

C
·
D
I
P

1
1
3
4
5
6

1
5
0
1
1
4

1
4
:
0
1

SOLICITUD DE DATOS, INFORMES O DOCUMENTOS

D. RICARDO SIXTO IGLESIAS	D ^a
Diputado del Grupo Parlamentario de IU, ICV-EUiA, CHA La Izquierda Plural	Diputada del Grupo Parlamentario
recaba para el mejor cumplimiento de sus funciones parlamentarias, al amparo de lo establecido en el artículo 7º del Reglamento, de la Administración pública que se indica, los siguientes:	recaba para el mejor cumplimiento de sus funciones parlamentarias, al amparo de lo establecido en el artículo 7º del Reglamento, de la Administración pública que se indica, los siguientes:

A) DATOS.

B) INFORMES O DOCUMENTOS.

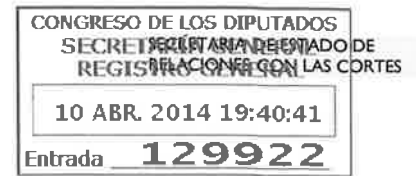
Copia de los informes realizados por el Instituto Geológico Minero y por el Instituto Geográfico Nacional en relación a la plataforma de gas Castor (en Vinaroz-Castellón), encargados por el Ministerio de Industria en septiembre del año pasado tras los cientos de seísmos registrados frente a la costa de Castellón.

ADMINISTRACIÓN PÚBLICA DE LA QUE SE RECABAN:

ADMINISTRACIÓN GENERAL DEL ESTADO

Palacio del Congreso de los Diputados, 14 de enero de 2014

EXCMO. SR. PRESIDENTE DEL CONGRESO DE LOS DIPUTADOS



RESPUESTA DEL GOBIERNO

(186) SOLICITUD DE INFORME A LA ADMINISTRACION DEL ESTADO CONGRESO

186/1886 ✓

15/01/2014

113456

AUTOR/A: SIXTO IGLESIAS, Ricardo (GIP)

RESPUESTA:

Adjunto se acompaña en **anexo** copia del informe sobre “La Actividad Sísmica en el Golfo de Valencia”, que se suscribió por el Instituto Geográfico Nacional con fecha 17 de diciembre de 2013 y se remitió a su petionario, la Dirección General de Política Energética y Minas, del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, el pasado 18 de diciembre de 2013.

Madrid, 31 de enero de 2014



MINISTERIO
DE FOMENTO

SUBSECRETARÍA

DIRECCIÓN GENERAL DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO
NACIONAL

**INFORME SOBRE LA ACTIVIDAD SÍSMICA
EN EL GOLFO DE VALENCIA**

17 de diciembre de 2013

CONGRESO DE LOS DIPUTADOS SECRETARÍA GENERAL REGISTRO GENERAL
10 ABR. 2014 18:40:43 C/ General Ibáñez de Ibero, 3 28003 MADRID TEL.: 91 597 70 00
Entrada 129922



10 ABR. 2014 19:40:41 Entrada: 129922

MINISTERIO
DE FOMENTO



Informe sobre la actividad Sísmica en el Golfo de Valencia

1. ANTECEDENTES	5
1.1. Actividad sísmica previa al 4 de septiembre 2013	5
1.2. Peligrosidad sísmica del Golfo de Valencia	7
2. SERIE SÍSMICA DESDE EL 5 DE SEPTIEMBRE DE 2013	9
2.1. Evolución temporal	10
2.2. Disipación energética	10
2.3. Análisis macrosísmico	11
3. PRINCIPALES ACTUACIONES LLEVADAS A CABO	19
4. LINEAS PRIORITARIAS DE TRABAJO. RESULTADOS	21
4.1. Mecanismos focales	21
4.2. Revisión de las determinaciones epicentrales	23
4.3. Profundidad de los sismos	26
4.4. Discriminación de eventos: formas de onda y polaridades	26
5. CONCLUSIONES	34
6. BIBLIOGRAFIA	36
ANEXO	37



10 ABR. 2014 19:40:41 Entrada: 129922

MINISTERIO
DE FOMENTO



1. ANTECEDENTES

Según el Real Decreto 452/2012 de 5 de marzo, corresponde a la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) entre otras, la siguiente función: *“La planificación y gestión de sistemas de detección y comunicación de los movimientos sísmicos ocurridos en territorio nacional y áreas adyacentes y sus posibles efectos sobre las costas, así como la realización de trabajos y estudios sobre sismicidad y la coordinación de la normativa sismorresistente”.*

Dentro de sus operaciones habituales de detección y análisis de sismos próximos, el IGN comenzó a detectar actividad sísmica en el Golfo de Valencia, a unos veinte kilómetros de la costa, frente a Vinarós (Castellón), a partir del día 5 de septiembre de 2013. Se siguió a partir de entonces con los protocolos habituales de aviso a la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCyE) y se procedió a efectuar un seguimiento especial debido al incremento diario de la actividad. La localización inicial de los epicentros se ha situado en torno a la plataforma instalada para la ejecución del denominado proyecto Castor, de coordenadas:

Latitud = 40°.3946N y Longitud = 0°.7091E

Con fecha 26 de septiembre de ese mismo año, la Dirección General del IGN recibió una comunicación escrita de la Dirección General de Política Energética y Minas perteneciente a la Secretaría de Estado de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, en la que se solicitaba la realización de un estudio detallado sobre la actividad sísmica, sus causas, evolución temporal y recomendaciones relativas a las operaciones en las instalaciones para la inyección de gas en la plataforma del proyecto Castor.

Este informe responde a dicha solicitud, abordando las cuestiones que son propias de las competencias asignadas al IGN y que, en el caso presente, se concretan en aportar información sobre la fuente sísmica hasta donde sea posible, ello sin perjuicio de aportar desde el primer momento: fecha y hora en que ocurren los terremotos, parámetros focales, estimación del área afectada y de intensidades (EMS) en municipios en que percibieron los terremotos.

En el Anexo a este informe, se muestra un listado de aquellas estaciones sísmicas que la RSN ha utilizado en los registros y análisis de los eventos, tanto las pertenecientes a la propia RSN, como a otras instituciones nacionales y extranjeras.

1.1. Actividad sísmica previa al 4 de septiembre de 2013

Para la descripción de la sismicidad histórica e instrumental se ha seleccionado una amplia zona representada en la siguiente Figura 1 y dentro de la cual se encuentra la plataforma del proyecto Castor y las principales fallas conocidas.

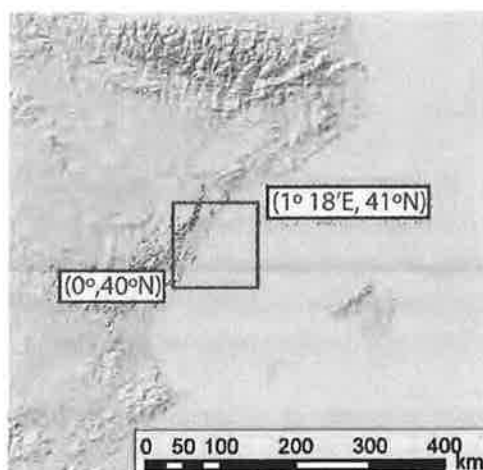


Figura 1. Recuadrado en rojo aparece la zona de estudio seleccionada.

Hasta 1920 el número de sismos que aparecen en la base de datos sísmicos del IGN es de 6, con una intensidad máxima (sentidos por la población) de V (escala EMS). Desde 1920 hasta el 1 de junio de 2013 el número de sismos registrados es de 203, con una magnitud máxima de 3.3 (medida instrumental de la energía liberada) (Figura 2). Desde el año 2011 la actividad sísmica del área esta resumida en la Tabla 1.

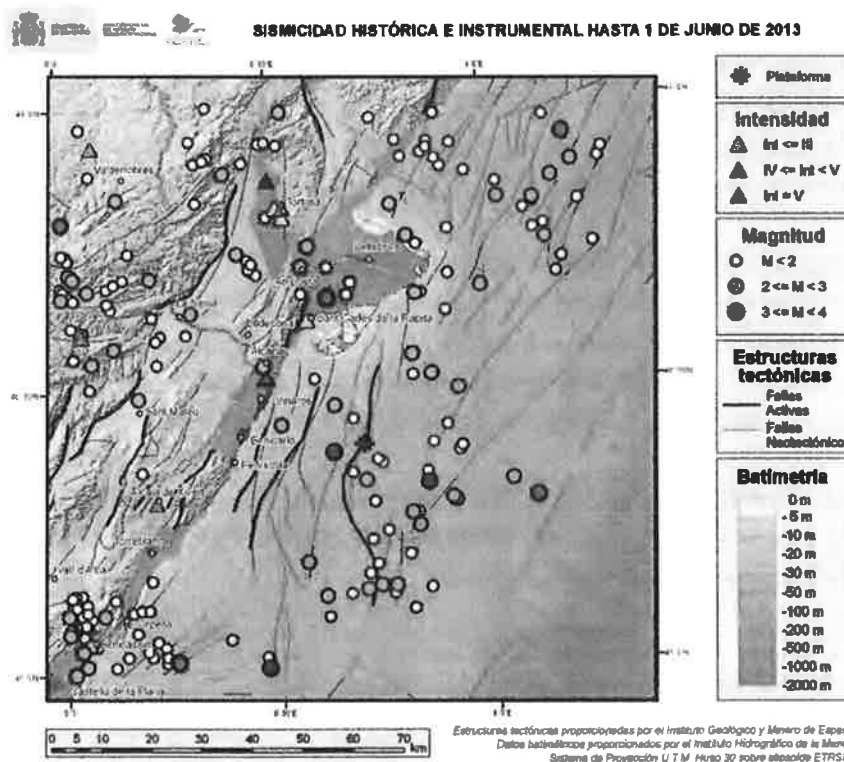


Figura 2. Sismicidad del área hasta el 1 de junio de 2013. Las fallas representadas corresponden al Fichero de Fallas Activas (IGME) y al Mapa Neotectónico (IGME)

Tabla 1
Estadística de los sismos registrados desde 2011

AÑO	Nº DE SISMOS	MAGNITUD MÁXIMA DEL PERIODO	Nº DE SISMOS SENTIDOS
2011	3	1.7	0
2012	7	3.3	0
Desde 1 de enero hasta 4 de septiembre de 2013	0	0	0

1.2. Peligrosidad sísmica del Golfo de Valencia

En el desarrollo del actual Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (2012), se tuvo en cuenta la existencia de las fallas de Amposta y las dos paralelas hacia la costa y fueron asociadas a la zona sismotectónica nº 27. Como resultado de dichos estudios, la peligrosidad en el emplazamiento de la plataforma de inyección del proyecto Castor, se obtiene un valor de aceleración máxima horizontal (475 años de periodo de retorno) para la zona, comprendido entre 0,04g y 0,05g. Se correspondería con el valor más bajo de peligrosidad sísmica a considerar en la Normativa Sismorresistente. El impacto de sismicidad inducida no se tiene en cuenta en estos mapas. Se debería estudiar para el caso de emplazamientos que puedan generarla. En la Figura 3 se muestra un extracto del Mapa de Peligrosidad Sísmica de España de 2013.

