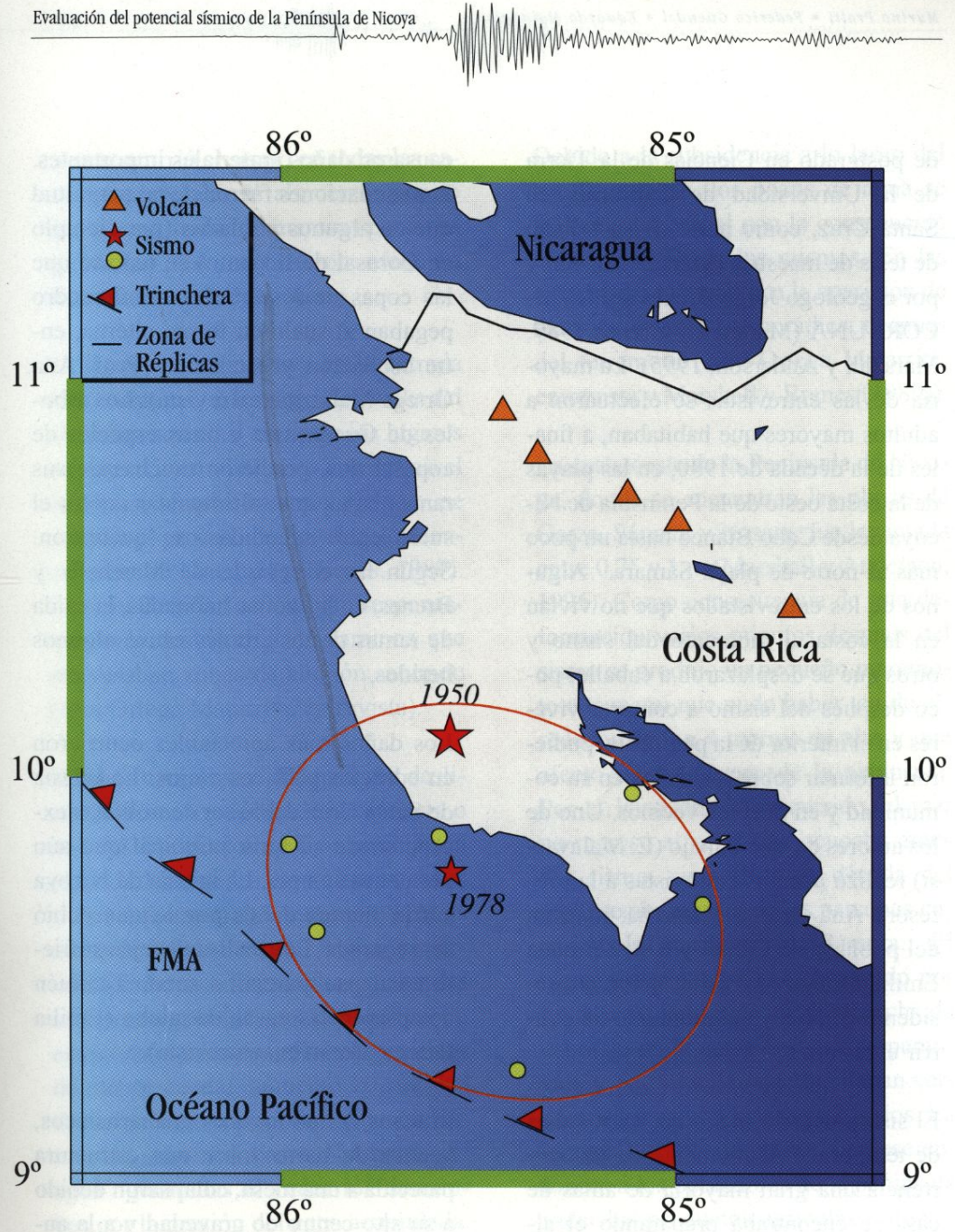
proceso de subducción y produjo un fuerte levantamiento a lo largo de la costa oeste de la Península de Nicoya entre Cabo Velas (al noroeste) y Cabo Blanco (al Sur-Este). Según relatos obtenidos de los moradores de la Península de Nicoya, el levantamiento observado a lo largo de la costa se estima en alrededor de 1 m (Marshall y Brenes, 1989; Marshall y Anderson, 1995). Por las características y la magnitud tanto del sismo como de los daños causados se dedica la siguiente sección a este evento.

### Parámetros sísmicos e impacto del terremoto de 1950

Como se mencionó anteriormente un fuerte terremoto, de magnitud Mw=7.7 y con epicentro en la Península de Nicoya, ocurrió a las 10 horas y 9 minutos de la mañana del día 5 de octubre de 1950. Este sismo es recordado, por los guanacastecos y puntarenenses que lo sintieron, como el evento sísmico más fuerte que hayan experimentado en toda su vida.

Las siguientes son reconstrucciones basadas en una serie de entrevistas a personas que experimentaron el sismo del 5 de octubre de 1950. Estas entrevistas fueron realizadas entre 1989 y 1990 por Jeffrey Marshall, estudiante





**Figura 10.** Ubicación del sismo de Nicoya del 5 de octubre de 1950 (estrella grande) y 5 de sus réplicas más importantes (círculos rellenos), relocalizados por Güendel (1984), utilizando el sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978 (estrella pequeña) como evento maestro. Los triángulos rellenos indican la ubicación de la cadena volcánica de Guanacaste. FMA: Fosa Mesoamericana.





de postgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad de California en Santa Cruz, como parte de su trabajo de tesis de maestría (Marshall, 1992) y por el geólogo Jorge Brenes del OVSI-CORI-UNA (Marshall y Brenes 1989, Marshall y Anderson, 1995). La mayoría de las entrevistas se efectuaron a adultos mayores que habitaban, a finales de la década de 1980, en las playas de la costa oeste de la Península de Nicoya desde Cabo Blanco hasta un poco más al norte de playa Sámara. Algunos de los entrevistados que no vivían en la costa al momento del sismo y otros que se desplazaron a caballo, poco después del sismo a comprar víveres en el interior de la península, pudieron informar sobre los daños en su comunidad y en pueblos vecinos. Uno de los autores de este trabajo (E. Malavassi) realizó además entrevistas a la profesora Ana Ortega Matarrita, maestra del poblado de Canjel y a su hermana Emilia Ortega Matarrita, quien era residente de Nicoya al momento de ocurrir el sismo.

El sismo ocurrió luego de varios días de temporal. Al momento de su ocurrencia una gran mayoría de amas de casa se encontraba preparando el almuerzo en el fogón familiar. Aunque el sismo no cobró víctimas entre los habitantes de la región, por su alta magnitud, produjo grandes oscilaciones que

causaron daños materiales importantes. Las oscilaciones fueron de tal magnitud que en algunos poblados (por ejemplo en Corosal de Lepanto) se reportó que las copas de los árboles de almendro pegaban al suelo en forma alterna, entre oscilación y oscilación (Prof. Ana Ortega Matarrita, entrevista). Los árboles de Guanacaste y otras especies de copas bajas, perdieron muchas de sus ramas bajas que, al impactar contra el suelo entre sacudidas, se quebraron. Según las entrevistas de Marshall y Brenes, en las zonas habitadas, la caída de ramas de los árboles causó algunos heridos.

Los daños más apreciables ocurrieron en edificios públicos viejos. La iglesia de Santa Cruz debió ser demolida, a excepción de su torre principal que aún permanece en pie. La iglesia de Nicoya sufrió fuertes daños por lo que debió ser reparada. Los techos de tejas sufrieron colapso parcial o total. También colapsaron las casas de adobe (Emilia Ortega Matarrita, entrevista).

Muchos de los fogones guanacastecos, hechos de barro sobre una estructura parecida a una mesa, colapsaron debido a su alto centro de gravedad y a la ausencia de arriostres o reglas que unan pata con pata para darles resistencia lateral a las oscilaciones sísmicas. Como se mencionó anteriormente, a la hora





en que ocurrió el sismo en todas las casas se preparaba el almuerzo, por lo que se registraron numerosas personas quemadas que requirieron atención hospitalaria o de enfermería.

En las playas arenosas y en la entrada de los esteros, a lo largo del valle del río Tempisque, así como en los lugares en que existen aluviones con un nivel de aguas subterráneas muy elevado, se produjo el proceso de licuefacción (entrevistas de Marshall y Brenes, 1989). La licuefacción fue también responsable de la destrucción de caminos que atravesaban zonas de aluvión saturado (Ana Ortega Matarrita, entrevista).

Muchos caminos se dañaron por deslizamiento en los cortes de la carretera o por deslizamientos que se produjeron en las laderas de las montañas cercanas y que afectaron los caminos y otras obras de infraestructura. Según las personas entrevistadas, muchas quebradas se vieron obstruidas por derrumbes. En estos represamientos efímeros y en ríos de mayor caudal, aumentó la cantidad de sedimentos transportados y ocurrieron, en algunos casos, "cabezas de agua" generadas al ceder los derrumbes por la presión del agua acumulada. El terremoto de 1950 ocurrió cuando el suelo se encontraba altamente saturado de agua después de varios días de lluvia continua.

Debido a la subsidencia a lo largo del río Tempisque, los pozos de agua se salieron del brocal con la consecuente contaminación de los mismos. En las entrevistas se menciona la aparición de diarreas, en forma esporádica, después del terremoto (Ana Ortega Matarrita, entrevista y Marshall y Brenes (1989)).

La costa oeste de la Península de Nicoya, donde se encuentran las playas de Garza, Sámara y Nosara, fue levantada entre 0.75 y 1 m (Marshall y Anderson, 1995). Como consecuencia de esta deformación varios minutos después del sismo se produjo un pequeño maremoto o tsunami que pudo haber tenido alrededor de 2 a 4 metros de alto y que afectó la costa oeste de la península. Por el levantamiento ocurrido, el mar no regresó al nivel que ocupaba antes del sismo, sino hasta la década del 1990 según reporte de las personas entrevistadas residentes en Sámara. El tsunami fue claramente observado por los vecinos que esperaban la lancha de cabotaje en la costa oeste de la península y por aquellos que habitaban cerca de la desembocadura de los ríos. La lancha de cabotaje permitía en ese entonces a los pobladores de la península sacar los productos agrícolas a Puntarenas. Existe el reporte de una familia a la cual el tsunami la sorprendió cruzando un estero en carreta; la familia fue rescatada, pero estuvieron a punto





de perecer ahogados (entrevistas de Marshall y Brenes).

Lejos de los pueblos, los heridos por el colapso de techos de teja, la caída de ramas de árboles y las quemaduras con agua caliente de los fogones, no pudieron recibir asistencia médica por estar los caminos bloqueados. Las cañerías de algunos caseríos se dañaron como consecuencia de los derrumbes y de las cabezas de agua, según reportaron varios de los entrevistados.


En la ciudad de Puntarenas, algunos edificios como el de la Aduana y el muelle sufrieron subsidencia. También se produjo licuefacción en muchos lugares dentro de la ciudad, principalmente en el sector cercano al "muellecito" (Jorge Alvarez Montenegro, entrevista). El OVSICORI-UNA documentó los daños causados en la ciudad de Puntarenas por el terremoto del 25 de marzo de 1990, en la entrada al Golfo de Nicoya y constató que la mayoría de los daños ocurrieron en el sector norte de la ciudad, a lo largo de la costa del estero. Estos daños se debieron principalmente al hundimiento y deslizamiento hacia el estero de los sedimentos fangosos y de relleno (Protti *et al.* 1995b). Consultando en esa ocasión a pobladores puntarenenses que vivieron también el terremoto de 1950, se logró documentar que las

características de los daños de ambos terremotos fueron muy similares, pero de mucho mayor magnitud durante el terremoto de 1950.

### El sismo de Sámara de 1978

El 23 de agosto de 1978 ocurrió, frente a las costas de Sámara, un sismo de magnitud  $M_w=6.9$ , el evento sísmico de mayor magnitud que ha ocurrido dentro de la brecha sísmica de Nicoya después del terremoto de Nicoya de 1950. Güendel (1986) relocalizó un total de 421 sismos asociados a este sismo de Sámara, que ocurrieron antes y después del evento (Fig. 6). El sismo principal fue también modelado por Güendel (1986) utilizando las ondas P de período largo (Langston y Helmberger, 1975) de las estaciones de la Red Mundial Estandarizada (WWSSN). El mecanismo focal así obtenido es de tipo inverso, consistente con la subducción de la placa del Coco bajo la del Caribe a lo largo de un plano somero, buzando 22 grados en dirección  $N28^{\circ}E$ . De acuerdo con Güendel (1986), tanto la actividad premonitória, así como las réplicas registradas, muestran una ruptura sobre el plano de subducción elongada en dirección del buzamiento. La réplica más grande se dio a los 10 minutos del evento principal con una magnitud estimada en 5.3 grados. La caída de esfuerzos de este





evento produjo, a lo sumo, un deslizamiento sísmico promedio de 60.7 cm (Güendel, 1986) a lo largo de un área pequeña comparada con la extensión de la brecha sísmica de Nicoya. Este deslizamiento contribuyó en muy poco a cubrir el déficit de deslizamiento existente desde 1950, estimado para el año 2000 en 4.4 m. Se puede pensar que la ocurrencia de la secuencia de Sámara de agosto de 1978 tenga un efecto retardador sobre el futuro terremoto de la Península de Nicoya y puede retrasar la ocurrencia del mismo en unos 4 o 5 años, sin embargo, su ubicación cercana al centro de la brecha podría más bien incrementar los esfuerzos en los alrededores de la brecha produciendo el patrón conocido como la dona de Mogi (1981).

Más recientemente, con el conocimiento que se tiene de la geometría de la superficie de contacto entre las placas del Coco y del Caribe, los resultados iniciales sobre el límite superior de la zona sismogénica de Nicoya (Protti *et al.*; 2000b) y por la profundidad del sismo de Sámara y sus réplicas, hemos comenzado a evaluar la posibilidad que el evento principal de Sámara, así como la mayoría de sus réplicas, representen rompimiento interno de la placa del Coco como consecuencia de los esfuerzos de doblamiento. Comprobar esta hipótesis requiere de una inversión

de los sismogramas de ese evento y una reubicación del mismo y sus réplicas, utilizando modelos tridimensionales de velocidad. Dicha investigación está fuera del alcance de este trabajo, pero será fundamental hacerla en el futuro cercano. La confirmación de esta hipótesis vendría a aumentar el potencial sísmico de esa región.

### **Secuencia sísmica de marzo de 1991**

En medio de los dos eventos sísmicos que sirvieron para definir la extensión geográfica de la brecha sísmica de Nicoya, se presentaron, en 1991, una serie de sismos frente a Punta Guiones y Sámara, que llamaron la atención de los científicos porque podrían haber sido interpretados como el comienzo de la corrosión de la aspereza. El primero de marzo de ese año había ocurrido ya un sismo profundo en las llanuras de San Carlos, detrás de la Cordillera Volcánica de Guanacaste (1991/03/01 17:30, profundidad=180 Km, Mw=6.1) indicativo del nivel de esfuerzos alcanzado en la zona de acople (ver sección sobre sismicidad intraplaca). Esto creó, por lo tanto, gran expectativa sobre si se estaba ya cerca del rompimiento principal y motivó el estudio en detalle de esa actividad.






La actividad sísmica frente a Guiones y Sámara inició con un evento de  $M_w=6.3$  (1991/03/16 06:02, profundidad=25 Km) y se extendió por 4 días (86% de los eventos ocurrieron en los dos primeros días) (OVSICORI-UNA, 1991). La profundidad y ubicación del evento principal, así como de la gran mayoría de las réplicas, indican que se trata de eventos intraplaca producto de la deformación interna de la placa del Coco, por debajo de la zona de acoplamiento. Los eventos más superficiales de esta secuencia fueron de menor magnitud y ocurrieron en la zona de acoplamiento y en el arco externo, producto quizás del debilitamiento vibratorio de las fallas, más que de algún cambio en el régimen de esfuerzos. Las implicaciones tectónicas y su relación con el nivel de acoplamiento en la brecha sísmica de Nicoya se discuten más adelante en la sección sobre sismicidad intraplaca.

Seis meses después de esa actividad ocurrió otro evento en la misma región y con las mismas características (13 de setiembre de 1991,  $M_w=5.2$ ). Por su menor magnitud, este último evento tuvo una secuencia de réplicas más corta.

### Actividad microsísmica en la brecha desde 1984

Como se mencionó anteriormente, desde el inicio del registro de la red sismográfica de la Universidad Nacional, en abril de 1984, se han registrado a la fecha más de 50,000 eventos sísmicos. Esta actividad sísmica distribuida a lo largo y ancho de Costa Rica, no muestra una distribución uniforme, tanto en su ubicación epicentral como en profundidad. La Figura 8 muestra las principales características de la actividad sísmica superficial (sismos con profundidad menor que 40 Km). En dicha figura se ha graficado la actividad sísmica entre abril de 1984 y mediados del año 2000 y únicamente aquellos eventos cuya magnitud es superior o igual a los 3.0 grados y cuyos errores en ubicación epicentral y en su profundidad no superan los 20 y 10 Km, respectivamente. Se grafican solo los eventos que se localizan en los primeros 40 Km de la litósfera por cuanto, para caracterizar la brecha sísmica de Nicoya, interesan únicamente aquellos eventos que se ubican a lo largo de la interface entre las placas del Coco y del Caribe. En dicha figura se puede notar que, separando la sismicidad de la región costera del Pacífico de Costa Rica de lo que ocurre al interior y hacia la región del Caribe, existen sitios donde la concentración de epicentros es mayor. Se puede notar





que en la región sur de Costa Rica, a lo largo de las Penínsulas de Osa y de Burica, se presenta un alto nivel de microsismicidad, asociado a la presencia del punto triple entre las placas del Coco, Nazca y el bloque de Panamá. También a lo largo de la región pacífica central de Costa Rica, frente a las costas de Quepos, hay sitios de alta concentración de microsismicidad, relacionada con la subducción y deformación de montañas marinas que son introducidas bajo la corteza continental junto con la placa del Coco.

Más al norte, a lo largo de la costa pacífica de la Península de Nicoya, se presenta una microsismicidad menos concentrada y más esparcida, mostrando un patrón importante, característica que viene a definir el concepto de brecha sísmica. Este patrón, conocido como la "*Dona de Mogi*" (1981) se caracteriza por mostrar una zona central con muy poca actividad sísmica rodeada de un anillo donde sí se presenta un nivel de microsismicidad más alto. Este patrón sugiere que entre la Península de Nicoya y fuera de ésta, buscando hacia la "Trinchera Mesoamericana", se ubica una zona de quietud sísmica. Esto pone de manifiesto la presencia de una zona de alto acople entre las dos placas, la del Coco y la del Caribe, donde se interpreta que el proceso de subducción está obtaculizado y se resiste el desli-

zamiento normal entre las dos placas. Esto sugiere que la baja actividad sísmica registrada por la red sismográfica del OVSICORI-UNA desde abril de 1984, apoya la existencia de una brecha sísmica para magnitudes superiores a los 3 grados.

Con el propósito de poder apreciar mejor las dimensiones y características de dicha brecha sísmica, se ha procedido a calcular la energía sísmica liberada por medio de la actividad registrada por la red sismográfica del OVSICORI-UNA desde abril de 1984. La Figura 9 muestra una gráfica que señala con mayor claridad la poca liberación de energía en la región entre la "Trinchera Mesoamericana" y la costa pacífica de la Península de Nicoya entre Cabo Blanco al sur y Cabo Velas al norte. Esta deficiencia, en la liberación de energía, es más significativa ya que muestra, gráficamente, que la zona externa de la Península de Nicoya se comporta de manera anómala con respecto al resto de la zona de acople entre las placas del Coco y del Caribe. Es así como nuevamente se identifica de forma clara la región anómala que representa la brecha sísmica de Nicoya, la cual deberá liberar la energía acumulada durante los últimos 50 años en forma de un sismo de magnitud importante.



CAPÍTULO V

Lo que se ha hecho  
y que queda por hacer

CAPÍTULO VI

Respecto a los trabajos realizados en la Penitencia  
de los años 1901 y 1902, y en los años 1903 y 1904  
se han realizado trabajos de estadística y de  
investigación, necesarios para el conocimiento de la  
situación sobre el sistema de penitencia de la  
República para la fundamentación del presente  
trabajo de tesis y que sirven como base para  
el estudio y posterior  
elaboración de la tesis y para el estudio del  
problema de la penitencia.

CAPÍTULO VII

Conclusiones

Según se ha visto en el presente trabajo  
de tesis, el sistema de penitencia de la  
República de Chile.

El sistema de penitencia de Chile, en el  
año 1901, era un sistema de penitencia  
de tipo primitivo, basado en el sistema de  
reclusión, que consistía en la privación  
de la libertad del recluso, en un espacio  
de tiempo determinado, para la ejecución  
de trabajos forzados, con el fin de  
rehabilitarlo y preparar para la vida  
civil.

132

133



## CAPÍTULO III

# Información que sustenta el potencial sísmico de la Península de Nicoya

### Deficiencia de deslizamiento sísmico

El principal indicador del potencial sísmico bajo la Península de Nicoya es la deficiencia de deslizamiento sísmico en ese segmento de la zona de subducción. La deficiencia de deslizamiento es evidente porque no ha ocurrido un sismo de magnitud importante por debajo de la península desde 1950. La ausencia de sismicidad se puede explicar de dos maneras. Una, en la que la mayor parte de la convergencia tectónica entre las placas del Coco y del Caribe se asimila en forma de deslizamiento asísmico constante, o sea, sin que ocurran sismos de gran magnitud, deslizando y convergiendo las placas por medio de una gran cantidad de sismos de baja magnitud. La otra manera como se puede explicar la ausencia de sismicidad es asumiendo que el componente de deslizamiento sísmico (en forma de temblores de gran magnitud) es la dominante y se permite así la acumulación en el tiempo y en este espacio, de gran cantidad de energía. En el primer caso, el potencial sísmico sería bajo y en el segundo el potencial sería muy alto.

Hasta la fecha no se ha encontrado evidencia alguna que soporte el modelo asísmico; por el contrario, existe una gran cantidad de evidencias que apuntan a que el modo característico de rompimiento del segmento de Nicoya es por medio de deslizamiento sísmico intermitente. La ocurrencia en el pasado de sismos de gran magnitud por debajo de la Península de Nicoya ( 1853, 1900 y 1950)





y la actividad sísmica anormalmente baja durante el período intersísmico, no solo apuntan en contra del modelo de deslizamiento asísmico, sino que dejan claro que el rompimiento es predominantemente sísmico. Los deslizamientos recientes en los segmentos de Cóbano-Herradura en 1990 y Nicaragua-Papagayo en 1992, han contribuido a un aumento en el potencial sísmico de la brecha de Nicoya.

Esta deficiencia de deslizamiento sísmico ha sido utilizada por Nishenko (1989) y por Panagiotopoulos (1995) en determinaciones probabilísticas del potencial sísmico para el segmento de Nicoya. Estos trabajos están actualmente siendo revisados por sus autores según lo expuesto anteriormente.

### **Sismicidad y acople elástico**

Con una tasa de convergencia entre las placas del Coco y la placa del Caribe frente a la Península de Nicoya del orden de 88 mm/año, el deslizamiento acumulado desde 1950 sería, para octubre del año 2000, del orden de 4.4 m. Esta estimación representa el valor mínimo acumulado ya que asume que el sismo de 1950 liberó todo lo acumulado hasta esa fecha. De acuerdo con Güendel (1986), el área de ruptura del sismo de Sámara del mes de agosto de

1978 fue del orden de 1,500 Km<sup>2</sup> y de acuerdo al catálogo de soluciones del tensor de momento de la Universidad de Harvard, la magnitud de momento sísmico fue de 6.9 grados. Con estos valores y sin considerar la posibilidad que ese evento sea de intraplaca, se obtiene que el sismo de Sámara deslizó únicamente 71 cm, lo que representa alrededor del 25% de lo acumulado hasta este momento. Esto deja acumulado, en el área de ruptura de ese evento, alrededor de 3.7 m desde 1950. Guendel 1986, obtuvo 60.7 cm de deslizamiento en su análisis de este evento.

Si se considera el sismo de Nicoya de 1950 como un sismo característico de esta zona, con un área de ruptura de alrededor de 6,500 Km<sup>2</sup> (estimada en este trabajo a partir de la relocalización de réplicas de Güendel 1986) y una magnitud de momento de 7.8 (Abe, 1979) el deslizamiento sísmico de ese evento sería de 2.04 m. Si entre 1900 y 1950 no ocurrió deslizamiento sísmico importante, a la fecha de ocurrencia del sismo de 1950 habrían cerca de 4.5 m acumulados y por lo tanto se tendría que la componente de deslizamiento sísmico en el segmento de Nicoya durante el terremoto de 1950, sería de 45%. McNally y Minster (1981), acumulando el deslizamiento desde 1928, reportan alrededor de un 54% de deslizamiento sísmico para este segmento de la fosa Mesoamericana.





El porcentaje de deslizamiento sísmico da información importante sobre la magnitud del acople entre las placas. Las fallas con un fuerte acople no solo tienen la capacidad de acumular deslizamiento por más tiempo, sino también presentan un nivel muy bajo de actividad durante el período intersísmico. Ha sido posible documentar este bajo nivel de actividad desde 1984, en los Catálogos de Temblores del OVSICORI-UNA (Fig. 8 y 9) para sismos con magnitudes inferiores a 5 grados y para sismos con magnitud por encima de 5 en el catálogo de soluciones del tensor de momento de la Universidad de Harvard desde 1976. (Fig. 7). Los únicos tres sismos que se muestran en la Fig. 7 dentro de la brecha sísmica de Nicoya corresponden al sismo de Sámara de 1978 ( $M_w=6.9$ ) y los eventos del 16 de marzo ( $M_w=6.3$ ) y 13 de setiembre ( $M_w=5.2$ ) ambos de 1991. Estos dos últimos eventos, como se mencionó en el capítulo anterior, fueron eventos dentro de la placa del Coco y por lo tanto, no representan liberación de energía en la interfase entre las placas del Coco y Caribe. A manera de comparación, el segmento de subducción de Cóbano-Herradura muestra un nivel muy alto de sismicidad durante los períodos intersísmicos y la información del sismo del 25 de marzo de 1990 en ese segmento indica que solo el 18% de la convergencia tectónica desliza en

forma sísmica (Tabla I). McNally y Minster, (1981) reportan alrededor de un 21% para este segmento.

### **Sismicidad intraplaca subducente**

Se ha encontrado que las características de la actividad sísmica interna de la placa que se subduce, alrededor de zonas de subducción acopladas, está relacionada con el ciclo sísmico (Liu & McNally, 1993). Hacia la trinchera y en períodos intersísmicos, los sismos intraplaca más superficiales tienen un modo de rompimiento tensional producto del doblamiento de la placa. En regiones con un acople fuerte y a finales del período intersísmico, el régimen de esfuerzos en la placa que se subduce se vuelve más compresivo debido a la resistencia que, a la subducción, presenta la zona acoplada. Con esto se cambia, de distensivo a compresivo, el modo de ruptura de los sismos intraplaca cerca de la trinchera (i.e. levantando la superficie neutra) (Liu & McNally, 1993). Los sismos del 16 de marzo de 1991 ( $M_w=6.3$ ) y del 13 de setiembre de 1991 ( $M_w=5.2$ ) representan dos de esos sismos intraplaca compresivos (Catálogo de Harvard). Estos eventos son, por lo tanto, indicadores del régimen compresivo en el que se ha encontrado la brecha





sísmica de Nicoya desde principios de la década de 1990.

Dado que el intervalo de tiempo entre la ocurrencia de sismos compresivos intraplaca subducente cerca de la zona de acople y el rompimiento principal varía de región a región, desde más de una década hasta pocos meses, su utilidad como premonitor cuantitativo es baja. Sin embargo, la ocurrencia de éstos representa un indicador cualitativo, de mediano plazo, de los cambios en el régimen de esfuerzos.

El modo de ruptura de los sismos de profundidad intermedia (profundidades mayores que 50 Km), por debajo de zonas de subducción, también cambia durante el ciclo sísmico. Después de un sismo fuerte de subducción, el modo de ruptura de sismos de profundidad intermedia es de tipo compresivo, debido a la resistencia que presenta la astenósfera a una subducción rápida inducida por el deslizamiento en la zona de acople. Al final del ciclo sísmico, el anclaje de la placa en la zona de acople y el proceso continuo de hundimiento de la placa en el manto, generan esfuerzos distensivos y dominan los sismos intraplaca con mecanismo focal tensional.

Este fue el caso del sismo del 1° de marzo de 1991 que ocurrió al NE de la Península de Nicoya con una profundidad

de 180 Km y una magnitud ( $M_w$ ) de 6.1 grados. Este evento sísmico presentó un mecanismo focal tensional que aporta de nuevo información sobre la existencia ya de un acople elástico importante en la zona de contacto entre las placas y que por lo tanto se está dentro del estadio final del período intersísmico. De nuevo, dado que el intervalo de tiempo entre la ocurrencia de sismos extensivos de profundidad intermedia y el rompimiento principal varía en el tiempo y de región a región y aún cuando representa un indicador cualitativo y de mediano plazo, su utilidad como premonitor cuantitativo es baja.

