



**UEN PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS
C. S. EXPLORACIÓN SUBTERRÁNEA**

**LA CRISIS SÍSMICA DE BIJAGUA DE UPALA
(ENERO-MARZO DEL 2002), COSTA RICA**

*Waldo Taylor C.
Rafael Barquero P.
Wilfredo Rojas Q.
Walter Montero P.
Lepolt Linkimer A.*

Área de Amenazas y Auscultación Sismo-volcánica

Setiembre del 2002

LA CRISIS SÍSMICA DE BIJAGUA DE UPALA (ENERO-MARZO DEL 2002), COSTA RICA

*Waldo Taylor C., Rafael Barquero P., Wilfredo Rojas Q.,
Walter Montero P., Lepolt Linkimer A.*

RESUMEN

En el presente informe se analiza la información sismológica obtenida por los instrumentos sismográficos de la RSN, además de los datos de campo recopilados en la zona, tales como: efectos, daños, evidencias de fallamiento activo, así como por fotointerpretación, relacionados con el fuerte sismo y sus réplicas que afectaron la zona de Bijagua de Upala, entre finales de enero y marzo del 2002.

El procesamiento de la información permitió definir las fuentes sísmicas relacionadas con la actividad precursora, el sismo principal y las réplicas. Paralelamente, la recopilación de datos macrosísmicos en la zona hizo posible la elaboración del mapa de intensidades del evento principal de magnitud Mw 5,4.

Se determinó que la sismicidad ocurrida se debió a fallas geológicas superficiales. Los sismos tuvieron profundidades entre 5 y 15 km y estuvieron relacionados principalmente con el sistema de fallamiento de Caño Negro-El Macho y Bijagua.

INTRODUCCIÓN

El día domingo 27 de enero del 2002 un fuerte temblor sacudió la zona de Bijagua de Upala a las 08:49 pm, hora local. El sismo que provocó alarma entre los vecinos de esta localidad, tuvo su epicentro 2 km al noreste de la población de Bijagua de Upala y su magnitud fue Mw 5,4. La sacudida fue bastante fuerte en el sitio, provocando daños leves, como fallas en las bases de casas de madera, pequeños deslizamientos y caída de objetos, así como el pánico entre los vecinos de la zona, algunos de los cuales buscaron refugio en comunidades cercanas como la ciudad de Cañas.

La localización de los eventos se realizó utilizando las estaciones de la red sismológica del OSIVAM y 4 estaciones sismológicas digitales que prestó la compañía Seism Technology, las cuales fueron instaladas a partir del lunes 28 de enero en el área epicentral.

Este informe presenta los resultados de la investigación sismológica realizada por personal de la Red Sismológica Nacional, que gracias al trabajo en equipo, logró procesar gran cantidad de información, visitó, instrumentó y efectuó el monitoreo de inmediato en la zona. Además, se atendió profesionalmente y en forma directa y en conjunto con la Comisión Nacional de Emergencias, las dudas e incertidumbre que reinaba en la comunidad durante los momentos posteriores a la actividad sísmica.

ANTECEDENTES

Tectónica regional

La cordillera volcánica de Guanacaste forma parte del arco interno actual resultado de un proceso activo de subducción de la placa del Coco bajo la Caribe. La cordillera de Guanacaste está formada por una cadena de estrato-volcanes andesíticos del Cuaternario que se alinean aproximadamente en dirección NW-SE, constituidos por rocas piroclásticas, lavas y depósitos fluvio-lacustres. Los depósitos de nubes ardientes constituyen una meseta de ignimbritas de suave pendiente que se extiende a ambos lados de la cordillera. Toda esta serie geológica está sometida a esfuerzos regionales derivados del proceso de subducción y el levantamiento del arco volcánico, dando origen a un complejo sistema de fallas con orientaciones principales NW-SE, NE-SW y N-S.

Históricamente se han registrado terremotos importantes en la cordillera de Guanacaste relacionados con fallas, como fueron los de 1935 y 1941 en Bagaces (Montero y Alvarado, 1988). Más recientemente, en 1984, 1985 y 1987 se registraron enjambres sísmicos en Armenia de Upala (Barquero y Alvarado, 1989). Posteriormente, en 1997 y 1998 hubo enjambres sísmicos en Tierras Morenas y en el volcán Miravalles (Taylor y Barquero, 1999).

CARACTERÍSTICAS DE LA SISMICIDAD

La zona de Bijagua de Upala ha presentando sismicidad baja en los últimos años, con muy pocos eventos. Sin embargo, desde el año 2000 se venían produciendo un promedio de 2 a 3 sismos por mes, con una actividad importante en el mes de setiembre cuando se registraron al menos 15 eventos. La actividad sísmica actual se inició el domingo 27 de enero con varios eventos pequeños ($M < 2,5$) que se empezaron a registrar desde las horas de la tarde de ese día. A las 20:49 (hora local) se produce el evento principal de magnitud Mw 5,4, el cual sacude fuertemente las poblaciones de Bijagua y alrededores. Esta sacudida fue súbita, de carácter trepidatorio y corta duración, acompañada por algunos ruidos subterráneos. Posterior a este evento siguieron una gran cantidad de réplicas, más de 150 durante las doce horas posteriores al evento principal, con magnitudes inferiores a 4,1, y alrededor de 1000 hasta mediados de marzo.

Parámetros del sismo principal

El temblor principal tuvo los siguientes parámetros:

Fecha: Domingo 27 de enero del 2002

Hora local : 20:49

Magnitud: 5,4 (Mw)

Profundidad: 12 km

Ubicación: 2 km al NE de Bijagua.

Intensidades:

VI en Bijagua, Pílon y El Salto: Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. La gente camina inestablemente. Adornos, libros, etc., se caen de las estanterías. Los muebles se mueven o vuelcan.

V en Río Naranjo y San Rafael de Guatuso: Los que están durmiendo se despiertan, los líquidos se agitan, algunos se derraman, las puertas se balancean.

III-IV en Tilarán y Guayabo de Bagaces: Sentido dentro de las casas, los objetos suspendidos oscilan, hay una sensación de mareo. Duración apreciable, las vibraciones son como las de un camión pesado al pasar, las ventanas vibran.

III en Liberia: Vibraciones como las de un camión ligero al pasar, puede no ser reconocido por la gente.

II en el Valle Central: Sentido por personas en posición de descanso.

Distribución temporal de la actividad sísmica

La crisis sísmica se inició el 27 de enero después de las 15 hrs (hora local) con varios sismos, tres de ellos sentidos por la población en Bijagua (15:11, 15:33 y 15:40). Luego se produjo el sismo principal a las 20:49 y continuaron gran cantidad de réplicas (más de 150) durante las doce horas siguientes. El día miércoles 30, a las 01 hrs., se vuelve a registrar otro evento importante de magnitud 4,1 (Md) que también fue sentido por los vecinos de la zona y hay un nuevo incremento en el número de eventos registrados (**Fig. 1 y 2**). De estos sismos, 19 fueron reportados como sentidos por los vecinos de la zona de Bijagua y alrededores.

