

RELOCALIZACIÓN DE LOS TERREMOTOS DE LA SERIE SÍSMICA DE 1951 EN EL ALTO VALLE DEL GUADALQUIVIR.

J. Batlló¹, B. Palombo², D. Stich³, R. Macià^{4,5}, J. M. Martínez Solares^{6,7} y J. Morales⁸

1 Institut Geològic de Catalunya, Balmes 209-211. 08006 Barcelona. jbatllo@igc.cat.

2 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata 605. I-00143, Roma, Italia.

3 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via Donato Creti 12. I-40128 Bologna, Italia.

4 Dept. Matemàtica Aplicada II, UPC, Pla de Palau 18. 08003 Barcelona.

5 Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontserè, IEC, Barcelona.

6 Instituto Geográfico Nacional, Ibáñez de Ibero 3. 28003 Madrid.

7 Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid

8 Inst. Andaluz de Geofísica, Campus Universitario de Cartuja s/n. 18071 Granada.

RESUMEN

En 1951 una larga serie de terremotos, que se prolongó desde Marzo a Septiembre, sacudió el alto valle del Guadalquivir. Se contabilizaron más de 90 eventos, varios de ellos sentidos, incluyéndose dos de magnitud mayor que 5 ocurridos los días 10 de Marzo y 19 de Mayo. Desde los primeros estudios de los eventos, se han publicado diferentes y, en parte, contradictorias localizaciones y profundidades para los mismos.

Hemos reunido, un importante número de boletines, sismogramas y otros documentos correspondientes al registro instrumental de estos terremotos. Su análisis pormenorizado nos ha permitido preparar una base de datos que permite más y mejores localizaciones de los mismos. Se han identificado y corregido errores de lectura y se han añadido nuevas fases y estaciones. Para la relocalización, se ha aplicado un algoritmo de localización convencional de mínimos cuadrados (hypo71), y algoritmo probabilístico de búsqueda no lineal (NonLinLoc). Como resultado, la localización de los eventos muestra menor dispersión que en el catálogo hasta ahora existente, se confirma su origen cortical, y se descarta una relevante migración de los focos a lo largo de la serie. A parte de una más consistente interpretación sismotectónica de la serie del 1951, este caso nos permite el estudio de las posibilidades y limitaciones de los métodos de localización para datos anteriores a la instalación de redes regionales de sismógrafos modernos.

Palabras clave: localización epicentral, sismogramas analógicos, valle del Guadalquivir.

SUMMARY

Between March and September 1951, a long series of earthquakes shock the upper Guadalquivir valley, in the SW part of Spain. From the first moment, location and depth of the earthquakes were a matter of discussion, leading to different and partly contradictory results among the different studies undertaken. We collected available analog seismogram recordings and seismic bulletins for two moderate magnitude earthquakes, on March 10th and May 19th 1951, and the series of aftershocks. A critical review of an extensive set of phase readings permitted us to detect several mistakes in the original bulletins, and to obtain more precise hypocenter relocations for the two main shocks as well as location estimates for 20 aftershocks. From a technical point of view, the recording of the 1951 Jaén earthquake doublet at a network of common stations offers an excellent possibility to validate the

performance of classic analog recording systems, as well as the precision of our processing sequence involving manual digitizing of the original seismograms. So, while several previous studies had difficulties to characterize these earthquakes, partially describing them as unusual intermediate deep focus events, we propose near sources in the lower crust.

Introducción

En 1951, una larga serie de terremotos, con más de 90 eventos registrados, afectó a la región de Jaén en España meridional (3.0° - 4.5° W, 37.0° - 38.5° N), prolongándose desde marzo a septiembre. En ella se incluyen dos eventos principales de magnitud 5+ los días 10 de marzo (10h 38m) y 19 de mayo (15h 54m). Ya desde los primeros estudios realizados sobre estos terremotos, su localización y profundidad ha sido un tema de controversia, publicándose diferentes e incluso contradictorias estimaciones y no alcanzándose ningún consenso. Específicamente, se ha propuesto que uno o ambos terremotos principales tuviesen un foco profundo intermedio, hecho realmente singular comparando con la distribución geográfica de las localizaciones profundas intermedias obtenidas con las redes regionales modernas (Buforn et al., 1991, Morales et al., 1997), e implicaría una revisión fundamental del marco tectónico regional establecido.

Pocas horas después de ocurrido el primer evento, el 10 de marzo, el director del observatorio de Málaga, Felix Gómez Guillamón, distribuyó un telegrama (se ha descubierto una copia en el cuaderno de anotaciones del observatorio Fabra), divulgando la localización del terremoto y asignándole un foco profundo intermedio. Esta primera estimación de la profundidad, y un área macrosísmica relativamente grande (efectos de intensidad IV se sentían en Madrid, a 300 kilómetros del epicentro -Bernal et al., 1991; Udías et al., 2005), pudieran haber predispuerto los subsecuentes estudios hacia un foco más profundo de lo normal, con las estimaciones de la profundidad extendiéndose a partir de 80 hasta 140 kilómetros para ambos terremotos (Due-Rojo, 1953; Bonelli y Esteban-Carrasco, 1953; Munuera, 1966). Posteriormente, Vidal (1986) situó los dos terremotos en valores de profundidad más bajos (25 kilómetros para el 10 de marzo y 60 kilómetros para el terremoto del 19 de mayo), atribuyendo un origen en el manto superior al segundo evento.

