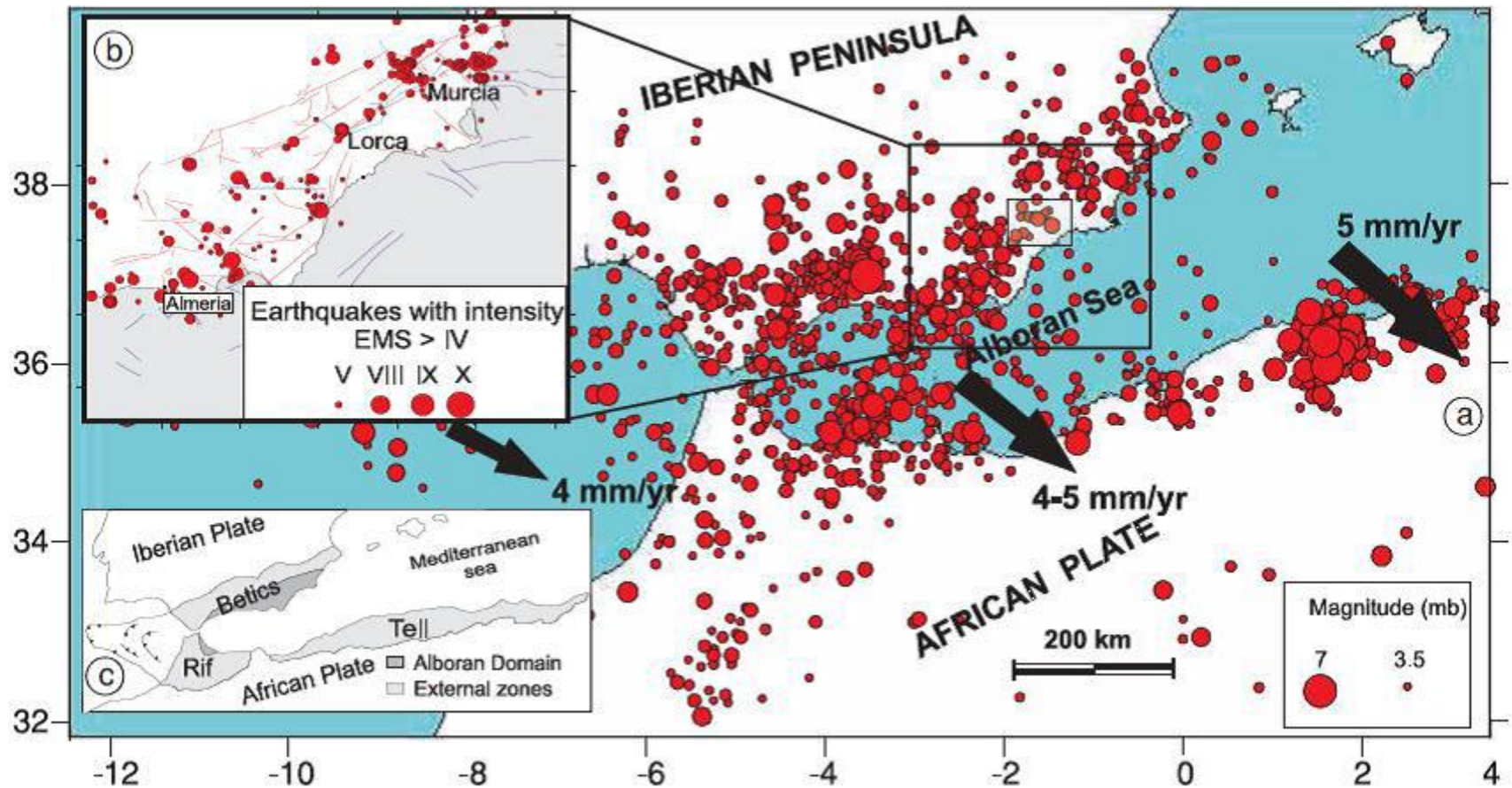


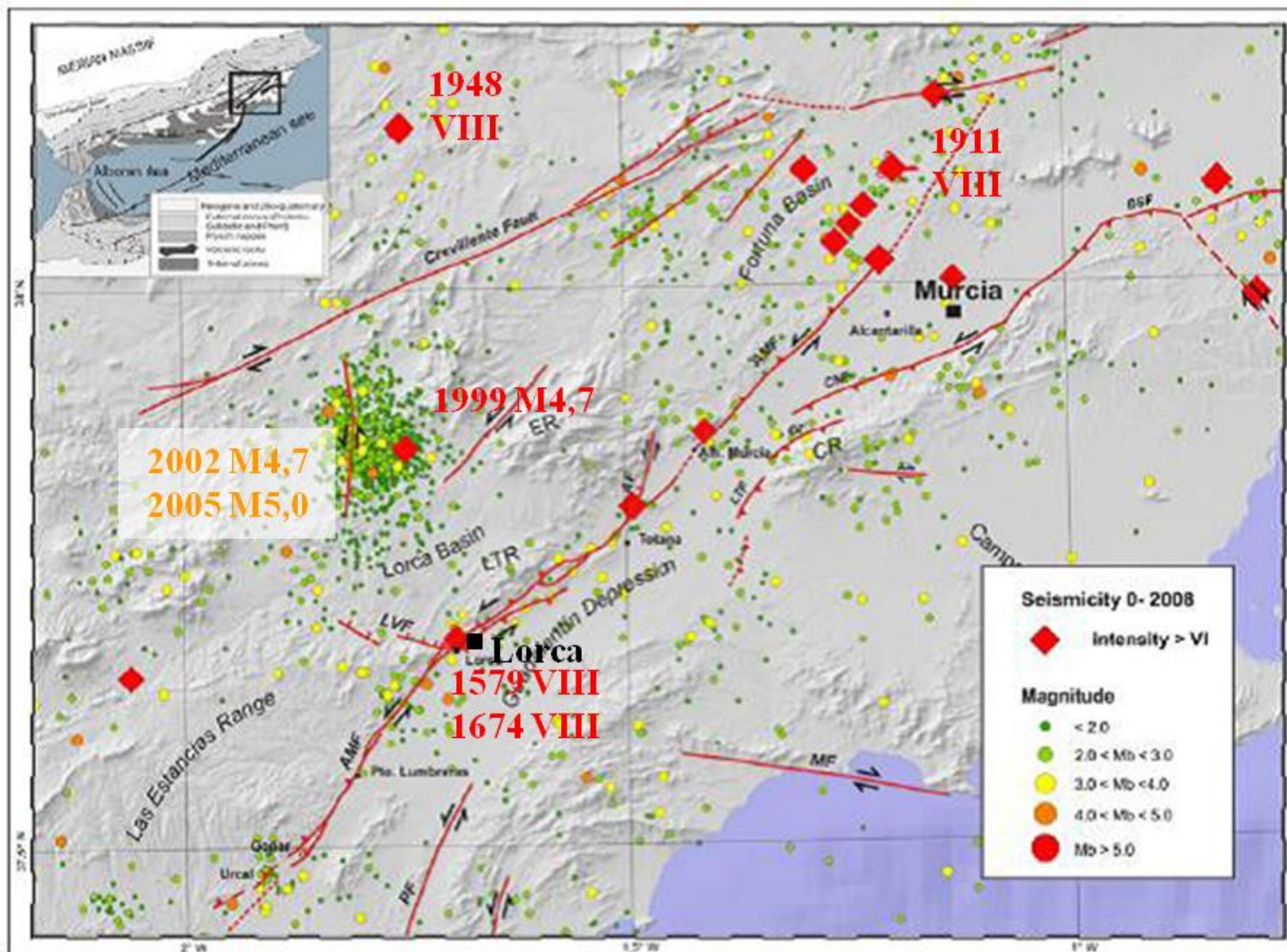


Terremoto de Lorca de 11 de mayo de 2011: Fuente sísmica y registros

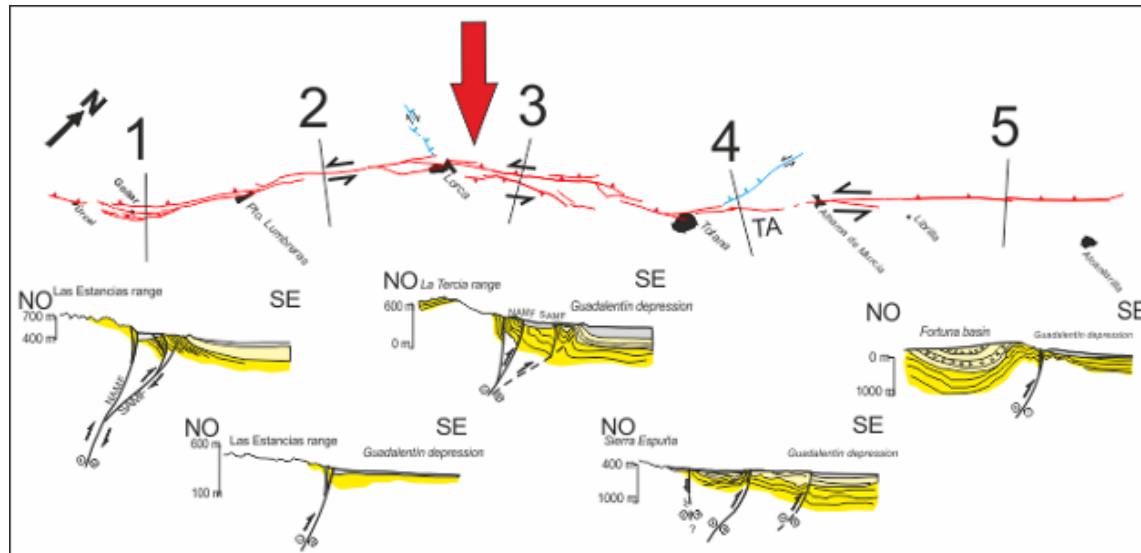
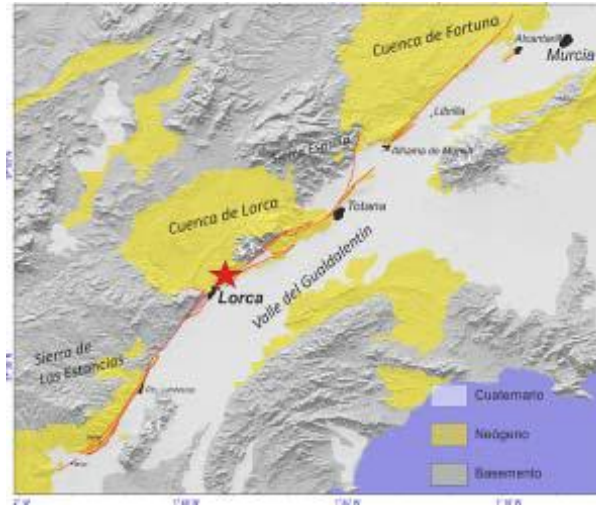
X. Goula







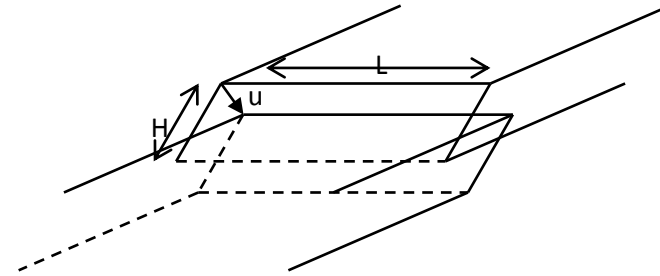
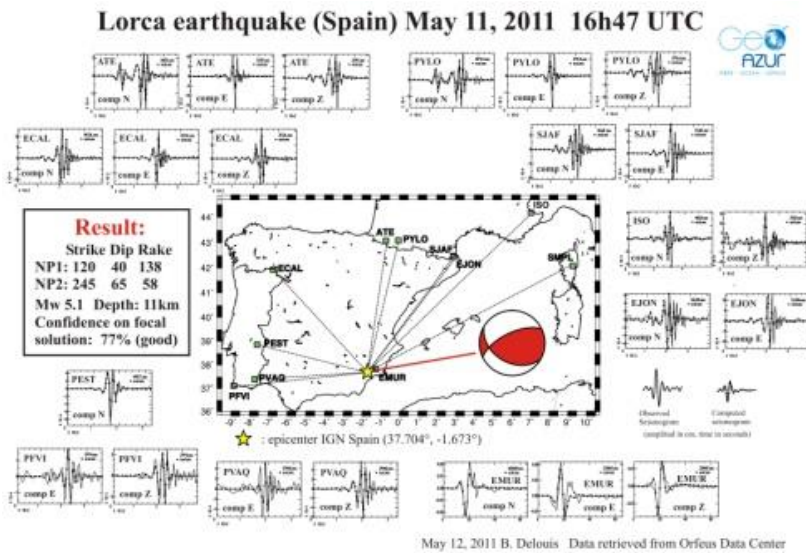
Falla de Alhama de Murcia y segmentación



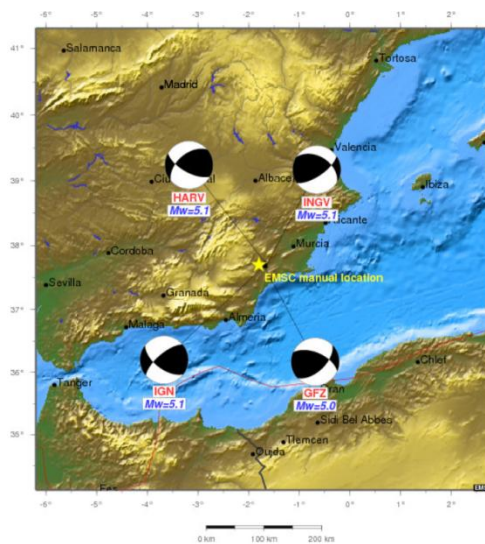
Falla de Alhama de Murcia en Lorca



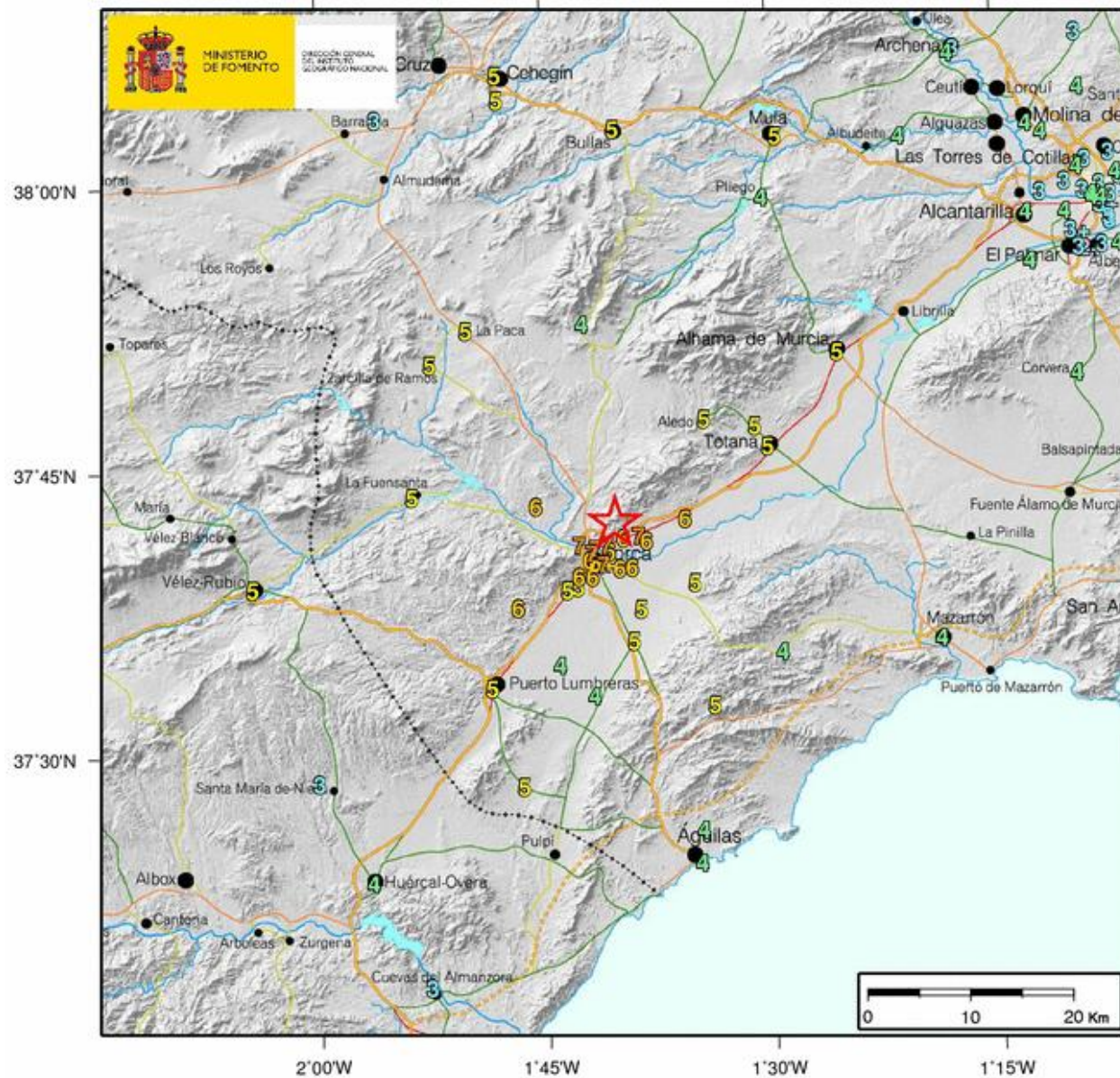
Mecanismo focal, geometría y tamaño de ruptura