### **Deformación cortical**

El régimen de esfuerzos y la deformación cortical inducida en la Península de Nicoya y sus alrededores, han sido registrados por medios geodésicos. Tres campañas de medición utilizando los sistemas globales de posicionamiento GPS (geodesia satelital) realizadas en el país por el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA y el OVSICORI-UNA en 1994, 1996 y 1997 y otra a principios del 2000, con colaboración además de la Universidad de Miami, han permitido registrar dicha deformación. Con base en los resultados de las tres primeras campañas





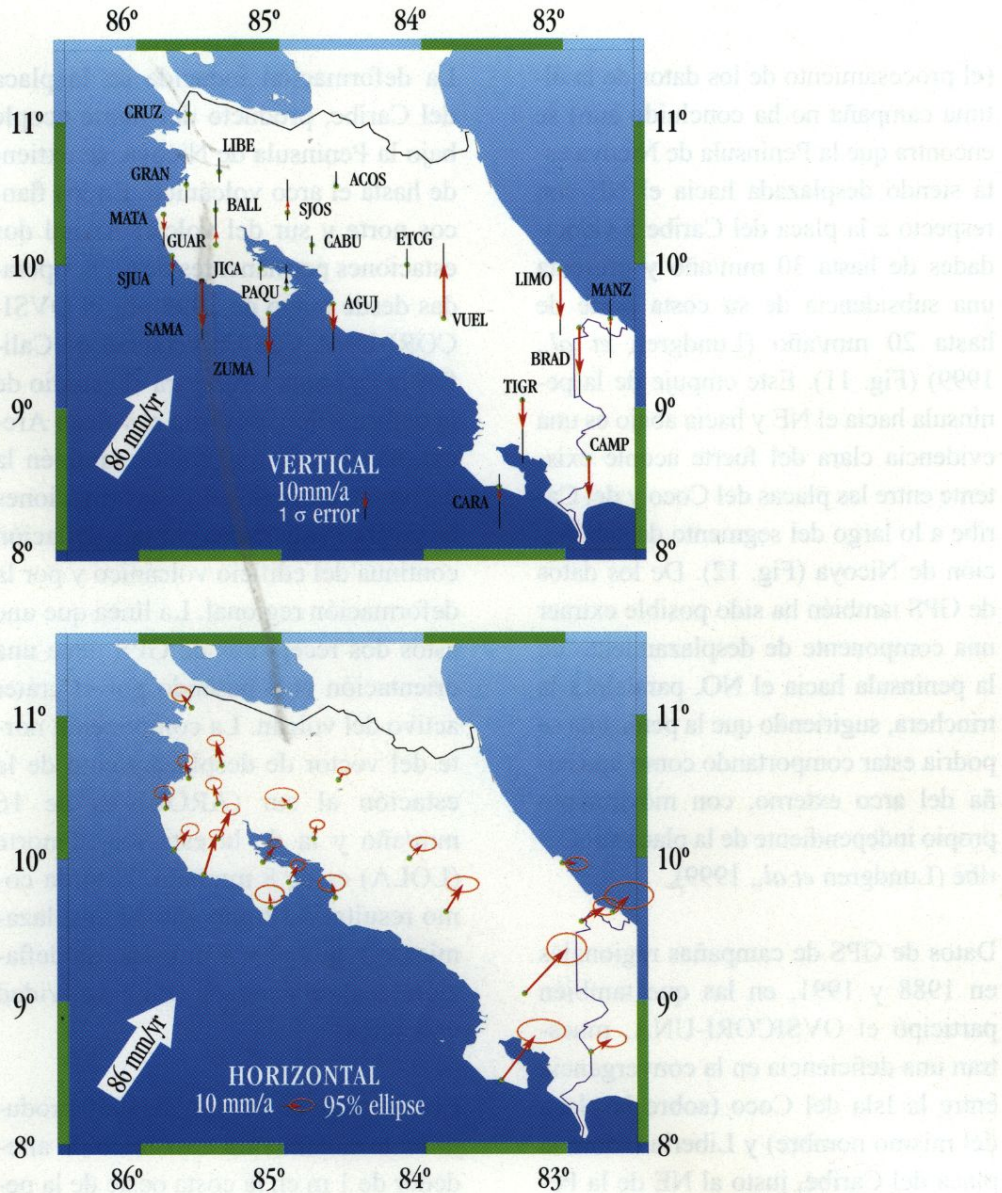
(el procesamiento de los datos de la última campaña no ha concluido aún) se encuentra que la Península de Nicoya está siendo desplazada hacia el NE con respecto a la placa del Caribe a velocidades de hasta 30 mm/año y presenta una subsidencia de su costa oeste de hasta 20 mm/año (Lundgren *et al.*, 1999) (Fig. 11). 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 (Fig. 12). De los datos de GPS también ha sido posible extraer una componente de desplazamiento de la península hacia el NO, paralelo a la trinchera, sugiriendo que la península se podría estar comportando como una cuña del arco externo, con movimiento propio independiente de la placa del Caribe (Lundgren *et al.*, 1999).

Datos de GPS de campañas regionales en 1988 y 1991, en las que también participó el OVSICORI-UNA, muestran una deficiencia en la convergencia entre la Isla del Coco (sobre la placa del mismo nombre) y Liberia (sobre la placa del Caribe, justo al NE de la Península de Nicoya). Dixon (1993) modeló esta deficiencia de deslizamiento y la interpretó como un bloqueo en la zona de contacto entre las placas, a una profundidad de 25 Km bajo la Península de Nicoya (Fig. 13).

La deformación inducida en la placa del Caribe, producto del fuerte acople bajo la Península de Nicoya, se extiende hasta el arco volcánico. En los flancos norte y sur del volcán Arenal dos estaciones permanentes de GPS, operadas desde mayo de 1995 por el OVSICORI-UNA y la Universidad de California en Santa Cruz para el estudio de la deformación asociada al volcán Arenal, han estado registrando también la deformación regional. Estas estaciones de GPS son afectadas por una deflación continua del edificio volcánico y por la deformación regional. La línea que une estos dos receptores de GPS tiene una orientación N-S pasando por el cráter activo del volcán. La componente norte del vector de desplazamiento de la estación al sur (AROL) es de 16 mm/año y la de la estación al norte (LOLA) es de 8 mm/año. Esto da como resultado 12 mm/año de desplazamiento regional y 4 mm/año de deflación local relacionada con la actividad volcánica.

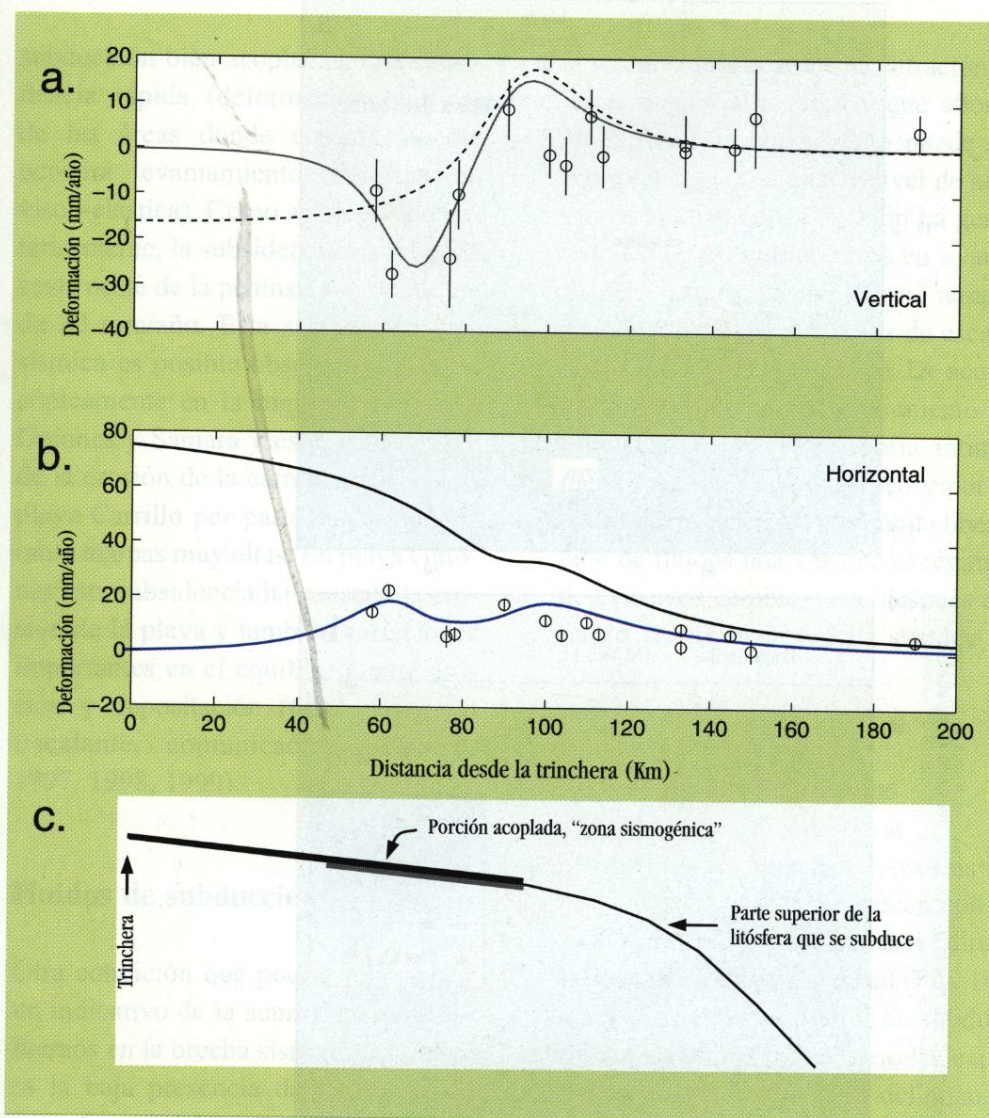
El terremoto de Nicoya de 1950 produjo un levantamiento cosísmico de alrededor de 1 m en la costa oeste de la península (Marshall y Anderson, 1995) y la mayor parte de ese levantamiento se ha recuperado como subsidencia durante el período intersísmico. Al final del período intersísmico, previo a la ruptura principal, ocurre, en zonas de





**Figura 11.** Vectores de desplazamiento cortical vertical y horizontal, con respecto a la placa del Caribe, obtenidos a partir de tres campañas de GPS realizadas en 1994, 1996 y 1997 (Lundgren *et al.*, 1999). Nótese la rápida subsidencia de la costa oeste de la Península de Nicoya y el desplazamiento de ésta hacia el NE. Los vectores de gran magnitud en la región sur de Costa Rica son el resultado del movimiento del bloque de Panamá respecto a la placa del Caribe e incluyen deformación posterior al sismo del Valle de la Estrella del 22 de abril de 1991.

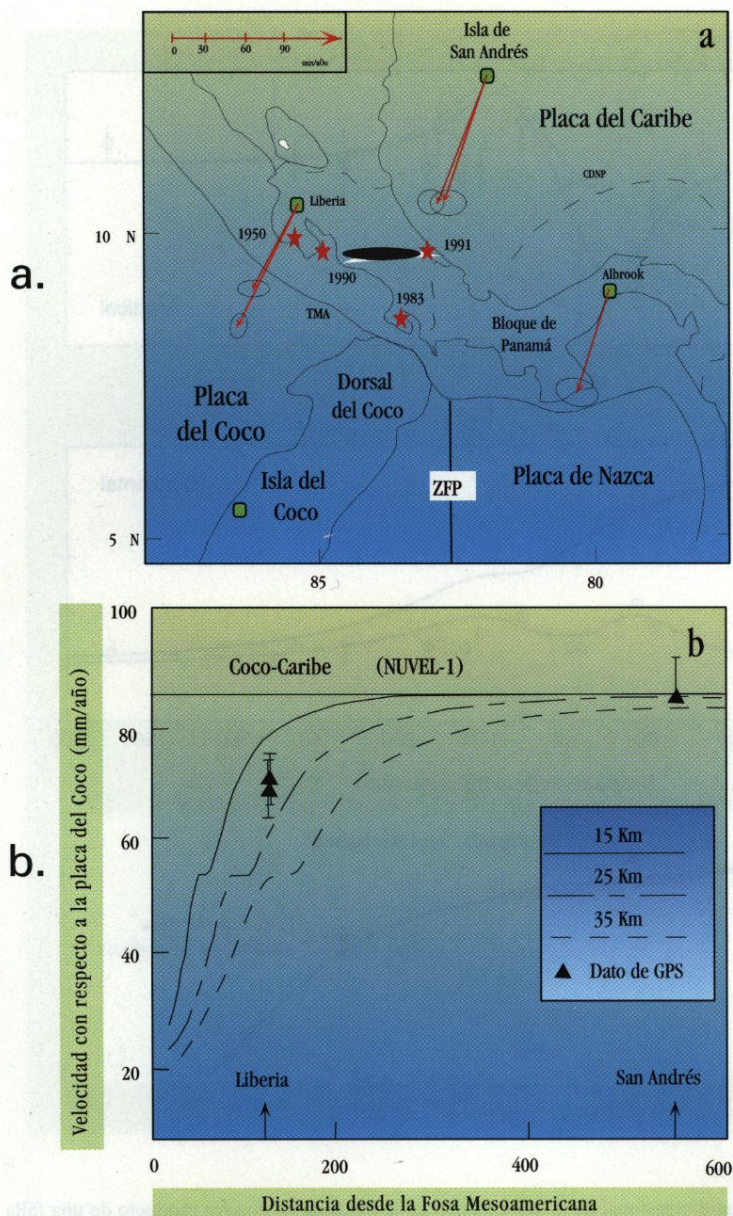


**Figura 12.**

Modelaje unidimensional de la deformación en la Península de Nicoya producto de una falla parcialmente acoplada (50%) desde la trinchera (línea interrumpida) y solo por debajo de la península (línea continua) (modificado a partir de Lundgren *et al.*, 1999).

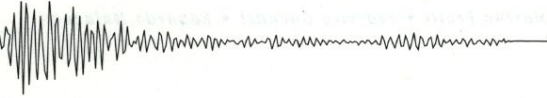
**a)** deformación vertical observada con sus respectivos errores y deformación esperada para ambos modelos; **b)** deformación horizontal observada con sus respectivos errores y deformación esperada para ambos modelos; **c)** diagrama de la geometría de la zona de contacto utilizada en el modelaje y ubicación de las zonas acopladas para cada modelo.



**Figura 13.**

Desplazamientos teóricos y observados de la placa del Caribe con respecto a la placa del Coco para un sitio en la Isla de San Andrés y otro en Liberia (modificado a partir de Dixón 1993). a) Mapa con vectores, ubicación de sitios (círculos sólidos) y terremotos importantes (estrellas); b) modelaje de los resultados para tres modelos de fallas acoplados bajo la Península de Nicoya a 15, 25 y 35 Km de profundidad. CDNP: "Cinturón Deformado del Norte de Panamá"; TMA: "Trinchera Mesoamericana"; ZFP: Zona de Fracturar de Panamá.





subducción bien acopladas, una subsidencia rápida (deformación elástica) de las áreas donde cosísmicamente ocurrirá levantamiento (deformación visco-elástica). Como se mencionó anteriormente, la subsidencia actual en la costa oeste de la península es del orden de 20 mm/año. Esta subsidencia pre-sísmica es posible 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 subsidencia 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).

### Fluidos de subducción

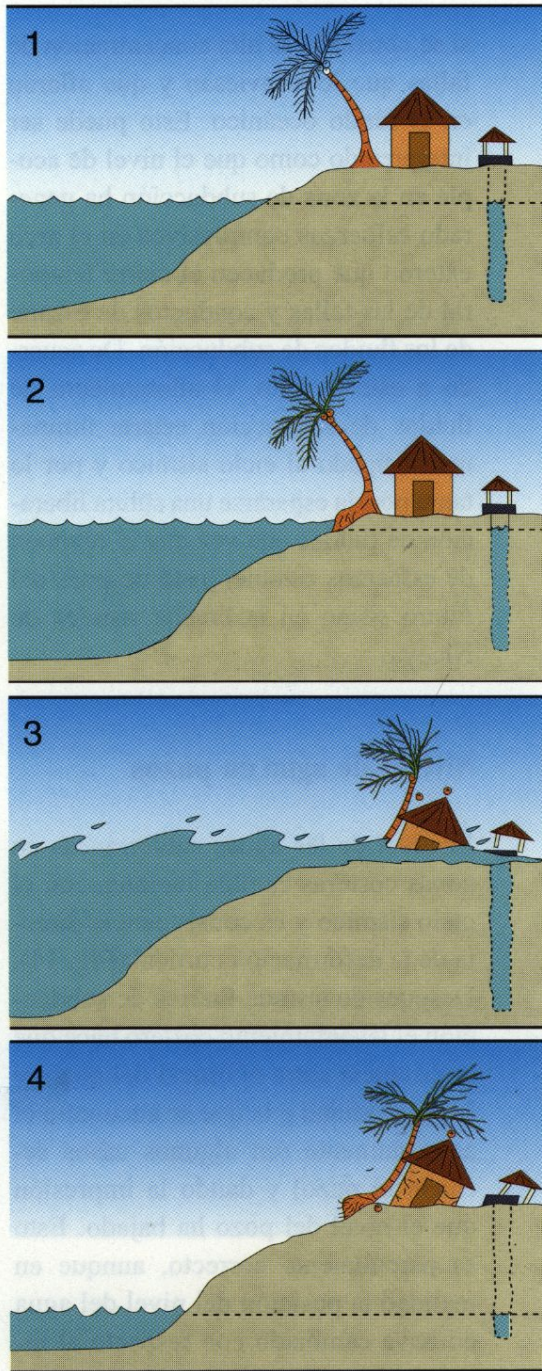
Otra condición que podría representar un indicativo de la acumulación de esfuerzos en la brecha sísmica de Nicoya es la baja presencia de fluidos en la parte frontal del arco externo. Silver *et al.* (1994) a través de inmersiones en el sumergible Alvin, del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, descubrieron que la cantidad de fluidos que afloran en el fondo oceánico en el talud continental frente a la Península de Nicoya es anómalamente baja, sobre todo

si se considera la alta concentración de fallas que lo atraviesan y que afloran en el fondo oceánico. Esto puede ser interpretado como que el nivel de acople en la zona de subducción ha generado esfuerzos compresivos en el arco externo que producen el cierre temporal de las fallas y conductos de escape de los fluidos de subducción. De acuerdo a este modelo, el afloramiento de fluidos de subducción estaría íntimamente ligado al ciclo sísmico y por lo tanto podría esperarse una súbita liberación de fluidos una vez que el régimen de esfuerzos cambie, justo después del futuro sismo en la brecha sísmica de Nicoya.

### Niveles de agua en pozos

El nivel de las aguas subterráneas en zonas costeras cambia también con el ciclo sísmico y es consecuencia directa de la deformación cortical (Fig. 14). Después de sismos fuertes de subducción el levantamiento costero hace que la distancia entre el brocal del pozo y la profundidad a la que se encuentra el agua aumente (en algunos casos secando el pozo) y dando la impresión que el nivel del pozo ha bajado. Esto es parcialmente correcto, aunque en realidad la posición del nivel del agua no haya cambiado con respecto al nivel del mar. Por el contrario, cuando





hay subsidencia costera, el nivel de los pozos aumenta con respecto al brocal de los mismos. Esto ha sido documentado en los últimos años en la región de playa Guiones por el geólogo Gregorio Escalante (Escalante, comunicación personal, 1997, 1998, 1999). El pozo de agua que abastece la casa de recreo del Geol. Escalante, en Playa Guiones, comenzaba a secarse parcialmente a finales de marzo de todos los años requiriendo racionar el agua durante la Semana Santa. Aún cuando el invierno de 1998 y el verano de 1999 fueron particularmente secos, para la Semana Santa de 1999 el nivel del pozo no bajó. Esto es una consecuencia directa de la subsidencia.

**Figura 14.** Relación levantamiento-subsidencia y nivel del agua en pozos costeros. 1. Durante el periodo intersísmico. 2. presísmico, 3. cosísmico y 4. postsísmico.



## CAPÍTULO IV

# Posibles características y consecuencias de un futuro sismo por debajo de la Península de Nicoya

Con base en la información existente expuesta en el Capítulo II, la información rescatada de sismos anteriores (en especial del terremoto de 1950) y la registrada por el OVSICORI-UNA, se pueden estimar las características del futuro terremoto de Nicoya, por medio de posibles escenarios. Estos escenarios incluyen descripciones de la fuente y sus parámetros sísmicos, así como estimaciones de la manera como este evento sísmico podría afectar tanto a la población como a la infraestructura de la Península de Nicoya y sus alrededores.

### Magnitud y momento sísmico

Para la determinación del tamaño o magnitud potencial del futuro terremoto de Nicoya es necesario conocer o estimar el área potencial (A) de la superficie de falla que deslizará cosísmicamente y la magnitud del vector de deslizamiento (s). Con estos valores y el coeficiente de rigidez ( $\mu=3 \times 10^{11}$  en unidades cgs), podemos obtener el momento sísmico del evento ( $M_0$ ) y a partir de éste obtener la magnitud de momento ( $M_w$ ) (Hanks y Kanamori; 1979):

$$M_0 = A \mu s$$

$$M_w = ( (\log M_0) / 1.5 ) - 10.7$$





Como se mencionó anteriormente, al definir la brecha sísmica de Nicoya, utilizando información de los sismos de Nicoya de 1950, de Sámara de 1978, el ocurrido a la entrada del Golfo de Nicoya en 1990 y el de Nicaragua de 1992, se estimó que el área de ruptura del próximo terremoto por debajo de la península podría estar entre 4,600 y 9,600 Km<sup>2</sup> (Fig. 5). El área menor representa un escenario en que el sismo no rompe nuevamente el área deslizada durante el sismo de Sámara de 1978 y en el que la ruptura no se extendería hasta la trinchera; el área mayor implicaría la generación de deslizamiento sísmico incluyendo el área del sismo de Sámara y la extensión de la ruptura cosísmica hasta 20 Km antes de la trinchera.

Al describir las evidencias que soportan la ocurrencia del futuro sismo de Nicoya, se mencionó que el deslizamiento acumulado desde octubre de 1950 hasta octubre del 2000 es de alrededor de 4.4 m y que el total aumenta en 88 mm cada año. Dado que el valor del deslizamiento acumulado asume que el sismo de 1950 liberó todo el acumulado hasta esa fecha, la magnitud del vector de deslizamiento acumulado al presente podría ser mayor si el deslizamiento en 1950 solo fue parcial. Para el segmento de subducción de Nicoya se obtuvieron valores indepen-

dientes (intervalo 1900-1950 y deficiencia de deslizamiento registrado con GPS) del porcentaje de deslizamiento sísmico que oscila entre 45% y 54%. Aplicando dos técnicas de modelaje distintas (Lundgren *et al.*, 1999) se encontraron distribuciones no homogéneas de acoplamiento a lo largo de la interfase que van desde 20 hasta 80% de acople elástico, con un promedio general para todo el segmento de aproximadamente 50%.

Estos valores de área y deslizamiento potenciales permiten estimar que aún en el caso más conservador, existe al presente, suficiente energía sísmica acumulada para producir un sismo de 7.3 grados de magnitud de momento (Fig. 15 y Tabla II). El escenario menos conservador y potencialmente más catastrófico, indica potencial para un sismo de hasta 8.1 grados de magnitud. En vista que la información existente sobre la historia sísmica de la Península de Nicoya no muestra evidencias de la ocurrencia de un terremoto de tal magnitud, se descarta enfáticamente la posibilidad de un evento sísmico tan grande.

En cada región de la corteza terrestre las rocas en el proceso de deformación acumulan energía sísmica hasta que rebasan el límite elástico, conduciendo a la ruptura y a la liberación de energía.





**Tabla II.** Fechas y magnitudes potenciales para diferentes áreas y % de deslizamiento

AÑO	Magnitud de momento (Mw) = (Log Mo)/1.5-10.7			Momento sísmico Mo = u*A*s			Deslizamiento s (cm)			Area A (cm <sup>2</sup> )
	(20%)	(50%)	(100%)	(20%)	(50%)	(100%)	(20%)	(50%)	(100%)	
1996	7.33	7.60	7.80	1.11E+27	2.78E+27	5.56E+27	8.10E+01	2.02E+02	4.05E+02	4.58E+13
1997	7.34	7.60	7.80	1.14E+27	2.84E+27	5.68E+27	8.27E+01	2.07E+02	4.14E+02	4.58E+13
1998	7.34	7.61	7.80	1.16E+27	2.90E+27	5.80E+27	8.45E+01	2.11E+02	4.22E+02	4.58E+13
1999	7.35	7.61	7.82	1.19E+27	2.96E+27	5.93E+27	8.62E+01	2.16E+02	4.31E+02	4.58E+13
2000	7.36	7.62	7.82	1.21E+27	3.02E+27	6.05E+27	8.80E+01	2.20E+02	4.40E+02	4.58E+13
2001	7.36	7.63	7.83	1.23E+27	3.08E+27	6.17E+27	8.98E+01	2.24E+02	4.49E+02	4.58E+13
2002	7.37	7.63	7.83	1.26E+27	3.14E+27	6.29E+27	9.15E+01	2.29E+02	4.58E+02	4.58E+13
2003	7.37	7.64	7.84	1.28E+27	3.20E+27	6.41E+27	9.33E+01	2.33E+02	4.66E+02	4.58E+13
2004	7.38	7.64	7.84	1.31E+27	3.26E+27	6.53E+27	9.50E+01	2.38E+02	4.75E+02	4.58E+13

AÑO	Magnitud de momento (Mw) = (Log Mo)/1.5-10.7			Momento sísmico Mo = u*A*s			Deslizamiento s (cm)			Area A (cm <sup>2</sup> )
	(20%)	(50%)	(100%)	(20%)	(50%)	(100%)	(20%)	(50%)	(100%)	
1996	7.55	7.81	8.01	2.33E+27	5.83E+27	1.17E+28	8.10E+01	2.02E+02	4.05E+02	9.60E+13
1997	7.55	7.82	8.02	2.38E+27	5.96E+27	1.19E+28	8.27E+01	2.07E+02	4.14E+02	9.60E+13
1998	7.56	7.82	8.02	2.43E+27	6.08E+27	1.22E+28	8.45E+01	2.11E+02	4.22E+02	9.60E+13
1999	7.56	7.83	8.03	2.48E+27	6.21E+27	1.24E+28	8.62E+01	2.16E+02	4.31E+02	9.60E+13
2000	7.57	7.83	8.04	2.53E+27	6.34E+27	1.27E+28	8.80E+01	2.20E+02	4.40E+02	9.60E+13
2001	7.57	7.84	8.04	2.59E+27	6.46E+27	1.29E+28	8.98E+01	2.24E+02	4.49E+02	9.60E+13
2002	7.58	7.85	8.05	2.64E+27	6.59E+27	1.32E+28	9.15E+01	2.29E+02	4.58E+02	9.60E+13
2003	7.59	7.85	8.05	2.69E+27	6.72E+27	1.34E+28	9.33E+01	2.33E+02	4.66E+02	9.60E+13
2004	7.59	7.86	8.06	2.74E+27	6.84E+27	1.37E+28	9.50E+01	2.38E+02	4.75E+02	9.60E+13

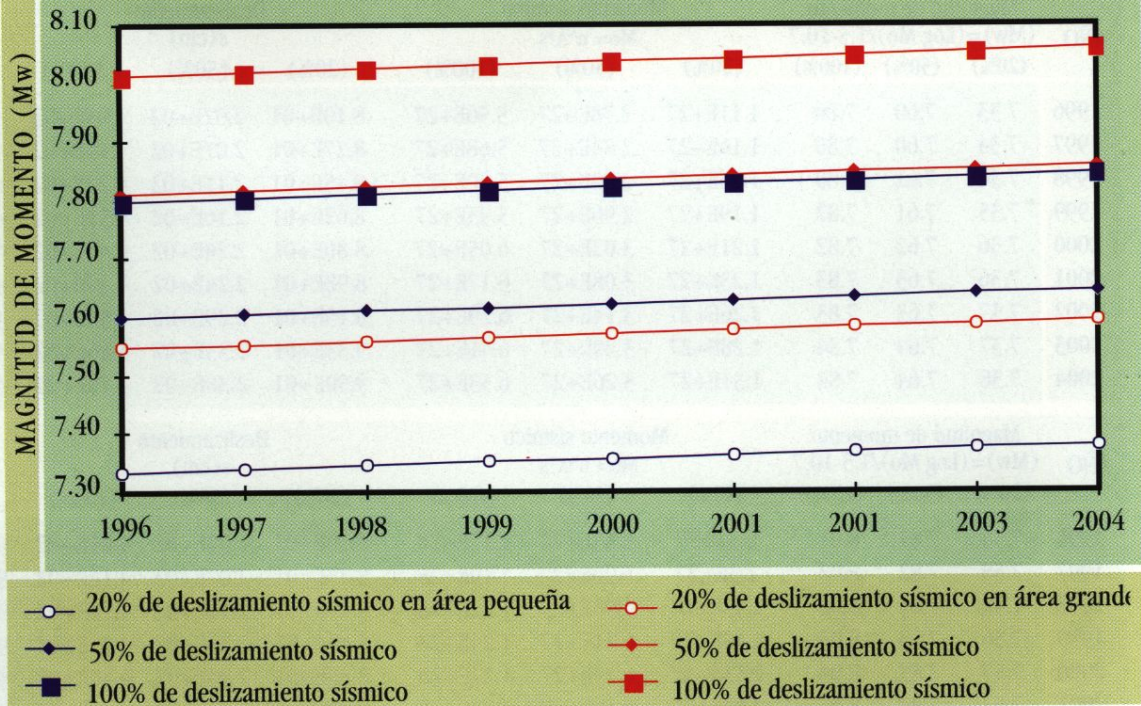
El hecho que, dependiendo del escenario, existe en el presente energía acumulada para producir un terremoto de gran magnitud y que la historia sísmica de Nicoya no incluye sismos de magnitud cercana a 8 grados, indica que este segmento de la zona de subducción no puede continuar acumulando energía por tiempo indefinido y que

el momento de la ruptura no está lejano. También, con base en el comportamiento histórico de este segmento, se considera que el límite conservador de la magnitud potencial es demasiado bajo (asume un acople muy débil y un área muy reducida) y que, por lo tanto, una magnitud (Mw) cercana a 7.7 grados resultaría físicamente más probable.





