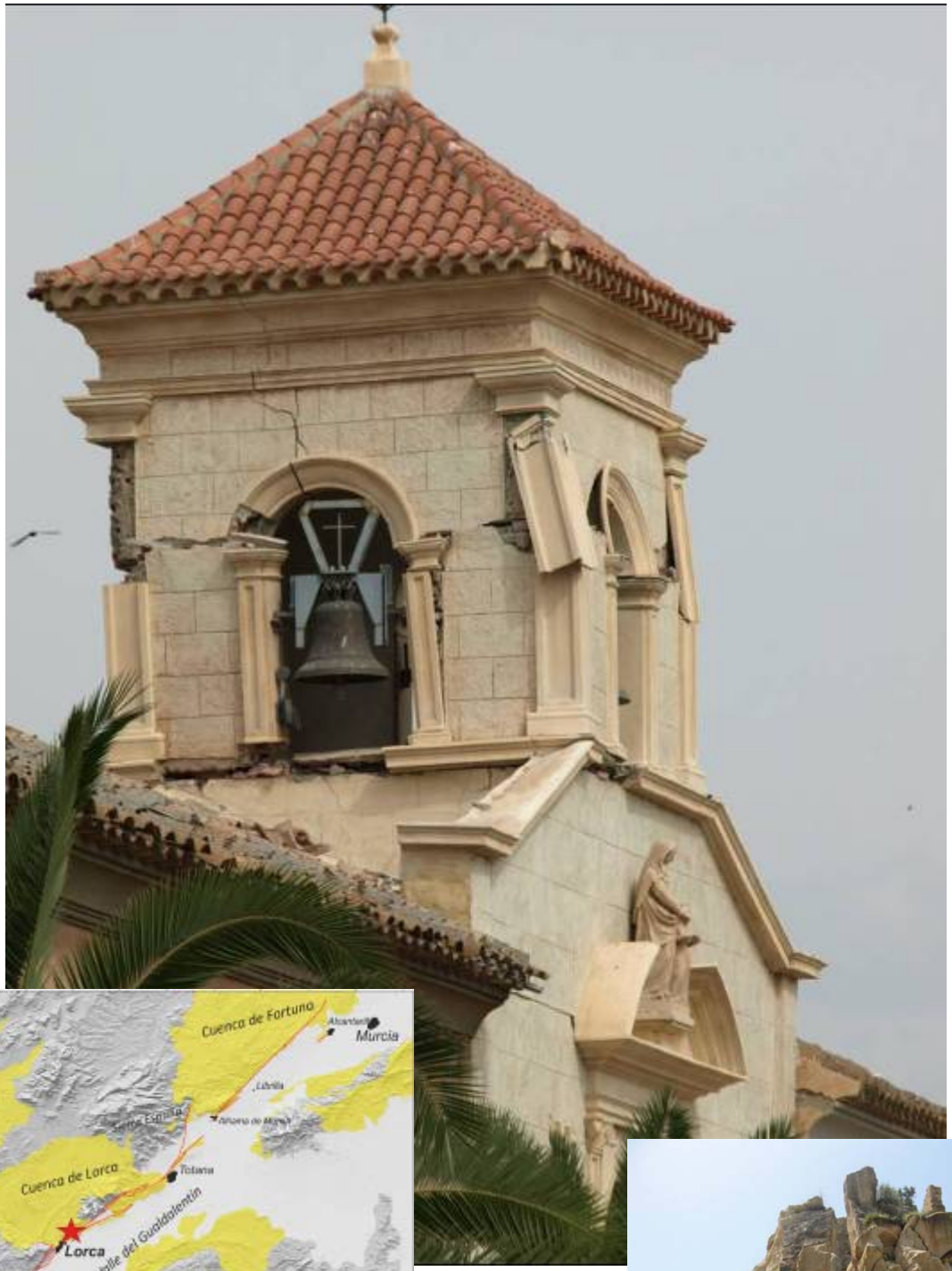
MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Instituto Geológico
y Minero de España

Fecha: 20 de mayo de 2011

INFORME GEOLÓGICO PRELIMINAR DEL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DEL AÑO 2011, 5.1 M_w



CRÉDITOS:
Elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Grupo de Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos Asociados de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC).
José Jesús Martínez Díaz; Miguel Ángel Rodríguez-Pascua; Raúl Pérez López; Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles; Fidel Martín-González; Martín Rodríguez Peces; Jose Antonio Álvarez Gómez; Juan Miguel Insua Arévalo.

Registro de derechos de Autor:
Esta obra está bajo una licencia de *Creative Commons*
Reconocimiento - NoComercial - CompartirIgual (by-nc-sa) 3.0 España
(http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/)

Depósito Legal: M-23569-2011

Índice

1. **Motivación de este informe y agradecimientos**
José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)……4

2. **Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y análisis de la fuente geológica del terremoto**
José J. Martínez Díaz (UCM); José A. Álvarez Gómez……5

2.1. Caracterízación sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y sus eventos principales, MW 4.5 y MW 5.1 del 11/05/2011.
2.2. Análisis de la fuente geológica del terremoto: ¿La falla de Alhama de Murcia?.

3. **Reconocimiento geológico de la zona epicentral y de la Falla de Alhama de Murcia (FAM)**
J. J. Martínez-Díaz (UCM); F. Martín-González (URJC); R. Pérez López (IGME); M. A. Rodríguez-Pascua (IGME); J.García Mayordomo (IGME); M.Rodríguez Peces (UCM) ……15

4. **Inestabilidades del Terreno producidas por los terremotos de Lorca del 11 de Mayo de 2011**
Julián García Mayordomo (IGME); Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM). ……19

5. **Estudio de daños en edificaciones históricas mediante técnicas de análisis estructural geológico. Aplicaciones a la arqueosismología.**
Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Jorge Luis Giner Robles (UAM); Raúl Pérez López (IGME); Fidel Martín-González (URJC) ……..30

6. **Conclusiones preliminares**
José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM). ……43

7. **Bibliografía principal** *……...44*

Anexo 1: Breve reseña sobre la Peligrosidad Sísmica en la Zona
Julián García Mayordomo (IGME) ……45

1. Motivación de este informe y agradecimientos

Con motivo de la ocurrencia de un terremoto catastrófico el 11 de mayo de 2011 de magnitud Mw 5.1, a las 18:47 (hora local), presentamos a continuación un informe geológico preliminar de urgencia. Consta de una descripción de los primeros datos geológicos relacionados con la posible fuente geológica del terremoto, sus características sismotectónicas, y sus efectos superficiales, tanto los relacionados con los daños en edificaciones como con efecto geológicos superficiales. Pocas horas después del evento se desplazó a la zona un grupo de especialistas en geología de terremotos de varias instituciones: Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Grupo de Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos Asociados de la UCM (UCM), Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJC), con el fin de recabar todos aquellos datos, tanto de daños como de posibles efectos geológicos superficiales que por su carácter efímero pudieran desaparecen en pocos días tras el evento. Para la realización de este informe se han utilizado los datos obtenidos durante los cuatro días que duró esta campaña de emergencia, así como datos sísmicos del Instituto Geográfico Nacional y datos geológicos de trabajos previos. Los resultados e interpretaciones presentadas son preliminares y responden al análisis de las evidencias con que se cuenta a día de hoy durante la redacción de este informe.

Agradecemos a la Red Sísmica Nacional, del Instituto Geográfico Nacional, el habernos proporcionado los datos sísmicos que se presentan en este informe. En especial a su director Emilio Carreño, a Juan Rueda por poner a disposición del público los mecanismos focales de los eventos principales y a Resurrección Antón por proporcionarnos los parámetros detallados de los eventos.

En los próximos meses se presentará un informe completo de toda la información recopilada durante la campaña de campo de emergencia, con todo el tratamiento y análisis de los datos y las conclusiones extraídas de los mismos.

2. Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y análisis de la fuente geológica del terremoto

José J. Martínez Díaz (UCM)
José A. Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM)

2.1. Caracterización sismotectónica de la serie sísmica de Lorca y sus eventos principales, MW 4.5 y MW 5.1 del 11/05/2011.

Se presenta una caracterización inicial de la serie sísmica iniciada el 11 de Mayo de 2011 con los datos sísmicos del Instituto Geográfico Nacional hasta el 17 de Mayo de 2011. Además se realiza una interpretación preliminar de la relación con la tectónica de la zona.

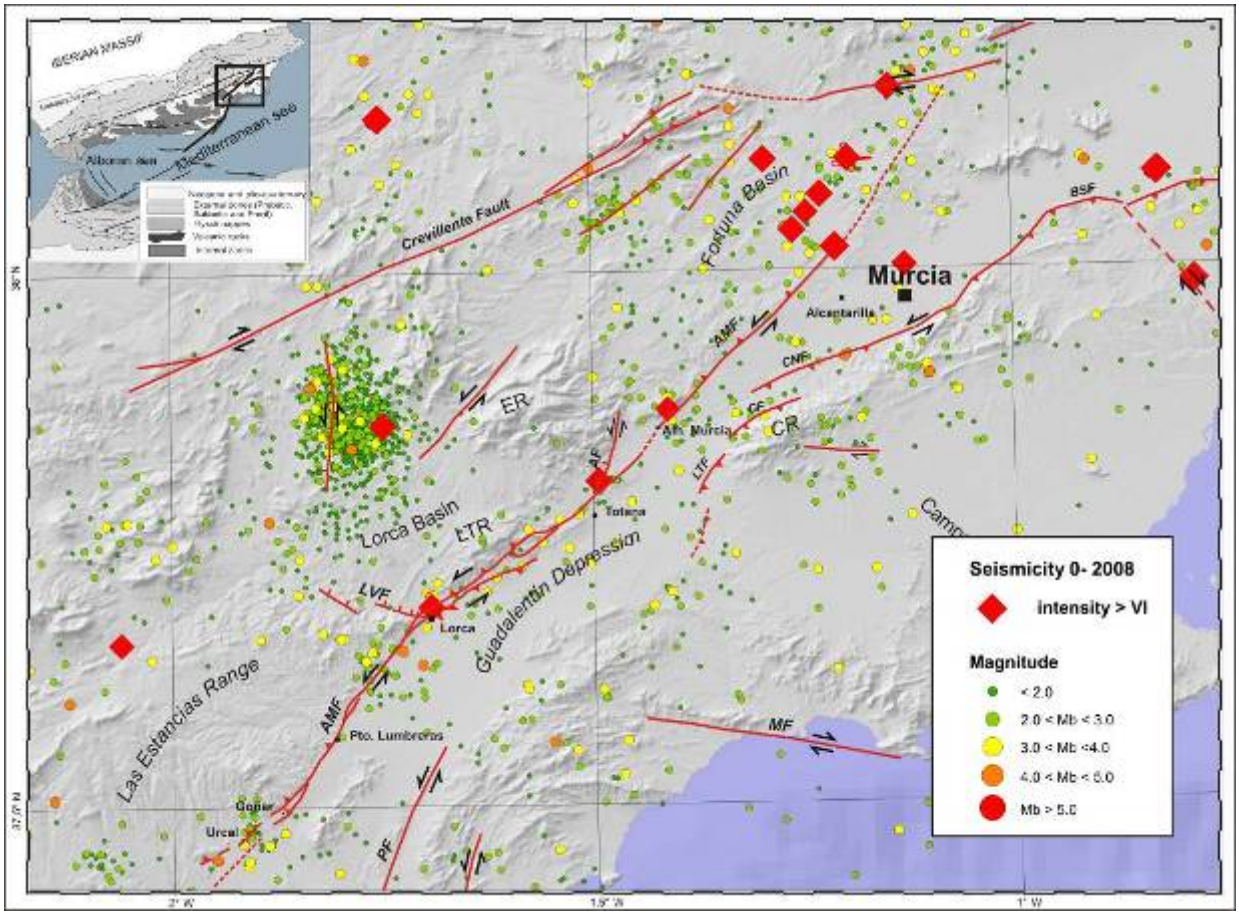


Figura 2.1: Mapa de la sismicidad ocurrida en la zona hasta el año 2008. Los rombos rojos indican la posición de terremotos históricos destructores. Los círculos muestran los epicentros de los sismos con el color en función de la magnitud del evento. Las lineas rojas muestran las trazas de las principales fallas activas.

La región de Murcia es conocida desde hace tiempo como una de las zonas con más actividad sísmica de España. Históricamente ha sufrido una buena cantidad de eventos dañinos (Figura 2.1), muchos de ellos asociados de alguna manera a la zona de Falla de Alhama de Murcia. Como puede observarse en la Figura 2.1 cerca de la ciudad de Lorca ya hay registrado un evento destructivo, así como en las cercanías de las localidades de Totana

o Alhama de Murcia. En época más reciente cabe destacar la serie sísmica de La Paca – Aviles – Zarcilla de Ramos; en el año 2005, con un evento de magnitud inferior al reciente de Lorca, pero también causando daños de importancia y con una serie de réplicas intensa (agrupación de eventos verdes al sur de la Falla de Crevillente y al norte de la Cuenca de Lorca (Lorca Basin).

El 11 de Mayo de 2011 a las 15:05 se produjo un evento sísmico con magnitud M_W 4.5. Este evento es seguido por una pequeña serie de réplicas de magnitudes inferiores a mb_{Lg} 2.5 (6 temblores) y un evento sísmico mayor, de magnitud M_W 5.1 a las 16:47. Tras este evento mayor se han producido hasta el día 17 de Mayo, 103 réplicas con magnitudes entre m_{bLg} 0.4 y M_W 3.9. Esta diferencia de uso de magnitud se debe a que a partir de la magnitud 3.5 se calculan los mecanismos focales de los eventos obteniéndose su magnitud momento (M_W). En la Figura 2.2 se muestra el mapa de la distribución epicentral de los eventos así como su evolución temporal.

Los dos eventos principales se sitúan muy cerca el uno del otro, aproximadamente sobre la traza de la rama norte Falla de Alhama de Murcia (FAM). La mayor parte de las réplicas sin embargo se concentran hacia el sureste de esta zona. Esta diferencia podría deberse a varios motivos. Podría deberse a un error sistemático en la localización, que se subsanaría con un procesado de relocalización y la instalación de una red local auxiliar temporal para mejorar la localización de futuras réplicas. Podría deberse también a que las roturas que produjeron los eventos principales no ocurrieran en la FAM sino en una falla de dirección NO-SE y por lo tanto las réplicas representar la continuación hacia el sur de esta estructura. O bien podría deberse a la inexistencia de réplicas sobre el plano de falla y a la generación de réplicas fuera de falla en una zona de aumento de esfuerzos estáticos de Coulomb.

En el gráfico de evolución temporal de la Figura 2.2 puede apreciarse como la ocurrencia de réplicas no se ha producido de manera más o menos continua, o gradual, si no que se ha dado en agrupaciones de eventos, gran parte de estas teniendo lugar entre las 21:00 horas de la noche y las 06:00 de la mañana. De especial relevancia es la serie ocurrida la noche del 14 al 15 de mayo, en la que se dieron más de 30 réplicas. También es de destacar que las réplicas han disminuido enormemente su frecuencia en los días posteriores a la serie mencionada.