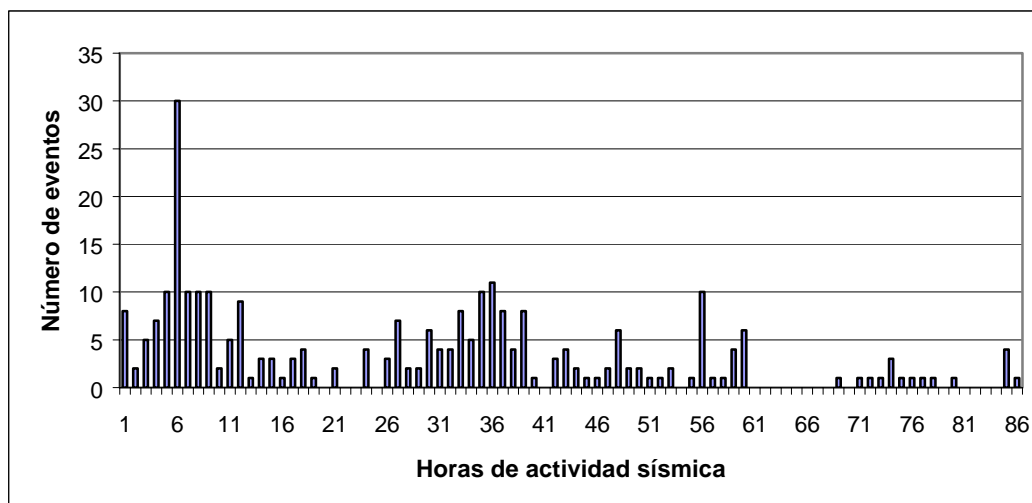


Fig. 1: Número de sismos registrados durante las 86 horas posteriores al inicio de la crisis sísmica, desde las 15 hrs. del día domingo 27 de enero del 2002 hasta las 05 hrs del día 31 de enero.

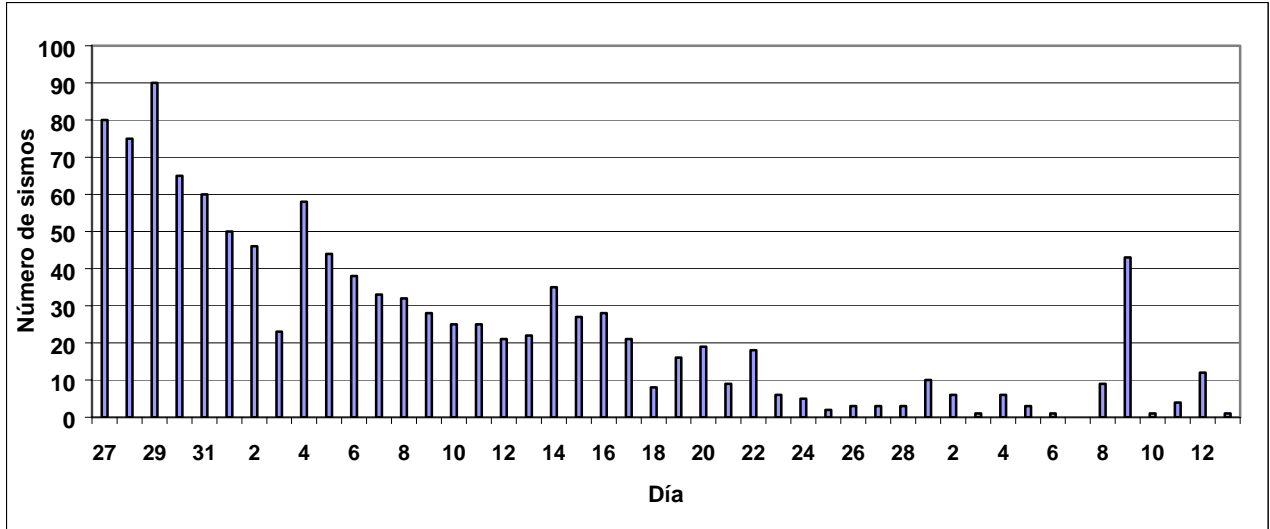


Fig. 2: Distribución diaria de sismos desde el 27 de enero hasta el 14 de marzo

Distribución espacial de la actividad sísmica

Los eventos localizados durante la crisis sísmica hasta el día 14 de marzo, se distribuyen en varios sectores principales; uno con una orientación aproximada de NW-SE desde el flanco nor-noreste del macizo del volcán Miravalles, hasta el sector NE de Bijagua de Upala (**Fig. 3**). Otro foco de actividad sísmica se localiza al NW del poblado Río Naranjo y un tercer grupo se localiza en el flanco este del volcán Tenorio. La profundidades de los sismos son por lo general bastante superficiales (entre 0 y 15 km) con la particularidad de que los eventos del sector NW tienen profundidades entre 5 y 10 km y los del sector SE entre 10 y 15 km, es decir, la profundidad se incrementa hacia el SE (**Fig. 4 y 5**).

La mayoría de las réplicas registradas son de baja magnitud ($M < 2,5$) por lo que fueron relativamente pocos los eventos sentidos por los pobladores de la zona. Se reportaron como sentidos unos 20 eventos desde el domingo 27 de enero por la tarde y luego del evento de la madrugada del miércoles 30 ($M 4,1$). Posteriormente, se sintieron unos pocos eventos en las semanas siguientes. La sismicidad se extendió por una distancia de unos 15 km en dirección NW a SE.