## Magnitud de momento ( $M_w$ ) versus año del próximo terremoto de Nicoya



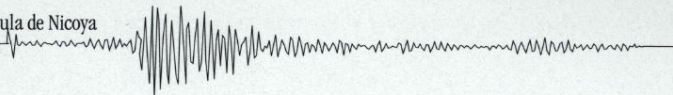
**Figura 15.** Estimaciones de la magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ) del próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya en función del año de ocurrencia. Las gráficas representan estimaciones para rupturas de las áreas mínima y máxima y para tres niveles diferentes de acoplamiento elástico.

### Evolución de la ruptura cosísmica

La energía acumulada por debajo de la Península de Nicoya podría ser liberada por medio de un solo evento o durante varios sismos separados en el

tiempo (y necesariamente en el espacio) por varios segundos o minutos. Esto está controlado por muchos factores tales como el porcentaje de acople elástico, la velocidad de ruptura, el módulo cortante de las rocas en la falla, el contenido de fluidos y la rugosidad de la





superficie de falla entre otros. Si, por ejemplo, existe potencial para un evento de magnitud  $M_w=7.7$ , esa misma energía podría ser liberada por dos sismos con  $M_w=7.5$ , o cuatro con  $M_w=7.3$ , u ocho con  $M_w=7.1$ , o doce con  $M_w=7.0$  y así sucesivamente. La zona de ruptura del sismo de Sámara separa a la brecha sísmica de Nicoya casi por la mitad, dándole a ésta una forma de herradura (Javier Pacheco, comunicación personal, 1994) que podría, al momento de la ruptura, comportarse como dos parches ásperos aislados con posibilidad de romper independientemente, separados por un intervalo de tiempo relativamente corto (menos de 30 segundos).

Dado que los sismogramas del terremoto de Nicoya de 1950 registrados a distancias telesísmicas muestran que la ruptura de dicho evento no fue simple y que involucró por lo menos dos eventos, los autores consideran que el futuro sismo no será simple en su mecanismo de ruptura. En el futuro cercano se tratará de estudiar esas formas de onda para conocer mejor la historia de ruptura y distribución espacio-temporal del deslizamiento cosísmico del terremoto de 1950. Esto permitirá tener una mejor idea de cuántos subeventos se podrían presentar en una futura ruptura. La complejidad de la ruptura del sismo de 1950, según los sismogramas

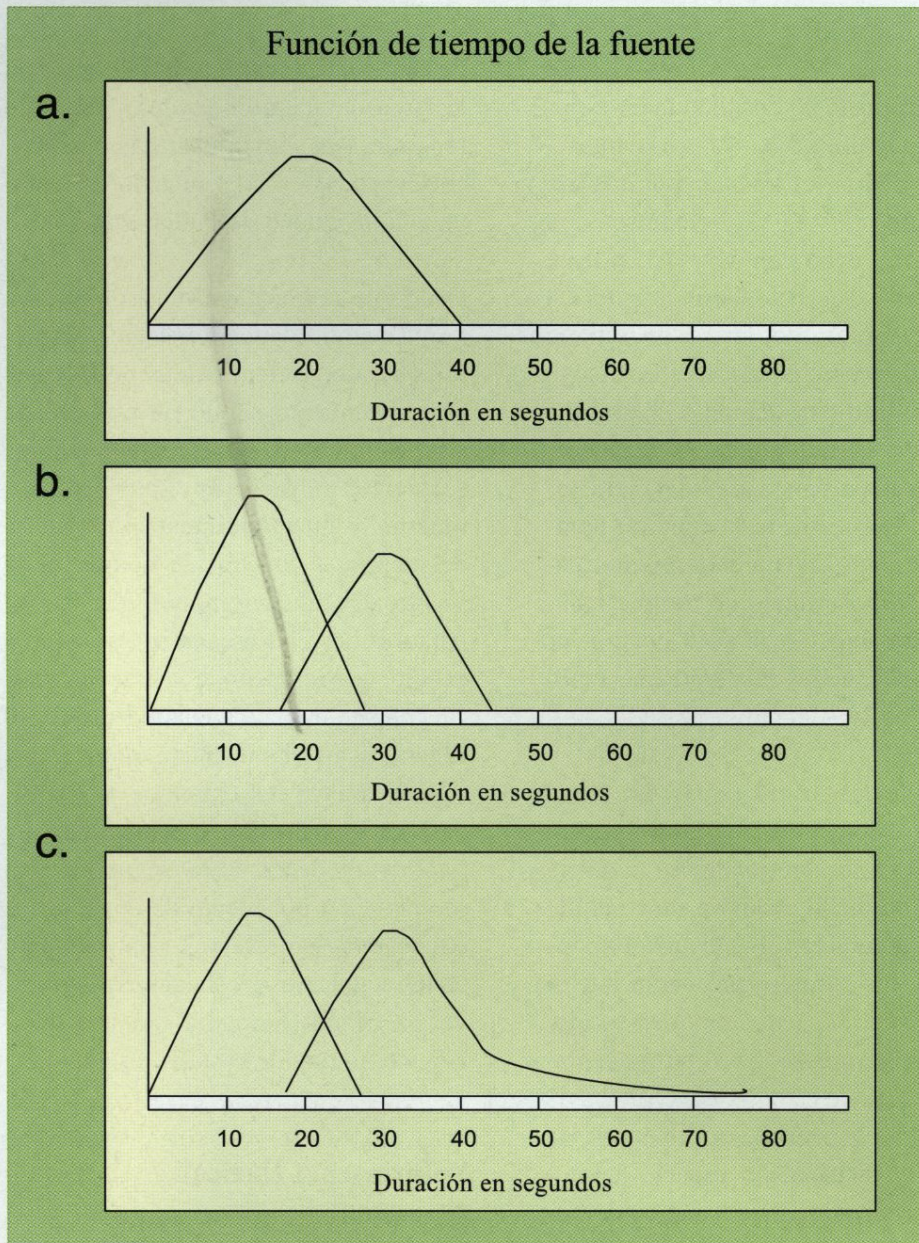
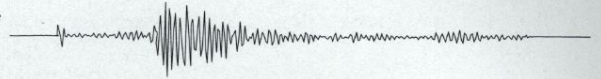
de estaciones lejanas, correlaciona con la larga duración del evento, según lo reportaron la mayoría de las personas entrevistadas en la Península de Nicoya y en la ciudad de Puntarenas.

Dado que la brecha sísmica de Nicoya limita a ambos lados con segmentos débiles de subducción, es muy posible que el deslizamiento súbito de esta brecha sísmica induzca deslizamiento en los segmentos adyacentes. La Figura 16 muestra esquemáticamente la historia de ruptura, o función de tiempo de la fuente, del futuro terremoto de Nicoya para tres posibles escenarios: a) un solo evento, que rompe toda la brecha sísmica, con una duración de alrededor de 40 segundos; b) dos eventos, que rompen separadamente los extremos NO y SE de la brecha sísmica, con una duración total de alrededor de 60 segundos y c) rompimiento por medio de dos eventos e inducción inmediata de deslizamiento en los segmentos de Nicaragua-Papagayo y Cóbano-Herradura con una duración de ruptura de hasta 100 segundos.

### **Deformación cortical y tsunami**

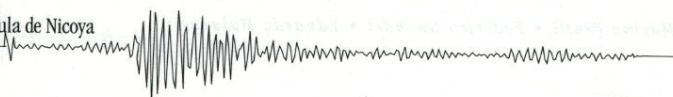
Los modelos viscoelásticos simples predicen, para sismos de subducción, un levantamiento cortical hacia la trinchera en la parte más superficial de la





**Figura 16.** Esquemas de la historia de ruptura, o función de tiempo de la fuente, de sismos fuertes de subducción bajo la Península de Nicoya, para 3 escenarios: a) ruptura simple en un solo evento; b) ruptura de dos asperezas y c) ruptura de esas mismas dos asperezas con inducción de deslizamiento lento de los segmentos aledaños.





falla y subsidencia o hundimiento sobre la parte más profunda. La Figura 17 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 grados) de la zona de acople (de 6 a 12 Km de profundidad, o sea, una ruptura que no se extendería hasta la trichera) y 60% de deslizamiento en la parte más profunda y más inclinada (29 grados) 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.

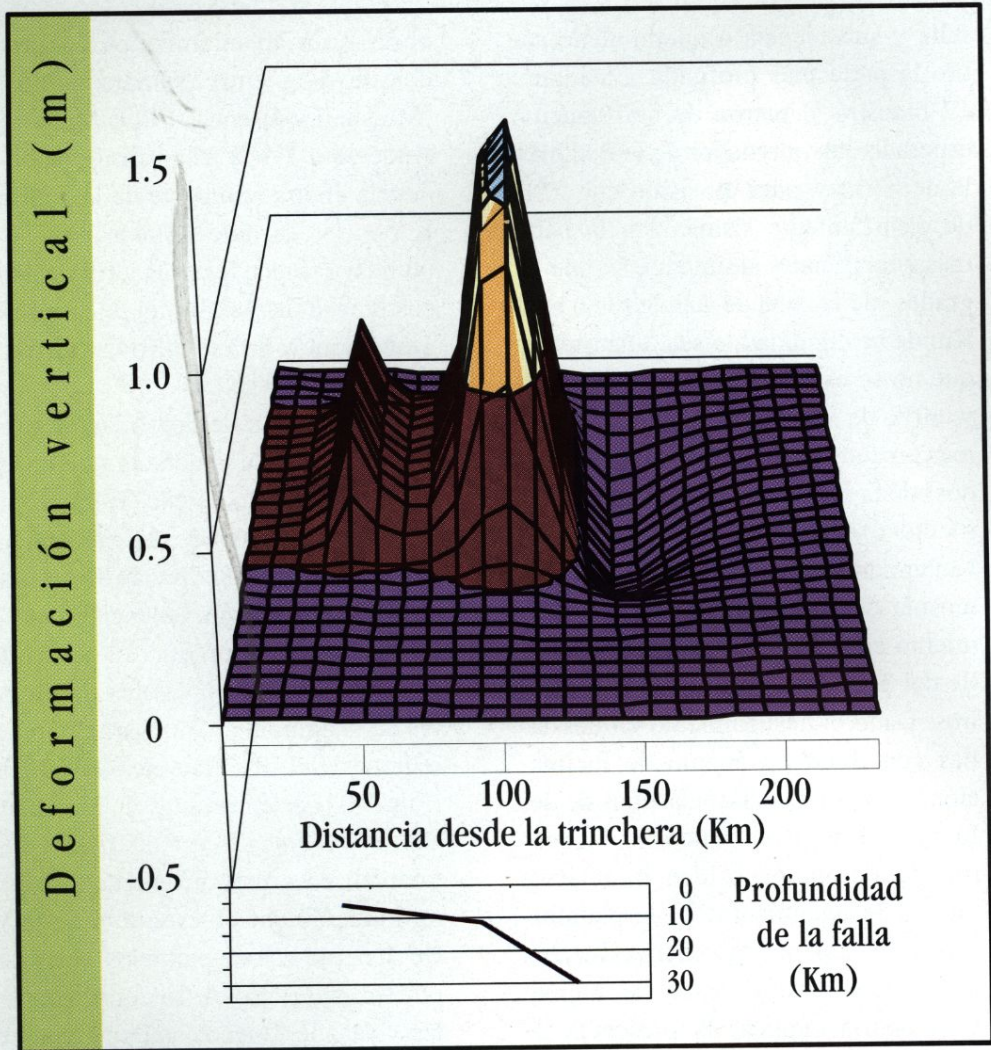
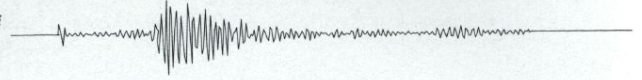
Los levantamientos en la costa oeste de la península podrían bloquear temporalmente el acceso a estuarios y marinas. Después del sismo de 1950 se

observaron levantamientos de alrededor de 1 m entre Sámara y Nosara (Marshall y Brenes, 1989; Marshall y Anderson, 1995). Asimismo, la subsidencia en la región este de la península podría, durante mareas muy altas inundar salinas, lagunas y tierras bajas costeras a lo largo del eje del Río Tempisque y en el Golfo de Nicoya.

Con este patrón de deformación existe potencial para la generación de un tsunami o maremoto. Ureña (1996), ha utilizado los parámetros de ruptura aquí expuestos, para estudiar las características del tsunami que potencialmente se podría generar. Con esto, él obtuvo los tiempos de arribo y valores preliminares de la altura de la ola para diferentes regiones del Pacífico de Costa Rica (Fig. 18). Las entrevistas de Marshall y Brenes (Marshall y Anderson 1995) también describen un pequeño tsunami inducido por el terremoto de 1950. De acuerdo a los resultados obtenidos por Ureña (1996) el tsunami llegaría a las costa de Quepos y Puntarenas en aproximadamente 40 minutos después de ocurrido el sismo y tendría una amplitud de poco más de 1 m.

Otra manifestación de deformación cortical que puede ocurrir, después del futuro sismo de Nicoya, es el desplazamiento horizontal de la Península de Nicoya hacia el SO, como un retorno,





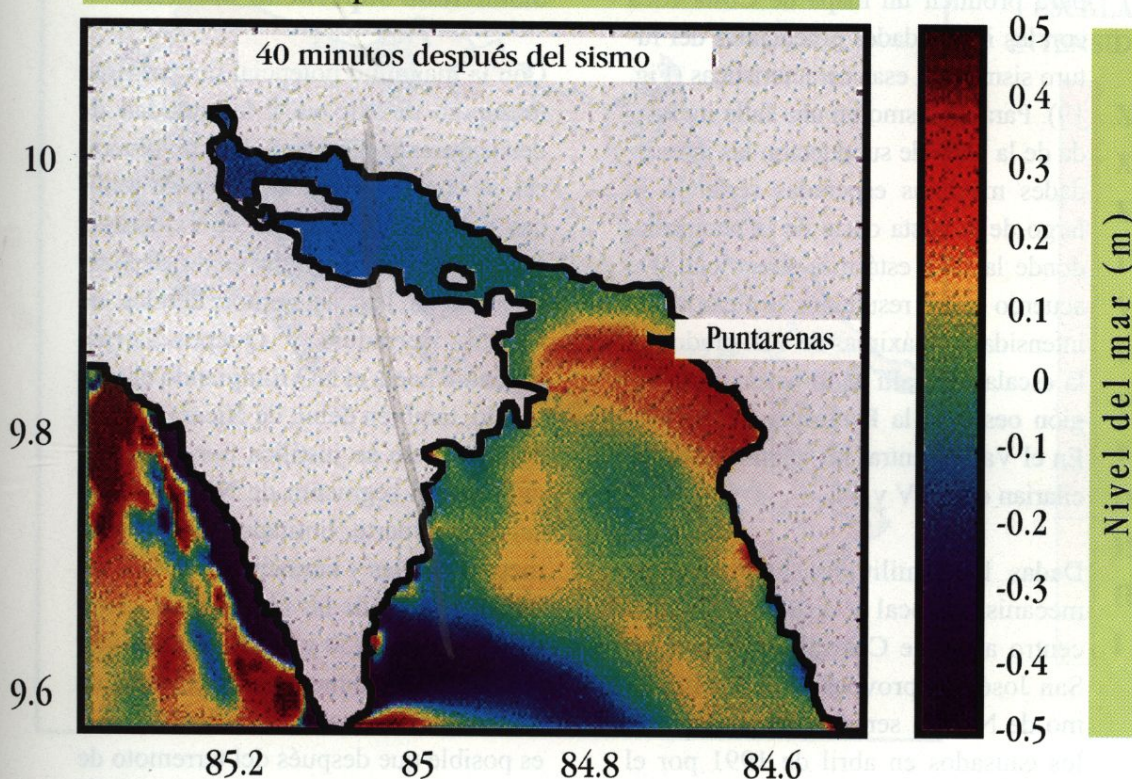
**Figura 17.**

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 grados) 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 grados) de la falla (de 12 a 40 Km de profundidad).





### Arribo de la primera onda a Puntarenas



**Figura 18..** Amplitud del tsunami que potencialmente podría generar el próximo terremoto en la brecha sísmica de Nicoya. Modificado a partir de Ureña, 1996.

una vez liberado el empuje que la está desplazando actualmente hacia el NE. Esta deformación no sería observable a simple vista y solo podría registrarse por medio de métodos geodésicos, de la misma forma que se está documentando el desplazamiento horizontal actual de la península hacia el NE.

### Intensidades sísmicas

Montero (1996), utilizando el programa de Evernden and Thomson (1988), para la simulación de intensidades sísmicas, combinó la geología en superficie con los parámetros de un sismo por debajo de la península de Nicoya,





para producir un mapa de Costa Rica con las intensidades potenciales del futuro sismo con esas características (Fig. 19). Para un sismo en una falla inclinada de la zona de subducción las intensidades máximas esperadas serían a lo largo de la costa oeste de la península, donde la falla está más superficial. De acuerdo a esos resultados se alcanzarían intensidades máximas de VIII grados en la escala Mercalli Modificada en la región oeste de la Península de Nicoya. En el Valle Central las intensidades oscilarían entre IV y VI.

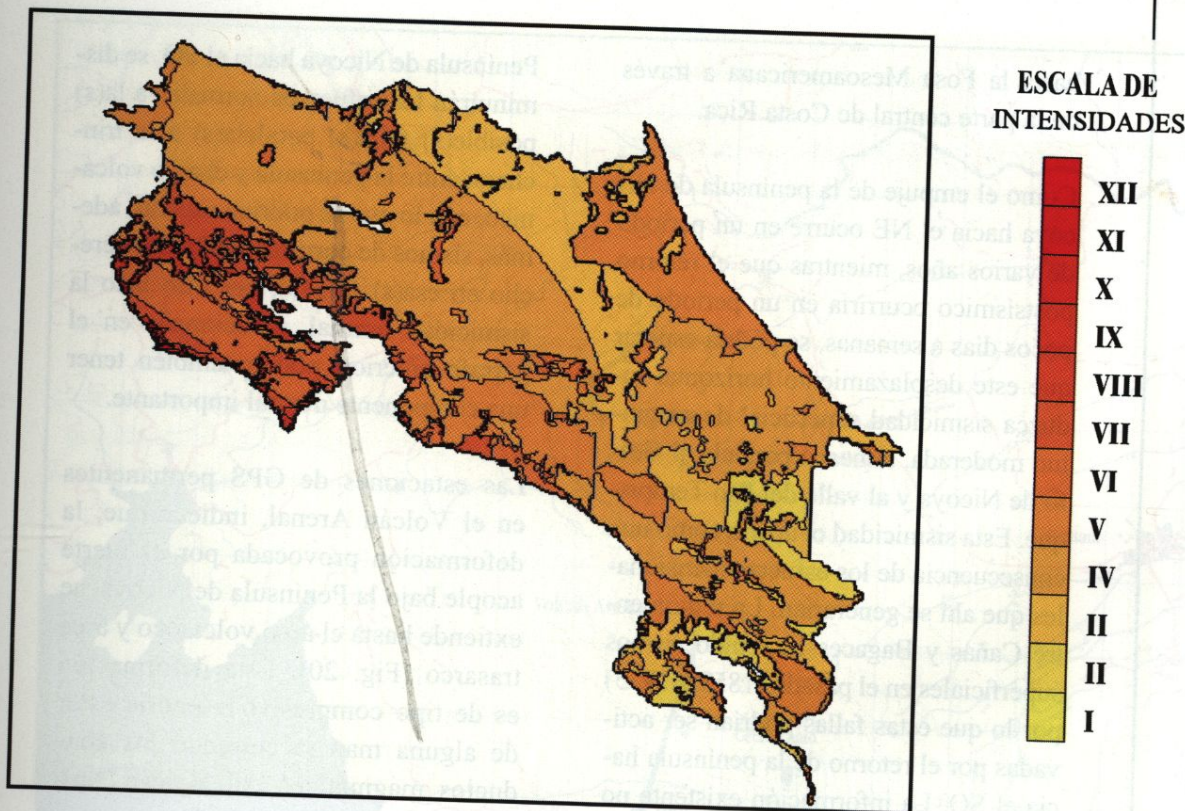
Dadas las similitudes en magnitud, mecanismo focal y distancia del epicentro al Valle Central, los daños en San José que provocaría el futuro sismo de Nicoya serían muy similares a los causados en abril de 1991 por el terremoto en el Valle de la Estrella, Limón. Sin embargo, como el nivel de daños en estructuras civiles es acumulativo, los daños podrían ser mayores en aquellas estructuras que presentaron problemas anteriores. En el Valle Central, los efectos de este sismo serían los de un evento de foco lejano: ondas sísmicas de baja frecuencia (período largo) que producirían un efecto de resonancia en edificios altos (Sauter, 1991 y 1992).

### Sismicidad superficial inducida

Con la magnitud potencial del próximo terremoto de Nicoya y la cantidad de deslizamiento tectónico que involucraría, se considera que la región de réplicas del evento principal se extendería tanto hacia el SE, induciendo deslizamientos en los segmentos débiles de Cóbano-Herradura y Quepos-Sierpe, así como hacia el NO rompiendo el segmento, también débil, de Nicaragua-Papagayo. Esto se justifica por la condición que el segmento de Nicoya es un segmento fuerte, limitado por dos segmentos débiles y también porque las relocalizaciones de las réplicas del sismo de Nicoya de 1950 y de Golfito de 1983 (Güendel, 1986) muestran precisamente ese comportamiento. Esto significa que es posible que después del terremoto de Nicoya ocurran sismos de magnitud cercana a 6 grados en el Golfo de Papagayo y el Pacífico Central. Sismos de esta magnitud en dichas regiones y sobre el plano de subducción, no causarían daños asociados, aunque es de esperar que puedan inducir gran preocupación en los habitantes del Valle Central y el Pacífico Central.

La existencia de la red sismográfica del OVSICORI-UNA permitió registrar cambios importantes en el régimen de esfuerzos de la placa sobreyacente justo después del sismo de marzo de 1990 a la



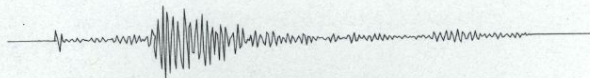


**Figura 19.** Simulación de intensidades sísmicas esperadas para un sismo por debajo de la Península de Nicoya. Para detalles sobre los parámetros utilizados en este modelaje, ver Montero, 1996.

entrada del Golfo de Nicoya (Protti *et al.*, 1995b) y del sismo de abril de 1991 en el Valle de la Estrella (Montero *et al.*, 1991; Protti & Schwartz, 1994). Estos cambios en el régimen de esfuerzos provocaron la activación de varios enjambres sísmicos en el Valle Central. Por esto, un sismo de la magnitud esperada del próximo terremoto de Nicoya puede producir también cambios en el régimen de esfuerzos y la inducción de actividad

sísmica somera por medio de enjambres sísmicos, con eventos de magnitud inferior a 6 grados. Estos enjambres podrían presentarse a lo largo de diferentes partes del país, muy especialmente en aquellos lugares donde ya existen sistemas de fallas que asimilan desplazamiento de placas, tal como el caso de la zona difusa de fallamiento de corrimiento lateral izquierdo que corre desde Limón





hasta la Fosa Mesoamericana a través de la parte central de Costa Rica.

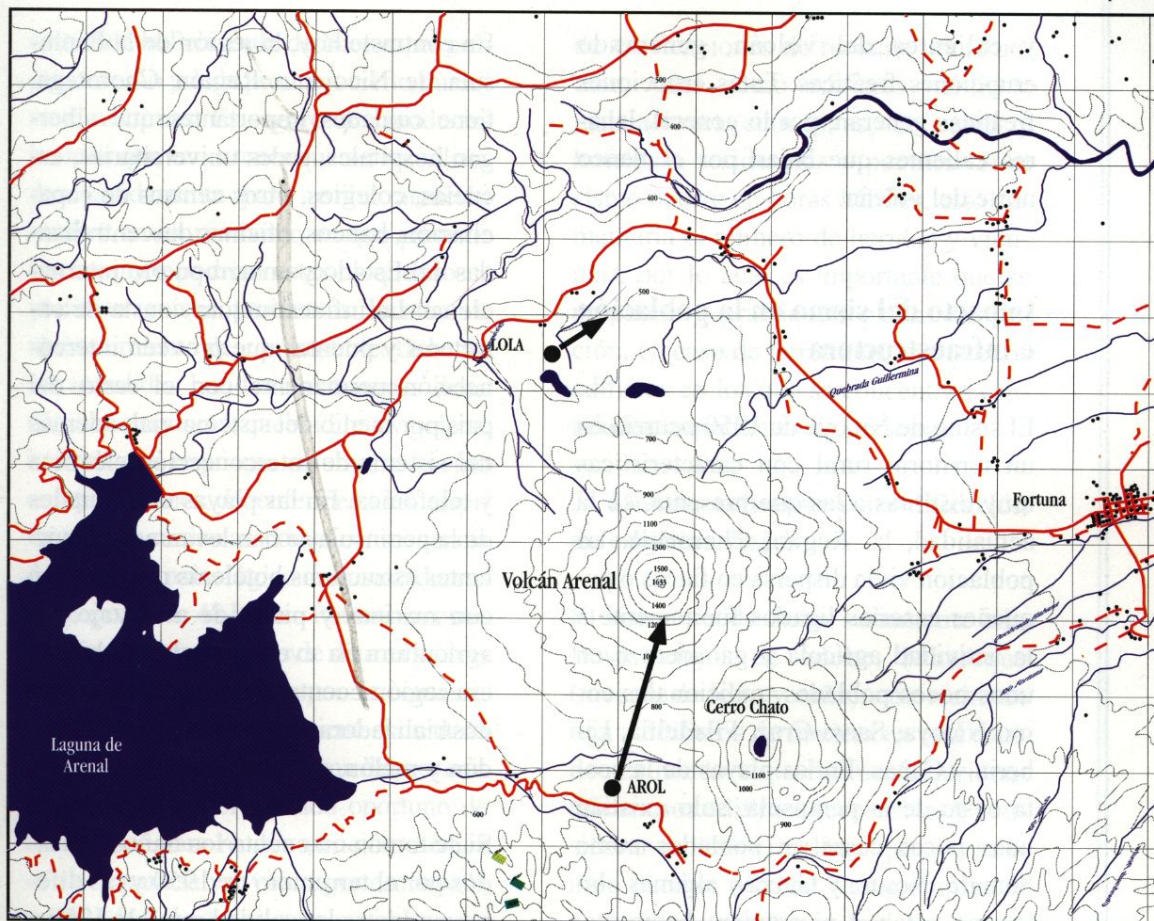
Como el empuje de la península de Nicoya hacia el NE ocurre en un período de varios años, mientras que el retorno postsísmico ocurriría en un período de pocos días a semanas, se podría esperar que este desplazamiento horizontal induzca sismicidad superficial de magnitud moderada, alineada paralela al Golfo de Nicoya y al valle del Río Tempisque. Esta sismicidad ocurriría como una consecuencia de los esfuerzos tensionales que ahí se generarían. La región entre Cañas y Bagaces ha tenido sismos superficiales en el pasado (1853 y 1935) por lo que estas fallas podrían ser activadas por el retorno de la península hacia el SO. La información existente no es suficiente para poder discernir si esto ocurrió también después del terremoto de Nicoya de 1950, quizás porque todo sismo sentido después, habría sido asociado o considerado réplica del evento principal.

El análisis de las deformaciones recientes, observadas por medio de GPS, indican una componente de desplazamiento hacia el NO de la Península de Nicoya con respecto al resto de la placa del Caribe, paralelo a la fosa Mesoamericana (Lundgren *et al.* 1999). Después que ocurra el futuro sismo de Nicoya y el consecuente desplazamiento de la

Península de Nicoya hacia el SO, se disminuirán los esfuerzos normales a la(s) posible(s) falla(s) paralela(s) a la trinchera, entre la península y el arco volcánico, con lo que se podrían esperar, además, sismos de corrimiento lateral derecho en esa(s) falla(s); por otro lado la sismicidad normal, mencionada en el párrafo anterior, podría también tener una componente dextral importante.

Las estaciones de GPS permanentes en el Volcán Arenal, indican que, la deformación provocada por el fuerte acople bajo la Península de Nicoya, se extiende hasta el arco volcánico y área trasarco (Fig. 20). Esta deformación es de tipo compresivo y podría estar de alguna manera cerrando los conductos magmáticos del Volcán Arenal. Una vez ocurrido el futuro terremoto de Nicoya, esa compresión sería eliminada y aún cambiada a distensión, por lo que si el enfriamiento del magma no ha sellado permanentemente los conductos, podría ocurrir un aumento en la actividad efusiva del volcán, con respecto a los meses anteriores al sismo. Este escenario se podría presentar también en el Volcán Rincón de la Vieja, el más activo de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, después del Arenal. En el Volcán Rincón de la Vieja la extensión en el macizo podría causar una mayor infiltración de aguas a niveles más profundos





**Figura 20.** Vectores de deformación horizontal observada en las estaciones permanentes de GPS en el Volcán Arenal una vez sustraído el desplazamiento regional de la placa del Caribe (Edmundo Norabuena, comunicación escrita, 2000). Estos vectores (AROL:  $11.02 \pm 3.17$  mm/año hacia el  $N16.0^\circ E$ ; LOLA:  $3.52 \pm 5.49$  mm/año hacia el  $N57.3^\circ E$ ) indicando que los esfuerzos compresivos en la zona de acople bajo la Península de Nicoya se extienden hasta el arco volcánico.





y calientes del volcán, generando erupciones freáticas. Estas erupciones freáticas generan, por lo general, lahares calientes que bajan por el flanco norte del volcán.