En la Figura 2.3 se muestran las elipses de error proporcionadas por el IGN para los eventos con magnitudes superiores a 1.5; por ser su localización más representativa. Las elipses se han sombreado de manera que la superposición de ellas da lugar a áreas más oscuras. Como puede verse todas las elipses presentan una orientación N150ºE, aproximadamente perpendicular a la FAM. Tienden a solaparse con mayor frecuencia cerca de la FAM, al sureste de esta, zona donde se produjo la principal réplica de M_W 3.9 (Figura 1 - 11/05/2011 20:37). Esto muestra cómo la calidad de localización es mejor en dirección NE-SO que en la dirección NO-SE, donde hay un margen de error de localización de hasta más de 10 km en algunos casos.

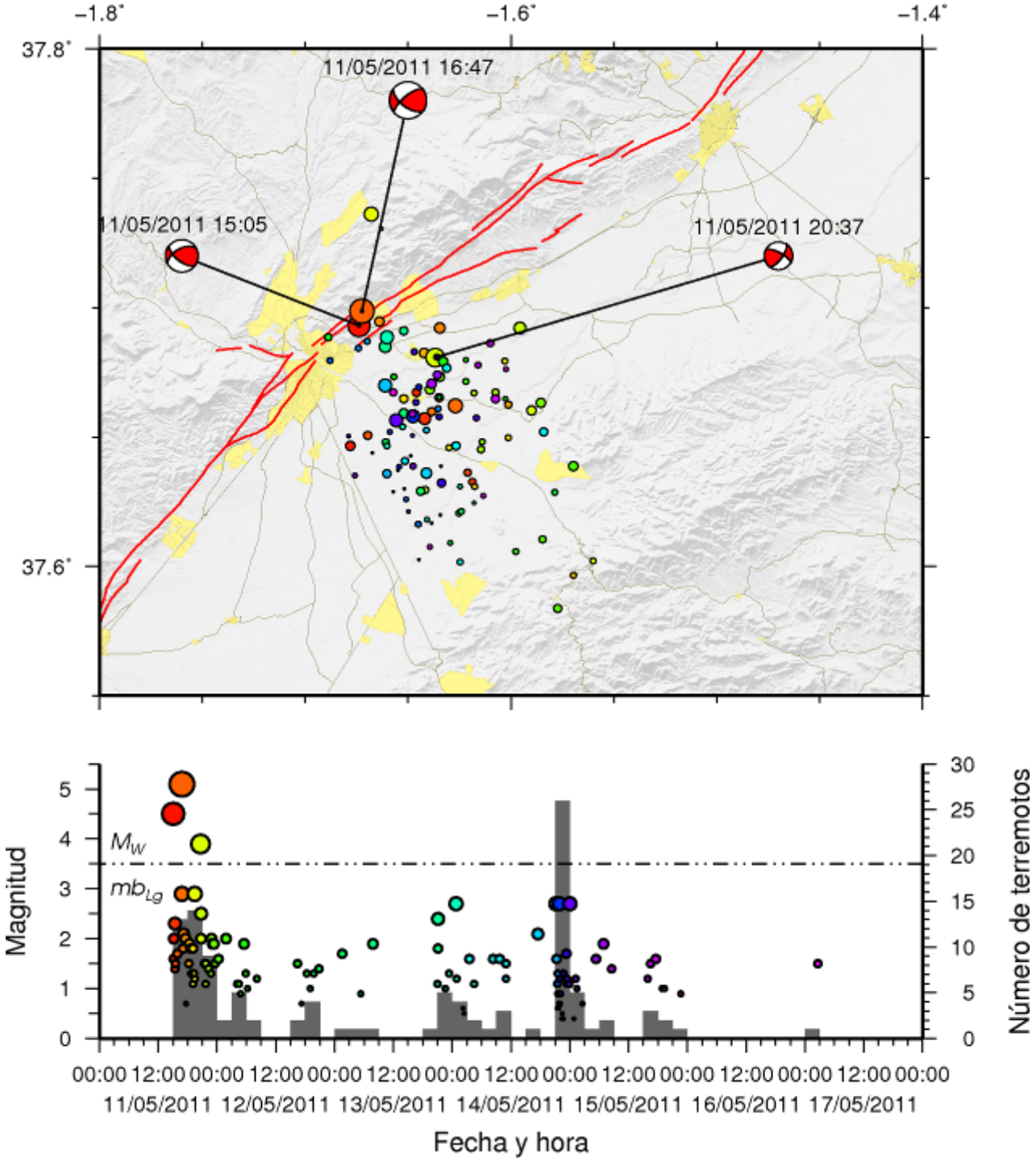


Figura 2.2. Mapa mostrando la serie sísmica. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud del evento. El color es función de su posición en la serie como se muestra en la gráfica inferior de evolución temporal. Los mecanismos focales de los eventos principales muestran las características del movimiento de la rotura, en este caso fallas de desgarre con componente inversa. En línea roja se muestran las trazas de las principales estructuras activas. El gráfico inferior muestra la evolución temporal de la serie. Los círculos representan cada evento con el tamaño proporcional a la magnitud (eje Y de la izquierda), su color es función de su posición en la serie. Las barras grises muestran la cantidad de eventos en intervalos de 3 horas. Es destacable el pico de actividad de la noche del 14 al 15 de Mayo. La línea discontinua muestra el umbral a partir del cual las magnitudes están expresadas como M_W en lugar de como m_{bLg}. El número de eventos se refiere al diagrama de barras.

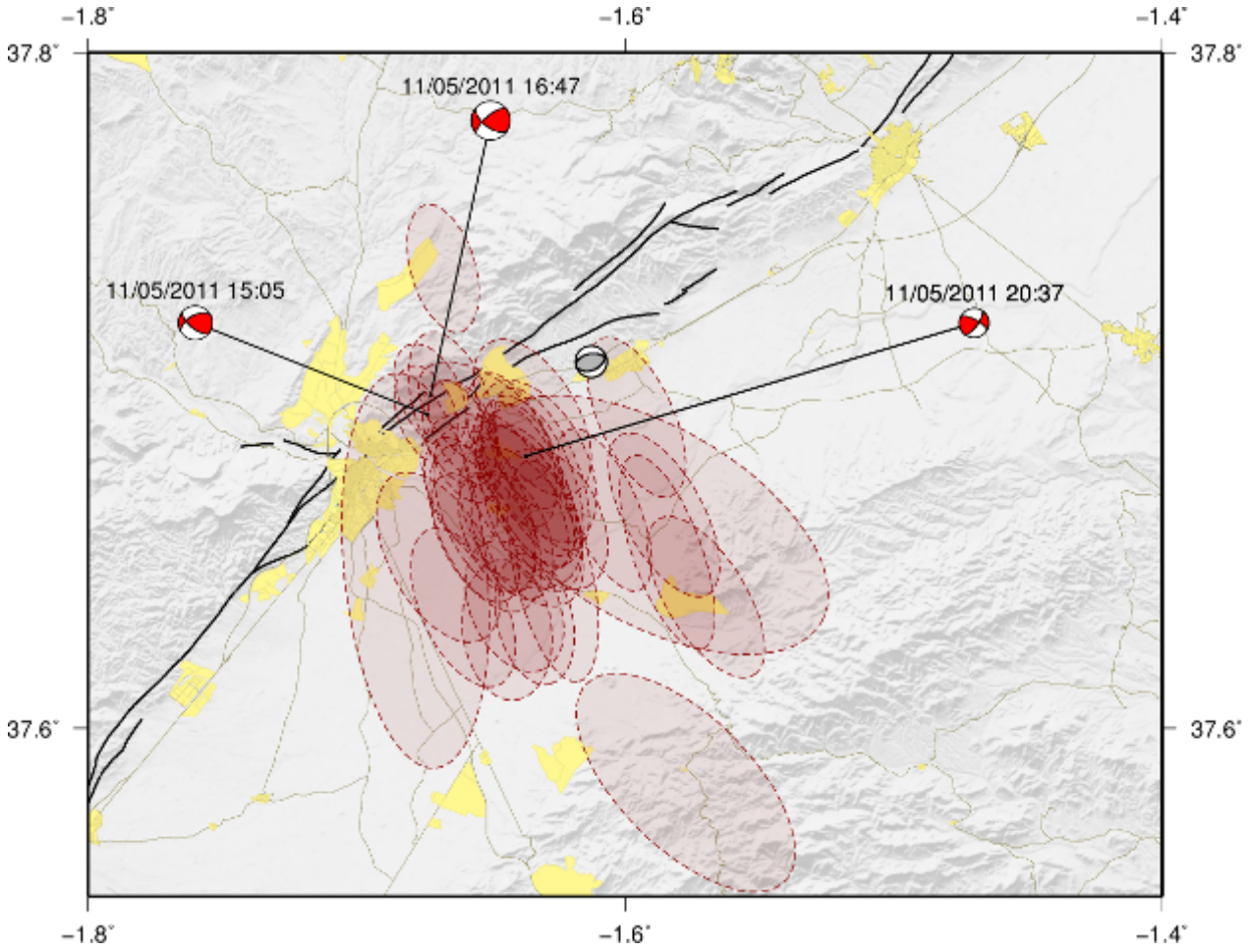


Figura 2.3. Mapa de elipses de error de la localización de los eventos de la serie sísmica con magnitud superior a m_{bLg} 1.5. Los mecanismos focales sombreados en rojo corresponden a los tres eventos principales de la serie ocurridos el 11/05/2011, el mecanismo focal gris corresponde a un evento producido el 08/03/2006.

De manera preliminar se ha realizado también un análisis de transferencia de esfuerzos de Coulomb. Esta metodología analiza el grado de influencia del movimiento de una falla sobre las fallas del entorno. En función de la dirección de las fallas y de su posición con respecto a la falla generadora del terremoto, estas fallas del entorno pueden ver incrementada su probabilidad de rotura (de generación de un sismo) o bien disminuida. En las Figuras 2.4 y 2.5 se muestran estos análisis. Los colores rojos implican una variación positiva del esfuerzo de Coulomb, es decir, se ha aumentado la probabilidad de ocurrencia de un evento en estas áreas. Los colores azules por el contrario muestran zonas donde el esfuerzo ha disminuido de manera que es menor la probabilidad de ocurrencia de sismos. Sin embargo hay que tener en cuenta que estos cálculos se hacen sobre planos de falla determinados y que el aumento de esfuerzos en un tipo de planos, por ejemplo de dirección N-S, no excluye que en otros planos, por ejemplo de dirección E-O, pueda ocurrir un descenso de esfuerzos.

En la Figura 2.4 hemos calculado la variación de esfuerzos producida por el terremoto principal de magnitud M_W 5.1 asumiendo que el plano responsable de la rotura es el NE-SO,

sobre planos de falla de la misma dirección y buzamiento, es decir, el tipo de plano de la FAM. En la figura 2.5 hemos hecho el mismo cálculo pero asumiendo el plano NO-SE como generador del terremoto. Independientemente de cual de los dos planos sea el responsable del evento la variación de esfuerzos de Coulomb sobre el plano de falla de la FAM es prácticamente el mismo. Existen dos lóbulos de aumento de esfuerzos sobre los extremos de los segmentos Puerto Lumbreras – Lorca (al sur) y Lorca – Totana (al norte) y otros dos lóbulos ortogonales. Sobre el lóbulo sur de estos últimos se está desarrollando principalmente la serie de réplicas. El que dos lóbulos de aumento de esfuerzos se produzcan sobre extremos de la FAM implica que la probabilidad de generación de un nuevo evento en esta falla ha aumentado. Estos resultados deberían ser refinados una vez que se conozca mejor el plano de rotura causante del evento.

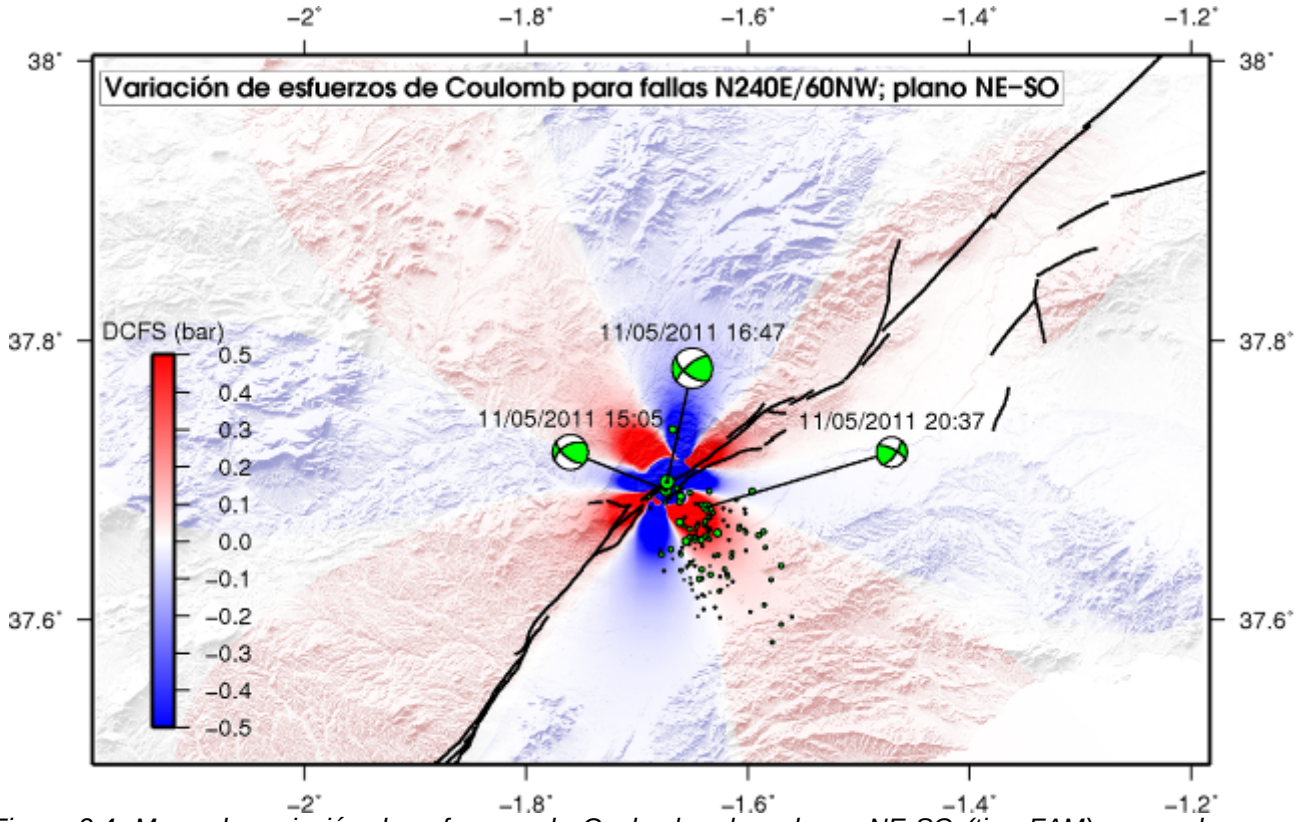


Figura 2.4: Mapa de variación de esfuerzos de Coulomb sobre planos NE-SO (tipo FAM) generados por el plano NE-SO del mecanismo focal del evento principal de la serie. Los colores indican la variación de esfuerzos (representada en la escala de colores). Los colores rojos indican un aumento de la probabilidad de generación de nuevos eventos.