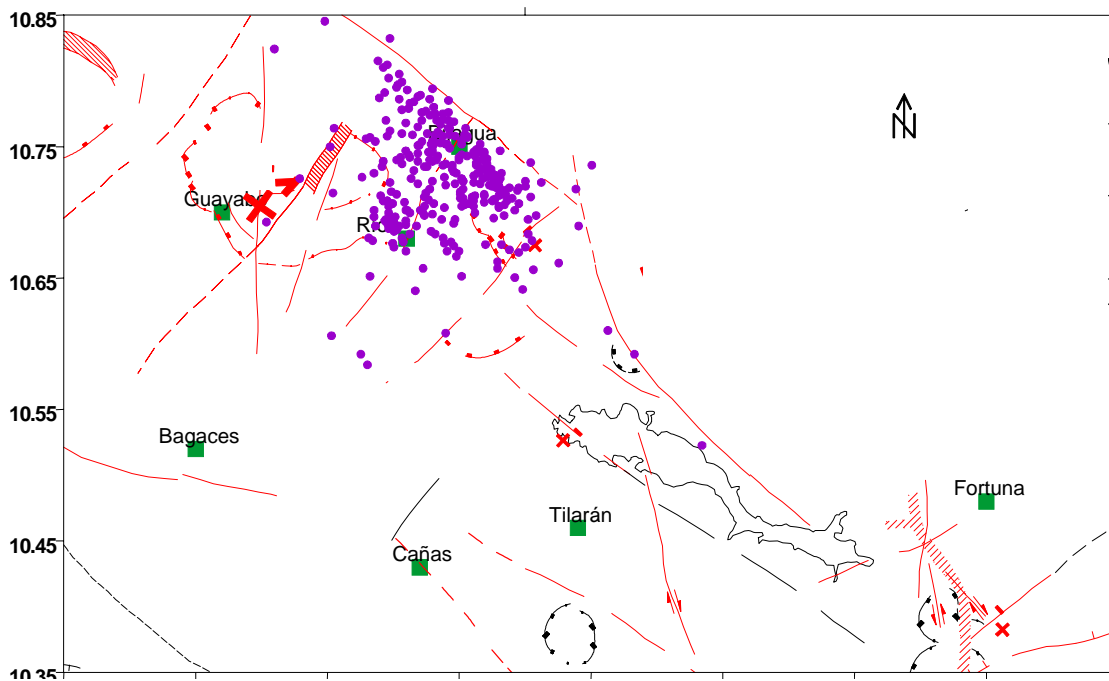


Fig. 3: Distribución de la sismicidad en la zona de Bijagua de Upala

ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS FOCALES

En el análisis de los mecanismos focales, fueron primeramente seleccionados los sismos de mayor tamaño ($M > 3,7$), procurando contar con la mayor cantidad de estaciones, tanto de la RSN como de la red local de OSIVAM, que cubre la zona de Arenal y la Planta Geotérmica Miravalles.

Un total de 9 eventos de buena calidad en su localización hipocentral, fueron los que resultaron con calidades aceptables en sus soluciones de mecanismos focales y estos ocurrieron entre los días 28 de febrero y 4 de marzo. Los datos de estos mecanismos focales son presentados en el cuadro 1 y en la figura 6.

Los epicentros de los 9 eventos seleccionados, se distribuyen espacialmente en dirección NW a SE, a lo largo de unos 15 km, entre Aguas Claras y Pilón de Bijagua. Las profundidades de estos oscilan entre los 5 y 15 km. De estos mecanismos, los de tipo normal con rumbos entre N y NW como el del sismo principal, podrían estar asociados con las fallas El Macho y Bijagua. Otros de tipo inverso podrían estar relacionados con fallas que sufrieron reacomodos tectónicos secundarios (falla Caño Negro y asociadas) por los esfuerzos a que se vieron sometidas por el movimiento en las fallas anteriores.

Cuadro 1: Soluciones de los mecanismos focales

N° sismo	Fecha	Hora GMT	Lat. ° N	Long. ° W	Prof. km	Mag. Mw	Rumbo de falla	Incl. de falla	Vector deslizam.
1	27/01	21:04	10,800	85,122	10	4,4	283	81N	80
2	28/01	02:49	10,769	85,026	12	5,4	15	80E	-8,6
3	28/01	02:54	10,780	85,100	10	4,1	313	13NE	-90
4	28/01	11:22	10,746	85,091	11	3,7	14	50E	59
5	28/01	13:55	10,753	85,076	05	3,7	317	60NE	-35
6	28/01	23:31	10,771	85,066	10	3,8	355	85E	-50
7	30/01	07:02	10,708	85,013	15	4,3	286	33N	-24
8	31/01	20:40	10,780	85,087	10	4,0	345	78E	37
9	04/02	21:10	10,791	85,103	5	4,1	45	60E	36