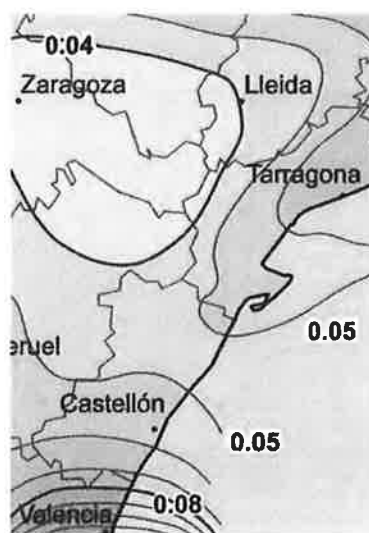


Figura 3. Extracto del Mapa de Peligrosidad Sísmica de España 2012 para periodo de retorno de 475 años.
(Grupo de trabajo IGN-UPM, 2013)



10 ABR. 2014 19:40:41 Entrada: 129922

MINISTERIO
DE FOMENTO

2. SERIE SISMICA DESDE EL 5 DE SEPTIEMBRE DE 2013

Aunque la inyección de gas en la plataforma se inicia el mes de junio, hasta el 5 de septiembre no se registra ningún sismo por la RSN. En total, los sismos registrados a partir de esta fecha son:

Nº de sismos registrados: 512 (a fecha 15 de octubre a las 09:00h)
Magnitud máxima registrada: 4.2 (M_w)
Nº de sismos sentidos: 15
Intensidad máxima: III (EMS)

Previamente al recálculo epicentral de la serie que posteriormente se presenta la distribución provisional de epicentros para los sismos mayores de 2.0, junto a la representación de las principales fallas y estructuras procedentes del fichero de Fallas Activas y del Mapa Neotectónico del IGME, se observa en la Figura 4.

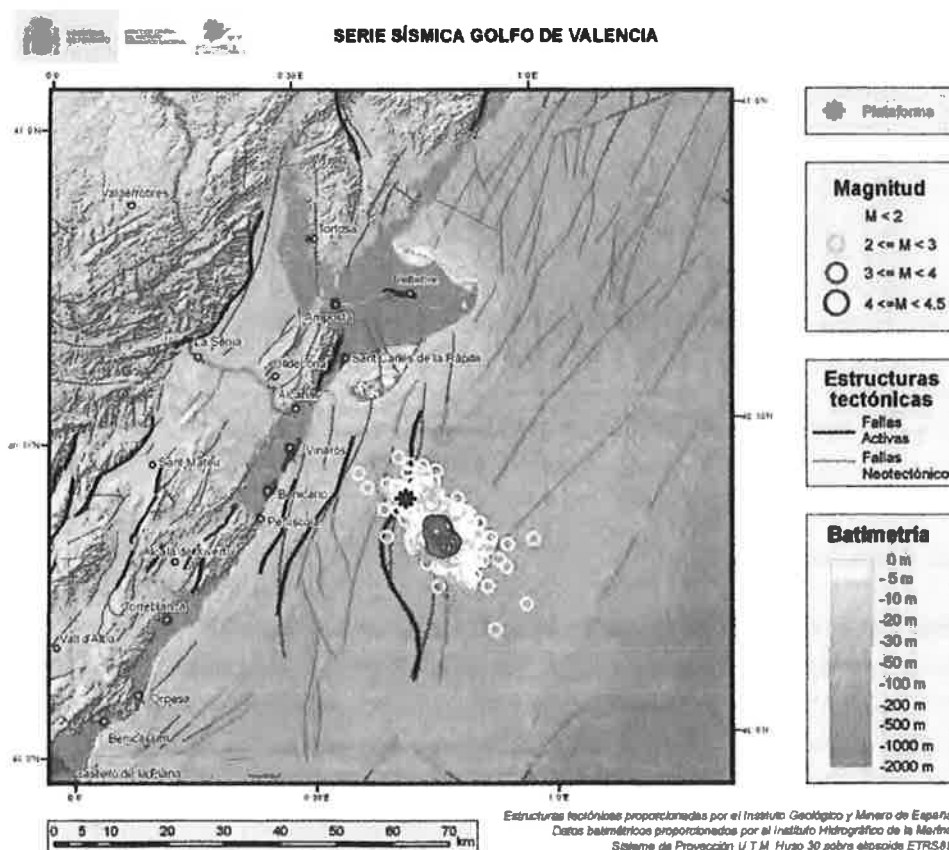


Figura 4. Sismicidad registrada desde el día 1 de junio hasta el día 14 de octubre de 2013 previa al recálculo de epicentros para los sismos mayores de magnitud 2.0. Las fallas representadas corresponden al Fichero de Fallas Activas (IGME) y al Mapa Neotectónico (IGME)

2.1. Evolución temporal

Desde el inicio del registro de la serie sísmica, el 5 de septiembre de 2013, el número de sismos que se han producido y su magnitud ha ido variando considerablemente hasta la fecha de este informe en que ha decaído completamente, al menos de forma temporal. La evolución de la actividad se presenta en la Figura 5. En dicha figura, en el eje de abscisas se muestra la fecha y en el de ordenadas se muestran a la vez el número de terremotos (barras) y la magnitud máxima de los mismos (círculos rellenos) para cada día. Vemos que los episodios más críticos suceden desde el día 29 de septiembre hasta el día 4 de octubre, disminuyendo considerablemente a partir de entonces la actividad.

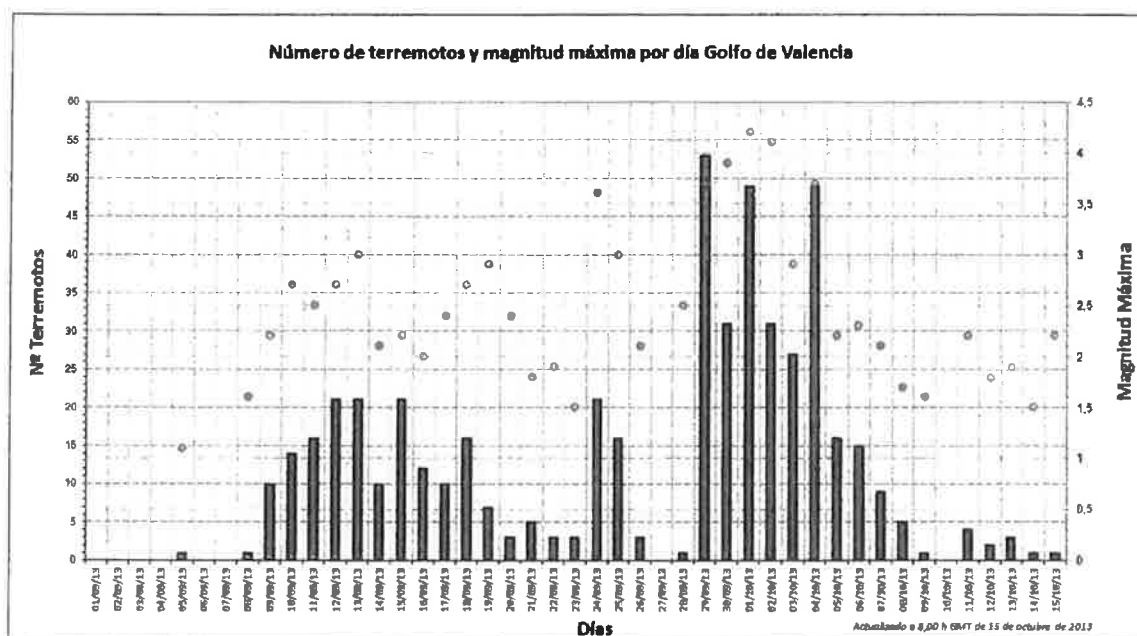


Figura 5. Evolución temporal de la sismicidad. Las barras representan el número de terremotos por día y los círculos, las magnitudes máximas.

2.2. Disipación energética

Dado que la escala de magnitudes no es lineal, se puede expresar mejor el comportamiento de la actividad sísmica mediante la energía liberada. Siguiendo las relaciones que hay establecidas entre las diferentes escalas de magnitud y la energía hemos representado como se ha ido liberando dicha energía sísmica con los terremotos a lo largo del tiempo. En la Figura 6 se aprecia cómo ha evolucionado la actividad sísmica marcándose un cambio de pendiente con la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud. Las zonas planas se corresponden con periodos en que se producen pequeños sismos aunque sean numerosos y los saltos con la ocurrencia de sismos mayores.

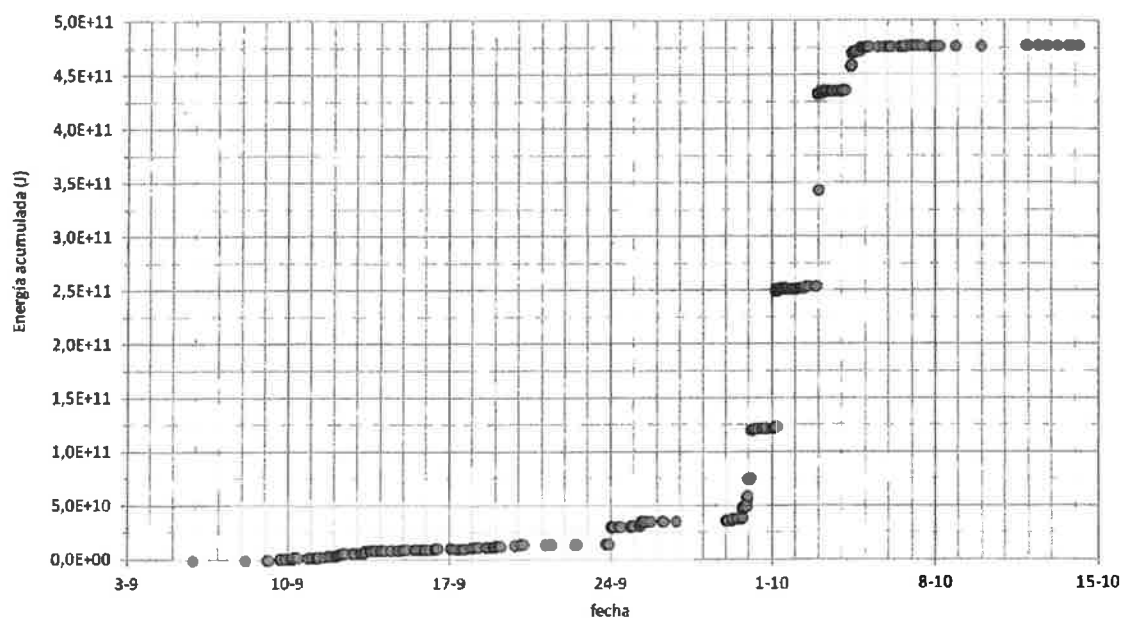


Figura 6. Energía acumulada en el proceso temporal de ocurrencia de los terremotos.