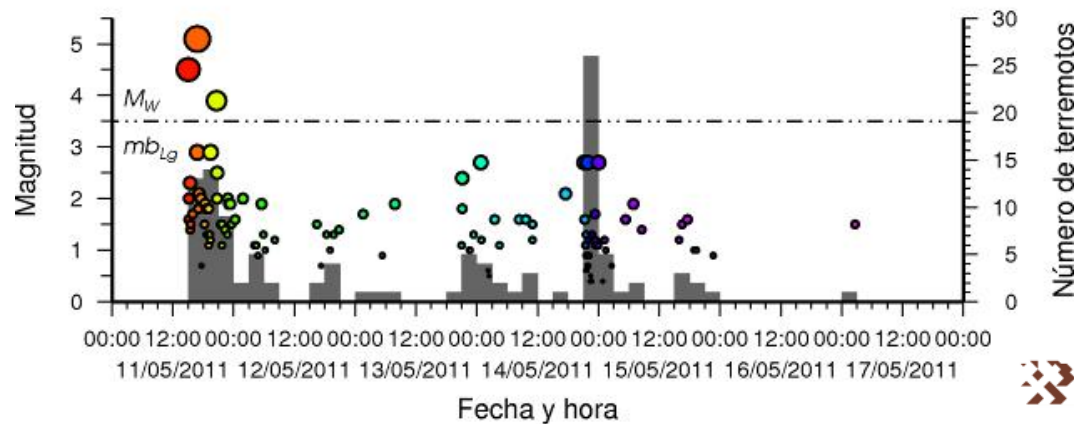
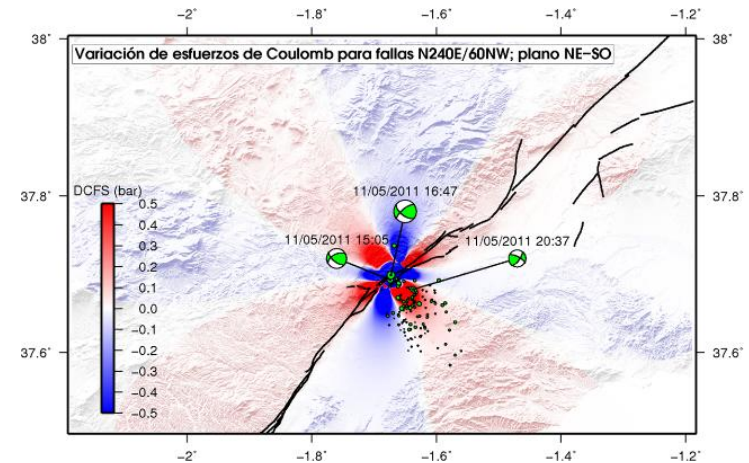
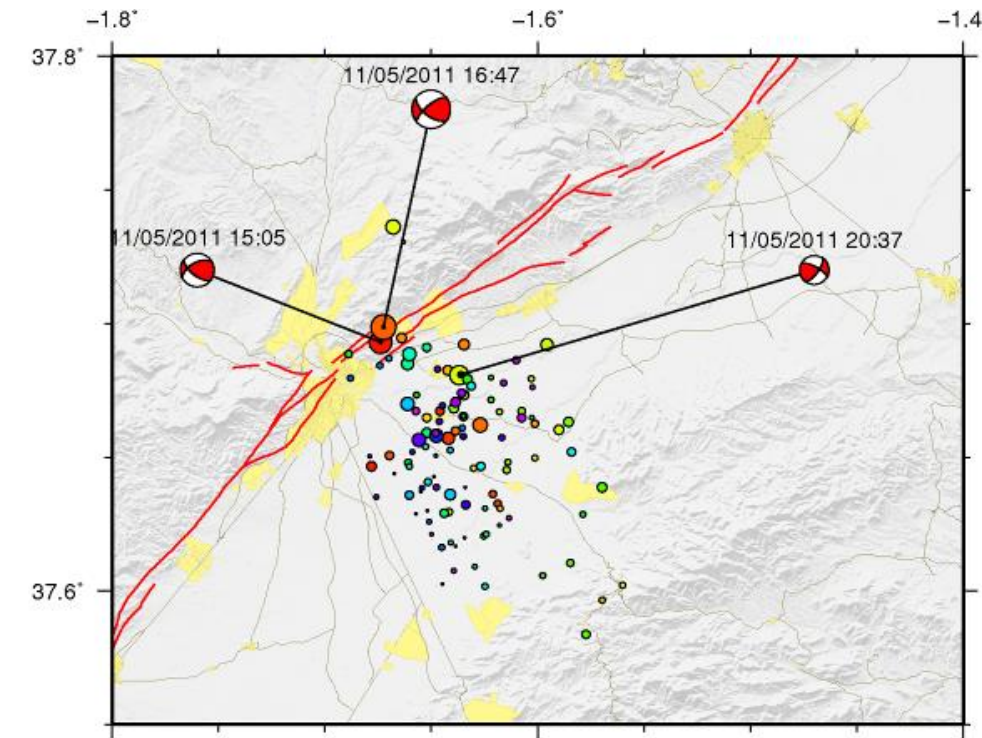
M_w	M_0 (N·m)	L (Km)	H (Km)	u (cm)
4	10^{15}	1	0.5	5
5	10^{16-17}	4	2	15
6	10^{18}	12	5.5	50
7	10^{19-20}	40	18	150
8	10^{21}	120	55	500



$I_0 = VII$
(EMS-98)

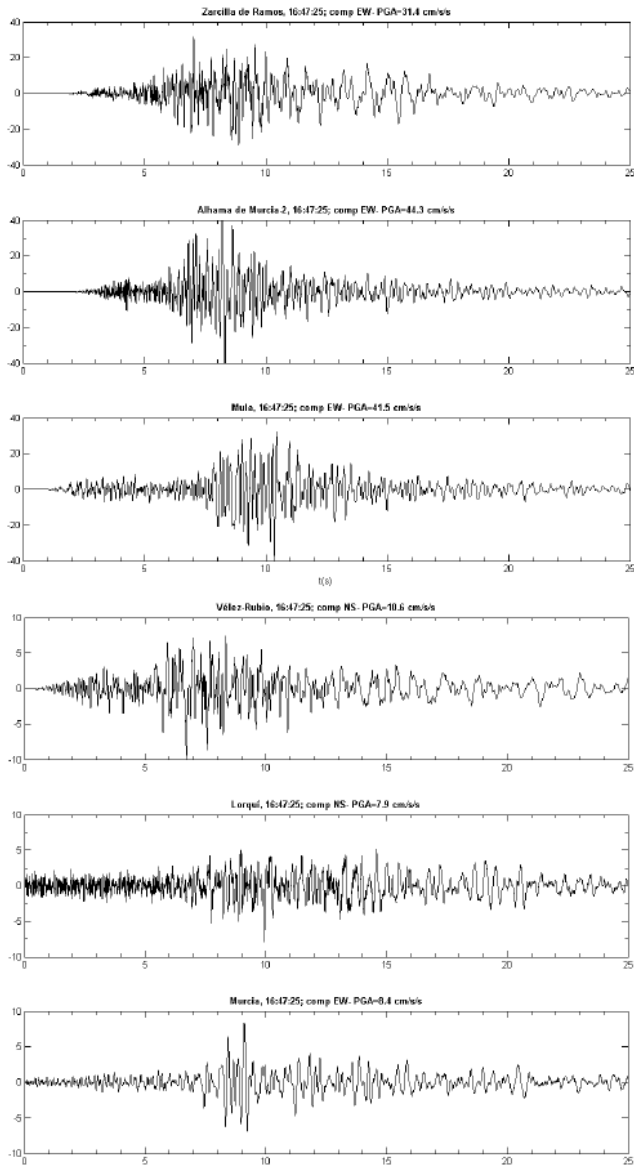


Réplicas y Esfuerzos de Coulomb



Disminución rápida del número de réplicas

Acelerogramas del terremoto del 11 de Mayo de 2011



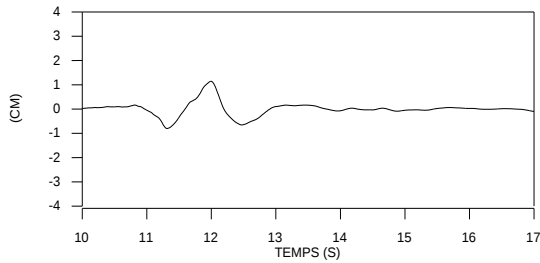
Aceleròmetro de LORCA: ubicado en el sótano de la antigua cárcel



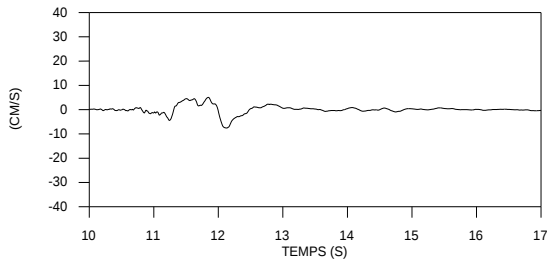
Acelerograma de 3 comp. de la estación de Lorca

**Lorca 11/05/2011
Comp V**

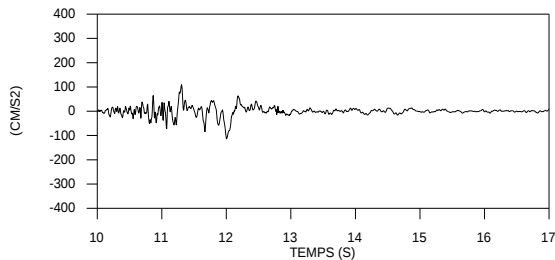
DESPLAÇAMENT



VELOCITAT

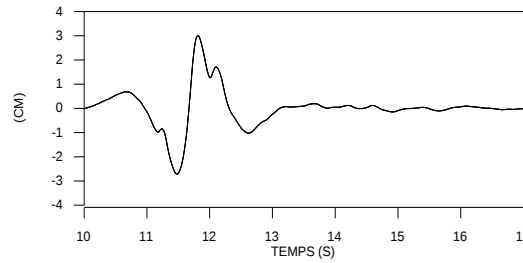


ACCELERACIÓ

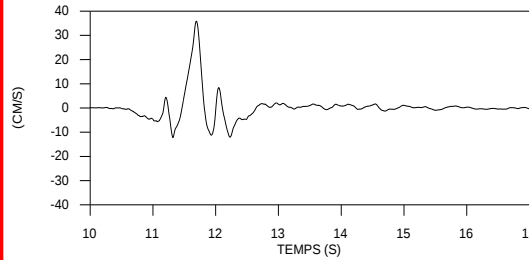


**Lorca 11/05/2011
Comp N30W**

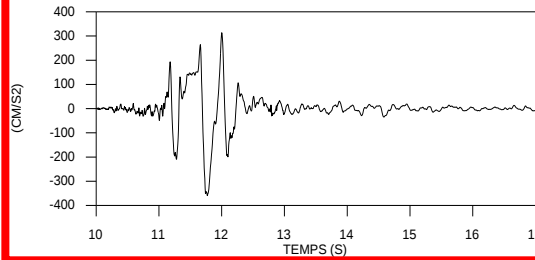
DESPLAÇAMENT



VELOCITAT

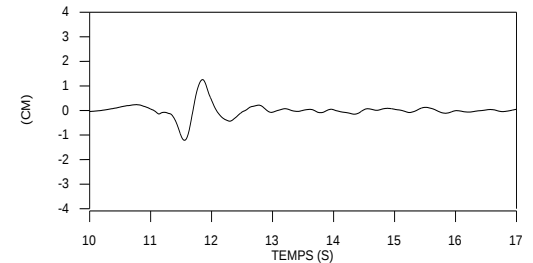


ACCELERACIÓ

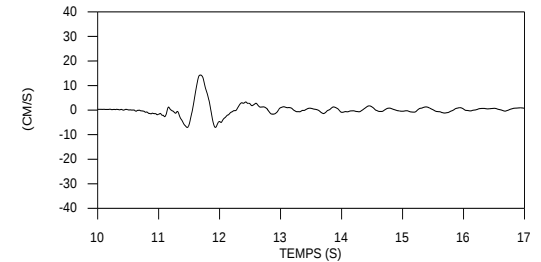


**Lorca 11/05/2011
Comp E30N**

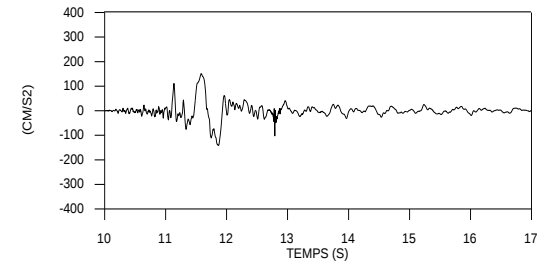
DESPLAÇAMENT



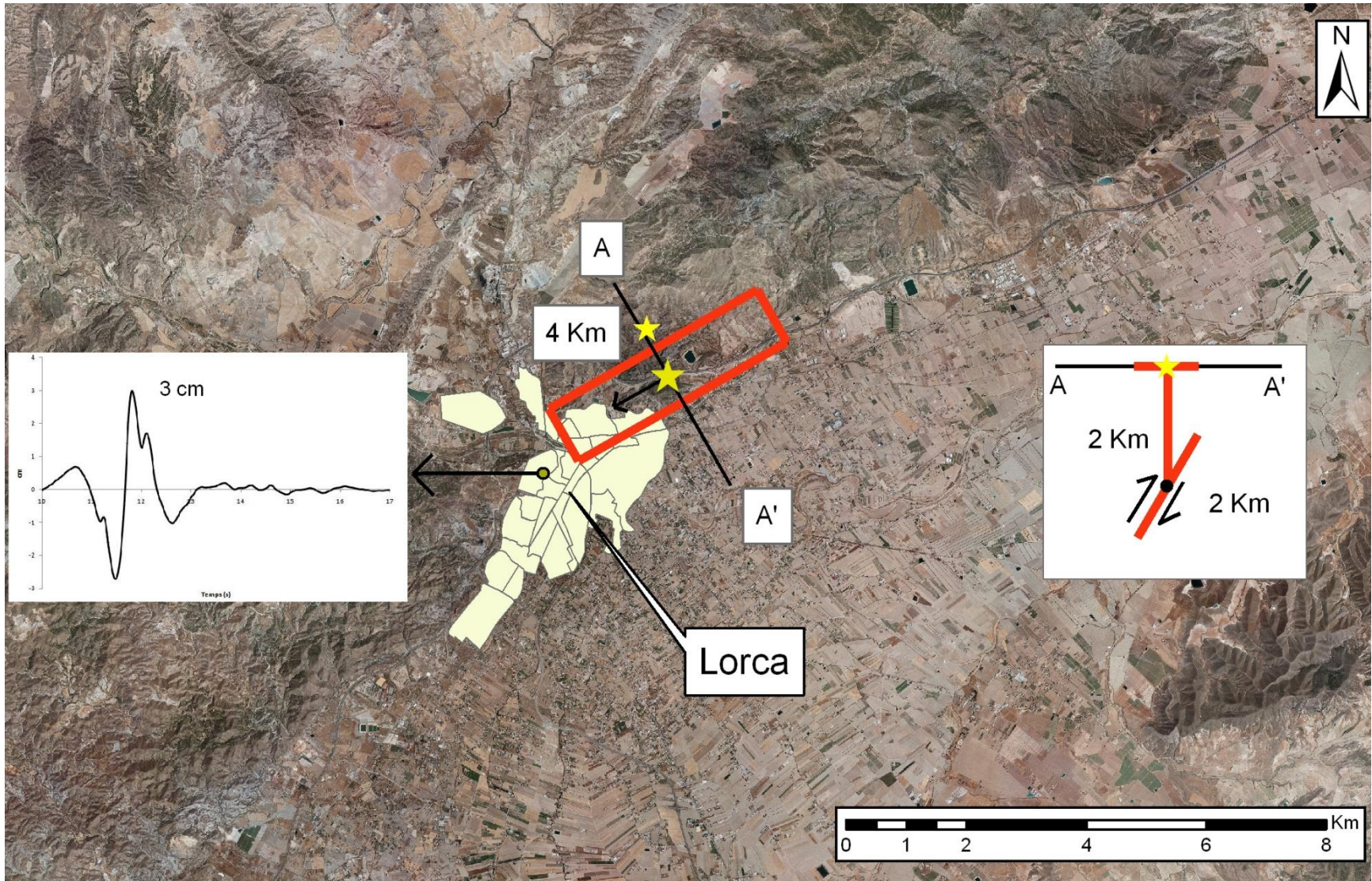
VELOCITAT



ACCELERACIÓ



Efecto de directividad de la propagación de la ruptura hacia el SO



Ejemplos del desplazamiento observado en la ciudad



Shear crack onto the castle tower – sliding toward north direction



Shear crack onto the castle tower – sliding toward north direction

D. Combescure et al., 2011

Rotación de segmentos del Obelisco de la Carrera



Iglesia del Paso Blanco



Cúpula de la iglesia del Paso Blanco



13 cm de desplazamiento entre muros y cúpula



Desplazamiento de máquinas en dirección Norte



Sliding of heavy machinery with loss of the supports

D. Combescure et al., 2011



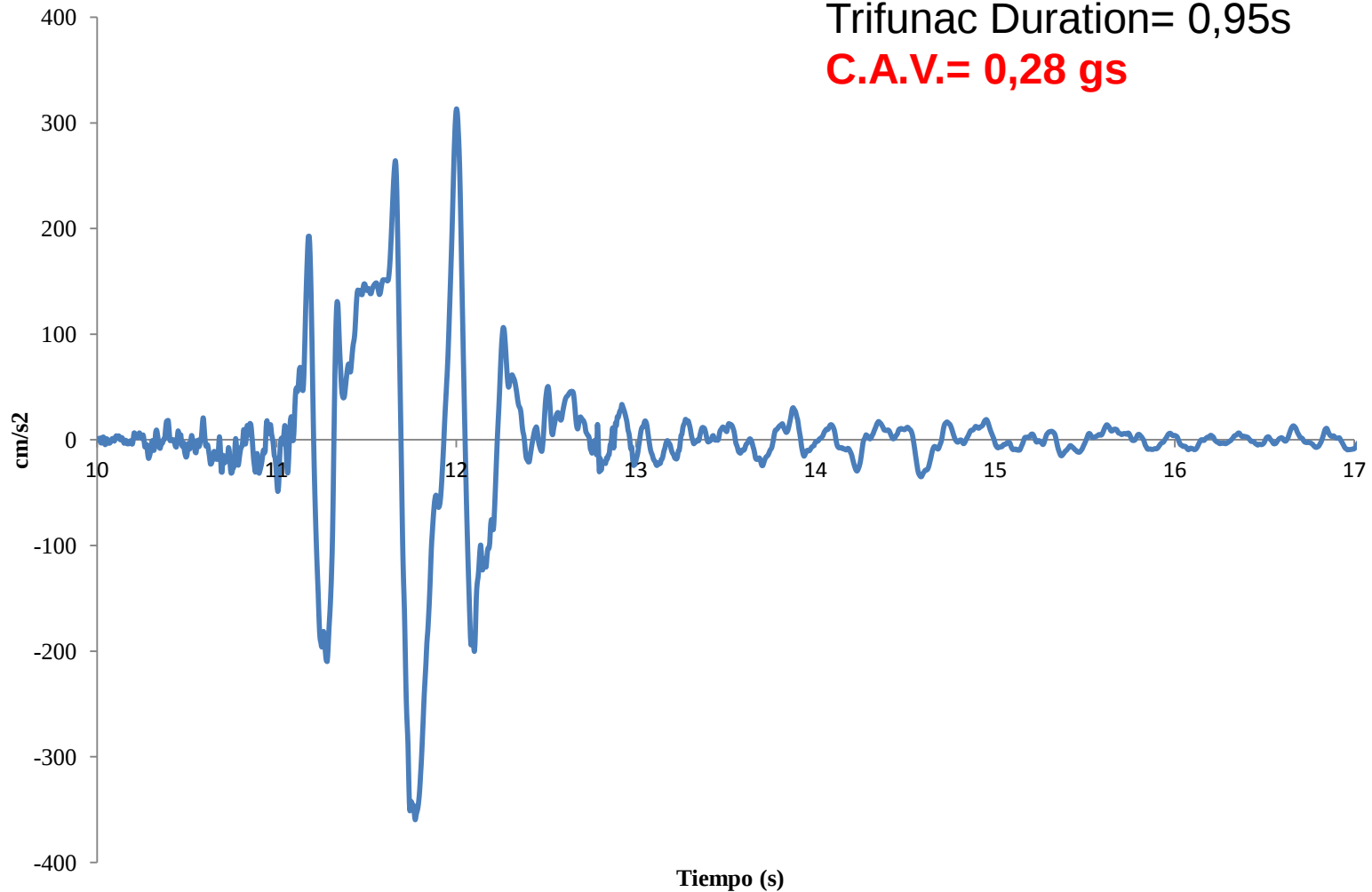
Sliding of heavy machinery towards North

