

ESTUDIO DE REPLICAS DEL TERREMOTO DE LIMON USANDO DATOS LOCALES: RESULTADOS E IMPLICACIONES TECTONICAS.

Lautaro Ponce^{1,2}, Mario Pardo^{1,2}, Jaime Domínguez¹, Walter Montero³, Wilfredo Rojas³, Ileana Boschini⁴, Gerardo Suárez¹ & Eduardo Camacho⁵

¹Instituto de Geofísica, UNAM, 04510 México D. F.

²Departamento de Geología y Geofísica, U. de Chile, Santiago

³Escuela Centroamericana de Geología, U. de Costa Rica, Apartado 35-2060, San José, Costa Rica

⁴Instituto Costarricense de Electricidad, Apartado 2032-1000, San José, Costa Rica

⁵Instituto de Geociencias, U. de Panamá, C. de Panamá, Panamá.

ABSTRACT: An aftershock study of the Limón earthquake of April 22, 1991 ($M_s = 7.6$) was done combining data from a temporal network of seismic stations located inside the aftershock area, and data obtained from the Red Sismológica Nacional (RSN, ICE-UCR). A definition of the aftershock area of 85 x 45 km² were found after the location process of a good sample of aftershocks (M_c from 2.4 to 4.0). Also, we estimated that the rupture surface of the mainshock has a mean inclination of 23° to the SW. We find that the fault shallows from the Costa Rica-Panamá border zone to the northwest side of the rupture area. Some of the hypocenters located suggests that some secondary thrust and sinistral strike slip faults were reactivated by the mainshock.

RESUMEN: Un estudio de réplicas del Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 ($M_s = 7.6$) fue realizado combinando datos de una red temporal de estaciones ubicadas dentro del área epicentral, en conjunto con datos obtenidos de la Red Sismológica Nacional (RSN, ICE-UCR). El estudio permitió la definición del área de ruptura frágil el cual se estima en 85 x 45 km² y del ángulo promedio de inclinación de la falla principal, el cual se considera es de 23° al SW. Además se encuentra que la falla se hace más somera progresivamente desde la zona fronteriza de Costa Rica-Panamá hacia el borde noroeste del área de ruptura. Algunos de los hipocentros localizados sugieren que fallas secundarias inversas y de desplazamiento de rumbo fueron reactivadas por el evento principal.

INTRODUCCION

El 22 de abril de 1991 ocurrió un gran terremoto ($M_s = 7.6$) en la región Caribe de Costa Rica. El epicentro fue localizado alrededor de 40 km al sur de Puerto Limón (Fig. 1). El levantamiento cosísmico fue bien conspicuo desde Puerto Limón hasta cerca de la frontera con Panamá (Plafker & Ward, 1992; Denyer et al., este volumen). El potencial sísmico asociado a la ocurrencia de

grandes terremotos era considerado bajo en esta región, dado que ésta no forma parte de un límite importante de placas y además no habían sido reconocidos grandes sismos en esta región. Cuando ocurrió el evento principal, las redes sismográficas de Costa Rica (ICE-UCR y UNA)* cubrían principalmente la región pacífica y el cinturón volcánico. Deslizamientos disparados por el terremoto ocurrieron a lo largo de las faldas noreste de la Cordillera de Talamanca, pero no se reportó

