



Foto de cubierta

Deslizamientos disparados en el cañón del río Turrialba, coordenadas Lambert Norte 563 E - 214 N. Foto de Waldo Taylor.



Red Sismológica Nacional
RSN: (UCR-ICE)

INFORME PRELIMINAR
SISMO SENTIDO

El Sismo de Capellades de Alvarado (Mw 5,5) del 30 de noviembre del 2016

Editores:

Lepolt Linkimer
Gerardo J. Soto

Procesamiento, análisis y textos:

Juan Luis Porras
Mauricio Mora
María Cristina Araya
Waldo Taylor
Magda Taylor
Guillermo E. Alvarado
Silvia Carvajal
Kevin Godínez
Allan Sanabria
Jenny Chaves

Diciembre del 2016

Contenido

CONTENIDO.....	I
1. INTRODUCCIÓN	1
2. CONTEXTO SISMOLÓGICO PREVIO AL EVENTO DE CAPELLADES	1
3. LOCALIZACIÓN DEL EVENTO PRINCIPAL	2
4. MECANISMO FOCAL Y TENSOR MOMENTO	5
5. EVOLUCIÓN DE LA SISMICIDAD (RÉPLICAS).....	8
6. TRANSFERENCIA DE ESFUERZOS DE COULOMB	12
7. DISCUSIÓN DEL ORIGEN: ACTIVIDAD SÍSMICA DE LOS ALREDEDORES AL ÁREA EPICENTRAL.....	13
8. INTENSIDADES Y REPORTES DE DAÑOS EN MEDIOS Y REDES SOCIALES	18
9. DESLIZAMIENTOS DETERMINADOS A PARTIR DEL SOBREVUELO EN EL ÁREA EPICENTRAL	21
10. CONCLUSIONES.....	22
11. AGRADECIMIENTOS	23
12. REFERENCIAS	23
APÉNDICE 1	27

1. Introducción

Costa Rica se localiza dentro de un marco geotectónico complejo y muy dinámico que la hace propensa a los sismos y otros procesos geológicos concatenados que afectan al ser humano y su desarrollo socioeconómico. Esa vulnerabilidad en que se encuentra el país requiere de un conocimiento detallado de la sismicidad que permita crear los insumos necesarios para planes adecuados de ordenamiento territorial.

La Red Sismológica Nacional (RSN) es una de las principales instancias del país dedicada a investigar los procesos sísmicos y volcánicos y desde la cual se promueve la cultura de la prevención de desastres. Fue creada mediante un convenio entre la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Desde 1973, la RSN estudia la sismicidad y actividad volcánica de Costa Rica. Nuestra misión es desarrollar conocimiento científico sobre la geodinámica interna de la Tierra para transferirlo a la sociedad costarricense, a través de la docencia y la acción social, de manera que pueda ser aplicado en los planes de gestión del riesgo, ordenamiento territorial y atención de emergencias en Costa Rica.

Actualmente nuestra red sísmica está constituida por alrededor de 138 estaciones que se registran en tiempo real en el Laboratorio de Sismología de la Escuela Centroamericana de Geología y con las cuales se realiza el monitoreo sismológico rutinario, que permite localizar un promedio diario de 16 sismos y un promedio mensual de 12 sismos reportados como sentidos por la población. En los casos de los sismos relevantes por su tamaño o efectos, se produce un informe más detallado resumiendo las características del temblor, como es el caso del presente informe para el sismo de Capellades del 30 de noviembre del 2016.

2. Contexto sismológico previo al evento de Capellades

En todo el arco magmático de Costa Rica existen fallamientos que cortan los voluminosos (> 150 km³) edificios volcánicos de las cordilleras de Guanacaste y Central. Esto provoca que puedan generarse sismos importantes en estas áreas, debido tanto a la actividad tectónica normal, como por interacciones entre la actividad volcánica y esas fallas.

En el caso de sismos originados en fallas que cortan los macizos volcánicos, generalmente pueden ser segmentos que podrían tener rupturas del orden de 4-12 km de longitud, capaces de generar sismos con magnitudes (M_w) máximas probables de 6,1 a 6,5. Ejemplos claros son los sismos de Patillos ocurrido en 1952 (M_w 6,0) y el terremoto de Cinchona ocurrido en 2009 (M_w 6,2). Ambos eventos ocurrieron en ambientes en la periferia de volcanes activos y complejos de la Cordillera Volcánica Central (Montero & Alvarado, 1995; Méndez et al., 2009; Montero et al., 2010).

Por lo anterior, siempre es natural que quede abierta la pregunta de si el estado de estrés tectónico causado por el movimiento del magma en profundidad o en la corteza media-superior, podría generar diferenciales de estrés en la vecindad de fallas activas o potencialmente activas. La pregunta anterior cobra, por supuesto, particular relevancia, si se considera que el sismo de Capellades ocurre en un contexto geológico complejo generado por la reciente actividad eruptiva del volcán Turrialba. Estos antecedentes han instado a la Red Sismológica Nacional a incrementar su observación a la sismicidad perivolcánica, con objetivos preventivos y científicos.

3. Localización del evento principal

Fecha: 30 de noviembre del 2016

Hora local: 6:25 pm.

Localización: 2 km al este de Capellades, cantón Alvarado, provincia Cartago (Figura 1).

Coordenadas: 9,943° N y 83,789° W.

Profundidad: 1 km (con respecto al nivel del mar).

Magnitud revisada: 5,5 M_w .

La detección y localización de los sismos de la secuencia de Capellades se realizó a través de los sistemas Seiscomp, Earthworm y SeisAn. La lectura de los arribos de ondas sísmicas, la localización del hipocentro y el cálculo de magnitudes, se llevó a cabo en primera instancia de forma automática y luego fue revisada manualmente mediante el programa HYP (Lienert & Havskov, 1995), el cual está integrado en la última versión del software SeisAn (Ottemöller et al., 2011). Posteriormente se realizó una relocalización de las réplicas a través del programa HypoDD (Waldhauser, 2001). Para la localización de sismos se utilizó un modelo de velocidades de la onda primaria de siete capas, una razón de velocidades (V_p/V_s) de 1,74 y se calculó la magnitud momento (M_w) para cada sismo.



Figura 1: Mapa epicentral del sismo principal del 30 de noviembre del 2016.

Para la localización del sismo principal se utilizaron arribos de la onda P en 126 estaciones (Figura 2), la mayoría pertenecientes a la RSN (UCR-ICE), pero también se incorporaron estaciones de la red del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA) y de redes internacionales, como el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), la Universidad de Panamá y el Observatorio Sismológico del Occidente de Panamá (OSOP), disponibles a través de IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).

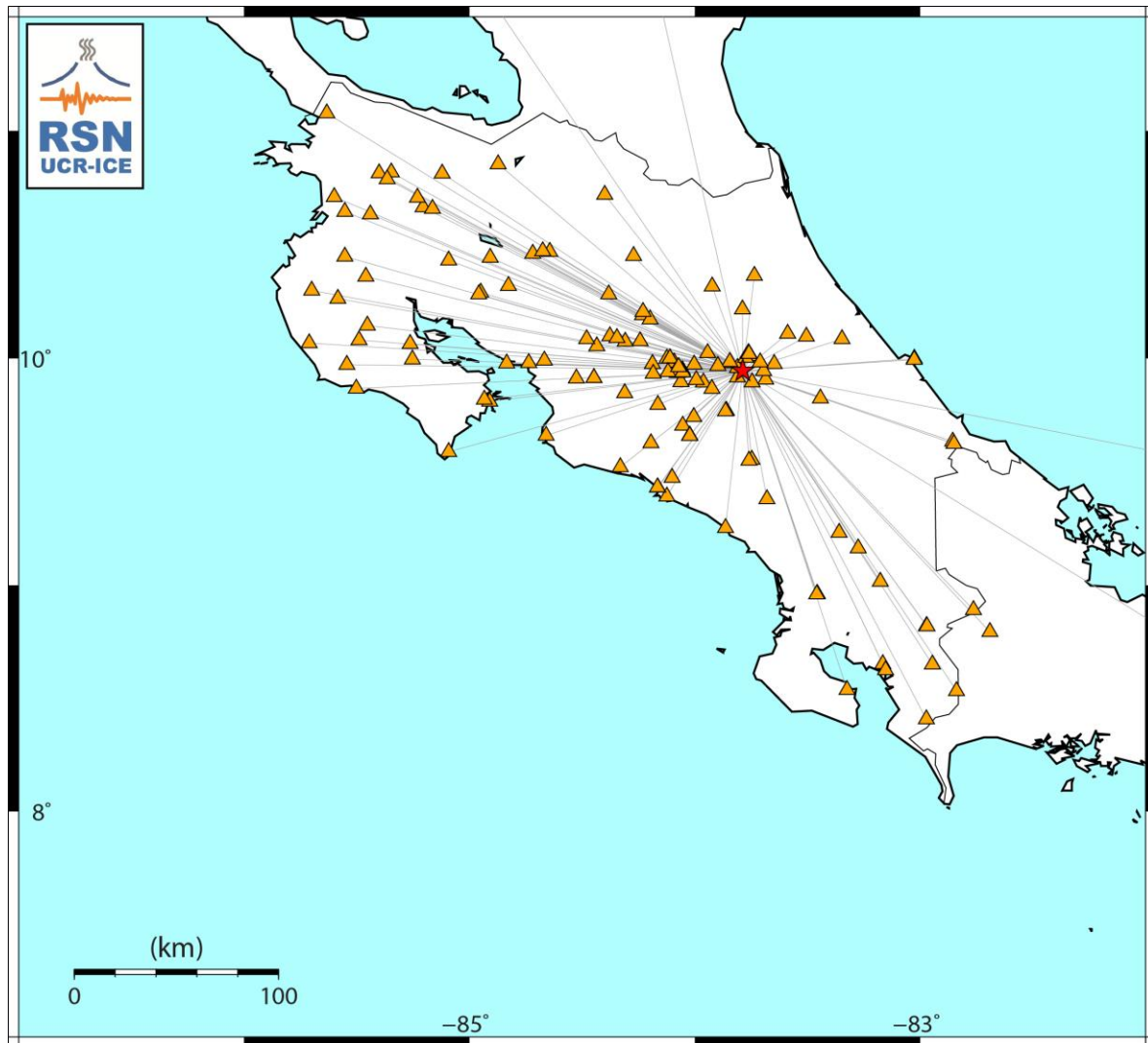


Figura 2: Mapa de estaciones (triángulos) usadas en la localización del sismo principal.

La estación más cercana al epicentro se encuentra en San Rafael de Irazú, a sólo 2,9 km, y la más lejana en la península de Azuero en Panamá a 454 km. Para las lecturas, se siguió un esquema de pesos dependiendo de la claridad de los arribos y además, se asignaron pesos para las estaciones a más de 100 km de distancia, de forma que en la localización tuvieran un mayor aporte las observaciones cercanas. En total, 53 estaciones se encuentran a una distancia menor a 50 km del epicentro. El *gap* de cobertura azimutal es de sólo 27 grados. La solución del hipocentro con 126 observaciones de la onda P, tiene un valor de la raíz cuadrática media (RMS) de 0,5. El RMS es mínimo a una profundidad de 1 km bajo el nivel del mar, por lo que esa profundidad fue seleccionada como la mejor solución.