Componente N30°O del acelerograma de Lorca

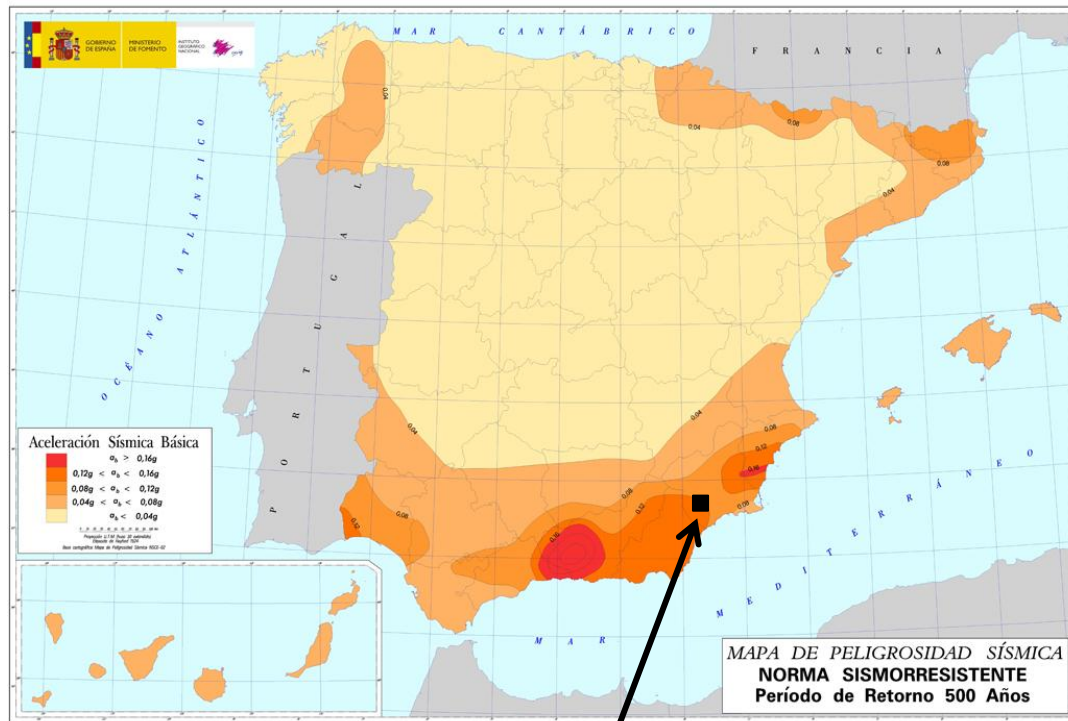
PGA = 0,376 g

Trifunac Duration= 0,95s

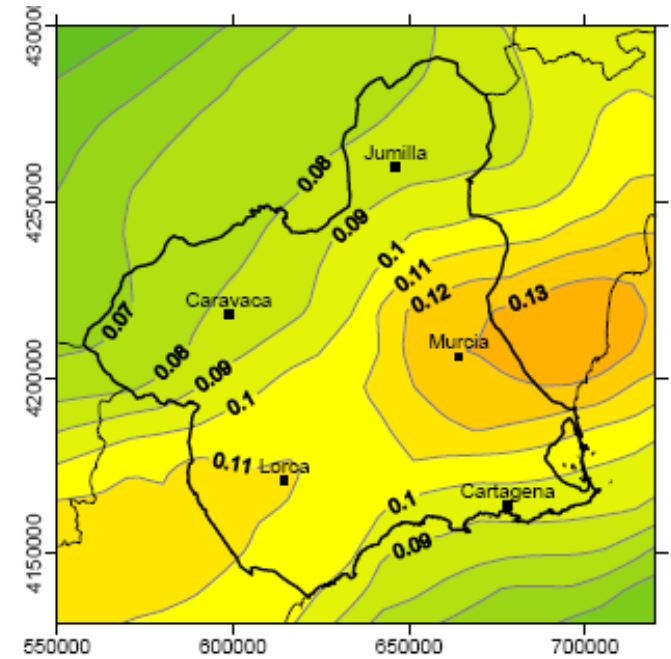
C.A.V.= 0,28 gs



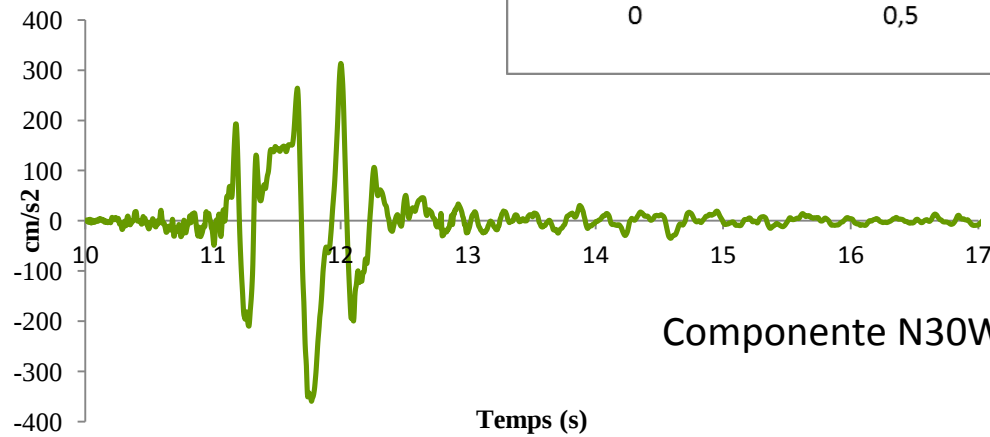
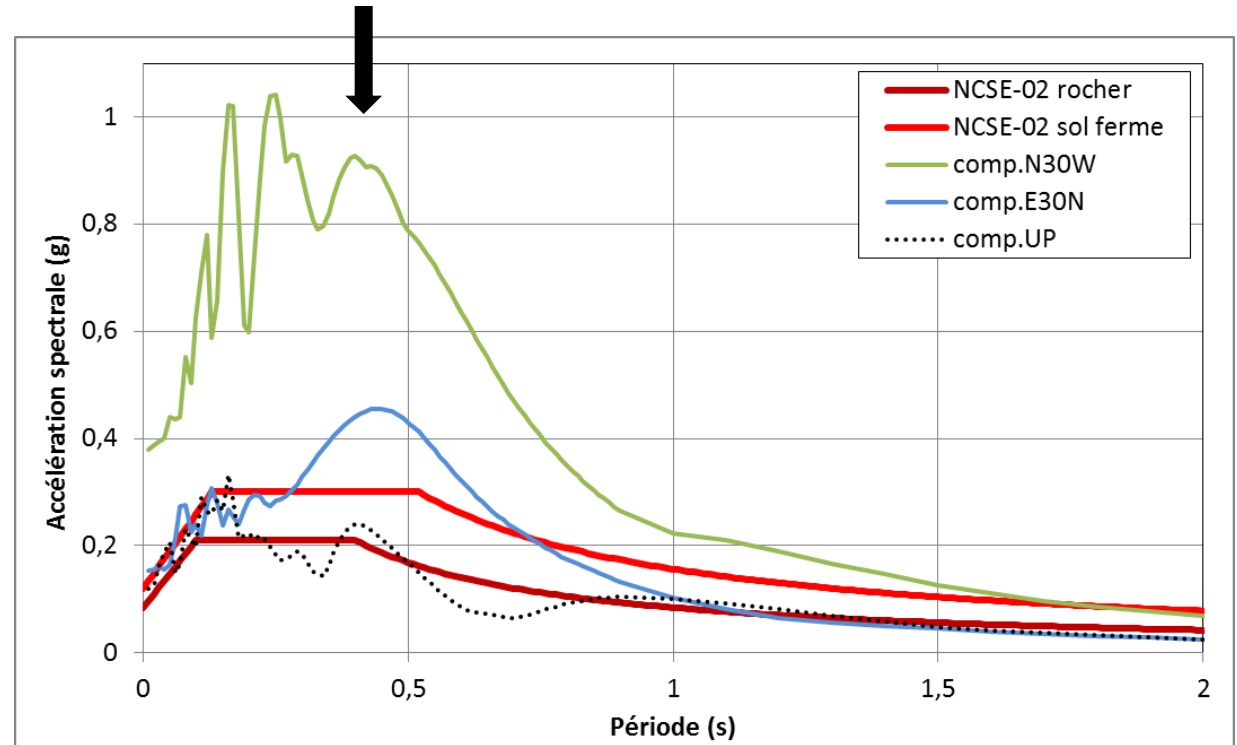
NORMA NCSE-02 y Plan de Emergencia de la región de Murcia



Aceleración de referencia en Lorca = 0,12g

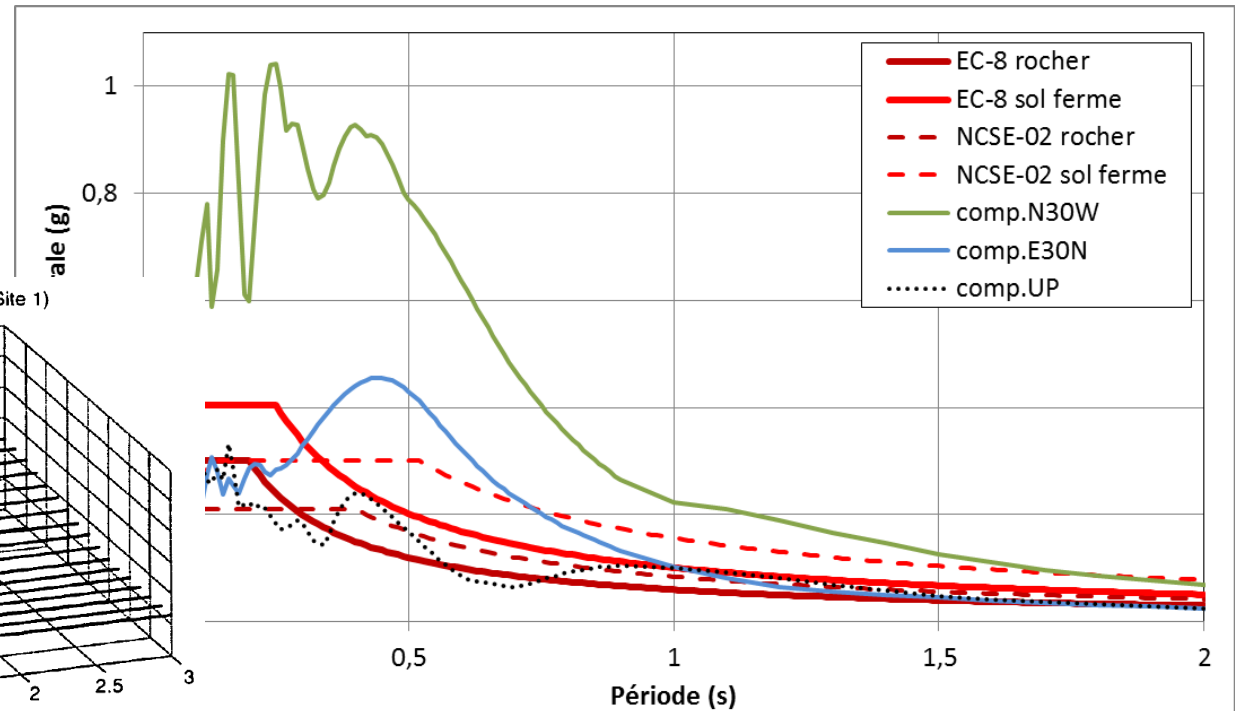
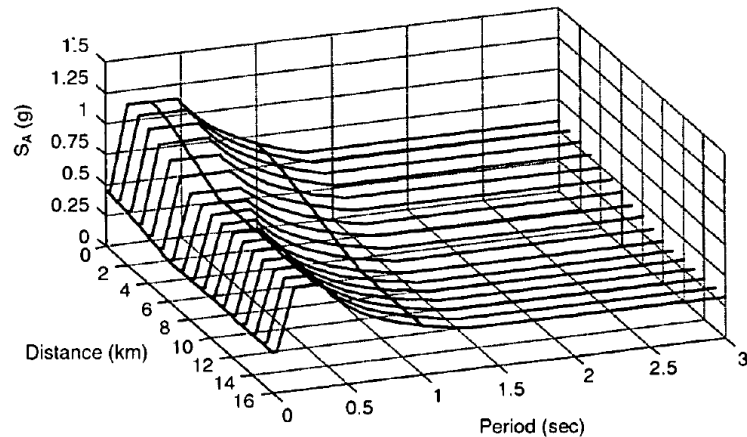


Espectros de respuesta respecto espectros de NCSE-02

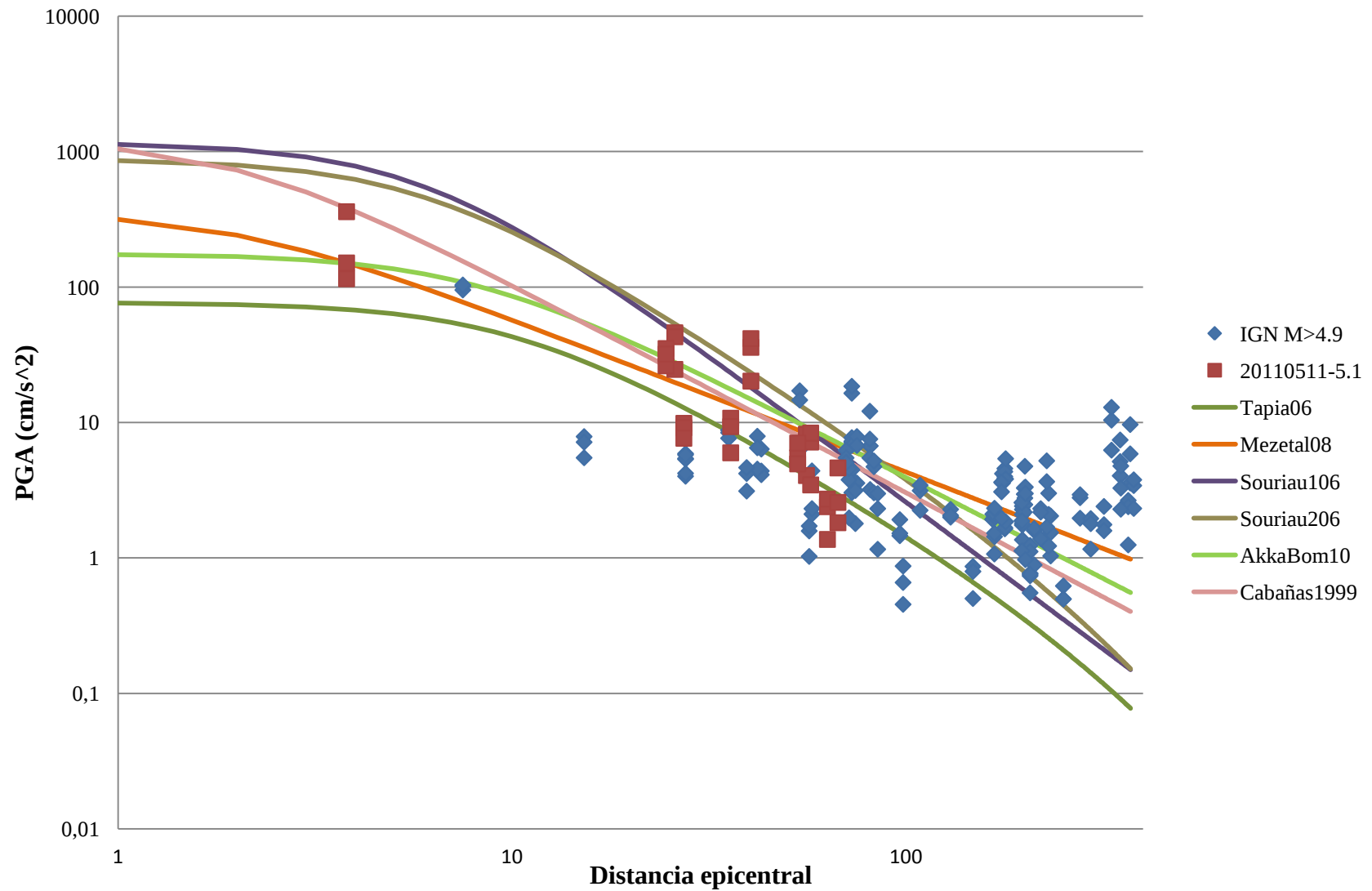


Falla de Chelungpu sismo de Chichi (Chai *et al.*, 2000)

Near Fault Design Spectrum ($Z=0.33g$, Site 1)



Si se retira el pico a 0,4 s, se obtiene mayor coherencia con las mesetas de los espectros EC-8





Lorca,
11 de mayo de 2011

Deformaciones
co-sísmicas:
DInSAR/GPS

T. Frontera⁽¹⁾, A. Concha⁽¹⁾,
P. Blanco⁽²⁾, A. Echeverria⁽³⁾,
X. Goula⁽¹⁾, R. Arbiol⁽²⁾,
G. Khazaradze⁽³⁾, F. Pérez⁽²⁾
y E. Suriñach⁽³⁾