2.3. Análisis macrosísmico

Se tiene constancia de que la población ha sentido 15 terremotos, con intensidad macrosísmica II y III en la escala macrosísmica europea EMS-98, es decir, se sintieron de forma leve o muy leve. Estos terremotos corresponden a magnitudes entre 2.9 mBlg y 4.2 Mw (Tabla 2).

Tabla 2
Terremotos sentidos por la población

Evento	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof. (Km)	Inten.	Mag.	Localización
1234647	24/09/2013	00:21:50	40.3324	0.7757	3	II	3.6	GOLFO DE VALENCIA
1236155	29/09/2013	16:36:23	40.3154	0.7903	5	II	3.4	GOLFO DE VALENCIA
1236342	29/09/2013	21:15:06	40.3487	0.7638	4	II	3.3	GOLFO DE VALENCIA
1236361	29/09/2013	21:23:16	40.3133	0.7803	2	II	3.2	GOLFO DE VALENCIA
1236429	29/09/2013	22:15:48	40.3305	0.7693	2	III	3.6	GOLFO DE VALENCIA
1236581	30/09/2013	02:21:17	40.3359	0.7704	3	III	3.9	GOLFO DE VALENCIA
1237104	01/10/2013	03:32:45	40.3202	0.7939		III	4.2	GOLFO DE VALENCIA
1237788	02/10/2013	09:27:26	40.3309	0.7653		II	2.9	GOLFO DE VALENCIA
1237944	02/10/2013	23:06:50	40.3448	0.7713	6	III	4.1	GOLFO DE VALENCIA
1237976	02/10/2013	23:29:29	40.3505	0.7691	6	III	4.1	GOLFO DE VALENCIA
1238106	03/10/2013	03:13:02	40.3346	0.7947		II	2.9	GOLFO DE VALENCIA
1238333	04/10/2013	08:49:48	40.3372	0.7639	6	III	3.7	GOLFO DE VALENCIA
1238401	04/10/2013	09:55:19	40.3173	0.7691	1	II	3.5	GOLFO DE VALENCIA
1238531	04/10/2013	12:56:10	40.3162	0.7881	5	II	2.9	GOLFO DE VALENCIA
1238635	04/10/2013	20:02:24	40.3189	0.7924	2	II	3.1	GOLFO DE VALENCIA

El primer terremoto que se tiene constancia que fuera sentido por la población es el del día 24.09.2013, 00:21 GMT (02:21 hora local), del que únicamente se recibieron tres cuestionarios macrosísmicos (Benicarló, Font-Nova y Vinaròs). Del terremoto que se recibieron más respuestas fue el del día 2.10.2013-23:29GMT, del que se han valorado 327 cuestionarios.



Es habitual que en las series sísmicas que se producen en zonas donde la población no está acostumbrada a sentir terremotos, inicialmente se reciban muy pocas encuestas, o que incluso, como en este caso, el mismo ayuntamiento no tuviera constancia de que hubiera sido sentido. Esto se debe a que las pequeñas vibraciones, balanceos o ruidos que se sienten, se atribuyan al paso de un camión, a un golpe en la casa de un vecino, o incluso a algún problema de salud. El número de cuestionarios recibidos ha ido aumentando al estar la población sensibilizada con los terremotos y saber reconocerlos más fácilmente.

En la Tabla 3 se presentan las localidades donde se tiene constancia de haber sentido los terremotos, junto con la intensidad máxima en dichas localidades.

Tabla 3
Intensidades máximas por localidad

<i>Localidad</i>	<i>Intensidad</i>
ALCALA DE XIVERT.CS	II-III
ALCANAR.T	III
ALCANAR-PLATJA,ALCANAR.T	III
ALDEA. L'.T	II-III
ALMEDA MERCADER,CORNELLA LLOBREGAT.B	II
AMETLLA DE MAR. L'.T	II-III
AMPOLLA. L'.T	II-III
AMPOSTA.T	III
ATALAYAS (LAS),PEÑISCOLA.CS	II-III
BARBERA DE LA CONCA.T	II
BARCELONA.B	II
BARRI MARITIM DE COMARRUGA,VENDRELL.T	II
BECEITE.TE	II
BENICARLO.CS	III
BORRIOL.CS	II
BOT.T	II
CALAFELL.T	II
CALIG.CS	III
CAMARLES.T	II
CAMBRILS.T	II
CAMPCLAR,TARRAGONA.T	II
CASES D'ALCANAR. LES,ALCANAR.T	III
CASTELLDEFELS.B	II
CASTELLON DE LA PLANA.CS	II
CASTELSERAS.TE	II
CERVERA DEL MAESTRE.CS	III
CULLERA.V	II
DELTEBRE.T	III
FALSET.T	II



FONT-NOVA, PEÑISCOLA. CS	III
FREGINALS. T	II-III
FRESNEDA. LA. TE	II
GANDESA. T	II
GAVA. B	II
GODALL. T	II-III
GODELLA. V	I-II
GOLMES. L	II
GRAO, CASTELLON DE LA PLANA. CS	II
JANA. LA. CS	II-III
JESUS, TORTOSA. T	II
MONCOFA. CS	II
MONTGONS (ELS), TARRAGONA. T	II
MONT-ROIG DEL CAMP. T	II
MORELLA. CS	II
OROPESA. CS	II
PALLARESOS. ELS. T	II
PEÑISCOLA. CS	III
PERELLO. EL. T	II
PINEDA. LA, VILA-SECA. T	II
PLAYA DE CALAFELL, CALAFELL. T	II
POBLA DE BENIFASSA. LA. CS	II
PRATDIP. T	II
RAVAL DE CRISTO, ROQUETES. T	II-III
REUS. T	II
ROQUETES. T	II
ROSSELL. CS	II
SALOU. T	II
SAN JORDI/SAN JORGE. CS	II
SANT ADRIA DE BESOS. B	II
SANT BOI DE LLOBREGAT. B	II
SANT CARLES DE LA RAPITA. T	III
SANT JOAN DE MORÓ. CS	II
SANT PERE I SANT PAU, TARRAGONA. T	II
SANT SALVADOR, TARRAGONA. T	II
SANTA COLOMA DE GRAMENET. B	II
SARROCA DE LLEIDA. L	I-II
SEGUR DE CALAFELL, CALAFELL. T	II
SITGES. B	II
TARRAGONA. T	II
TERRASSA. B	II
TORREBONICA, TERRASSA. B	II
TORREDEMBARRA. T	II
TORTOSA. T	II
TRAIQUERA. CS	II
ULLDECONA. T	III



VALDERROBRES.TE	II
VALENCIA.V	I-II
VALLS.T	II
VENDRELL. EL.T	II
VILADECANS.B	II
VILAFORTUNY,CAMBRILS.T	II
VILAFRANCA DEL PENEDES.B	II
VILANOVA I LA GELTRU.B	II
VILA-SECA DE SOLCINA.T	II
VINAROS.CS	III
ZONA COSTERA,RODA DE BARA.T	II
ZONA EIXAMPLE,TARRAGONA.T	II

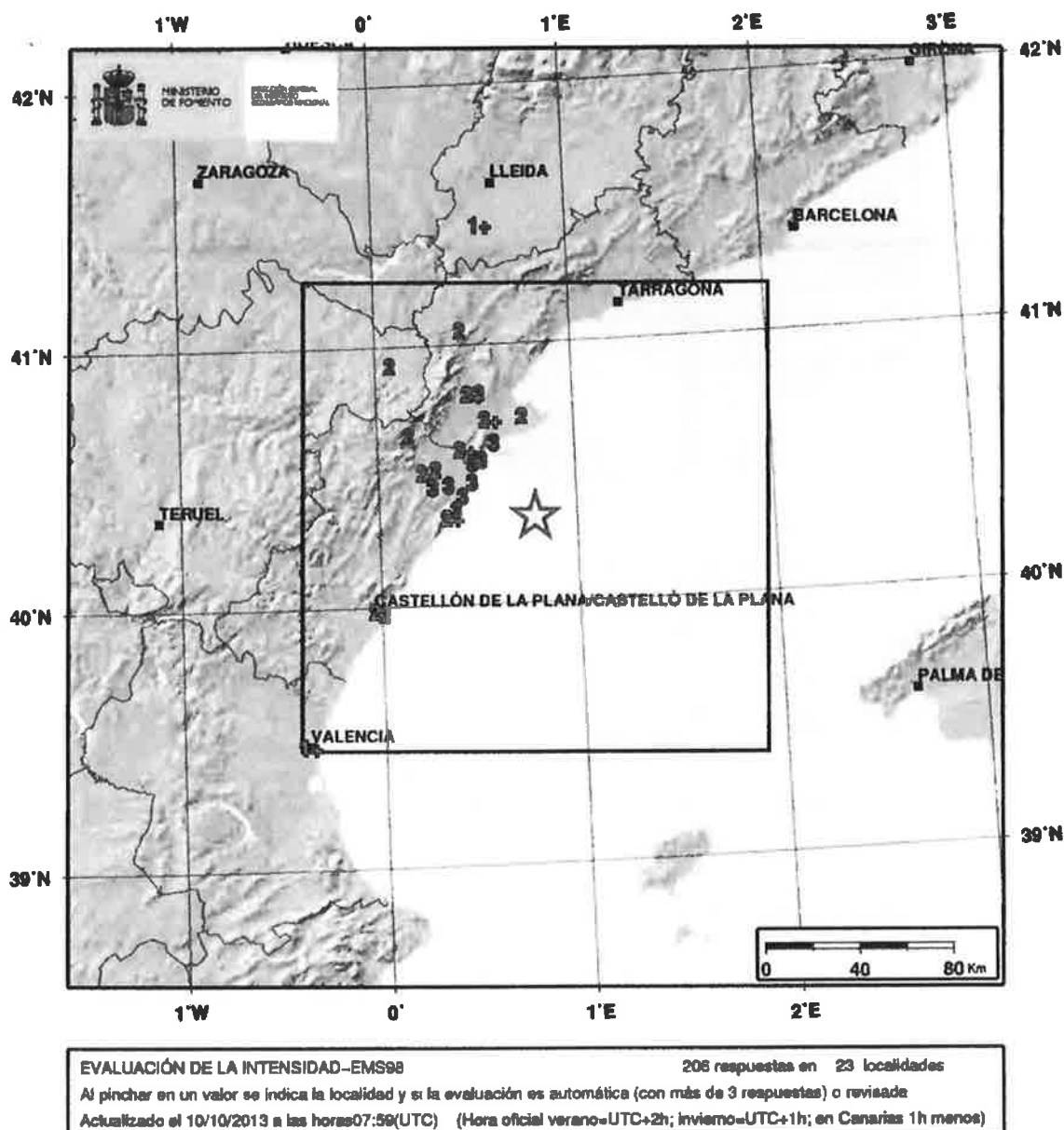


Figura 7. Mapa de intensidades del terremoto 01/10/2013 - 03:32:45 GMT - Mw 4.2 - Evid: 1237104