4. Mecanismo focal y tensor momento

El mecanismo focal del sismo principal fue calculado usando el programa FOCMEC (Snoke, 1984) a través de observaciones de la polaridad del primer arribo de la onda P. Se identificaron 60 polaridades claras, con una buena cobertura en la esfera focal. La búsqueda de planos nodales fue realizada cada 5 grados, de forma que estos planos nodales permitieran separar en regiones los grupos de observaciones de compresión y dilatación, sin permitir errores.

Se exploraron soluciones a diversas profundidades para evaluar la estabilidad de la solución. En el rango de profundidades en que se obtienen el menor RMS de la localización, de 0 a 3 km, el mecanismo focal es de una falla de desplazamiento de rumbo (Figura 3); no obstante, este tipo de fallamiento se obtiene aunque el hipocentro esté a profundidades hasta de 5 km.

El resultado obtenido a una profundidad de 1 km es la solución favorita por poseer el menor RMS en la localización. En la Figura 3 se muestran todas las soluciones posibles de los planos nodales, que debido a la alta cantidad de observaciones y cobertura, se tiene un rango restringido de planos. De las posibles soluciones de planos nodales mostrados en la Figura 3, se seleccionó por inspección visual, la solución óptima que se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Plano nodal seleccionado para la solución del mecanismo focal a varias profundidades.

Profundidad (km)	Rumbo/Inclinación/Rake Plano nodal 1	Rumbo/Inclinación/Rake Plano nodal 2
0,5	247/85/9	152/81/175
1,0	247/85/9	152/81/175
1,5	241/71/17	145/74/160
2,0	244/73/10	151/80/162
2,5	245/80/18	151/72/170
3,0	245/80/18	151/72/170

En todos los casos, el rumbo, inclinación y ángulo de Rake apuntan a planos nodales casi verticales de una falla de desplazamiento de rumbo sinistral con rumbo noreste y una falla de desplazamiento de rumbo dextral con rumbo noroeste.

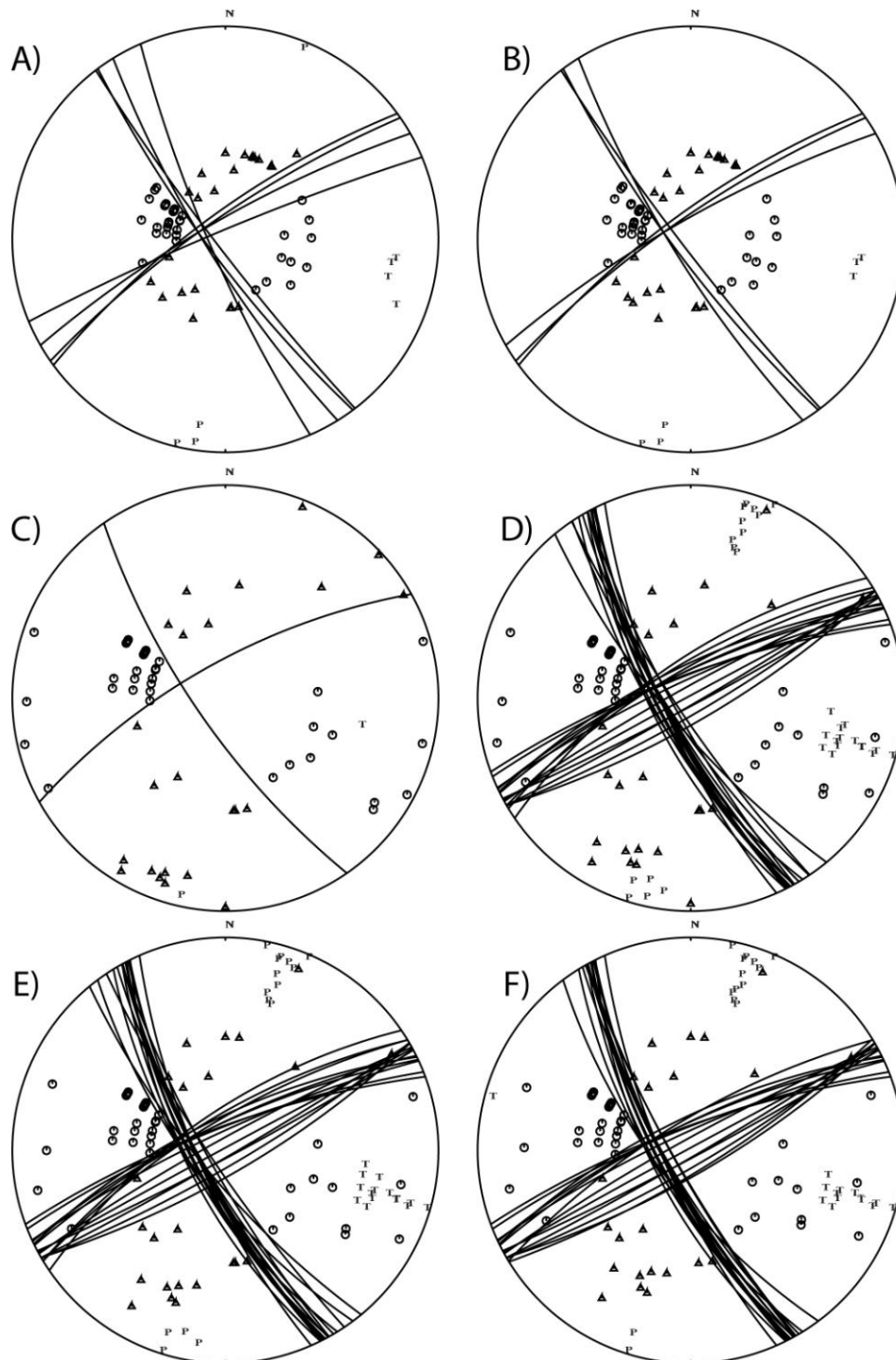


Figura 3: Soluciones del mecanismo focal derivado con la polaridad del primer arribo de la onda P para un hipocentro a varias profundidades. A) 0,5 km. B) 1,0 km. C) 1,5 km. D) 2,0 km. E) 2,5km. F) 3,0 km. Círculos denotan compresión y triángulos dilatación. P y T representan los ejes de compresión y tensión, respectivamente.

Se realizó además la inversión del tensor momento, con el módulo *scmtv* de *Seiscomp*. En este caso, se construyeron sismogramas sintéticos a través de funciones de Green y un modelo de velocidad de la onda P y se compararon los sismogramas observados en las estaciones de banda ancha de la RSN y OVSICORI-UNA disponibles a través de IRIS. Para 23 estaciones es posible tener un ajuste $>70\%$ y con ellas fue calculado el tensor momento (Figura 4).

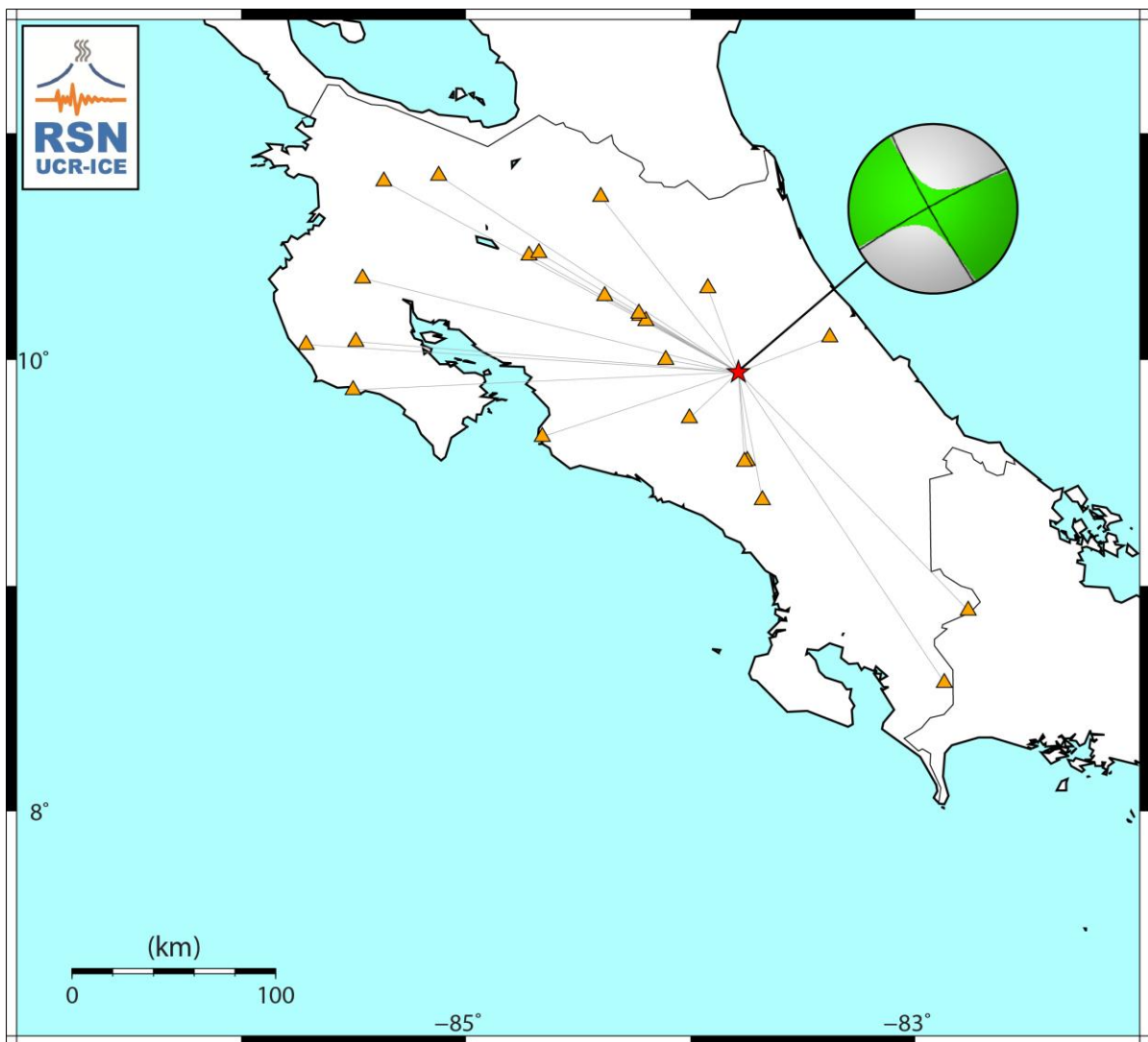


Figura 4: Solución del tensor momento y ubicación de las 23 estaciones (triángulos) usadas para su estimación.

Al igual que con la solución determinada con primeros arribos, se exploraron soluciones en diversas profundidades, de entre 0 y 20 km. En el Cuadro 2 se muestran las soluciones cuando el hipocentro se ubica a menos de 3 km de profundidad. El mejor ajuste (91,222%) ocurre a 1 km, por lo que esta es la solución favorita. La solución del tensor momento es consistente con la solución del mecanismo focal determinado con los primeros arribos de la onda P. La solución sugiere una falla de desplazamiento de rumbo, con un plano nodal casi vertical de tipo sinistral y rumbo noreste y otro plano nodal casi vertical de tipo dextral y rumbo noroeste. Los resultados preliminares del tensor momento indican además que existe un porcentaje de doble copla de 76,4% y un restante 23,6 de componente volumétrica.

Cuadro 2: Solución del tensor momento para diferentes profundidades.