En general, las localizaciones epicentrales disponibles de la serie de terremotos de Jaén presentan una dispersión grande (fig. 1a y 1b). El catálogo sísmico español (Mezcua y Martínez-Solares, 1983) da la localización para 21 eventos registrados entre el 10 de marzo y el 24 de noviembre. 16 de ellos fueron sentidos por la población. Sus localizaciones se extienden entre 3.0° - 4.8° W y 37.4° - 38.3° N, sin tener en cuenta un evento el día 19 de mayo, a las 20h 06m, que fue situado en 5.5° W en el catálogo español y se relocalizará en el área epicentral en este estudio. Un estudio anterior de Bonelli y Esteban-Carrasco (1953) localiza 16 terremotos de la serie (37.4° - 38.5° N, 3.0° - 4.4° W). Todos menos uno situados en profundidades intermedias. En su estudio, Rey Pastor (1954) menciona 89 choques y 15 días en que los terremotos fueron percibidos por la población. Hay alguna incongruencia entre las listas que figuran en el estudio y las figuras y no aporta una lista de localizaciones. Due-Rojo (1953) lista 13 eventos percibidos y 104 no percibidos. No proporciona una localización paramétrica de los terremotos, solamente la distancia a la estación sísmica más cercana y una descripción somera del lugar. En todo caso, y según los estudios publicados, los epicentros de la serie se extendieron por un área de más de 100 x 100 kilómetros. Esto parece peculiar para las réplicas sísmicas de dos terremotos de tamaño moderado, donde esperaríamos observar una mayor concentración de la secuencia, y apunta a la existencia de incertidumbres relevantes en la localización de los eventos a partir de los datos

contemporáneos publicados en los boletines. También las localizaciones epicentrales para los eventos principales muestran discrepancias significativas en diversos estudios, por lo menos para el evento del 10 de marzo (Due-Rojo, 1953; Bonelli y Esteban-Carrasco, 1953; Munuera, 1966; Vidal, 1986; Udías et al., 2005).

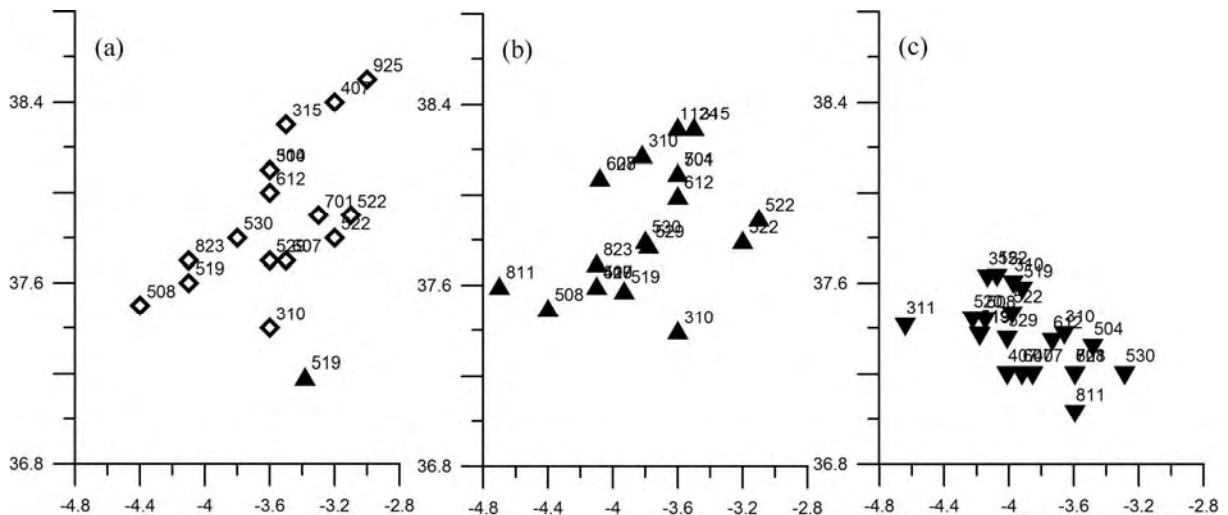


Figura 1. Localización de los eventos de la serie sísmica del alto valle del Guadalquivir según (a) Bonelli y Estaban Carrasco (1953), (b) Mezcua y Martínez Solares (1983) y (c) el presente estudio. Los números sobre símbolos indican el mes y día del evento.