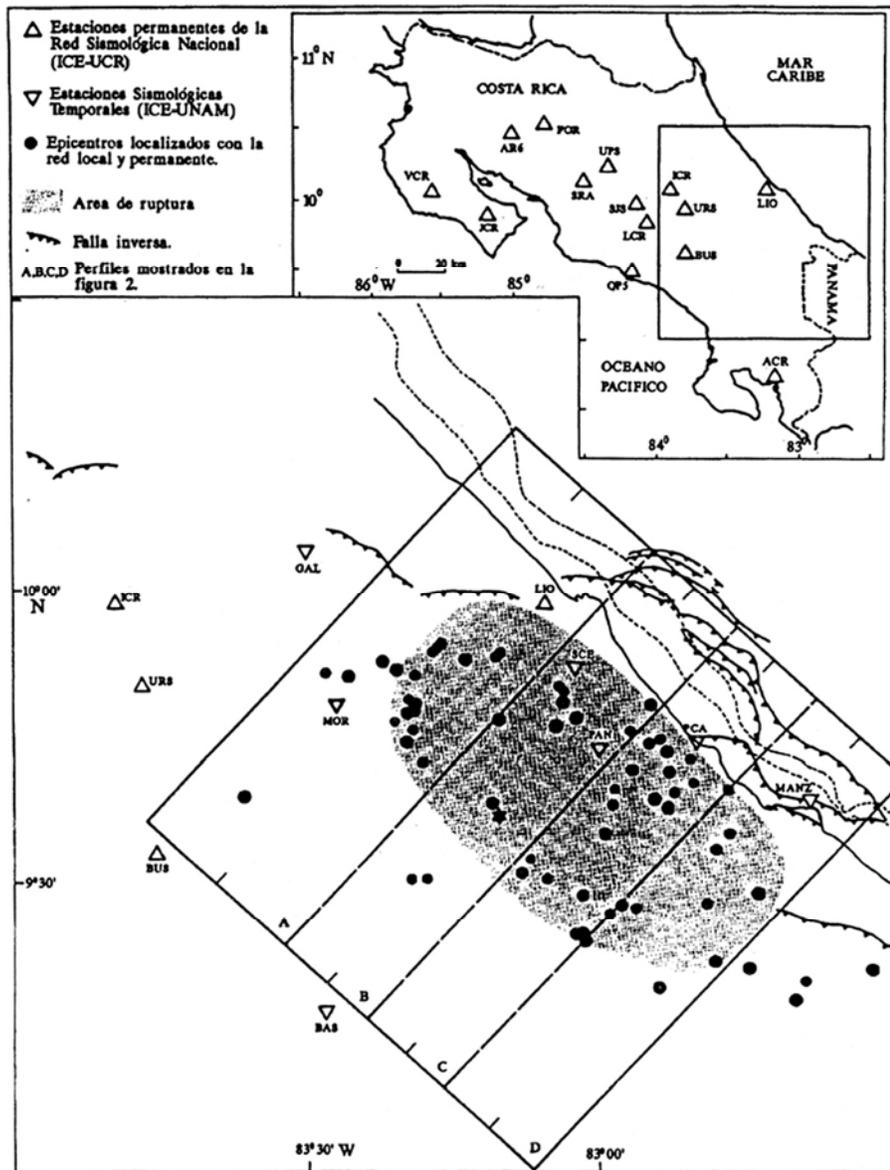


Fig. 1: Esquina superior derecha. Se muestra la ubicación de las estaciones sismológicas permanentes de la RSN (ICE-UCR). Se señala además el área que se muestra en detalle en la parte inferior. Figura principal. Vista detallada del área epicentral y de la zona de ruptura definida con base en las réplicas localizadas con las estaciones portátiles y permanentes (Tabla 2). El epicentro del evento principal se muestra como una estrella. se muestran los sistemas de fallas inversas recopilados de información proporcionada por RECOPE para la región marina adyacente. También se definen la ubicación de las estaciones temporales y las cajetillas cuya sismicidad se muestra en los perfiles de la figura 2.

evidencias de fallamiento superficial a lo largo de la ruptura principal, aunque si se ha reportado fallamiento secundario (Denyer et al., este volumen). Un pequeño tsunami fue observado por

los habitantes de la zona; este fue registrado con una amplitud de 7 cm en Puerto Cristóbal, Panamá.

Para complementar la cobertura de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR), nueve

estaciones portátiles fueron instaladas dentro del área de réplicas por el Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma (IGF-UNAM), en colaboración con la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica (EG-UCR) y el Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). ROSTLAC-UNESCO dió el apoyo financiero al IGF-UNAM para su visita oficial a Costa Rica. Debido a los daños causados a las vías de comunicación por el terremoto y a la apretada agenda de los viajes del helicóptero que fue especialmente asignado para el rescate de la gente aislada, las dos estaciones portátiles planeadas para monitorear la costa Caribe fueron instaladas y mantenidas diariamente por vía marítima. La rutina de mantenimiento de la red temporal fue extremadamente difícil y una operación continua y completa de la red temporal se logró solo parcialmente. En este trabajo se reportan los resultados del estudio de 68 réplicas bien localizadas, registradas en el período del 29 de abril al 4 de mayo, 1991. Resultados preliminares fueron reportados por Montero et al. (1991) y Ponce et al. (1991).