### **Impacto del sismo en la población e infraestructura**

El sismo de Nicoya de 1950 ocurrió en un territorio rural con características muy distintas a las que presenta, en la actualidad, la Región Chorotega. La población vivía dispersa en fincas o pequeños caseríos ligados fuertemente a la actividad agrícola y ganadera o en unos pocos poblados tradicionales como Nicoya, Santa Cruz, Filadelfia, Liberia y Cañas. En las playas de la costa oeste de la península, solo existían unas pocas casas en poblados como Sámara, Nosara y Garza y algunas playas no estaban ni siquiera habitadas. La red de caminos era virtualmente inexistente durante la estación lluviosa y el medio de transporte más importante para trasladarse a la península era el servicio de cabotaje, seguido por el caballo y la carreta, que se utilizaban para trasladarse dentro de la península, a partir de los embarcaderos ubicados en la costa del Golfo de Nicoya o en la parte baja del Río Tempisque.

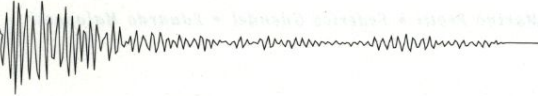
En contraste hoy, la región de la Península de Nicoya o Región Chorotega, tiene ciudades importantes que albergan hospitales, sedes universitarias, escuelas, colegios, otros centros de capacitación, bancos, oficinas descentralizadas del Estado y un aeropuerto internacional. La infraestructura consta de carreteras y puentes que proveen interconexión permanente con el resto del país por medio del sistema vial, además del sistema de interconexión eléctrica y telefónica. En las playas occidentales de la península se han levantado importantes estructuras hoteleras que cuentan con marinas y pistas de aterrizaje. La agricultura ha evolucionado también y esa región cuenta ahora con plantas industrializadoras de azúcar, arroz algodón y melón, entre otras.

Si se toman en cuenta los daños causados por el terremoto de 1950 y las diferencias entre la realidad rural de 1950 y la actual infraestructura en la Región Chorotega, se puede construir un escenario prospectivo para el próximo terremoto bajo la Península de Nicoya, considerando 8 aspectos descritos a continuación:

#### **1- Consecuencias en la población**

Aunque el sismo de 1950 no causó víctimas mortales, es posible que por la complejidad de la infraestructura





actual de la Península de Nicoya, el próximo sismo pueda producir cierto número de víctimas. Es seguro que producirá heridos que van a tener que ser movilizados rápidamente para recibir atención médica en un momento en que parte de los caminos podrían estar bloqueados y pudieran existir problemas locales de abastecimiento de combustible. Deberán ser atendidos heridos por traumas debidos a quemaduras, quebraduras y golpes, heridas que requieran suturas, así como complicaciones de enfermedades respiratorias o cardíacas como consecuencia del impacto psicológico del sismo durante las primeras 48 horas. Posteriormente, podrían aparecer brotes de diarrea y otras enfermedades causadas por la contaminación del agua, si no se tiene el cuidado de clorar el agua como forma de prevenir enfermedades. El traslado oportuno de los heridos para recibir atención médica es clave para salvar vidas; por eso ante la posibilidad de tener caminos bloqueados, puede resultar conveniente considerar formas de transporte alternativo para evacuar heridos como helicópteros o lanchas rápidas.

## **2- Consecuencias en edificios nuevos**

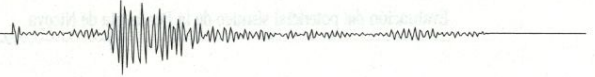
La gran intensidad de la sacudida cerca de la zona epicentral y una mala respuesta del suelo podrían, además, causar daños y colapso parcial

de edificaciones de reciente construcción, tales como edificios públicos, instalaciones educativas, de salud y hoteleras, residencias y puentes. Si el sismo ocurre en horas hábiles, esto aumentaría el número de heridos y víctimas, por lo cual es importante que se preparen y practiquen planes de acción, en caso de terremoto, en aquellos edificios en los que se concentren cantidades importantes de personas.

## **3- Daños, refuerzo y modificación de edificios viejos**

El sismo puede dañar seriamente edificios viejos de adobe, bahareque (mezcla de lodo y caña), con techo de teja o edificios de madera en mal estado. Es por lo tanto fundamental identificar esos edificios (censarlos) y considerar reducir el peligro que los mismos puedan ofrecer. Por ejemplo, se pueden contruir "pies de amigo" permanentes en las paredes de edificios viejos para prevenir el colapso de paredes o sustituir la teja por hierro galvanizado antes de la ocurrencia del evento. Posteriormente a la ocurrencia del sismo y su secuencia de réplicas se podrían eliminar los pies de amigo o reponer las tejas a los tejados. Los ranchos típicos de la zona, con piezas de madera cilíndricas, tienden a rotar y colapsar como sucedió en 1950. Es importante que los usuarios





de este tipo de ranchos conozcan sobre esta posibilidad para que eviten buscar refugio dentro de los mismos durante el terremoto y sus réplicas.

#### **4-Modificación del entorno habitacional**

Las ramas de árboles grandes que se encuentren cerca de los edificios son fuente potencial de accidentes ya que pueden pegar contra el suelo, contra otro árbol o contra una casa durante el sismo y quebrarse. Por lo tanto, como medida de precaución, es importante proceder a la poda de esas ramas. Los habitantes de la Región Chorotega deben además aprender a construir sus fogones de barro de tal forma que sean más resistentes a las sacudidas sísmicas. Conviene ponerles tirantes o reglas entre sus patas y bajar un poco la altura de los mismos.

#### **5- Agua potable**

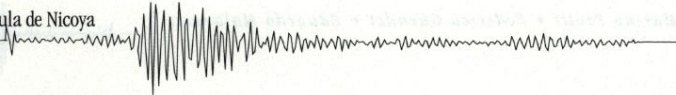
El agua de consumo humano debería ser clorada en cada casa inmediatamente después del sismo, con el fin de reducir las posibilidades de aparición de diarreas causadas por la contaminación. Muchos lugares de la región quedarían sin agua potable como consecuencia de derrumbes o cabezas de agua. Los habitantes de las zonas costeras o del valle

inferior del Tempisque, en donde el nivel de las aguas subterráneas es muy elevado (y se elevaría aún más con el sismo), deben aprender a descontaminar sus pozos con cloro, de tal manera que si el nivel del agua sube y el agua tiende a salirse de los brocales, puedan descontaminarlos.

#### **6- Maremoto**

En las zonas costeras del oeste de la península y especialmente en la salida de esteros, los pobladores deberán saber que durante la primera hora después de ocurrido un sismo de gran magnitud, deben permanecer en alerta y evitar cruzar esteros por la posibilidad que un tsunami o desórdenes de marea generados por el sismo, puedan anegarlos. Es recomendable que los pobladores conozcan acerca de la posibilidad de tsunamis o maremotos, los puedan identificar y estén vigilantes a los cambios que se presenten inmediatamente después del terremoto. Los sitios más vulnerables son la entrada de los esteros, desembocaduras de los ríos y playas con pendientes muy bajas. Los sitios más seguros son las costas rocosas elevadas a más de 4 m por encima del nivel de marea alta.





## 7- Caminos

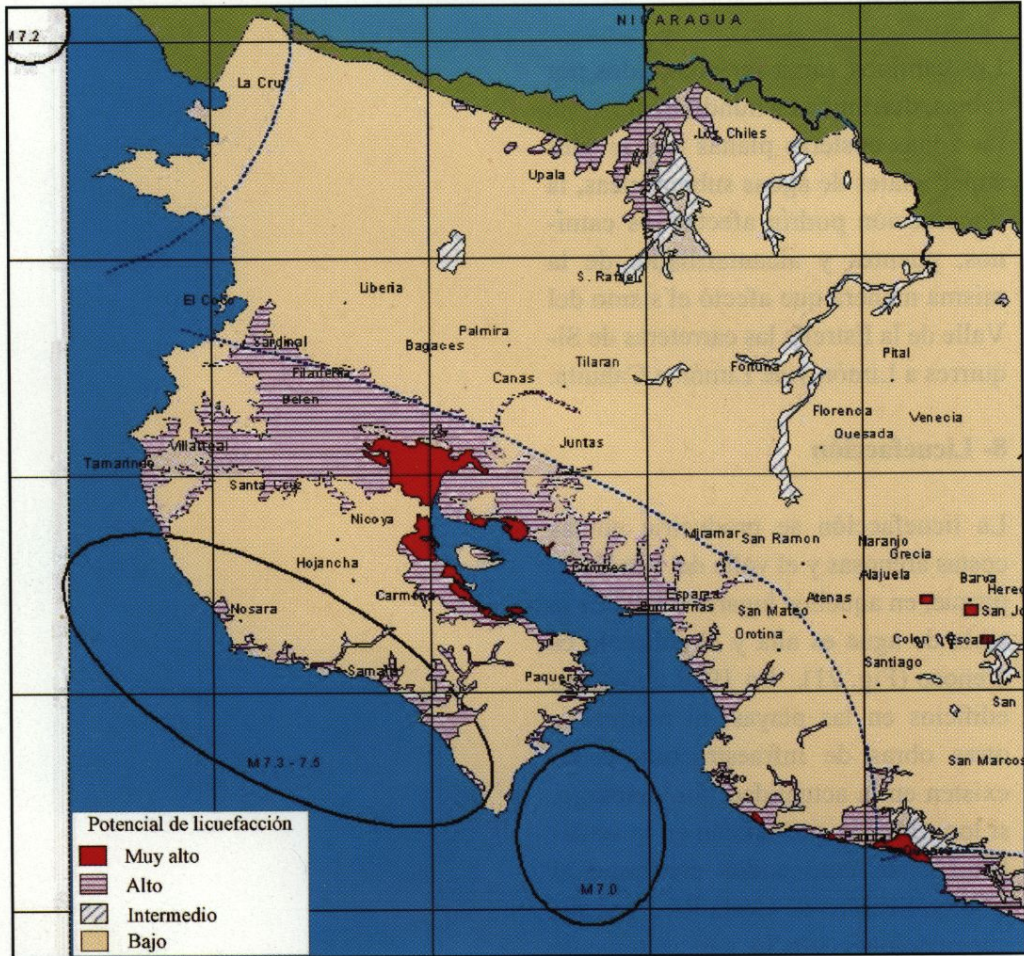
Los caminos van a ser obstruidos por ramas, derrumbes y hundimientos. En las zonas costeras planas con niveles superficiales de aguas subterráneas, la licuefacción podría afectar los caminos, puentes y alcantarillado, de la misma manera que afectó el sismo del Valle de la Estrella las carreteras de Siquirres a Limón y de Limón a Cahuita.

## 8- Licuefacción

La licuefacción se produciría en las costas arenosas y el valle del Río Tempisque, en aquellos lugares en donde la tabla de agua es alta y el subsuelo es arenoso (Fig. 21). En 1950 no habían edificios en las playas, ni marinas u otras obras de infraestructura como existen en la actualidad. Sin embargo, si los edificios que existen en la actualidad están contruidos conforme al Código Sísmico de Costa Rica y si sus cimentaciones son lo suficientemente profundas, posiblemente no colapsen. Si el sismo ocurre durante la época de lluvia, la licuefacción podría ser más intensa y podría, aún en edificios bien contruidos, causar daños de consideración en elementos estructurales y no estructurales, dependiendo del tipo de construcción, tales como fracturación de columnas, vigas y rompimiento de paredes.







**Figura 21.** Potencial de licuefacción en la Península de Nicoya y sus alrededores. Tomado del cuadrante noroeste del Mapa de Susceptibilidad de Licuefacción de Malavassi y Salgado (1995).



## CAPÍTULO V

# LO QUE SE HA HECHO Y AÚN QUEDA POR HACER

### **Redes de control geodinámico existentes en la Península de Nicoya y alrededores**

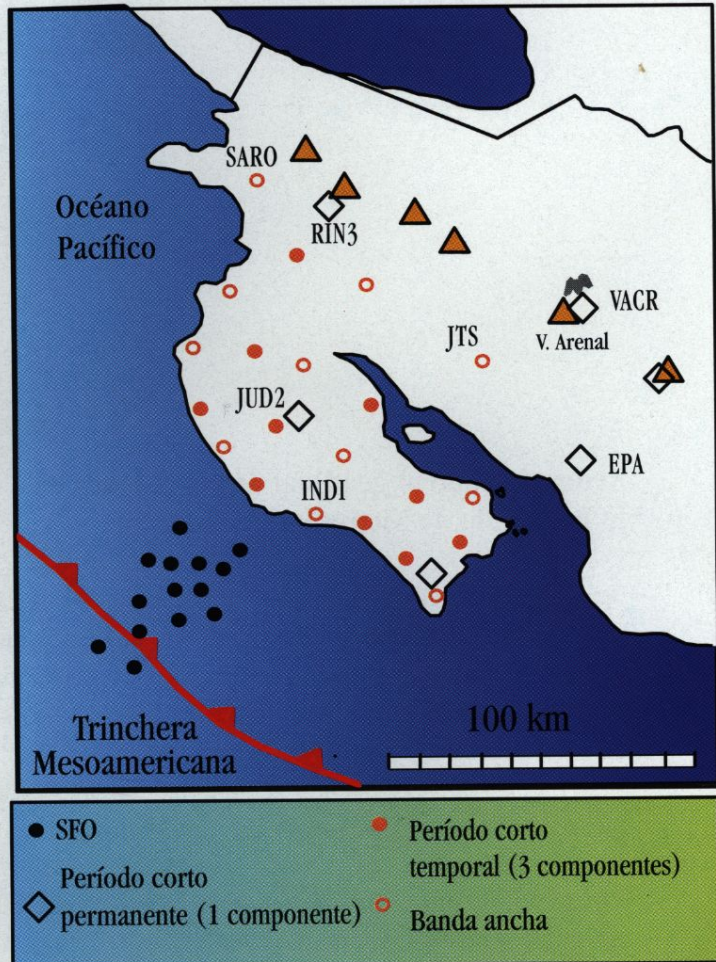
Para el monitoreo tectónico de la Península de Nicoya y sus alrededores, el OVSICORI-UNA opera, conjuntamente con otras instituciones, redes de control geodinámico: sísmicas, geodésicas y de gas radón. Por carencia de instrumentación y presupuesto de operación, muchas de estas redes no tienen el número y distribución óptima de estaciones.

La red sísmica permanente en los alrededores de la Península de Nicoya consiste de 5 estaciones de período corto y componente vertical, de la red sísmica telemétrica de cobertura nacional del OVSICORI-UNA. Estas estaciones están ubicadas en Cóbano (CAO), Nicoya (JUD2), Volcán Rincón de la Vieja (RIN3), Volcán Arenal (VACR) y Esparza (EPA) (Fig. 22). Esta red fue financiada por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (US-AID) a través de un proyecto de la Dra. Karen McNally de la Universidad de California en Santa Cruz (UCSC). En la actualidad dicha red recibe también el apoyo de la Agencia Sueca para el Desarrollo Internacional (ASDI) y de NORAD a través de la Universidad de Bergen. Además de estas estaciones de período corto, el OVSICORI-UNA opera tres estaciones de banda ancha y tres componentes: una en Las Juntas de Abangares (JTS) de la red mundial IRIS/IDA, operada en conjunto con la Universidad de California en San Diego (UCSD); otra en Carrillo de Hojanca (INDI) y la última en el Parque Nacional de Santa Rosa (SARO). Estas dos últimas pertenecen y se



operan en conjunto con la Dra. Susan Schwartz de UCSC y son parte ahora de la red sísmica digital de Nicoya que se describe en el Apéndice II. El OVSICORI-UNA cuenta además con dos acelerógrafos digitales que pronto serán instalados en la Península de Nicoya. Se está además tramitando presupuesto en la Universidad Nacional para la compra de 5 estaciones portátiles para registro de enjambres sísmicos y réplicas de eventos de gran magnitud.

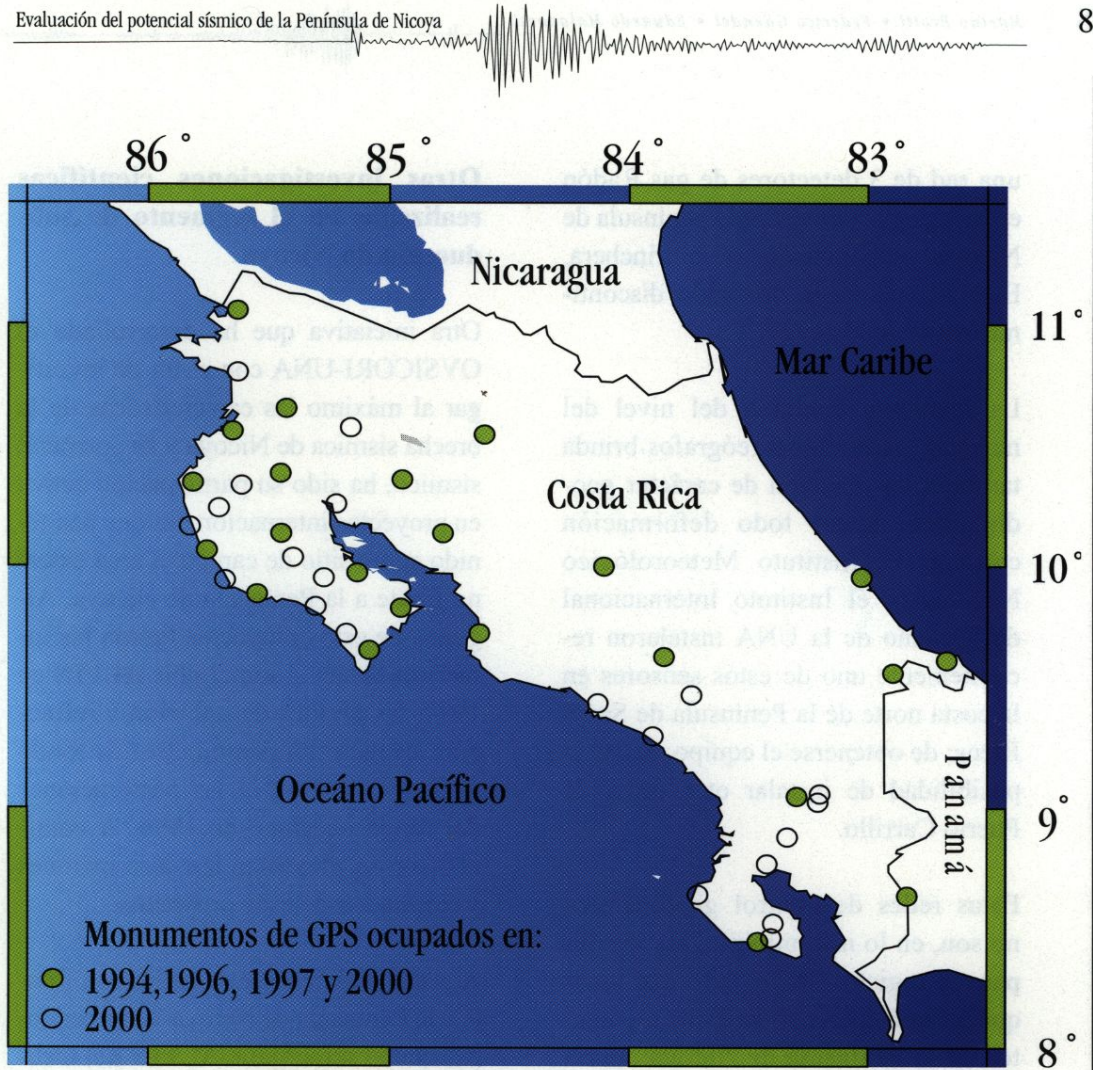
Junto con el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Agencia Nacional de Aeronáutica Espacial de los Estados Unidos (JPL-NASA), el OVSICORI-UNA ha participado en la ocupación de monumentos geodésicos de una red de GPS en y alrededor de la Península de Nicoya (Fig. 23). Dicha red, que fue diseñada por el OVSICORI-UNA específicamente para el seguimiento de la brecha sísmica de Nicoya, ha sido



**Figura 22.** Estaciones sísmológicas en el noroeste de Costa Rica. SFO: sismómetro de fondo oceánico.

ocupada en 1994, 1996, 1997 y más recientemente en febrero del año 2000. En la costa oeste de la península, entre Puerto Carrillo y Sámara, el





**Figura 23.** Distribución de los monumentos geodésicos de la red de GPS para estudios de deformación cortical en Costa Rica. Círculos rellenos marcan los sitios ocupados en los años 1994, 1996, 1997 y 2000; los círculos sin relleno indican sitios ocupados únicamente en el año 2000.

OVSICORI-UNA y el JPL-NASA operan además un receptor permanente de GPS en el mismo lugar donde opera la estación sísmológica INDI de banda ancha.

El Laboratorio de Física Nuclear, de la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica y el OVSICORI-UNA, con la ayuda del Dr. Michel Monnin de Francia, mantienen en operación





una red de 3 detectores de gas Radón en un arreglo a través de la península de Nicoya, perpendicular a la trinchera. Este arreglo viene operando discontinuamente desde 1997.

La medición continua del nivel del mar por medio de mareógrafos brinda también información de carácter geodinámico, sobre todo deformación cortical. El Instituto Meteorológico Nacional y el Instituto Internacional del Océano de la UNA instalaron recientemente uno de estos sensores en la costa norte de la Península de Santa Elena; de obtenerse el equipo, existe la posibilidad de instalar otro cerca de Puerto Carrillo.

Estas redes de control geodinámico no son, en lo más mínimo, las ideales para el registro de las deformaciones que están ocurriendo en estos momentos en la Península de Nicoya: se requiere una densificación de las mismas y la instalación de otros tipos de redes que permitan documentar un espectro más amplio de las señales tectónicas. En los siguientes párrafos se sugieren algunas recomendaciones al respecto y en el Apéndice II se describe la instrumentación temporal que se ha instalado como parte del proyecto SEIZE.

### **Otras investigaciones científicas realizadas en el segmento de subducción de Nicoya**

Otra iniciativa que ha desarrollado el OVSICORI-UNA con el fin de investigar al máximo las características de la brecha sísmica de Nicoya y su potencial sísmico, ha sido su participación activa en proyectos internacionales que han tenido como sitio de campo el arco externo frente a la Península de Nicoya. Algunos de estos proyectos fueron las inmersiones con el sumergible ALVIN en 1994, los perfiles de reflexión y refracción sísmica con sismómetros de fondo oceánico en 1995 y las perforaciones del fondo oceánico en 1996. A continuación se presentan las descripciones y resultados de esos proyectos.

A principios de 1996 se realizaron frente a la Península de Nicoya 20 inmersiones con el sumergible ALVIN del Instituto Oceanográfico de Woods Hole. Este fue un proyecto del Dr. Eli Silver de la UCSC y tuvo como objetivo principal localizar, describir y tomar muestras de sitios ubicados en la zona de colisión entre las placas del Coco y del Caribe, donde afloran fluidos de subducción. Debido a la química particular de esos fluidos, en los lugares donde afloran se establecen comunidades biológicas aisladas. La base de la cadena alimenticia de estas comunidades son organismos





que se nutren de los componentes químicos aportados por los fluidos de subducción. A pesar de que fue posible hallar varias de esas comunidades, su concentración no fue la esperada dadas las características de esta zona de subducción (Silver *et al.*, 1994; Kahn *et al.*, 1994; Kahn *et al.*, 1996). Una posible interpretación de esta relativa escasez de comunidades biológicas (o escasez de afloramiento de fluidos de subducción) sería que la circulación y emanación de los fluidos que salen de la zona de subducción esté controlada por el ciclo sísmico. Con base en este modelo, al final del ciclo sísmico y antes del rompimiento, las condiciones de compresión en el arco externo, debido a la transmisión de esfuerzos desde la parte acoplada de la interfase, producen la extrangulación y cierre de los conductos (superficies de falla en el arco externo). Durante y después del rompimiento (deslizamiento de la zona acoplada) el régimen de esfuerzos se invertiría facilitando la expulsión de fluidos de subducción y la colonización de esos afloramientos. Se conoce tan poco de esos organismos que no se puede asegurar si es posible desarrollar una de esas comunidades biológicas en tan solo el tiempo transcurrido durante un ciclo sísmico.

Durante el mismo crucero en el que se hicieron las inmersiones del Alvin, se realizaron sondeos de flujo de calor desde el barco geofísico R/V Atlantis II. Los resultados obtenidos durante estos sondeos indican que, frente a la Península de Nicoya, hay un segmento de subducción anormalmente frío (quizás una de las zonas de subducción más frías del mundo) (Langseth y Silver 1994; Langseth y Silver, 1996). Los valores de flujo de calor son tan bajos que ha sido necesario recurrir a un modelo de refrigeración interna de la placa oceánica, con el fin de poder aislar el calor que debería estar siendo transmitido por una placa oceánica de la edad de la placa del Coco en esta región. Esto es sin duda otra condición más que hace del segmento de subducción de Nicoya un sitio tan especial desde un punto de vista científico.

A principios de 1995 se realizó otro crucero geofísico frente a la Península de Nicoya y en el Pacífico Central. Las investigaciones se realizaron a bordo del R/V Maurice Ewing y se trató de un proyecto conjunto entre instituciones alemanas y la Universidad de Texas en Austin. Este crucero, en el que también tuvo la oportunidad de participar un investigador del OVSICORI-UNA, consistió de tres segmentos. Durante el primero se realizó un perfil de refracción con 20 sismómetros de fondo oceánico





(SFO) distribuidos desde la trinchera hasta cerca de Marbella, frente a la Península de Nicoya. En el segundo segmento se instaló una red de 33 SFO sobre la zona de ruptura del terremoto de 1990 a la entrada del Golfo de Nicoya, con el fin de corroborar la presencia del monte submarino que, de acuerdo a Protti *et al.*, (1995), su ruptura generó dicho evento. Lamentablemente lo cerrado de la red no permitió obtener una estructura concluyente. En el último segmento de ese crucero se realizó otro perfil de refracción de 26 SFO distribuidos desde la trinchera hasta frente a Playa Dominical. El objetivo del primer y último experimento fue conocer la estructura de velocidades sísmicas del arco externo, con el fin de hacer interpretaciones sobre su origen y para poder contar con modelos tridimensionales de velocidades sísmicas que permitan una mejor ubicación de los sismos que ocurren entre la Trinchera Mesoamericana y la costa costarricense.

Entre octubre y diciembre de 1996 estuvo en el Pacífico de Costa Rica, el barco de perforación del fondo oceánico R/V Joides Resolution. Este barco pertenece al consorcio JOI de instituciones oceanográficas y es subcontratado por el programa mundial de perforación del fondo oceánico ODP. En esa oportunidad, personal del OVSICORI-UNA también formó parte del equipo científi-

co a bordo. En el segmento 170 del R/V Joides Resolution frente a la Península de Nicoya se efectuaron 5 perforaciones: una directamente en la placa del Coco muy cerca de la trinchera; 2 en el frente de colisión, también muy cerca de la trinchera y que atravesaron tanto la placa del Caribe como la placa del Coco y otras dos en el talud continental dentro de la placa del Caribe.

Estas perforaciones fueron motivadas y propuestas por el Dr. Eli Silver de UCSC, con el fin de conocer los detalles de la deformación en el frente de colisión y para discriminar entre dos modelos propuestos sobre la constitución del arco externo frente a la Península de Nicoya. Uno de esos modelos propone que el arco externo está principalmente constituido por materiales acrecionados contra la raíz de la Península de Nicoya, mientras que el otro modelo propone que el arco externo constituye una extensión hasta la trinchera de las rocas de la Península de Nicoya (Kimura *et al.*, 1997). Según el primer modelo el mecanismo dominante en esta zona de subducción sería la acreción, mientras que, según el segundo modelo, la erosión tectónica sería lo dominante. Discriminar entre estos dos modelos tiene implicaciones importantes sobre cualquier modelo que se proponga para la zona sismogeneradora frente y por debajo de la Península de



Nicoya. También tiene implicaciones importantes sobre la presencia de fluidos en la zona sismogénica y sobre los procesos de fusión parcial del manto bajo la cadena volcánica.

Lamentablemente, las dos perforaciones en el talud fueron, técnicamente, muy difíciles. Esto imposibilitó penetrar hasta profundidades que permitieran obtener información concluyente que descartara alguno de los modelos propuestos. La ambigüedad por lo tanto aún persiste. Más información sobre los resultados de estas perforaciones puede ser consultada en Kimura *et al.*, (1997); una versión digital de ese reporte también puede ser consultada en <http://www.odp.tamu.edu/publications/170IR-170TOC.html>.

En junio y julio de 1998, el OVSICORI-UNA participó activamente en una campaña geológica en la parte sur de la Península de Nicoya, como parte del programa de campo del Consorcio Keck de Geología. Este consorcio es una agrupación que reúne 12 departamentos de geología de universidades de Estados Unidos, con financiamiento de la Fundación W. M. Keck. En esa campaña participaron 11 estudiantes y 4 profesores de los Estados Unidos, un estudiante y un profesor del OVSICORI-UNA (Gardner *et al.*, 1999). El trabajo de

campo consistió en un estudio detallado de las terrazas marinas levantadas en esa región, del pleistoceno (Kehrwald, 1999) y holoceno (Bee, 1999; Burgette, 1999; Burton, 1999; Cooke, 1999 y Kraal, 1999). Se hizo además un muestreo geoquímico de las rocas del Complejo de Nicoya (Stamski, 1999) y estudios estructurales de las rocas sobrecubiertas (Krull, 1999 y Claypool, 1999). Se realizaron levantamientos paleomagnéticos (Reves, 1999) y se realizó nivelación geométrica, trigonométrica y ocupación con GPS (Shearer, 1999a y Hernández, 1999). Toda la información recolectada durante esa campaña de campo ha permitido documentar aún mejor la historia de deformación tectónica de la Península de Nicoya y ubicar mejor la brecha sísmica de Nicoya dentro de un contexto temporal más amplio.