En un estudio reciente, Udías et al. (2005) han revisado los conocimientos sobre los dos eventos principales e intenta aclarar algunos de los problemas referentes a los mismos. En él se redeterminan las localizaciones, las magnitudes y los mapas de intensidad epicentral y se propone un mecanismo focal para el terremoto del 19 de mayo, basado en las primeras polaridades del movimiento. Udías et al. (2005) muestran, mediante un análisis de regresión de las intensidades reevaluadas, que estos terremotos tendrían un foco en la corteza más profunda, y que, a partir de las lecturas de fases disponibles, obtenidas mediante la escasa red de estaciones de la época, se pueden esperar compensaciones significativas entre la profundidad focal y la localización epicentral, concluyendo que la interpretación más plausible de los datos disponibles apunta a una profundidad focal cortical para ambos terremotos.

En el presente trabajo, intentaremos conectar con este estudio, recogiendo y evaluando un conjunto extenso de boletines y de datos originales de formas de onda para reanalizar las localizaciones de estos terremotos. Hemos utilizado dos enfoques distintos para la localización. El primero implica la utilización de un algoritmo convencional por mínimos-cuadrados (Hypo71, Lee y Lahr, 1975) y el segundo el de un algoritmo no lineal probabilístico de búsqueda (Lomax et al., 2000). Ambos se basan en lecturas substancialmente revisadas de las fases y en una evaluación crítica de los datos contenidos en los boletines y de la información original de la forma de onda. Anticipamos que las formas de onda sísmicas muestran características claras de un foco cortical, tales como llegadas de Pn y ondas superficiales bien desarrolladas, y que las formas de onda de los dos eventos principales demuestran las semejanzas llamativas de un doblete del evento, indicando una localización próxima, la profundidad similar, y patrones de radiación similares de la fuente.

Localización de la fuente a partir de boletines y de datos de las formas de onda

Puesto que los estudios existentes no solucionaron concluyentemente el caso de una localización instrumental del hipocentro para estos terremotos, decidimos recoger otra vez tanto cuanto sea posible de la documentación contemporánea original, abarcando boletines y sismogramas, y reanalizarla de nuevo. Recogimos los boletines de todas las estaciones sísmicas españolas y portuguesas entonces en funcionamiento (fig. 2). En algunos casos (estaciones TOL, ALI, ALM, MAL) pudimos tener acceso también a los boletines preliminares, así como a los cuadernos originales de los observatorios de Toledo (TOL) y de Fabra (FBR). Esto permite que comprobemos la consistencia de las transcripciones para estimar la calidad de las lecturas de los sismogramas en estas estaciones, así como en COI y EBR, para las que también obtuvimos los sismogramas. Para los dos eventos principales, además de las estaciones ibéricas, se formó un inventario extenso de boletines regionales de estaciones sísmicas lejanas (fig. 2). Los sismogramas originales para muchas estaciones europeas fueron recogidos y rasterizados con resoluciones entre 600 y 1200 ppp, dependiendo de las características del original. Esto incluye la serie entera de réplicas sísmicas registradas en las estaciones ibéricas TOL, MAL, EBR, FBR y COI. Los dos eventos principales, incluidos en el catálogo de terremotos de EUROSEISMOS (EUROSEISMOS, 2003), fueron obtenidos además en varias estaciones regionales lejanas (STR, DBN, KEW, ROM, PCN, BER, ALM, GTT, PRA, AVE, ZAG). La colección formada permitió que confirmáramos una calidad generalmente buena de las lecturas para los estándares de esa época. En la mayoría de los casos, nuestras lecturas no se diferencian de las antiguas en más que unas pocas décimas de segundo para llegadas claras e impulsivas. Debe tenerse en cuenta que la velocidad más común del papel de registro en aquel momento era 15mm/min. Esto significa que una diferencia de apenas 0.1mm en una lectura, claramente en el límite de la resolución de la imagen y de la estabilidad de la velocidad del tambor, es equivalente a 0.4s en tiempo de llegada.