Las réplicas definen un área de ruptura de alrededor de 85 x 45 km². La distribución de los hipocentros de las réplicas son usadas para seleccionar el plano de falla. La profundidad del evento principal puede ser fijado en el intervalo entre 20 a 25 km. El rumbo y la inclinación de la superficie de falla es de alrededor de 13° N y 23° hacia el SW, respectivamente. Además, la distribución de los hipocentros sugiere que fallas inversas superficiales, cuyas trazas en la región continental ha sido bien reconocida, fueron reactivadas por el evento principal. Los anteriores parámetros son básicos para determinar los parámetros del evento principal (Montero et al., este volumen).

TRABAJO DE CAMPO Y ANÁLISIS DE DATOS

Siete sismómetros verticales ($T_0=1_s$) en conjunto con estaciones MEQ-800 y tres sismómetros de tres componentes ($T_0=1_s$) conectados a estaciones digitales EA A, fueron usados durante

Tabla 1
Ubicación de las estaciones sismológicas temporales.

Est.	Lat °N	Long. °W	Alt. m	Corrección seg.
GAL	10,07	83,50	0350	
MOR	09,81	83,45	1180	+0,60
PAN	09,73	83,90	0040	+0,60
BAS	09,28	83,47	0900	
LVU	08,97	83,18	0210	
ALT	08,93	82,83	1410	
SCE	09,87	83,04	0150	+0,30
MAN	09,64	82,64	0010	+0,60
PCA	09,74	92,84	0003	+0,60

el estudio de réplicas. El equipo fue instalado en los sitios SCE, MAN y PCA (Fig. 1). Las observaciones duraron desde el 28 de abril hasta 4 de mayo. Las estaciones portátiles que complementaron la red de estaciones permanentes de la RSN, se muestran en la figura 1 y la Tabla 1. La parte sur del área de réplicas fue inaccesible debido a los deslizamientos ocurridos a lo largo de los caminos y por el daño provocado a los puentes. Del lado de la costa Caribe, las localizaciones epicentrales fueron controladas por la estación permanente LIO y por las estaciones portátiles PCA y MAN. Las últimas dos fueron instaladas sobre terreno arrecifal y fueron accesibles únicamente por mar. Las estaciones portátiles instaladas en el interior fueron instaladas en roca, y en general tenían alta ganancia. Cientos de réplicas fueron registradas durante el trabajo de campo. La red permanente y las estaciones portátiles instaladas en SCE, MAN, y PCA tuvieron un control de tiempo exacto. Las otras estaciones portátiles no tuvieron un control de tiempo regular. Para estas últimas estaciones solo los tiempos S-P fueron usados en las localizaciones hipocentrales. Únicamente las estaciones permanentes localizadas a menos de 250 km de los epicentros fueron consideradas en el proceso de localización. Los datos obtenidos en la estación permanente LIO, localizada dentro del área epicentral fue especialmente útil.

Inicialmente 120 réplicas fueron seleccionados y únicamente 68 de ellos tuvieron localizaciones aceptables (Fig. 1 y Tabla 2). Las magnitudes