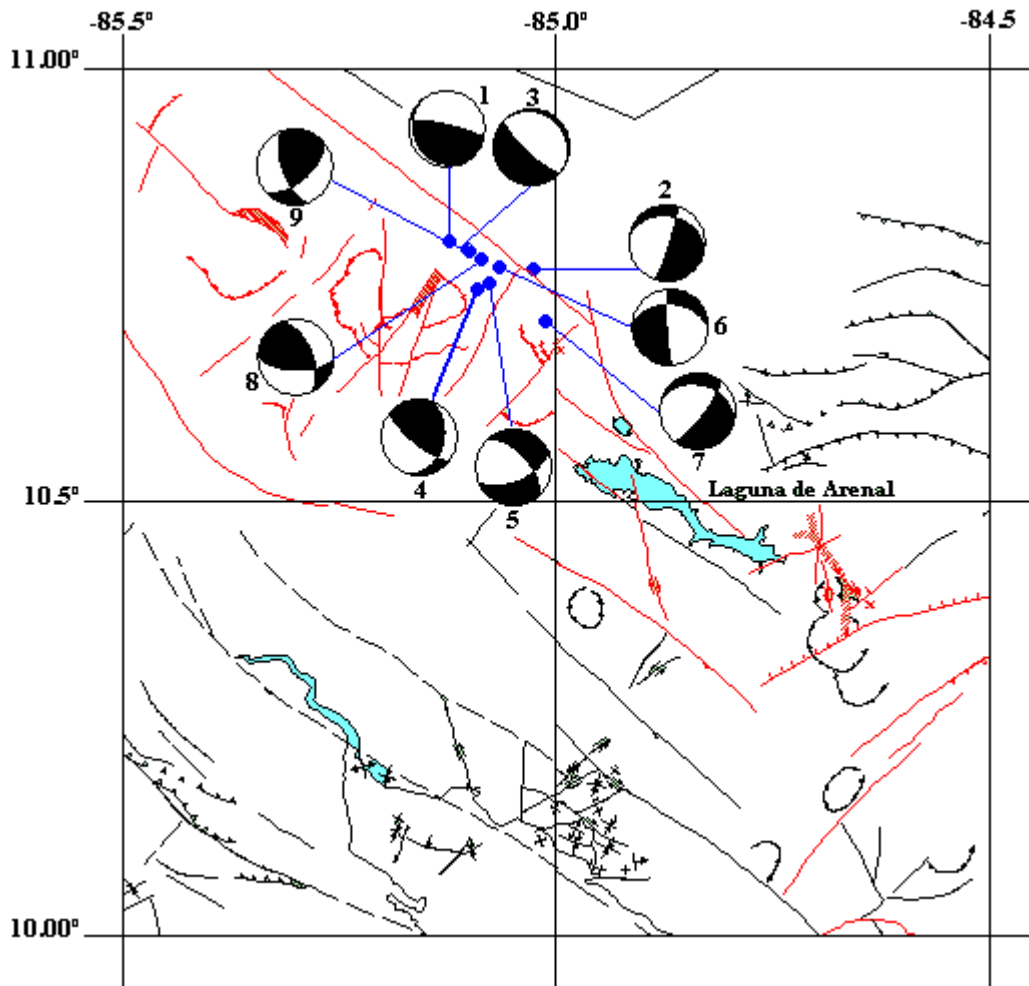


Fig 6: Mecanismos focales seleccionados

Efectos de la actividad sísmica

Durante la secuencia sísmica se reportaron un total de 22 sismos sentidos, de los cuales 6 fueron percibidos con una intensidad Mercalli Modificada (MM) igual o superior a IV (**Cuadro 2**). El primer evento sentido sucedió a las 3:04 p.m. (hora local) del 27 de enero y fue percibido con una intensidad de V en la zona de Bijagua de Upala. No hay reportes de daños asociados con este temblor, solamente provocó la alarma de la población. El evento principal ocurrió a las 8:49 p.m. del 27 de enero (5,4 M_w), se sintió fuerte en gran parte del norte de Costa Rica y en forma leve en la península de Nicoya y otras poblaciones del centro y el Caribe del país. El Anexo 1 y la **figura 7** muestran la intensidad (MM) asignada a cada una de las poblaciones investigadas.

Cuadro 2: Sismos sentidos en la zona de Upala, enero y febrero del 2002

#	Fecha	H. L.	Lat. N	Long. W	Prof. km	Md	Localización	Intensidades (MM)
1	27-01	15:04	10,800°	85,122°	10,0	4,4	10 km al NW de Bijagua de Upala	V Bijagua, IV-III Bagaces y Upala
2	27-01	15:15	10,937°	85,054°	20,0	3,8	5 km al SW de Canalete, Upala	IV Canalete, Upala III
3	27-01	20:06	10,723	85,034°	20,0	3,6	Sur de Upala	II-III Upala
4	27-01	20:49	10,743°	85,035°	12,0	5,4	5 km al NE de Bijagua de Upala	Ver Cuadro 3.
5	27-01	20:58	10,778°	85,114°	11,7	3,3	Sur de Upala	II-III Upala
6	27-01	21:41	10,805°	85,109°	11,0	3,7	Sur de Upala	II-III Upala
7	27-01	23:13	10,758°	85,052°	20,3	3,3	Sur de Upala	II-III Upala
8	27-01	23:46	10,718°	85,159°	20,0	3,2	Sur de Upala	II-III Upala
9	27-01	22:00	10,711°	85,045°	8,4	3,4	Sur de Upala	II-III Upala
10	27-01	20:54	10,790°	85,100°	10,0	4,1	7 km al NW de Bijagua de Upala	IV-III Bijagua, III Upala
11	28-01	02:34	10,873°	84,958°	63,3	3,1	Sur de Upala	II-III Upala
12	28-01	02:53	10,780°	85,082°	13,3	3,5	Sur de Upala	II-III Upala
13	28-01	04:24	10,709°	85,190°	7,8	3,4	Sur de Upala	II-III Upala
14	28-01	05:22	10,746°	85,091°	11,0	3,7	4 km al NW de Bijagua de Upala	II-III Upala
15	28-01	07:55	10,753°	85,076°	11,0	3,7	3 km al NW de Bijagua de Upala	II-III Upala
16	28-01	17:26	10,765°	85,080°	22,6	3,8	Sur de Upala	II-III Upala
17	28-01	17:31	10,771°	85,066°	10,0	3,8	8 km al N de Upala	III Upala
18	28-01	17:58	10,770°	85,041°	11,2	3,6	14 km al S de Upala	III Upala
19	28-01	22:38	10,746°	85,066°	12,1	3,4	14 km al S de Upala	III Upala
20	30-01	01:02	10,708°	85,013°	15,0	4,3	6 km al SE de Bijagua de Upala	IV-III Bijagua
21	31-01	14:40	10,780°	85,087°	10,0	4,0	6 km al NW de Bijagua de Upala	IV Canalete y Bijagua de Upala
22	04-02	15:10	10,791°	85,103°	5,0	4,1	8 km al NW de Bijagua de Upala	IV Bijagua, III en Upala