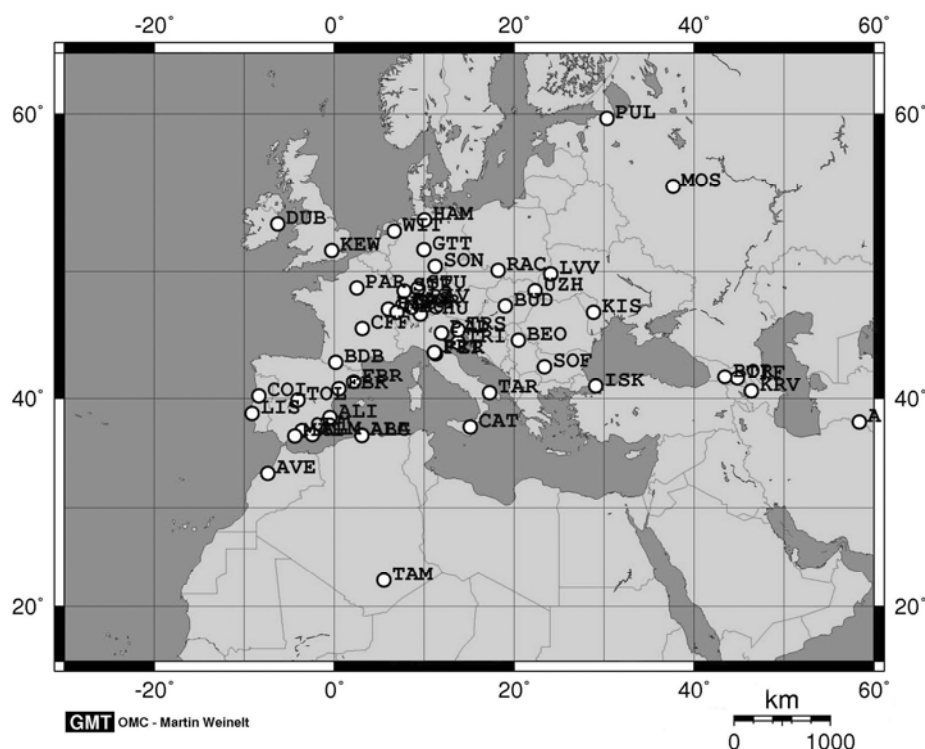


Figura 2. Localización de las estaciones sísmicas para las que se ha obtenido el boletín original de lecturas.

Sin embargo, un análisis meticuloso de los boletines y de los datos originales a partir de las formas de onda nos reveló varias interpretaciones erróneas introducidas en los conjuntos anteriores de datos de las llegadas de fases. Algunos ejemplos a mencionar incluyen identificaciones claramente erróneas de las fases (P o Pg en vez de S en las estaciones CRT y LIS) y las inexactitudes evidentes de la sincronización del instrumento que no fueron documentadas en el boletín de la estación. Para el evento del 10 de marzo, encontramos una transcripción errónea del tiempo de llegada de la fase P de la estación MAL (fig. 3a) del boletín preliminar (10:38:31) al boletín definitivo (10:38:41), como se ha comprobado leyendo el sismograma original (10:38.30.8). Debido a este hecho, el tiempo de la onda P estaba desplazado 10s. Dado que MAL es la segunda estación más cercana al epicentro, y la única en el acimut al sudoeste, tal error tiene un pesado impacto en la localización. Como tendencia general, podemos mencionar la confusión en la lectura de las fases S observada en varias estaciones, principalmente para el terremoto del 10 de marzo. La más aparente corresponde a TOL, donde la fase S para el primer evento se confunde (fig. 3b). Para MAL, sin llegadas de S consignadas en el boletín, pudimos releer estas llegadas claramente visibles de S para el 10 de marzo (la plumilla del instrumento sale de escala en la llegada de S) y muchas réplicas sísmicas. Como problema general, varios observatorios españoles dan numerosas fases de una forma descriptiva (casi cualquier prominente oscilación que se observa en el sismograma), utilizando el viejo código de fases propuesto por Mohorovicic, descrito, por ejemplo, en Macelwane y Sohon (1932) como P3S, P5, P2S2, etc.). Después de una revisión cuidadosa, estas lecturas se han podido transcribir parcialmente a la nomenclatura moderna. La Tabla 1 resume, como ejemplo, las lecturas originales para las llegadas de P y de S para los terremotos del 10 de marzo consignadas en boletines y las lecturas finales adoptadas en nuestra compilación revisada de los tiempos de llegada.

STA	Fase	Hr:Mn:Sec	Fase	Hr:Mn:Sec	
CRT	iPn	10:38:41	-	-	*
CRT	iS	10:38:41	iSg	10:38:41	*
MAL	iP	10:38:41	iPg	10:38:30.2	*
MAL	-	-	iSg	10:38:42.6	*
ALM	iPg	10:38:54	iPn	10:38:54.1	*
ALM	iSg	10:39:16	iSn	10:39:14.6	*
TOL	e(Pg)	10:38:55	ePn	10:38:55.0	*
TOL	iSg	10:39:14	iSn	10:39:26.7	*
ALI	iPg	10:39:15.5	iPn	10:39:15.5	
ALI	iSg	10:39:48.5	iSn	10:39:48.5	
LIS	P	10:39:34.0	Pn	10:39:34.0	
LIS	iS	10:40:19	iSn	10:40:19	
COI	iPg	10:39:34.7	iPn	10:39:34.7	
COI	iS	10:40:39.3	iS	10:40:20.5	*
EBR	iP	10:39:41	iP	10:39:41.9	*
EBR	iS	10:41:03	iS	10:40:39.4	*
FBR	P	10:39:59	P	10:39:55	*
FBR	i(S)	10:41:45	i(S)	10:41:03.8	*
AVE	ePn	10:39:49	ePn	10:39:49	
AVE	iSn	10:40:39	eS	10:40:39	

Tabla 1: Fases y tiempos originales (izquierda) y corregidos (derecha) para el terremoto del día 10 de marzo de 1951. Los asteriscos indican las correcciones.