Tabla 2
Parámetros focales de las réplicas localizadas

FECHA	LAT	LONG	PROF	MAG	N	DM	GAP	RMS	ERH	ERZ	Q
a m d h m s	°N	°W	km	km			km	(°)	seg	km	km
91429 01024,93	9,658	82,871	33,72	3,0	8	16	155	,21	2,4	3,2	C
91429 23236,26	9,543	83,117	27,66	2,7	9	37	106	,25	1,5	5,9	C
91429 35046,30	9,367	82,803	27,06	3,3	16	35	177	,41	2,0	5,4	C
91429 62802,33	9,413	83,039	22,41	3,4	13	35	129	,24	1,0	5,5	C
91429 65740,95	9,662	82,970	29,17	2,9	15	8	97	,31	1,6	2,5	C
91429 82602,34	9,320	82,400	28,99	3,2	8	44	266	,55	6,8	3,8	D
91429 85225,56	9,559	82,802	23,31	2,8	9	19	138	,51	4,4	7,8	D
91429 100510,51	9,746	82,895	15,29	3,0	14	6	157	,27	1,9	1,7	C
91429 125834,68	9,738	82,913	11,05	3,1	14	8	147	,34	2,2	2,5	C
91429 135337,70	9,747	83,166	27,54	4,0	13	19	137	,46	2,9	6,4	C
91429 135826,53	9,457	82,936	31,71	2,9	12	31	138	,24	1,1	2,9	C
91429 142108,03	9,354	82,745	26,94	3,4	14	33	191	,41	2,0	3,4	D
91429 154636,84	9,830	83,057	7,89	2,9	11	17	133	,45	1,7	6,2	C
91429 161137,74	9,884	83,225	21,33	3,2	9	18	125	,31	3,6	4,7	C
91430 192733,10	9,298	82,667	37,29	3,1	12	38	214	,28	3,3	2,0	D
91430 205332,15	9,835	83,058	5,03	3,2	19	5	83	,33	1,6	1,5	B
91430 213802,09	9,637	83,182	5,00	3,3	17	30	89	,24	0,8	1,6	C
91430 213951,18	9,856	83,315	5,55	2,9	15	16	101	,40	1,8	3,0	C
91430 224657,87	9,633	82,974	22,17	2,9	16	11	102	,44	2,4	4,7	C
91430 233834,67	9,483	83,026	25,05	3,1	15	35	122	,37	1,8	8,5	C
91501 002427,90	9,855	83,436	13,45	3,0	17	6	86	,45	2,0	3,0	B
91501 002535,95	9,861	83,469	11,53	2,8	15	6	81	,29	1,3	2,2	B
91501 011151,85	9,509	83,293	18,14	3,0	15	37	186	,40	2,4	16,0	D
91501 012106,39	9,586	82,989	29,69	3,2	15	24	109	,47	2,3	4,8	C
91501 024641,82	9,461	82,959	22,43	3,4	18	30	208	,42	2,7	7,8	D
91501 024904,83	9,758	82,944	17,67	2,4	12	7	133	,45	3,2	3,2	C
91501 032930,79	9,778	83,348	8,68	3,0	17	12	140	,23	1,1	5,1	C
91501 034622,76	9,649	83,605	11,39	3,6	14	20	148	,34	1,7	4,3	C
91501 043513,46	9,807	83,312	20,70	3,2	16	15	136	,35	1,8	3,7	C
91501 051003,84	9,784	83,035	15,20	3,2	18	7	108	,36	2,3	2,2	C
91501 055222,45	9,796	83,312	10,37	2,9	16	15	138	,51	2,5	5,9	D
91501 070041,71	9,504	83,086	13,82	2,9	12	27	220	,60	8,7	19,4	D
91501 081427,23	9,895	83,166	21,23	2,7	11	12	123	,29	3,3	3,4	C
91501 084214,58	9,588	82,777	6,58	2,7	9	16	198	,23	10,1	9,9	D
91501 093900,98	9,709	83,302	23,13	2,9	14	19	155	,37	2,1	4,7	C
91501 104710,10	9,749	83,321	5,67	3,2	16	15	146	,31	1,2	2,1	C
91501 112252,92	9,583	83,632	20,74	3,5	12	14	171	,34	2,6	4,4	C
91501 124420,67	9,866	83,343	7,01	3,1	14	13	122	,49	2,5	4,6	C
91501 131355,96	9,467	82,816	29,85	3,0	11	27	230	,31	3,0	3,8	D
91501 131953,00	9,507	83,320	38,51	2,6	10	36	197	,28	2,8	4,8	D
91501 135659,68	9,791	83,324	17,94	3,0	16	14	83	,49	2,4	7,7	B
91501 141538,62	9,736	82,830	16,66	3,1	15	2	182	,38	2,5	2,1	D
91501 141742,03	9,645	82,906	20,82	3,3	17	13	103	,58	3,0	4,5	C
91501 144849,89	9,694	82,942	2,21	3,3	18	12	92	,50	1,7	2,3	D
91501 150212,48	9,723	82,882	16,54	3,1	19	5	103	,69	3,1	3,9	C

Tabla 2 (continuación)