### **Investigaciones necesarias para complementar la información sobre el segmento de subducción de Nicoya**

Existe aún una serie de investigaciones científicas que se deben realizar con el fin de complementar la información existente. Algunas de esas investigaciones se mencionan a continuación.





### **1. Inversión de sismos ocurridos durante la primera mitad del siglo XX**

En la época de ocurrencia del terremoto de 1950 ya existía una red sismográfica con estaciones distribuidas en varias regiones del planeta. Dada la magnitud de ese evento, existen registros sísmicos analógicos de varias de esas estaciones que podrían ser digitalizados e investigados para la obtención del tensor de momento sísmico y la función de tiempo de la fuente. En estos momentos se están haciendo los contactos pertinentes para completar los registros disponibles. Una vez completa esa base de datos se invitará a científicos a que apliquen los diversos métodos que han desarrollado para ese propósito y sobre todo a aquellos con experiencia en la inversión de sismos ocurridos durante la primera mitad del siglo XX. Un estudio de este tipo ayudaría a obtener más información sobre la historia de ruptura del segmento de Nicoya y podría ayudar a obtener el número y mecanismo focal de los subeventos así como la duración total de la ruptura.

### **2. Estudio del tsunami de 1950**

También sería importante realizar una documentación histórica de la magnitud y tiempo de arribo del tsunami generado por el terremoto de 1950, para las diferentes regiones de la península.

Se planea también obtener registros de aquellos mareógrafos que estuvieron operando en el mundo en esa fecha. Con esto se podría también modelar el mecanismo y momento sísmico de ese evento.

### **3. Daños causados por el terremoto de 1950**

Un estudio más detallado de las características del daño causado por el terremoto de 1950 podría ayudar a complementar los escenarios de daños del futuro terremoto. Este estudio deberá incluir la revisión crítica de los archivos eclesiásticos, de municipios, hospitales y centros educativos de la península y de ciudades cercanas (Liberia, Cañas, Bagaces y Puntarenas), así como del Gobierno Central.

### **4. Verificar localización del terremoto de 1950**

Otro trabajo de investigación pendiente de realizar, es utilizar la ubicación obtenida por el OVSICORI-UNA del terremoto de 1990, para relocalizar el evento de Sámara de 1978 con el uso del método de "Determinación Conjunta de Epicentros". Si esta ubicación discrepa de la obtenida por Güendel (1986), sería necesaria una nueva relocalización del terremoto de 1950 y sus réplicas más importantes.





## 5. Replanteo de los cálculos de Nishenko y Panagiotopoulos

Como parte de una investigación también necesaria, los autores han realizado contactos con los Drs. Nishenko y Panagiotopoulos solicitando volver a calcular las probabilidades por ellos publicadas [Nishenko (1989) y Panagiotopoulos (1995)] de la ocurrencia de un terremoto en la brecha sísmica de Nicoya. Estos nuevos cálculos se justifican por cuanto, como se mencionó en el Capítulo I, en sus trabajos ambos autores asociaron al segmento de Nicoya sismos ocurridos en otros lugares y omitieron otros eventos importantes ocurridos en el segmento de Nicoya. Además, dichos cálculos estadísticos requieren ser actualizados ya que han pasado 11 años desde la publicación del trabajo de Nishenko y 6 años desde la publicación del trabajo de Panagiotopoulos. Las inclusiones y omisiones mencionadas se deben a problemas con los catálogos sísmicos por ellos utilizados y a que los límites geográficos de la brecha sísmica de Nicoya no eran conocidos en el momento en que ellos estudiaron el problema.

## Recomendaciones para la documentación del próximo terremoto de Nicoya y sus deformaciones presísmicas, cosísmicas y postsísmicas

En el OVSICORI-UNA se tiene claro que no se puede predecir la fecha del próximo terremoto de Nicoya, pero también se tiene claro el compromiso de aprovechar esta oportunidad histórica de tener una brecha sísmica madura y la ventaja geográfica de contar con una península que sobreyace la zona de ruptura de ese futuro terremoto, condición casi única en el mundo para sismos de subducción. Esta condición es muy especial y ofrece un laboratorio natural para probar y valorar los alcances de las diferentes metodologías que se han propuesto a nivel mundial para la predicción sísmica. La recolección de los datos básicos, antes, durante y después de los terremotos, es lo que sustenta la viabilidad de las metodologías y brinda la información básica para modelar el marco teórico que explique las señales registradas.

**1. GPS.** Quizás la técnica que tiene mayor potencial en este momento para el monitoreo de los procesos de acumulación de energía y la deformación asociada a ese proceso, la constituye el uso de los sistemas de posicionamiento global (GPS). Los datos recolectados en Costa Rica, durante campañas de GPS,





han probado ser muy útiles para documentar y modelar la deformación asociada al acoplamiento elástico por debajo de la Península de Nicoya, pero no son suficientes para establecer la continuidad y registrar eventos repentinos de deformación. Para eso es estrictamente necesaria la operación de receptores continuos con un espaciamiento no mayor a 25 Km entre sí.

**2. Nivelación de precisión.** En los años 50 (pocos años después del sismo de 1950) el Instituto Geográfico Nacional realizó nivelación de precisión y sería importante poder repetir algunos tramos de nivelación antes y después de la ocurrencia del próximo terremoto bajo la península. Dos segmentos cortos, uno desde cerca de Montezuma hasta Cóbano y otro de Río Negro a Pochoyte, ya fueron renivelados en 1998 por personal del OVSICORI-UNA y estudiantes del Consorsio Keck (Shearer, 1999a y 1999b; Hernández, 1999). Como parte del proyecto SEIZE (Apéndice II) se realizará una nivelación desde Playa Sámará, en la costa oeste de la Península de Nicoya, hasta Puerto Moreno, en el Golfo de Nicoya.

**3. Emanometría del gas radón.** El potencial de los sistemas de registro de la propagación o emanometría del gas radón en el subsuelo, podría también ser probado en este ambiente de la Península

de Nicoya. Las estaciones de registro de radón que operan conjuntamente el OVSICORI-UNA y el Laboratorio de Física Nuclear de la UCR (LFN-UCR) están muy espaciadas. Se recomienda que sean instalados más receptores de gas Radón, a espaciamientos de unos 25 km y sobre todo a lo largo de la costa oeste de la península, donde la falla se encuentra a una menor profundidad.

**4. Mareógrafos.** Se requiere una red, de por lo menos 5 mareógrafos, ubicada alrededor de la Península de Nicoya que aportaría información importante sobre la magnitud de los cambios de nivel de mar antes y después del deslizamiento sísmico. Esta información podría ser crucial para determinar el nivel máximo de deformación presísmica que podría convertirse en un premonitor de mediano plazo.

**5. Acelerógrafos.** Al momento de ocurrencia del próximo evento principal bajo la Península de Nicoya, así como para muchas de sus réplicas, la red sísmica, tanto de período corto como la de banda ancha, se saturaría debido a la gran amplitud de las señales generadas. Los registros de movimiento fuerte solo se pueden hacer con instrumentos sísmicos que respondan a la aceleración del suelo; es por esto que se hace también necesario la instalación en la Península de Nicoya y sus





alrededores, de una red de acelerógrafos. De no registrarse aceleraciones del suelo, se perdería información muy valiosa sobre la dirección y velocidad de propagación de la ruptura, lo cual a su vez, permite cartografiar con más detalle las asperezas más fuertes o áreas de mayor acople elástico. Los valores de aceleración, así registrados, servirán además para la microzonificación sísmica de la región y para el establecimiento de parámetros de construcción para futuras obras de infraestructura. Durante octubre y noviembre de 1999, M. Protti, con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), visitó varias instituciones científicas japonesas con el fin de exponer la situación de la Península de Nicoya y estimular la inversión científica del Japón en Costa Rica. Algo en lo que más se insistió fue la necesidad de esta red de instrumentos de movimiento fuerte. Una red densa de acelerógrafos (mínimo 12 en la península) podría servir además como el fundamento de registro de un sistema de alerta temprana para el Valle Central. Este sistema se describe en el Apéndice III.

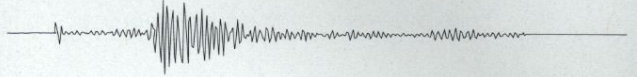
**6. Monitoreo del nivel de pozos de agua.** Importante también para el monitoreo de las deformaciones es el registro continuo de los niveles de agua en pozos profundos de la península. En países como Japón, existen pozos

construidos específicamente para este propósito y con registro telemétrico en tiempo real a centros de registro. Cerca de la costa los cambios en el nivel de agua darían información complementaria sobre levantamiento y subsidencia y al interior de la península darían información sobre el nivel de esfuerzos (por ejemplo, cambios de permeabilidad y porosidad producidos por cambios en el régimen de esfuerzos).

**7. Strainmeters.** Para el registro más directo de cambios en el régimen de esfuerzos y para el cálculo de tasas de deformación, se podrían instalar "strainmeters". Estos instrumentos, altamente sensitivos se colocan en pozos profundos (de unos 1,000 m). Por su alto costo (varias decenas de miles de dólares) es difícil pensar en la instalación de una red de ellos, pero uno al menos, aportaría información sumamente valiosa. Como parte del proyecto SEIZE (Apéndice II) se está discutiendo la posibilidad de instalar un "strainmeter" en la Península de Nicoya y proponer además la instalación de otro en el talud continental frente a Playa Sámara.

**8. Estaciones sísmicas portátiles.** Como se mencionó atrás, la ocurrencia del próximo terremoto bajo la Península de Nicoya disparará actividad sísmica, tanto réplicas en la zona de ruptura como por activación de fallas





locales. Para lograr documentar la evolución de esa actividad será necesario contar con estaciones sísmicas portátiles, que puedan ser instaladas como redes en las regiones donde comiencen a activarse enjambres sísmicos. Para el registro de las réplicas asociadas al evento principal será posible contar con la instrumentación del consorcio IRIS (Incorporated Research Institutions in Seismology), a través de su centro PASSCAL de instrumentación, pero para los enjambres sísmicos locales se requerirá instrumentación de más fácil instalación y que pueda ser desplazada con mayor rapidez. Como mínimo se necesitan 12 estaciones portátiles para poder contar con dos redes de 6 estaciones: una para movilizar en la región entre Aranjuez y Liberia y otra para movilizar dentro del Valle Central.

#### **Recomendaciones para la reducción del impacto y preparación de la población**

En virtud de los escenarios descritos, es obvia la necesidad de tomar medidas de preparación de la población, como alternativa para reducir el impacto potencial que el sismo esperado tenga sobre la vida y recursos de los habitantes de la región Chorotega, así como de otras regiones vecinas. Esto redundaría

en una reducción del impacto potencial del sismo sobre la economía nacional.

Existen medidas preventivas y de mitigación, que son parte de protocolos de preparación aceptados universalmente, para enfrentar el efecto potencial de los sismos y otras medidas que deberán implementarse considerando la particularidad de la Península de Nicoya. Esta particularidad debe tomar en cuenta y respetar desde aspectos tales como los recursos disponibles en cada comunidad y hasta aquellos que tienen que ver con su sistema de creencias y valores.

La columna vertebral de todo plan de reducción de los efectos potenciales de un sismo de gran magnitud, es la educación de la población. Se requiere que la población acepte e implemente medidas de prevención, se organice y capacite técnicamente con grupos encargados de ejecutar acciones de reducción de peligros potenciales, a nivel comunal o regional y especialmente, una organización de las comunidades potencialmente afectadas por el sismo, para que sean autosuficientes durante las primeras 72 horas después de ocurrido el mismo. La experiencia mundial indica que, solo en casos muy especiales, ha sido posible reabastecer comunidades afectadas en menos de tres días posterior a una catástrofe. Este es el





período vital en el que se requiere ser autosuficiente. Las siguientes podrían ser algunas estrategias a seguir en el campo de la prevención y mitigación sísmica.

### **1. Educación de la población**

Se trata de cambiar patrones de comportamiento de la población, para que actúe de tal manera que reduzca el peligro potencial a que estaría expuesta al ocurrir el sismo esperado. La educación de la población debe realizarse por medio del sistema educativo formal en la enseñanza primaria, secundaria, técnica y universitaria de la región Chorotega y a la vez, por medio de la educación informal que utiliza los medios de comunicación con programas de radio, televisión y periódicos, entre otros. También deben participar y colaborar activamente las instituciones del Estado que trabajan con las comunidades, como por ejemplo, los Equipos Básicos de Atención Integral en Salud (EBAIS), el Instituto Mixto de Ayuda Social (IMAS) y los programas de extensión agropecuaria, entre otros. En el campo de la educación existen múltiples alternativas que van desde los textos educativos de primaria o secundaria, hasta programas de radio dirigidos hacia las comunidades. Como parte de este proceso de educación y capacitación se debe también incluir los lugares de trabajo, sobre todo

aquellos donde se opere maquinarias pesadas, se trabaje con sustancias peligrosas o donde se den grandes concentraciones de personas.

### **2. Organización y capacitación técnica de cuadros encargados de ejecutar acciones de reducción de peligros potenciales a nivel comunal o regional.**

Se trata de organizar acciones a nivel de las comunidades, con recursos locales, que tiendan a reducir la vulnerabilidad sísmica y el establecimiento de planes de contingencia para reducir su impacto. En esta etapa debe identificarse y reducirse el peligro alrededor de la infraestructura; deben determinarse zonas más propensas a presentar problemas y deben ejecutarse medidas preventivas concretas para reducir el peligro. Por ejemplo, realizar censos de edificios mal construidos o en mal estado y zonas susceptibles a sufrir licuefacción o propensas a sufrir deslizamientos. Alrededor de los edificios viejos de adobe y que se deben preservar por ser patrimonio histórico, conviene poner soportes en las paredes de los mismos. Esto es especialmente requerido cuando se trata de edificios públicos como escuelas, colegios e iglesias.





### 3. Organización de las comunidades para que sean autosuficientes durante los primeros 3 días después de ocurrido el sismo.

Los comités locales de emergencia deberán instruir a las familias de sus comunidades a mantener una reserva de productos no perecederos, tales como granos y enlatados. Deberán, además, elaborar un inventario de fuentes potenciales de abastecimiento de agua potable. Si el suministro de fluido eléctrico se interrumpiera será necesario una distribución inmediata de los productos que requieren refrigeración de tal forma que no se desperdicien y para evitar que sean consumidos después de muchas horas de estar a temperatura ambiente.

Existe una gran variedad de medidas preventivas que se pueden realizar con el fin de estar preparados para enfrentar un sismo. Estas medidas a nivel familiar, empresarial o social exigen la preparación de planes comunales y familiares para enfrentar el sismo y deberán ir orientadas en dos sentidos básicos. El primero es garantizar comida, agua, medicinas, primeros auxilios, abrigo y refugio a los miembros de la familia o la empresa, para poder tener recursos disponibles que les permitan ser autosuficientes durante los primeros 3 días después de ocurrido el

sismo. Este es el período en que normalmente se interrumpen todos los servicios en las comunidades afectadas. El segundo tiene que ver con la seguridad general de la sociedad y tiende a garantizar que las líneas de vida fundamentales tales como agua, electricidad, carreteras, puentes y demás vías de comunicación, hospitales y otros centros de atención médica, se mantengan en operación durante y después de un sismo. Alternativamente debe considerarse un plan de reparación rápida para poner a funcionar en el menor tiempo posible aquellos recursos que son vitales para la sociedad. El primer sentido de orientación tiene como protagonistas a la familia y pequeña empresa, en tanto el segundo sentido de orientación tiene como protagonistas a los municipios, a las empresas estatales y ministerios como la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS), Acueductos y Alcantarillados (AYA), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), el Ministerio de Educación Pública (MEP), entre otros y a las grandes empresas privadas de la región como hoteles y complejos agroindustriales. En Montero *et al.*, (1993), puede ser consultada información adicional sobre preparación de la población a diferentes niveles (individual, familiar y comunal).





Un ejemplo de acción en este campo es la organización de un sistema de transporte por medio de avionetas, que pudieran dar servicio en pistas de aterrizaje que no hayan sido severamente dañadas, para evacuar heridos hacia el Valle Central. Lanchas rápidas podrían evacuar heridos de las playas del oeste de la península, la costa del Golfo y la parte navegable del Río Tempisque hacia el Hospital Monseñor Sanabria, en Puntarenas, en caso que éste no sufriera daños importantes. Debe recordarse que este hospital fue reforzado estructuralmente hace pocos años. La organización de cuadrillas de remoción de escombros para limpiar los caminos y habilitar la red vial, en el menor tiempo posible, tendría también un impacto importante, especialmente durante las primeras semanas después del terremoto. Para ello, tanto la empresa privada como la pública deben garantizarse que tienen en la región reservas de combustible suficientes como para iniciar la reconstrucción, y que estas reservas se encuentren en reservorios sísmicamente resistentes.

Aún cuando los datos disponibles sugieren que el segmento de subducción frente y por debajo de la Península de Nicoya no tiende a producir grandes tsunamis, sin embargo, bajo condiciones especiales (mareas muy altas, durante o justo después de períodos de

altas precipitaciones, en épocas de gran afluencia turística a las playas tales como Semana Santa, vacaciones escolares de julio, Año Nuevo y meses de diciembre a febrero), un pequeño tsunami como el ocurrido durante el terremoto de 1950, podría producir daños y hasta pérdidas de vidas si no se sabe cómo actuar. La distribución de afiches en las áreas costeras con información sobre cómo identificar la inminencia de un tsunami, qué hacer al momento y datos sobre el tiempo disponible después de ocurrido el sismo y antes del impacto del tsunami, serán de mucho valor. El OVSICORI-UNA se encuentra elaborando un borrador de un posible afiche con la información antes mencionada.

El OVSICORI-UNA ha venido además contribuyendo con la Comisión del Código de Construcción Antisísmica del Colegio de Ingenieros Civiles y aportando la información requerida, para asegurarse que el nuevo código de construcción (en proceso) sea actualizado y que, por lo tanto, considere el potencial sísmico de la Península de Nicoya. En el Código Sísmico vigente no se reconoce el carácter segmentado de la zona de subducción frente a Costa Rica, con sus diferentes modalidades de ruptura. Esto implica que, edificaciones construidas de acuerdo al código vigente, podrían





tener parámetros de diseño que estén por debajo de lo requerido para enfrentar un sismo como el que producirá la ruptura del segmento debajo de la Península de Nicoya. Si a esto se agrega una mala condición del suelo y deficiencias en la supervisión de las obras, se puede entender entonces las razones por las cuales varios edificios podrían tener serios problemas.

También se ha efectuado una propuesta para la implantación de un sistema de alerta temprana al Valle Central de Costa Rica, la cual se describe en el Apéndice III.

El estudio de la zona en este campo es la organización de un sistema de transporte por medio de aviones, que pueden dar servicio en pistas de aterrizaje que no hayan sido recientemente habilitadas para evacuar heridos hacia el Valle Central. Las pistas aptas por ellas evacuar heridos de las playas del oeste de la península, la costa del Golfo y la parte navegable del Río Tenorio hacia el Hospital Mesón de la Sabana, en Puntarenas, en caso que se le no sufriera daños importantes. Debe acordarse que este hospital ha estado estructuralmente afectado por años. La organización de cualquier tipo de evacuación de heridos para impedir la pérdida de vidas es el primer paso en el momento de habilitar la red vial en el menor tiempo posible, también haciendo un trabajo importante especialmente durante las primeras semanas después del terremoto. Para ello, tanto la empresa privada como la pública deben garantizar que tienen en la región reservas de combustible suficientes para operar la reconstrucción, y que estas reservas se encuentran en reservas estratégicamente resistentes.

Aún cuando los datos disponibles señalan que el segmento de subducción frente y por debajo de la Península de Nicoya no tiende a producir grandes tsunamis sin embargo, bajo condiciones especiales (ondas muy altas durante o justo después de períodos de



## Conclusiones

Se ha definido aquí 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. No se puede saber cuándo este evento tendrá lugar, pero con base en datos históricos (tiempos de recurrencia y la ausencia de registros de terremotos de magnitud superior a 8) se interpreta que será pronto (pocos años).

Se insiste que, con base en los registros orales y escritos del impacto de sismos anteriores y dado que actualmente existe mayor infraestructura en la región, se considera en este trabajo que el próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya, tiene potencial para producir daños importantes en la población y su infraestructura. Es por eso que se han incluido en este libro recomendaciones para contribuir a la reducción del impacto potencial de dicho sismo.

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.

El nivel de conocimiento en materia sísmica adquirido en Costa Rica, desde la instalación de la red sísmica del OVSICORI-UNA, ha permitido realizar estimaciones de lo que ocurrirá, en materia de sismicidad inducida, inmediatamente después de la ocurrencia del próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya. Se espera que ocurrirán réplicas no solo por debajo de la península, sino también actividad sísmica en y frente al Golfo de Papagayo y en el Pacífico Central de Costa Rica. Además de las réplicas por deslizamiento en la zona de subducción, posiblemente se dará una reactivación de fallas al interior de la placa del Caribe con sismos superficiales entre la Cordillera de Guanacaste y la Península de Nicoya y en la parte central de Costa Rica, a lo largo del límite de placas entre la placa del Caribe y el bloque de Panamá.

En resumen, en este estudio se ha presentado una descripción de los aspectos que se han aprendido sobre la brecha sísmica de Nicoya y con base en ello se presentaron modelos e interpretaciones del futuro comportamiento de esta brecha. Se incluyen recomendaciones sobre lo que se puede y debe hacer ante el acaecer de este evento. Se presenta así la oportunidad de poner al servicio del país el conocimiento adquirido, antes de la ocurrencia de una liberación importante de energía sísmica, con la finalidad de que sea utilizado en la disminución del impacto de un sismo sobre la población y la estructura productiva del país. Se espera que lo expuesto en este libro sea evaluado después de la ocurrencia del próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya. La diferencia entre lo expuesto aquí y lo que suceda en el futuro tendrá también un gran valor para estimar cuánto hemos aprendido de la brecha sísmica de Nicoya y si la sociedad costarricense puede realmente modificar sus modelos de conducta como resultado de un esfuerzo de prevención a nivel nacional. ¡La prevención es la mejor estrategia!



## APÉNDICES

### Apéndice I

#### **Sismicidad histórica en la región norte de Costa Rica 1644-1916**

En este apéndice se presenta una selección de citas relacionadas con sismos en la Península de Nicoya; la gran mayoría de ellas fueron tomadas de la recopilación realizada por Hilge y Álvarez, 1994. En las citas textuales se ha respetado el uso del castellano antiguo que usaban los pobladores de Costa Rica.

Los primeros recuentos históricos de daños en la región del Guanacaste y en especial sobre la Península de Nicoya, datan del siglo XVII. En la obra de Cleto González Víquez (1910), se indica que "*Celidón de Morales, en carta de 1644, refiriéndose a Nicoya, dice que durante su administración hizo reedificar a la iglesia parroquial, reparar el convento y mejorar las casas de los pueblos. Se ve que por aquella región había también habido sacudidas sísmicas*".

Posteriormente, durante el siglo XVIII, en nota que el señor Obispo Tristán dirigió al Presidente de la Audiencia en setiembre de 1784, dice que "*después de solicitar permiso para erigir una iglesia filial en Alajuela, da cuenta de que las iglesias de Guanacaste, Bagaces, Cañas y Esparza estaban hundidas y é indecentísimas*". Estos dos breves informes, aún cuando mencionan daños y la





reparación de edificaciones en la región del Guanacaste, no asocian los daños con sismos y mucho menos se mencionan fechas. Es, por lo tanto, muy difícil inferir que hay correlación entre las reparaciones hechas y la causa de las mismas. No queda más que inferir que es posible que los daños se hayan debido a la acción de terremotos.

Durante el siglo XIX ha sido posible, de los relatos descritos en la literatura, tanto del libro del Lic. González Víquez (1910), como de los archivos de Gobernación, Congreso, Municipal y Policía (1802-1870) y archivos de Gobernación y Policía (1870-1900) [Hilje y Alvarez (1994)], recopilar una historia más completa de los terremotos acontecidos en la región del Guanacaste. Es así como, para el siglo XIX, se ha logrado en este trabajo una historia más completa que la presentada en el trabajo de González Víquez (1910).

El primer informe que habla de la reedificación del Cabildo de Nicoya, sin mencionar la causa, se da el 15 de marzo de 1825 (Gobernación No. 8783 Año 1825). González Víquez (1910) comenta sobre lo que dice Villavicencio, quien a su vez menciona que apenas puede señalarse algunas pérdidas que ocasionó el temblor de tierra de 1825, sin embargo, González Víquez

dice que "en ese año (1825) no ha habido temblor notable y que Villavicencio lo confunde con el sismo de 1822".

Posteriormente, el 19 de julio de 1827, se menciona una nota del Jefe Político Superior de la Municipalidad de Heredia, en la cual comunica el decreto emitido por el Jefe Supremo, relativo a la necesidad demostrada de reedificar la Parroquia del Pueblo de Nicoya, sin mencionar la causa de dicha reedificación. Se destina para tal efecto 6000 pesos, esto de dinero de Cofradías, San José 19 julio, 1827, (Municipal Heredia No. 849 Folio 54-55 V del 28-7-1827). Para este mismo fin se decreta por parte de la Asamblea Constitucional del Estado Libre de Costa Rica, conceder licencia a los pueblos de Guanacaste y Santa Cruz para reedificar su Parroquia y la portada de su Iglesia, respectivamente, San José 30 de junio 1828. (Municipal San José No. 346 Año 1828 Folio 40 F-41 11-7-1828). González Víquez (1910) menciona que la Municipalidad de Nicoya, en acta del 20 de mayo de 1827, habla de la reedificación de aquella Iglesia Parroquial, arruinada por el terremoto del 3 de abril de 1827 (éste ocurrió en el año 1826, aclaración que se hace más adelante). Sobre este mismo sismo se reportan de nuevo en la literatura daños en la región de Guanacaste y se asocian directamente a la ocurrencia de





un terremoto acaecido el 3 de abril de 1826. En esta oportunidad se convoca, por parte de la Municipalidad de Nicoya, a sus habitantes para tomar la decisión de reedificar la Iglesia Parroquial, debido a daños causados por el terremoto del 3 de abril de 1826. (No. 669 Congreso, 21 de mayo de 1827). En comunicación de la Municipalidad de la Villa de Nicoya al Jefe Político Superior, se solicita permiso para llevar a cabo la reedificación, 5 febrero de 1828. (Municipal de Nicoya No. 304 Año 1828 Folio 43 del 13 febrero de 1828). Referente a este mismo terremoto, se tiene el relato de la Villa de Santa Cruz en sesión ordinaria del 19 de mayo de 1828, diciendo: *“Esta Municipalidad presentada la gravedad que hay en esta población de reedificar la Iglesia de este vecindario que es altura de Parroquia por ser filia de la de Nicoya y hallarse la portada sumamente deteriorada con el terremoto del 3 de abril de año 1826... junio 26 de 1828”*. (No. 717 Congreso 1828). Igualmente en sesión Municipal de Santa Cruz, se habla en Cabildo Abierto del estado de miseria en que se halla la Casa Consistorial, a raíz del terremoto del 3 de abril de 1826. (Gobernación No. 8503 Año 1828 Folio 6 V-7 F del 24 de febrero de 1828). González Viquez (1910) lo ubica el 3 de abril de 1827, sin embargo existe suficiente evidencia como para corregir a González Viquez y asignar

estos daños en Nicoya al terremoto ocurrido el 3 de abril de 1826. De los reportes anteriores es difícil discriminar si dicho sismo ocurrió en el segmento de Nicoya o en el de Nicaragua-Papagayo.