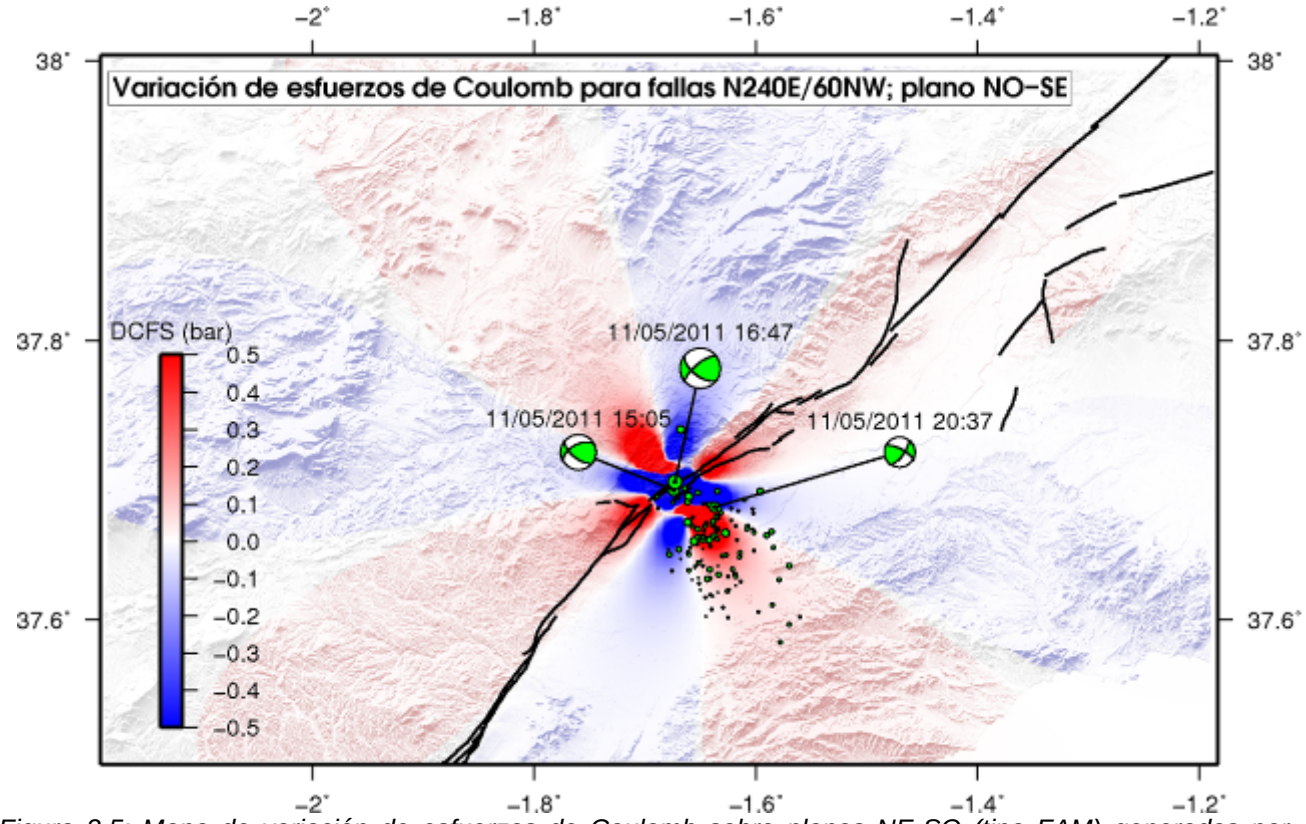


Figura 2.5: Mapa de variación de esfuerzos de Coulomb sobre planos NE-SO (tipo FAM) generados por el plano NO-SE del mecanismo focal del evento principal de la serie. Los colores indican la variación de esfuerzos (representada en la escala de colores). Los colores rojos indican un aumento de la probabilidad de generación de nuevos eventos.

2.2. Análisis de la fuente geológica del terremoto: ¿La falla de Alhama de Murcia?.

La posición de los epicentros del terremoto principal de magnitud Mw 5.1 así como del terremoto de magnitud Mw 4.5 ocurrido aproximadamente 2 horas antes, coinciden espacialmente con la localización de la traza de la Falla de Alhama de Murcia (FAM) a unos 2 km al noreste de la ciudad de Lorca (Figura 2.6). La FAM fue descrita por primera vez por Bousquet et al. (1979) y ha sido objeto de numerosos trabajos de carácter estructural, neotectónico, sismotectónico y paleosísmico en los que se evidencia su carácter activo y su alto potencial sismogenético. Se trata de una falla de desgarre sinestral con una componente inversa que varía de unos segmentos a otros de la falla; la FAM se extiende a lo largo del borde NO de la depresión del Guadalentín, desde las proximidades de Alcantarilla hasta los alrededores de Góñar en Almería alcanzando una longitud total de al menos 85 kms. La falla se encuentra segmentada en varios tramos con direcciones algo distintas y estructura interna de la zona de cizalla que de complejidad variable (Figura 2.7).

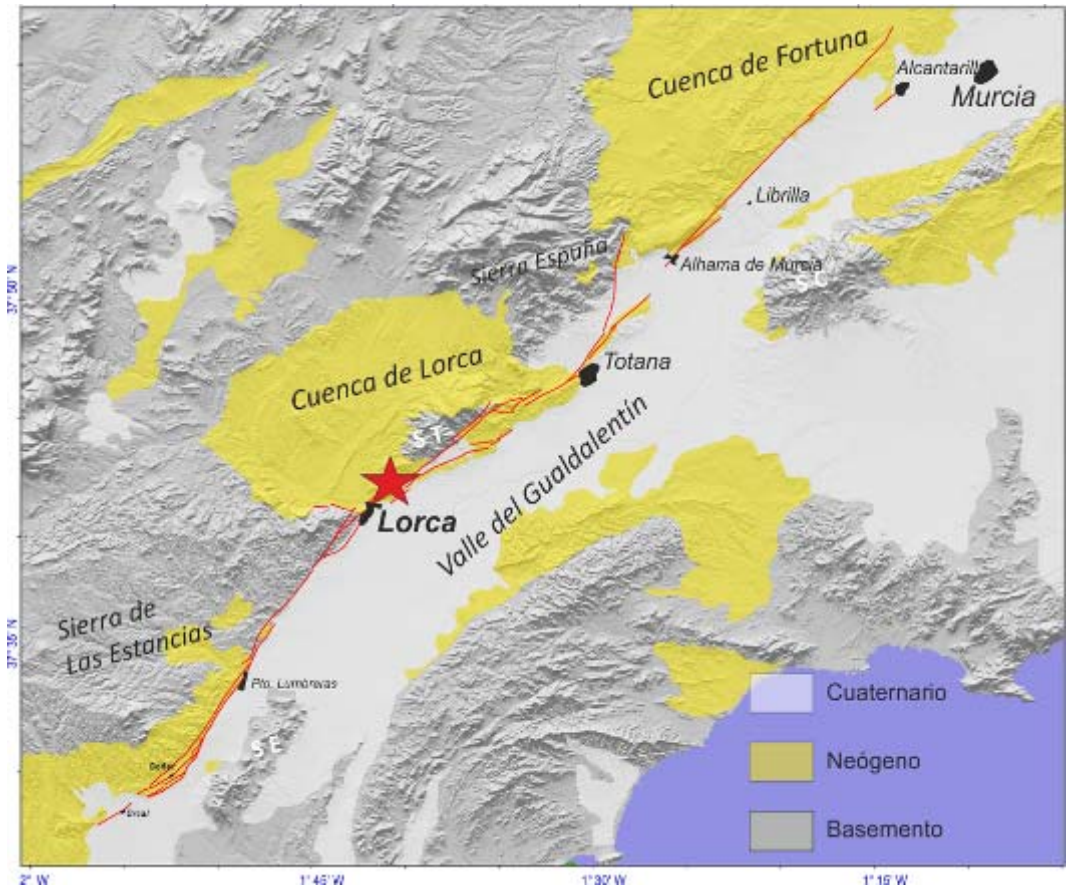


Figura 2.6: Cartografía de la traza de la Falla de Alhama de Murcia. La estrella indica la posición del epicentro del terremoto de magnitud Mw 5.1.

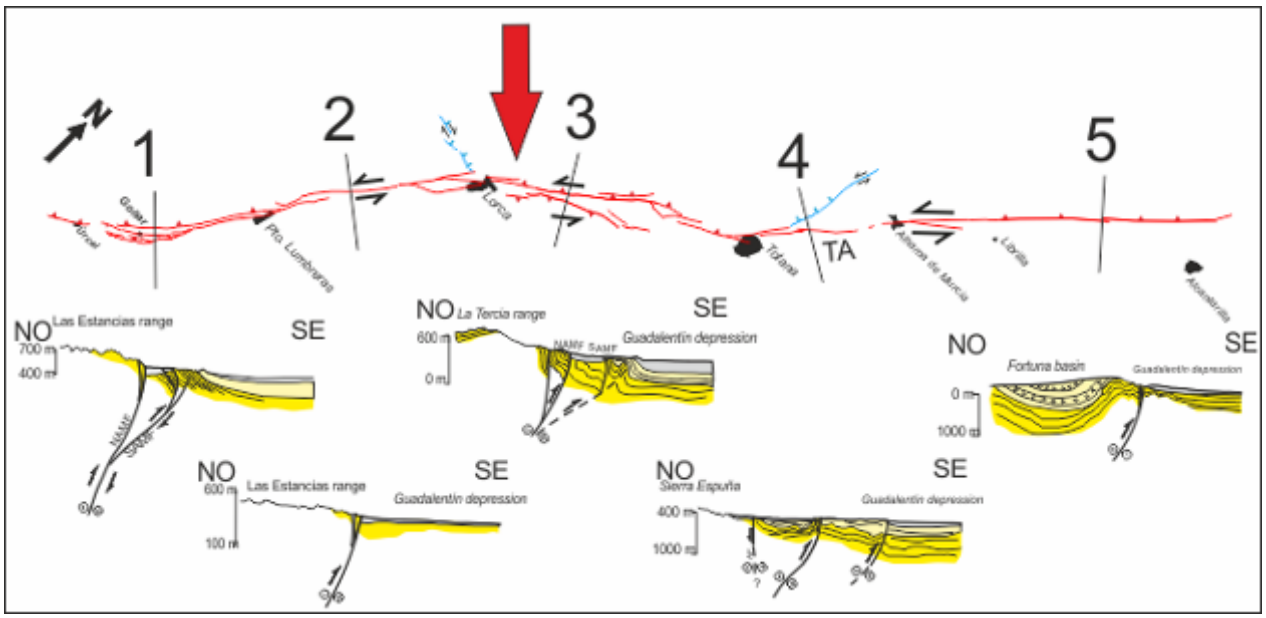


Figura 2.7: Estructura segmentada de la Falla de Alhama de Murcia tomada de Martínez-Díaz et al. (2010). La flecha roja marca la posición del epicentro del terremoto de 5.1 que se localiza en la terminación CO del segmento Lorca-Totana. En la parte inferior se muestra la estructura de la falla en profundidad interpretada a partir de datos geológicos de superficie en varias secciones a lo largo de la falla.

A una escala más local los epicentros de los dos terremotos de mayor magnitud parecen relacionados a una zona donde la FAM presenta una estructura algo compleja (Figura 2.8), con dos ramas principales de buzamientos opuestos en superficie: El Corredor Norte de Lorca con buzamiento hacia el norte, y el Corredor Sur de Lorca con buzamiento hacia el sur. Las elipses de error calculadas por el Instituto Geográfico Nacional indican que los epicentros podrían localizarse en cualquiera de las dos ramas, si bien parece más probable su localización asociada a al Corredor Norte. Este corredor está formado por una estructura de dúplex de desgarre compresivo formado a su vez por dos ramas paralelas muy próximas en superficie y cuyas trazas pasarían una por debajo de la casco urbano de Lorca y otra por el flanco NO del cerro del Castillo de Lorca (ver figura 2.9). En todo caso la estructura de la falla a su paso por Lorca es bastante compleja, sufre un ligero cambio de dirección y podrían existir varias ramas activas de la falla en el sustrato del casco urbano.

Por otra parte, la geometría y cinemática de uno de los dos planos de los dos mecanismos focales (plano NE-SO con buzamiento alto hacia el NO) presenta clara coincidencia con las dos fallas que forman el dúplex citado que además tienen un movimiento de desgarre sinestral con componente inversa, también coherente con los mecanismos.

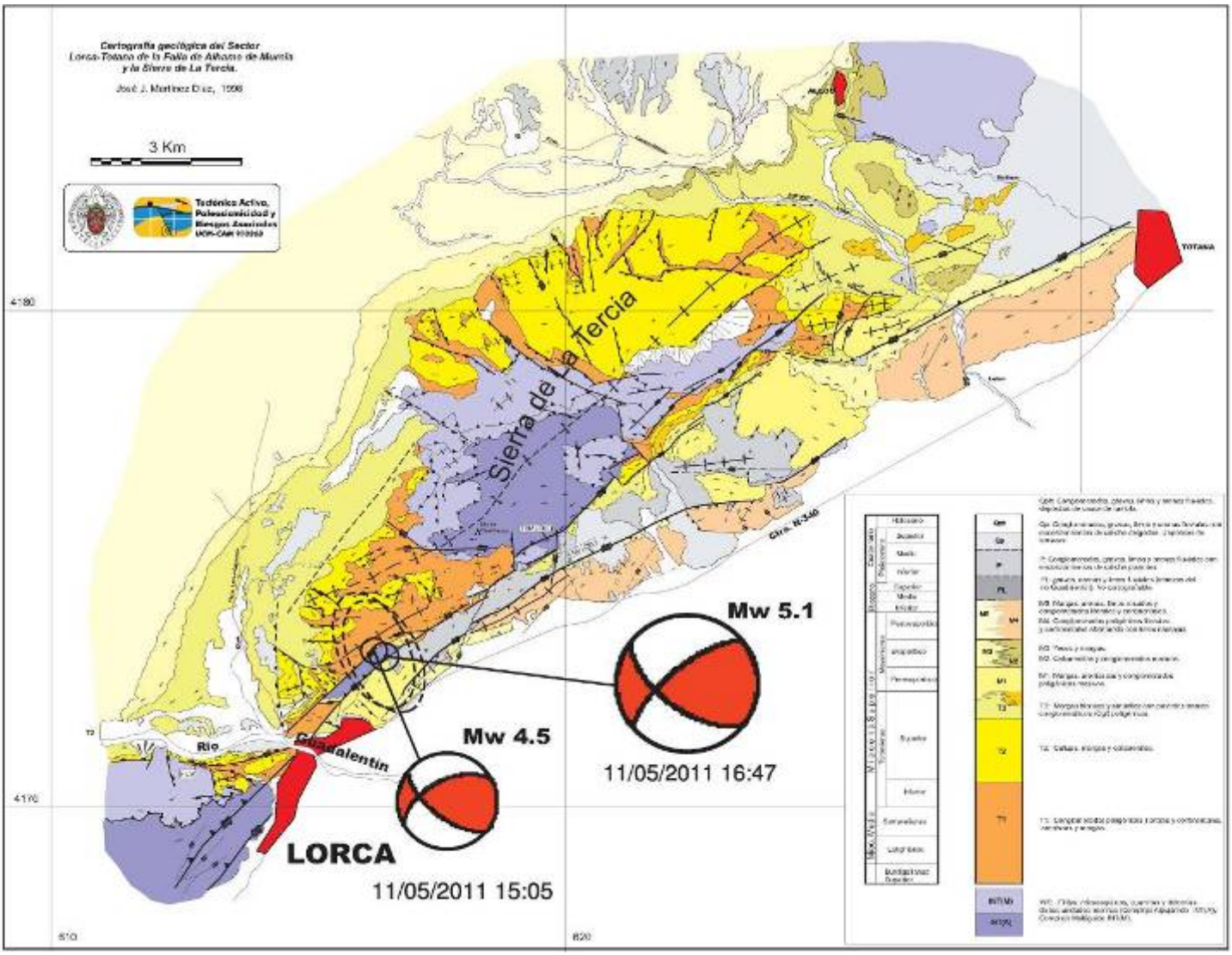


Figura 2.8: Mapa geológico del sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia sobre el que se han proyectado los epicentros de los dos terremotos mayores de la serie sísmica, sus elipses de error y los mecanismo focales calculados por el Instituto Geográfico Nacional. La cartografía geológica está tomada de Martínez-Díaz (1998).