FECHA	LAT	LONG	PROF	MAG	N	DM	GAP	RMS	ERH	ERZ	Q	
a m d h m s	°N	°W	km	km			km	(°)	seg	km	km	
91501	161707,77	9,890	83,172	21,72	2,7	16	13	124	,25	1,4	2,2	B
91501	164350,36	9,184	83,322	8,99	3,0	18	14	89	,44	1,8	4,6	C
91501	165058,20	9,905	83,276	4,24	2,7	19	22	121	--	2,5	3,2	D
91502	174225,00	9,400	83,020	37,26	3,2	12	35	133	--	1,2	1,5	C
91502	174618,00	9,690	82,880	29,66	3,5	12	32	141	,58	4,0	5,3	D
91502	181545,84	9,640	82,880	19,07	3,4	18	7	123	,36	2,4	6,4	C
91502	195119,45	9,410	83,030	33,75	3,4	16	15	131	,32	1,9	3,4	D
91502	211426,71	9,780	83,320	7,72	3,0	12	27	117	,22	1,4	7,4	D
91502	222938,23	9,480	82,730	15,17	3,6	11	12	239	,35	4,6	4,3	C
91503	002630,58	9,910	83,270	22,64	3,4	9	16	123	,31	2,4	2,3	D
91503	002741,98	9,880	83,370	18,38	3,2	14	19	121	,39	2,8	4,2	C
91503	003337,10	9,670	82,910	26,76	2,9	16	15	165	,34	2,4	2,5	C
91503	030300,92	9,710	82,840	27,62	3,0	12	14	150	,29	3,2	2,2	C
91503	045544,67	9,520	83,130	1,82	3,6	14	13	106	,44	1,7	2,5	C
91503	075816,96	9,450	82,980	19,34	2,7	11	27	131	,17	1,1	7,6	D
91503	082704,00	9,330	82,650	36,57	2,8	10	36	216	,22	3,5	2,0	D
91503	083857,68	9,900	83,280	5,00	2,8	16	14	149	,37	2,2	2,4	B
91503	085826,62	9,350	82,540	33,66	3,4	15	2	242	,38	3,4	2,0	D
91503	131620,03	9,640	82,910	1,56	3,5	17	13	172	,48	3,3	5,2	C
91503	134029,89	9,660	82,780	37,57	2,8	18	12	308	,07	3,5	1,6	D
91503	150712,48	9,780	83,170	22,56	3,1	19	5	143	,40	3,0	3,9	C
91503	160036,77	9,810	83,060	13,93	3,4	16	13	110	,43	3,7	3,7	B
91503	162851,36	9,770	83,070	5,55	3,3	18	14	145	,30	3,2	3,3	C

locales (Lee & Lahr, 1975) variaron entre 2,4 y 4,0. Una atención especial fue dada a la forma de la onda P de cada temblor; esta observación fue útil para estimar la profundidad hipocentral cuando la cobertura de la red era pobre. Los arribos de las ondas P y S fueron leídos con una exactitud de 0,1 s a 0,3 s respectivamente. Los hipocentros fueron localizados mediante el programa HYPO71PC (Lee & Valdés, 1985). El modelo cortical corrientemente usado por la RSN se muestra en la Tabla 3 y fue adaptado de uno propuesto por Matumoto et al. (1977) para el noroeste de Costa Rica. Dado que el espesor de los sedimentos es bastante variable bajo la zona epicentral (S. Mora, comunicación verbal), correcciones a los tiempos de arribo fueron estimadas para cada estación sismológica (Tabla 1).

DISTRIBUCION DE REPLICAS Y PERFILES SISMICOS

Los epicentros de las réplicas fueron localizadas en el área trasarco del sector noreste de la Cordillera de Talamanca; ningún epicentro fue localizado en la zona fuera de la costa. Las réplicas definen un área de 85 x 45 km², este refleja el límite superior de la zona de ruptura frágil. La distribución de réplicas muestra que el eje más largo de la superficie de la falla es subparalelo a la línea de la costa Caribe. Los perfiles (Fig. 2) muestran un incremento sistemático en la profundidad de la falla, desde 10-15 km bajo la costa Caribe a 20-30 km bajo el continente. En general, la actividad sísmica es menos profunda en la terminación noroeste del área de ruptura

(perfil A) y es más profundo hacia el sureste (perfil D). La morfología del basamento correlaciona positivamente con las localizaciones hipocentrales, sugiriendo que la geometría de la falla fue controlada, al menos parcialmente, por la interfase entre los sedimentos y el basamento. El hipocentro del evento principal debe ubicarse entre 20-25 km de profundidad, tal como lo sugieren los perfiles B y C.

Tabla 3
Modelo de corteza.