Posteriormente se documentan los daños causados en la Villa de Santa Cruz por el terremoto del 2 de noviembre de 1833 diciendo: *“Reunida la Municipalidad, acordó en punto 1o. que habiendo visto y observado la grande ruina que, ha causado el terremoto del dos del corriente en el Templo que lo ha dejado todo desquizado el firmamento de madera, y justamte. haber desecho los simientos que. heran de adobes, y verce quebrado pr. su mitad el frontal, pues solo las puertas se hallan de servicio, y alguna parte de maderas, se hallan en la urgente necesidad de reedificarlo todo de nuevo”*. Se menciona también sobre casas sin paredes. (Municipalidad de Santa Cruz No. 1117 Año 1833 Folio 33 V-34 F del 11 de noviembre de 1833). Sobre el mismo terremoto se menciona además: *“Comunicación de Santa Cruz de Guanacaste al Mando Político Superior. Con la grande ruina, y estragos que ha causado, en esta Villa, la lluvia y el terremoto del día 2 del corriente. como al medio día.....no ha quedado una casa buena, pues todas se han desquizado, y caídas las tejas,*



y casi a redificarlas de nuevo; y la mas lastima es, el Templo pues solo las puertas han quedado de servicio, pues todo quedó inutilizado, y pa. qe. halla templo será preciso reedificarlo....". (Gobernación No. 13492 Año 1833 Folio 16 del 6 de octubre de 1833). Aunque el Folio 16 tiene fecha del 6 de octubre de 1883, anterior a la fecha del terremoto del 2 de noviembre del mismo año, es posible que la sesión de la Gobernación que dió origen a dicho folio, fue efectivamente abierta el 6 de octubre y que por motivo del huracán que azotara la región de Guanacaste, durante el mes de octubre, la sesión permaneció abierta hasta después de la ocurrencia del terremoto del 2 de noviembre. Este mismo terremoto causó daños en Nicoya tal como se menciona a continuación: "*Comunicación de J. Cupertino Briceño de Nicoya al Jefe Político Superior. El día 2 del corriente ha acesido un gran terremoto, qe. ha dañado la Yga. parroquial de este, y el Cabildo donde se celebran la Junta de mode que será necesario lebantarlo de nuevo pues ha quedado inutil*". (Gobernación No. 13495 Año 1833 Folio 9-10 del 5 de noviembre de 1833). González Víquez (1910) no menciona ningún sismo en este año. En el archivo municipal de Cartago No. 551 Folio 83-84 del 18 de setiembre de 1837 en sesión Municipal, en el artículo 1o. se leyó

orden expedida por Asamblea del 21 de mes anterior (agosto), relativo a conceder licencia a la Municipalidad de las Cañas, para que promueva la reedificación de aquella Iglesia. Esta reparación muy probablemente corresponda a daños causados por el terremoto del 2 de noviembre de 1833 y que afectara a Nicoya y Santa Cruz, tal como se mencionó anteriormente. En un relato del Municipal de Nicoya No. 1100 del Año 1839 Folio 87 y 11 F del 15 de febrero de 1839, se menciona que todavía no se han iniciado las reparaciones del Cabildo, dañado por el terremoto del 2 de noviembre de 1833. De manera similar, en relato del Municipal de Guanacaste No. 5527 Folio 1 del 6 de agosto de 1844, se solicita al Ministro de Relaciones del Supremo Gobierno, "*conceder arbitros convenientes para reedificar la Iglesia de esta ciudad (Guanacaste) que se haya amenazando ruyna*". Estos daños probablemente correspondan también al terremoto del 2 de noviembre de 1833. Solo los sismos del segmento de Nicoya producen este nivel de daños en Nicoya y Santa Cruz y los daños parecieran ser mayores en Santa Cruz; aun así, la información existente no es suficiente para poder determinar si este sismo ocurrió en el segmento de Nicaragua-Papagayo o en el de Nicoya.





Según John L. Stephens (Travel in Central America), citado en González Víquez (1910), estando él en la hacienda de don José Bonilla llamada Santa Rosa, ubicada después del río Lagartos y antes de Bagaces, en las primeras horas de la noche del 18 de febrero de 1840, se sintió un temblor que debió ser fuerte, pero del cual no se tuvo noticia en el interior. Dice que oyó un ruido de arriba como si el techo se abriera, que la tierra se movía como un buque que se balanceaba en un mar tempestuoso y que los choques continuaron por casi dos minutos. Agrega que la vuelta de la tierra a su tranquilidad fue casi tan violenta como el choque. Por las descripciones de este sismo como impetuoso y de altas aceleraciones y por no haberse reportado ni sentido al interior del país, interpretamos que se trata de un evento intraplaca asociado a fallas locales en dicha región.

El 13 de febrero de 1845 se habla del expediente municipal para reedificar la Iglesia Parroquial y se solicita nuevamente los árbitros ante el Gobierno; el 9 de abril de ese mismo año se habla sobre la reedificación de la Iglesia Parroquial de Nicoya (Gobernación No. 27639 Año 1845 Folio 33-33 V y Folio 85 V 86 F respectivamente). Esta situación se repite en el año de 1849, donde todavía se espera concluir las

reparaciones de la Iglesia de Nicoya, solicitada originalmente en 1827 (Gobernación No. 26301 del 16 de abril de 1849).

En el año de 1853 se producen dos terremotos que causan daños, el primero ocurre el 26 de agosto y afectó principalmente a la Villa de Cañas, destruyendo la mayoría de las casas y quedando éstas reducidas a la mayor miseria (Gobernación No. 27344 del 29 de octubre de 1853 y Gobernación No. 27952 Folio 24 V del 12 setiembre 1853); el segundo ocurre el 8 de setiembre y afecta principalmente a las poblaciones de Nicoya, Santa Cruz y Siete Cueros (Filadelfia) (Gobernación No. 27344 Folio 28 F del 3 de octubre de 1853).

Sobre el primer terremoto (26 de agosto de 1853), en nota enviada al Sr. Ministro de Gobernación, el Gobernador de Guanacaste, Sr. Rudesindo Guardia, fechada 11 setiembre de 1853, menciona que *“por los daños causados por el temblor del 26 de agosto último en la Villa de las Cañas, los cuales fueron de vastante consideración pues no solamente se deshentecharon todas las casas en su totalidad sino tambien calleron algunas y las demás quedaron desplomadas, sin embargo aquellos vecinos desecharon la oferta que les mandó hacer esta Gobernación de*





trasladarse a Bagaces.....que fue a explorar el serro llamado del Pelado que se supone que era el que habia echo la explosión regresó despuez de haber examinado aquel Serro y segun sus investigaciones observaron que no era allí el origen de los temblores porque no encontraron ningún resquicio de erucción y haviéndose internado sobre la cordillera advirtieron que asia el este se divisaba un pequeño serro a poca distancia del volcan llamado Tenorio y que de éste se elevavan grandes volcanadas de umo de diferentes colores ollendose al mismo tiempo grandes retumbos presedidos de repetidos temblores: también obervaron la destrucción de una gran parte de la montaña y grandes oquedades de la tierra que se había abierto en grietas. El ocho del corriente repitió otro movimiento de tierra bastante fuerte pero ya no ocasionó estagros en aquellas villas y aunque siguió temblando casi todos los días es con más moderación, sin embargo no dejan de tener aterrados a aquellos vesinos” (No. 5540 Policía 1856 Folios 82 y 83 fv.). González Viquez lo ubica el 24 de agosto de 1853.

El Sr. Rudecindo Guardia, Gobernador de Guanacaste, en nota enviada al Señor Ministro de Gobernación el 22 de setiembre de 1853, hace mención del segundo terremoto: “informe oficial

rendido por el Jefe Político de Santa Cruz a esa Gobernación, sobre los daños ocasionados por el fuerte temblor de tierra que sufrió en aquella Villa el 8 de setiembre como a la una de la tarde, el cual ocasionó varios perjuicios a aquellos moradores en sus casas de habitación y aun en la Iglesia Parroquial, extendiéndose aquellos hasta el barío de Siete Cueros (Filadelfia, cantón de Carrillo), donde también sufrieron bastante a pesar de que dista siete leguas de Santa Cruz; siendo de advertir que en las Villas de Bagaces y Cañas apenas se hizo sentir y en esta ciudad (Liberia) a pesar de que fue dilatado y fuerte, no ocasionó gran daño a las casas de la población..... Aunque el Jefe Político del Cantón de Nicoya no ha dado aviso oficial a esta Gobernación, por cartas privadas se asegura que en aquella Villa también ocasionó daños considerables el mismo movimiento de tierra, pues la Capilla de aquella Iglesia, no ha mucho se había concluido, fue arruinada casi en su totalidad”. (No. 5540 Policía Año 1853 Folio 91). Refiriéndose a este mismo terremoto, el Jefe Político de Santa Cruz envía nota al Sr. Gobernador Político de la Provincia con fecha de 30 de setiembre de 1853 indicándole entre otras cosas: “El Temblor de Tierra que ocurrió en esta villa a la una de la tarde del día ocho del corriente, fue vastante grande, y día y noche por cinco días se hicieron



*sentir más pequeños, sin embargo la ruina que causó consistió en el techado de la Yglesia que aun havido que entejarse de nuevo y en el frontisfusio se advierte rebentado, con unas rebentaduras y desbarrancaduras que tienen la tocorra o socorra de la pared serca del altar mayor. Incontablemente se cuentan dose casas perjudicadas su entejado pero no han quedado desplo-madas, ni menos ha peligrado la vida de un avitante. Con todo el vecindario ha sentido el más formidable terror”* (No. 5540 Policía Año 1853 Folio 81). Por el nivel de daños causado por el segundo sismo en la villas de Nicoya y Santa Cruz, se considera que este sismo debió haber roto el segmento de la Península de Nicoya en 1853.

Diez años después, el miércoles 9 de diciembre de 1863, ocurre otro terremoto en la región de Guanacaste para el cual se presentan los siguientes reportes: Nota al Sr. Ministro de Gobernación enviada por el Sr. S. Lizano donde lo pone “en conocimiento para que se digne elevarlo al del Señor Presidente de la República que el día de ayer a las ocho y cuarenta minutos de la noche ha habido en esta un fuerte temblor de tierra que duró minuto y medio, y que según las observaciones que se hicieron fue de Oeste a Este, no habiendo causado ningún daño tanto en los habitantes como en las casas y

*edificios públicos, según los informes que he adquirido”* (No. 4719 Policía Puntarenas, 1863 1 f. No. 396).

Por otra parte, en comunicación de la Jefatura de Política de Nicoya al Sr. Gobernador de la Provincia el 11 de diciembre de 1863, se dice lo siguiente: “El miércoles 9 de los corrientes entre las ocho y nueve de la noche, la Omnipotencia Soberana, nos hizo experimentar una parte de sus potentes e insondalbes decretos, enviándonos un espantoso terremoto: que amas de la sorpresa general que infundio, dejo sentir tambien sus indispensables consecuencias, ninguna persona ha perecido, pero los edificios han experimentado algun quebranto. El Baul de la Yglesia fracturado en el año 1853 por otro terremoto, hacido lastimado en la misma parte aunque en mayor dimension; en esta ves esto es rajandole al trabes, de parte a parte como del grosor de media pulgada, dejandolo si en su verdadero nivel sin desquiciarlo en lo menos segun: el dictamen de tres arquitectos. La Azotea en la parte Sur, recién concluida voto a tierra una porcion como de ocho varas en su parte media, volando igualmente tres piramides de cada lado y desquiciando una de la misma parte Sur; aunque no obstante las paredes de las Azoteas no han perdido su nivel y aplomo. En las paredes principales de la Yglesia tiene





dos aberturas en la parte Norte, poco menos del grozor de una línea, pero como las otras, sin perder su aplomo correspondiente. Es todo lo ocurrido en la Yglesia. La casa Cabildo en su techumbre ha sufrido mucho quebranto; esto es en el tejado y encanado, y demanda un costo no pequeño para su reparación. En cuanto a las casas de particulares casi todas han sufrido lo mismo en los tejados y parte de las familias viven aún bajo chinamitos por precaver un nuevo incidente. Hasta ahora no se hace ningún reparo porque hasta anoche se hicieron sentir pequeños temblores” (Municipal de Nicoya No. 4770 Año 1863 Folio 17-17 V 18 F). Con respecto a la Villa de Santa Cruz, el Jefe Político de Santa Cruz envía un comunicado al Gobernador de la Provincia. En este le avisa: “de que el temblor del 9 del corriente que tuvo lugar como a las 8:30 de la noche causó el deterioro de la Casa de Cabildo, de quedar destituida la cumbrera de la teja que le cubría.....Asimismo doy aviso a usted de que todos los edificios o casas particulares han sufrido deterioro en el sacudimiento citado, especialmente el frontispicio de esta Parroquia que se halla trozada por el medio....” (Gobernación No. 27360 Año 1863 folio 29-29 V del 12 de diciembre de 1863). Con respecto a este mismo sismo, se menciona que en sesión Municipal de Liberia del 15 de marzo de

1865, artículo 2o. “se vio la exposición del Mayordomo de Fábrica, manifestando el mal estado en que se encuentra la Iglesia, con especialidad el entejado, que es necesario reparar”. Estos daños muy probablemente están relacionados con el terremoto del 9 de diciembre de 1863.

Las descripciones de los daños ocurridos el 9 de diciembre de 1863 indican la presencia de daños sobre construcciones que ya se encontraban dañadas por lo que este terremoto ha de haber tenido una magnitud menor que la del terremoto de 1853.

González Viquez (1910) no menciona nada sobre el sismo del 9 de diciembre de 1863 y se limita a mencionar lo que Francisco Kurtze relata sobre los 18 temblores sentidos ese año, haciendo mención que 2 fueron sentidos en diciembre y que ese año, en general, hubo pequeños y pocos temblores.

El 30 de octubre de 1888, se hace mención de la necesidad de urgentes reparaciones en la Iglesia de Bagaces, no se menciona por que razón. (No. 5394 Policía 1888).

El 16 de mayo de 1889 se informa sobre la visita a la Isla de San Lucas donde los reos “exigen perentoriamente reparación bastante formal, pues no dejó





*de sufrir con el temblor de ayer, que allí fue fuerte y se nota que hizo desplomo de algunas paredes" (No. 5124 Policía Puntarenas 1889). En otro informe se menciona que en enero de 1889 se dieron los temblores que afectaron las cárceles (no especifica si son las de San Lucas) (No. 5126 Policía San José 1889).*

El 3 de julio de 1895 se menciona que la Parroquia de Nicoya necesita reparaciones por algunos temblores, por lo que se hace solicitud de licencia para turnos (No. 3686 Policía 1895). González Víquez reporta 83 sismos registrados ese año en el país y aclara que ninguno fue sentido fuerte por la población.

En 1900, los vecinos de Nicoya piden fondos para levantar la Iglesia destruida por los temblores del 21 de junio (Archivos de la Curia Metropolitana Caja No. 437 Año 1900). González Víquez le asigna al sismo intensidad VII (Rossi-Forel) con una duración de 75 segundos. Se reporta ocurrido a las 3:14 pm. y vino acompañado de muchas réplicas. Sobre este mismo evento, José Fidel Tristán, en junio de 1912 publica unas notas en los Anales del Centro de Estudios Sismológicos de Costa Rica, año de 1911, referentes al temblor del 21 de junio de 1900. En ellas menciona lo siguiente: "En los días anteriores al 21 de junio se habían sentido en varias partes

*del Guanacaste pequeños temblores. El 21 á las 3 de la tarde, se sintió un violentísimo remezón, sumamente largo. Algunos ancianos de Nicoya aseguran que nunca habían sentido un temblor más largo ni más fuerte. El momento en que se sintió la violenta sacudida, era la hora de la comida. Los trastos de la cocina, ollas, cazuelas y calderos, saltaron de los tinamastes y rodaron por los fogones, quebrándose muchos de aquellos, de tal modo que muchas personas no pudieron comer. Y minutos después otra sacudida aunque no tan fuerte como la primera, aumentó el pánico y la gente dispuso pasar la noche en las calles y plaza pública. En el Observatorio Nacional se registraron hasta las 11 y 22 m. pm. del día 22, 12 temblores, 4 de ellos bastante fuertes, pero en Nicoya sintieron muchos más, especialmente en la noche del 21.... Duró este período sísmico casi dos meses". También se relata que además de los grandes daños en Nicoya, en Filadelfia la iglesia se dañó seriamente y que en Puntarenas los daños materiales fueron de consideración.*

Con respecto a los temblores de 1900, se emite el Decreto No. 41, fechado 30 de julio y dice: "Auxilia con la suma de quince mil colones a la Provincia de Guanacaste para reparar daños causados por los últimos temblores en los templos y edificios escolares, a solicitud





*del Sr. Cura de Nicoya. ....el temblor terráqueo que tubo lugar el veintiuno del mes próximo pasado a las 3:15 m. pm. en buena parte de la República y que al parecer azotó con más fuerza la Provincia de Guanacaste*" (No. 2622 Congreso 1900). También se hace mención de nota enviada el 9 de julio de 1900, por el Sr. Gobernador de la Provincia de Guanacaste al Sr. Director General de Obras Públicas, con sede en el Palacio Nacional, y dice entre otras cosas: "Art. 1o. Con motivo de las muchas ruinas causadas en los edificios públicos de este Cantón en general, con particularidad en las Iglesias de esta villa y la del distrito de Sardinal, a consecuencia de los temblores del 21 del corriente mes (junio) y no habiendo en esta localidad persona competente que pueda juzgar..." (No. 1357 Fomento 1900).

El Presidente de la República acuerda en 1901: Conceder licencia a la Junta Edificadora de la Iglesia del Cantón de Santa Cruz, de la Provincia de Guanacaste, para que celebre tres turnos generales, con el objeto de recoger fondos para reparar los daños que sufrió dicho templo, ocasionados por los temblores de 21 de junio de 1900 (No. 011 Policía Libro de Acuerdos Folio 87). De manera similar se habla de daños en los templos de Filadelfia y Sardinal con daños en casa cural (ACM Caja

No. 447 Año 1900). La naturaleza y extensión de los daños ocurridos como consecuencia del terremoto del 21 de junio de 1900 sugieren la ruptura del segmento de la Península de Nicoya.

Después de la actividad sísmica de junio de 1900, se vuelve a presentar el 20 de enero de 1905 una serie de temblores que muy probablemente se ubican a la entrada del Golfo de Nicoya, ya que la ciudad de Puntarenas es la que al parecer sufre más con daños menores en casas, la mayoría de madera y techos de teja. Se reporta que el tajamar tiene rajaduras. En la Isla de San Lucas se reportan daños en los edificios de las cárceles y derrumbes. Hacia el sur-este (en dirección a Caldera y Jacó), y en el momento del temblor principal a las 12:10, se observó desde la playa grandes polvaredas haciendo presumir que se dieron grandes derrumbes. Hacia el interior del país se reportan daños en casas, iglesias y edificios en las ciudades de Alajuela, San Ramón, Naranjo, Heredia, San José, Desamparados y Cartago. (varios de Policía y Gobernación 1905). González-Viquez le asigna intensidad VII o VIII y lo clasifica como terremoto de 19 segundos de duración. José Fidel Tristán en González Viquez (1910), menciona haber realizado una gira a la Provincia de Guanacaste y comenta que definitivamente este terremoto fue



muy violento en la Costa del Pacífico y que en las Salinas de Caldera el agua salada saltó con violencia de las canoas.

El 5 de febrero de 1906, se reporta que en Tempate, Playa Potrero, Cantón de Santa Cruz, *"la playa se ha secado la mar hasta quedar por completo descubierto los bajos de las islas Cocineras, distantes dichos bajos como a mil varas de la costa. El fenómeno se ha estado repitiendo estos días"* (5 de febrero) (No. 986 Policía Guanacaste 1906).

El 11 de junio de 1907 como a las 6:30 de la mañana se siente en Liberia un pequeño temblor, habiendo alcanzado mayor fuerza en Filadelfia (Gobernación No. 1812 del 11 de junio de 1907 Folio 5).

En los archivos hay un telegrama de Liberia al Gobernador de San José, del 27 de febrero de 1916 a las 3 p.m., diciendo que: *"Acábase de sentir en ésta un temblor de gran intensidad. Ruégole decirme si ha ocurrido algo en esa"* (Gobernación No. 25228 Año 1916 Folios 54). Este reporte corresponde al terremoto de Papagayo  $M=7.5$ . Nótese que aunque se trata de una ruptura en el segmento Papagayo-Nicaragua no existen reportes de daños en la Península de Nicoya.







## Apéndice II

### **El experimento de la zona de sismogeneración (SEIZE)**

Uno de los resultados de un taller celebrado en 1995 del Programa Internacional de la Litósfera (ILP) sobre Dinámica de la Litósfera en Zonas de Convergencia, fue la creación del programa internacional de investigación SEIZE (Seismogenic Zone Experiment), para estudiar la zona sismogeneradora de grandes terremotos en márgenes convergentes (zonas de subducción). Dado que la gran mayoría de las investigaciones se hacían en muchas zonas de subducción con la dificultad de poder correlacionar la información, SEIZE decidió convocar, para junio de 1997, a una reunión en Hawaii en la que los investigadores presentaran propuestas para seleccionar las dos mejores zonas de subducción del mundo y enfocar ahí todas las metodologías de estudio. Cuando en febrero de 1997 el OVSICORI-UNA se enteró de esa reunión y por no contar con los fondos para asistir a la misma, se envió por correo electrónico una propuesta a todos los participantes para que consideraran la brecha sísmica de Nicoya como uno de los dos sitios para el experimento. Esa propuesta incluía todas las condiciones especiales de la Península de Nicoya que la hacían un sitio idóneo. Como resultado de la propuesta del OVSICORI-UNA, se presentaron algunas condiciones especiales y con el apoyo financiero del Dr. Paul Lundgren de JPL, del Dr. Eli Silver de UCSC y de la Dra. Miriam Kastner de UCSD, el OVSICORI-UNA pudo participar en dicha reunión y defender su propuesta. Afortunadamente fue escogida la brecha sísmica de





Nicoya y se incluyó además la zona de subducción frente a Nicaragua, como uno de esos dos sitios; el otro sitio seleccionado fue la zona de subducción de Nankai, en Japón.

En diciembre de 1997 se llevó a cabo en San Francisco, California, el primer taller sobre las actividades de investigación que se realizarían en Nicoya como parte del programa SEIZE. Dicho taller fue organizado por los Drs. Eli Silver de UCSC y Marino Protti del OVSICORI-UNA. Del taller surgió la idea de presentar una propuesta, por alrededor de 1 millón de dólares, para instrumentar la península y sus alrededores. Esa propuesta, por un poco más de 1.2 millones de dólares, fue remitida a la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NSF) a principios de enero de 1998 por los Drs. Timothy Dixon de la Universidad de Miami, Susan Schwartz de UCSC, Paul Lundgren de JPL, LeRoy Dorman de UCSD y Marino Protti del OVSICORI-UNA. Con esa propuesta se pretendía instalar una red de 15 sísmómetros de fondo oceánico (SFO) en el mar frente a la península, 20 estaciones sísmicas en la península (10 de banda ancha y 10 de período corto), 4 estaciones permanentes de GPS, dos sensores de deformación de pozo profundo y realizar campañas de nivelación y reocupación de sitios de GPS en

la península. A pesar de que la propuesta no tuvo rechazos de carácter científico, no fue financiada por la gran cantidad de dinero solicitado y por no incorporar otros grupos científicos que trabajan en la región.

Por esa razón se trabajó durante todo diciembre y parte de enero de 1999, con los científicos antes mencionados, en la modificación de la propuesta inicial y el 15 de enero de 1999 se presentó nuevamente ante la NSF una versión modificada de la propuesta. En esa versión no varió el monto solicitado, pero se propuso la recolección de datos tanto en la Península de Nicoya como en la Península de Osa y, en caso de ser aprobada, se trabajaría coordinadamente con un grupo científico alemán. En resumen se propuso realizar el doble del trabajo con los mismos recursos solicitados en la primera propuesta.

Esta última propuesta fue aprobada y para setiembre de 1999 se tenía ya instalada una red sísmica de seis estaciones desde la parte NO de la Península de Osa hasta Quepos y una red de 14 SFO al sur de Quepos. La ubicación de estas redes fue cambiada con respecto a la propuesta inicial de instalar en y frente a la Península de Osa, debido a la ocurrencia en esa región de un evento de magnitud  $M_w=5.8$  el 10





de agosto de 1999, seguido 10 días después por uno de magnitud  $M_w=6.9$ . La secuencia de réplicas de esta actividad al sur de Quepos garantizaba la oportunidad de registrar una mayor cantidad de eventos claramente de subducción que los que se podrían registrar en la región de Osa.

De acuerdo a lo estipulado en la propuesta, en diciembre de 1999 se trasladaron los sismómetros de fondo oceánico del sur de Quepos, al frente de la Península de Nicoya y se instaló una red de 20 estaciones sísmicas en la península (Fig. 22). Los instrumentos que estaban en tierra entre Osa y Quepos pasaron a formar parte de la red de Nicoya. Los sismómetros de fondo oceánico registraron frente a la península hasta finales de mayo del año 2000, mientras que la red sísmica de la península registrará hasta junio del año 2001.

También como parte del proyecto SEIZE en enero y febrero del 2000 se densificó la red de monumentos de GPS para ocupaciones temporales agregando alrededor de 25 nuevos sitios. Durante febrero y marzo del 2000, en una campaña de GPS por todo el país, se ocupó tanto la red descrita por Lundgren *et al.*, (1999), como todos los nuevos sitios. (Fig. 23)

Se tenía previsto para el año 2000 hacer la nivelación de precisión entre Sámará y Puerto Moreno, pero debido a la decisión de ocupar toda la red de GPS, se decidió posponerla para el año 2001. La red de GPS volverá a ser ocupada a principios del año 2002, o justo después del próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya en caso que este ocurriera antes de ese año.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal del proyecto SEIZE es la definición geográfica de los límites superior e inferior de la zona sismogénica (la parte bloqueada o parcialmente bloqueada de la zona de contacto entre las placas que producen grandes terremotos) y definir su naturaleza en esta zona de subducción. Este no es un proyecto de predicción sísmica ni tiene como objetivo la captura del próximo terremoto de Nicoya; si el sismo ocurriera durante el período de instrumentación sería de gran valor, pero no es requerido para el éxito del proyecto.







## Apéndice III

### **Propuesta para la implementación de un sistema de alerta temprana al Valle Central de Costa Rica por sismos fuertes de subducción en la brecha sísmica de Nicoya**

El Valle Central, donde se encuentra la mayor concentración de población e infraestructura de Costa Rica, se encuentra ubicado entre 100 y 250 km de distancia del área potencial de ruptura de la brecha sísmica de Nicoya. Estas distancias están dentro del rango de operación de sistemas de alerta temprana para terremotos que han probado ya ser efectivos, por lo que esta región es un excelente sitio para la puesta en operación de uno de esos sistemas de alerta.

El OVSICORI-UNA ha presentado ante el Banco Mundial y ante el Gobierno del Japón, propuestas para la instalación de un sistema de alerta temprana que avise al Valle Central al momento de la ocurrencia del próximo terremoto por debajo de la Península de Nicoya. Para esta propuesta se ha contado con el apoyo de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE). Con esta propuesta se pretende:

- 1) la instalación de 12 sensores de movimiento fuerte (acelerógrafos) en la Península de Nicoya, conectados en tiempo real y vía ondas de radio, al centro de registro del OVSICORI-UNA;





2) instalar en el OVSICORI-UNA el equipo y programas de cómputo necesarios para la discriminación de eventos, determinación de tasas de crecimiento y declaración de alertas;

3) instalar una red de receptores de la señal de alerta, vía ondas de radio, en escuelas, colegios, hospitales, medios de comunicación colectiva, edificios públicos y privados, con sus respectivas sirenas; y

4) desarrollar programas educativos, planes de emergencia y simulacros en aquellos lugares donde se instalen los receptores y sirenas de alerta.

Los sistemas de alerta temprana en caso de terremotos están conceptualizados y operan tomando ventaja de la diferencia entre la velocidad de las ondas sísmicas (3-7 Km/s) y la velocidad de las ondas de radio (cercana a la velocidad de la luz, o sea, unos 300,000 Km/s). Al momento de ocurrir y detectar un sismo, es posible enviar una señal de radio a distancias donde se recibiría mucho antes del arribo de las ondas sísmicas. El tiempo transcurrido entre el arribo de las ondas de radio y la llegada de las ondas sísmicas, será mucho mayor cuanto más cercano al epicentro se instale el detector y cuanto más alejado esté el receptor de la señal de radio.

El sistema consiste en una red de instrumentos de registro de movimientos fuertes (acelerógrafos) alrededor de la fuente sísmica, radios de comunicación que transmiten la señal a un centro de control, un algoritmo de identificación de eventos y cuantificación de su tamaño, un radio de transmisión de la señal de alerta en caso que se determine que se trata efectivamente de un sismo importante y una red de radios receptores que reciban la señal de alerta. El algoritmo de identificación de eventos podría estar en el campo, como parte de la estación de registro o en el centro de control. Una condición necesaria para el disparo de una alerta es que más de una estación detecte y declare el evento. Esta redundancia es necesaria para reducir el número de falsas alarmas producto de ruidos locales, problemas electrónicos y/o de interferencia en la transmisión de la información.

Para que cualquier sistema de alerta temprana sea eficiente es estrictamente necesaria una preparación intensa de la población, de tal forma que ésta sepa cómo actuar al momento de la alarma. Previo y simultáneamente a la instalación de un sistema de alerta hay que identificar y practicar cada paso a seguir cuando se reciba la alerta. Para esto es necesario realizar simulacros y establecer una rutina de práctica en las cuales, tanto las personas como los



sistemas automatizados, aprendan a identificar el tono de la alerta. La respuesta efectiva de la población en caso de terremotos y aún en casos de falsa alarma, debe ser el componente más importante de todo sistema de alerta temprana.

Estos sistemas de alerta temprana en caso de terremotos ya operan en varios países y han probado ser efectivos. Ejemplos de países, con condiciones tectónicas similares a las de Costa Rica (zonas de subducción activas) y con sistemas de alerta temprana en operación son: México (Espinosa Aranda, *et al.*, 1995), Japón (Nakamura, 1985) y Taiwan (Lee *et al.*, 1995).