(1) Institut Geològic de Catalunya

(2) Institut Cartogràfic de Catalunya

(3) Universitat de Barcelona

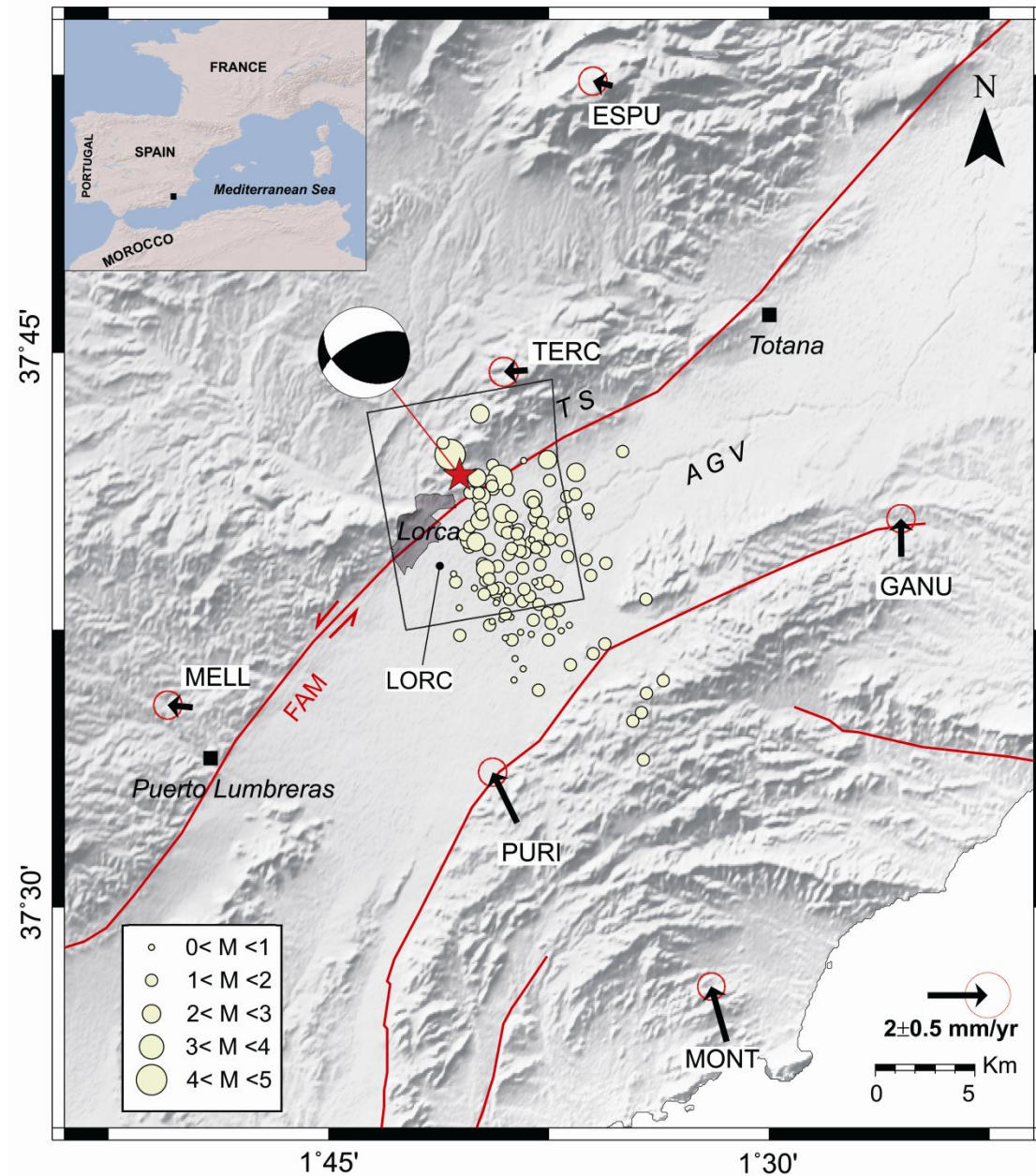


Seísmo principal

$M_w = 5.1$

Mecanismo Focal segons DeLouis (2011)

FAM: Falla Alhama-Murcia
AGV: Valle Alto Guadalentín

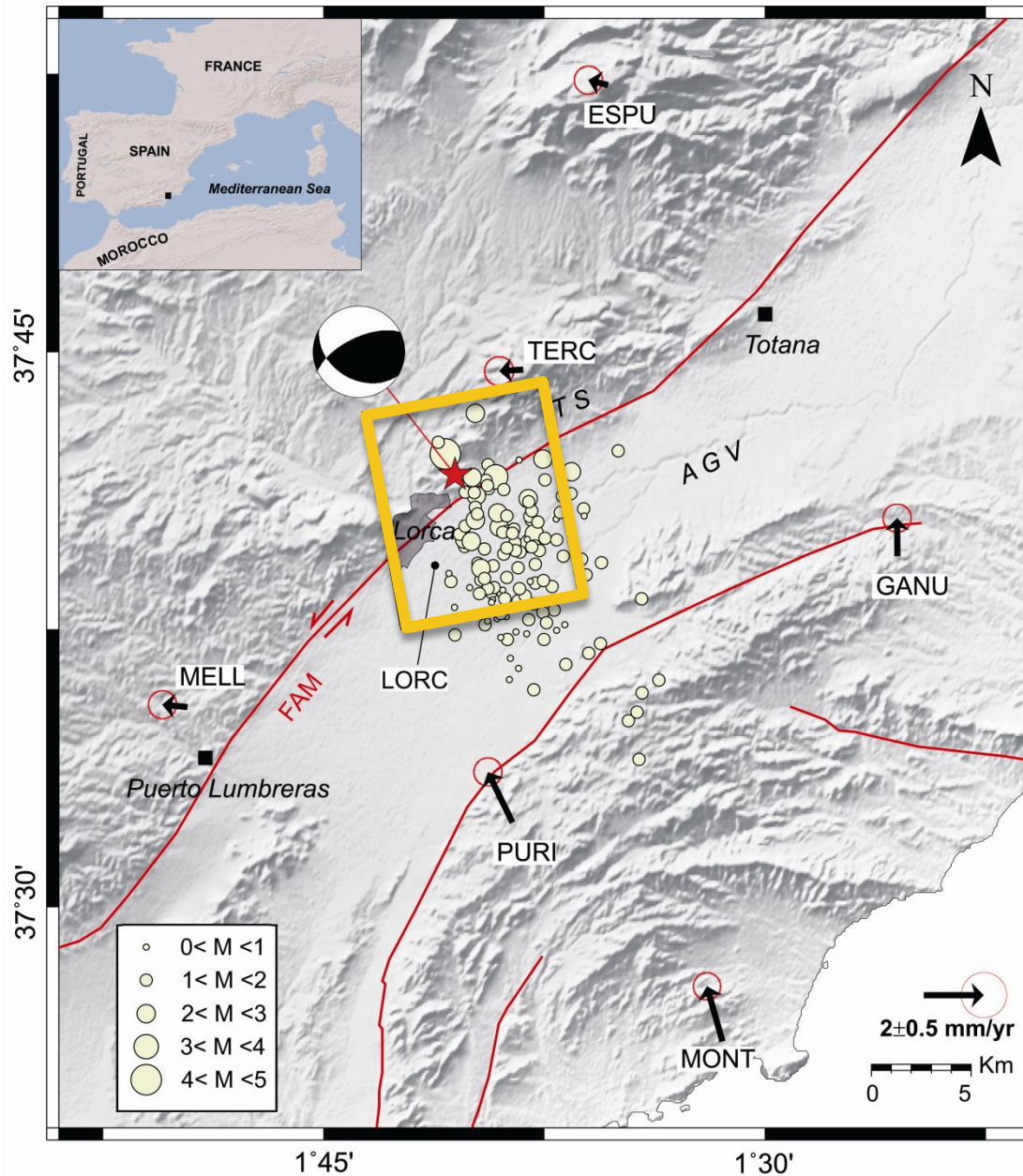


DInSAR (ICC)

TerraSAR-X

25 julio 2008

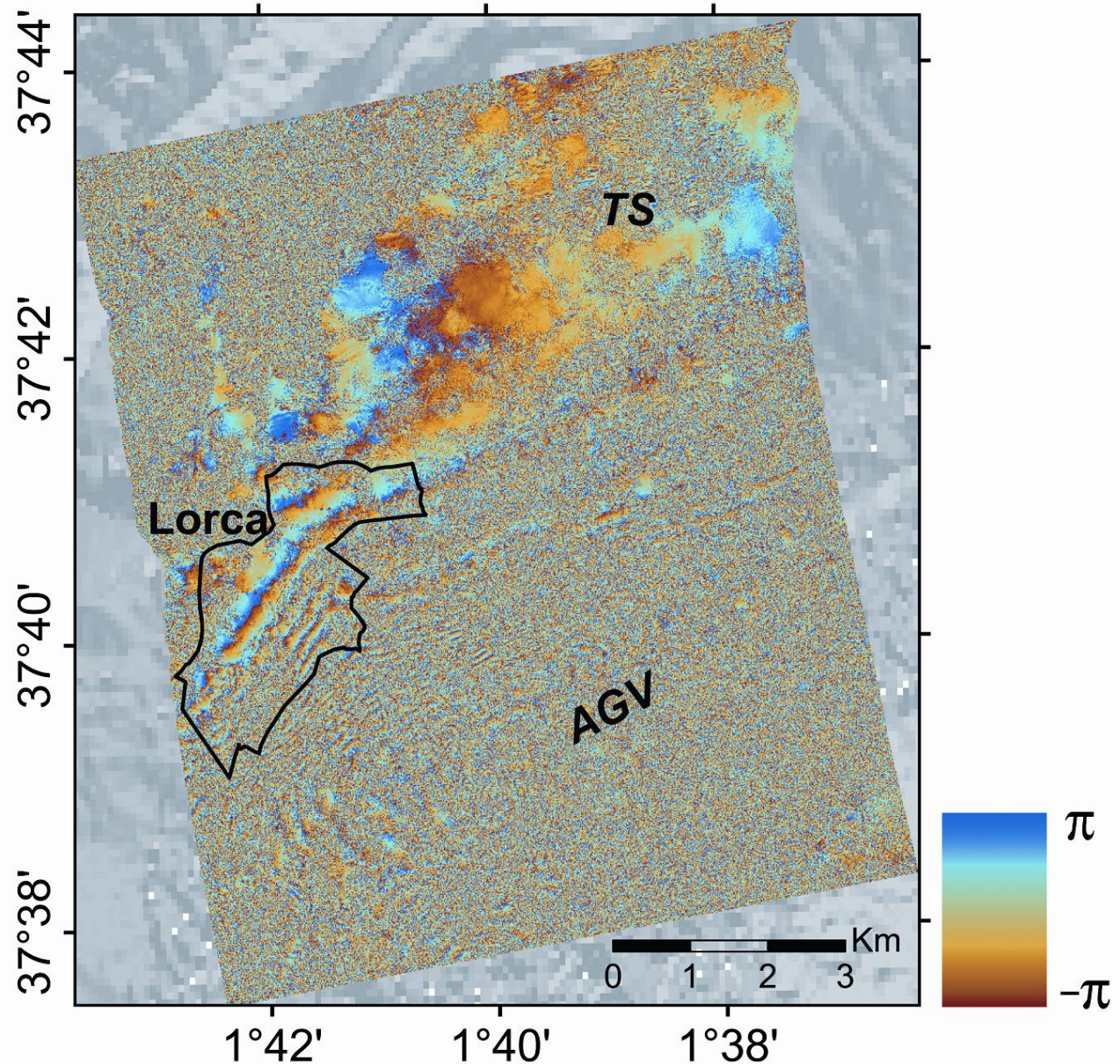
14 mayo 2011

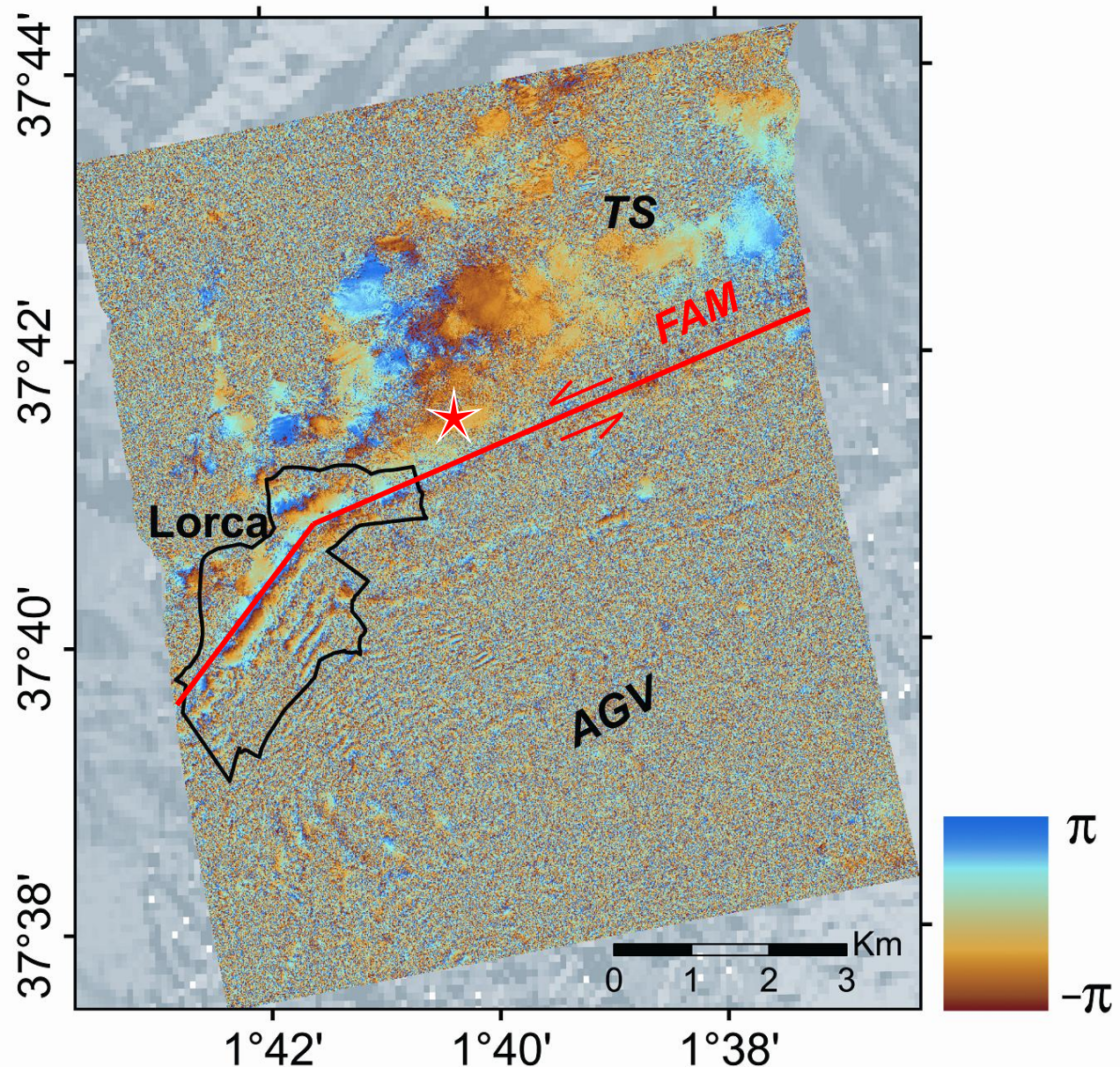


DInSAR (ICC)

1 ciclo=1.55 cm

Movimiento sobre *line of sight (LOS)* del satélite



DInSAR (ICC)**1 ciclo=1.55 cm****Movimiento sobre *line of sight* (LOS) del satélite****EPICENTRO ★****Dada la separació de las imágenes en el tiempo (25 julio 2008 -14 mayo 2011)****¿Qué porcentaje de este movimiento es cosísmico?**

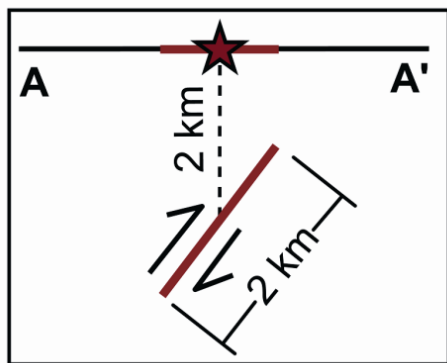
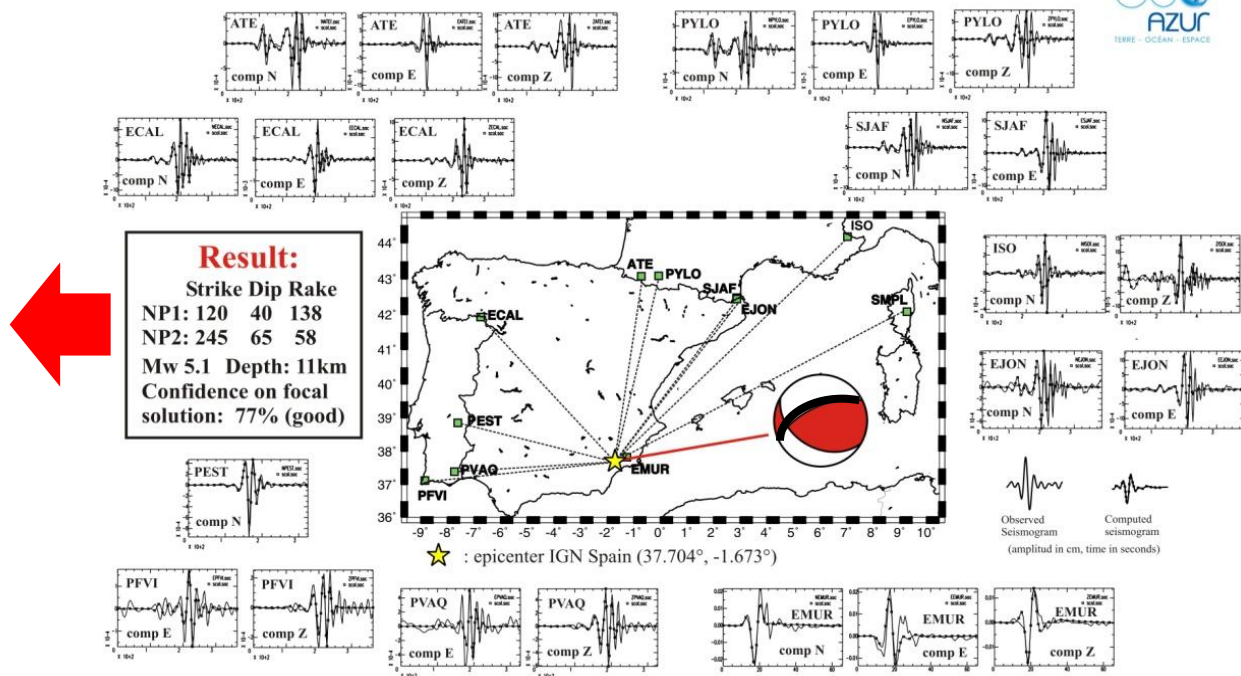
Modelo numérico (IGC)