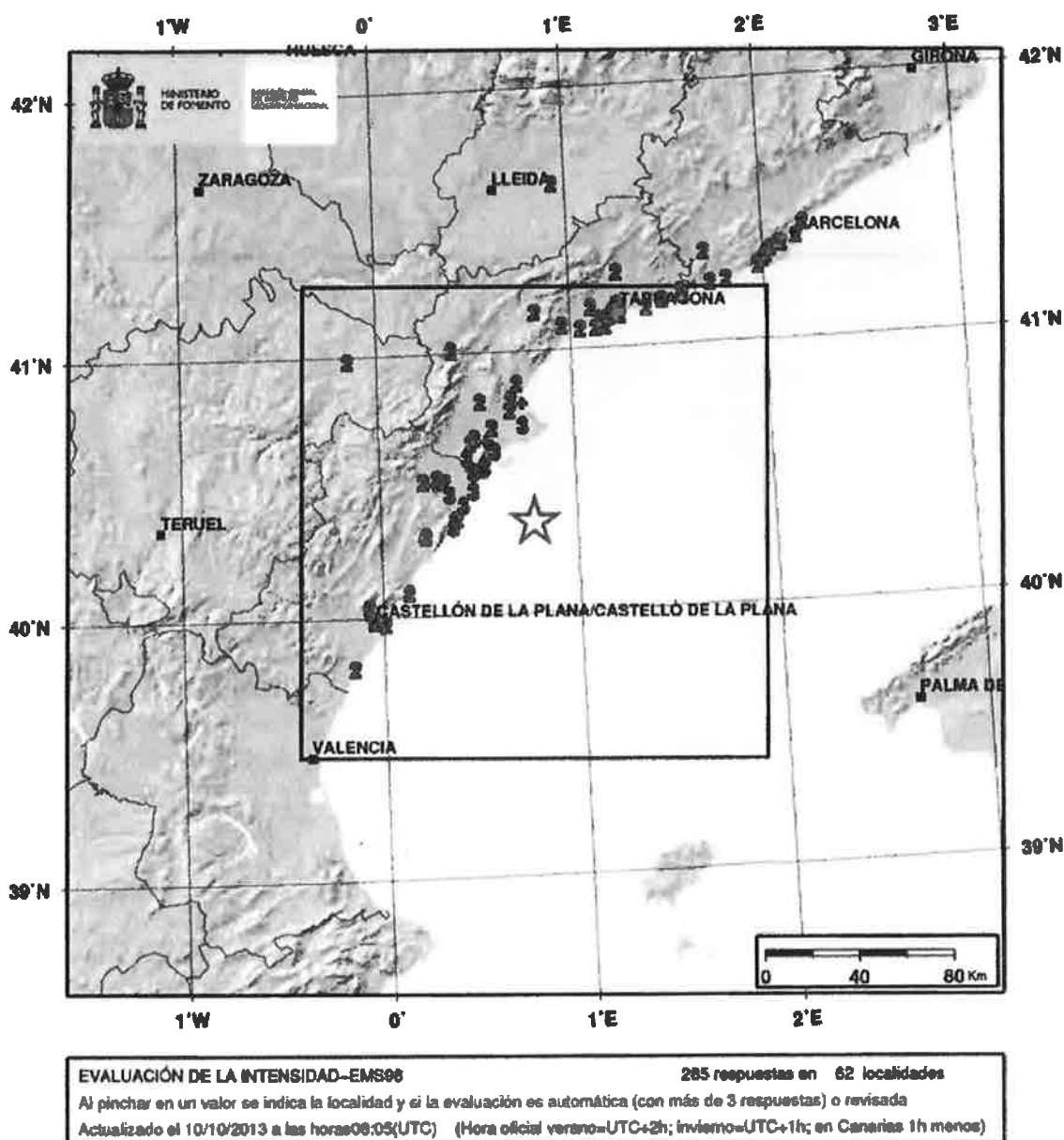


Figura 8. Mapa de intensidades del terremoto 02/10/2013 - 23:06:50 GMT - Mw 4.1 - Evid: 1237944

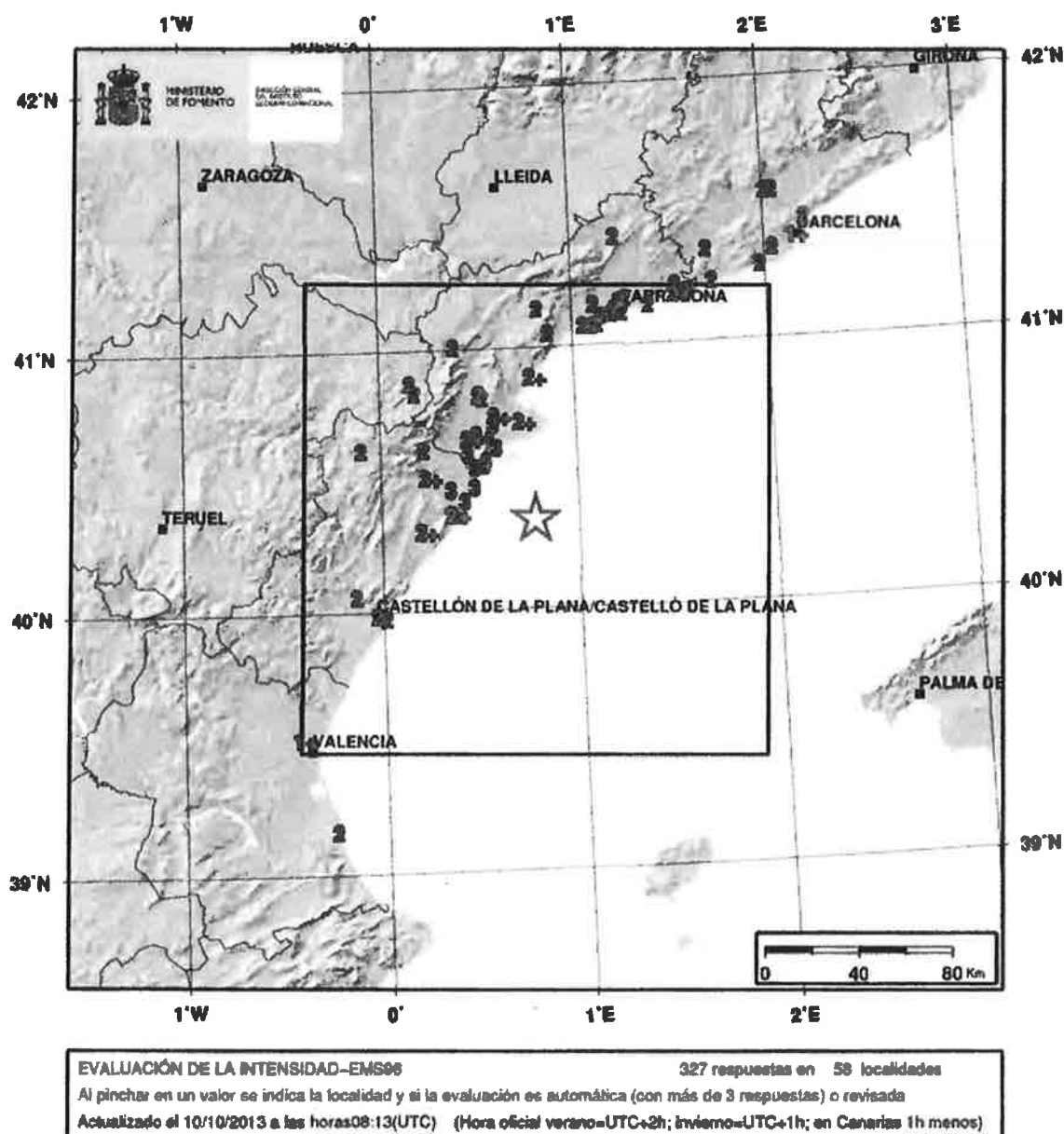


Figura 9. Mapa de intensidades del terremoto: 02/10/2013 - 23:29:29 GMT - Mw 4.1 - Evid: 1237976





3. PRINCIPALES ACTIVIDADES LLEVADAS A CABO

La RSN del IGN ha desarrollado, además de las labores habituales de registro y análisis de los sismos, las siguientes actividades relacionadas con la sismicidad del Golfo de Valencia:

- Se ha asistido a cuatro reuniones en el Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Han participado, además de personal del IGN, miembros del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Instituto Geológico y Minero de España, Dirección General de Protección Civil y Emergencias.
- En estas reuniones, se actualizó la información sobre los trabajos que se estaban realizando. Se apreció bastante consenso entre las hipótesis que iba desarrollando el IGN y las que planteaba el IGME.
- Se ha procedido a la instalación de una nueva estación sísmica en L'Ille Grossa de las Islas Columbretes, por estar muy cercana a la zona de actividad sísmica. La estación comenzó a enviar datos en tiempo real a la RSN a las 14:45 del domingo 6 de octubre. En la gestión, el IGN contó con la ayuda de la DGPCyE, con la Subdelegación del Gobierno en Castellón y la empresa TRAGSA.
- Se han incorporado al cálculo los registros sísmicos del sismógrafo existente en la Central Nuclear de Vandellós, a través de la Secretaría de Estado de Energía.
- Se ha establecido la conexión en tiempo real con las dos estaciones sísmicas que la empresa ESCAL UGS ha facilitado al Observatorio del Ebro y situadas en las poblaciones de Alcoceber (Castellón) y Alcanar (Tarragona).
- Con fecha 7 de octubre se recibió de EPRONA (Comandancia de la Guardia Civil) petición de datos de sismicidad en la zona registrados en los últimos 10 años a petición de la Fiscalía Delegada de Medio Ambiente de la Fiscalía Provincial de Castellón (Diligencias de Investigación Penal). Dicha solicitud fue contestada el 8 de octubre.
- Se ha establecido conexión en tiempo real con el sismómetro marino que el Instituto Geológico de Cataluña tiene en la plataforma marina llamada Casablanca.
- Se han elaborado, desde el día 2 de octubre a las 9h, un total de 29 partes (2 por día) con la actividad en la zona del Golfo de Valencia, a través de los cuales se ha informado a los siguientes centros:
 - Ministerio de Industria (Ministro, Gabinete del Ministro, Secretario de Estado de Energía, Director General de Política Energética y Minas, Subdirector General de Hidrocarburos)
 - Subsecretaría de Fomento



- Dirección de Comunicación del Ministerio de Fomento
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias
- Agencia de Seguridad Nacional



4. LINEAS PRIORITARIAS DE TRABAJO. RESULTADOS

El Instituto Geográfico Nacional tiene experiencia en el tratamiento de la sismicidad inducida por operaciones tecnológicas sobre el terreno a partir del registro de la sismicidad producida en el año 1961, durante el primer vaciado del embalse de Camarillas (Albacete) en que se registraron sismos con una magnitud máxima de 3.5. Posteriormente, se analizó la sismicidad producida en el colapso de la mina de Reocín (Santander) el 9 de enero de 1965 y que alcanzó una magnitud de 4.1 y de intensidad VII (MSK) con varios heridos. Años después, se estudió la actividad sísmica del embalse de Ricobayo (Zamora) en 2003 y más recientemente en el primer llenado y vaciado del embalse de Itoiz (Navarra) y ampliación del embalse de Yesa (Navarra), ambos en 2009. Hasta el momento, el IGN no había intervenido en estudios relacionados con la inyección de fluidos en el terreno.

Se han consultado los trabajos científicos más recientes y se seleccionaron los considerados como más fiables, relacionados con los sismos inducidos por inyección de fluidos. La bibliografía principalmente consultada aparece en este mismo informe.

4.1. Mecanismos focales

Las hipótesis básicas en que se apoyan los resultados del estudio del IGN, tienen como base fundamental, el análisis de los mecanismos focales de los sismos mayores, que son los únicos sobre los que se puede determinar. El mecanismo focal determina, a través de su análisis, la forma y dirección en que se ha movido la posible falla originaria de los sismos.

El análisis del mecanismo focal se realiza en el IGN por dos equipos diferentes y tres métodos distintos. Dos de los métodos están basados en los ajustes de las observaciones con sismogramas sintéticos. Un tercer método se apoya en las polaridades de las primeras llegadas (onda P) de las ondas registradas.

De esta manera, se han podido determinar los mecanismos focales correspondientes a los sismos de mayor magnitud y con los resultados representados en la Tabla 4.

Hay que señalar que, siempre, los mecanismos focales, independientemente del método que se utilice para su determinación, presentan como resultado, dos planos de falla posibles y perpendiculares entre sí; sin que sea posible, a priori, determinar cuál es el verdadero.



Tabla 4
Mecanismos focales de los terremotos de mayor magnitud

Fecha Hora (UTM)	Mw	Planos nodales			Proyección estereográfica
		Azimut	Buzamiento	Deslizamiento	
24/09/2013 00:21:50	3.5	132	88	-155	
		41	65	-2	
29/09/2013 22:15:48	3.7	134	74	-138	
		31	50	-21	
30/09/2013 02:21:19	4.0	139	80	-127	
		36	38	-16	
01/10/2013 03:32:45	4.2	36	89	36	
		305	54	178	
02/10/2013 23:06:51	4.1	131	88	-141	
		39	51	-2	
02/10/2013 23:29:29	4.0	304	86	-176	
		214	86	-4	
04/10/2013 08:49:48	3.7	310	82	158	
		44	69	9	
04/10/2013 09:55:20	3.5	214	87	-7	
		304	83	-177	

De los mecanismos focales se deduce lo siguiente:

- Todos los mecanismos focales tienen similares características mostrando un movimiento de desgarre con una ligera componente normal.
- Uno de los dos planos nodales del conjunto de mecanismos calculados tiene un azimut compatible con la falla de Amposta, pero presenta un buzamiento, en general, en sentido contrario. La localización epicentral está situada al E de la citada falla, con lo que no se correspondería con el buzamiento de la falla de Amposta. Respecto al otro plano nodal posible, presenta un azimut en torno a 130° o 140° y un buzamiento en la mayoría de los casos cercano a la vertical.

Por las razones anteriores se podría tratar de una falla cuya traza sería aproximadamente de 130° o 140° y un buzamiento, en unos casos, cercano a la vertical.

Una mejor relocalización de los eventos podría dar una mejor aproximación y poder relacionarla con más precisión con la falla responsable de la actividad. En la Figura 10 se muestra un esquema, para la mejor interpretación, de los principales mecanismos focales y su representación sobre la esfera focal.



Figura 10. Ejemplos gráficos de fallas típicas y su representación sobre la esfera focal.

4.2. Revisión de las determinaciones epicentrales

Los procedimientos de alerta sísmica y revisión posterior de los sismos ocurridos en territorio español y áreas adyacentes que pudieran afectar a la seguridad de ciudadanos y construcciones, se

lleva a cabo mediante programas informáticos preparados para dar respuesta a sismos de cualquier parte de la Península e Islas. No obstante, en casos como el que nos ocupa, existe la posibilidad de repetir los análisis por diferentes métodos y utilizando estaciones sísmicas de las que en los primeros cálculos no se disponía. En el cálculo definitivo de epicentros y profundidad se han utilizado, además de las estaciones sísmicas del IGN, varias estaciones del Institut Geològic de Catalunya, del Observatorio del Ebro, de la red de investigación del consorcio Universidad Complutense de Madrid y Real Observatorio de la Armada, estaciones de la red sísmica de Portugal y del Observatoire Midi-Pyrénées de Francia.

La relocalización de los epicentros, es este caso, especialmente determinante para identificar cuál es el plano de falla en que se están produciendo los sismos y si ese plano de falla es compatible con las fallas existentes, activas y conocidas. El cálculo se ha realizado por dos diferentes métodos, por medio del uso del software SEISCOMP del Centro Alemán de Sismología GFZ (Geoforschungs Zentrum) y por el método denominado de dobles diferencias basado en el programa informático HypoDD de Walhauser de 2001.

En la Figura 11 se representa la distribución espacial y temporal de los epicentros, tal y como se calculó inicialmente, en los que se utilizaron todas las estaciones del IGN y el modelo general de estructura de la corteza. Contiene 163 sismos de magnitud $M \geq 2.0$ y es la que figura actualmente en el catálogo. Las elipses que aparecen rodeando cada evento son las elipses de error para un intervalo de confianza del 90%.

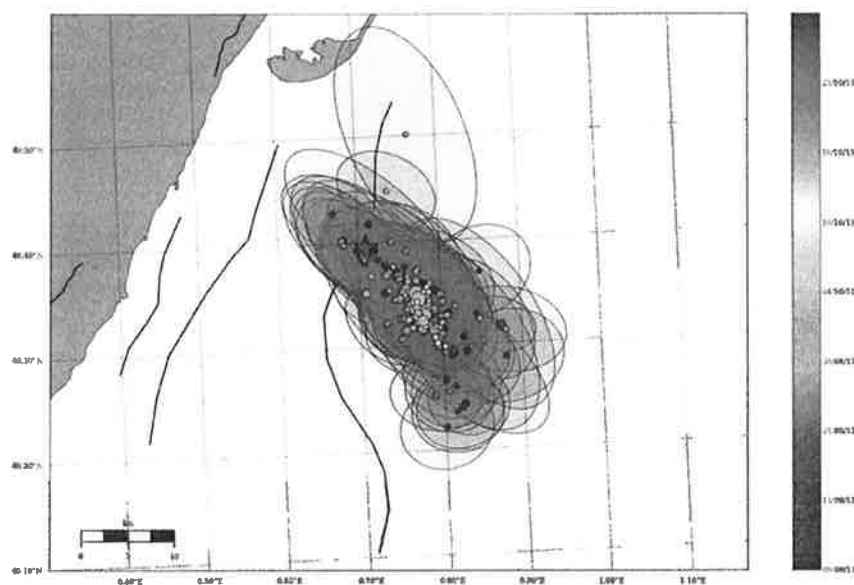


Figura 11. Distribución obtenida en el cálculo inicial de epicentros de los sismos de magnitud mayor o igual a 2.0. La estrella de color verde señala la plataforma

La Figura 12 refleja la situación después de la relocalización. En este cálculo se han incorporado datos de otras instituciones y las estaciones del IGN situadas a distancias como máximo de 2° . El modelo de estructura utilizado es de tres dimensiones y específico para la zona, para sismos de magnitud mayor o igual a 2.0. Hemos de señalar no obstante, que los sismos de menor magnitud tienen una

mayor incertidumbre en su localización epicentral. La estrella en rojo señala la ubicación de la plataforma Castor.