Profundidad (km)	Ajuste	Doble copla (%)	Rumbo/Inclinación/Rake Plano nodal 1	Rumbo/Inclinación/Rake Plano nodal 2
0,5	91,217	76.59	241/86/3	151/87/176
1,0	91,222	76.42		
1,5	91,216	76.24		
2,0	89,904	77.06		
2,5	89,899	77.33		
3,0	89,894	73,75		

5. Evolución de la sismicidad (réplicas)

La secuencia sísmica se prolongó hasta el 6 de diciembre de 2016 y tuvo su periodo más intenso entre las 00 y las 06 UTC del 1° de diciembre, con una tasa promedio de 126 eventos por hora (Figura 5A). En las siguientes 20 horas esta tasa cayó a alrededor de 30 eventos por hora con un ligero incremento el 4 de diciembre. En total se contabilizaron alrededor de 2151 eventos a partir de los registros de la estación CVTQ, ubicada en el área de Los Quemados en el volcán Turrialba. El rápido decrecimiento en la actividad se refleja también a partir del promedio cuadrático de la amplitud o RSEM del registro de la estación CVTQ (Figura 5B), a partir del cual se observa cómo dicha amplitud decrece rápidamente y se estabiliza a partir de las 00:00 horas UTC del 2 de diciembre y se incrementa levemente el 4.

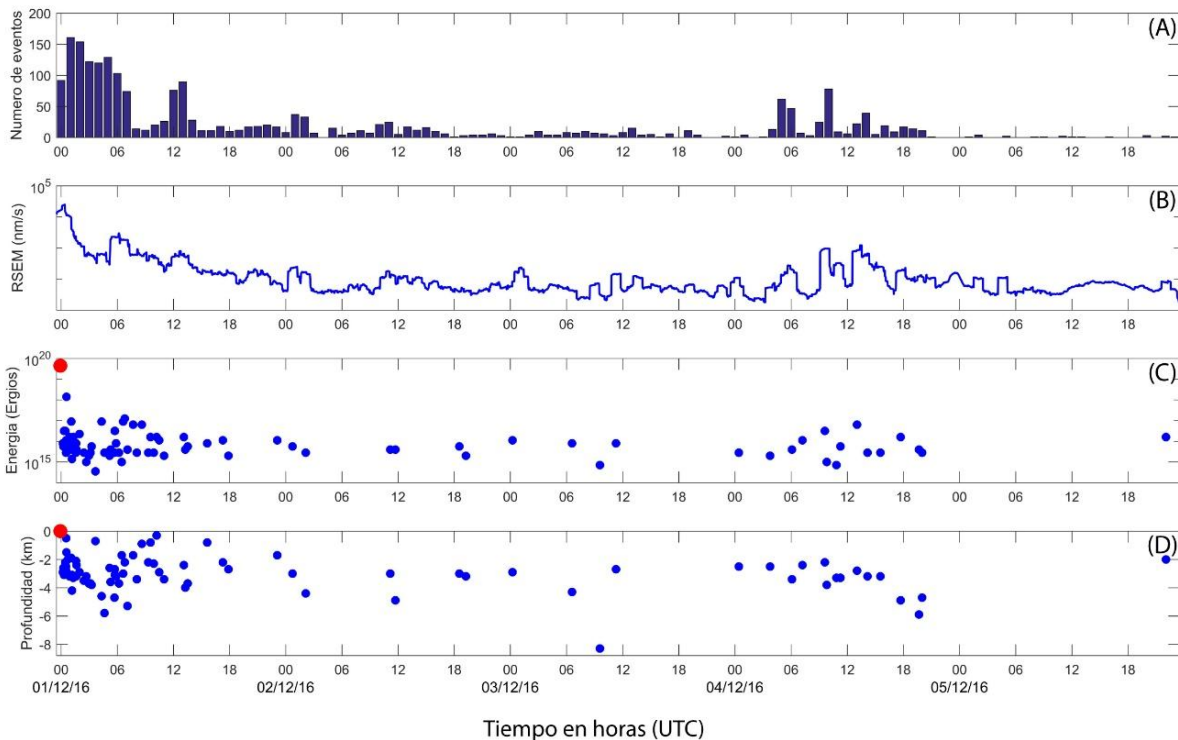


Figura 5: A) Número de eventos tectónicos locales registrados en la estación CVTQ entre el 1 y 5 de diciembre. B) RSEM (amplitud cuadrática media promediada cada 10 minutos) de la estación sísmica CVTQ. C) y D) Energía liberada y profundidad, respectivamente, de los sismos localizados. En rojo se resaltan los datos del sismo principal.

Por otra parte, las magnitudes (M_w) en general se mantuvieron entre los 2,5 y 3,5, lo cual se refleja en la energía liberada (Figuras 5C y 6). Por encima de los 4,0 grados se ubica el sismo principal con M_w 5,5 y una réplica de M_w 4,5. La profundidad de los eventos (Figura 5D) presenta una variación curiosa, ya que se observa una profundización de los hipocentros antes de las 06:00 del 1° de diciembre y seguidamente se tornan más someros. En cuanto a la energía liberada, claramente resalta el sismo principal, no hay mucha variación con el tiempo, aunque, al inicio de la secuencia se ve cómo paulatinamente hay una disminución y a la hora 06 se retoma.

La secuencia de réplicas fue relocalizada con el programa HypoDD (Figura 7). Una ventaja que ofrece este algoritmo es que si los eventos ocurren a lo largo de una misma estructura, este método de localización múltiple puede localizar mejor cada evento con respecto a los otros, con relación a los métodos de localización de un evento de forma aislada (Waldhauser & Ellsworth, 2000). El resultado es que se puede determinar de forma más precisa la forma de la estructura que generó la sismicidad.

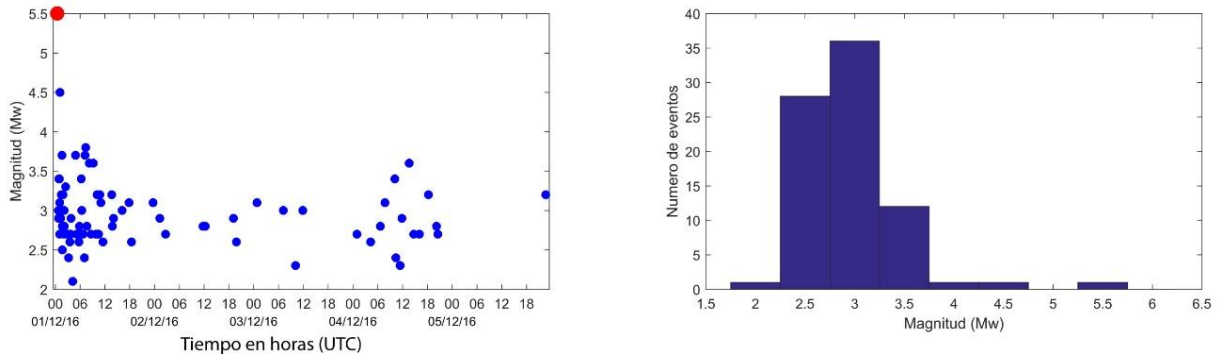


Figura 6: Evolución de las magnitudes en función del tiempo (izquierda) y su distribución (derecha). En rojo se resaltan los datos del sismo principal.

Las réplicas relocalizadas muestran un claro lineamiento de rumbo NNW, entre los volcanes Irazú y Turrialba (Figura 7B), que se extienden por unos 3 km. Llama la atención, que el sismo principal es el evento más al sureste de la secuencia, a unos 3 km al SE de las réplicas y además la ausencia de réplicas en esa zona. Una posibilidad, es que la ruptura del sismo principal deslizó completamente la falla dejando una zona de asperezas en el extremo noroeste, en donde ocurren las réplicas. La longitud de la zona de epicentros, desde el sismo principal hasta el más NW es de unos 6 km.

De la secuencia sísmica temprana, hasta la 1 pm del 1º de diciembre, la RSN localizó 58 réplicas, y luego hasta el 6 de diciembre se habían localizado 83, de las cuales las más grandes se detallan en el Cuadro 3. Según los reportes de las redes sociales de la RSN, 19 de estas réplicas fueron sentidas por la población.

Cuadro 3: Localización inicial de las réplicas con $M_w \geq 3,5$ hasta el día 6 de diciembre.

Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Magnitud
30 de noviembre	18:33	9,986	-83,811	1,5	4,2
30 de noviembre	19:05	9,975	-83,802	1,6	4,5
30 de noviembre	19:20	9,988	-83,805	2,1	4,0
30 de noviembre	19:35	9,972	-83,806	2,0	3,7
30 de noviembre	22:50	9,939	-83,793	4,1	3,7
1º de diciembre	01:08	9,984	-83,801	2,6	3,7
1º de diciembre	01:18	9,974	-83,802	2,1	3,8
1º de diciembre	02:12	9,971	-83,796	1,6	3,5
1º de diciembre	03:08	9,963	-83,806	0,1	3,6
4 de diciembre	07:33	9,985	-83,806	2,8	3,6

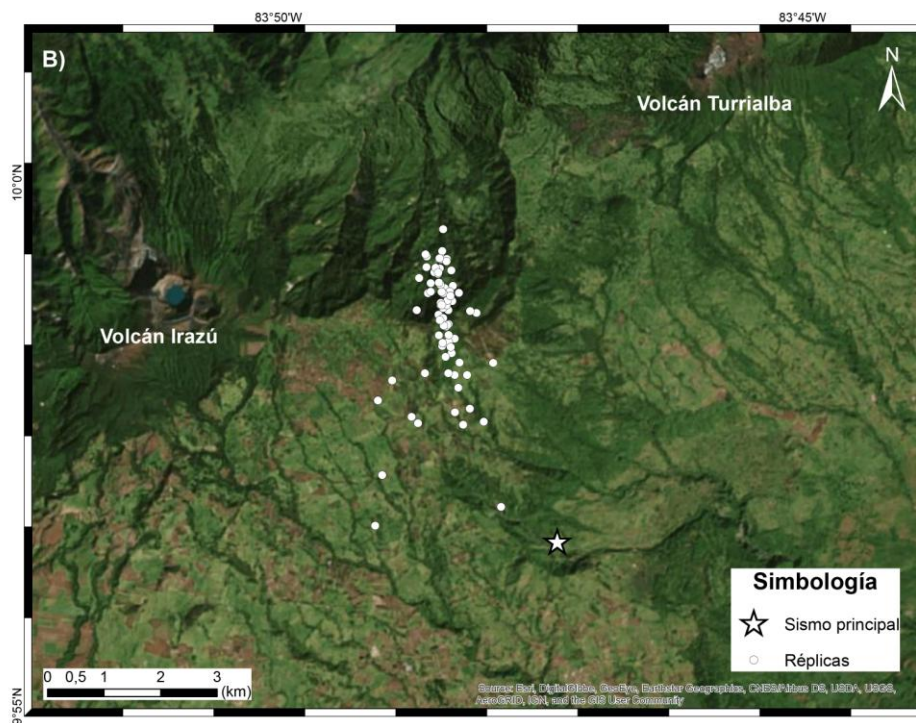
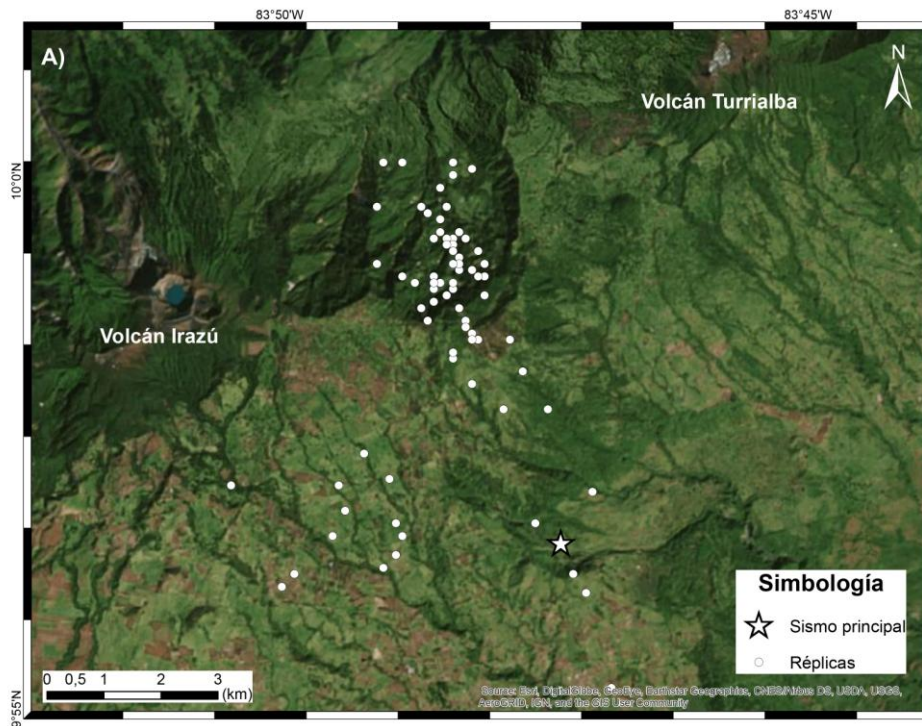