Orientación del plano de ruptura

Strike	Dip	Rake
245	65	58

Dimensiones del plano de ruptura

Lorca earthquake (Spain) May 11, 2011 16h47 UTC



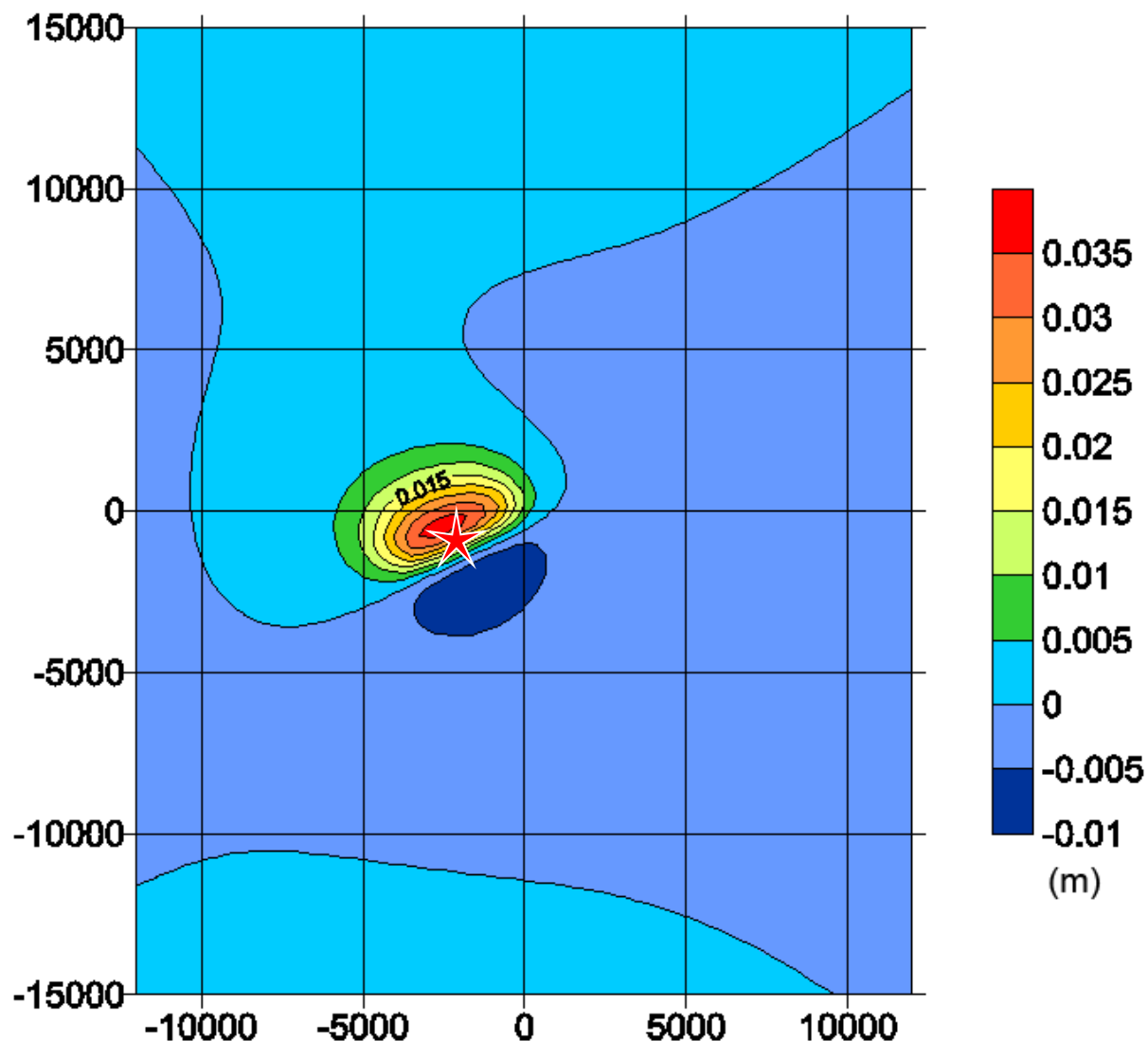
Slip (cm)	L (km)	W (km)
15	4	2

Valores medios (Wells & Coppersmith, 1994)

Modelo numérico (IGC)

Desplazamiento vertical
superficial

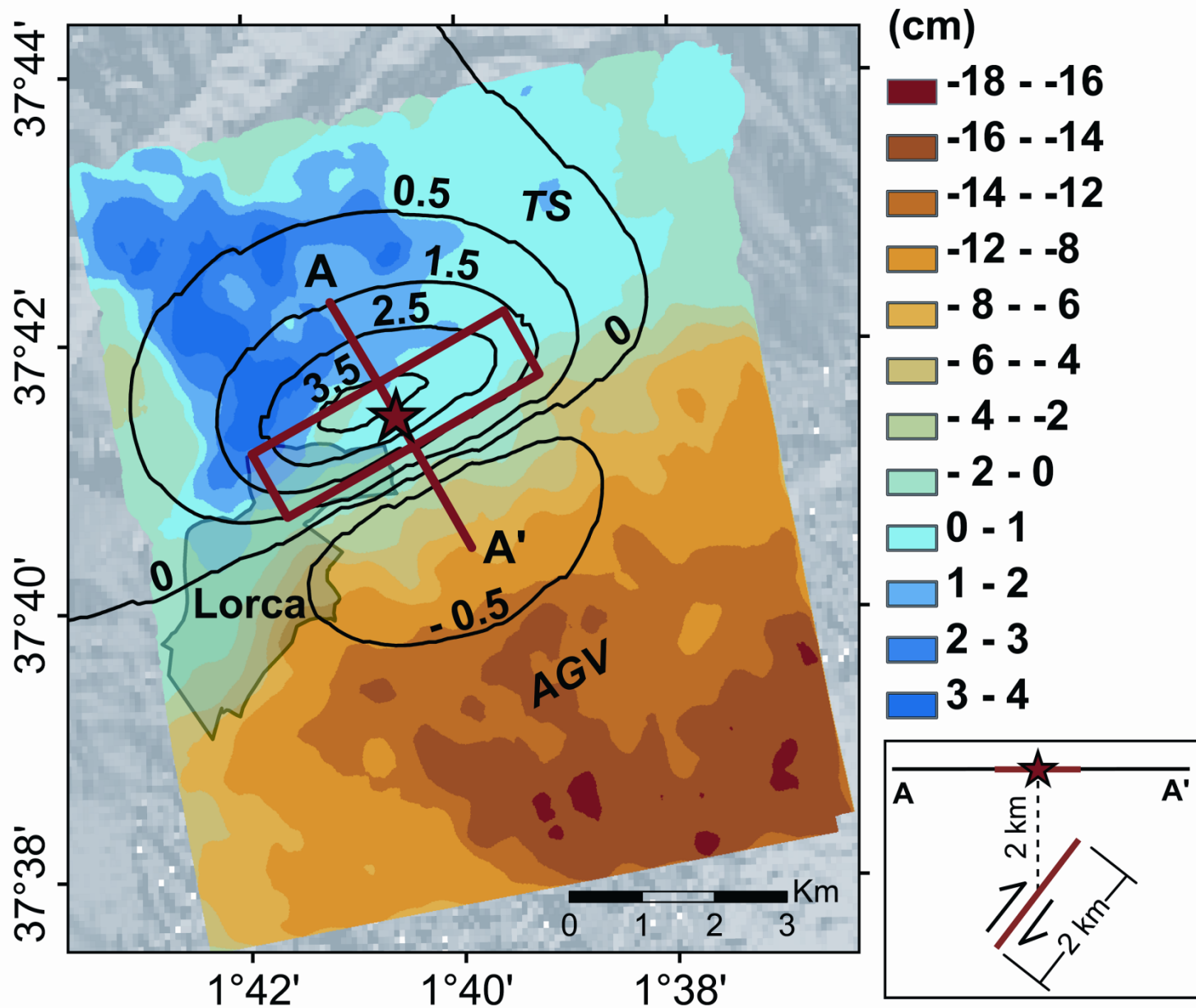
EPICENTRO ★



(0,0) = (-1.6514° E, 37.6975° N)

epicentro: -1.6756° E, 37.6945° N

DInSAR
(2008-2011)
+
Modelo
numérico



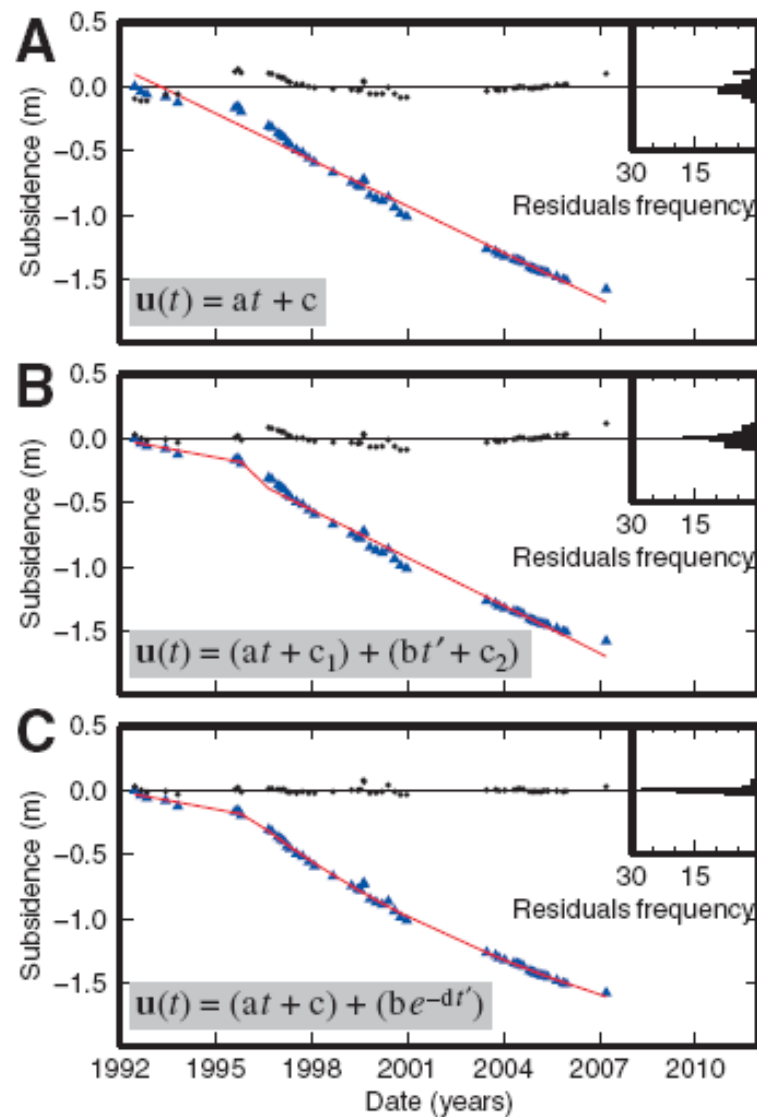
Técnica	Máx. depl. vertical bloque N (mm)	Máx. depl. vertical bloque S (mm)	Tasa despl. vertical (mm / año)
DInSAR (2008-2011) (este estudio)	+ 30	-180	- 64.2
Modelo numérico (este estudio)	+ 40	- 10	-
DInSAR (1992-2011) (González y Fernández, 2011)	-	-	- 100 *

* Medidas realizadas antes del terremoto de Lorca (11/05/2011)

(González y Fernández, 2011)

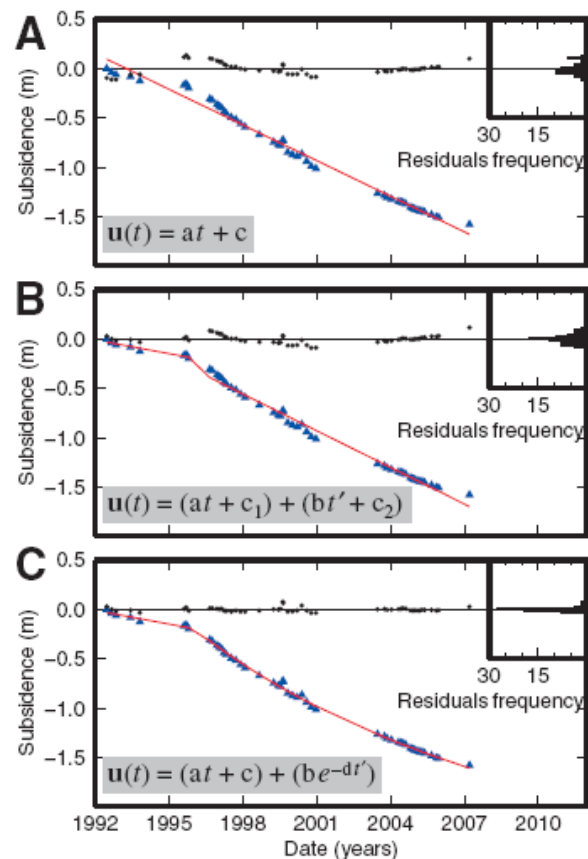
Técnica	Máx. depl. vertical bloque N (mm)	Máx. depl. vertical bloque S (mm)	Tasa despl. vertical (mm / año)
DInSAR (2008-2011) (este estudio)	+ 30	-180	- 64.2
Modelo numérico (este estudio)	+ 40	- 10	-
DInSAR (1992-2011) (González y Fernández, 2011)	-	-	- 100 *

* Medidas realizadas antes del terremoto de Lorca (11/05/2011)

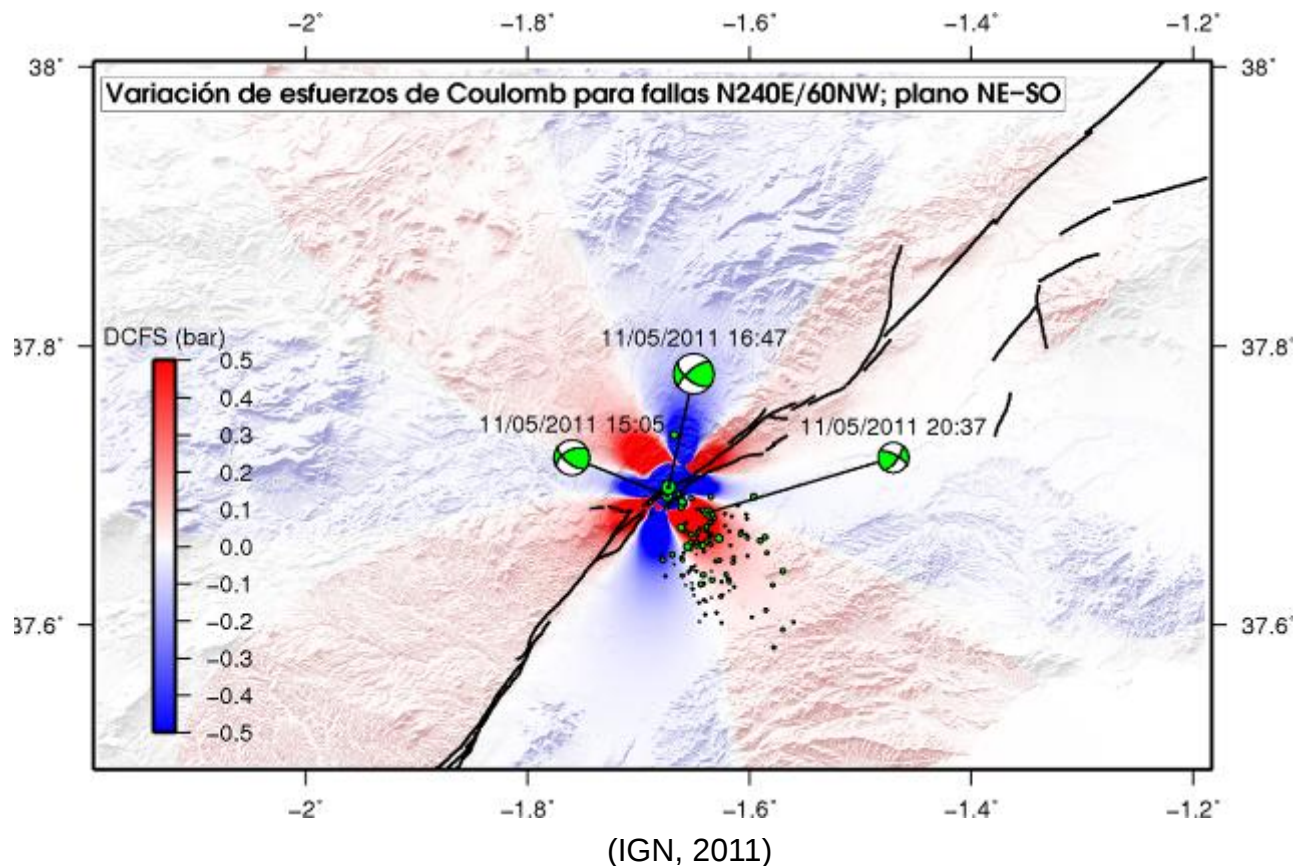


(González y Fernández, 2011)

La extracción de agua es una componente importante de los movimientos verticales en el bloque sur



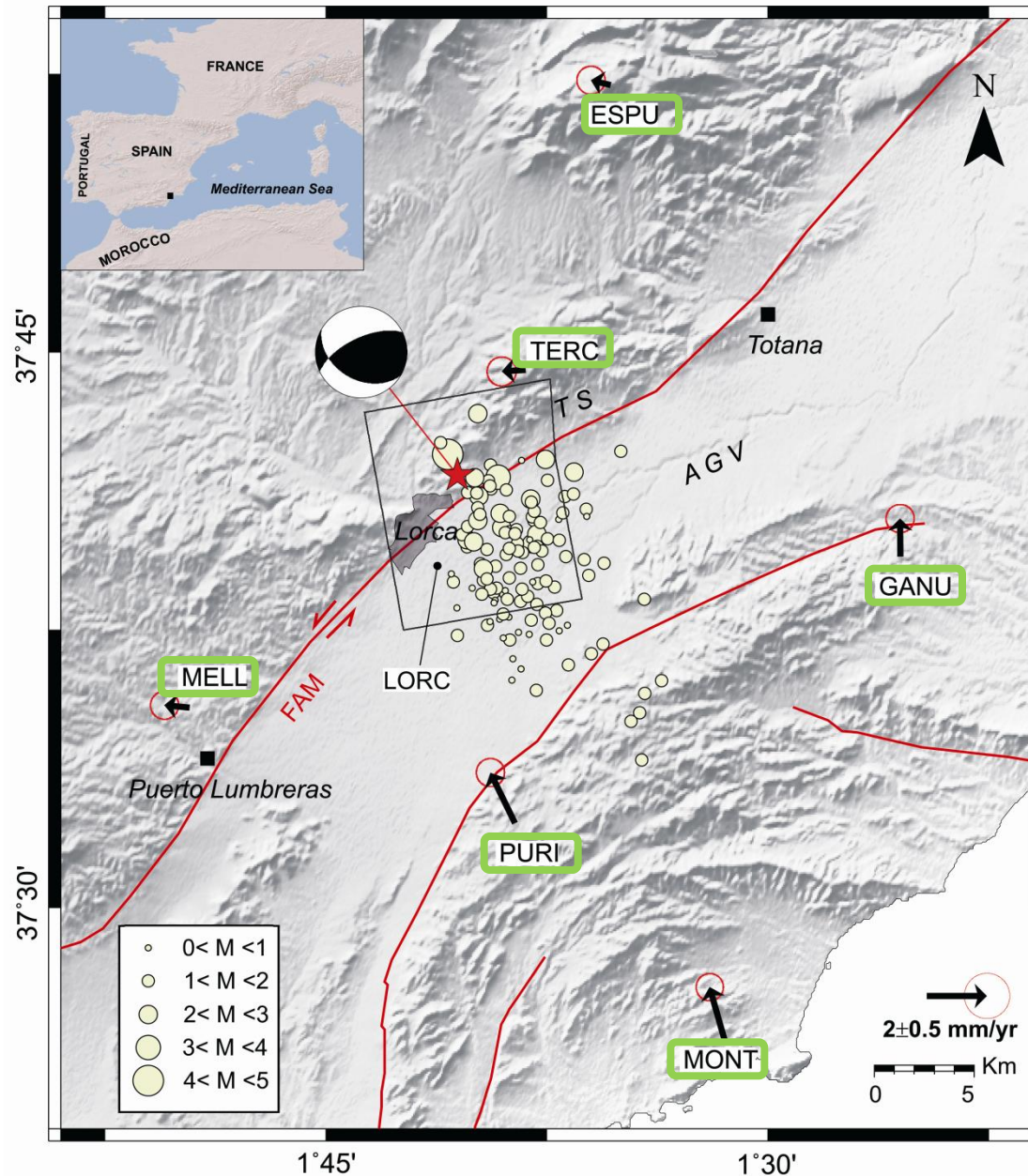
(González y Fernández, 2011)



Extracción de agua y concentración alta de esfuerzos ¿podrían controlar la ubicación de las réplicas observadas?