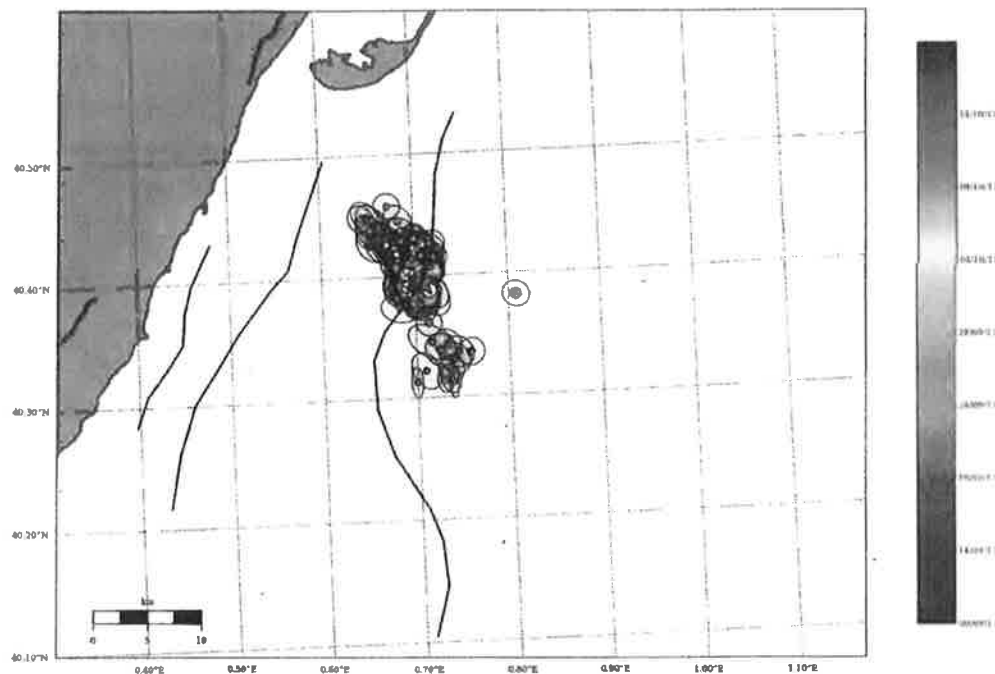


Figura 12. Distribución resultante de la relocalización de epicentros de los sismos de magnitud igual y mayor de 2.0.

En la Figura 13 se representan los epicentros recalculados junto con sus mecanismos focales calculados por medio de la inversión del tensor momento sísmico, utilizando sismogramas sintéticos.

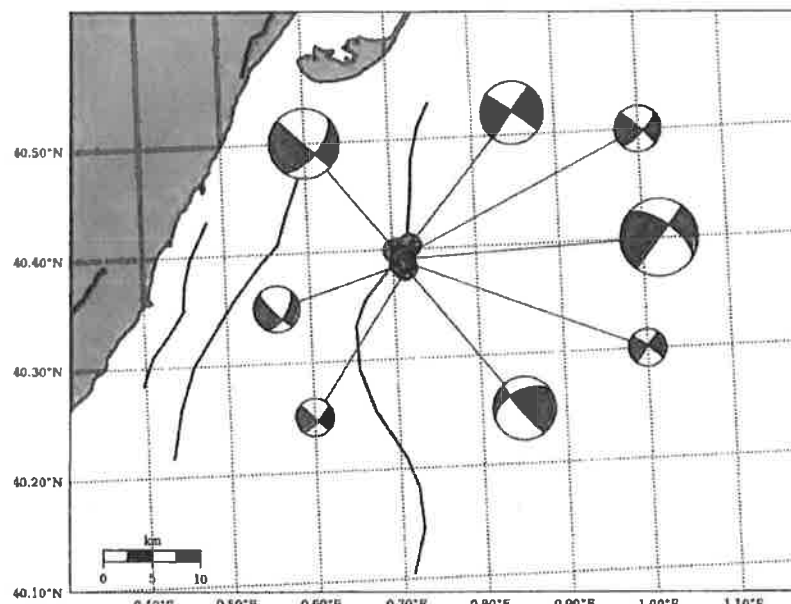


Figura 13. Representación de los epicentros recalculados y sus correspondientes mecanismos focales para sismos de magnitud comprendida entre 3.5 y 4.2.

4.3. Profundidad de los sismos

En la Figura 14 se ha representado la distribución de los terremotos recalculados en función de la profundidad. Los de mayor magnitud están situados a una profundidad menor de 2 km, que coincide con la profundidad calculada mediante el tensor del momento sísmico. En general, el cálculo de la profundidad focal siempre presenta gran incertidumbre en su determinación y tiene menor precisión en los terremotos de menor magnitud, siendo el intervalo de error en el cálculo de estas profundidades de unos 2 km para una probabilidad del 90%.

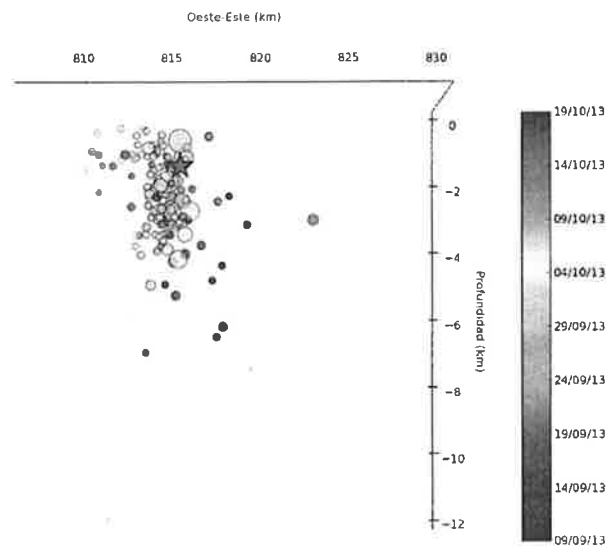


Figura 14. Distribución en profundidad de los sismos relocados. En la imagen se representa la proyección sobre el eje Oeste-Este. (Ejes en coordenadas UTM y profundidades en kilómetros). La escala de colores señala la fecha de ocurrencia de los sismos. La estrella en rojo señala la plataforma Castor.

4.4. Discriminación de eventos: formas de onda y polaridades

Los sismos de mayor magnitud de la serie sísmica, y por tanto aquellos en los que ha sido posible determinar el mecanismo focal, se han producido después de detener la inyección del gas. Así pues, no disponemos de esa herramienta para poder caracterizar el tipo de sismo producido en la primera fase de inyección. Existen en cambio otros procedimientos como son la identificación de la forma de onda o la determinación de las polaridades de las ondas P.

Formas de onda

La forma de la onda es diferente en caso de sismo de origen tectónico (fallas) que de otro tipo como explosiones o colapsos. De la casuística para este tipo de registros existente en la literatura al respecto, podemos deducir una forma generalmente distinta para estos segundos casos. Como ejemplo tomamos un caso comparado de un sismo registrado en un lugar de origen tectónico y otro

sismo en el mismo lugar de origen de colapso en minería tomado de James C. Pechwan, et al. (2008) y que reproducimos en la Figura 15.

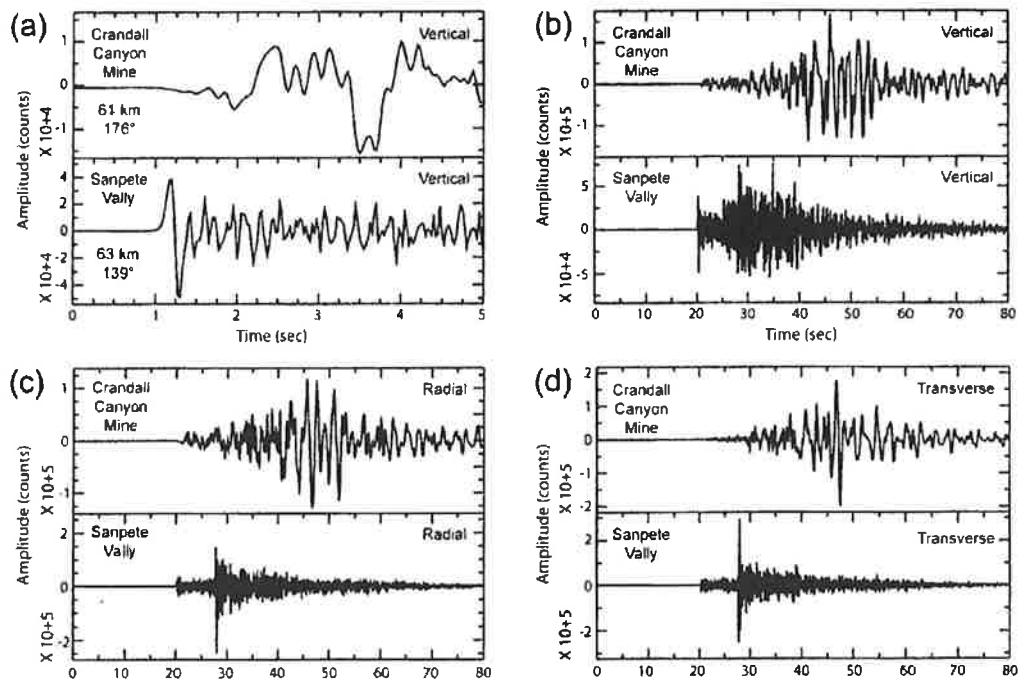


Figura 15. Pie de figura del autor: Comparación de formas de onda de banda ancha del principal derrumbe de la mina Crandall Canyon y la de un terremoto de magnitud ML 3.9 que ocurrió a 40 km en dirección WSW de Sanpete Valley el 5 de noviembre de 2001. Los datos fueron registrados en un array portátil Q16A, aproximadamente a la misma distancia. Los dibujos muestran: (a) componentes verticales con la distancia epicentral y el azimut, (b) componentes verticales a una escala comprimida, (c) componentes radiales, (d) componentes transversales. Similares diferencias en las formas de onda se observan en otras distancias. (Pechwan et al. 2008).

Utilizando sismos registrados en la serie del Golfo de Valencia, hemos tomado como ejemplo dos sismos de fechas anteriores a la paralización de la inyección y dos sismos registrados después. Los dos primeros del 12 y 13 de septiembre y magnitudes 2.7 y 3.0 y dos sismos de 1 y 3 de octubre de magnitudes 4.2 y 2.0 respectivamente, en la misma estación sísmica. Son formas muy semejantes y con características similares a cualquier sismo de origen tectónico. Aparentemente no se puede diferenciar la forma de onda de los sismos anteriores al día 16 de septiembre a la de los ocurridos posteriormente. Se muestran en las Figuras 15 (a), (b), (c) y (d), registros en la estación sísmica de ERTA (IGN), de dos sismos ocurridos antes del 16 de septiembre y dos sismos ocurridos después de esa fecha.