Vel. P (km/seg)	Lím. sup. capa (km)
5,1	0,0
6,2	7,2
6,6	16,0
7,9	41,5
8,2	80,0

La sección CC' define una inclinación de la falla de 23° hacia el SW (Fig. 2). La falla se propagó probablemente a lo largo de una superficie lístrica bajo la región marina, desplazando los sedimentos superiores no competentes. Las fallas lístricas han sido observadas en las líneas de reflexión sísmica realizadas en la región marina y estas cortan los sedimentos marinos de la cuenca de Limón (Sheehan et al., 1990).

Un tsunami moderado asociado con el evento principal y un levantamiento cósmico de hasta 1,5 m fue observado a lo largo de la costa (Plafker & Ward, 1992; Denyer et al., este volumen). Cuando la región más superficial de la falla es incluida, el área de ruptura se incrementa a 85 x 55 km². Este incremento del área ajusta mejor la relación de la magnitud (Ms) con el momento (M) del evento principal y también correlaciona mejor con la geometría del modelo de dislocación que explica el levantamiento observado a lo largo de la costa Caribe (Montero et al., 1991; Ponce et al., 1991).

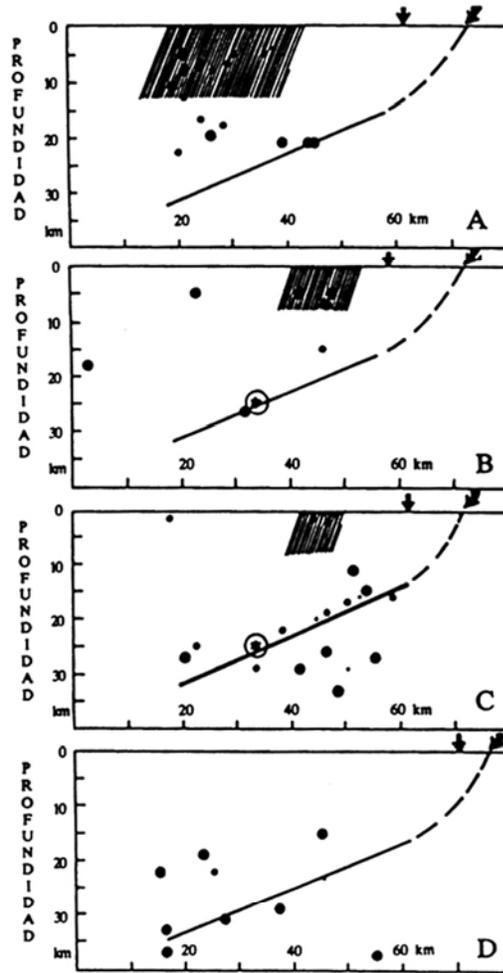


Fig. 2: Perfiles sísmicos tal como fueron definidos en la figura 1. La flecha inclinada muestra la terminación de la traza de la falla inversa que termina bajo el piso marino. La flecha vertical indica la posición de la línea de costa. La ubicación del hipocentro del evento principal se muestra en los perfiles B y C como una estrella con un círculo alrededor. La proyección de la falla principal con inclinación de 23° al SW se muestra formalmente en el perfil C y se muestra menos pronunciado en los otros perfiles. La forma lístrica de la falla se muestra a trazos en los diferentes perfiles. Las zonas marcadas por líneas inclinadas definen las áreas con hipocentros localizados en fallas superficiales reactivadas.

El análisis de las primeras réplicas sugiere que la ruptura se propagó bilateralmente, pero un complejo proceso de ruptura es sugerido por los registros del movimiento fuerte. De hecho, al

menos cinco subeventos fueron observados en una estación acelerográfica ubicada en San Isidro de El General, que se localiza 70 km hacia el suroeste del epicentro del evento principal (Montero et al., este volumen). Las réplicas también sugieren un complejo proceso de ruptura de la corteza dentro del área epicentral. Las secciones BB' y CC' muestran la ocurrencia de unos pocos temblores superficiales alrededor de 25 km tierra adentro; estos temblores sugieren la reactivación de viejas fallas imbricadas traseras (Soulas, 1991). Los eventos del perfil AA', también reflejan la reactivación de fallas de desplazamiento de rumbo sinistral en el sector noroeste del área de ruptura (Barquero & Rojas, este volumen; Fan et al., 1993; Denyer et al., este volumen). Denyer et al. (este volumen) presentan evidencia convincente del desplazamiento cosísmico en la falla Río Blanco, la cual se ubica en este borde de la ruptura. La evidencia de desplazamientos cosísmicos en las fallas inversas no ha sido demostrado (Soulas, 1991).