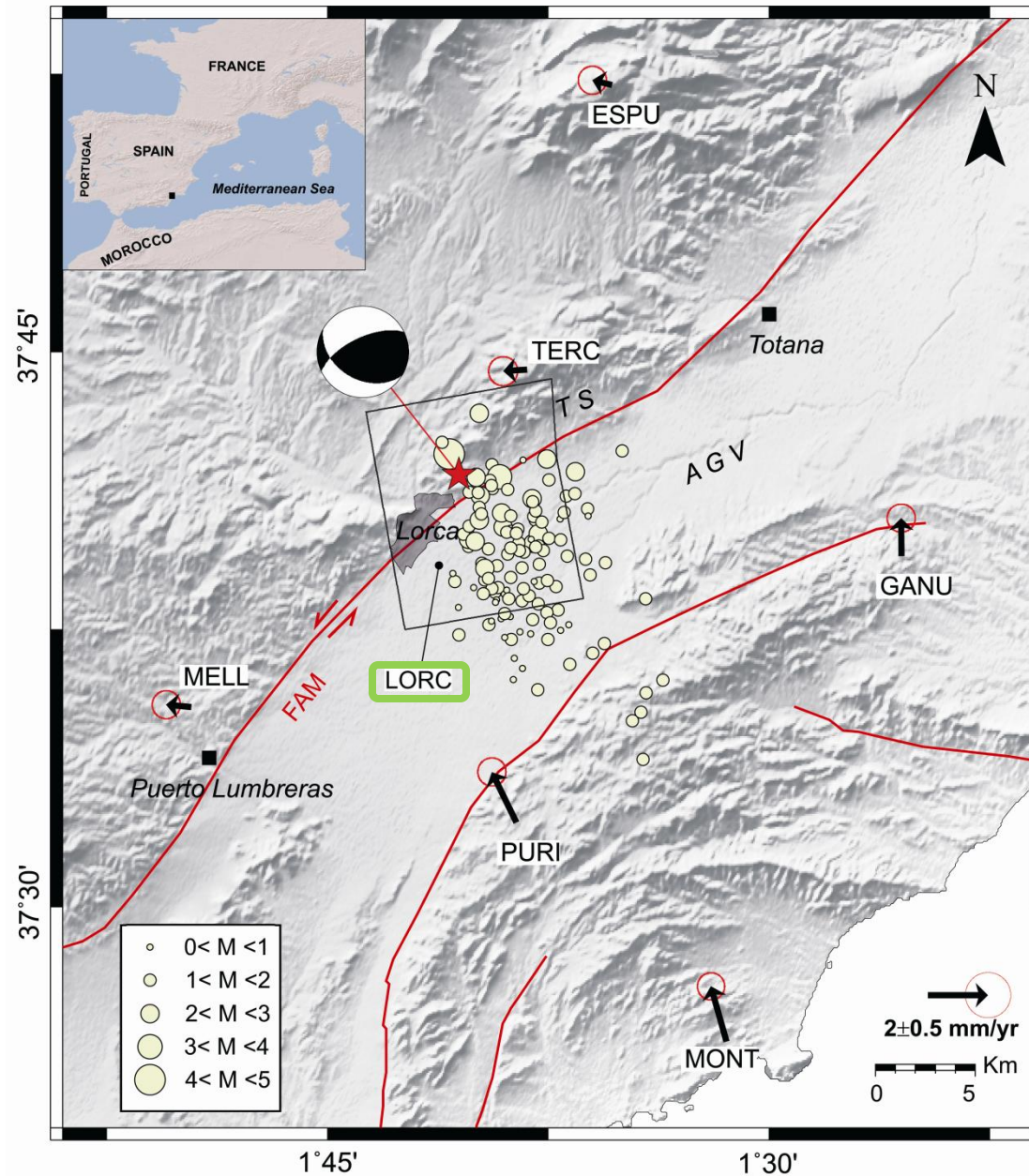
GPS (UB)
Red CuaTeNeo

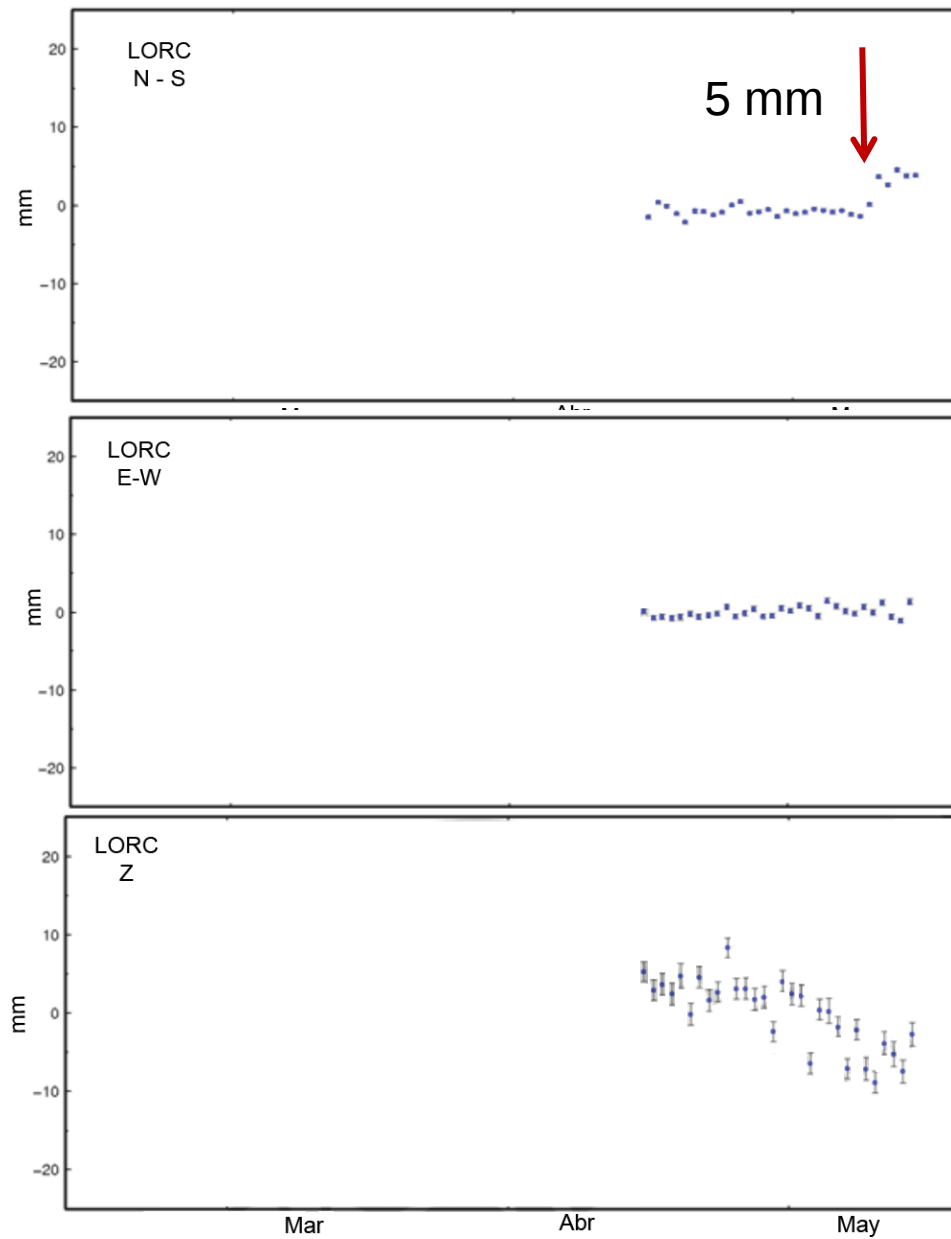
PURI y GANU
1.9 0.5 mm/yr
respecto a
MELL y TERC



GPS
Red Meristemum

LORC



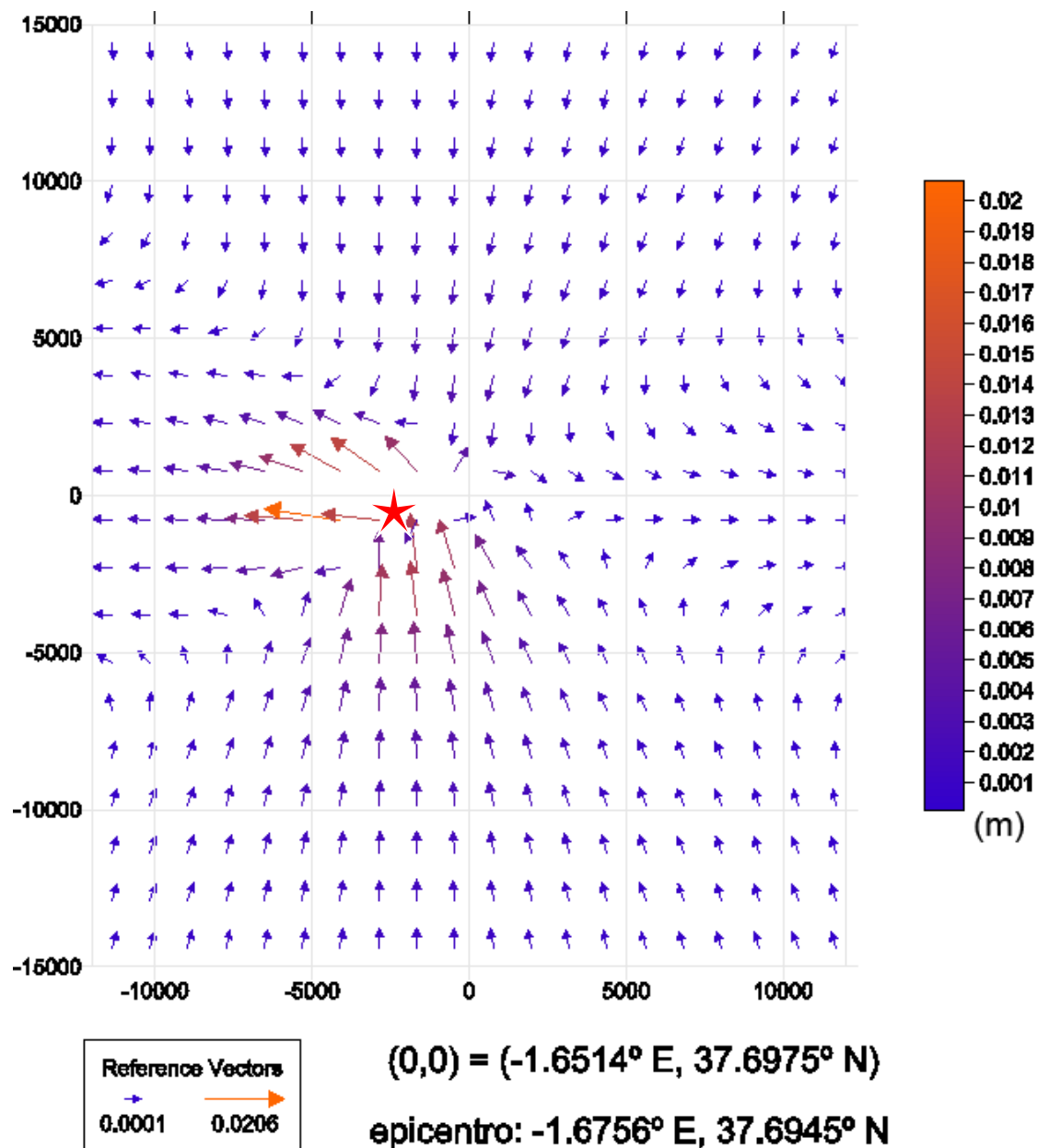
GPS**Red Meristemum****Componentes de
movimiento en la
estación LORC**

(IGN, 2011)

Modelo numérico

Desplazamiento
horizontal

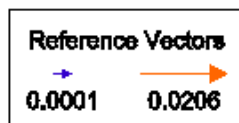
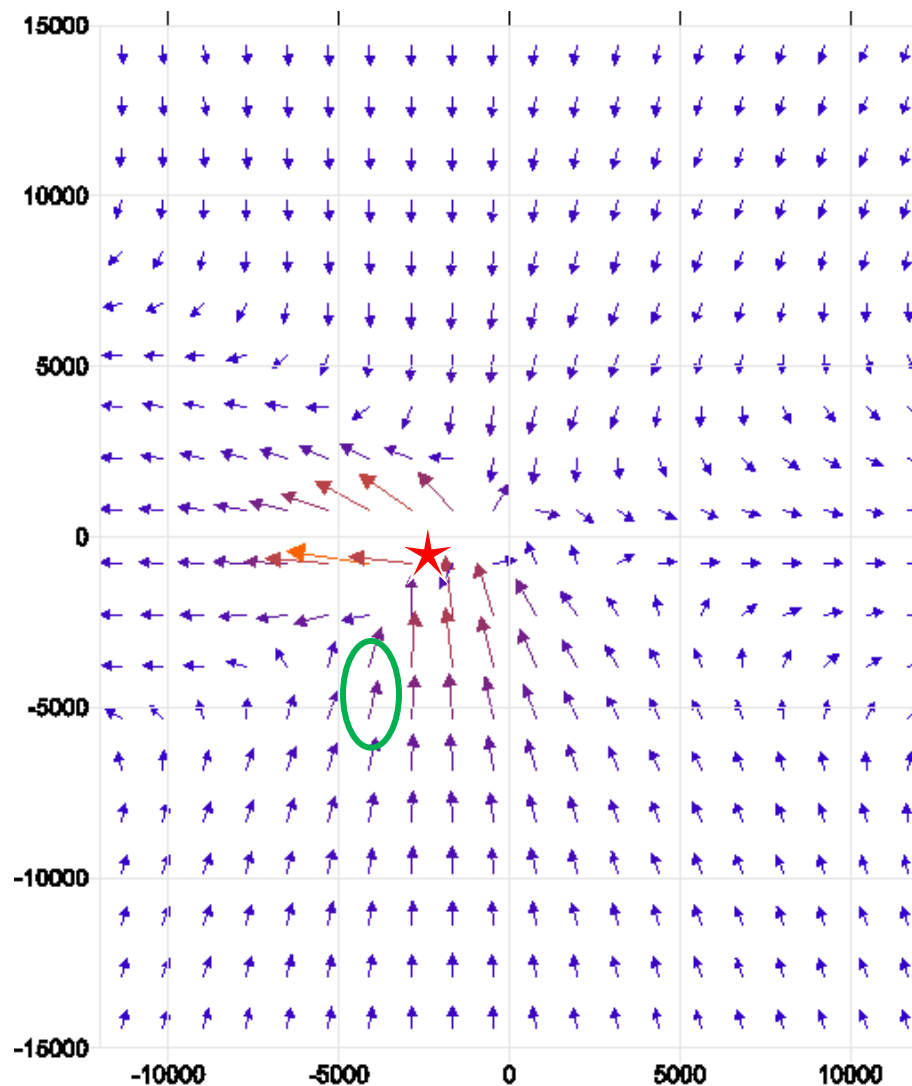
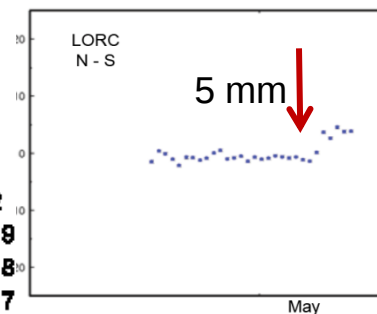
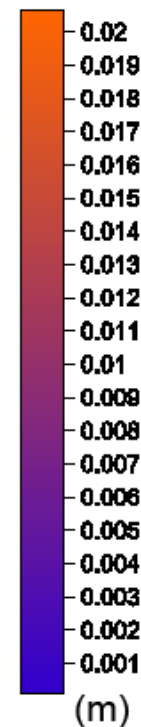
EPICENTRO ★



Modelo numérico

Desplazamiento
horizontal

EPICENTRO ★

 $(0,0) = (-1.6514^\circ \text{ E}, 37.6975^\circ \text{ N})$ epicentro: $-1.6756^\circ \text{ E}, 37.6945^\circ \text{ N}$ LORC:
Red GPS
Meristemum

Conclusiones

- La técnica **DinSAR** representa una herramienta de uso rápido y de costos relativamente bajos que permite evaluar los movimientos del terreno cubriendo grandes extensiones.
- La existencia de redes de monitoreo **GPS** permiten una caracterización detallada y precisa de los movimientos del terreno. En zonas tectónicamente activas resultan de gran valor para el monitoreo constante de las estructuras geológicas o de eventos sísmicos repentinos.
- Este estudio multidisciplinario combina técnicas geodésicas de monitoreo con modelos numéricos de ruptura que permiten evaluar y verificar los movimientos cosísmicos e identificarlos y separarlos de otros posibles fenómenos que generan movimientos verticales del terreno.
- En el caso del evento de Lorca, se pudo separar la componente de movimientos cosísmicos (repentinos) de los ocasionados por subsidencia por extracción de agua en el bloque sur de la falla (constantes e incluso mas grandes que los cosísmicos).