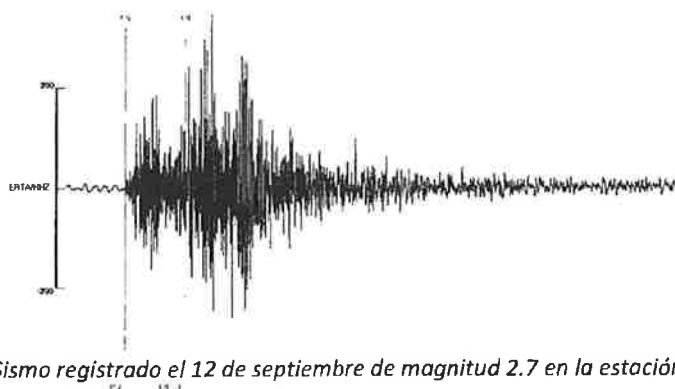


Figura 16 (a). Sismo registrado el 12 de septiembre de magnitud 2.7 en la estación de ERTA (IGN)

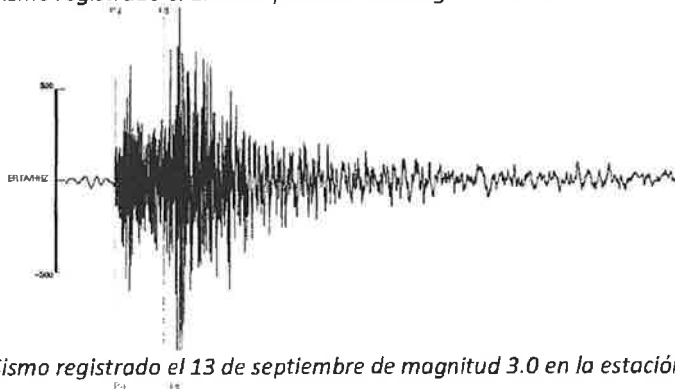


Figura 16 (b). Sismo registrado el 13 de septiembre de magnitud 3.0 en la estación de ERTA (IGN)

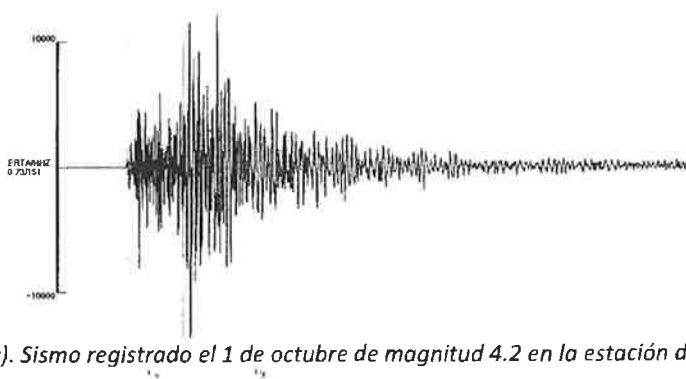


Figura 16 (c). Sismo registrado el 1 de octubre de magnitud 4.2 en la estación de ERTA (IGN)

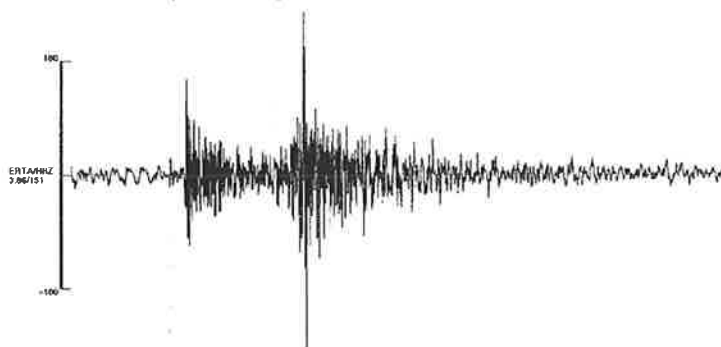


Figura 16 (d). Sismo registrado el 3 de octubre de magnitud 2.0 en la estación de ERTA (IGN)

Polaridades

Con el fin de resolver las dudas que esta comparación de formas de onda pudiera suscitar, se ha recurrido a otro estudio que nos permita discernir las formas de onda de la fase de inyección de la fase posterior. Consiste en la determinación de las polaridades de la fase P en los sísmos registrados durante la inyección de gas. De tratarse de explosiones, derrumbes o colapsos, todas las polaridades serían iguales para todas las estaciones que registrasen un mismo terremoto. Para poder estudiar esta particularidad en nuestro caso hemos escogido un sísmo del día 13 de septiembre (periodo de inyección) y hemos calculado las polaridades y con ellas se han distribuido sobre una esfera que representa la proyección para el caso de mecanismo de desgarre. Se presenta, a manera de ejemplo el gráfico ampliado de la primera fase de registro para un sísmo en que se señala mediante una flecha verde la lectura de polaridad (Figura 17).

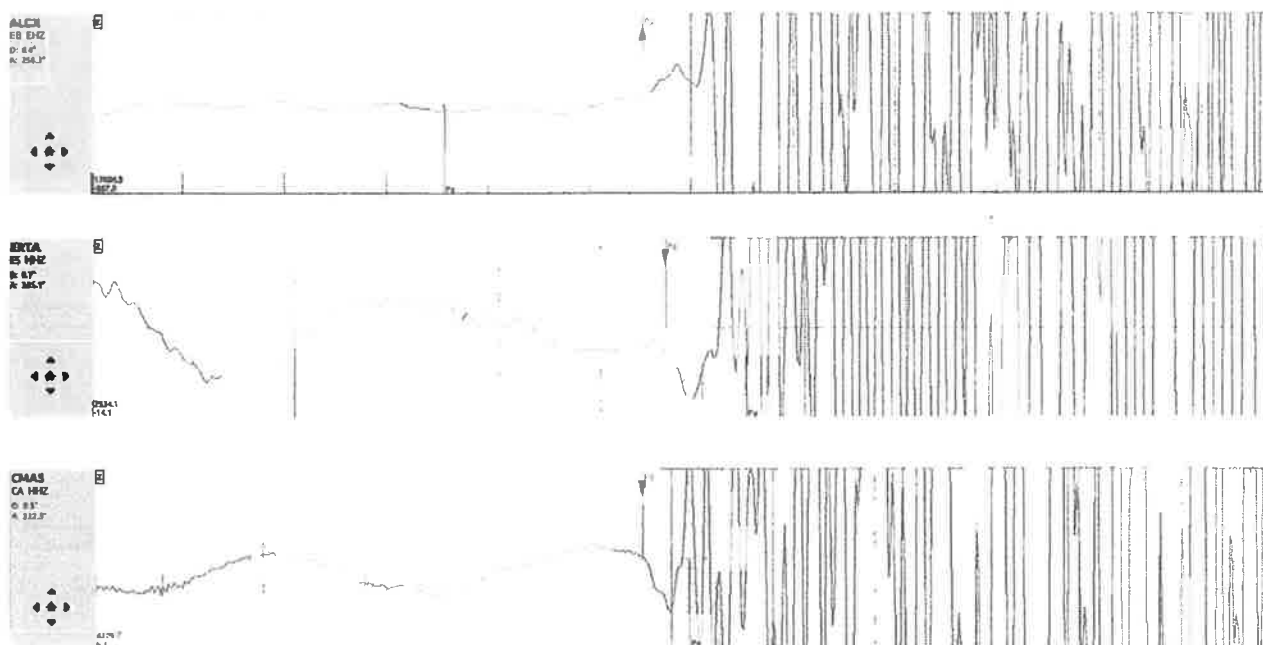


Figura 17. Primeras llegadas de onda correspondientes al sísmo de magnitud 3.0 del 13 de septiembre en las estaciones sísmicas de ALCX, CMAS y ERTA, indicando en la flecha verde el carácter impulsivo o compresivo de la primera llegada.

Se observan polaridades positivas en las estaciones CMOS, ALCX y CFON y polaridades negativas en las estaciones ERTA, CMAS, ALCN. Las polaridades son compatibles con un mecanismo parecido a los calculados para los terremotos mayores después de la inyección de gas. Este ejemplo corresponde a medida de la polaridad de la primera fase en el evento ocurrido el 2013/09/13 06:35:51 de M=3.0.

En todos los casos se observan polaridades en ambos sentidos. Existe demasiada ambigüedad como para deducirse a partir de estas polaridades el mecanismo focal del terremoto, especialmente en los eventos de menor magnitud. No obstante se propone un mecanismo focal compatible con las medidas de polaridad.



En la Tabla 6 se muestran las polaridades de los terremotos reseñados en la Tabla 5, con un sismo de 2012, tres sismos registrados durante la inyección de gas y cuatro sismos posteriores a la suspensión de los trabajos.

Tabla 5
Sismos en los que se ha podido determinar la distribución de polaridades

08/04/2012	3.3
10/09/2013	2.7
12/09/2013	2.7
13/09/2013	3.0
30/09/2013	4.0
01/10/2013	4.2
02/10/2013	4.1
02/10/2013	4.0

Tabla 6
Terremotos analizados mediante la polaridad de la primera fase

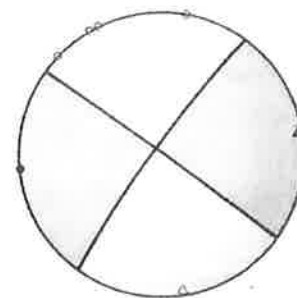
FECHA HORA (UTM) MAGNITUD	RELATIVO INYECCIÓN GAS	POLARIDADES PRIMERA FASE
---------------------------------	------------------------	-----------------------------