Figura 2.9: Vista panorámica de la ciudad de Lorca tomada desde la zona del epicentro. Las trazas rojas muestran la posición de las trazas principales de la FAM a su paso por Lorca. Las dos fallas que se dirigen hacia el pueblo forman el dúplex de desgarre que forman un bloque de rocas de basamento metamórficas levantadas por un régimen transpresivo y rodeadas por rocas sedimentarias miocenas. Se han marcado como referencia varios puntos singurales de la ciudad.

Incertidumbres en la interpretación de la fuente

Si bien el análisis de la geología de superficie y la posición de los epicentros apuntan claramente a la FAM como la responsable del terremoto destructivo, la posición de la mayoría de las réplicas situadas al sur de los epicentros en el interior del valle del Guadalentín no encajaría con esta interpretación. Una posible explicación sería que las réplicas responden a la reactivación de fallas menores situadas en el interior del valle alejadas de la FAM, de manera que aun no se han producido réplicas rodeando la zona de ruptura en la FAM. Otra posibilidad es la existencia de cierto error de localización debido a la baja magnitud de las réplicas. Una tercera posibilidad sería que la falla responsable no fuera la FAM sino una falla de dirección NO-SE que se internase en el valle. El número de observaciones y la calidad de las mismas a la hora de localizad los dos terremotos principales (reflejada en sus elipses de error) hace menos propable esta tercera posibilidad.

En todo caso se hace necesario realizar una relocalización de las réplicas y un afinado en la localización de los epicentros e hipocentros de los eventos principales para poder realizar una interpretación definitiva.

3. Reconocimiento geológico de la zona epicentral y de la Falla de Alhama de Murcia (FAM)

J. J. Martínez-Díaz (UCM)
F. Martín-González (URJC)
R. Pérez López (IGME)
M. A. Rodríguez-Pascua (IGME)
J.García Mayordomo (IGME)
M.Rodríguez Peces (UCM)

La poca profundidad hipocentral (2 km) calculada por el Instituto Geográfico Nacional para el terremoto destructivo de magnitud Mw 5.1 que es coherente con la gran intensidad de los daños, eleva las posibilidades de que la ruptura a lo largo de la Falla de Alhama de Murcia hubiera alcanzado la superficie. Teniendo en cuenta la magnitud del terremoto y suponiendo una rotura muy superficial como la calculada por el IGN, el desplazamiento no habría podido superar unos pocos centímetros por ello se realizaron durante los tres días siguientes al sismo recorridos de campo por la zona epicentral y a lo largo de la traza de la FAM, prestando especial atención en estructuras y elementos artificiales como firmes carreteras, pistas prensadas o vallados de hormigón en los que pudieran quedar preservados pequeños desplazamientos centimétricos asociados a la ruptura en la falla. Se presenta en este trabajo una síntesis del reconocimiento de campo llevado a cabo.

En la ciudad de Lorca se ha recorrido la rambla del río Guadalentín a su paso por la ciudad que se encuentra encauzada por dos muros de mampostería de más de 6 m y un canal de cemento. Esta rambla se encuentra sobre el corredor sur de la Falla de Alhama, comportándose como un posible marcador (Fig. 3.1). La orientación de los muros es N113º E en el tramo más occidental y N140º E en el más oriental. El recorrido ha sido de 600m por ambos márgenes y no se ha encontrado desplazamiento asociado a ruptura con desplazamiento. Las numerosas grietas no presentan desplazamientos ni son penetrativas a todo lo largo del muro, ni se pueden continuar en el lecho de la rambla. Es de destacar que el muro norte (Fig. 3.2) presenta más grietas y desconchones que el muro sur que apenas presenta grietas.

Fig. 3.1 muro de la rambla del rio Guadalentín a su paso por Lorca, usado como marcador.

Fig. 3.2. Muro norte de la rambla del río Guadalentin.

En la zona epicentral calculada por el IGN y situada a unos 2 km al NNE de Lorca se ha realizado un reconocimiento a lo largo de la Falla de Alhama tanto en el Corredor Sur como en el Corredor Norte. Se ha recorrido en el antiguo campo de tiro (37°41'54"N, 1°40'7"W) muy próximo al epicentro, se recorrió el muro de hormigón de una valla de dirección N 120º y longitud 160 m, que atraviesa completamente la falla sur del dúplex citado arriba como marcador del posible desplazamiento (Fig 3.3). El muro se encuentra intacto sin rotura asociada a un desplazamiento de la falla con cinemática sinestral. De igual manera se ha recorrido la zona epidentral en las coordenadas (37°41'42"N 1°40'49"W) al oeste del epicentro calculado por el IGN, recorriendo varias pistas de tierra, así como la rambla de Las Canales que cruzan las dos fallas de la estructura duplex. No se ha observado ningún rasgo evidente de rotura en superficie asociado a la rotura de la falla.

Fig. 3.3. Muro de hormigón utilizado como marcador de posible ruputura a su paso por la traza de la falla.

Finalmente, se ha realizado un recorrido bordeando la Autovía A-7 que al oeste del epicentro es atravesada por la FAM. Se han observados algunas grietas muy pequeñas y discontinuas de aspecto reciente pero sin continuación lateral, por lo que interpretamos que tampoco deben estar asociadas a ruptura superficial de la falla. También se realizaron observaciones en el túnel de la A-7 que atraviesa la FAM al NW de Lorca, sin que se hayan observado deformaciones en dicha infraestructura.

Por último y al cierre de la redacción de este informe, no parece que la baja magnitud del terremoto y tras los reconocimientos de campo de la traza de la Falla de Alhama de Murcia, se haya generado una rotura superficial asociada. Sin embargo, si tras una nueva relocalización de los epicentros e hipocentros de las réplicas, quedara definido como plano de falla el NO-SE y no la FAM, se debería reconocer nuevamente la zona de la Vega para descartar este otro plano como ruptura en superficie.

4. Inestabilidades del Terreno producidas por los terremotos de Lorca del 11 de Mayo de 2011

Julián García Mayordomo (IGME)
Martín Jesús Rodríguez Peces (UCM)
Juan Miguel Insua Arévalo (UCM)

Se presenta una síntesis del reconocimiento de campo efectuado desde la tarde del jueves 12 al mediodía del sábado 14 de Mayo de 2011.

La serie sísmica del 11 de Mayo de 2011 ha generado una serie de inestabilidades de ladera en general de poca entidad y en un entorno muy localizado. Sin embargo, esta afirmación debe todavía contrastarse adecuadamente cuando se disponga de imágenes aéreas posteriores al terremoto principal.

Las inestabilidades del terreno producidas por el terremoto han sido básicamente: desprendimientos rocosos de diferente entidad (desde meros desconchones hasta desprendimientos con flujo de rocas), caída de bloques independientes y desmoronamientos de tramos de la muralla exterior del castillo de Lorca.

Algunas de las inestabilidades producidas por el terremoto pueden calificarse como significativas en el sentido de que han producido algún daño en edificación y cortes temporales de carreteras.

En particular, en la zona del espolón del castillo (extremo este del cerro del castillo), la caída de un bloque rocoso ha destrozado parte de un muro de cerramiento del patio de una vivienda. Así mismo, en la carretera de subida al castillo se han producido caídas de bloques que han dañado seriamente el pavimento de la carretera. Igual situación se ha dado en la carretera de Las Viñas, implicando el corte de la misma. Es de destacar que el mismo viernes 13 (es decir, algo más de 24 horas después del terremoto) ambos situaciones habían sido resueltas y se podía circular por ambas carreteras con relativa normalidad.

Merece destacarse que las medidas de estabilización del frente rocoso de la falda sur del cerro del Castillo de Lorca han funcionado adecuadamente, evitando lo que hubiera supuesto un agravamiento de los daños producidos por el terremoto, y quizá un mayor número de victimas, en particular en las viviendas situadas justo debajo del acantilado. Una revisión ocular rápida sugiere el perfecto estado de las medidas, aunque por supuesto esta observación deberá confirmarse tras una revisión sistemática y pormenorizada.

Finalmente, es conveniente señalar dos trabajos previos muy importantes realizados por el IGME en Lorca:

- Estudio de Peligrosidad y Vulnerabilidad Sísmica en Lorca y su Término Municipal (1992).
- Estudio de Riesgos por Desprendimientos en el Cerro del Castillo de Lorca (Murcia) (1988)

A continuación se presenta un breve reportaje fotográfico de las inestabilidades citadas ordenadas por su localización general (la distribución de afloramientos se puede observar en la figura 4.1):

- Falda norte del cerro del castillo de Lorca (Figuras 4.2.0 y siguientes).
- Falda sur del cerro del castillo de Lorca (Figuras 2.3.0 y siguientes).
- Ladera norte de la carretera del pantano de Puentes (Figuras 4.4.0 y siguientes).
- Otras fotos (Figuras 4.5 en adelante).

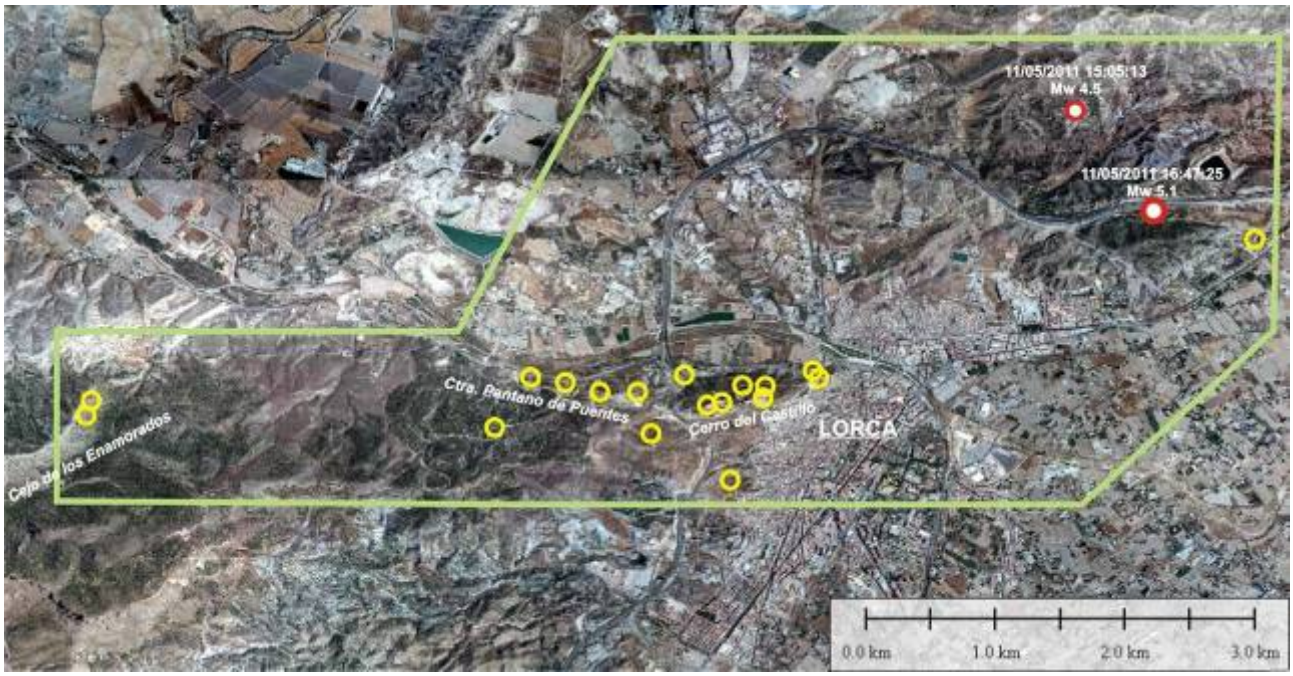


Figura 4.1: Localización de las principales inestabilidades de ladera identificadas en el reconocimiento de campo.

Figura 4.2.0: Vista general de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. Se identifican las inestabilidades más importantes inducidas por los terremotos del 11 de mayo.

Figura 4.2.1a: Desmoronamiento parcial del espolón del cerro del Castillo (extremo más oriental del mismo). La caída de un bloque independizado provocó daños en una vivienda (ver Fig. 4.2.1c). La imagen de la derecha se corresponde con el mismo lugar y está tomada del estudio de riesgo sísmico de la ciudad de Lorca (IGME, 1992).

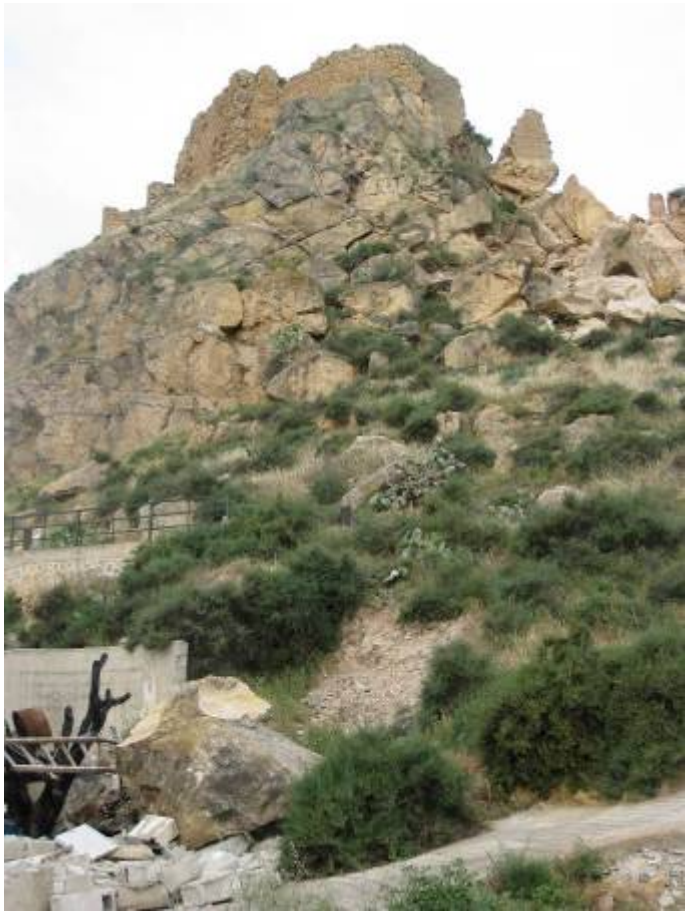


Figura 4.2.1b: Vista del lateral S del espolón del cerro del castillo y del bloque que causó la rotura de un pequeño muro. En este tramo la carretera de descenso del castillo sufrió daños moderados en el pavimento. Se observa a la izquierda la terminación lateral de la malla de contención que estabiliza el frente norte del cerro.