CONCLUSIONES

1. El área de ruptura con base en las réplicas del Terremoto de Limón fue 85 x 45 km². El eje largo de la zona de ruptura es aproximadamente paralelo a la costa Caribe. Los hipocentros de las réplicas se distribuyen dentro de la región continental. La parte superior de la falla probablemente se extendió a través de una sección sedimentaria de baja resistencia, con lo cual el área total de la ruptura se incrementa a 85 x 55 km². Esta área total se ajusta mejor a los valores M_s y M_0 reportados para el evento principal y concuerda con el modelo de dislocación que ajusta el levantamiento observado a lo largo de la costa Caribe.
2. La falla se hace progresivamente más somera desde la zona fronteriza de Costa Rica - Panamá hacia el sector noroeste del área de ruptura. Existe una correlación positiva entre la morfología del basamento y los hipocentros de las réplicas. Se ha definido una inclinación promedio de 23° hacia el suroeste para la falla principal.

3. La distribución de los hipocentros de las réplicas sugieren que fallas inversas y de desplazamiento de rumbo sinistral, cuyas trazas en la superficie continental han sido reconocidas, fueron reactivadas por el evento principal.

AGRADECIMIENTOS

El éxito del trabajo de campo fue posible gracias a la cooperación de muchas personas e instituciones en México: el Instituto de Geofísica de la UNAM, la Dirección de Protección Civil-Secretaría de Gobernación, la Embajada de México en Costa Rica, PEMEX y la aerolínea Mexicana. En Costa Rica: la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR, la Comisión Nacional de Emergencias, el Ministerio de Ciencia y Tecnología y el Instituto Costarricense de Electricidad. Una ayuda continua durante el trabajo de campo fue proporcionada por Mario Fernández, Antonio Pérez y Mario Casanova. Rafael Barquero, Carlos Redondo y asistentes de la Sección de Sismología de la UCR ayudaron en el procesamiento de la información (muchas otras personas ayudaron en el campo; gracias a todos ellos). La organización de la misión oficial y el apoyo financiero de ROSTLAC-UNESCO, promovido por el Sr. Fernando Repetto, permitió la posibilidad de llegar a Costa Rica el 25 de abril de 1991 con las estaciones portátiles.

REFERENCIAS

- Denyer, P., Arias, O. & Personius, S. (este volumen): Efecto tectónico del Terremoto de Limón. - Rev. Geol. América Central, vol esp.: El Terremoto de Limón.
- Fan, G., Beck, S. & Wallace, T., 1993: The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica Aftershock sequence: Evidence for a transcurrent plate boundary. - *J. Geophys. Res.*, 98: 15759-15778.
- Lee, W.H.K. & Valdés, C. M., 1985: HYPO71PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program. - U. S. Geological Survey Open-File Report 85-749.

- Matumoto, T., Latham, G., Ohtake, M. & Umaña, J., 1977: Crustal structure in Southern Central America.- Bull. Seism. Soc. Am., **67**: 121-134.
- Montero, W., Pardo, M., Ponce, L., Rojas, W. & Fernández, M. (este volumen): Evento principal y réplicas importantes del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 ($M_w = 7,7$). - Rev. Geol. América Central, vol esp.: El Terremoto de Limón.
- Montero, W., Ponce, L., Pardo, M., Domínguez, J., Boschini, I., Rojas, W., Suárez, G., & Camacho, E., 1991: The Limon, Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 ($M_s = 7.5$). Seismicity, Focal Mechanism and Tectonic implications. - (abstract), EOS, Trans. Am. Geophys. Union, **72**: 301.
- Plafker, G. & Ward, S., 1992: Backarc thrusting faulting and tectonic uplift along the Caribbean sea coast during the April 22, 1991 Costa Rica earthquake.- Tectonics, **11**: 709-718.
- Ponce, L., Pardo, M., & Domínguez, J., 1991: El terremoto de Limón, Costa Rica del 22 de abril de 1991, $M_s = 7,5$. - 35 págs. Informe Técnico, Instituto de Geofísica, UNAM: Contrato 870.147.1 ROSTLAC-UNESCO.
- Sheehan, C. A., Penfield, G. T., & Morales, E., 1990: Costa Rica geologic basins lure wildcatters. - Oil and Gas Jour., April 30, 73-79.