OBSERVATORIO DE MÁLAGA - BOLETÍN SÍSMICO - 195... MAR 1951 Hoja / 5

Núm.	Día	Fase	Compo- nente	T M U h m s	Periodo T s	Amplitud m m	Distancia Grad Km	Observaciones
16	4	iP eS eL F	z z z cambio de bandas.	11 29 50 2 40 05 58 Ca 20	1 c 85 ^a	9440	Km.h= 160 Km.Prox.a la coa- ta S.del Perú 16 ^a S.74 ^a W. h= 150 H= 11 17 33(USCGS) Mo= 6,75 a 7 (Pas)	
17	5	iP PP SKS L M F	z z z z z z	20 25 20 2 29 02 5 31 06 7 36 00 4 21 10 33 20 18 22 15 1 c 32 Ca	1 d 101 ^a	11220	Km.h= 160Km.Islas Ryu- Kyu 29 ^a N.128 ^a E.h= 150 (USCGS) Mo= 7 (Pas)	
18	10	iP i F	z nw saltan las agujas.	10 38 21 rap 47	1,5 ^a	170	Km.Falla del Gualdequivir prox- ximo a La Carolina.Gr.VI-VII) Sentido en toda Andalucía y en la Meseta Central hasta Madrid,h=35 a 105 Km. Epic:provisional 38,2 ^a N. 3,7 ^a W.(Calculado en Mála- ga con datos de Cartuja y Almería y Toledo)	
19	10	iP i F	nw nw nw	11 01 23 rap. -2 35 " -12 04 Ca			1ªReplica	
20	10	iP	z	12 07 13 rap.			2ª replica	
21	10	iP	z	12 29 28 rap			3ª replica	

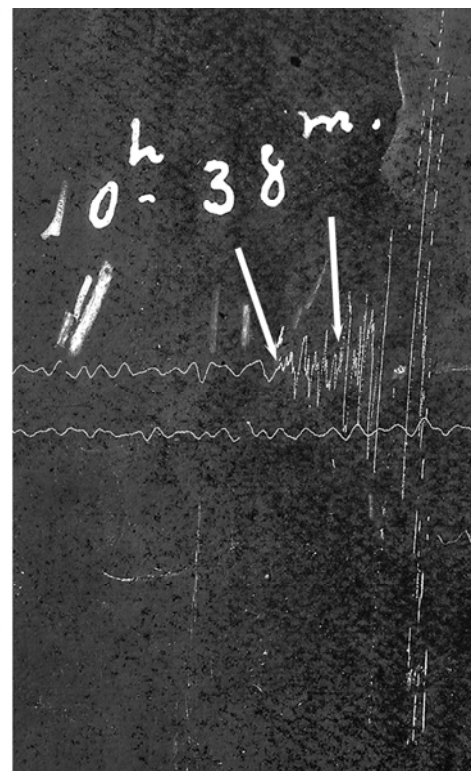


Figura 3. (a) Fragmento del boletín provisional del observatorio de Málaga en donde se observa la dudosa anotación para el tiempo de llegada de la onda P, que se transcribiría

como 41s en el boletín definitivo. (b) Fragmento de sismograma del observatorio de Toledo en donde se ha indicado la selección de la fase S realizada en la época y la seleccionada en este estudio (más a la derecha).

Utilizamos nuestras lecturas revisadas de las fases para los dos eventos principales y 20 réplicas sísmicas, para las que disponemos de lecturas en tres o más estaciones, para relocalizar los eventos mediante un clásico algoritmo de localización por mínimos cuadrados (Hypo71, Lee y Lahr, 1975), y utilizando un modelo regional de la velocidad para España propuesto por Stich et al. (2003a). Para este análisis se utilizaron las estaciones situadas a menos de 800 kilómetros del epicentro. La tabla 2 lista las coordenadas hipocentrales y RMS para cada evento calculado. Los valores del RMS indican localizaciones pobremente restringidas, reflejo de la todavía escasa distribución de estaciones sísmicas en la época y de la calidad de las lecturas. En su mayor parte, las lecturas consignadas en los boletines se reducen al segundo más cercano y, según lo indicado, también nuestras nuevas lecturas de las fase tienen, en los mejores casos, una precisión de pocas décimas de segundo. Sin embargo, aunque los epicentros individuales demuestran incertidumbres, el patrón general de la serie de terremotos de 1951 aparece mucho más compacto después de la relocalización mediante la base de datos agrandada y corregida. Esta mejora es principalmente debida a la corrección introducida en varios tiempos de llegada de S para TOL y a la introducción de muchos tiempos de llegada de S en la estación MAL, hasta ahora no usados. Otro resultado importante es que los eventos, excepto algunas réplicas sísmicas más pequeñas, localizan en la corteza, que era una de las dudas principales sobre esta serie. La mayor parte de nuestras relocalizaciones aparecen desplazadas varios kilómetros al SW del área epicentral previamente asumida, centrándose ahora entre Jaén y Granada, en un área de una actividad sísmica conocida más alta (fig. 1c). Los dos eventos principales y las mejores réplicas sísmicas localizadas se arraciman a unos 20 kilómetros al SW de la ciudad de Jaén, cerca de la localización dada por varios autores para el evento del 19 de mayo (Bonelli y Esteban-Carrasco, 1953; Mezcua y Martínez-Solares, 1983; Vidal, 1986; Udías et al., 2005).