08/04/2012

11:58:44

M = 3.3

ANTERIOR

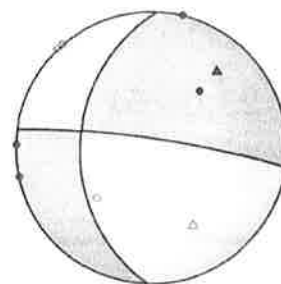


10/09/2013

04:43:15

M = 2.7

DURANTE

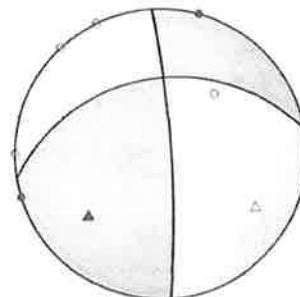


12/09/2013

02:40:50

M = 2.7

DURANTE

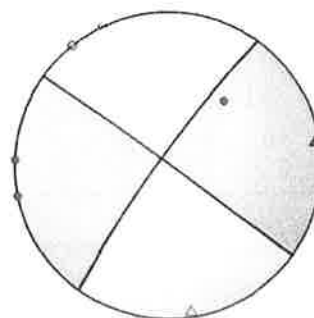


13/09/2013

06:35:51

M = 3.0

DURANTE

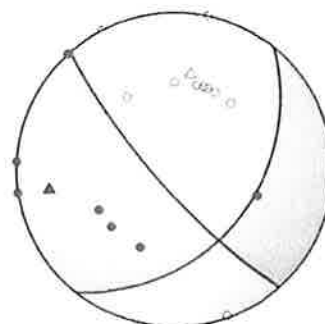


30/09/2013

02:21:19

M = 4.0

POSTERIOR

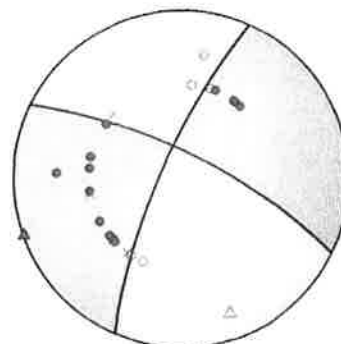


01/10/2013

03:32:47

M = 4.2

POSTERIOR

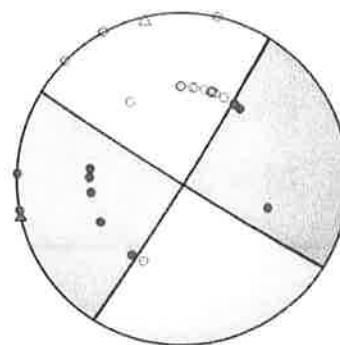


02/10/2013

23:06:51

M = 4.1

POSTERIOR

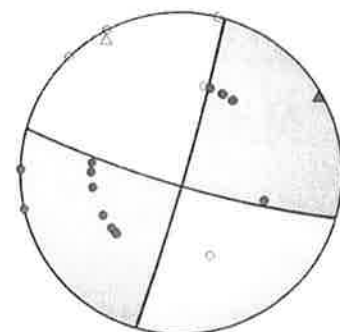


02/10/2013

23:29:29

M = 4.0

POSTERIOR



Los círculos verdes rellenos indican compresiones y los verdes huecos dilataciones. Es un mecanismo de cizalla y estos datos son compatibles con los calculados para los sismos mayores para los que sí se pudo calcular por los métodos anteriormente descritos. Los triángulos indican los ejes de presión. También se ha comprobado el método de polaridades con sismos posteriores al día 16 de septiembre obteniendo resultados compatibles con los mecanismos ya determinados por el método de sismogramas sintéticos.



5. CONCLUSIONES

Como resultado del análisis de todos los datos registrados, tanto en la Red Sísmica Nacional (IGN) como en otros centros, se concluye lo siguiente:

1.- Tras el análisis detallado del Tensor Momento Sísmico de los sismos de mayor magnitud, como resultado también de la relocalización epicentral de la serie mediante distintos procedimientos e inclusión de datos adicionales y diferentes modelos de velocidad de estructura cortical, y en compatibilidad con la distribución de polaridades de la onda P, todo indica que si tenemos en cuenta el buzamiento obtenido a través del cálculo de los mecanismos focales, éste no parece ser compatible con el de la denominada Falla de Amposta, tal como se describe en el Fichero de Fallas Activas del IGME. Se trataría de otra falla, no cartografiada, con buzamiento prácticamente vertical y trazas, bien en torno a $130^{\circ}\text{N(NW-SE)}$, o su conjugada de $40^{\circ}\text{N(NE-SW)}$. Entendemos que el estudio para identificar la falla que haya sido responsable de la sismicidad, debe ser labor muy especializada de geólogos con experiencia en sismotectónica. En España es habitual que las fallas responsables de terremotos, no rompan en superficie y se necesitan estudios específicos para identificarlas.

2.- Con el fin de discriminar el origen de los sismos, tanto de los registrados antes de la paralización de la inyección de gas (16 de septiembre), como de los producidos posteriormente, se ha hecho un análisis de comparación forma de onda y obtención de la proyección estereográfica de polaridades de la onda P. De los resultados obtenidos se deduce que todos los sismos registrados en la serie son de origen tectónico, consecuencia probablemente de esfuerzos almacenados previamente en una o varias fallas próximas.

3.- Teniendo en cuenta la sismicidad histórica e instrumental anterior al 5 de septiembre de 2013 y la peligrosidad sísmica natural de la zona, obtenida a partir de las estructuras geológicas activas conocidas, todo indica que el origen de la actual serie sísmica registrada tiene una relación directa con la inyección de gas del Proyecto Castor, sin perjuicio de que tal valoración se confirme con estudios geológicos que se pongan en relación con las características de la inyección.



4.- Sin perjuicio de estudios geológicos posteriores, todo indica que la sismicidad inducida es resultado de la actividad de inyección de gas que a su vez ha acelerado un proceso sismotectónico con acumulación de esfuerzos, ya existente en la zona, y que no estaba previamente caracterizado.

Madrid, 17 de diciembre de 2013

Emilio Carreño Herrero
Director de la Red
Sismica Nacional

Jose Manuel Martínez Solares
Jefe del Area de Geofísica

Juan Vicente Cantavella Nadal
Jefe de Servicio de la RSN



6. BIBLIOGRAFÍA

IGN, "Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012". CNIG. 2013

IGME " QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia". Versión On line: www.igme.es/infoigme/aplicaciones/QAFI/

James C. Pechwam, Walter, J. Arabas, Kris, L. Pankow and Reim Burlacu, "Seismological Report and the 6 Aug 2007. Crandall Canyon". *Seismological Research Letters*, V. 79, pp. 620-636. 2008.

McGarr, David Simpson and L. Seeber, "Case Histories of induced and triggered seismicity". International Handbook of Earthquake and Engineering seismology. V. 81A. 2002.

Neus Vidal, Josep Gallart and Juan José Dañobietia, "A deep seismic crustal transect from the NE Iberian Peninsula to the western Mediterranean". *Journal of Geophysical Research*. V. 103, B6, pp. 12.381-12.396. 1998.

Randi Keller, G. and Austin Holland, "Oklahoma Geological Survey", March 22, 2013.

The National Research Council, "Induced Seismicity Potential in Energy Technologies". The National Academic Press. P248. 2013

William L. Ellsworth, "Injection-Induced Earthquakes". *Science*, V.341, 12 July, 2013.



ANEXO

Relación de estaciones sísmicas que han intervenido en los análisis de la actividad

CODIGO	LOCALIZACIÓN	INSTITUCIÓN
ALCN	Alcanar (Castellón)	Observatorio del Ebro / Escal
ALCX	Alcalá de Xivert (Castellón)	Observatorio del Ebro / Escal
AETJ	Ermita Tres Juanes (Granada)	Instituto Andaluz Geofísica
ATE	Adette (Francia)	Observatoire Midi-Pyrénées. Francia
CFON	Fontmartina (Barcelona)	Institut Geològic Catalunya
CLLI	Llivia (Gerona)	Institut Geològic Catalunya
CMAS	Mas de Barberáns (Tarragona)	Institut Geològic Catalunya
COBS	Plataforma Casablanca	Institut Geològic Catalunya
CSOR	Soriguera (Lleida)	Institut Geològic Catalunya
EADA	Adamuz (Cordoba)	Instituto Geográfico Nacional
EAGO	Agolada (Pontevedra)	Instituto Geográfico Nacional
EALK	Alkurruntz (Navarra)	Instituto Geográfico Nacional
EARA	Aranguren (Navarra)	Instituto Geográfico Nacional
EARI	Arriondas (Asturias)	Instituto Geográfico Nacional
EBAD	Badajoz	Instituto Geográfico Nacional
EBEN2	Beniarda (Alicante)	Instituto Geográfico Nacional
EBER	Berja (Almeria)	Instituto Geográfico Nacional
ECAB	El Cabril (Córdoba)	Instituto Geográfico Nacional
ECAL	Calabor (Zamora)	Instituto Geográfico Nacional
ECHE	Chera (Valencia)	Instituto Geográfico Nacional
ECHI	Chisagues, Bielsa (Huesca)	Instituto Geográfico Nacional
EGOR	Sierra Gorda Loja (Granada)	Instituto Geográfico Nacional
EGRO	El Granado (Huelva)	Instituto Geográfico Nacional
EIBI	Ibiza (Baleares)	Instituto Geográfico Nacional
EJON	La Jonquera (Gerona)	Instituto Geográfico Nacional
ELAN	Lanestosa (Vizcaya)	Instituto Geográfico Nacional
ELGU	Los Guajares (Granada)	Instituto Geográfico Nacional
ELOB	Lobios (Ourense)	Instituto Geográfico Nacional
EMIJ	Mijas (Malaga)	Instituto Geográfico Nacional
EMIN	Mina Cpcion (Huelva)	Instituto Geográfico Nacional
EMIR	Miracle (Lleida)	Instituto Geográfico Nacional
EMOS	Mosqueruela (Teruel)	Instituto Geográfico Nacional
EMUR	La Murta (Murcia)	Instituto Geográfico Nacional
ENIJ	Níjar (Almería)	Instituto Geográfico Nacional
EORO	Oroz-Betelu (Navarra)	Instituto Geográfico Nacional
EPLA	Plasencia (Cáceres)	Instituto Geográfico Nacional
EPOB	Poblet (Tarragona)	Instituto Geográfico Nacional
EPON	Pontenova (Lugo)	Instituto Geográfico Nacional



EQES	Quesada (Jaen)	Instituto Geográfico Nacional
EQTA	Quentar (Granada)	Instituto Geográfico Nacional
ERTA	Horta de S.Juan (Tarragona)	Instituto Geográfico Nacional
ESAC	S.Caprasio (Zaragoza)	Instituto Geográfico Nacional
ESDC	SONSECA (Toledo)	Instituto Geográfico Nacional
ESPR	Espera (Sevilla)	Instituto Geográfico Nacional
ETOB	Tobarra. (Albacete)	Instituto Geográfico Nacional
ETOS	Mallorca (Balears)	Instituto Geográfico Nacional
ETRV	Los Montesinos (Alicante)	Instituto Geográfico Nacional
E0201	Torreperogil (Jaen)	Instituto Geográfico Nacional
E0301	Islas Columbretes	Instituto Geográfico Nacional
GORA	Gorafe (Granada)	Instituto Andaluz Geofísica
GUD	Guadarrama (Madrid)	Instituto Geográfico Nacional
IZUN	Zunzarren (Navarra)	Instituto Geográfico Nacional
MVO	Moncorvo (Portugal)	Instituto Portugués do Mar e da Atmosfera
PAB	S.Pablo (Toledo)	Instituto Geográfico Nacional
RETOR	Torete (Guadalajara)	Instituto Geográfico Nacional
SESP	Santiago Espada (Jaen)	Instituto Andaluz Geofísica
SJAF	Saint Jean de L'Alberes (Francia)	Observatoire Midi-Pyrénées. Francia
TLOR	Lorca (Murcia)	Instituto Geográfico Nacional
VAN2	Vandellós II (Tarragona)	Endesa - Iberdrola