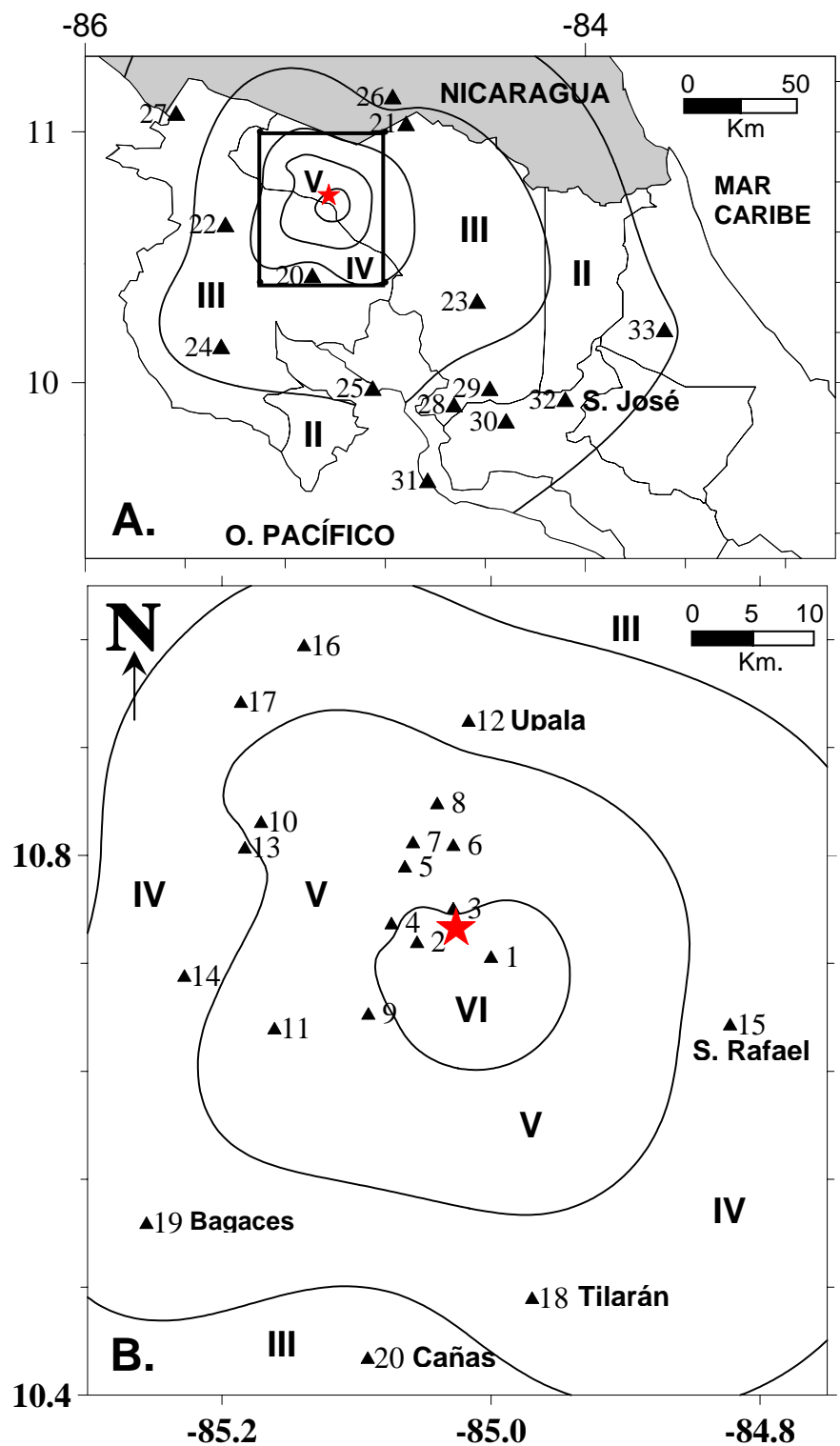


Fig. 7. A) Mapa de isosistas del sismo de Bijagua del 27 de enero del 2002 (5,4 Mw). B) Detalle de las isosistas en la región más afectada por el sismo. Las localidades en las que se estimó la intensidad son indicadas por un triángulo junto al número de localidad referida en el Anexo 1. La estrella representa el epicentro del sismo.

En la **figura 7** se muestra el mapa de isosistas del evento principal. La máxima intensidad fue de VI en las comunidades de El Pílon y Bijagua de Upala. En la población de El Pílon tres casas de madera fueron severamente afectadas, ya que sus bases se inclinaron por estar muy deterioradas, y desestabilizaron toda la estructura (**Foto 1**). Además, ocurrieron pequeños deslizamientos, caída de rocas y pequeñas grietas producidas por el asentamiento diferencial de algunos tramos del camino (**Foto 2**).

En Bijagua hubo daños en los locales comerciales por caída de mercancías y objetos de los estantes. En el centro de salud y en algunas casas se agrietaron los repellos de paredes y pisos. Además, se interrumpió el fluido eléctrico y en gran parte de la comunidad se suspendió el servicio de agua, debido a daños en algunos tramos de las tuberías provenientes de las tomas de agua.

De inmediato, los sismos despertaron rumores sobre una posible actividad eruptiva de los volcanes Tenorio y Miravalles, ubicados muy cerca de las poblaciones afectadas. Esta situación, junto con la gran cantidad de réplicas sentidas luego del evento principal, provocaron cierto pánico en la población, especialmente en muchos residentes de Bijagua que decidieron abandonar la comunidad y refugiarse en la ciudad de Cañas en busca de seguridad.

Otro efecto notable luego de los sismos, fue el cambio en la coloración del agua en algunos manantiales celestes existentes en las faldas del volcán Tenorio que se tornaron más turbios. Estos cambios son normales y se deben a contaminación de los acuíferos por la sacudida sísmica.

ANÁLISIS

Evolución de la crisis sísmica

La presente actividad sísmica en la zona de Bijagua de Upala fue del tipo “**precursores-sismo principal-réplicas**”. Los eventos precursores se presentaron desde unos dos días antes del evento principal. Éste ocurrió el 27 de enero y tuvo una magnitud de 5,4 Mw. Las réplicas continuaron hasta el mes de marzo inclusive.

La distribución de sismicidad (**Fig. 3**) se ubica en territorio de Upala, en una zona bien definida, restringida de norte a sur entre los poblados de Río Naranjo y Canalete y de NW a SE entre Armenia y Pílon. Los primeros sismos se produjeron en las cercanías de Bijagua y Pílon y seguidamente la actividad migró principalmente en dos sentidos, hacia el NW, hasta llegar al poblado de Armenia y simultáneamente otro grupo se distribuyó hacia el sur, cerca del poblado de Río Naranjo.

FALLAS PRINCIPALES

Falla Caño Negro

Esta falla aparece cartografiada en Dengo (1962), Dóndoli et al. (1968), Sandoval et al. (1982) y Barquero (1990), quienes la consideran como una falla normal; no obstante, Alvarado (com. verb., 2002) opina que no existen estudios de detalle para poder discernir de qué tipo de falla se trata. Barquero y Alvarado (1989) fueron los primeros en denominar la falla con el nombre de Caño Negro, e indican que se le puede asociar actividad sísmica tipo enjambres, tal como los que reportan ocurrieron en la década de 1980.

En el sector noreste de los macizos volcánicos del Rincón de la Vieja-Santa María y Miravalles, se encuentra la falla Caño Negro, que tiene un rumbo N 50° W, que es la falla más relevante, de acuerdo con su longitud de varias decenas de kilómetros. Esta falla se caracteriza por su escarpe bastante rectilíneo al nivel regional, aunque localmente se observan cambios de rumbo. Es un escarpe de disectado (maduro) a poco disectado (juvenil), con facetamiento rectangular y triangular, que mira al NE. El escarpe tiene una altura máxima de 200 a 300 m, disminuyendo hacia sus extremos. En algunos sectores se pueden observar varias generaciones de facetas y niveles de descansos o gradas, lo cual sugiere varios pulsos de actividad tectónica. Aguas arriba del pie del escarpe, algunos ríos tienen cañones profundos y son antecedentes (p. e., el río Cucaracho).

Al noroeste, la falla se inicia unos 2 km al oeste del río Cucaracho (sector noreste de la hoja Cacao del IGN, escala 1: 50 000). A partir de ahí, la falla se puede seguir al sureste hasta cerca de Pueblo Nuevo, localidad ubicada en el sector noreste de la hoja Miravalles del IGN (escala 1: 50 000). La longitud del trazo de falla es de 37 km, sin considerar la posible presencia de fallas secundarias asociadas.

En varios sectores de la falla, se observa un basculamiento del bloque levantado, lo cual es evidenciado por una superficie geomórfica que se inclina al SSW a partir de la cumbre del escarpe. En algunas zonas esa superficie se muestra poco disectada, sugiriendo una relativa juventud.

En el campo se observaron varios indicadores de actividad tectónica reciente de la falla, tales como quebradas desviadas o desplazadas, encajadas o con desequilibrios en el perfil longitudinal, pequeñas cascadas en rocas pobremente consolidadas, facetamiento rectangular y triangular y niveles de terrazas levantados localmente. Lo anterior se encontró al pie del escarpe, en la zona de transición entre el frente montañoso y la llanura aluvial. También se observa un megadeslizamiento antiguo en el sector noreste del macizo del volcán Miravalles, que afecta localmente a esta estructura.