Solid Earth Discuss., 3, 1–12, 2011
 www.solid-earth-discuss.net/3/1/2011/
 doi:10.5194/sed-3-1-2011
 © Author(s) 2011. CC Attribution 3.0 License.



This discussion paper is/has been under review for the journal Solid Earth (SE).
 Please refer to the corresponding final paper in SE if available.

DInSAR coseismic deformation of the May 2011 M_w 5.1 Lorca earthquake, (Southern Spain)

T. Frontera¹, A. Concha², P. Blanco³, A. Echeverria⁴, X. Goula¹, R. Arbiol³,
 G. Khazaradze⁴, F. Pérez³, and E. Suriñach⁴

¹Institut Geològic de Catalunya, Seismology Dept., Balmes 209–211, Barcelona 08006, Spain

²Institut Geològic de Catalunya, Geological Engineering and Hazards Dept., Balmes 209–211, Barcelona 08006, Spain

³Institut Cartogràfic de Catalunya, Remote Sensing Dept., Parc de Montjuïc s/n, Barcelona 08038, Spain

⁴Universitat de Barcelona, Geodynamics and Geophysics Dept., Martí i Franquès s/n, Barcelona 08028, Spain

Received: 14 October 2011 – Accepted: 24 October 2011 – Published:

Correspondence to: T. Frontera (tfrontera@igc.cat)

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

SED

3, 1–12, 2011

DInSAR coseismic deformation of the May 2011 Lorca earthquake

T. Frontera et al.

Title Page

Abstract

Introduction

Conclusions

References

Tables

Figures

◀

▶

◀

▶

Back

Close

Full Screen / Esc

Printer-friendly Version

Interactive Discussion





El terremoto de Lorca del 11 de Mayo de 2011: Efectos sísmicos locales

Sara Figueras ⁽¹⁾

Albert Macau ⁽¹⁾

Myriam Belvaux ⁽²⁾

(1) Instituto Geológico de Catalunya IGC

(2) Bureau de Recherches Géologiques et Minières. BRGM (Francia)



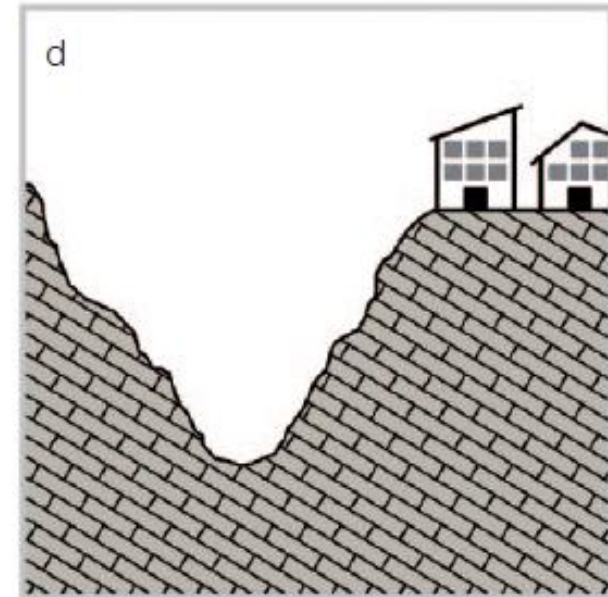
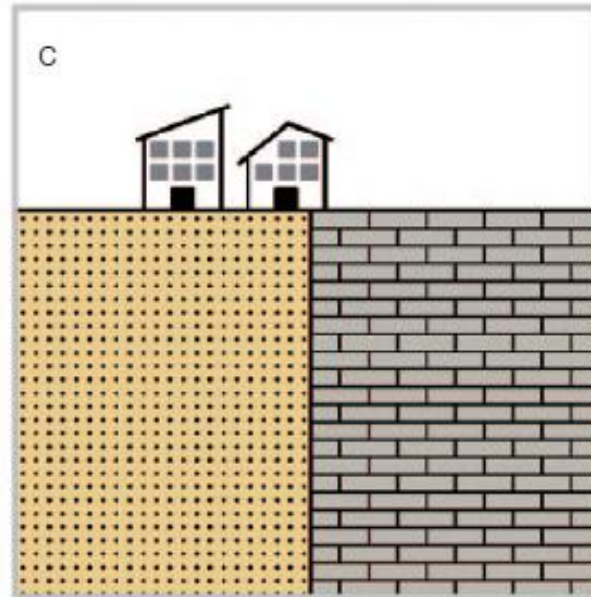
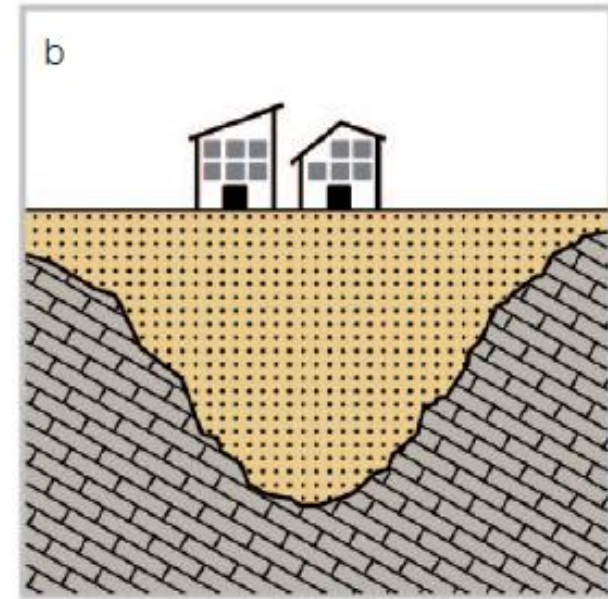
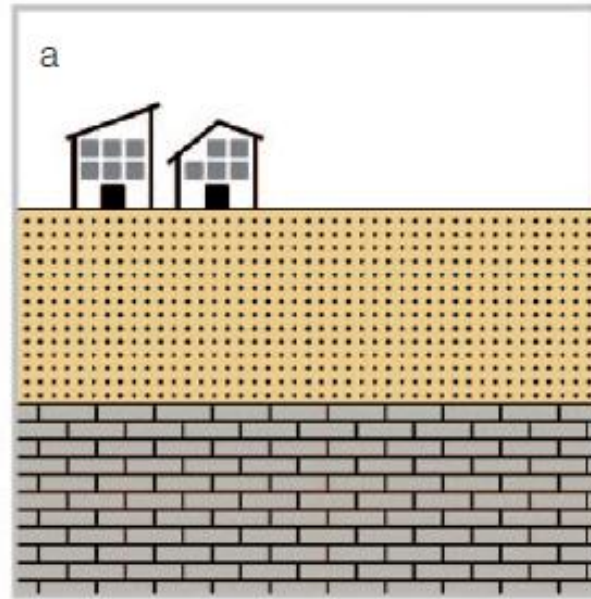
Contenido

- Los efectos sísmicos locales.
- Intervención post sísmica en Lorca.
- Modelización de la respuesta sísmica del suelo.
- Conclusiones.

Los efectos sísmicos locales



Estructuras y configuraciones típicas que pueden generar efectos locales

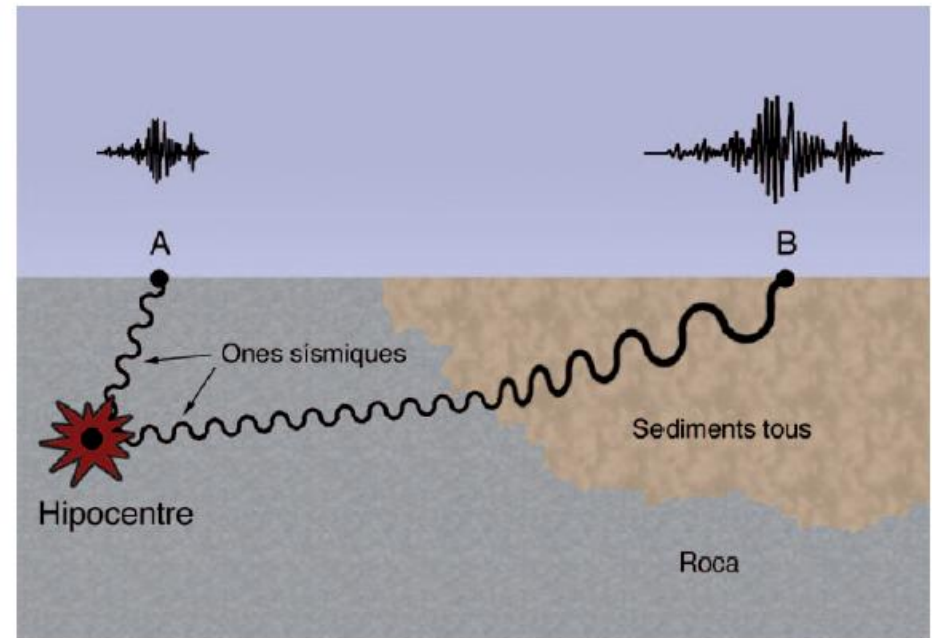


- a) Capas sedimentarias horizontales sobre un sustrato rocoso.
- b) Relleno sedimentario de un valle.
- c) Fuertes discontinuidades laterales.
- d) Relieves (efecto topográfico).

Efectos sísmicos locales

- **Efectos de suelo:**

Amplificación del movimiento del suelo debida a las características geológicas, litológicas y geomecánicas de las formaciones superficiales.

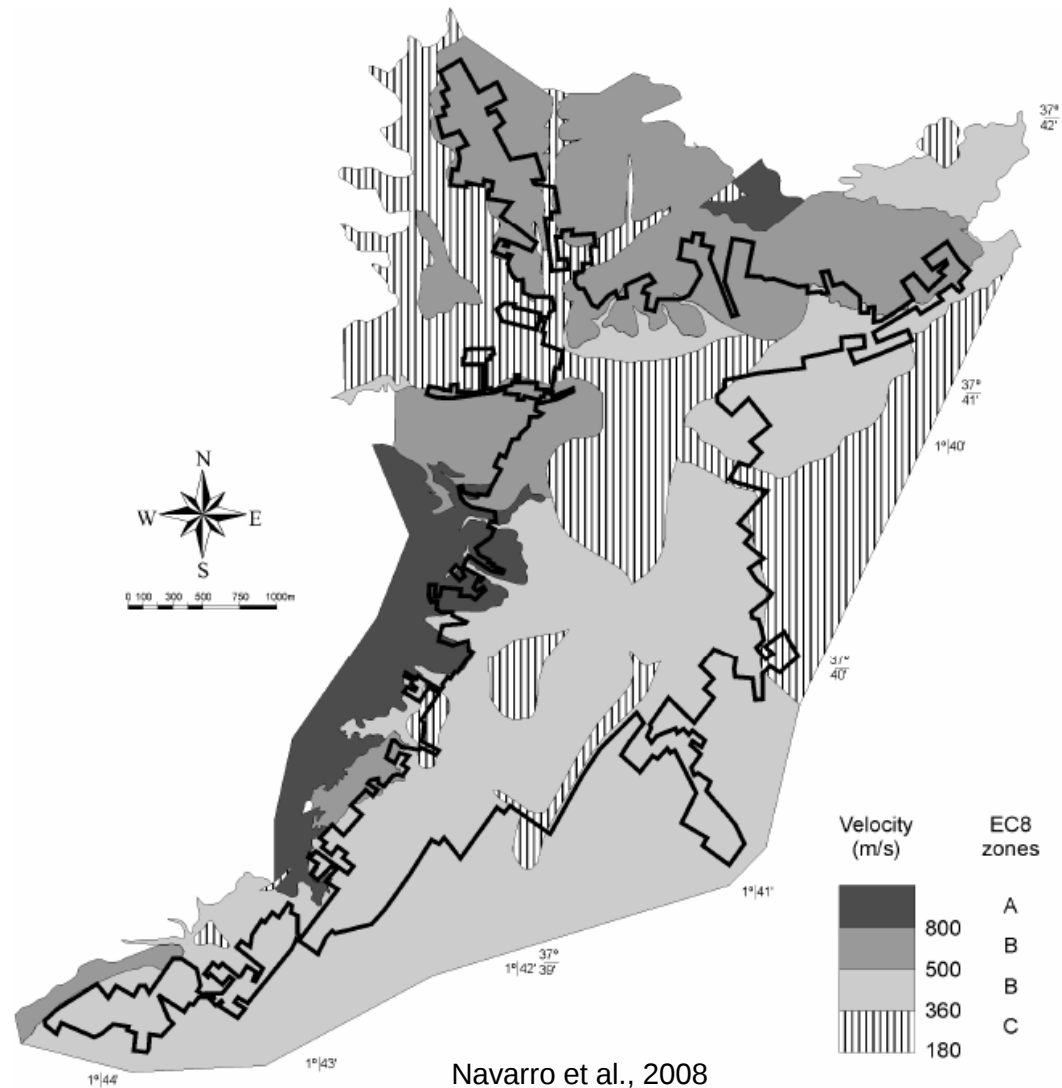


- **Efecto topográfico:** Amplificación del movimiento del suelo en la cima de los relieves respecto a la base.
- **Efectos inducidos:** licuefacción y deslizamientos de ladera.

Efectos de suelo durante el sismo de Lorca?

Estudios previos

- Escala regional:
RISMUR
SISMIMUR, DGPC, 2006
- Escala local:
ITGE, 1992
Navarro et al., 2006
Navarro et al., 2008



Efectos de suelo durante el sismo de Lorca?

■ Diferencias geográficas en la distribución de daños en los edificios:

- El sector mas afectado fue el barrio de la Viña, el más alejado del epicentro
- Mas daños en los edificios situados en el llano que en los de la parte alta de la ciudad

Tipo Suelo	Total Edificios	Total Dañados	% daños sobre total
IA	369	24	6,50%
IB	1006	74	7,36%
II	2013	127	6,31%
III	3374	664	19,68%

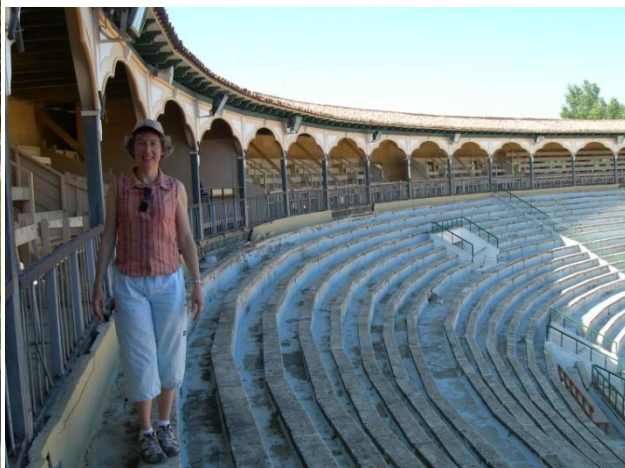
IGN-IGME, 2011



Posibles efectos de suelo

Intervención postsísmica en Lorca

- **Fecha:** 24-27 de mayo de 2011.
- **Participantes:** Myriam Belvaux (BRGM)
Albert Macau (IGC)
Sara Figueras (IGC)
- **Apoyo logístico: Policía local de Lorca**
Agustín Fernández
Pedro Servet
Antonio Fernández



Campaña de campo

- **Objetivo:**

Comprobar posibles efectos de suelo en la ciudad de Lorca.

- **Como?**

Caracterización de la capa de suelos poco consolidados a partir de registros de ruido sísmico:

Técnica del cociente espectral H/V

Técnica de “array”

Caracterización de la respuesta sísmica (FT):

Registro de réplicas en distintos emplazamientos.

Instrumentación

H/V:

4 sensores LE 5s +
CityShark (IGC, BRGM)



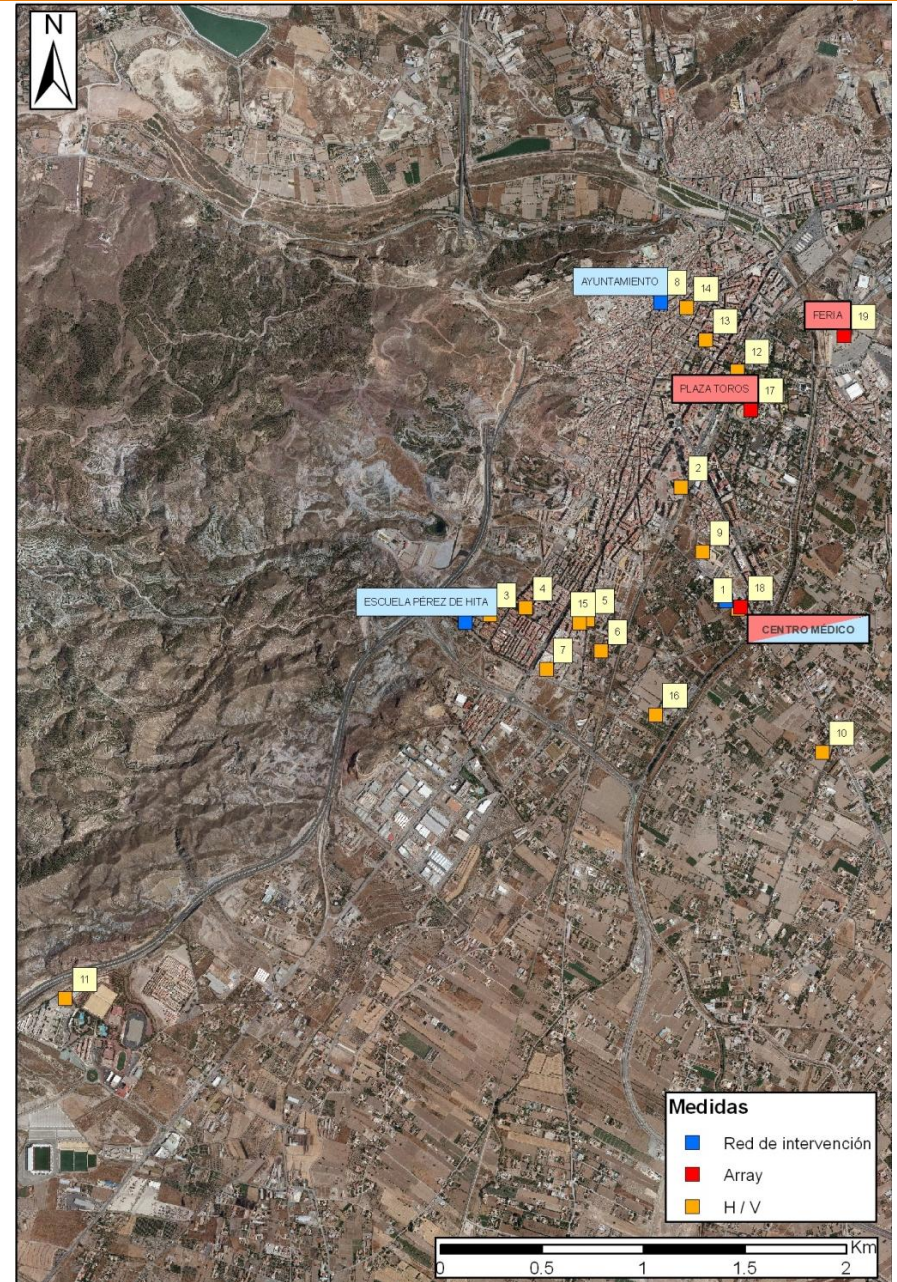
Array:

11 sensores 1Hz
+ Summit (IGC)



Réplicas:

3 sensores LE 5s +
Spider (IGC)



Técnica H/V

Registro puntual de ruido sísmico. Se obtienen la frecuencia fundamental de vibración del suelo

Medidas en 19 emplazamientos.