Figura 7: A) Localizaciones iniciales y B) Relocalización con HypoDD.

6. Transferencia de esfuerzos de Coulomb

Después de que la energía ha sido liberada en un área epicentral, se produce un desplazamiento de la corteza que provoca a su vez un cambio en los esfuerzos tectónicos locales. Este cambio de esfuerzos generalmente es transferido a las fallas cercanas y es posible modelarlos con el programa Coulomb (Toda et al., 2011).

Se modelaron once fallas importantes en los alrededores del área epicentral, diez de ellas definidas como fallas de desplazamiento de rumbo y una falla modelada como falla normal. Como la inversión del tensor de momento sugiere que el sismo no es totalmente de doble copla (DC), la fuente se modeló como si fuera una falla dextral con componente inversa.

El análisis de la distribución de los esfuerzos después de la ruptura principal (Figura 8), mostró que la falla que se movió tiene un área de 6,10 km x 4,53 km y las réplicas (relocalizadas con HypoDD) se ubican al NNW del epicentro, en un extremo del área de ruptura, justo donde se encuentran los límites de cambios de esfuerzos positivos (colores rojos) y negativos (colores azules).

En términos generales se puede afirmar que a las fallas con rumbo NNW y NW-SE le fue transferido la mayor cantidad de esfuerzos y que las fallas NE-SW sufrieron una descompresión. Los dos sectores que recibieron la mayor cantidad de esfuerzo y que permanecen cargadas, son el sector NW y el sector SE del área epicentral.

El volcán Irazú ha quedado en compresión, por lo que no se descarta la ocurrencia de sismos tal y como lo demuestran las réplicas. El volcán Turrialba ha quedado en descompresión, lo que puede facilitar el ascenso de fluidos por fracturas abiertas creadas por la actividad reciente del volcán, aunque puede resultar especulativo, debido a la complejidad del sistema volcánico en el Turrialba.

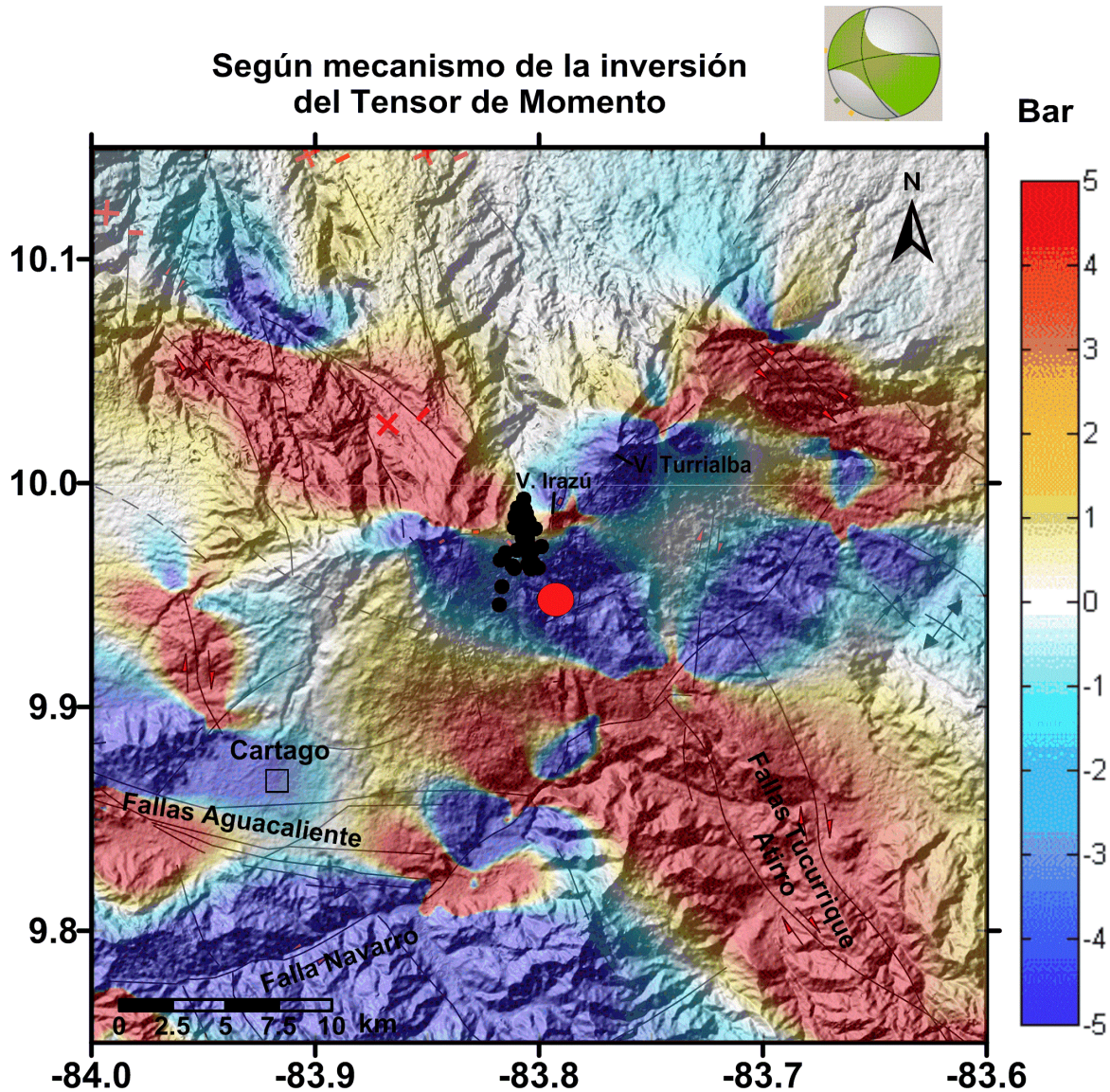


Figura 8: Distribución de los esfuerzos en las fallas locales cercanas al área epicentral (círculo rojo). Las réplicas se indican con puntos negros.

7. Discusión del origen: actividad sísmica de los alrededores al área epicentral

El área de los macizos de los volcanes Irazú y Turrialba se encuentra cortada por múltiples fallas, muchas de ellas activas. El fallamiento en el flanco NW del Irazú, fue estudiado por Montero & Alvarado (1995). En ese trabajo se reconocieron y describieron algunas estructuras importantes entre las cuales sobresale la Falla Río Sucio. Linkimer (2003) y Montero (2003) analizaron posteriormente las áreas del Irazú y Turrialba y

detallan el trazado del fallamiento y exponen evidencias geomorfológicas y geológicas de los movimientos recientes. Montero (2003), particularmente, propuso un modelo tectónico mediante el cual define el sistema de falla Atirro-Río Sucio compuesto por un conjunto de fallas neotectónicas de rumbo NW, predominantemente dextrales. El mismo autor propone que entre las fallas Atirro-Tucurrique y la falla Río Sucio se desarrolló una cuenca de tracción (*pull-apart*) que denominó Turrialba-Irazú.

Por otra parte, las estructuras volcánicas del Turrialba tienen una clara orientación en dirección NE: la ubicación de los cráteres cuspidales, caldera de avalancha o anfiteatro sectorial de colapso (Alvarado, 1984), fallamientos que cortan el macizo e identificados por Soto (1988 a y b) como las fallas Ariete, Elia y Guácimo. Regionalmente existen otras estructuras que cortan el macizo del Turrialba, particularmente en el sector sur, donde la prolongación de la falla Aguacaliente-Navarro, corta el macizo, según lo aportan Linkimer (2003), Montero (2003) y Denyer et al. (2003). El término noreste de la falla llegaría a cortar cerca del anfiteatro de avalancha de Coliblanco, que Alvarado et al. (2004) han propuesto como la posible zona de origen de la gran avalancha volcánica de Angostura, ocurrida hace cerca de 17 ka. Hay otras nuevas propuestas respecto a la continuación de las fallas Navarro, Aguacaliente y Cipreses hacia el este, en el sector sur del Turrialba (Alonso-Henar, 2011), pero sea cual sea esta, el tramo de ruptura visible es del orden de 8-10 km. El macizo del Turrialba se ubicaría en una zona tectónica regional compleja, cerca de donde confluyen los cinturones deformados del Centro de Costa Rica y del Norte de Panamá (cf. Montero, 2003).

En este contexto tectónico se han generado numerosas crisis sísmicas en el volcán Irazú en los años 1982, 1987, 1991, 1994, 1997 y 2012 (Barquero et al, 1992; 1995; Fernández et al., 1998; Mora et al., 2012); esta última, inducida por el terremoto de Sámara ocurrido el 5 de setiembre del 2012. Más recientemente, a partir del 2011 y hasta el presente, la actividad sísmica en los macizos del Irazú y Turrialba se ha tornado más profusa y continua, que en ocasiones se incrementa de manera súbita.

En la Figura 9 se muestra la sismicidad registrada por la RSN en varios periodos desde el 2005. Se observa que la sismicidad previa se concentra principalmente en un área de unos 5 km de ancho a lo largo del eje formado por los cráteres de los volcanes Irazú y Turrialba. El área donde ocurrió el Sismo de Capellades presentaba muy baja sismicidad, lo mismo que el sector sur-oriental del volcán Irazú.