Figura 4.2.1c: Impacto en el muro de bloques de hormigón del patio de una vivienda producido por la caída de una roca del espolón.

Figura 4.2.1d: Daños en la carretera de bajada del castillo causados por el rebote del bloque desprendido del espolón (foto 1.b).

Figura 4.2.1e: Vista de proximidad del desprendimiento del espolón (hacia el sur) y de las condiciones generales del macizo rocoso en este punto. En el extremo derecha se observa parte de la caída de un muro (ver foto 1.1f).

Figura 4.2.1f: *Vista de detalle de la caída de parte del muro de contención antiguo. Se observa el relleno de intradós que permanece metaestable. Este tipo de inestabilidad también se ha producido en la falda sur del cerro del castillo (ver foto 2.1).*

Figura 4.2.2: Pequeño desprendimiento con arrastre de un pino. Talud S de la carretera de subida al castillo.

Figura 4.2.3: Desprendimiento de rocas en la carretera de subida al castillo.

Figura 4.2.4a: Desprendimiento de un bloque rocoso de dimensiones métricas que provocó daños importantes en la carretera (ver foto 1.4b).

Figura 4.2.4b: Daños en el pavimento de la carretera de subida del castillo por la caída y rebote del bloque rocoso de la foto 1.4a.

Figura 4.2.5: Colapso de la muralla exterior del castillo de Lorca (falda N del cerro del Castillo).

Figura 4.3.0: Vistas parciales de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. El orden de las fotos es de oeste a este de izquierda a derecha. Solamente se han identificado dos pequeñas inestabilidades, una pequeña caída de rocas (foto núm. 2) y un desmoronamiento del muro exterior (foto núm. 3 y fig. 4.3.1). En la última foto se aprecia una visual del desprendimiento del espolón (fotos 4.2.1). Las medidas de estabilidad del macizo rocoso respondieron adecuadamente evitando mayores pérdidas y desgracias personales. Estas consisten en una malla de acero de doble diámetro cosida con bulones y una barrera dinámica. Las medidas fueron implantadas hace unos 3 años (com. pers. ayto.).

Figura 4.3.1: Desmoronamiento de un antiguo murete de contención adosado a la muralla exterior del castillo de Lorca en su falda N. Esta inestabilidad alertó a los habitantes de las viviendas situadas más abajo, preguntándonos in situ si era seguro volver a sus viviendas.

Figura 4.4.1a: Desprendimientos en la parte alta de la ladera norte de la carretera al pantano de Puentes. La atribución de su origen al terremoto del 11 de mayo se presupone. El de más hacia el oeste (a la derecha en la primera foto) se corresponde en parte con una inestabilidad previa.

Figura 4.4.1b: Continuación de la carretera del pantano de Puentes hacia el oeste. A lo largo de la misma se han identificado numerosas inestabilidades, aunque de pequeña entidad. Destaca la caída de bloques con origen en la cresta rocosa controlada por la falla de Las Viñas (señalado con una flecha). En la foto de la derecha se observa un detalle de los daños producidos por la caída de uno de estos bloques.

Figura 4.4.2: Desprendimientos en el Cejo de los enamorados.

Figura 4.5: Cerro con antenas de comunicaciones situado en frente de la terminación oriental del cerro del castillo de Lorca. Se observan dos desprendimientos recientes que se atribuyen a los terremotos del 11 de mayo.

Figura 4.6: Vista de la ladera en un depósito de bombonas de gas en la carretera del pantano de Puentes. No se han identificado inestabilidades del terreno atribuibles a los terremotos del 11 de Mayo, aunque el desplome del murete de bloques de hormigón sí se atribuye a estos.

Figura 4.7: Balsa de riego localizada en las inmediaciones de los epicentros de los terremotos del 11 de mayo. No se observó ningún daño ni inestabilidades aparentes en el talud del fondo.

Figura 4.8: Caídas de roca en la pista que cruza la zona epicentral (foto cortesía de J.J. Martínez-Díaz).

Figura 4.9: Desprendimientos superficiales atribuidos a los terremotos de mayo en un talud de la carretera de servicio del canal Tajo-Segura.

5. Estudio de daños en edificaciones históricas mediante técnicas de análisis estructural geológico. Aplicaciones a la arqueosismología.

Jorge Luis Giner Robles (UAM)
Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME)
Raúl Pérez López (IGME)
Fidel Martín-González (URJC)

El terremoto de Lorca (SE España) del 11 de mayo del 2011, fue el causante de una elevada cantidad de daños e intensidad sísmica sobre todo el abanico de edificaciones presente en la ciudad de Lorca, incluyendo los edificios históricos de la ciudad. A lo largo del casco histórico se observan daños tanto en las edificaciones más antiguas como el pórtico de San Antonio, cuyo origen es una antigua muralla defensiva del siglo XIII, como en las diferentes iglesias y conventos repartidos en el centro cultural lorquino. A vista de pájaro se observa una concentración de daños en las torres elevadas, afectando principalmente a los arcos, tejadillos arbotantes, bolardos y algún cimborrio. También aparecen rotaciones en elementos decorativos sueltos como bolardos y obeliscos, como el obelisco de la pequeña plazuela anexa a la iglesia de San Francisco.

En principio y atendiendo a la experiencia en terremotos pasados en otras partes del mundo, un terremoto de magnitud 5.1 no debiera de haber generado una intensidad sísmica (VII EMS, www.ign.es) tan elevada. Sin embargo, al ser una fuente somera cuyo hipocentro se localiza en los primeros kilómetros de la corteza y cuya propagación de la rotura se propagó desde la zona epicentral hacia el SW, podemos suponer que gran parte de la ruptura de la falla responsable del sismo (asumimos que es la FAM como estructura más probable), se produjo exactamente debajo del casco urbano. Por otro lado, los depósitos detríticos sobre los que se asienta la ciudad responden a materiales coluviales y aluviales junto al glacis de la sierra de la Tercia, así como depósitos de las ramblas del río Guadalentín y que constituyen depósitos con propiedades amplificadoras ante el paso de un tren de ondas sísmico.

Si bien es cierto que el terremoto de Lorca no ha producido colapsos generalizados en los edificios el casco urbano (solamente dos edificios colapsaron), durante las primeras horas de inspección sobre el terreno se han reconocido, clasificado y descrito más de cien efectos del terremoto sobre edificaciones y que corresponden a estructuras de deformación descritas en el trabajo de Giner-Robles et al., 2009 y 2011; Rodríguez-Pascua et al., 2011. Dichos autores los definen como Earthquake Archaeological Effects, siendo más comúnmente conocidos como EAE. El análisis de estas estructuras de deformación en edificios históricos surge como un estudio para poder reconocer y cuantificar daños de terremotos históricos en enclaves arqueológicos. En este sentido, los EAE describen y cuantifican deformaciones cosísmicas en yacimientos arqueológicos y edificios históricos. Según los trabajos anteriormente citados, se clasifican los EAEs en función (1) de la deformación permanente del sustrato o (2) de la deformación transitoria por el paso del rayo sísmico durante el terremoto.

El objetivo de este estudio es poder correlacionar los diferentes daños sufridos por los terremotos históricos de la ciudad de Lorca descritos mediante estructuras tipo EAEs, con los parámetros físicos del terremoto y la geología y sismotectónica a partir de los capítulos precedentes de este informe geológico. Además, en este trabajo preliminar, mostramos principalmente deformaciones asociadas a la anisotropía inherente del rayo sísmico. Con ello, es posible determinar la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) que sufrió la ciudad por deformación del sustrato al paso de un tren de ondas sísmicas durante los aproximadamente 5 segundos que duró la sacudida principal (Mw 5.1).

Durante el trabajo de campo, que se llevó a cabo en las 72 horas posteriores al sismo principal, se han reconocido principalmente deformaciones sobre los principales edificios singulares del casco viejo de Lorca, como iglesias, conventos y catedrales. La sistemática de estudio consistió en dividir el equipo en dos grupos de trabajo que accedieron a todos los edificios dañados con el objetivo de reconocer, clasificar y orientar los daños producidos dentro de una cuantificación y sistemática EAE (ver Rodríguez-Pascua et al. 2011). La figura 5.1 muestra la tabla de clasificación de los EAE según la propuesta de estos autores, con las claves usadas en la cartografía de localización de dichas deformaciones (Fig. 5.2).

Lo más relevante del estudio arqueosísmico aplicado a este terremoto instrumental, es que permite correlacionar los EAEs definidos a partir de terremotos históricos afectando a enclaves arqueológicos, con edificaciones patrimoniales y edificios modernos. Toda esta información además, se puede correlacionar con los parámetros sísmicos y geológicos que se muestran en este informe, tanto con la magnitud y mecanismo focal del terremotos, así como de la falla sismogénica y del efecto sitio debido a la geología del subsuelo lorquino.

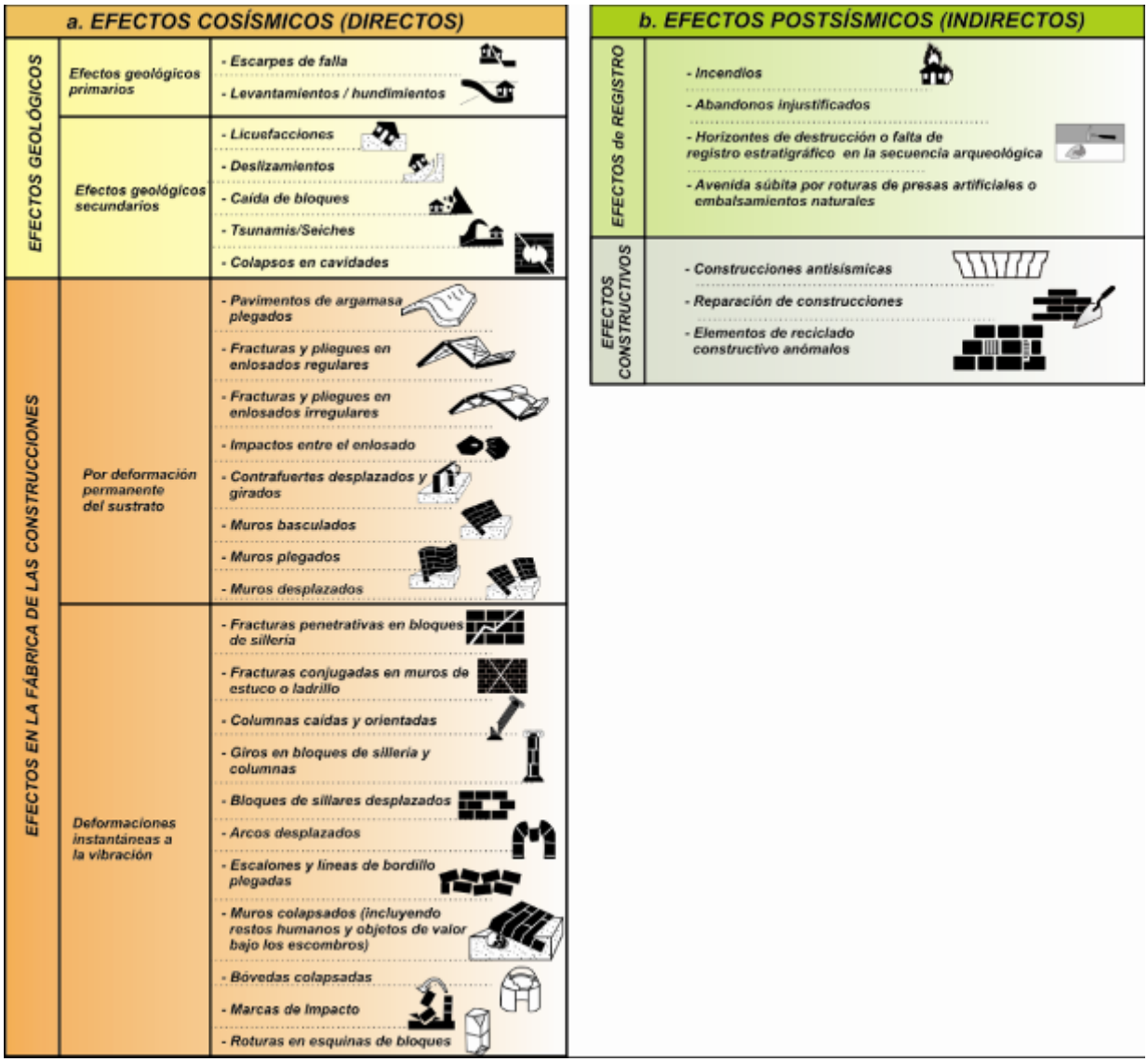


Figura 5.1 Tabla de clasificación de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects: EAE) (modificado de Rodríguez-Pascua et al. 2011): a) efectos cosísmicos, efectos producidos directamente por el evento sísmico (geológicos y en la fábrica de las construcciones) b) efectos postsísmicos, efectos indirectos producidos por las consecuencias del terremoto, ya sean visibles en el registro geoarqueológico (efectos de registro), o en las construcciones posteriores al evento sísmico (efectos constructivos).

La figura 5.2 muestra el mapa de la zona centro de Lorca identificando los principales EAEs reconocidos en este estudio. La leyenda de los EAEs corresponde a la misma que aparece en la figura 5.1. Las fichas describen los principales EAEs reconocidos y que han sido orientados según la metodología de Giner-Robles et al., 2009.