Falla El Macho

Es una falla de rumbo NW que se ubica del lado norte de los volcanes Tenorio y Montezuma. Muestra un escarpe bastante lineal, que se localiza consistentemente del lado

norte de la falla, lo cual implica que el lado sur está descendiendo. Además, se puede observar valles lineales (por ejemplo el de la quebrada El Macho) y represamiento del drenaje (por ejemplo, al sur de Pueblo Nuevo y en las nacientes de la quebrada El Macho). Dentro de la zona de estudio se puede seguir por unos 10 km. Las evidencias geomorfológicas de la falla sugieren que tiene una importante componente de desplazamiento normal.

Falla Bijagua

Es una falla de rumbo NNE, que muestra un prominente escarpe que mira al este y que se ubica del lado oeste del volcán Montezuma. El escarpe se muestra poco disectado y es bastante lineal y varía en altura entre 60 m en el sector sur y unos pocos metros hacia el sector norte. En su extremo norte, la expresión del escarpe se pierde al entrar en el cañón del río Zapote, antes de intersectar la falla Macho, contra la cual termina. Tiene una longitud cercana a 7 km, aunque es posible que se continúe al sur unos 2 km adicionales. La traza de la falla pasa por el poblado de Bijagua, alineándose con un afluente del río Bijagua. Las evidencias geomorfológicas de la falla sugieren que tiene una importante componente de desplazamiento normal, donde el bloque oriental baja.

Falla Tenorio

Consiste en una serie de lineamientos de rumbo entre N y NE que tienen una prominencia de débil a moderada, que siguen valles lineales (por ejemplo, en donde se alinea con el río Tenorio) y localmente escarpes. El poblado de Río Naranjo se ubica entre dos de los lineamientos del sistema.

Falla Agua Caliente

Se alinea con orientación NE-SW en el sector este del macizo del volcán Tenorio. En el campo se observan terrazas probablemente asociadas con esta falla, que sugieren que podría ser de tipo normal.

Falla Montezuma

Falla de orientación NW-SE ubicada entre los macizos del Tenorio y Montezuma. La geomorfología sugiere que es de tipo normal.

Interpretación sismotectónica

La sismicidad relacionada con el temblor de Bijagua sugiere que varias fallas fueron reactivadas. La distribución de epicentros muestra claramente que existe una barrera sísmica de dirección noroeste-sureste que está limitada por las fallas Caño Negro y El Macho. Asimismo, la actividad de réplicas se dispersa al sur-suroeste del frente sísmico anterior, en una banda de temblores que se localiza principalmente en la zona comprendida entre los volcanes Miravalles y Montezuma-Tenorio, donde se localizan las poblaciones de

Río Naranjo y Bijagua. Esto sugiere que otras fallas en esta zona se reactivaron. El análisis neotectónico muestra que en esta zona se presentan las fallas Bijagua y Tenorio de rumbo N-S, por lo cual se interpreta que ambas fallas también se reactivaron durante la secuencia sísmica. Asimismo, la ubicación de los epicentros muestra que otras fallas ubicadas en los macizos Montezuma y Tenorio (fallas Montezuma y Agua Caliente) también se activaron (Fig. 8).

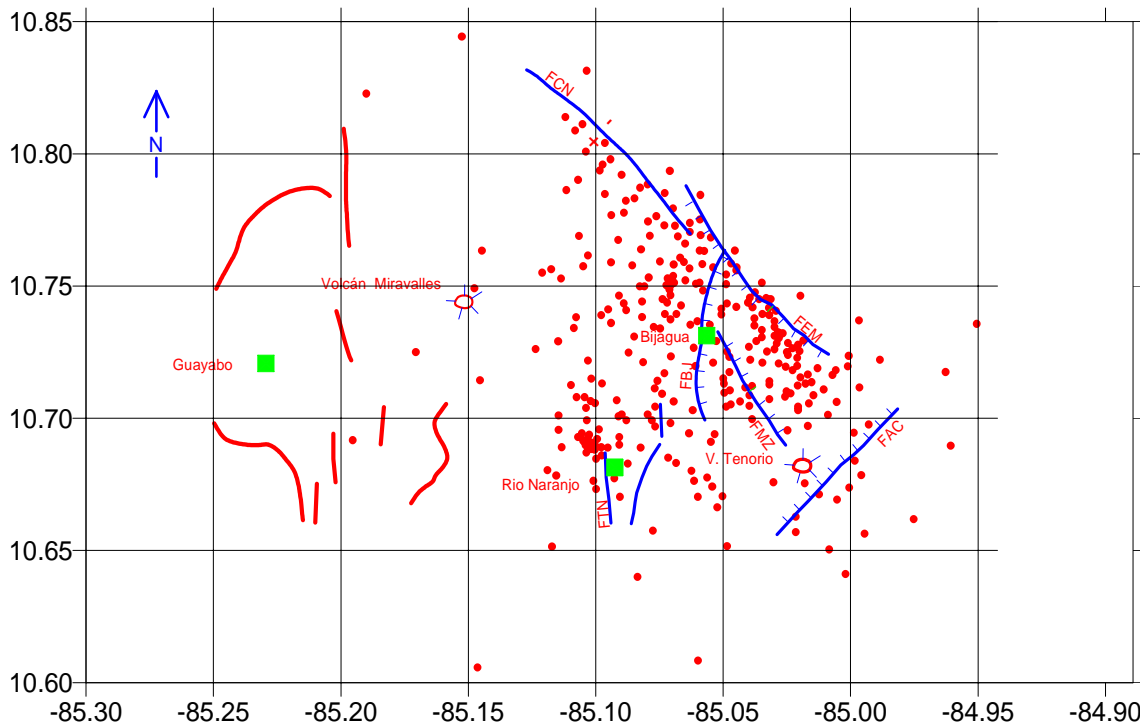


Fig. 8: Nueva interpretación sismo-tectónica. Fallas: FCN= Caño Negro, FEM= El Macho, FBJ= Bijagua, FTN=Tenorio, FMZ=Montezuma, FAC=Agua Caliente.

La presencia de sismicidad en diversas fallas es confirmada por los mecanismos focales, los cuales muestran varios tipos de soluciones (**Fig. 6**). El evento precursor tiene una solución con alta componente inversa (1 en figura) y uno de sus planos nodales podría corresponder con la falla Caño Negro. Es interesante observar que este evento se ubicó en el extremo noroeste de la zona epicentral.