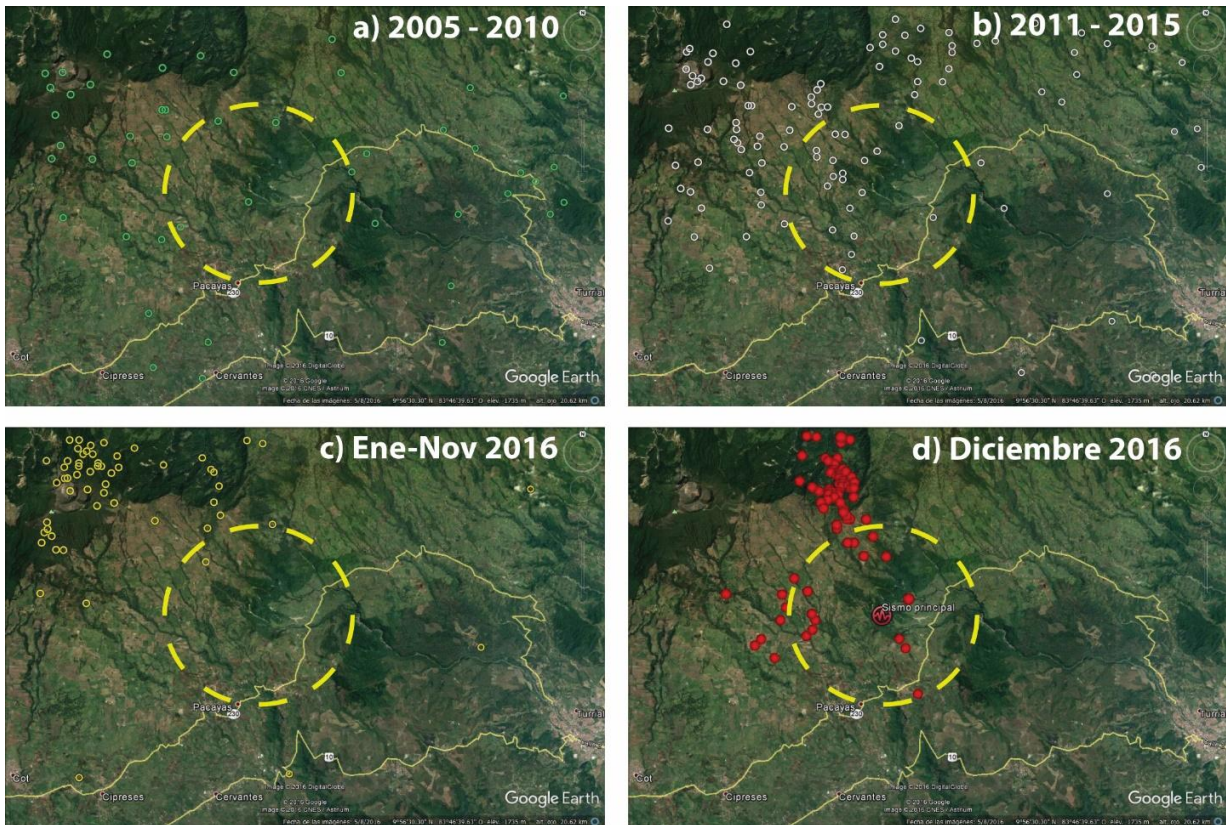


Figura 9: Sismicidad de los alrededores al área epicentral del sismo de Capellades desde el 2005.

El origen del sismo del 30 de noviembre de 2016 es un fallamiento local superficial en la corteza de la placa Caribe, que con base en la orientación de las réplicas y de las soluciones de los mecanismos focales, sería una falla casi vertical de tipo dextral y rumbo nor-noroeste.

Una de las fallas conocida más cercana al epicentro es la falla Capellades (Montero et al., 2013; Figura 10), la cual se localiza sobre el flanco sur de los volcanes Irazú y Turrialba. Esta falla es parte del Sistema de Falla Aguacaliente, tiene un rumbo este-noreste a noreste y una longitud de 25 km. Diversos indicadores geomorfológicos muestran desplazamientos sinestrales desde pocos metros hasta 0,7 km a lo largo de los diversos sectores de la falla Capellades. De acuerdo con Montero et al. (2013), la tasa de deslizamiento de la falla Capellades puede variar entre 0,5 y 3,3 mm/año. No obstante, las soluciones de mecanismos focales y la distribución de réplicas no favorecen a esta falla como la de origen del sismo.

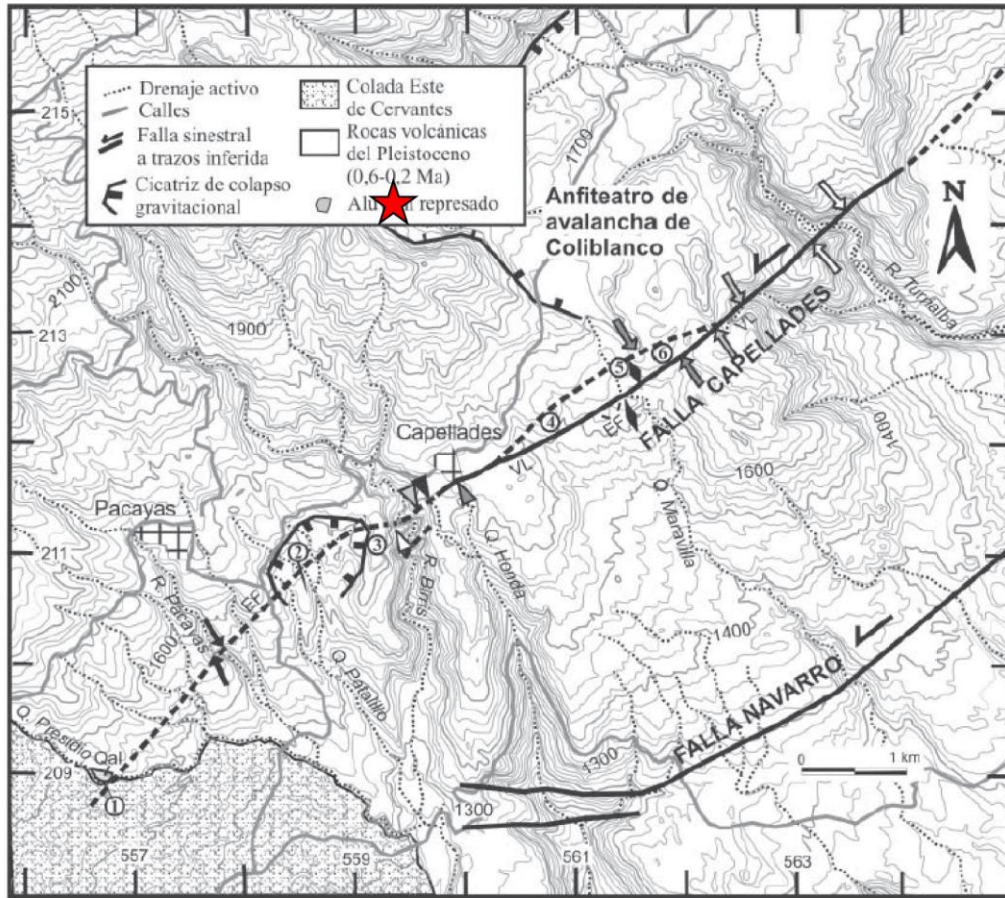


Figura 10: Fallas mapeadas cercanas al epicentro (estrella roja).

Por otra parte, en mapeos fotogeológicos del volcán Turrialba y la zona periférica hacia el volcán Irazú, realizados en un proyectos de investigación conjunto entre las universidades de Costa Rica y Nacional (UCR y UNA) entre 2009-10, se había sugerido la existencia de posibles fallas orientadas NNW en ese sector (Figura 11). En esa zona se interdigitan los macizos de los volcanes Irazú y Turrialba, y no se han hecho distinciones estratigráficas en la cabecera del valle del río Toro Amarillo. Más al sur, se ha mapeado la Unidad Finca Liebres, que es un cono compuesto erosionado con lavas hacia el S, SE y E (andesitas con orto y clinopiroxenos) (Soto, 1988a) con una edad de su actividad más reciente determinada en 251 ± 4 mil años (Ruiz et al., 2010), esto es, parte de la secuencia terminal de la fase de construcción Paleo-Turrialba-Irazú. El cono Finca Liebres estaría entonces ubicado sobre la intersección entre las fallas de rumbo NE-SW que cortan la cima del Turrialba, y la de rumbo NNW-SSE que corta las cabeceras del río Toro Amarillo. Esta última sería la responsable del Sismo de Capellades, continuaría por

varios kilómetros hacia el NNW, y se alinea paralela con otras que cortan el sector norte del macizo del Irazú.

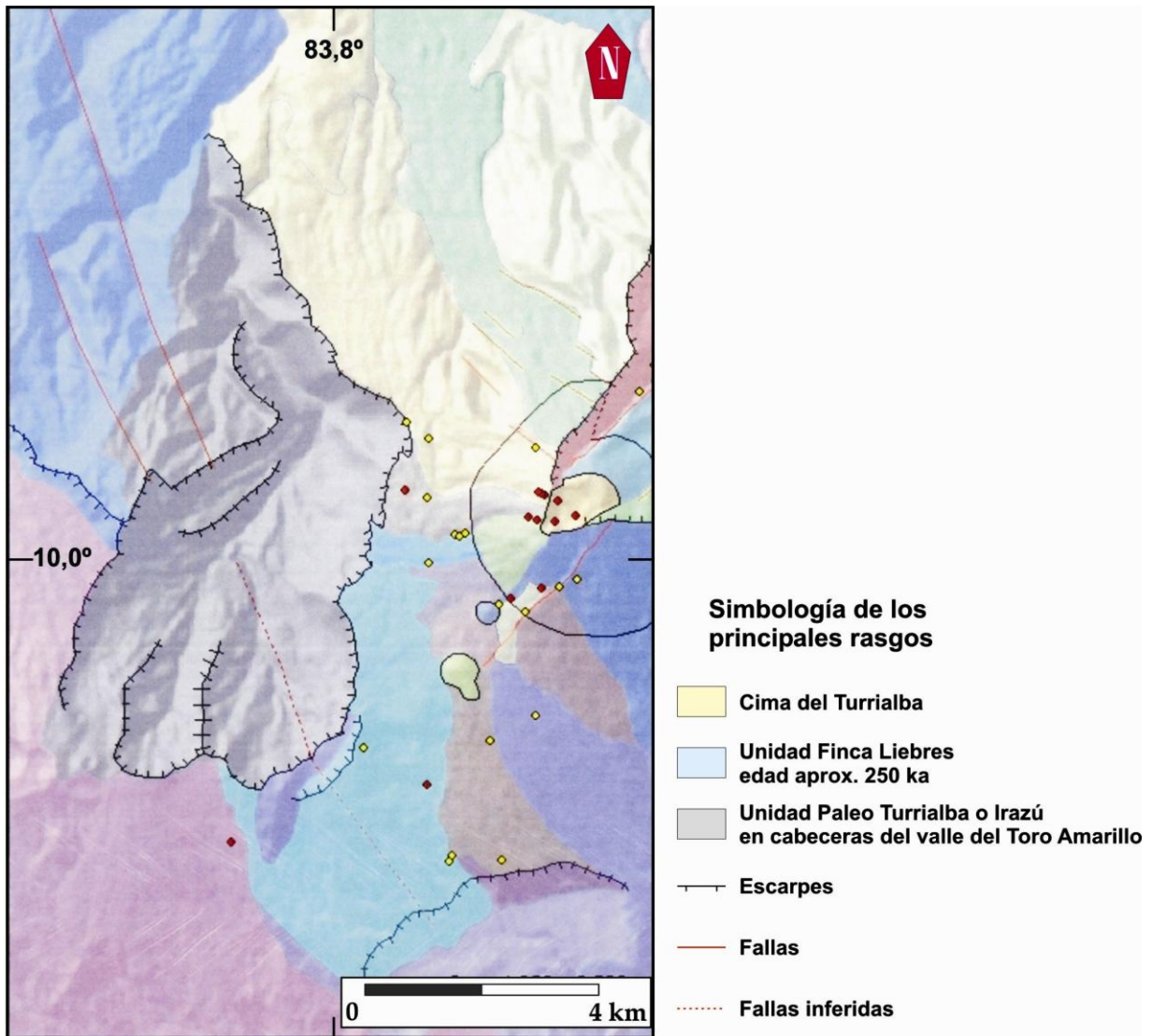


Figura 11: Mapa geológico-geomorfológico del sector entre los volcanes Irazú y Turrialba y la cabecera del río Toro Amarillo, donde se muestra el alineamiento fotogeológico similar al de las réplicas y mecanismo focal del Sismo de Capellades. Tomado del mapa de Rodrigo del Potro en documento de investigación inédito UCR-UNA (2010).