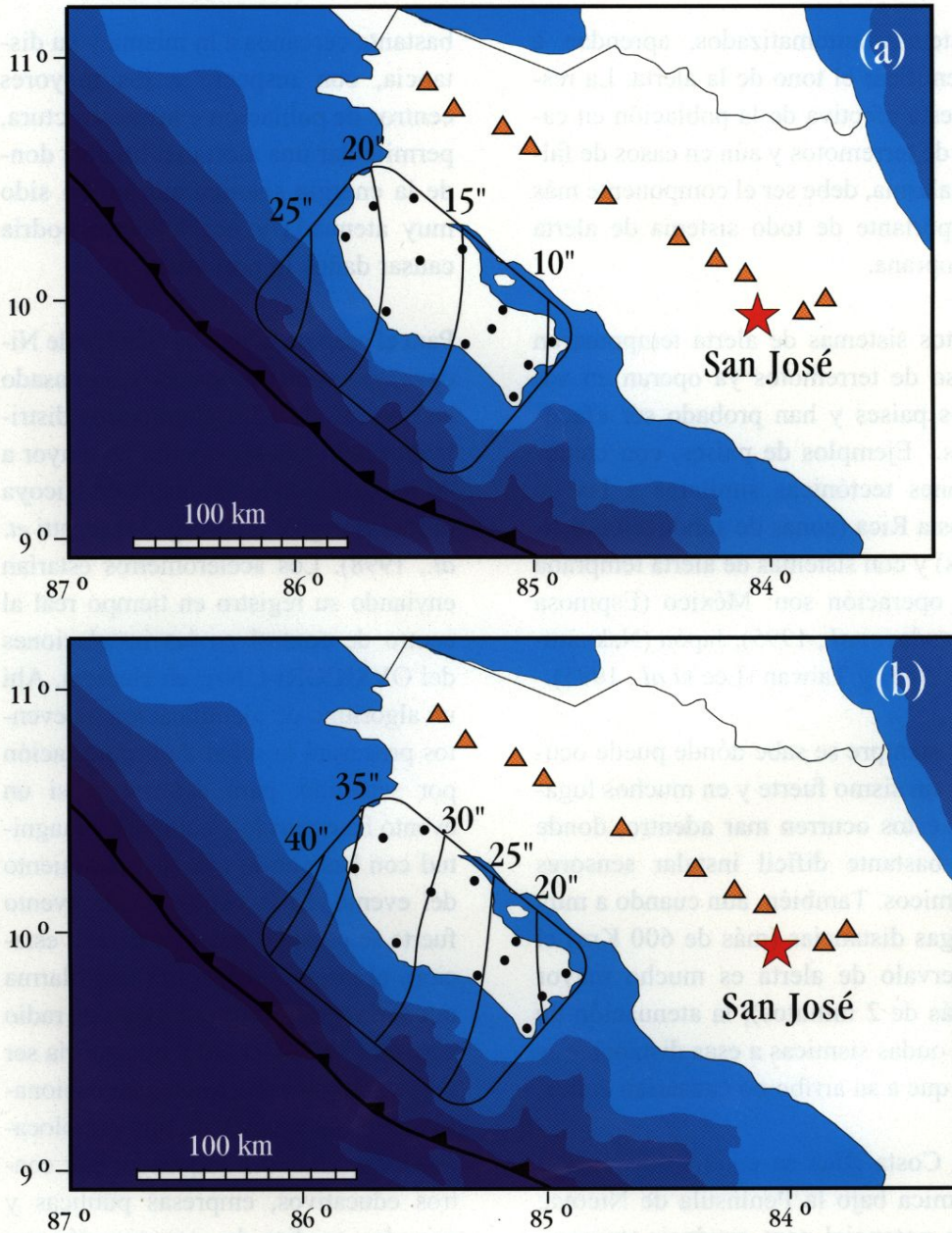
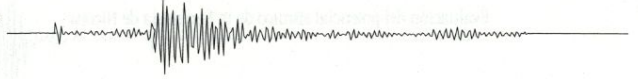
No siempre se sabe dónde puede ocurrir un sismo fuerte y en muchos lugares estos ocurren mar adentro, donde es bastante difícil instalar sensores sísmicos. También, aún cuando a muy largas distancias (más de 600 Km) el intervalo de alerta es mucho mayor (más de 2 minutos), la atenuación de las ondas sísmicas a esas distancias es tal que a su arribo no causarían daños.

En Costa Rica se conoce una fuente sísmica bajo la Península de Nicoya, con potencial para producir terremotos de magnitud importante. La ubicación de esta fuente sísmica permite instalar instrumentos de detección

bastante cercanos a la misma y su distancia, con respecto a los mayores centros de población e infraestructura, permite dar una alerta en lugares donde la energía sísmica aún no ha sido muy atenuada y por lo tanto podría causar daños importantes.

Para el caso de la brecha sísmica de Nicoya, el sistema propuesto está basado en una red de 12 acelerómetros distribuidos, con una separación no mayor a 40 Km, en toda la Península de Nicoya (círculos negros en la Fig. 24) (Protti *et al.*, 1998). Los acelerómetros estarían enviando su registro en tiempo real al centro de control en las instalaciones del OVSICORI-UNA, en Heredia. Ahí un algoritmo de identificación de eventos procesará la señal de cada estación por separado, para determinar si un evento ha ocurrido y estimar su magnitud con base en la tasa de crecimiento del evento. Si la condición de evento fuerte se cumple para más de una estación, el sistema dispararía una alarma que sería transmitida por ondas de radio a todo el Valle Central y que podría ser registrada por receptores convencionales. Estos receptores, de tipo radiolocalizador, podrán ser adquiridos por centros educativos, empresas públicas y privadas, medios de comunicación colectiva y cualquier individuo que quiera adquirirlo. También las empresas





**Figura 24.** Distribución propuesta de acelerógrafos (círculos negros) para el sistema de alerta temprana y tiempos de alerta al Valle Central antes del arribo de las ondas P (a) y S (b), en función de donde se inicie la ruptura.





que brindan servicio de radio-mensajes podrían transmitirlo a sus usuarios.

El lapso disponible entre el instante en que se dispara la alarma y el momento en que llegan las ondas sísmicas depende del lugar donde se inicie la ruptura y del lugar donde se recibe la alerta. Cuanto más cerca al Valle Central se inicie el sismo, menor será ese intervalo de tiempo. De igual manera, cuanto más cerca a la península se reciba la señal de alarma menor será también ese intervalo.

En la Figura 24 se muestran los resultados del modelaje del tiempo entre el momento de detección del sismo por dos estaciones en el campo y la llegada de las ondas sísmicas P y S a la ciudad de San José, respectivamente. Esos intervalos de tiempos están graficados dependiendo de donde se inicie la ruptura de un futuro terremoto en la brecha sísmica de Nicoya y están en el rango de los 10 a 25 segundos para ondas P y de 20 a 40 segundos para las ondas S.

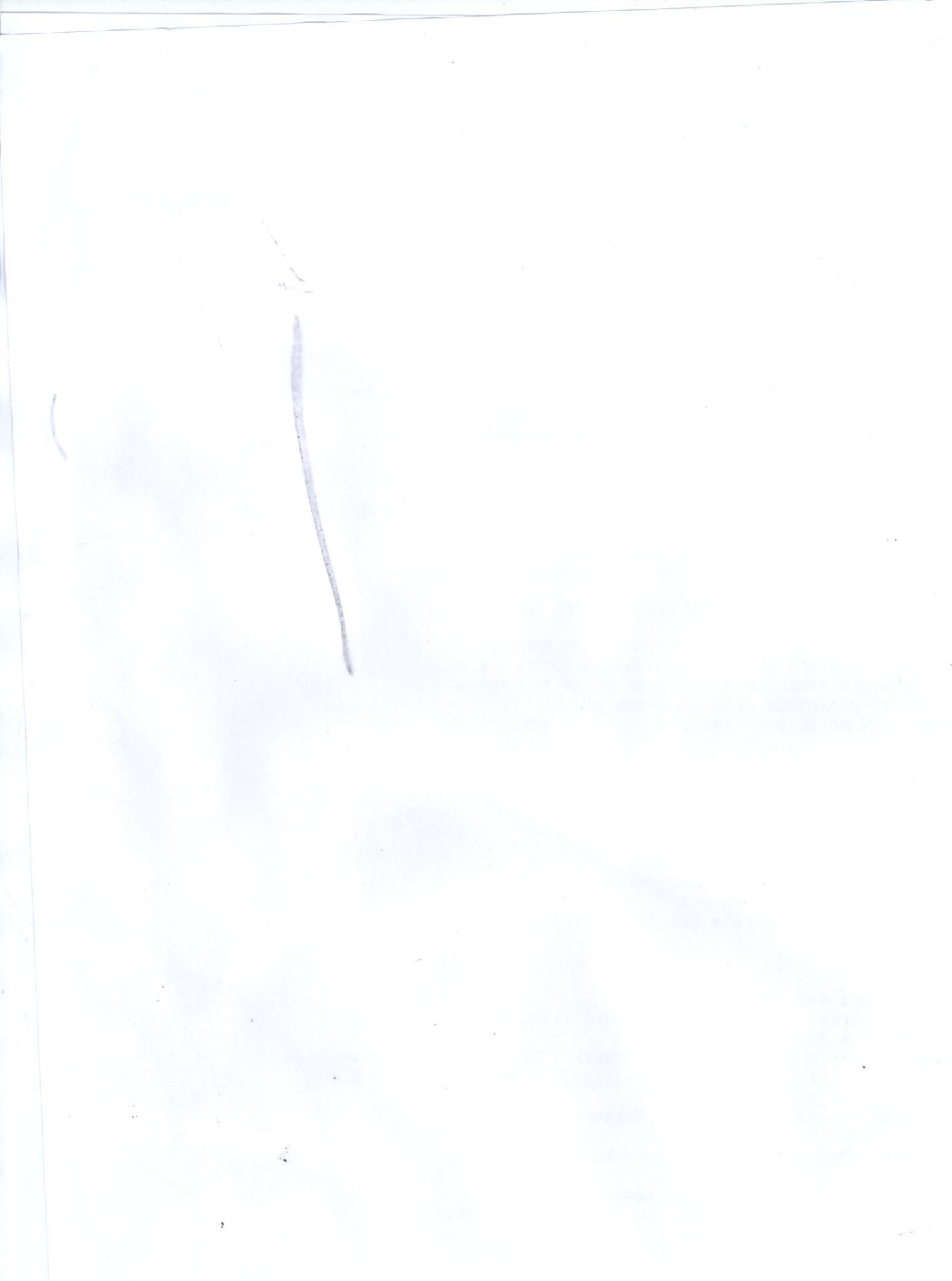
Para saber en realidad cuánto tiempo se dispone entre el momento de disparo de la alarma y la llegada del terremoto, es necesario sustraer a esos valores el tiempo requerido por el algoritmo de detección en la identificación del evento. Según la experiencia en

México, ese intervalo es del orden de 5 segundos y podría disminuir con el uso de procesadores más veloces y algoritmos más efectivos.

De esos dos tipos de ondas sísmicas, son las ondas S las que causarían mayor daño. El tiempo de alerta antes de la llegada de esas ondas, aunque parezca corto, podrían marcar una diferencia importante en el número de víctimas.

En las propuestas se solicitó financiamiento también para que conjuntamente a la instalación de éste sistema de alerta temprana por parte del OVSICORRI-UNA, la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) lleve a cabo un programa de educación a la población sobre acciones a tomar en caso de terremotos. La CNE será también responsable de asesorar a aquellas instituciones que reciban la alarma, en la elaboración de planes de emergencia y simulacros para practicar cómo actuar en la eventualidad de un sismo fuerte. Queda así planteada la propuesta en espera del apoyo de la sociedad costarricense y el patrocinio gubernamental y privado.







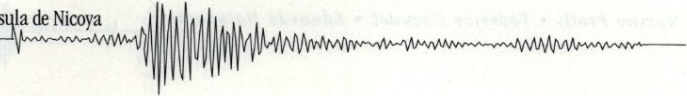
## Glosario

A continuación presentamos un listado de términos utilizados en este trabajo con sus respectivos significados para facilitar la comprensión del mismo. Además, se han incluido algunos términos complementarios, con el fin de brindar a los lectores la oportunidad de enriquecer sus conocimientos sobre sismología básica.









**Acelerógrafo:** Aparato que mide la aceleración del suelo producida por un sismo.

**Acople elástico:** Capacidad de una falla sísmica para resistir la acumulación de esfuerzos tectónicos antes de producir una deformación permanente (deslizamiento). La falla resiste a los esfuerzos tectónicos imperantes (se mantiene acoplada) mientras no sea rebasado el límite elástico de las rocas acopladas. Si se rebasa el límite elástico de las rocas, ellas no pueden acumular más deformación elástica y se produce un rompimiento de la falla que libera esa energía en forma de desplazamiento sísmico.

**Actividad sísmica somera:** Actividad sísmica que ocurre a una profundidad menor de 20 Km.

**Acresión:** En la interacción de dos placas convergentes (zona de subducción) se produce acresión cuando ocurre transferencia de masa de la placa que se subduce a la placa superior, cruzando el plano de falla. El proceso opuesto es la erosión tectónica.

**Alcalinos:** Se refiere a los elementos químicos Representativos del Grupo I formados por Litio, Sodio, Potasio, Rubidio y Cesio.

**Alcalinotérreos:** Se refiere a los elementos químicos Representativos del Grupo II formados por el Berilio, Magnesio, Calcio, Estroncio y Bario.

**Aluviones:** Sedimentos (gravas, arenas y limos) de origen continental depositados por los ríos en su llanura de inundación.

**Árbol de Guanacaste:** *Enterolobium cyclocarpum*. Es el árbol nacional de Costa Rica, muy abundante en la Península de Nicoya.

**Arco externo:** Territorio ubicado en zonas de subducción entre la fosa o trinchera y la base de la cadena volcánica.

**Área de ruptura:** Segmento de la superficie de una falla que se movió o resbaló durante un sismo y sus réplicas.

**Astenósfera:** Región del manto superior terrestre con comportamiento semifluido en el que ocurren las corrientes de convección que mueven las placas tectónicas.

**Aspereza sísmica:** Porción mejor acoplada de una falla. El rompimiento de las asperezas sísmicas es lo que genera los grandes terremotos.

**Batimetría:** Topografía de la superficie del fondo marino.

**Brecha sísmica:** Segmento a lo largo de los límites de placas, que no ha experimentado la repetición de un sismo de gran magnitud por varias décadas y que por tanto es considerado como sitio potencial para la ocurrencia de terremotos futuros. Estas brechas representan un intervalo de tiempo y un espacio geográfico donde no se han liberado grandes cantidades





de energía sísmica, en segmentos de los límites de placas convergentes que han generado en el pasado grandes terremotos. Una brecha sísmica es una zona de acople muy fuerte que puede tener una o varias asperezas sísmicas.

**Brocal (de un pozo):** Se refiere a la estructura de concreto o piedra, por lo general de forma circular, que se construye alrededor de un pozo de agua para prevenir colapsos de sus paredes, prevenir contaminación involuntaria por caída accidental de objetos, animales o personas al pozo y para afianzar las poleas utilizadas para la extracción del agua por métodos mecánicos.

**Buzar (o buzamiento):** Ángulo de inclinación que tiene una falla, o capa de rocas, con respecto a la horizontal.

**Cabo Blanco:** Cabo ubicado en el extremo sur de la Península de Nicoya muy cerca del límite sur del área de ruptura de la brecha sísmica de Nicoya.

**Cabo Velas:** Cabo ubicado en la costa noroeste de la Península de Nicoya muy cerca del límite norte del área de ruptura de la brecha sísmica de Nicoya.

**Carga litostática:** Es la carga o presión que soporta el medio a cierta profundidad como resultado del peso de la columna de roca que se encuentra por encima del mismo.

**Ciclo sísmico:** Historia sísmica de una región que presenta eventos fuertes e intermitentes.

Cada ciclo sísmico se cierra una vez que ocurre un evento de gran magnitud y su secuencia de réplicas.

**Circumpacífico:** Región continental e insular que rodea al Océano Pacífico.

**Convergencia de placas:** Proceso que ocurre al chocar dos placas tectónicas. Si una placa se introduce por debajo de la otra genera entonces una zona de subducción.

**Deformación cortical:** Cambio en la forma de las rocas de la corteza terrestre producto de los esfuerzos tectónicos.

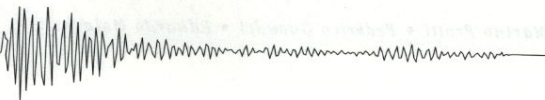
**Deformación elástica:** Deformación no permanente de las rocas como producto de los esfuerzos tectónicos.

**Deformación visco-elástica:** Se refiere a la deformación inducida en una falla que es en parte producida por la elasticidad de las rocas (sin producir deformación permanente) y en parte producida por la capacidad de las rocas de fluir como un cuerpo viscoso (produce deformación permanente).

**Doblamiento de placas:** Cambio de forma que ocurre en las placas tectónicas cuando éstas se introducen por debajo de otras en zonas de subducción.

**Dona de Mogi:** Se trata de un patrón de liberación de energía causado por la presencia de una aspereza que acumula gran cantidad de





energía sísmica, mientras que la región que la rodea mantiene actividad sísmica. Esto da como resultado un patrón, que visto en planta, parece una dona o rosquilla, en donde la aspereza se ubica exactamente en donde no ocurren sismos (centro) por la existencia de un acople muy fuerte.

**Dorsal del Pacífico Este:** Zona de fractura que separa a la placa del Pacífico de las placas del Coco, Nazca y Antártica. Constituye una cadena volcánica submarina.

**Erosión tectónica:** En la interacción de dos placas convergentes (zona de subducción) se conoce como erosión tectónica a la erosión o pérdida de materiales de la placa superior, como resultado de la subducción de la placa inferior.

**Esfuerzo (tectónico):** La fuerza a que un cuerpo está sometido, por unidad de área, como resultado de los movimientos de las placas tectónicas a nivel global.

**Esfuerzos tensionales:** Se trata de esfuerzos que tienen sentido contrario (divergente) y que tratan de estirar la corteza terrestre como resultado de su presencia.

**Esfuerzos compresionales:** Se trata de esfuerzos que tienen sentido contrario (convergente) y que tratan de acortar la corteza terrestre como resultado de su presencia.

**Falla:** Fractura o zona de fracturas a lo largo de la cual ha habido desplazamiento relativo entre

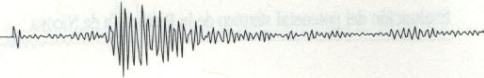
los lados (bloques) de la fractura en forma paralela a la misma. El desplazamiento puede ser de pocos milímetros a muchos kilómetros.

**Fluidos de subducción:** Agua y otros líquidos que normalmente se encuentran en forma intersticial en las rocas de una placa que se subduce. Muy cerca de la fosa se forman salidas de fluidos de subducción que pueden generar volcanes de barro y otras manifestaciones de la deshidratación por compresión de los poros de los sedimentos de la corteza terrestre que se subduce.

**Intensidad sísmica:** Medida de los daños ocurridos en un lugar como resultado de un sismo, o medida, cuando no hay daños, de la forma en que las personas sintieron el sismo. La intensidad sísmica disminuye con la distancia al epicentro. La Escala de Intensidades más utilizada es la Escala Modificada de Mercalli que consiste de XII grados de intensidad (indicados por medio de números romanos). Por ejemplo: la intensidad II se asigna a un sismo sentido solo por personas en reposo, la intensidad VI se asigna a un sismo sentido por todos, la intensidad VII se asigna a un sismo que produce daño moderado en algunas estructuras, la intensidad X se asigna un sismo que produce destrucción en edificios bien construidos.

**Islas Oceánicas (fuente de magmas de):** De acuerdo con la discusión de la petrogénesis de un margen continental activo o un arco de islas, se habla de la fuente de magmas de islas oceánicas al describir la componente de





los magmas originada por fusión parcial de un manto que ha sido enriquecido previamente en elementos incompatibles o que no ha sufrido eventos anteriores de fusión parcial. La fusión parcial de esta fuente de magmas genera magmas enriquecidos en elementos químicos conocidos como incompatibles, que al iniciarse la fusión parcial del manto, se incorporan preferiblemente a la fracción fundida (Potasio, Rubidio, Cesio, Uranio, Cerio y Lantano). El extremo de este proceso de enriquecimiento ocurre, por ejemplo, en Aguas Zarcas de San Carlos, donde basaltos shoshoníticos formaron conos volcánicos monogenéticos hace menos de 10.000 años. Estos están formados por basaltos similares a los de los volcanes activos pero enriquecidos extraordinariamente en elementos alcalinos, especialmente Potasio.

**Licuefacción:** Proceso mediante el cual altas aceleraciones del suelo, provocadas por el paso de las ondas sísmicas a través de un medio constituido por sedimentos (arenas o gravas) de diámetros muy similares entre sí (bien escogidos y sin arcilla entre los clastos), saturados de agua, poco consolidados y con espesores significativos (mayores a los 7 m), producen un reacomodo de los granos y la expulsión del agua que contiene. Esto produce una reducción importante en el volumen del medio y el hundimiento de las estructuras construidas sobre el mismo. Los sedimentos licuables son por lo general aquellos depositados por un río o por la acción de las corrientes costeras, que tienen un espesor significativo y un nivel freático o tabla de agua subterránea muy cercana a la superficie. La li-

quefacción se produce por lo general a distancias menores de 50 Km del epicentro de sismos de gran magnitud mayor a 7.0 grados. Es posible que construcciones levantadas siguiendo las especificaciones de códigos de construcción sufran daños significativos al producirse licuefacción si no siguen las especificaciones que establecen los códigos de cimentaciones.

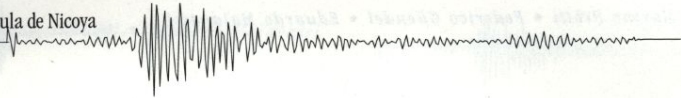
**Litósfera:** Porción rígida más externa del globo terrestre. Incluye la parte más externa del manto superior, por encima de la astenósfera y toda la corteza terrestre.

**Magnitud:** Es una medida de la cantidad de energía liberada por un sismo que se establece a partir de parámetros obtenidos directamente de los sismogramas. Debido a problemas de saturación, la tradicional escala empírica de magnitud de Richter, está, poco a poco, siendo sustituida por la escala de magnitud de momento sísmico. Esta última está mejor relacionada con parámetros físicos del sismo, tales como: área de ruptura y cantidad de deslizamiento sísmico.

**Mecanismo focal:** Es una representación gráfica del movimiento relativo entre los bloques de una falla. Se obtiene directamente de los sismogramas y permite conocer el tipo de esfuerzos que causaron el sismo, el tipo y geometría de la falla en la que ocurrió el evento.

**Microsismos:** Sismos de magnitudes menores que 2.0. En algunos casos se pueden considerar





microsismos eventos de hasta 3.0 grados de magnitud.

**Momento Sísmico (Mo):** Medida directamente proporcional a la magnitud de un sismo. Es el producto del área de ruptura por la magnitud del vector de deslizamiento sísmico, multiplicada por una constante (coeficiente de rigidez) en unidades cgs.

**Período presísmico:** Períodos de pocos años a meses antes del evento principal que descarga la mayor parte de la energía sísmica acumulada en una falla.

**Período cosísmico:** Período de algunos segundos a pocos minutos en que está ocurriendo la ruptura de la falla y se están generando las ondas sísmicas.

**Período postsísmico:** Período de varios meses después de la ruptura principal de una falla. Durante ese período se registran sismos réplicas del evento principal y la corteza terrestre se deforma para acomodarse a los cambios producidos por el evento principal.

**Período intersísmico:** Es el intervalo de tiempo entre dos eventos fuertes que cierran dos ciclos sísmicos.

**Permeabilidad:** Un material es permeable cuando tiene poros interconectados entre sí, lo que le permite dejar pasar líquidos y gases a través de sí. Es conveniente hacer notar que todas las rocas permeables son porosas, pero

no todas las rocas porosas tienen poros interconectados y por lo tanto no son necesariamente permeables.

**Petrogénica (petrogénesis):** Una rama de la petrología que estudia el origen de las rocas y más específicamente el origen de las rocas ígneas que son producidas por ascenso de magmas. En el contexto de un margen continental activo o arco de islas se discute acerca del aporte relativo (intercambio de masas) de tres componentes para la formación de los magmas: aporte por fusión parcial del manto, aporte de la placa que se subduce y aporte de la corteza que se funde al entrar en contacto con los magmas en ascenso.

**Porosidad:** Un material es poroso cuando tiene poros o espacios llenos de aire. Las arcillas tienen una gran cantidad de poros llenos de aire, pero no por ello son necesariamente permeables.

**Punto caliente (del manto terrestre):** Se refiere a varias zonas fijas de ascenso de masa y calor en el manto, por debajo de la astenósfera, que generan grandes volúmenes de magma. Estos magmas atraviesan la astenósfera y la litósfera (placas tectónicas) y producen los volcanes de puntos calientes. El movimiento de las placas sobre los puntos calientes (fijos) produce cadenas lineales de volcanes, como es el caso de las islas de Hawai y de Galápagos.





**Rebote elástico:** Esta teoría propone que el fallamiento se produce como consecuencia de la liberación rápida de energía elástica que se acumula lentamente en la corteza terrestre como resultado de los esfuerzos tectónicos. Inmediatamente antes de la ruptura, la energía liberada por fallamiento es enteramente energía potencial almacenada como extensión elástica de las rocas que se encuentran a ambos lados de una falla. En el momento de la ruptura, las rocas que se encuentran a ambos lados de una falla regresan a una posición en que quedan sometidas a niveles más bajos de esfuerzos.

**Recurrencia (Período de Recurrencia):**

Cuando se asume el modelo que los sismos se repiten en el tiempo, en forma periódica para una determinada región y se cuenta con un historial sísmico suficientemente grande, entonces, es posible calcular el tiempo promedio que transcurre entre cada sismo de gran magnitud o sea el período de recurrencia o retorno.

**Red Mundial de Estaciones Sismográficas**

**Estandarizadas (WWSSN):** Red sismográfica de estaciones de período largo, con parámetros instrumentales similares, utilizada para el registro y ubicación de grandes sismos a nivel global. Esta red ha sido fundamental en la investigación sismológica de la estructura interna del manto y el núcleo terrestre, y para documentar la ocurrencia de grandes sismos en regiones del mundo que carecían de redes sismográficas locales.

**Réplicas:** Son los sismos que siguen a la ruptura principal de una falla. Dependiendo de la magnitud del evento principal y de las características de la falla, pueden registrarse por períodos desde solo pocas horas hasta varios años.

**Represamientos efímeros:** Represamientos del cauce de un río causados por obstrucción parcial del curso de las aguas. Este represamiento puede ocurrir por deslizamientos o por levantamiento diferencial de la corteza terrestre. Son efímeros por cuanto la corriente de agua acaba por erosionar la obstrucción.

**SEIZE:** Siglas en inglés de "Seismogenic Zone Experiment" que en español corresponde a "Experimento de Zonas Sismogénicas". Se trata de un proyecto de investigación que estudia la ubicación y características de los límites superior e inferior de las zonas generadoras de grandes sismos en las zonas de subducción de Nicoya en Costa Rica y Nankai en Japón.

**SFO:** Sismómetro de fondo oceánico, OBS (Ocean Bottom Seismometer en inglés). Se trata de sismógrafos que son instalados, por un barco oceanográfico, en el fondo del mar para mejorar la cobertura de redes sismográficas en tierra firme.

**Sismicidad interplaca:** Se refiere a la actividad sísmica producida a lo largo de los límites donde entran en contacto dos placas tectónicas.





**Sismicidad intraplaca:** Se refiere a la sismicidad producida por ruptura interna de una placa.

**Sismo:** Liberación de energía producida por la ruptura repentina de una falla.

**Sismo extensivo:** Sismo originado en una falla sometida a esfuerzos tensionales o distensivos.

**Sistemas Globales de Posicionamiento (GPS):** Se trata de aparatos que al recibir señales de los satélites pueden determinar su posición (latitud, longitud y elevación) con gran precisión. Se utilizan para hacer trabajos de topografía y cuando tienen alta precisión pueden utilizarse para hacer estudios de deformación cortical.

**Strainmeter (extensiómetro):** Aparato que sirve para medir las tasas de deformación como resultado del régimen de esfuerzos.

**Subducción:** Proceso mediante el cual una placa tectónica se introduce por debajo de otra. Las zonas de subducción desarrollan, por lo general, un arco volcánico o margen continental activo, constituido por una cadena volcánica y una fosa submarina, o trinchera, aproximadamente paralelas.

**Subsidencia:** Hundimiento de la corteza terrestre como consecuencia de la acción de las fuerzas tectónicas o del movimiento de una falla.

**Tasa de convergencia:** Velocidad de acercamiento entre dos placas tectónicas. Se expresa en centímetros o milímetros por año.

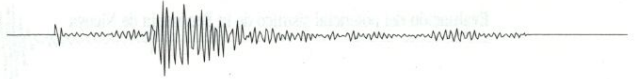
**Tectónica:** Rama de la geología que estudia la estructura de las rocas, las formas externas que resultan de la deformación de la corteza terrestre y los procesos que provocan esa deformación.

**Tensor de momento:** Se trata de una representación vectorial del mecanismo de ruptura de un evento sísmico. Se obtiene directamente de los sismogramas, brinda información sobre el tipo de movimiento en una falla, la geometría de la misma y provee la cantidad de momento sísmico asociado al evento.

**Toleítica (fuente de magmas):** En la discusión de la petrogénesis de un margen continental activo o arco de islas, se habla de una fuente de magmas toleítica, al describir la componente de los magmas originada por la fusión parcial de un manto previamente empobrecido por eventos de fusión parcial anteriores. Esto genera magmas empobrecidos en elementos que, al iniciarse la fusión parcial del manto, se incorporan preferencialmente a la fracción fundida y que son conocidos como elementos incompatibles (Potasio, Rubidio, Cesio, Uranio, Cerio y Lantano).

**Trasarco:** El territorio trasarco, en un margen continental activo (zona de subducción), se encuentra detrás del arco volcánico o sea detrás de las sierras volcánicas.





**Trinchera (fosa):** Depresión profunda, de paredes muy empinadas, angosta y alargada que se encuentra en el fondo marino, en la región donde dos placas convergentes inician el proceso de subducción.