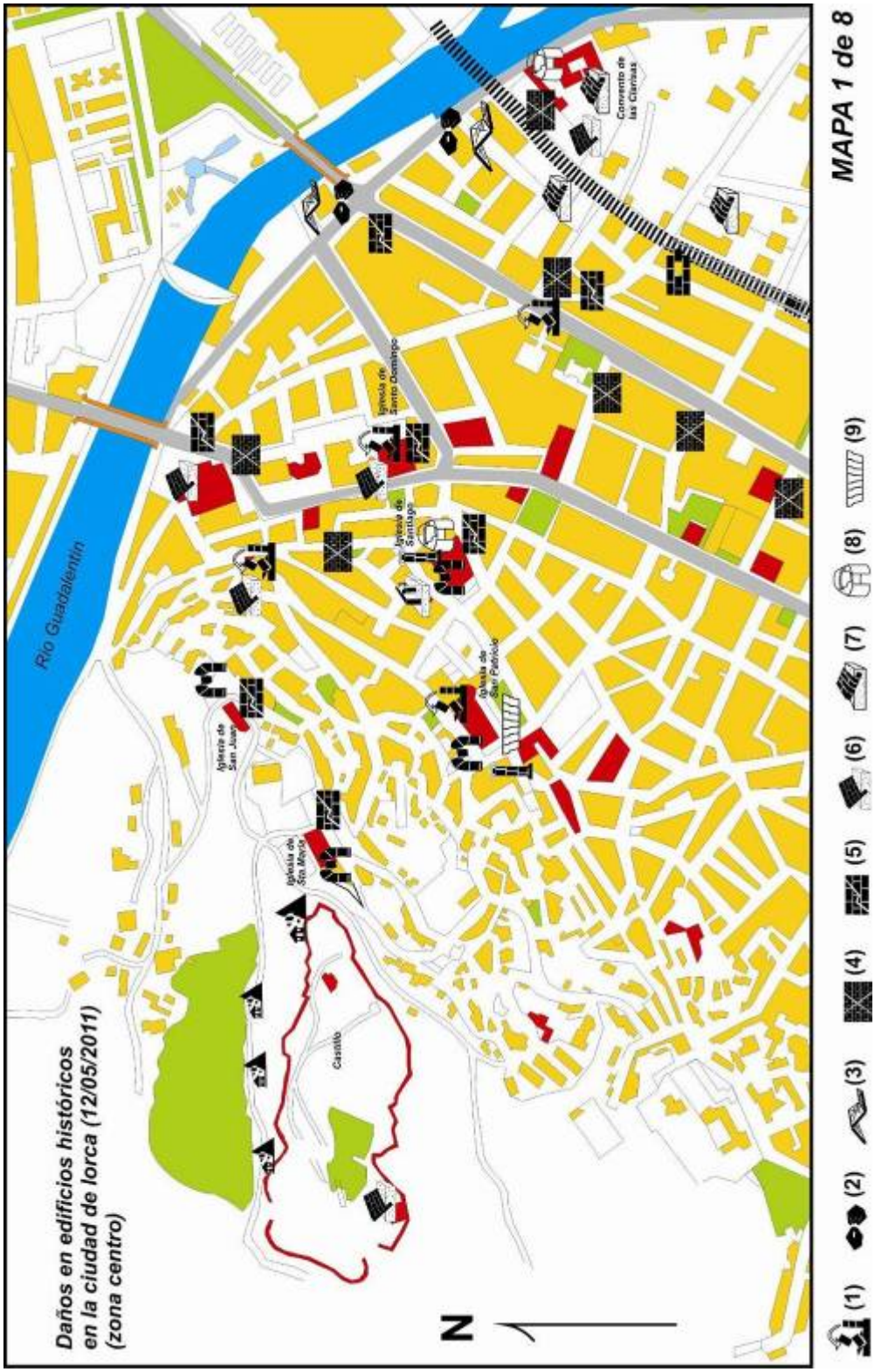


Figura 5.2 Mapa del centro urbano e histórico de Lorca con la distribución espacial de los principales EAEs clasificados durante el trabajo de campo posterior al terremoto. Ver figura 5.1 para la leyenda.

El terremoto de Lorca constituye un ejemplo ideal para el estudio de deformaciones asociadas al campo cercano durante un evento sísmico y que permite correlacionar el daño con la intensidad sísmica, así como parámetros propios del terremoto, magnitud, profundidad y geometría de la falla sismogénica. De este modo, podemos extrapolar dichos resultados del terremoto de Lorca del 11 de Mayo a los estudios de yacimientos y enclaves arqueológicos en los que la interpretación de un terremoto histórico de campo cercano.

En este informe preliminar se han recopilado los principales EAEs medidos y orientados en el Convento de las Clarisas (S. XVII), en la Iglesia de San Juan (S. XV), en la Iglesia de Santiago (S. XVIII), en Santa María (S. XV), en la Iglesia de San Francisco (S. XVII) y el Pórtico de San Antonio (S. XIII-S. XV). Además, se han descrito estructuras similares en edificaciones modernas como en el colapso orientado del edificio de las Viñas y en otras edificaciones modernas de ladrillo. También se incorporan dos nuevos EAEs observados en el reconocimiento de campo de las edificaciones lorquinas. Con toda esta información preliminar, se muestra el resultado final en una rosa de orientaciones. La figura 5.10. muestra el resultado principal con una orientación NW-SE, de media N150-160E. Interpretamos a partir de estos datos una direccionalidad en los daños NW-SE con un azimut desde el SE. Dicha orientación sugiere una dirección de ey según los N150-160, que es compatible con la dirección regional del campo de esfuerzos, el mecanismo focal del terremoto (desgarre izquierdo con componente inversa) y la localización epicentral en la sierra de la Tercia con el error de localización asociado.

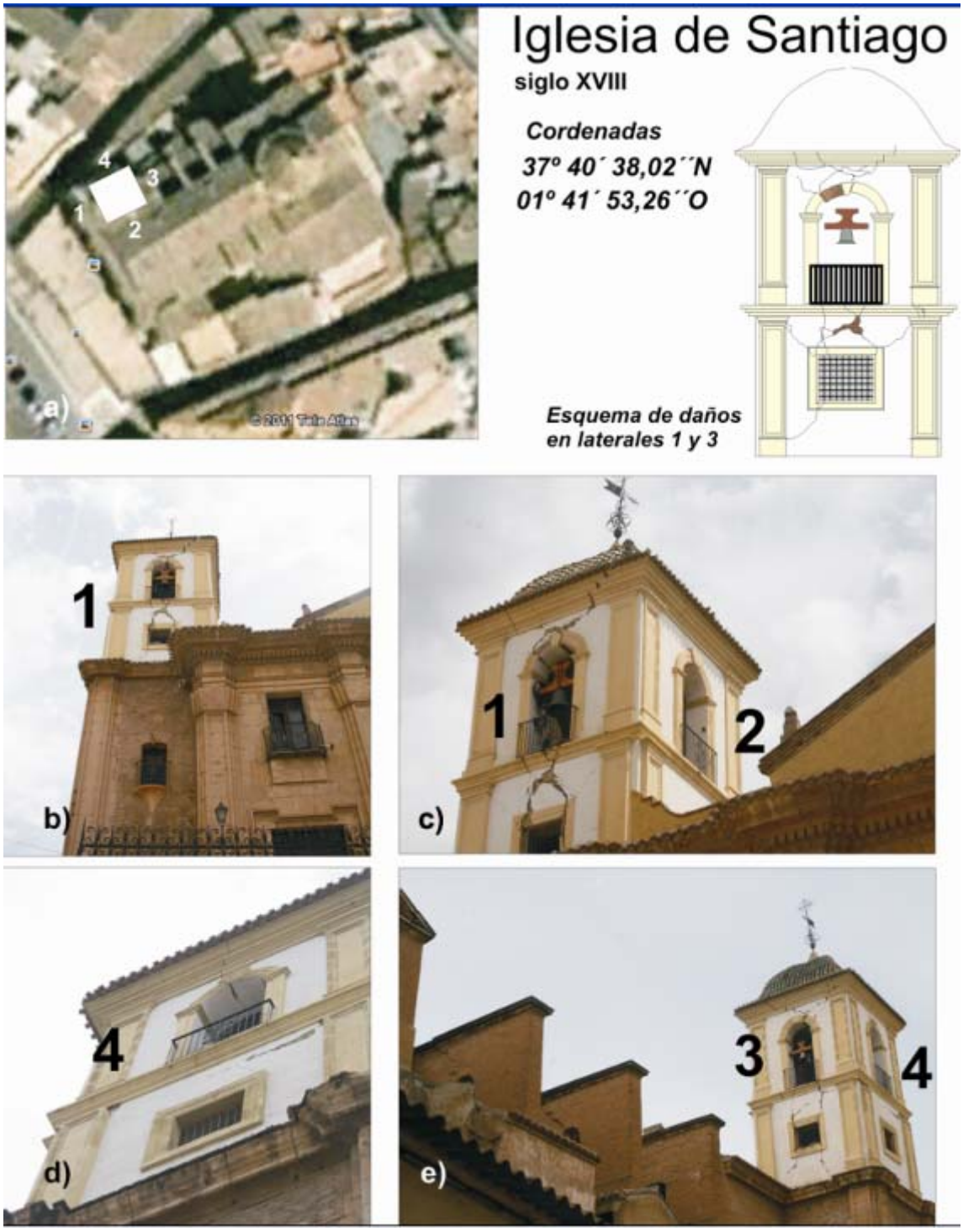


Figura 5.3 Daños en la torre de la iglesia de Santiago.

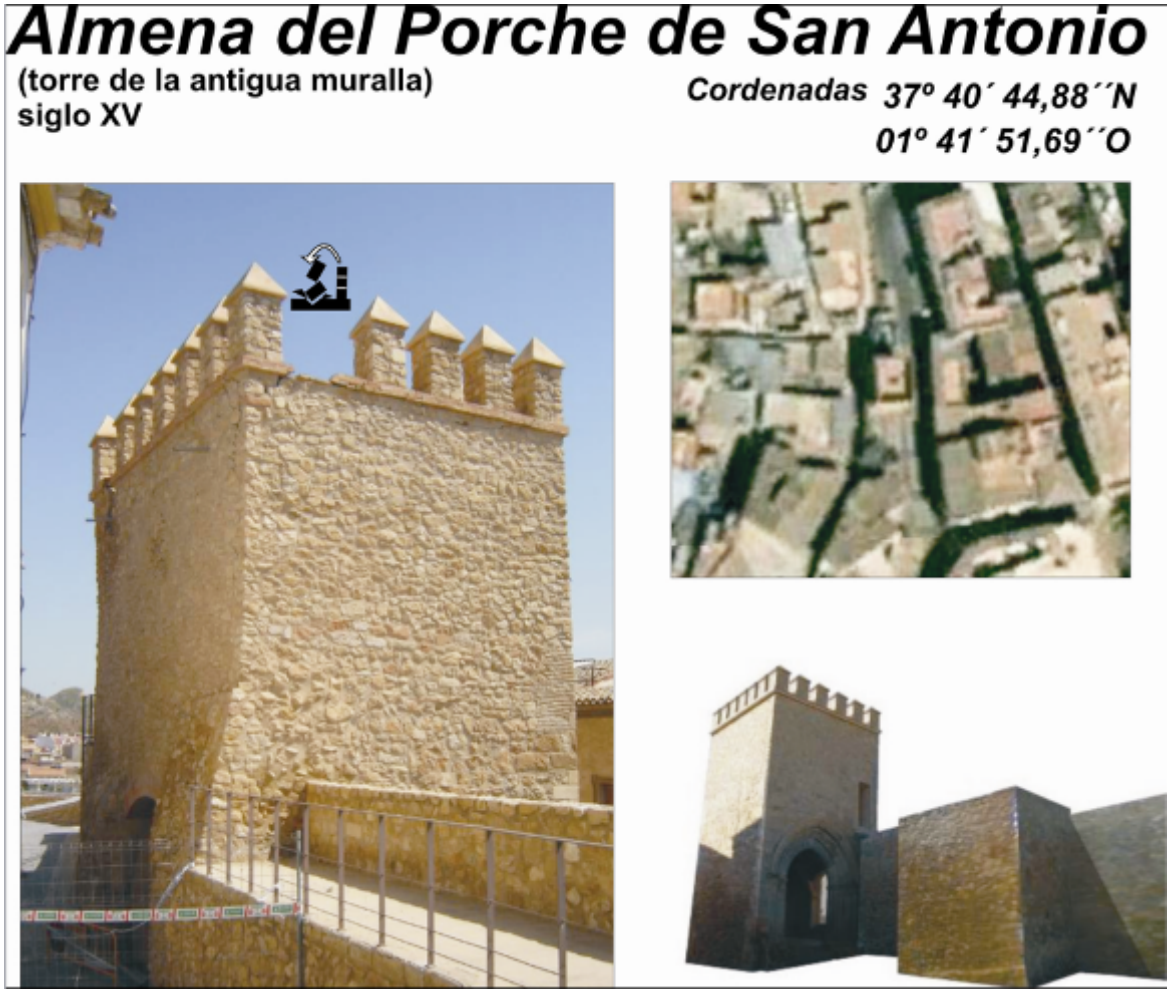


Figura 5.4 Daños de las almenas del porche de San Antonio (Torre de la antigua muralla Almonacid).

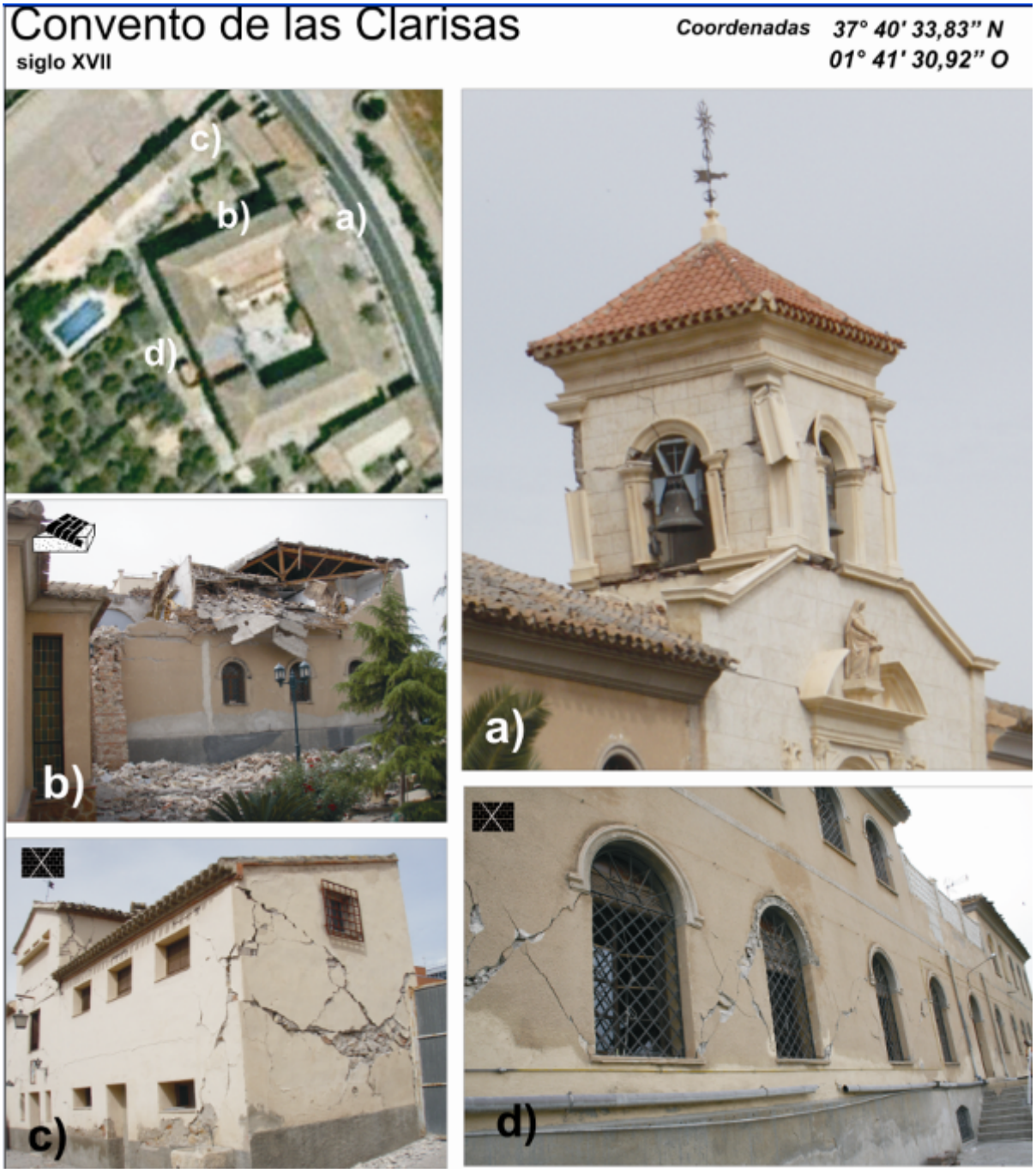


Figura 5.5 Daños en la torre y edificaciones principales del Convento de las Clarisas.