FECHA	TIEMPO	LAT	LONG	PROF.	NO.	RMS
0310	10:38:25.73	37.595	-3.975	14.71	17	4.49
0310	11:01:08.80	37.367	-3.659	10.00*	7	3.45
0311	13:18:00.43	37.405	-4.640	10.00*	7	5.26
0315	07:37:52.99	37.622	-4.133	14.87	7	2.75
0407	02:17:45.74	37.192	-3.855	10.00	7	4.89
0407	02:22:33.56	37.192	-4.012	5.00	8	5.74
0504	19:06:22.19	37.311	-3.482	24.35	7	2.05
0508	22:31:27.45	37.432	-4.146	9.87	9	4.47
0519	15:54:26.25	37.567	-3.917	18.56	12	2.48
0519	20:06:41.80	37.366	-4.184	9.48	8	5.67
0519	22:33:41.31	37.361	-4.182	9.80	8	5.44
0520	00:53:03.39	37.434	-4.226	0.30	9	2.45
0522	04:38:03.31	37.625	-4.074	0.22	9	5.52
0522	05:35:05.36	37.456	-3.981	14.61	16	4.37
0529	05:52:09.98	37.348	-4.011	39.32	7	1.88
0530	14:41:56.73	37.192	-3.287	37.66	8	2.85
0607	00:01:36.78	37.192	-3.921	31.50	9	2.41
0612	22:21:00.63	37.338	-3.733	37.35	9	2.60
0628	17:27:49.84	37.192	-3.594	10.00	7	7.59
0701	11:11:57.51	37.192	-3.594	41.99	6	2.81
0811	22:32:52.17	37.023	-3.594	23.43	5	4.52
0823	18:04:22.61	37.192	-3.594	36.37	6	3.72

Tabla 2: Relocalizaciones de la serie de terremotos de 1951 obtenidas mediante el algoritmo Hypo71. Las dos últimas columnas indican el número de fases utilizadas para cada localización (no.) y el error cuadrático medio (rms). Los asteriscos indican que la profundidad se fijó.

Respecto a los dos eventos principales, usando los tiempos de llegada corregidos localizan realmente cerca el uno del otro, a una distancia de 10 kilómetros (tabla 2). La localización del evento del 10 de marzo muestra más incertidumbre (RMS 4.49) que para el segundo evento del 19 de mayo (RMS 2.48). También la réplica sísmica mayor, ocurrida el 22 de mayo a las 5h 35m, da una localización próxima (37.46°N, 3.98°W). Todos estos terremotos se localizan a profundidades corticales. Para los eventos del 19 y 22 de mayo, el algoritmo de localización converge para profundidades alrededor 20 kilómetros independientemente de la profundidad a la que se inicie el ajuste. El evento del 10 de marzo muestra una inestabilidad importante. Un estudio de la variación del RMS con la profundidad revela una variación regular a partir de 4.42s en la superficie hasta 6.49s a 130 kilómetros, con un mínimo alrededor de los 11-12 kilómetros. La localización varía de 37.44°N-3.98°W en la superficie a 37.69°N-3.75°W a 130 kilómetros de profundidad, resultando también más estable frente a esta clase de análisis que la base de datos usada por Udías et al. (2005).

Mediante la utilización de un algoritmo no lineal probabilístico de búsqueda (NonLinLoc, Lomax et al., 2000) hemos obtenido una nueva localización independiente de los dos choques principales y de la réplica sísmica más grande. Como ventaja principal frente al Hypo71, el algoritmo maneja asignaciones de fase de una manera flexible, lo que nos permitió incluir lecturas a distancias regionales más elevadas, para las que no podíamos

confirmar la identificación de la fase y la precisión de la lectura consignada en los documentos originales. El algoritmo de la búsqueda también ofrece un punto de vista estadístico mejor de la exactitud de la localización del hipocentro mediante la inversión lineal. No se han investigado otras réplicas con este método, puesto que fueron registradas solamente en algunas estaciones regionales cercanas y las lecturas de las fases ya se comprobaron individualmente. En este caso la localización se basa en el modelo global de velocidad IASPEI91 (Kennett, 1991). Una vez más los eventos principales localizan muy cerca uno del otro (menos de 10km, en coordenadas 37.43°N-4.20°W y 37.39°N-4.26°W respectivamente), mientras que la réplica sísmica del 22 de mayo localiza cerca de 20km al NW (37.56°N-4.32°W). Las localizaciones absolutas se desplazan cerca de 30 kilómetros al sudoeste comparandolas a las soluciones HYPO71, reflejando probablemente un efecto direccional, debido a la distribución azimutal desigual de las estaciones agregadas (todas al este de los epicentros, principalmente en Europa) y una sobreestimación leve de las velocidades sísmicas reales por el modelo IASPEI91. Seguimos estando muy interesados en la localización relativa de los choques principales, en donde la similitud de los epicentros parece ser confirmada por la semejanza de las funciones correspondientes de la densidad de la probabilidad para la localización epicentral (fig 4). En términos de exactitud absoluta de la localización, las funciones de densidad de probabilidad presentan una meseta de 30 x 30 kilómetros aproximadamente donde pueden situarse los epicentros. Una vez más, se dedujo que los terremotos se hallan a profundidades corticales (12 a 16 kilómetros).