8. Intensidades y reportes de daños en medios y redes sociales

Al momento del temblor, a las 6:25 pm, se hizo una publicación en la cuenta de *Facebook* preguntando en cuáles localidades fue sentido el sismo, la que obtuvo 1853 comentarios y alcanzó a 103 372 usuarios. De la respuesta de los usuarios, fue posible recabar información sobre cómo fue percibido el sismo en 167 localidades ubicadas en las siete provincias de Costa Rica (Apéndice 1). La descripción de los usuarios permitió asignar un valor preliminar en la escala de Intensidad Mercalli Modificada (IMM), el cual puede servir como base para la elaboración en el futuro de un mapa de intensidades observadas.

La intensidad máxima reportada a la RSN fue de VI+ en las localidades de Capellades y Pacayas (Apéndice 1). En estas localidades se reportó daños en varias viviendas, deslizamientos y la caída de objetos. Adicionalmente, hubo reportes de caída de objetos y daños menores en comunidades como Cervantes de Alvarado y Aquiares de Turrialba, en donde se estima una intensidad de VI. En las ciudades de Cartago y Turrialba se reportó la caída de objetos livianos, por lo que se asignó una intensidad de V. En el área metropolitana de San José, los reportes del sismo sugieren que las intensidades varían entre IV en el sector este y III en el oeste. Las localidades más distantes de las que se tienen reportes del sismo fueron San Vito de Coto Brus, el Valle de la Estrella en Talamanca, Puerto Viejo de Sarapiquí y Tambor en la península de Nicoya, en donde fue sentido leve, con una intensidad de II.

Las observaciones reportadas por los usuarios son consistentes con las determinadas de forma automática en la RSN a partir de regresiones construidas con observaciones de intensidades de muchos sismos históricos y los parámetros hipocentrales y la magnitud del sismo (Figura 12) y a partir de los registros instrumentales de las estaciones de la RSN (Figura 13) a través del software *ShakeMap* (Wald et al., 1999). En ambos mapas, se obtienen intensidades máximas de VI en la zona epicentral y un radio de percepción de aproximadamente 150 km.

Los medios de comunicación nacionales e internacionales reportaron daños en la zona cercana al epicentro. Por ejemplo, se reportó la caída de objetos, cortes de electricidad y deslizamientos en las vías en Santa Cruz de Turrialba, Alvarado, Jiménez y Oreamuno. También se reportó que varios poblados como Pacayas, Capellades y otros distritos de Alvarado se quedaron sin luz y agua potable. Se informó que en las localidades de Capellades, Turrialba, Alvarado y Oreamuno, la Cruz Roja y el Cuerpo de Bomberos reportaron la atención de personas afectadas por crisis nerviosas y la

evacuación de al menos 26 personas a un albergue debido a que se encontraban en zonas vulnerables a deslizamientos. Además, se reportó que la Cruz Roja recibió llamadas por golpes con objetos en la cabeza, cortadas con vidrios, y de personas dependientes de oxígeno con problemas por la falta de electricidad. En total se trasladaron 5 personas a centros médicos y el cuerpo de bomberos recibió el reporte de aproximadamente 30 incidencias entre Capellades y Turrialba (reportes de *Diario Extra*, *La Nación*, *La Prensa Libre*, *Repretel* y *El Nuevo Día*).

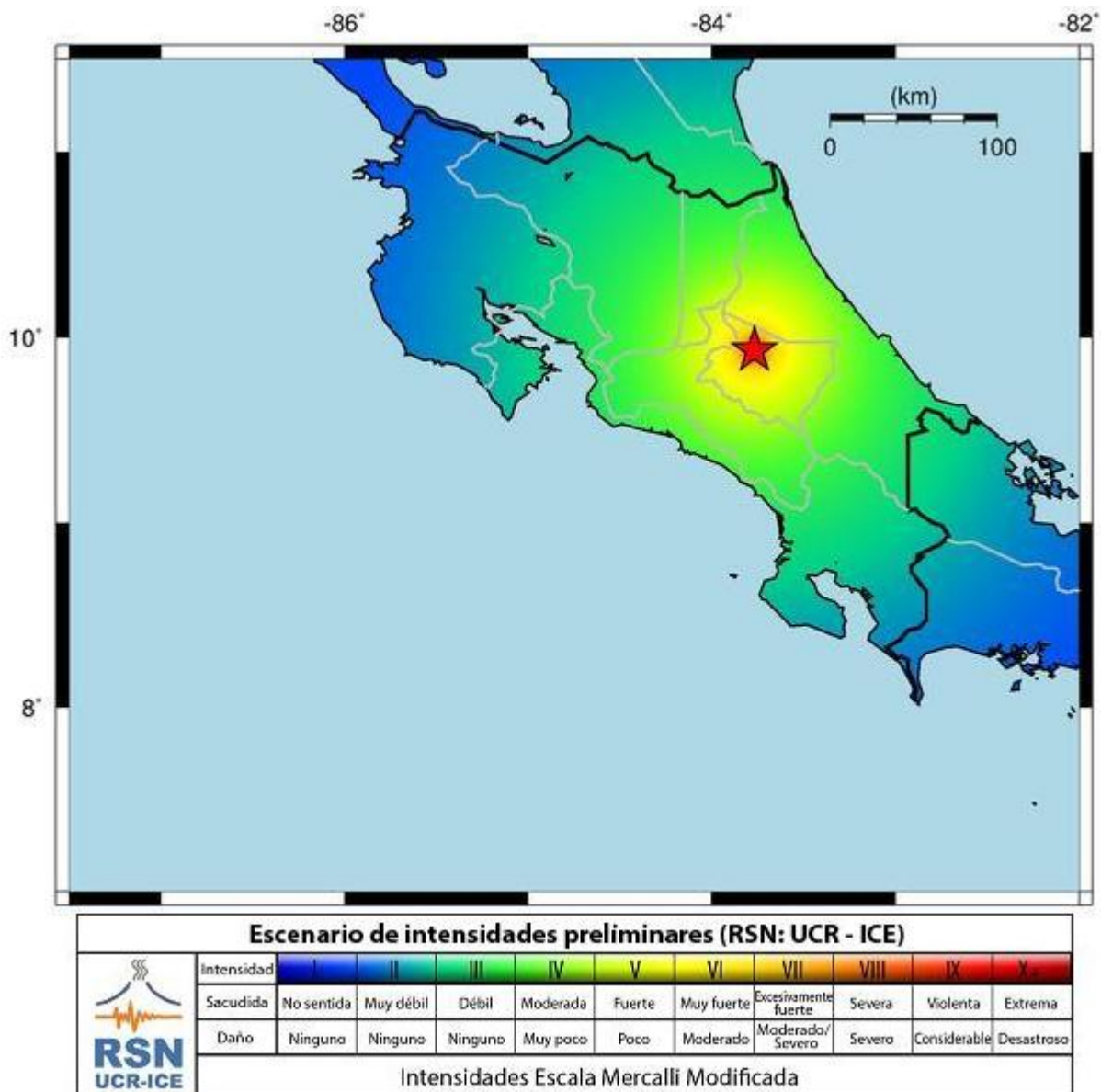


Figura 12: Mapa de intensidades generado a partir del sistema automático de la RSN con base en regresiones que consideran los parámetros hipocentrales y la magnitud del sismo.

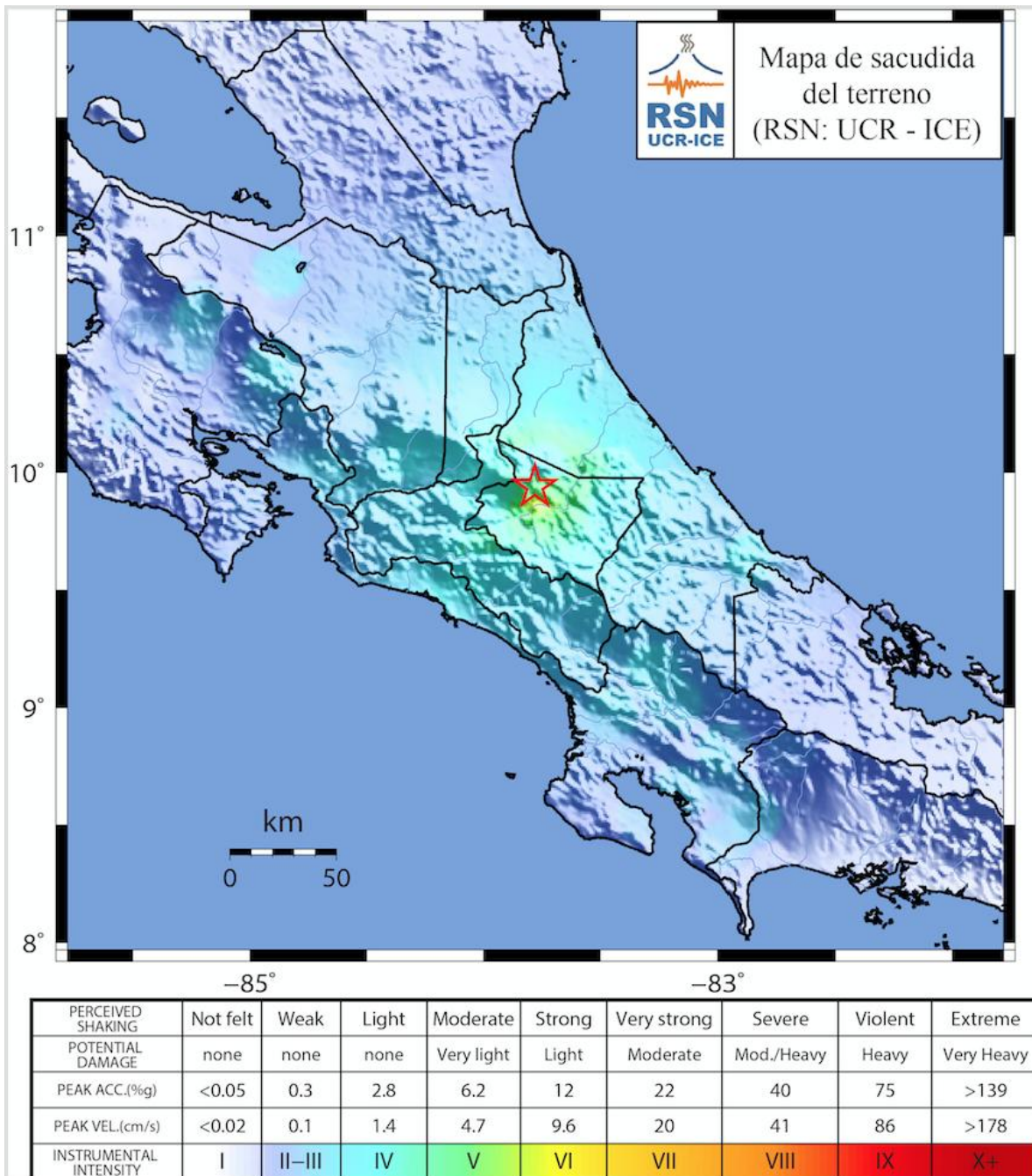


Figura 13: Mapa de sacudida del terreno generado por el programa *ShakeMap* usando los registros instrumentales de la RSN.