El mecanismo focal del evento principal (2 en figura 6) es de desplazamiento de rumbo con una pequeña componente normal. El plano nodal de rumbo NNE, coincide con el rumbo de la falla Bijagua y es el que se escoge como plano de ruptura. El plano N80°W, con inclinación al norte no coincide con las fallas neotectónicas de la región de estudio. El plano nodal seleccionado indica una alta componente dextral y una pequeña componente normal en la falla Bijagua. La componente normal es coincidente con el esarpe que tiene la falla. Es importante acotar que este plano nodal no está restringido en rumbo e inclinación, pudiendo variar alrededor de 30° respecto al plano nodal mostrado.

Con respecto a los mecanismos focales realizados para las réplicas (3 a 9 en figura 6), estos nuevamente muestran diversas soluciones. El mecanismo 3 es de falla normal pero se encuentra alejado de la traza de la falla Caño Negro, por lo que podría corresponder con alguna falla secundaria asociada con el sistema. El mecanismo focal 4 es de alta componente inversa y ambos planos nodales tienen rumbos que corresponden con las fallas neotectónicas; el plano nodal NW tiene rumbo similar a las fallas Caño Negro o El Macho.

La presencia de soluciones de mecanismos focales tan diversas también podría asociarse, en parte, con pequeños desplazamientos en el megadeslizamiento que se ubica en el flanco NE del macizo del Miravalles, que pudo ser reactivado por el sismo principal de 27 de enero (Mw 5,4).

El mecanismo 5 es tipo oblicuo con mayor componente de rumbo. Se escoge el plano nodal de rumbo N 20° E, dado que posee un rumbo e inclinación semejante al de la falla Bijagua. De ser así, el mismo indicaría un movimiento dextral-normal, en un plano nodal que se inclina al SE. El mecanismo 6 es oblicuo con similares componentes inversa y de rumbo. El plano nodal de rumbo norte es parecido al de la falla Bijagua, aunque el tipo de mecanismo difiere del mostrado para el evento principal. El mecanismo 7 es similar al del evento principal. Su ubicación fue en el extremo sureste de la zona de réplicas. Se escoge el plano nodal de rumbo NNE y se debe asociar con una falla secundaria. En el mecanismo 8 se escoge el plano nodal NWW buzante hacia el SW, que muestra una falla oblicua con componentes inversa y dextral que se puede asociar con la falla Caño Negro. El mecanismo 9 se puede relacionar con la falla Caño Negro dado que tiene una alta componente inversa en planos nodales de rumbo cercano al NW y buzando hacia el SW.

En el caso de la falla Agua Caliente que es una falla de rumbo NE-SW localizada en el flanco SE del Tenorio, no se pudo obtener un buen mecanismo focal pero el alineamiento de los sismos es muy conspicuo y coincide bastante bien con esta falla, cuyas evidencias geomorfológicas sugieren es de tipo normal.

También se ubicaron eventos en el sector del volcán Montezuma que podrían estar asociados con una falla de rumbo NW-SE, aparentemente de tipo normal, que atraviesa este cono.

Conclusiones

La presente actividad sísmica en la zona de Bijagua de Upala es característica de una secuencia del tipo precursores-evento principal-réplicas. El sismo mayor tuvo una magnitud Mw 5,4 y una profundidad de 12 km. Este tipo de evento se asocia con una ruptura cortical de unos 5 km de extensión y un deslizamiento en el plano de falla entre 0,2 y 0,4 m. Las profundidades de las réplicas se distribuyen principalmente entre los 0 y 15 km, presentando un incremento hacia el SE.

La sismicidad de la zona de Bijagua muestra una marcada tendencia en sentido NW-SE correspondiendo con las fallas Caño Negro y El Macho. Además, se presentan otras

tendencias en sentido N-S que se puede asociar con las fallas Bijagua y Tenorio, así como otros eventos que se asocian a las fallas Agua Caliente y Montezuma.

La intensidad máxima estimada para el evento principal fue de VI (MM) en la localidad de Bijagua, en donde se dieron daños moderados como pequeños agrietamientos en paredes, deslizamientos menores y caída de objetos, así como alarma en la población. La distribución de las isosistas presenta un ligero alongamiento en sentido NW-SE. La mayor distancia a la que fue percibido el evento fue de 180 km, ya que fue levemente percibido en las zonas de Guápiles y Parrita en Costa Rica y Rivas en Nicaragua.

Los mecanismos focales de un precursor, del evento principal y de algunas de las réplicas de mayor magnitud, muestran una diversidad de soluciones de planos nodales, indicando desde soluciones puras del tipo normal (evento 3), desplazamiento de rumbo (evento 2), inverso (evento 1), hasta soluciones oblicuas combinando movimientos inversos y de desplazamiento de rumbo (eventos 4, 6, 8 y 9) y de desplazamiento de rumbo y normales (eventos 5 y 7).

Algunas soluciones de mecanismos focales que sugieren movimiento inverso pueden relacionarse con la falla Caño Negro y fallamiento secundario asociado con compresiones locales asociadas con movimientos compensatorios o con contracciones del medio relacionadas con los movimientos en las fallas principales o incluso con la posible reactivación de un megadeslizamiento antiguo, localizado en el flanco NE del macizo del Miravalles. Sin embargo, la tectónica en la zona es complicada y la presente interpretación es de carácter preliminar, ya que es necesario un trabajo de campo con más detalle para tratar de mejorarla.

El análisis del fallamiento neotectónico de la zona ha permitido identificar como posiblemente activas seis fallas en la zona donde ocurrió el sismo de Bijagua. Estas son las fallas Caño Negro, El Macho, Bijagua, Tenorio, Montezuma y Agua Caliente. La primera presenta evidencias sismológicas actuales que sugieren que se trata de fallamiento inverso que se podría explicar observando que el ambiente tectónico del sector oeste de la falla Bijagua está sometido a esfuerzos compresivos, aunque no se descarta la posibilidad de que también en ese sector se haya reactivado un megadeslizamiento. La presencia de una importante componente normal en las demás fallas, muestran que el bloque comprendido entre estas está hundiéndose. Además, los mecanismos focales indican que la falla Bijagua tiene también una componente de rumbo dextral.

Se desconoce la recurrencia sísmica de esta zona, debido a la carencia de suficientes datos históricos, geológicos, tectónicos o paleosismológicos de la región. Sin embargo, de acuerdo al contexto regional, se dan evidencias de que se trata de una zona sísmicamente activa, como lo es todo el cinturón volcánico que atraviesa nuestro país de NW a SE.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la importante colaboración prestada en la instalación de los equipos portátiles, recolección y procesamiento de datos, a los siguientes miembros de RSN y OSIVAM: Téc. Carlos Redondo CH., Geól. Magda Taylor C., M.Sc Mario Fernández y los técnicos Marco Tulio Naranjo, Luis Madrigal y Dagoberto Boniche. Un especial agradecimiento a la compañía SEISM TECHNOLOGY, que prestó cuatro estaciones portátiles, las que fueron de gran ayuda en el monitoreo de la actividad y en la obtención de buenos datos locales, vitales para las interpretaciones.