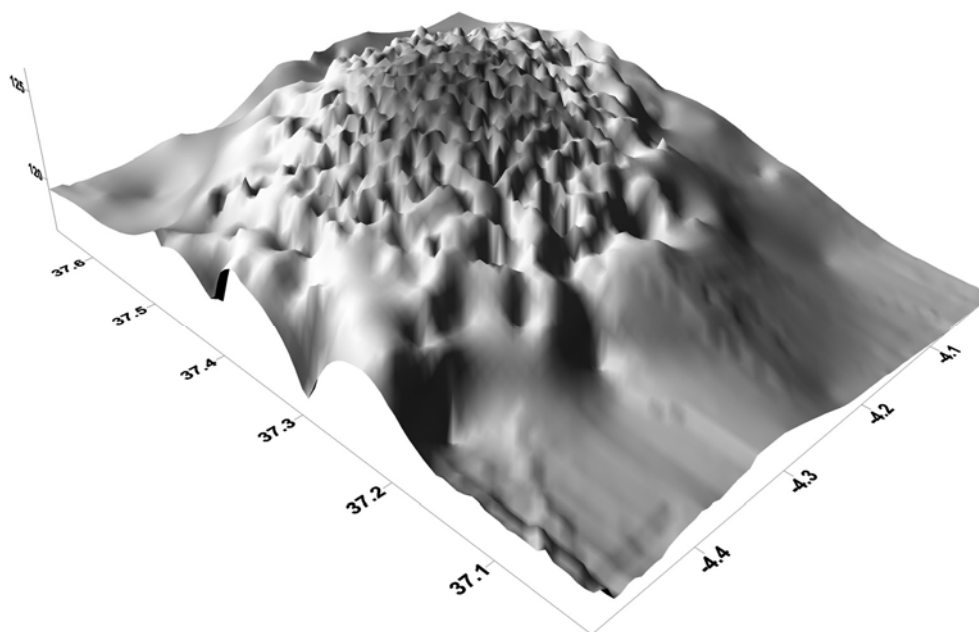


Figura 4. (a) Proyección de los valores de la función de probabilidad mediante el algoritmo de NonLinLoc para la localización del evento del día 19 de mayo de 1951. Los ejes horizontales corresponden a la latitud y longitud geográfica.

Conclusiones

Finalmente, cabe reflexionar sobre porqué estos terremotos, que muestran las fuentes simples y una profundidad focal normal pudieron haber conducido a las

interpretaciones impares publicadas en la literatura anterior. Varios factores, pequeños si los tomamos uno por uno, pero de importancia relevante si los agregamos todos, pueden alegarse. Como hemos mostrado a partir de una nueva evaluación crítica de boletines originales, varios tiempos de llegada claves y algunas identificaciones de fases eran erróneos, y esta coincidencia desafortunada hizo difícil obtener hipocentros instrumentales precisos a partir de las lecturas originales. Una posible razón para la existencia de estos errores puede ser que dos observatorios próximos importantes, TOL y CRT, se encontraban cerca de los planos nodales y que las lecturas aún recomplicaban más por la presencia de llegadas secundarias prominentes. La estación CRT, más cercana al epicentro, clave para determinar la profundidad de estos eventos, era en aquel momento un observatorio privado con problemas de recursos económicos y humanos. La velocidad máxima de la registro de sus instrumentos era de 10mm/min (Batlló, 2004), y es de esperar que los registros (actualmente perdidos) estuvieran saturados. Se hace claramente difícil realizar lecturas exactas de fase bajo circunstancias similares. Finalmente, los mapas del tiempo publicados por las oficinas meteorológicas españolas y francesas (anónimo, 1951a y b) nos informan de condiciones tempestuosas en el Atlántico el 10 de marzo, introduciendo una componente de ruido microsísmico grande en los registros, que es evidente en los sismogramas originales analizados y agrega nuevas dificultades a la obtención de la fase. Esta es una razón más probable de porqué las localizaciones anteriores del evento del 10 de marzo muestran mucha más incertidumbre que para el evento del 19 de mayo.