Este sismo ha sido uno de los dos más reportados y seguidos en redes sociales desde agosto del 2016. Comparando la pregunta inicial acerca de dónde y cómo fue sentido el sismo con las siguientes publicaciones que se realizaron en *Facebook* durante la noche del 30 de noviembre, se evidencia que sus seguidores tienen mayor interés en las publicaciones en las cuales pueden interactuar con el medio y entre ellos, y dar sus propios reportes, que en aquellas publicaciones meramente informativas. No obstante, el alcance de las siguientes publicaciones también es relevante. Por ejemplo, la publicación de la localización del sismo principal de Capellades tuvo un alcance de 69 141 usuarios y fue compartida 533 veces.

También se observó que los seguidores aún no manejan el lenguaje técnico, y sus reportes son cualitativos, describiendo el sismo con términos como “circular” o “bailado”. Estas descripciones son vagas y difíciles de agrupar en categorías. Por ello, se considera necesaria una campaña educativa en redes sociales para enseñar a los seguidores a describir los sismos con la IMM. Además, se destaca la necesidad de generar inmediatamente la publicación en *Facebook*, que pregunte en qué localidades fue sentido, ya que permite da al público una herramienta para dar sus reportes.

9. Deslizamientos determinados a partir del sobrevuelo en el área epicentral

Mediante un sobrevuelo realizado 36 horas después del evento, el día 2 de diciembre, se pudo constatar que el sismo disparó unos 40 deslizamientos en un sector de unos 7 km x 5 km (35 km²), para un total de afectación areal deslizada de unos 4 km². Los deslizamientos, en combinación con las condiciones saturadas de los suelos volcánicos tropicales, intensamente meteorizados, y la mezcla con el agua de los ríos, produjo flujos de escombros volcánicos a lo largo de los ríos Coliblanco, Playas y Turrialba (Figura 14), sin consecuencias que lamentar.

Aunque los deslizamientos de mayores proporciones se originaron en las cabeceras de los ríos Playas y Coliblanco, no se observó ningún peligro evidente por represamiento en sus cauces. En el río Turrialba, se recomendó la inspección de campo para verificar el estado de los taludes, especialmente en un sector aguas abajo de la intersección de los ríos Coliblanco y Turrialba, donde se observó un posible represamiento menor.

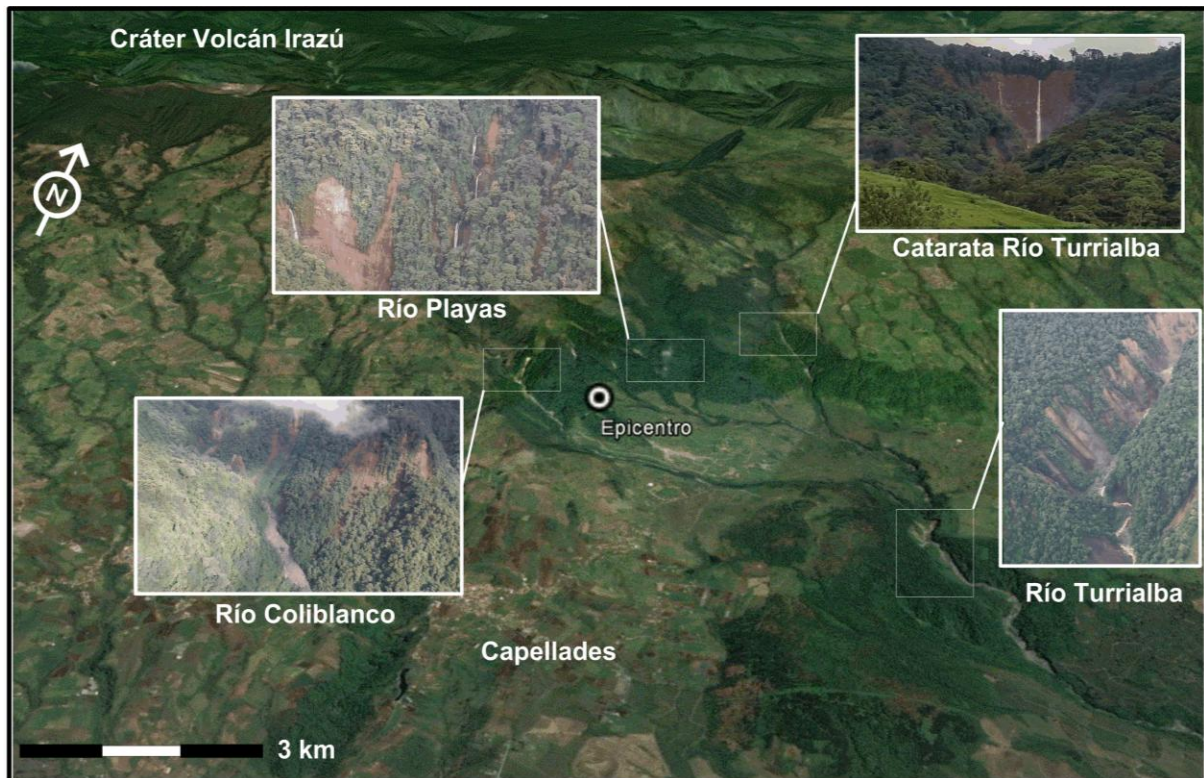


Figura 14: Ubicación de los deslizamientos de mayor tamaño en los ríos Turrialba, Playas y Coliblanco.

Por precaución, las cuencas de todos los ríos fueron recomendadas a ser vigiladas con detalle para determinar el potencial y riesgo de nuevos deslizamientos que pudieran haberse activado con lo que restaba de la estación lluviosa. Las torres de telecomunicaciones ubicadas en la cima del volcán Irazú, el cauce del río Reventado, las laderas de los flancos de los volcanes Irazú y Turrialba, las líneas de transmisión y las laderas de los embalses de los proyectos hidroeléctricos Angostura y Reventazón, no parecen haber sido afectados.

10. Conclusiones

El Sismo de Capellades del 30 de noviembre del 2016 (Mw 5,5) se originó en la parte intermedia entre los macizos volcánicos del Irazú y Turrialba, a una profundidad bastante somera. Ha sido el sismo de mayor magnitud en este sector oriental de la Cordillera Volcánica Central desde el Terremoto de Patillos de 1952 (Mw 6,0).

La secuencia sísmica se prolongó hasta el día 6 de diciembre. La localización de las

réplicas ha podido ser muy precisa, así como la determinación del tensor de momento, lo que en conjunto ha permitido definir dos planos de ruptura posible. Con base en las observaciones geomorfológicas y geológicas previas, es posible asociar la falla de origen del sismo a una identificada con rumbo NNW, que corta el cono Finca Liebres y las cabeceras del río Toro Amarillo.

El sismo ha sido sentido en una parte importante del territorio nacional, con una intensidad máxima de VI+. No obstante, los daños no han sido muy severos, y no ha habido pérdidas humanas ni heridos graves. Los deslizamientos importantes se han restringido a un área principal de 35 km² alrededor del epicentro.

A pesar de la cercanía del punto del hipocentro del sismo con el volcán Turrialba, que mantiene actividad eruptiva periódica desde el 2014, no ha habido consecuencias eruptivas inmediatas.

11. Agradecimientos

Es muy importante reconocer la labor de los técnicos Luis Fernando Brenes y Jean Paul Calvo, por el mantenimiento de la red de instrumentos. Este trabajo ha sido posible gracias a los recursos económicos y de personal brindados por la Universidad de Costa Rica y además de los recursos económicos que la RSN recibe provenientes de la Ley Nacional de Emergencias N^o 8488. Se agradece por su parte, el apoyo de la Rectoría de la Universidad de Costa Rica, a través de horas asistente para la RSN, además de los recursos de los siguientes proyectos vigentes inscritos en las Vicerrectorías de Investigación y Acción Social: “Vigilancia Sísmica de Costa Rica” (113-B5-704); “Estudio del catálogo de sismos de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica” (113-B5-A02); “Apoyo de Asistentes a la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica” (113-A1-716); “Geofísica y geodinámica interna del arco volcánico en Costa Rica” (113-B5-A00); “Estudios de deformación en volcanes activos de Costa Rica” (113-B1-230), y “Difusión de temas sismológicos en Costa Rica” (ED-3005).

12. Referencias

ALONSO-HENAR, J., 2011: Análisis morfotectónico y paleosísmico de la falla de Aguacaliente (Valle Central de Costa Rica). – 48 págs. Tesis de Maestría, Universidad Complutense de Madrid.

- ALVARADO, G.E., 1984: Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. - vii + 183 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- ALVARADO, G.E., VEGA, E., CHAVES, J. & VÁSQUEZ, M., 2004: Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos) de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 30: 83-99.
- BARQUERO, R., LESAGE, P., METAXIAN, J.P., CREUSOT, A. & FERNÁNDEZ, M., 1995: La crisis sísmica en el volcán Irazú en 1991 (Costa Rica). – Revista Geológica de América Central, 18: 5-18.
- BARQUERO, R., SOTO, G. & LESAGE, P., 1992: Volcán Irazú, Informe Vulcanológico período enero 1991 - mayo 1992. – Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, 29 pp. + 18 figs. + 4 Anexos.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica. – 81 págs. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José.
- FERNÁNDEZ, M., MORA, M. & BARQUERO, R., 1998: Los procesos sísmicos del volcán Irazú. - Revista Geológica de América Central, 21: 47-59.
- LIENERT, B.R. & HAVSKOV, J., 1995: A Computer Program for Locating Earthquakes Both Locally and Globally. -Seis. Res. Lett., 66, 26-36, doi:10.1785/gssrl.66.5.26.
- LINKIMER, L., 2003: Neotectónica del extremo oriental del cinturón deformado del centro de Costa Rica. - 103 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- MÉNDEZ, J., SOTO, G.J., ZAMORA, N., VARGAS, A., SJÖBOHM, L., BONILLA, E., BARAHONA, D., SOLÍS, L., KYCL, P. & BAROŇ, I., 2009: Geología de los deslizamientos provocados por el Terremoto de Cinchona, Costa Rica (Mw 6,2; 8 de enero del 2009) en la Ruta 126 (Varablanca-San Miguel). –X Congreso Nacional de Geotecnia y V Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. San José, Costa Rica, 19-21 de agosto del 2009, Memoria digital, 22 pp.
- MONTERO, W. & ALVARADO, G., 1995: El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms= 5.9) y el contexto geotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 18: 25-40.
- MONTERO, W., 2003: El sistema de falla Atirro-Río Sucio y la cuenca de tracción de Turrialba-Irazú: Indentación tectónica relacionada con la colisión del levantamiento del Coco. – Revista Geológica de América Central, 28: 5-29.
- MONTERO, W., ROJAS, W. & LINKIMER, L., 2013. Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de falla Aguacaliente, falda sur macizo Irazú-Turrialba –Revista Geológica de América Central, 48: 119-139.
- MONTERO, W., SOTO, G.J., ALVARADO, G.E. & ROJAS, W., 2010: División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en

- estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. – Revista Geológica de América Central, 43: 13-36.
- MORA, M. M., TAYLOR, W., SOTO, G. J., 2012: Sismicidad inducida y otros efectos causados en el arco magmático.- En: Linkimer, L., Soto, G. (eds.): El Terremoto de Sámara del 5 de setiembre de 2012. Red Sismológica Nacional (ICE-UCR). Informe Interno, págs. 88-91.
- OTTEMÖLLER, L., VOSS, P. & HAVSKOV, J., 2011: SEISAN: the Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, LINUX, and MACOSX, version 9.0.1, University of Bergen, pp. 361.
- RUIZ, P., TURRIN, B.D., SOTO, G.J., DEL POTRO, R., GAGNEVIN, D., GAZEL, E., MORA, M., CARR, M.J. & SWISHER, C.C., 2010: Unveiling Turrialba (Costa Rica) volcano's latest geological evolution through new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, ages. – Abstract V23B-2437 presentado en la 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, 13-17 diciembre.
- SNOKE, J.A., MUNSEY, J.W., TEAGUE, A.G. & BOLLINGER, G.A. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and Sv-P amplitude ratio data.- Earthquake Notes, 55: 15-20.
- SOTO, G.J., 1988a: Estructuras volcano-tectónicas del Volcán Turrialba, Costa Rica, América Central. – Actas V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 de agosto de 1988, Tomo III: I 163-I 175.
- SOTO, G.J., 1988b: Geología y vulcanología del Volcán Turrialba, Costa Rica. – Costa Rican Volcanism Workshop, 14-18 de noviembre de 1988, Washington, D.C. y Shenandoah National Park, 18 pp.
- TODA, S., ROSS S., STEIN, R., SEVILGEN, V. & LIN, J., 2011: Coulomb, Graphic-Rich Deformation and Stress-Change Software for Earthquake, Tectonic and Volcano Research and Teaching-User Guide.- USGS Open-File Report 2011-1060, 63 págs.
- WALD, D.J., QUITORIANO, V., HEATON, T.H., KANAMORI, H., SCRIVNER, C.W. & WORDEN, C.B., 1999: TriNet “ShakeMaps”: Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California.- Earthquake Spectra, 15(3): 537-555.
- WALDHAUSER, F., 2001. HYPODD: A Computer Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations. - Open-File Rep. - U. S. Geological Survey, 01-113, 25 págs.
- WALDHAUSER, F. & ELLSWORTH, W.L., 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. – Bulletin of the Seismological Society of America, 90: 1353-1368.

También puede obtener información a través de los siguientes medios:

- CIBERSITIO: <http://www.rsn.ucr.ac.cr/>
- FACEBOOK: <http://www.facebook.com/RSN.CR>
- TWITTER: <https://twitter.com/RSNcostarica>
- CORREO: redsismologica.ecg@ucr.ac.cr
- Aplicación móvil gratuita “RSN” disponible en: *App Store* y *Play Store*.

APÉNDICE 1

Intensidades preliminares a partir de reportes en redes sociales.

Localidad	Descripción	IMM
Pacayas	Demasiado fuerte, daños en varias casas, derrumbes y artículos caídos.	VI+
Capellades	Demasiado fuerte, daños en varias casas, con objetos caídos.	VI+
Cervantes	Demasiado fuerte, con objetos caídos	VI
Aquiaries	Demasiado fuerte con objetos quebrados.	VI
Cartago	Largo y muy fuerte, se cayeron objetos	V+
Paraíso	Largo y muy fuerte, se cayeron objetos	V+
Tucurrique	Fuerte, se cayeron objetos	V+
Turrialba	Largo y fuerte, hubo un pequeño derrumbe y se cayeron cosas	V+
Juan Viñas	Corto y fuerte, se cayeron cosas.	V+
Agua Caliente de Cartago	Largo y muy fuerte.	V
Birrisito, Paraíso	Muy fuerte	V
Cot de Cartago	Largo y muy fuerte	V
Dulce Nombre de Cartago	Largo y muy fuerte	V
El Alto de Oreamuno	Muy fuerte	V
Pitahaya	Muy fuerte	V
Caballo Blanco Cartago	Largo y muy fuerte	V
Cachi	Muy fuerte	V
La Unión de Cartago	Largo y fuerte	V
Llano Grande	Largo y fuerte	V
Irazú	Muy fuerte	V
El Carmen de Cartago	Largo y fuerte	IV
Guadalupe de Cartago	Largo y fuerte	IV
La Lima de Cartago	Largo y fuerte	IV
Las Vueltas de Tucurrique	Fuertísimo	IV
Oreamuno de Cartago	Largo y fuerte	IV
Potrero Cerrado	Fuerte	IV
San Blas Cartago	Fuerte	IV
San Nicolás de Cartago	Largo y fuerte	IV
San Rafael de Cartago	Largo y fuerte	IV
San Rafael de Oreamuno	Largo y fuerte	IV
Tejar del Guarco	Largo y fuerte	IV

El Guarco de Cartago	Largo y fuerte	IV
Ochomogo	Fuerte	IV
Orosi	Fuerte	IV
Pejibaye de Cartago	Fuerte	IV
San Cristóbal Norte	Fuerte	IV
Taras de Cartago	Fuerte	IV
Tierra Blanca de Cartago	Fuerte	IV
Tres Ríos	Fuerte	IV
Cariari de Pococí	Fuerte	IV
Concepción de Tres Ríos	Fuerte	IV
Coronado	Fuerte	IV
Guácimo, Limón	Largo y fuerte	IV
Guápiles	Largo y fuerte	IV
Jabillos	Fuerte	IV
La Suiza de Turrialba	Fuerte	IV
Pococí	Fuerte	IV
Curridabat	Largo y fuerte	IV
El Alto Guadalupe	Fuerte	IV
El Carmen de Guadalupe	Largo y fuerte	IV
Granadilla de Curridabat	Largo y fuerte	IV
Grano de oro	Fuerte	IV
Guadalupe	Largo y fuerte	IV
Jiménez, Pococí	Largo y fuerte	IV
La Aurora Heredia	Fuerte	IV
Lagunilla de Heredia	Fuerte	IV
Lourdes	Fuerte	IV
Matina	Fuerte	IV
Montes de Oca	Largo y fuerte	IV
Moravia	Largo y fuerte	IV
Mozotal de Goicoechea	Largo y fuerte	IV
Pavas	Largo y fuerte	IV
Platanares de Moravia	Fuerte	IV
Purrál	Largo y fuerte	IV
Río Jiménez de Guácimo	Fuerte	IV
Sabanilla	Largo y fuerte	IV
San Antonio Desamparados	Muy ruidoso, moderado	IV
San Francisco de Dos	Largo y fuerte	IV

Ríos		
San Isidro de Heredia	Largo y fuerte	IV
San Jerónimo de Moravia	Largo y fuerte	IV
San José de la Montaña	Largo y fuerte	IV
San Marcos de Tarrazú	Largo y fuerte	IV
San Rafael de Heredia	Fuerte	IV
San Ramón de Tres Ríos	Largo y fuerte.	IV
Tibás	Largo y fuerte	IV
Batan de Matina	Fuerte y largo	IV
Dota	Largo y fuerte	IV
Poas de Alajuela	Largo y fuerte	IV
Puriscal	Largo y fuerte	IV
Quepos	Fuerte	IV
San Gabriel de Aserrí	Fuerte	IV
Buenos Aires de Puntarenas	Largo y fuerte	IV
Siquirres	Largo y moderado	III
Alajuelita	Largo y moderado	III
Aranjuez	Moderado	III
Barreal de Heredia	Moderado y largo	III
Calle Blancos	Largo y moderado	III
Cedros de Montes de Oca	Largo y moderado	III
Chirripó	Moderado	III
Heredia	Largo y moderado	III
Ipís de Goicoechea	Largo y moderado	III
La Uruca	Largo y leve	III
Los Yoses	Largo y leve	III
Puerto Limón	Moderado	III
San Francisco de Heredia	Moderado	III
San José Centro	Largo y moderado	III
San Pablo de Heredia	Largo y moderado	III
San Pedro	Moderado como mecido	III
Zapote	Largo y moderado	III
Alajuela	Largo y moderado	III
Carrizal de Alajuela	Largo y moderado	III
Coto Brus	Largo y moderado	III

Río Segundo de Alajuela	Largo y moderado	III
San Joaquín de Flores	Largo y moderado	III
San Pedro de Poás	Largo y moderado	III
Santa Bárbara de Heredia	Largo y moderado	III
Uvita de Osa	Largo y moderado	III
Zona de Los Santos	Largo y moderado	III
Ballena de Osa	Moderado	III
Barra de Parismna	Moderado	III
Bribri, Talamanca	Intensidad moderada pero muy largo	III
Cahuita	Moderado	III
Cortés, Osa	Largo y moderado	III
Jacó	Largo y moderado	III
Portalón, Quepos	Largo y moderado	III
Aserri	Leve pero largo	II
Barrio México	Leve pero largo	II
Barva	Largo y moderado	II
Belén	Largo y leve	II
Beverly, Limón	Leve y largo	II
Carmen de Guadalupe	Leve y largo	II
Escazú	Leve y largo	II
Hatillo	Largo y leve	II
Jiménez de Guápiles	Leve	II
Rohrmoser	Leve	II
Sabana	Leve	II
San Sebastián	Leve	II
Tarrazú	Largo y leve	II
Uruca	Largo y leve	II
Ciudad Colón	Leve	II
Desamparados de Alajuela	Leve	II
La Ceiba de Alajuela	Largo y Leve	II
La Garita Alajuela	Leve	II
La Guácima de Alajuela	Largo y leve	II
Puerto Viejo Sarapiquí	Leve	II
Santa Ana	Largo y leve	II
Sarapiquí	Largo y leve	II
Tambor	Largo y leve	II
Tarbaca	Leve	II
Atenas	Leve	II
Ciudad Neilly	Leve como mecido	II

Esparza	Leve	II
Golfito	Suave y largo	II
Grecia	Leve	II
La Virgen de Sarapiquí	Leve	II
Manuel Antonio	Leve	II
Naranjo	Largo y leve	II
Osa	Leve	II
Palmar Norte Zona Sur	Leve	II
Palmar Sur	Leve	II
Playa Agujas	Largo y leve	II
Puntarenas	Leve	II
San Carlos	Leve	II
San Ramón de Alajuela	Leve	II
San Vito	Largo y leve	II
Sarchí	Leve	II
Talamanca	Leve	II
Valle la Estrella, Limón	Leve	II
Venecia de Limón	Leve	II
Barranca Puntarenas	No se sintió	I
Nicoya	No se sintió	I
Palmares	No se sintió	I
Parrita Puntarenas	No se sintió	I
Peñas Blancas, San Ramón	No se sintió	I
Río frío	No se sintió	I
Toro Amarillo en Guápiles	No se sintió	I