1- Referencias

Barquero, R., 1987: Proyecto geotérmico Miravalles. Estudio sismológico compilativo, Instituto Costarricense de Electricidad, Dirección de Planificación Eléctrica, Departamento de Geología, 25 págs + figuras y cuadros.

Barquero, R., 1990: Sismicidad y tectónica de la región noroeste de Costa Rica, con énfasis en la zona del proyecto geotérmico Miravalles. Tesis Lic. Escuela Centroamericana de Geología, Univ. De Costa Rica, 117 p.

Barquero, R. & Alvarado, G.E. (1989): los enjambres de temblores en el arco volcánico de Costa Rica, Bol. Observatorio Vulcanológico del Arenal, N 4 Pag. 18 – 30

Dengo, G. 1962: Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. En: Petrologic Studies, A. F. Buddington Volume, Geological Society of America, 133-161.

Dóndoli, C., Dengo, G. & Malavassi, E., 1968: Mapa Geológico de Costa Rica, Dirección de Geología y Minas, San José.

Montero, W. & Alvarado, G., 1988: Los terremotos de Bagaces de 1935 y 1941: Neotectonismo transversal a la Cordillera Volcánica del Guanacaste, Ciencia Tecnología, 12, 69-87.

Sandoval, L. F, Sáenz, R., Acuña, J., Castro, J. F., Gómez, M., López, A., Mederos, B., Monge, A., Vargas, J., Fernández, T., Ulate, R. & Ramírez, C., 1982: Mapa Geológico de Costa Rica: San José, Instituto Geográfico Nacional, 9 hojas, escala 1:200,000.

Taylor, W. & Barquero, R. 1999: Auscultación sismológica del campo geotérmico Miravalles, Tenorio y del volcán Arenal durante el año de 1998. Bol. OSIVAM, año 11, No. 21-22:33-47.

ANEXO I: Intensidades (MM) generadas por el sismo de Bijagua en algunas localidades del centro y norte de Costa Rica

Num.	Localidad	INTENSIDAD	Dist (km)	DESCRIPCIÓN
1	El Pilón	VI	3	Muy fuerte. Pánico general. Se tenía dificultad en caminar establemente. Tres casas viejas de madera (construidas sobre bases podridas) con daños severos, una de ellas inhabitable. Caída de objetos de los estantes. Pequeño estanque de tilapias destruido. Deslizamientos pequeños y caída de rocas a lo largo del camino hacia El Pilón. Asentamientos diferenciales en el camino, con grietas de 1-2 cm de ancho. Se reporta el cambio de coloración de las aguas en el sector de los teñideros del río Celeste.
2	Bijagua de Upala	VI	4	Sentido muy fuerte con un movimiento vertical de arriba hacia abajo y precedido por un fuerte ruido. Pánico general, mucha gente abandonó Bijagua y se dirigió hacia Cañas en busca de refugio. No se podía caminar establemente. Caída de objetos de los estantes, incluyendo televisores y otros artículos pesados. Los muebles fueron desplazados de su lugar. Grietas en repellos de paredes y en pisos. Se interrumpió el fluido eléctrico y el agua en una parte de la comunidad.
3	Las Flores de Upala	V	1,5	Sentido muy fuerte.
4	Zapote	V	5	Sentido muy fuerte. Caída de objetos livianos. Corte del suministro eléctrico. Algunos se dirigieron a Cañas luego del sismo.
5	Pueblo Nuevo	V	6	Sentido muy fuerte. No hubo caída de objetos
6	Buena Vista	V	7	Sentido muy fuerte, con un movimiento de arriba hacia abajo. Caída de objetos livianos de los estantes. Se escuchó un retumbo antes del sismo.
7	El Higuerón de Upala	V	8	Sentido muy fuerte. Caída de objetos livianos de los estantes
8	Canalete de Upala	V	10	Sentido muy fuerte. Caída de objetos livianos.
9	Río Naranjo	V	10	Sentido muy fuerte. Caída de objetos livianos de los estantes. Se escuchó ruido subterráneo justo antes del evento sísmico.
10	San Isidro	V	18	Sentido muy fuerte y corto. Caída de objetos
11	Cuipilapa de Bagaces	V	21	Sentido muy fuerte. Pánico general. Sillas y muebles se mecían
12	Upala centro	IV	17	Sentido fuerte por toda la población. La gente salió a la calle. Se produjeron sonidos de las estructuras. No hay caída de objetos.

Num.	Localidad	INTENSIDAD	Dist (km)	DESCRIPCIÓN
13	Aguas Claras de Bagaces	IV	19	Sentido fuerte. No hubo caída de objetos
14	Guayabo de Bagaces	IV	22	Sentido fuerte. No hubo caída de objetos.
15	San Rafael de Guatuso	IV	23	Se reporta fuerte. Vibraron ventanas. Despertó a personas que dormían
16	San José de Upala	IV	26	Sentido fuerte. No hubo caída de objetos
17	Cuatro Bocas de Upala	IV	26	Sentido fuerte
18	Tilarán	IV	30	Fuerte. Despertó a la gente que dormía. Lo sintió la gente en la calle
19	Bagaces	IV-V	36	Bastante fuerte. Los sintieron las personas que estaban caminando. Sillones y muebles pesados se movieron de sus lugares.
20	Cañas	III	36	Todas las personas lo sintieron con regular intensidad
21	Los Chiles	III	45	Sentido fuerte por la mayoría de las personas. No provocó alarma
22	Liberia	III	49	Fue sentido por casi todas las personas de la ciudad. Los que estaban en el parque se asustaron un poco.
23	Ciudad Quesada	III	79	Sentido por la mayoría de la gente. Vibración de ventanas y paredes en forma leve
24	Nicoya	III	82	Sentido leve y mecido por la mayoría de las personas.
25	Puntarenas	III	88	Personas en reposo sintieron el sismo.
26	San Carlos y Rivas de Nicaragua	II	52	No provocó alarma
27	La Cruz	II	78	Sentido leve por las personas
28	Orotina	II	107	El sismo fue sentido leve por las personas en reposo.
29	Atenas	II	110	El sismo fue sentido leve por las personas en reposo.
30	Santiago de Puriscal	II	126	Sentido leve por las personas
31	Jacó	II	130	Sentido leve por las personas sentadas, como una oscilación
32	San José	II	136	Sentido sólo por personas en reposo.
33	Guácimo	II	156	Sentido leve por las personas