Por tanto, y a modo de conclusión, podemos en muchos aspectos confirmar la interpretación de los terremotos del 10 de marzo y 19 de mayo de Jaén dada por Udías et al. (2005), especialmente en lo referente a las profundidades focales, situadas en la corteza profunda. No obstante encontramos una discrepancia significativa para la distancia epicentral entre los eventos (~40 kilómetros en Udías et al., 2005; ~10 kilómetros en este estudio). Una localización más cercana es más concordante con las semejanzas llamativas entre las formas de onda observadas, indicando que estos terremotos no deben estar separados más de 10km.

Referencias

- Anónimo (1951a), *Avance del Sabado 10 de Marzo de 1951*, Ministerio del Aire, Servicio Meteorológico Nacional, Madrid, 2 pp.
- Anónimo (1951b), *Bulletin Quotidien d'Études de la Météorologie Nationale. 10 Mars*, Ministère des Travaux Publics, des Transports et du Tourisme, Secrétariat Général a l'Aviation Civile et Commerciale, Paris, 7 pp.
- Batlló, J. (2004), *Catálogo - Inventario de Sismógrafos Antiguos Españoles*, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 414 pp.
- Bernal, A., Barrera, T. and Santiago, J. L. (1991), "The earthquakes of March 10th and May 19th 1951 occurred in the province of Jaén, Spain". En: Mezcua, J. and Udías, A. (eds.), *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Magrehbian Region*, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, pp. 149–161.
- Bonelli, J. and Esteban-Carrasco, L. (1953), *Resultados provisionales del estudio del carácter sísmico de la falla del Guadalquivir*. Instituto Geográfico Catastral, Madrid.
- Buforn, E., A. Udías, and R. Madariaga (1991), "Intermediate and deep earthquakes in Spain", *Pure Appl. Geophys.*, vol. 136, pp. 375–393.
- Due-Rojo, A. (1953), "Movimientos sísmicos en España durante el año 1951", *Bol. Real Soc. Española Historia Natural*, vol. 50, pp. 59–71.
- EUROSEISMOS (2003), http://storing.ingv.it/es_web/ (ultimo acceso: 31/01/2007).
- Kennett, B.L.N. (1991), *IASPEI 1991 seismological tables*, Research School of Earth Sciences, Canberra, 167 pp.

- Lee, W. K. H. and Lahr, J. C. (1975), HYPO71 (revised): "A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes", U.S. Geological Survey, Open-File Rep. (U.S.), pp.75-311.
- Lomax, A., J. Virieux, P. Volant, and C. Berge (2000), "Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations", in *Advances in Seismic Event Location*, C. H. Thurber and N. Rabinowitz (Editors), Kluwer, Amsterdam, pp. 101–134.
- Macelwane, J. B. and Sohon, F. W. (1932), *Introduction to theoretical seismology*, I & II, John Wiley & Sons, New York.
- Mezcuá, J. and Martínez Solares, J. M. (1983), *Sismicidad del área Ibero-Mogrebí*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, Publ. 203, 299 pp.
- Michelini A., De Simoni B., Amato A. and Boschi E. (2005), "Collecting, digitizing and distributing historical seismological data", EOS Transactions AGU, 12 July 2005, Vol. 86, no. 28.
- Morales, J., I. Serrano, F. Vidal and F. Torcal (1997), "The depth of the earthquake activity in the Central Betics (southern Spain)", *Geophys. Res. Lett.* 24, 3289-3292.
- Munuera, J. M. (1966), "Dos secuencias de sismos Ibéricos, posiblemente de foco intermedio", *Revista de Geofísica*, vol. 99-100, pp. 167–185.
- Rey Pastor, A. (1954), *Estudio morfo-tectónico de la falla del Guadalquivir*. Instituto Geográfico y Catastral, Madrid, 48 pp. + lam.
- Udías, A., D. Muñoz, E. Buforn, C. Sanz de Galdeano, C. del Fresno and I. Rodríguez (2005), "Reevaluation of the earthquakes of 10 March and 19 May 1951 in southern Spain", *J. Seismology*, vol. 9, pp. 99-110.
- Vidal, F. (1986), *Sismotectónica de la región Béticas – Mar de Alboran*, *Ph. D. Thesis*, Universidad de Granada, Granada.

Agradecimientos

Nos beneficiamos de las nuevas instalaciones y bases de datos desarrolladas bajo los proyectos EUROSEISMOS (EUROSEISMOS, 2003) y SISMOS (Michelini y otros., 2005); y también del libre acceso a la colección de boletines sísmicos preservados en el Observatori de Ebre, Roquetes, y en Observatori Fabra, Barcelona. El IGN nos facilitó el acceso abierto a los sismogramas y a los documentos conservados en sus observatorios. I. Alves proporcionó el acceso abierto a los sismogramas y a los documentos del observatorio de Coimbra. Recibimos la ayuda financiera de los proyectos españoles CGL2004-20332-E y CGL2005-04541-C03-01-BTE de la DGI y de la red SPICE, MRTN-CT-2003-504267 (DS), de la Unión Europea.