Figura 5.6 Daños en la Iglesia de San Francisco.

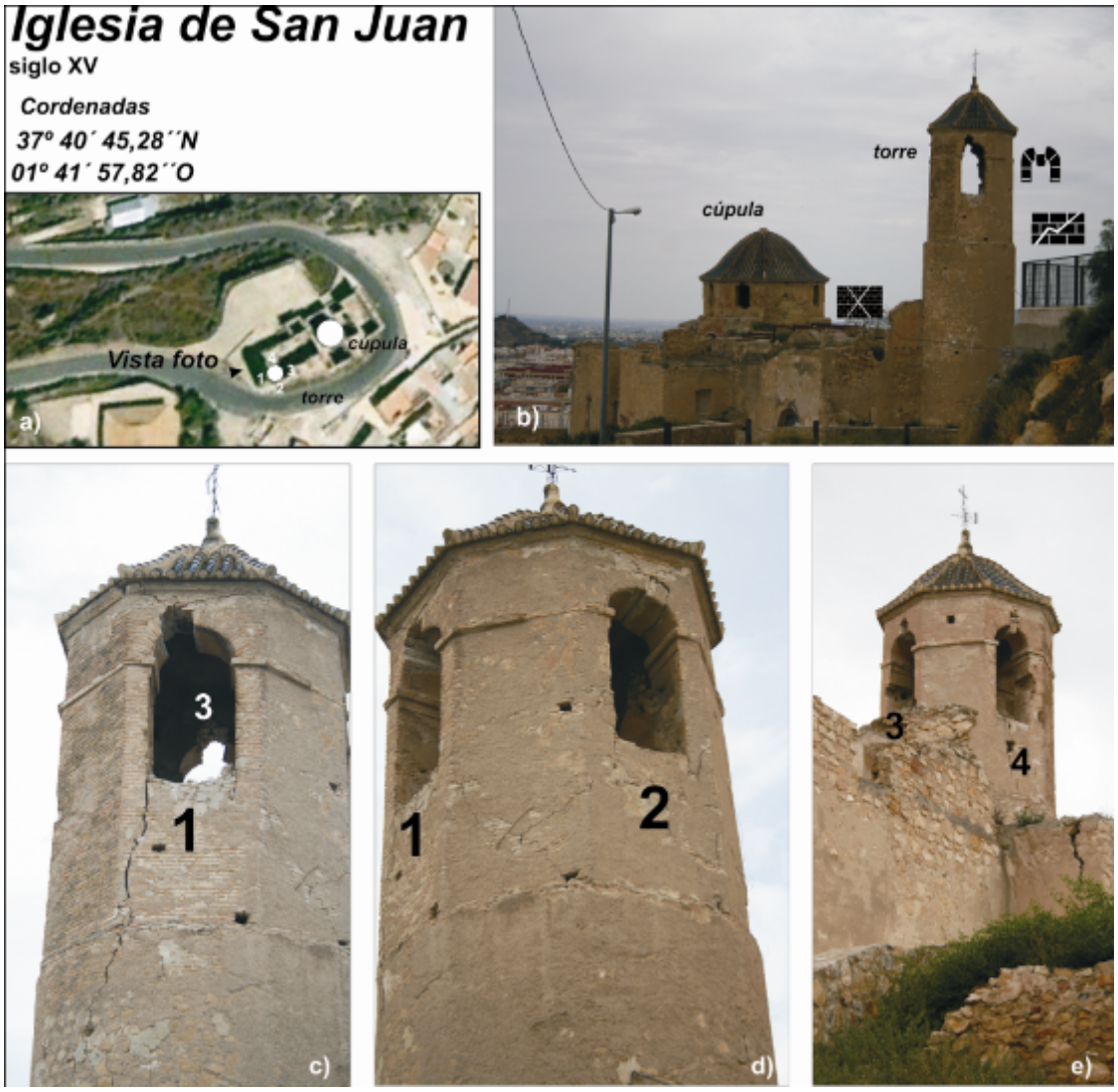


Figura 5.7 Daños en la torre de la Iglesia de San Juan.

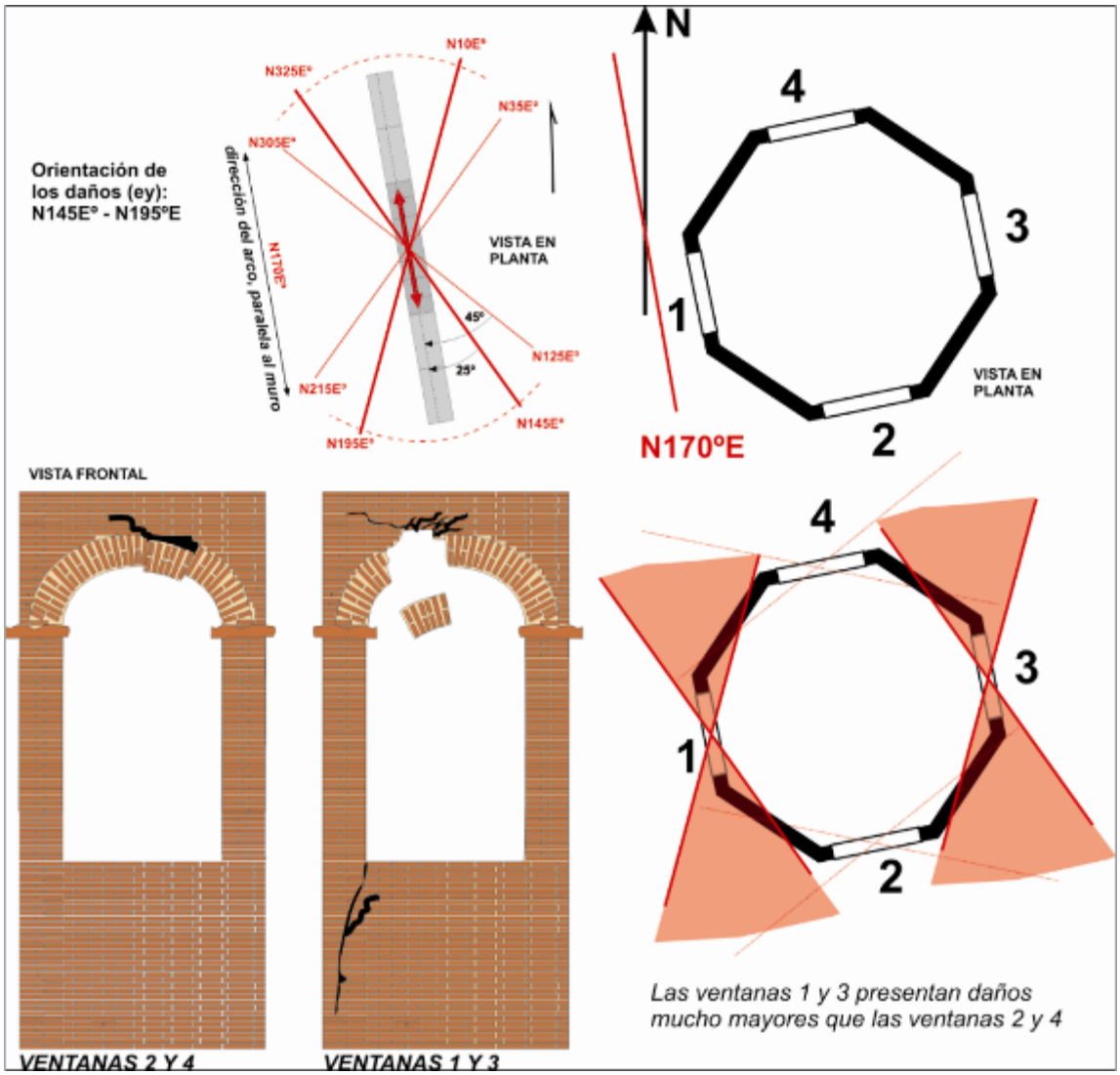


Figura 5.8 Ejemplo del análisis de las estructuras de deformación y determinación de la orientación de los daños (Iglesia de San Juan).

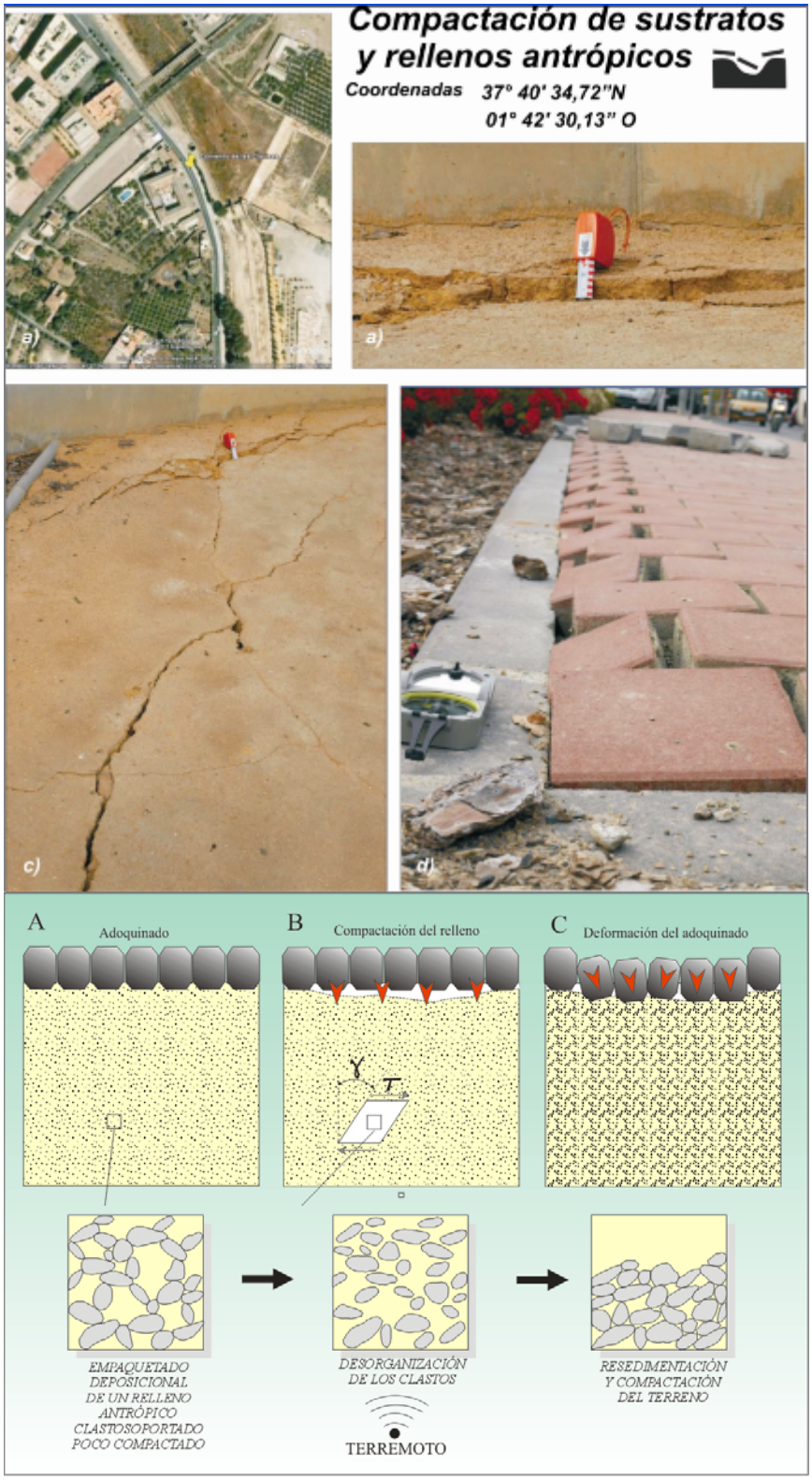


Figura 5.9 Compactación de sustratos y rellenos antrópicos asociados al Convento de las Clarisas. Nuevo EAE descrito.

Figura 5.10 Iglesia de Santa María. Clave de arco extruída al no soportar carga vertical.

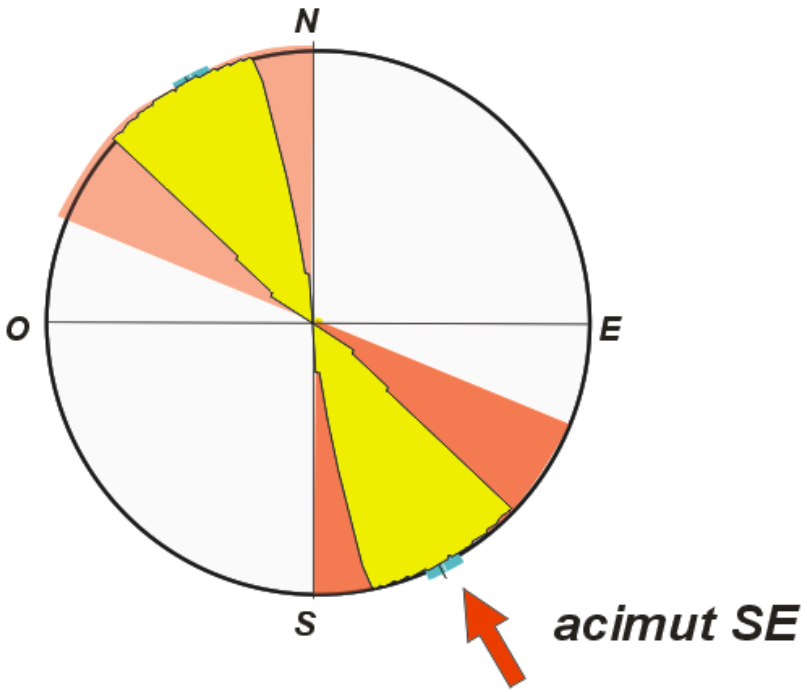


Figura 5.11 Rosa de orientaciones de la dirección media de los daños observados a partir del análisis de los EAEs inventariados. Resultados preliminares.

6. Conclusiones preliminares

José Jesús Martínez Díaz (UCM); Miguel Ángel Rodríguez Pascua (IGME); Raúl Pérez López (IGME); Julián García Mayordomo; Jorge Luis Giner Robles (UAM); Fidel Martín-González (URJC); Martín Rodríguez Peces (UCM); Jose Antonio Álvarez Gómez (IH Cantabria - UCM); Juan Miguel Insua Arévalo (UCM).