**Trinchera Mesoamericana:** Depresión profunda, de paredes muy empinadas, angosta y alargada ubicada entre 60 y 100 Km mar afuera de la costa del Pacífico del istmo centroamericano. Se extiende desde el istmo de Tehuantepec en el sur de México hasta el sur de Punta Buriaca, cerca de la frontera Costa Rica - Panamá.

**Tsunami (maremoto):** Levantamiento repentino del nivel del mar producto de la deformación del fondo oceánico causada por un fuerte terremoto. Los tsunamis viajan en el océano abierto en forma de ondas que tienen distancias, de cresta a cresta, de varios kilómetros, sin embargo, al acercarse a una zona costera poco profunda, la onda tiende a disminuir la distancia entre cresta y cresta y aumentar su altura. Esta transformación produce olas de hasta decenas de metros que pueden penetrar distancias significativas tierra adentro por la llanura costera y estuarios.

**Velocidad de ruptura:** Velocidad a la cual se propaga la ruptura en una falla como consecuencia de un terremoto.

**WWSSN:** Ver Red Mundial de Estaciones Sismográficas Estandarizadas.

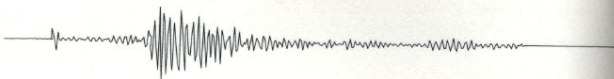
**Zona de acople:** Zona en que ambos bloques de una falla están acoplados elásticamente (mecánicamente). Es en esta zona donde se acumula la energía que será liberada, repentinamente, por sismos de gran magnitud.



## Referencias bibliográficas

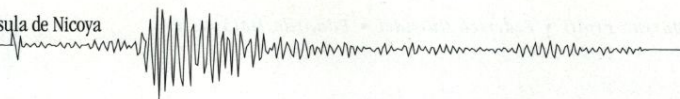
- Abe, K. 1979 Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data, *J. Geophys. Res.*, 84: 1561-1568.
- Abe, K. 1981 Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 27: 72-92.
- Abe, K., y S. Noguchi 1983 Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1897-1917, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 32: 45-59.
- American Geological Institute 1962 *Dictionary of Geological Terms*, Dolphin Books, Doubleday & Co, Inc., New York, 548 p.
- Bee, B. 1999 Rapid Quaternary uplift of marine terraces: Cabo Blanco to Montezuma area, Península de Nicoya, Costa Rica, in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*, Carleton College, 168-171.
- Burgette, R.. 1999 Rate and style of Holocene uplift in response to subducting seamounts, Malpaís area, Península de Nicoya, Costa Rica; in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*, Carleton College, 172-175.
- Burton, E. 1999 The marine terrace record of Holocene uplift, Península de Nicoya, Costa Rica, in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*, Carleton College, 176-179.
- Claypol, A. 1999 Faults and folds in the Cabo Blanco Formation, Península de Nicoya, Costa Rica; in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*, Carleton College, 196-199.





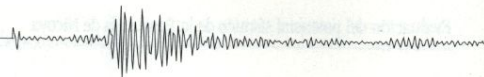
- Cooke, J. 1999 Fore arc deformation in response to subducting seamounts, Península de Nicoya, Costa Rica; in Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology, Carleton College, 180-183.
- De Mets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus y S. Stein 1990 Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101:425-478.
- Dewey, J. W. 1971 Seismicity studies with the method of joint hypocenter determination; PhD. Dissertation, University of California, Berkely..
- Dixon, T. 1993 GPS Measurement of relative motion of the Cocos and Caribbean plates and strain accumulation across the Middle America Trench, *Geophys. Res. Lett.*, 20-20: 2167-2170.
- Dmowska, R., J. R. Rice, L. C. Lovison y D. Josell 1988 Stress Transfer and Seismic Phenomena in the Coupled Subduction Zones During the Earthquake Cycle, *Jour. Geophys. Res.* Vol. 93, B7, 7869-7884.
- Dmowska, R. y L.C. Lovison 1992 Influence of Asperities along subduction interfases on the stressing and seismicity of Adjacent areas; *Tectonophys.*, 211: 23-43.
- Dmowska, R., G. Zheng, y J.R. Rice, 1996 Seismicity and Deformation at Convergent margins due to heterogeneous Coupling, *Jour. Geophys. Res.*, 101-B2: 3015-3029.
- Dziewonski, A.M., G. Ekström y M.P. Salganik 1992 Centroid-moment tensor solutions for October-December, 1991, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 74: 89-100.
- Dziewonski, A.M., G. Ekström, y M.P. Salganik 1991 Centroid-moment tensor solutions for April-June, 1991, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 71: 6-14.
- Espinosa Aranda, J.M., A. Jiménez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostrosa y S. Maldonado, 1995 Mexico City Seismic Alert System; *Seismol. Res. Lett.* 66-6: 42-52.
- Evernden, J.F. y J.M. Thomson 1988 Predictive Model for Important Ground Motion Parameters Associated with Large and Great Earthquakes, *Geol. Surv. Bull.* 1838: 27 p.
- Fan, G.W., S.L. Beck y T.C. Wallace 1993 The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica aftershock sequence: evidence for a transcurrent plate boundary; *Jour. Geophys. Res.*, 98: 15,759-15,778.
- Feldman, L. H. 1984 A catalog of historical documents pertaining to the earthquake damage in Costa Rica and Panamá; unpublished manuscript, 115 p.
- Fisher, D.M., T.W. Gardner, J.S. Marshall y W. Montero 1994 Kinematics Associated With Late Tertiary and Quaternary Deformation in Central Costa Rica: Western Boundary of the Panamá Microplate; *Geology*, 22: 263-266.
- Gardner, T.W., E. C. Beutner, J.S. Marshall, D. J. Merritts y M. Protti 1999 The effects of seamount subduction on forearc kinematics and origen of the Nicoya Complex,





- Pacific coast, Costa Rica; in Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology; Carleton College; 162-167.
- Gieskes, J., C-F. You, E. Zuleger, E. A. Silver, D. Orange, L.D. Abott, B. McAdoo, J. Galewski, L.M. Kahn, L. Ferioli, K.D. McIntosh, E. Sreaton, M. Protti y M. Langseth 1994 Chemistry of Interstitial Waters of Alvin push Cores (APC) in Black Clam-hosting sediments: Costa Rica Accretionary Prism; EOS Trans., Am. Geophys. Un., 75- 16: 324.
- Goes, S.D.B., A A. Velasco, S. Schwartz y T. Lay 1993 The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw=7.7) earthquake and its tectonic implications: a broadband seismic study, J. Geophys. Res., 98: 8127-8142.
- González-Viquez, C. 1910 Temblores, Terremotos, Inundaciones y Erupciones Volcánicas en Costa Rica, 1608-1910, Tipografía de Avelino Alsina, San José, Costa Rica, 200 p.
- 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.
- Güendel, F., K. C. McNally, J. Lower, M. Protti, R. Sáenz, E. Malavassi, J. Barquero, R. Van Der Laet, V. González, C. Montero, E. Fernández, D. Rojas, J. Segura, A. Mata y Y. Solís 1989 First results from a new seismographic network in Costa Rica, Central America, Bull. Seismol. Soc. Am., 79: 205-210.
- Güendel, F., C. Montero, V. González, J. Segura, E. Malavassi, E. Fernández, F. de Ovaldía, D. Rojas, H. Rodríguez, A. Mata, R. Van der Laet, V. Barboza, O. Barrantes, T. Marino y K. McNally 1991 Mainshock-aftershock sequence associated with the Costa Rica earthquake (Ms=7.5) of April 22, 1991, Eos Trans., Am. Geophys. Un., 72: 300.
- Güendel, F. y J. Pacheco 1992 The 1990-1991 seismic sequence across central Costa Rica: evidence for the existence of a micro-plate boundary connecting the Panama deformed belt and the Middle America trench, Eos Trans., Am. Geophys. Un., 73: 399.
- Güendel, F.; y M. Protti 1998 Sismicidad y sismotectónica de América Central; Física de la Tierra, 10: 19-51.
- Güendel, F. y M. Protti 2000 Actividad Sísmica Frente a las Costas de Quepos, Pacífico Central, Costa Rica, Revista de Vulcanología, Sismología y Tectónica, OVSICORI-UNA .
- Güendel, F., M. Protti y V. González 2000 Sismicidad en pares (duplets) frente a las costas de Quepos, Pacífico central, Costa Rica; Volumen de resúmenes presentados ante el I Congreso de Investigación de Universidades Estatales, San José, Costa Rica.





- Gutenberg, B. y C. F. Richter 1954 *Seismicity of the Earth and Associated phenomena.*, Princeton, N.J., University Press.
- Hanks, T. y H. Kanamori 1979 A moment magnitude scale; *Jour. Geophys. Res.*, 84- B5: 2348-2349.
- Harvard University 1977-1999 Harvard Centroid Moment Tensor Catalog; Seimology group, Harvard University; <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>
- Hernández, E. 1999 Leveling techniques applied to the southern part of the Nicoya peninsula in northern Costa Rica; in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*; Carleton College; 212-214.
- Hey, R. N. 1977 Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88: 1404-1420.
- Hilge, B. y Alvarez, J. 1994 *Temblores, terremotos y otros desastres naturales*; Reporte de proyecto; Inst. Pan. Geog. e Hist.; Esc. de Historia y OVSICORI, Universidad Nacional (inédito).
- Jacob, K.H. y J. Pacheco 1991 The M-7.4 Costa Rica earthquake of April 22, 1991: tectonic setting, teleseismic data, and consequences for seismic hazard assessment, *Earthquake Spectra*, 7- B:
- Kahn, L. M.; E. A. Silver; D. Orange; B. McAdoo; L. Ferioli; K. D. McIntosh; L. Abbot; E. Screaton; M. Protti; J. Galewsky; M. Langseth; E. Zuleger; C-F. You y J. Gieskes 1994 Evidence of Fluid Venting from the Costa Rica Accretionary Prism; *EOS Trans., Am. Geophys. Un.*, 75- 16: 324.
- Kahn, L. M.; Silver, E.; Orange, D.; Kochevar, R. y B. McAdoo 1996 Surficial evidence of fluid expulsion from the Costa Rica accretionary prism; *Geophys. Res. Lett.*, 23:887-890.
- Kehrwald; N. 1999 A tale of eight terraces: Landscape response to active tectonics of the southern Península de Nicoya, Costa Rica; in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*; Carleton College; 184-187.
- Kelleger, J. L., Sykes, L. y J. Olivier 1973 Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to mayor plate boundaries of the Pacific and the Caribbean; *Jour. Geophys. Res.*, 78: 2547-2585.
- Kimura, G., Silver, E., Blum, P. y otros 1997. *Proc. ODP, Init. Repts.*, 170; College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Kraal, E. 1999 Bedrock incision and knickpoint processes in streams along an uplifting coast, southern Península de Nicoya, Costa Rica; in *Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology*; Carleton College; 188-191.





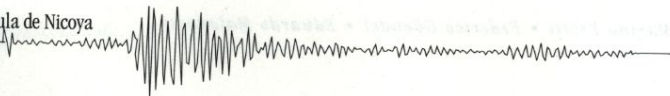
- Krull, A. 1999 Fault kinematics in the Mal País sandstones of the Península de Nicoya, Costa Rica; in Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology; Carleton College; 192-195.
- Langseth, M. y E. Silver 1994 Thermal Regime of the Costa Rica Accretionary Complex; Prism; EOS Trans. Am. Geophys. Un., 75- 44: 672.
- Langseth, M. y Silver, E. 1996 The Nicoya convergent margin: a region of exceptionally low heat flow; Geophys. Res. Lett., 23: 891-894.
- Langston, C.A. y D.V. Helmberger 1975 A procedure for modeling shallow dislocation sources, Geophys. J. R. Astr. Soc., 42: 117-130.
- Lee, W.H.K., T.C. Shin y T.L. Teng 1995 A Prototype Earthquake Warning System in Taiwan: Operation and Results; IUGG, IASPEI XXI General Assembly, Boulder, Co.
- Liu, X. y K. McNally 1993 Quantitative estimates of interplate coupling inferred from outer rise earthquakes, Pure and Applied Geophys, Vol. 140, No. 2, 211-255.
- Lonsdale, P.F. y K.D. Klitgord 1978 Structure and tectonic history of the eastern Panama basin, Geol. Soc. Am. Bull., 89: 981-999.
- 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.
- Lundgren, P., M. Protti, A. Donnellan, M. Heflin, E. Hernández, y D. Jefferson 2000 Deformación cortical de Costa Rica asociada al ciclo sísmico: observaciones por medio de GPS entre 1994 y 1997; resumen presentado ante el I Congreso de Investigación de Universidades Estatales, San José, Costa Rica.
- Malavassi, E. 1991 Magma sources and crustal processes at the southern terminus of the Middle America volcanic arc, PhD. dissertation, University of California, Santa Cruz, 448 p.
- Malavassi E. y Salgado D. 1995 Mapa de susceptibilidad de licuefacción y principales zonas generadoras de sismos con magnitud esperada o probable mayor o igual a 7.0. Versión preliminar. Proyecto de Cooperación Internacional: Amenaza Sísmica Secundaria en Costa Rica, con el aporte del British Geological Survey, Comisión Nacional de Emergencias, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de C. R.
- Marshall, J.S. 1992 Neotectonics of the Nicoya peninsula, Costa Rica: a look at forearc response to subduction at the Middle America Trench; MSc. dissertation, University of California, Santa Cruz, 196 p.
- Marshall, J. S., D. M. Fisher y T.W. Gardner 1993 Western margin of the Panama microplate, Costa Rica: kinematics of faulting along a diffuse plate boundary, Geol. Soc. Am. Abstracts with programs 25- 6: A-284.





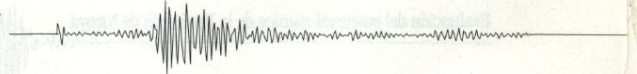
- Marshall, J.S. y R. S. Anderson 1995 Quaternary uplift and seismic cycle deformation, Península de Nicoya, Costa Rica, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107- 4: 463-473.
- Marshall, J. S. y J. Brenes 1989 Entrevistas a pobladores de la costa entre Sámara y Nosara que vivieron el terremoto de Nicoya de 1950; cinta magnética traducida al inglés por E. Malavassi; (inédito).
- Mc Graw-Hill 1987 *Encyclopedia of the Geological Sciences*, Mc Graw-Hill Book Co., 915 p.
- McNally, K. C. y J. B. Minster 1981 Nonuniform Seismic Slip Rates Along the Middle America Trench, *Jour. Geophys. Res.*, 86- B6: 4949-4959.
- McNally K.C. y F. Güendel 1982 Propuesta para la instalación de una red sismográfica en Costa Rica y un programa para disminuir el riesgo causado por sismos, propuesta de investigación remitida por la Universidad de California en Santa Cruz ante la Oficina para la Asistencia de Desastres en el Extranjero, de la Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos, Santa Cruz, California, 180 p.
- Miyamura, S. 1980 *Sismicidad de Costa Rica*, Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 190 p.
- Mogi, K. 1981 Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting, in *Earthquake Prediction* (D. Simpson and P. Richards editors) Maurice Ewing Series 4, *Am.Geophys. Union*, 43-51.
- Montero, C., J. Segura, E. Malavassi, F. Güendel, V. González, E. Fernández, F. De Ovaldía, D. Rojas, H. Rodríguez, A. Mata, R. Van Der Laet, V. Barboza, O. Barrantes, T. Marino y K. McNally 1991 Observaciones iniciales obtenidas luego del terremoto del 22 de Abril de 1991, Ms=7.4, Valle de la Estrella, Costa Rica, Informe Preliminar, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, OVSICORI-UNA, Heredia, Costa Rica, 27 p.
- Montero, C., V. González, M. Protti, y D. Rojas 1993 Guía para la preparación de la población en caso de terremotos, *Obs. Vulc. y Sism. de C. R.*, OVSICORI-UNA, 11p.
- Montero, C. 1996 Escenarios de Daños para un Terremoto Probable: el Terremoto de Nicoya, Costa Rica; Propuesta para Aspirar a una Beca de Investigación Auspiciada por la Fundación MAPFRE: Reducción de los Riesgos de la Naturaleza, OVSICORI-UNA, 43 p. (inédito).
- Nábêlek, J. 1984 Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves, Ph.D. thesis, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Nakamura, Y. 1985 Earthquake Alarm System of the Japanese National Railways; *Journal of Railway Engineering Research* 42- 10: 371-376.
- NEIC; National Earthquake Information Center Global Seismic Catalog, 1966-1999, U.S. Geological Survey; <http://www.neic.cr.usgs.gov/>





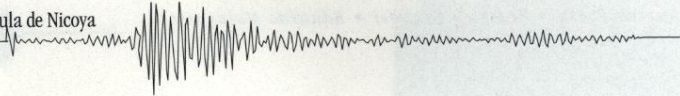
- Nishenko, S.P. 1985 Seismic Potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal, *Jour. Geophys. Res.*, 90-B5: 3589-3615.
- Nishenko, S. P. 1989 Circumpacific seismic potential 1989-1999, U.S. Depart. Int. Geol. Surv., NEIC, open file report 89-86.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Marshall, J.S. 1992 Neotectonics of the Nicoya peninsula, Costa Rica: a look at forearc response to subduction at the Middle America Trench; MSc. dissertation, University of California, Santa Cruz, 196 p.
- OVSICORI-UNA, 1984 a 1999 Catálogo Anual de Temblores 1984 a 1999, *Obs. Vulc. y Sism. de C. R.*, OVSICORI-UNA, Universidad Nacional, Heredia.
- OVSICORI-UNA, 1991, Boletín Sismológico Preliminar Marzo 1991, Mata, A. y Rojas, D. eds. *Observ. Vulc. y Sismol. de C. R.*, OVSICORI-UNA, abril de 1991, 18p.
- Pacheco, J. F. y L.R. Sykes 1992 Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 82- 3: 1306-1349.
- Panagiotopoulos, D.G. 1995 Long-Term Earthquake Prediction in Central America and Caribbean Sea Based on the Time-and Magnitude-Predictable Model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85- 4: 1190-1201.
- Peraldo, G. y W. Montero, W. 1994 Temblores del período colonial de Costa Rica; 1a. ed., Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- Ponce, D.A. y J.E. Case 1987 Geophysical interpretation of Costa Rica, in: Mineral Resources Assessment of the Republic of Costa Rica, U.S. Geol. Surv., Misc. Invest. I-1865: 8-17.
- 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. y S. Schwartz 1994 Mechanics of back arc deformation in Costa Rica: Evidence from an aftershock study of the April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica, earthquake (Mw=7.7). *Tectonics*, 13- 5: 1093-1107.
- Protti, M. Güendel, F. y K. McNally 1994a 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.





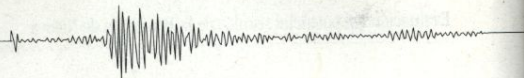
- Protti, M. Güendel, F. y J. Pacheco 1994b Possible Rupture Scenarios of the Future Nicoya (Ms 7.4-7.7) Earthquake, NW Costa Rica, Volumen de Resúmenes de Ponencias Científicas presentadas ante el Noveno Simposio Internacional sobre Pronóstico de Terremotos, San José, Costa Rica.
- Protti, M., Güendel, 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. 1997 What we know and what we could expect from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap; *EOS Trans., Am. Geophys. Un*; 78- 46: 450.
- Protti, M., V. González, E. Malavassi, E. Hernández y F. Güendel, 1998, Potential for the installation of a system in northern Costa Rica for early warning to the capital city of San José, from large subduction earthquakes under the Nicoya peninsula, Intern. IDNDR-Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters, Potsdam, Germany, p. 75.
- Protti, M. 1999a Alerta Temprana a San José por un sismo debajo de la Península de Nicoya, Reunión Hemisférica del Decenio Internacional de Reducción de Desastres Naturales, San José, Costa Rica, [http://www.disaster.info.desastres.net/idndr/hemiscr/memoria/ig\\_sec5.htm](http://www.disaster.info.desastres.net/idndr/hemiscr/memoria/ig_sec5.htm)
- Protti, M. 1999b Oportunidad para la implementación del Sistema Mexicano de Alerta Temprana para Terremotos al Valle Central de Costa Rica por sismos fuertes de subducción en la brecha sísmica de Nicoya; Resumen de ponencia presentada ante el Taller Regional México-Centroamérica sobre Riesgos Geológicos, Ciudad de México, México, julio 14-16.
- Protti, M., Lundgren, P. Stock, J. 1999 GPS monitoring of a mature seismic gap: Nicoya, Costa Rica; Volume of Programs and Abstracts of the International Symposium on GPS Application to Earth Sciences and Interaction with Other Space Geodetic Techniques, 06-10, Tsukuba, Japón.
- Protti, M., S. Schwartz, T. Dixon, V. González, F. Güendel, L. Dorman, D. Sampson, P. Lundgren, E. Hernández, T. Marino 2000a Delimitación de la zona sismogénica del segmento de la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya,





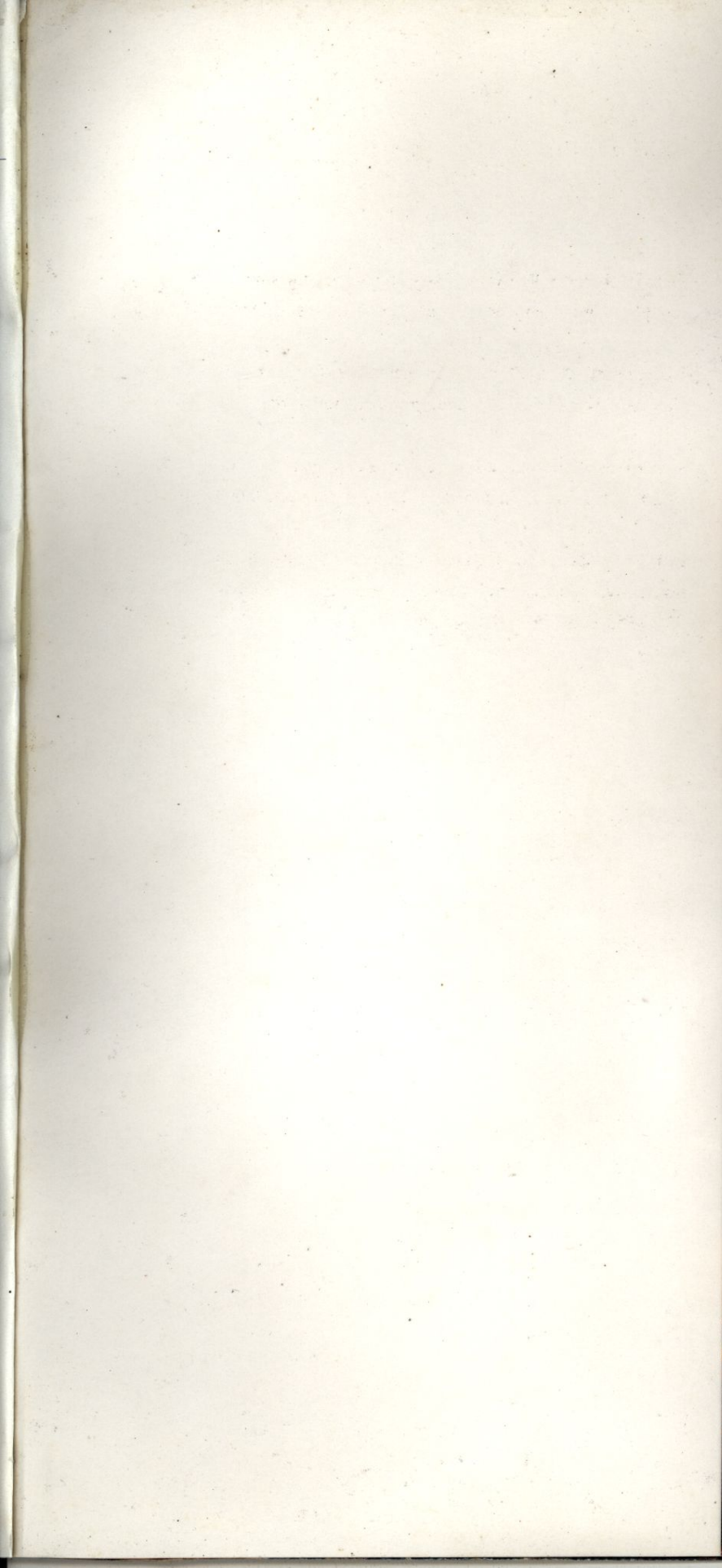
- Costa Rica, volumen de resúmenes presentados ante el I Congreso de Investigación de Universidades Estatales, San José, Costa Rica.
- Protti, M., González, V; Vega, F; Schwartz, S; Sampson, D; Newman, A; DeShon, H; Bilek, S; Dorman, L; Sauter, A; Flueh, E; First Seismic Results from the Nicoya, Costa Rica, SEIZE Initiative; Eos Trans. AGU, 81 (48), Fall Meet. Suppl., 2000.
- Reves, A. 1999 A study of paleomagnetism of the Nicoya Terrane, Costa Rica, in: Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology, Carleton College, 200-203.
- Rojas, W. 1993 Catálogo de sismicidad histórica y reciente en América Central, Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Costa Rica, 91 p.
- Sauter, F. 1997 El entorno tectónico y la amenaza sísmica en Costa Rica, Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Sísmica, I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, La Serena, Chile.
- Sauter, F. 1989 Fundamentos de Ingeniería sísmica -Parte I: Introducción a la sismología, Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Savage, J.C. 1995 Interseismic uplift at the Nankai subduction zone, southwest Japan, 1951-1990. Jour. Geophys. Res., 100-B4: 6339-6350.
- Savage, J.C. y W. Thatcher 1992 Interseismic deformation at the Nankai Trough, Japan, subduction zone. Jour. Geophys. Res, 97- B7: 11,117-11,135.
- Shearer, T. 1999a Geodetic measurements of Holocene deformation in response to subducting seamounts, southern Península de Nicoya, Costa Rica, in: Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology; Carleton College, pp. 208-211.
- Shearer, T. 1999b Geodetic measurements of recent deformation in response to subducting seamounts, southern Península de Nicoya, Costa Rica, Tesis de Bachillerato en Geología, Whitman College, Washington, USA.
- 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.
- Silver, E. A. Orange, D. Langseth, M. McIntosh, K. Gieskes, J. Abbot, L. Sreaton, E. Kahn, L. McAdoo, B. Zuleger, E. You, C-F. Protti, M. Galewsky y J. Ferioli, L. 1994 Importance of Out-of-Sequence Thrusts as Fluid Conduits in the SW Costa Rica Accretionary Complex. EOS Trans., Am. Geoph. Un., 75- 16: .324.
- Silver, E. 1996 Introduction to the special section on fluid flow in the Costa Rica accretionary prism. Geophys. Res. Lett., 23:881.
- Stamski, R.. 1999 Tectonic and geochemical investigation of basalts and associated deep sea sediments in the southern Península de Nicoya, Costa Rica, in: Proceedings of the Twelfth Keck Research Symposium in Geology; Carleton College; 204-207.





- Taylor, M. A. J., G. Zheng, J.R. Rice, D. Stuart, y R. Dmowska 1996 Cyclic Stressing and seismicity at strongly coupled subduction Zones. *Jour. Geophys. Res.*, 101- B4: 8363-8381.
- Tristán, J. F. 1912 El temblor del 21 de junio de 1900, Notas en Anales del Centro de Estudios Sismológicos de Costa Rica, Año 1911, Tipografía Nacional, San José, Costa Rica, p.61-62.
- Ureña, F. 1996 Simulación de un tsunami eventual frente a las costa de la Península de Nicoya y su influencia en el Golfo de Nicoya, Puntarenas y Quepos, Proyecto TIME ( inédito)
- Zheng, G., R. Dmowska, y J.R. Rice 1996 Modelling earthquake cycles in the Shumagin subduction segment, Alaska, with seismic and geodetic constrains. *Journal. Geophys. Res.*, 101- B4: 8383-8392.





ISBN-9968-14-086-4



9 789968 140867





## Evaluación del potencial sísmico de la Península de Nicoya

“Basados en las evidencias físicas, el historial sísmico de la región y en la interpretación de los procesos de deformación y de convergencia, los autores llegan a la conclusión de que la discusión no se centra ya en si ocurrirá o no el gran sismo por debajo de la Península de Nicoya; afirman: el sismo debe y va a ocurrir! Pero fieles a su formación y criterio científico, no ahondan en el tema de cuándo ocurrirá el gran sismo, pues no se cuenta con la información suficiente para contestar dicha pregunta.

El estudio emprendido, como lo aclaran los autores, no trata de una predicción, sino de una evaluación del potencial sísmico de la península de Nicoya, de una hipótesis fundada en consideraciones de la tectónica regional y la historia sísmica de la región, en especial en los modelos físicos de subducción del segmento de Nicoya. Como tal, se trata de una hipótesis y de un pronóstico válidos.

Debemos considerar la presente obra como un llamado, un reto que lanzan los autores al medio científico e institucional para instrumentar la Península de Nicoya y documentar así un sismo de gran magnitud en Costa Rica. Una oportunidad única para registrar instrumentalmente los cambios que ocurren antes, durante y después de un gran sismo. Los resultados de esta empresa serán sin duda una valiosa contribución hacia el perfeccionamiento del pronóstico sísmico.

Con la presente obra, los autores no pretenden crear pánico ante la posible ocurrencia de un gran terremoto, sino tratan de crear conciencia en las autoridades públicas, en el medio científico y profesional, asimismo en el público en general, sobre la imperiosa necesidad de adoptar medidas de prevención y mitigación de los efectos catastróficos del gran evento que han pronosticado. Se trata, por lo tanto, de una advertencia al sector público y a la sociedad en general para prevenir las consecuencias de un gran terremoto en la Península de Nicoya y para reducir el impacto negativo, social y económico, de una catástrofe sísmica”.

*Ing. Franz Sauter*