- La Falla de Alama-Murcia (FAM) es la falla con mayores evidencias de actividad cuaternaria en la zona, con evidencias paleosísmicas de ruptura superficial de terremotos de magnitud superior a 6.0 durante los últimos 1000 años, con surgencias termales asociadas a su traza superficial y sismicidad histórica destructiva localizada a lo largo de su traza durante los siglos XVII, XVIII y XIX. Es la falla con una mayor expresión geomorfológica en la zona y cuya traza es paralela a uno de los planos nodales del mecanismo focal obtenido para los terremotos del 11 de mayo de 2011. Su componente de movimiento inverso direccional (siniestro) es coherente con este mecanismo focal.

- La alta intensidad sufrida por la localidad de Lorca (intensidad VII en la escala EMS-98, datos IGN) asociada a una magnitud 5.1 Mw, puede deberse a una propagación del terremoto desde la Sierra de la Tercia (zona epicentral) hacia el SW. La falta de evidencias de vibración hacia el este del epicentro apoyan esta posible direccionalidad de la propagación.

- Esta direccionalidad apoyaría que la ruptura de la FAM se propagó desde la zona epicentral, atravesando la ciudad de Lorca. Esto, unido a la superficialidad del terremoto, explicaría la elevada intensidad sísmica y aceleraciones pico de 0,41 g (datos IGN) registradas en el acelerógrafo de la antigua cárcel de Lorca.

- El aumento de esfuerzos estáticos sobre los segmentos de la falla de Alhama generado por el terremoto principal pueden haber incrementado la probabilidad de ocurrencia de terremotos en estas áreas. Sin que se pueda precisar temporalmente su ocurrencia.

- La orientación de los ejes principales de las deformaciones extraídas del estudio arqueosísmico es NW-SE, coherente con el campo regional de esfuerzos tectónicos y el mecanismo focal del terremoto principal, así como con la posición epicentral.

- Las observaciones y datos arqueosismológicos (más de un centenar) apoyan un origen de la deformación asociado a un campo cercano, lo que implicaría que gran parte de la ruptura del terremoto principal se produjo debajo del casco histórico de la ciudad de Lorca.

- Con estos datos y su inclusión en la escala de intensidades geológicas de terremotos ESI-07, se podrá mejorar la información de terremotos históricos y su localización epicentral, mejorando el conocimiento del proceso sísmico en España.

7. Bibliografía principal

Giner-Robles, J.L. M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, P.G. Silva, T. Bardají, C. Grützner and K. Reicherter. (2009). Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain), vol. 2,130p. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. DEP. LEG.: M-27206-2009.

Giner-Robles, J.L. P.G. Silva, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, J. Lario, T. Bardají. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos: aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI, Fundación MAPFRE. En prensa.

Martínez Díaz, J.J. (1998). Neotectónica y Tectónica Activa del Oeste de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética). Tesis Doctoral. Universidad Complutense Madrid. 470 pp.

Martínez Díaz, J.J., E. Masana , J.L. Hernández-Enrile Y P. Santanach (2001). Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama De Murcia Fault, Southeastern Spain. Geológica Acta, (antes Acta Geológica Hispánica). 36 (3-4): 315-327.

Martínez Díaz, J.J. y J.L. Hernández-Enrile (2001). Using travertine deformations to characterize paleoseismic activity on an active oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera-Spain). Geologica Acta, (antes Acta Geológica Hispánica) 36 (3-4): 297-313.

Martínez-Díaz, J. J. (2002). Stress field variety related to fault interaction in a reverse oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault, Betic Cordillera, Spain. Tectonophysics, 356: 291-305.

Rodríguez-Pascua M.A.; R. Pérez-López; J.L. Giner-Robles; P.G. Silva; V.H. Garduño-Monroy and K. Reicherter. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. Quaternary International, doi:10.1016/ j.quaint.2011.04.044.

Rodríguez-Pascua, M.A.; Pérez-López, R.; Giner-Robles, J.L.; Silva, P.G.; Garduño-Monroy, V.H.;. Reicherter, K. (2010). Nueva tabla de clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos. Tierra y Tecnología. 38: 59-65.

ANEXO 1. Breve reseña sobre la Peligrosidad Sísmica en la Zona

Julián García Mayordomo (IGME)

La peligrosidad sísmica a la que está sujeta la ciudad de Lorca (y en general la Región de Murcia y Sureste de España) ha sido analizada en numerosas ocasiones y por procedimientos muy diferentes. No en vano los habitantes del municipio de Lorca y territorios aledaños son conscientes de que viven bajo este riesgo de la naturaleza.

Baste recordar que los últimos terremotos dañinos en España se han localizado en la Región de Murcia (terremotos de Mula en 1999, Bullas en 2002, La Paca en 2005, y ahora en Lorca en 2011). Asimismo, la historia de este territorio está marcada ocasionalmente por la ocurrencia de terremotos más o menos fuertes (ver: www.ign.es/ign/layout/sismologiaEstadisticasCartografiaSismica.do). El propio municipio de Lorca ha encargado estudios de este tipo en diferentes ocasiones, como por ejemplo el estudio pionero realizado por el Instituto Geológico y Minero de España en 1992. Asimismo Protección Civil de la Región de Murcia cuenta con un Plan Especial de Protección Ante el Riesgo Sísmico moderno (puede consultarse en: www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php). A nivel legislativo estatal la construcción o reforma de edificaciones en el municipio de Lorca están sujetas al obligatorio cumplimiento de la normativa sismorresistente (Figura 1) (www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/ingss/normageneral-pdf.htm).

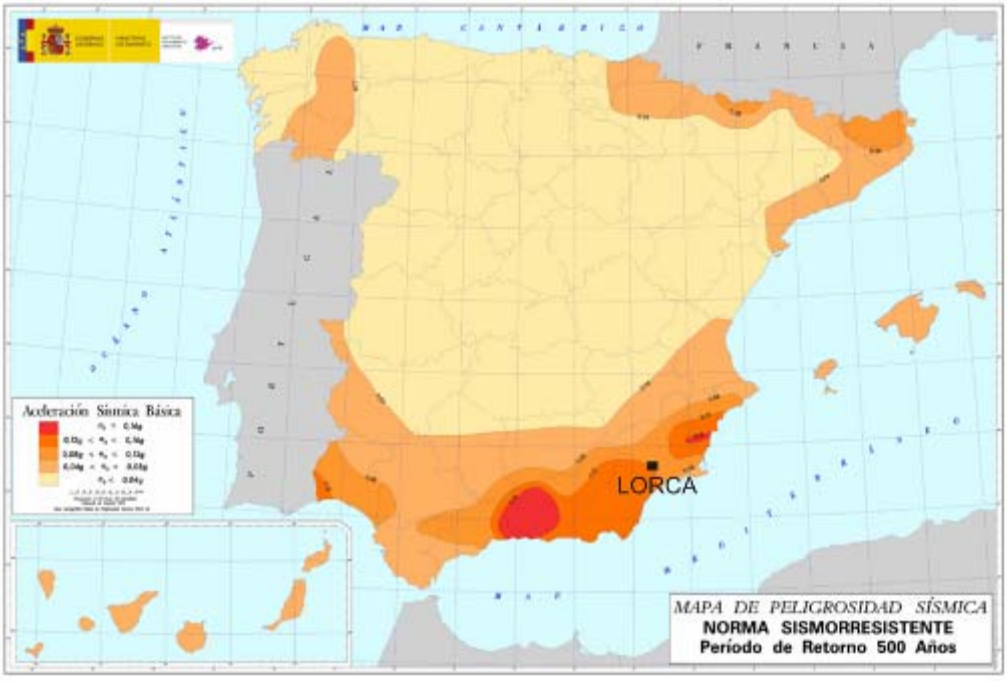


Figura 1: Localización de la ciudad de Lorca en el mapa de referencia de peligrosidad sísmica incluido en la norma de construcción sismorresistente española (NCSE-02).

En el contexto español Lorca se sitúa en una zona de peligrosidad moderada en relación con otros territorios como Granada y el sur de Alicante. Esto es debido a que el cálculo realizado para obtener este mapa está fuertemente controlado por el conocimiento que tenemos sobre terremotos que hayan ocurrido en el pasado histórico (de hecho los dos terremotos más destructivos en España en los últimos 100 años han tenido lugar en estas zonas: Arenas del Rey (1884) y Torrevieja (1829), respectivamente). Sin embargo, desde un punto de vista geológico, Lorca es un lugar sujeto a una alta peligrosidad sísmica.

La peligrosidad sísmica en la ciudad de Lorca está controlada por dos tipos básicos de fuentes capaces de producir terremotos dañinos (García-Mayordomo, Tesis doctoral UCM, 2005). Fallas conocidas o desconocidas que presumiblemente no producirán terremotos mayores de 5.5-6.0 y la Falla de Alhama de Murcia. Respecto al primer caso, un estudio científico reciente (Gaspar-Escribano et al., 2008, BEE:6,179-196) estima que el terremoto más probable en Lorca para un periodo de retorno de 500 años (el que se considera legalmente en la edificación de viviendas) tendría una magnitud del orden de 5.0, muy similar a la del terremoto principal del 11 de mayo. En este sentido podría considerarse que Lorca se ha puesto a prueba con el terremoto más grande que debieran soportar las edificaciones convencionales sin llegar al colapso. Sin embargo, todavía quedan por despejar muchos interrogantes, como el alto nivel de aceleración registrado (0.37g) en relación con la aceleración básica que provee la norma sismorresistente para la construcción (0.12g).

Respecto a la posibilidad de que ocurran terremotos realmente catastróficos en Lorca la fuente más probable es la propia Falla de Alhama de Murcia, que va limitando la serranía con la vega desde aproximadamente Puerto Lumbreras hasta prácticamente la ciudad de Murcia, con una longitud de unos 85 km. Se estima que esta falla es capaz de producir terremotos entre 6.5-7.0 cada 2000 años (información procedente de Martínez-Díaz et al., 2010, en la *Quaternary Active Faults Database of Iberia*) (Figura 2). En la Región de Murcia existen otras fallas también capaces de producir grandes terremotos, de consecuencias previsiblemente catastróficas, con una alta frecuencia en el sentido geológico (ej, 1 cada varios miles de años). Un problema importante es que no sabemos con seguridad cuando fue el último gran terremoto que produjeron estas fallas, cuestión fundamental para poder preveer el siguiente, y que sólo puede resolverse a través de la investigación geológica.

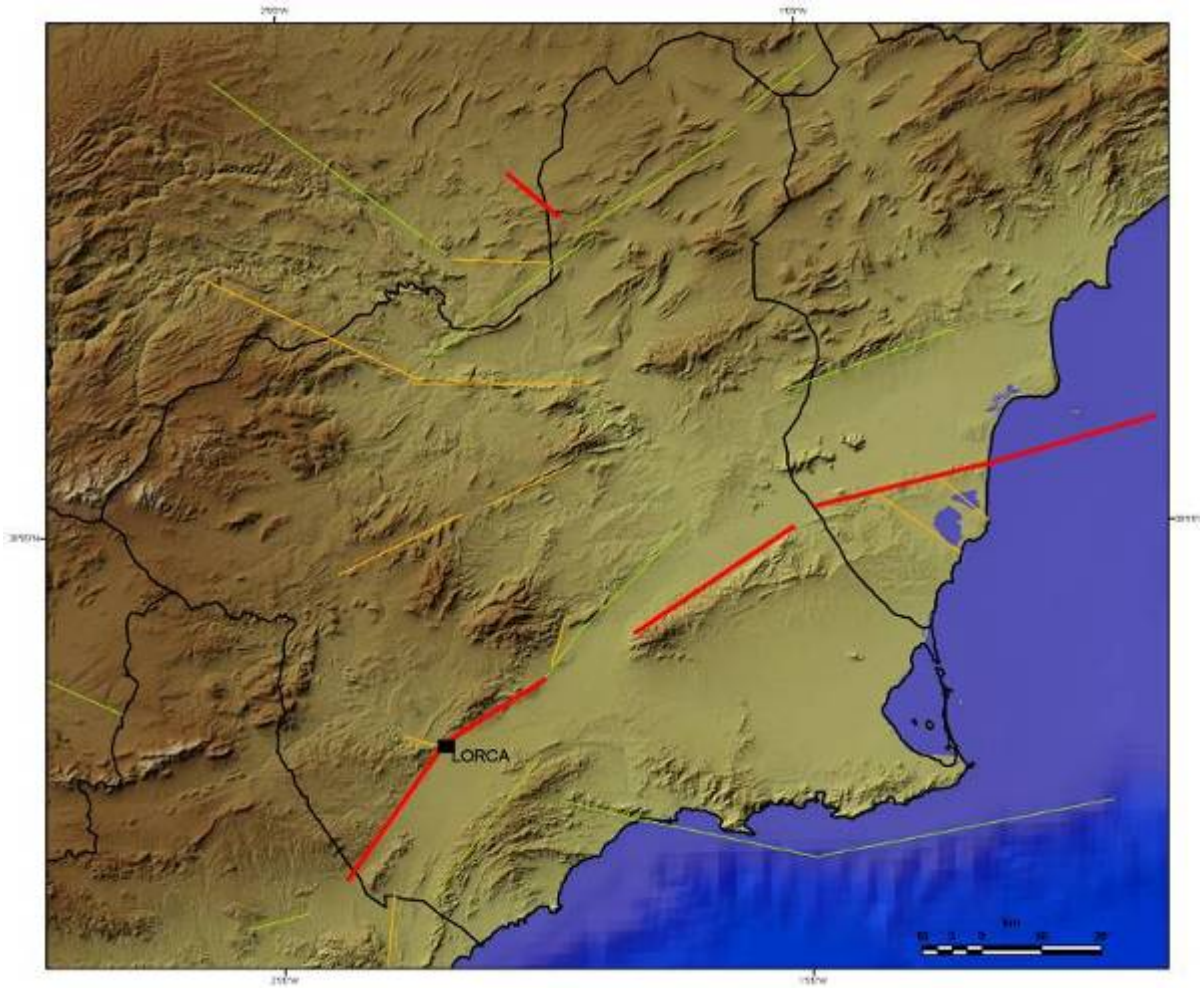


Figura 2: Localización de las principales fallas activas en la Región de Murcia. En rojo se señalan las fallas capaces de producir grandes terremotos con relativa frecuencia (cada varios miles de años). Obsérvese que la Falla de Alhama de Murcia cruza la ciudad de Lorca. Fuente: Quaternary Active Faults Database of Iberia (proyecto en desarrollo por el IGME en colaboración con investigadores en Ciencias de la Tierra de universidades y centros españoles y portugueses).

Los terremotos del 11 de Mayo de 2011 en Lorca van a suponer un fuerte un impulso a la investigación y a la innovación en todas las áreas involucradas en la prevención y mitigación del riesgo sísmico en España (geología, sismología, ingeniería, arquitectura, protección civil, educación ciudadana, legislación). Las lecciones que aprendamos hoy servirán para reducir pérdidas y salvar vidas el día de mañana.