Técnica H/V: Resultados

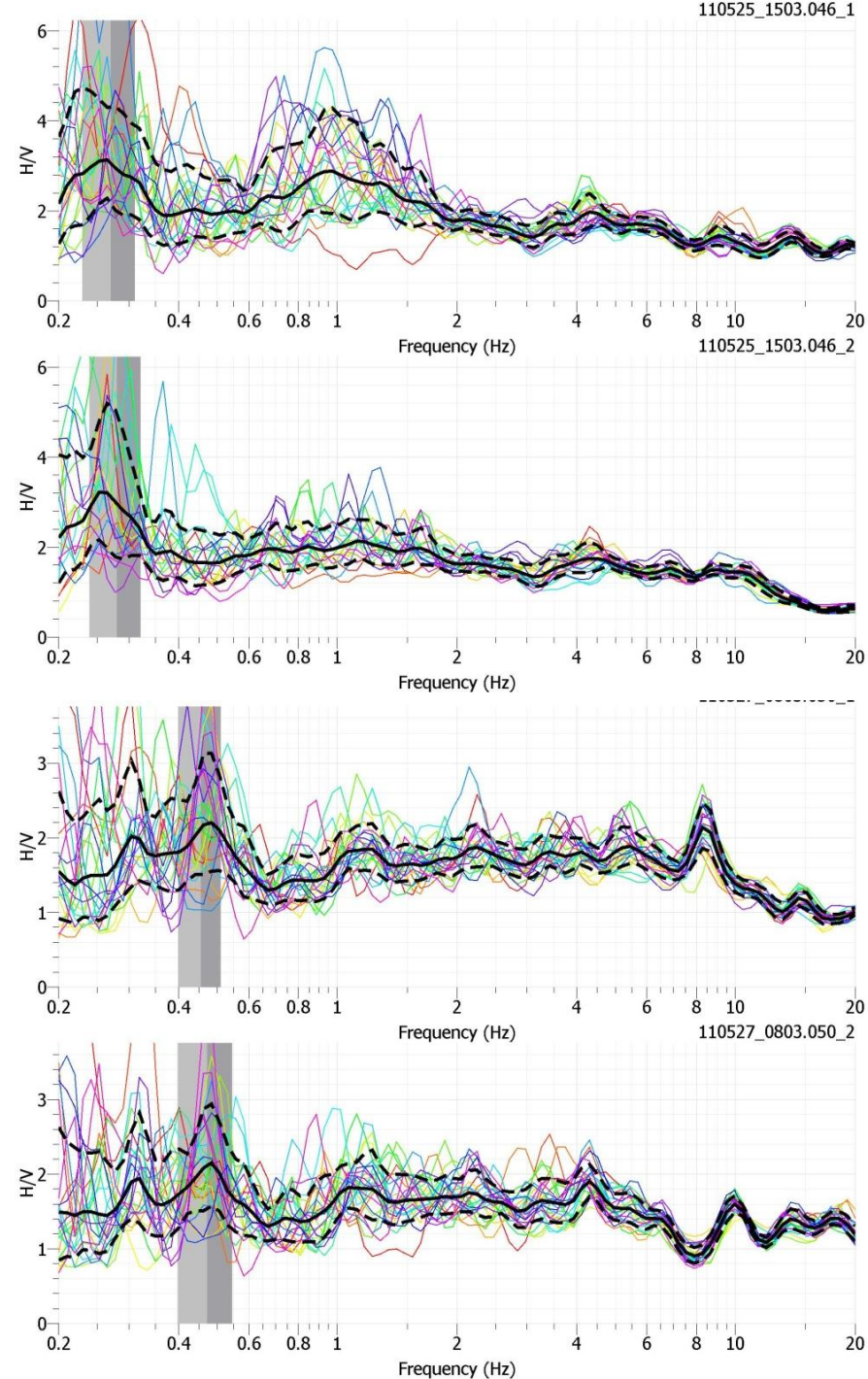
- Valores bajos de la frecuencia fundamental del suelo : 0.25 – 0.50 Hz

Depósitos de suelos con espesores de centenares de metros. Efecto de valle?

- Picos con poca amplificación (<3) y mucha dispersión. No se aprecian contrastes suelo/roca importantes

- Varios picos: Heterogeneidad vertical del terreno, contribución de varias capas.

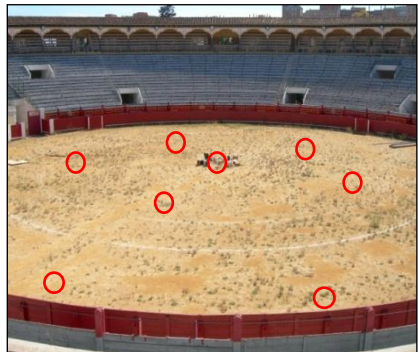
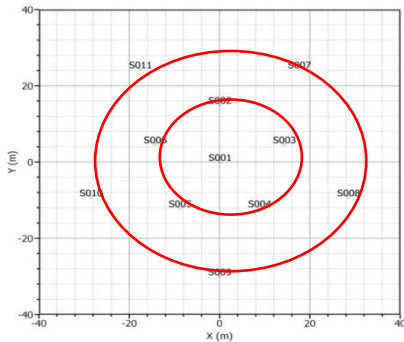
Aparentemente no se observan efectos de suelo destacados



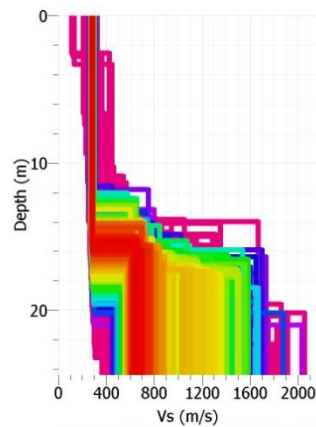
Técnica de array

Registro simultáneo de ruido sísmico.

Obtención del perfil de V_s con la profundidad



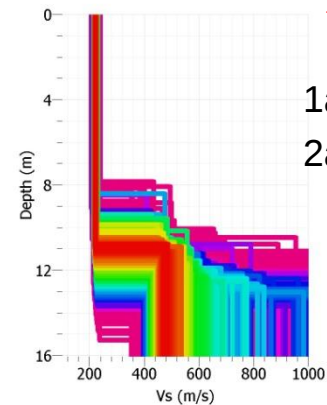
Plaza Toros



$$V_{s,30} = 386 \text{ m/s}$$

1a capa: 16m, $V_s=280\text{m/s}$
2a capa: $V_s=680\text{m/s}$

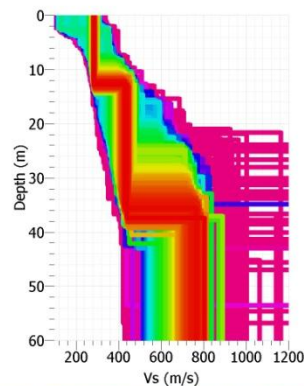
Centro médico



$$V_{s,30} = 338 \text{ m/s}$$

1a capa: 11m, $V_s=220\text{m/s}$
2a capa: $V_s=490\text{m/s}$

Recinto ferial



$$V_{s,30} = 361 \text{ m/s}$$

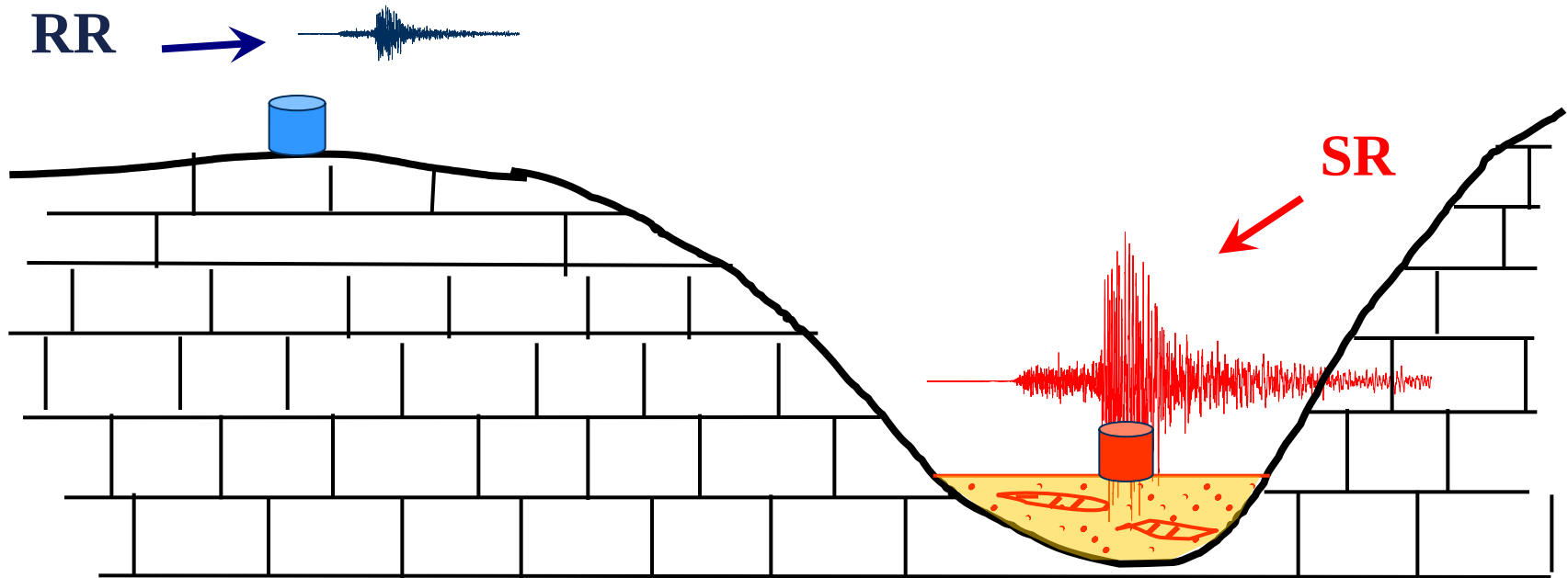
1a capa de 12m, $V_s=285\text{m/s}$
2a capa de 23m, $V_s=440\text{m/s}$
3a capa $V_s=750\text{m/s}$

Registro de réplicas

■ Objetivo:

- Registrar el movimiento sísmico en los distintos tipos de suelo presentes en la ciudad de Lorca.
- Cálculo de la función de transferencia de la capa de suelos.

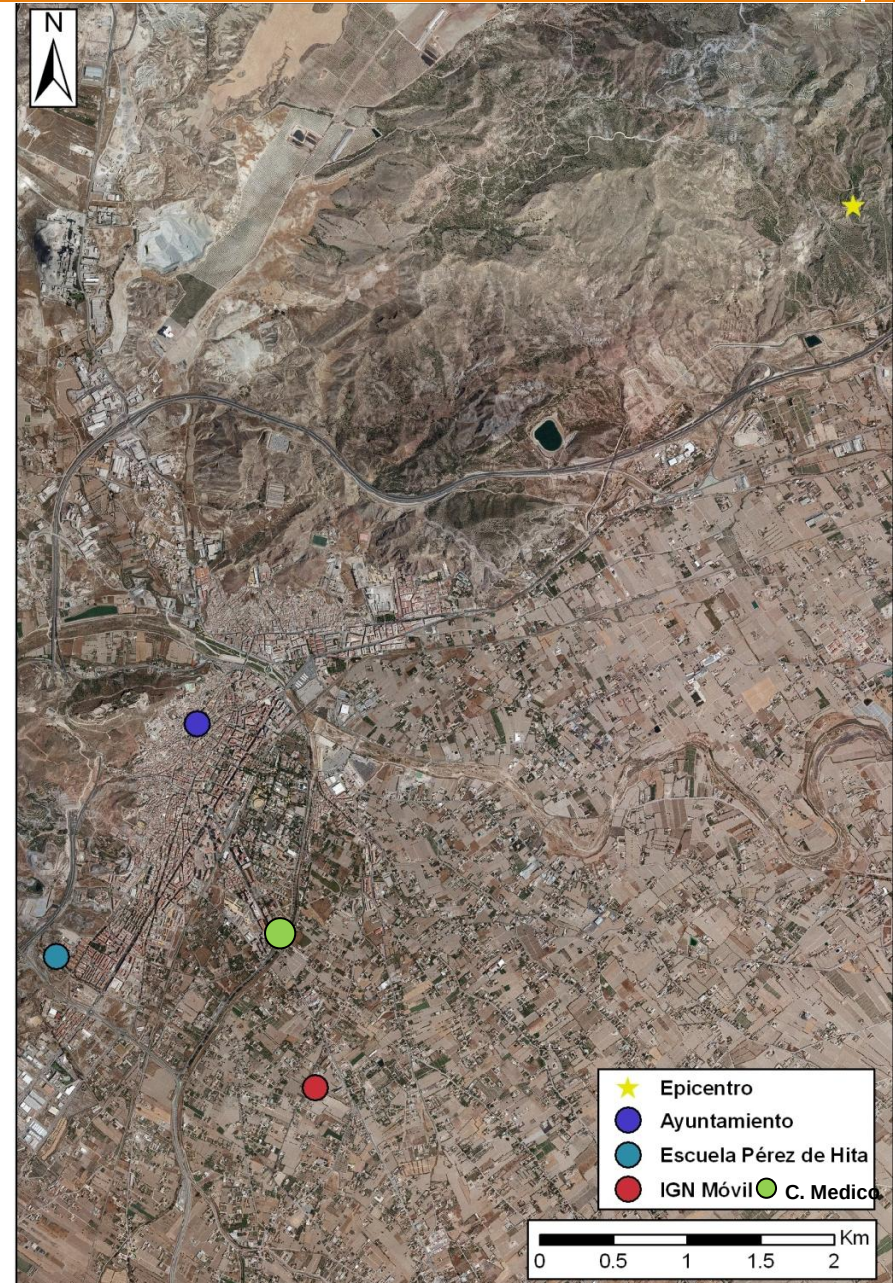
$$FT = \frac{SR}{RR}$$

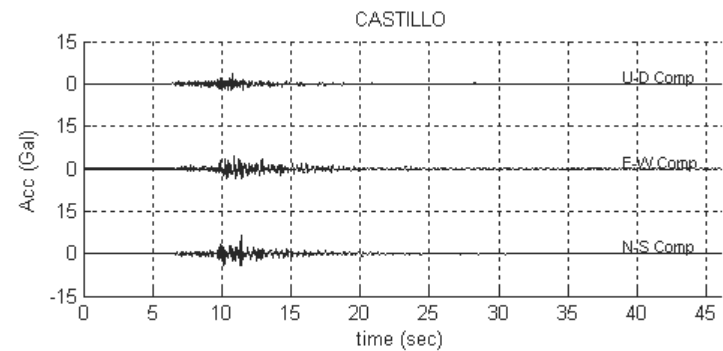
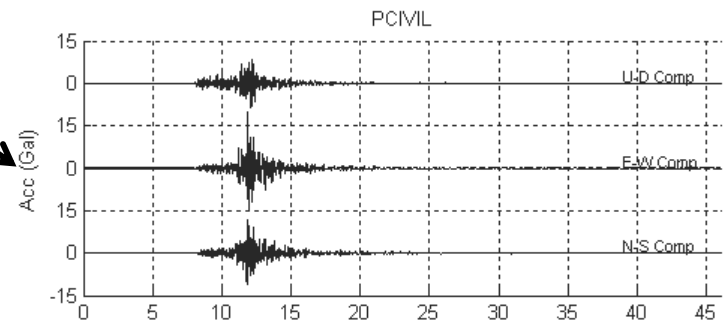
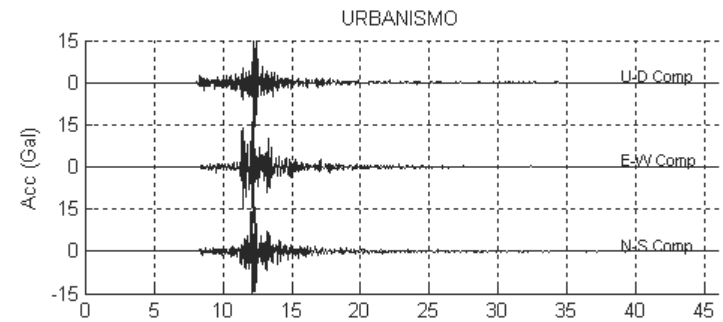
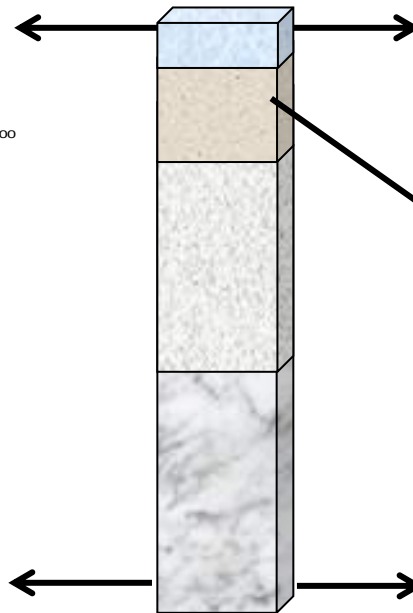
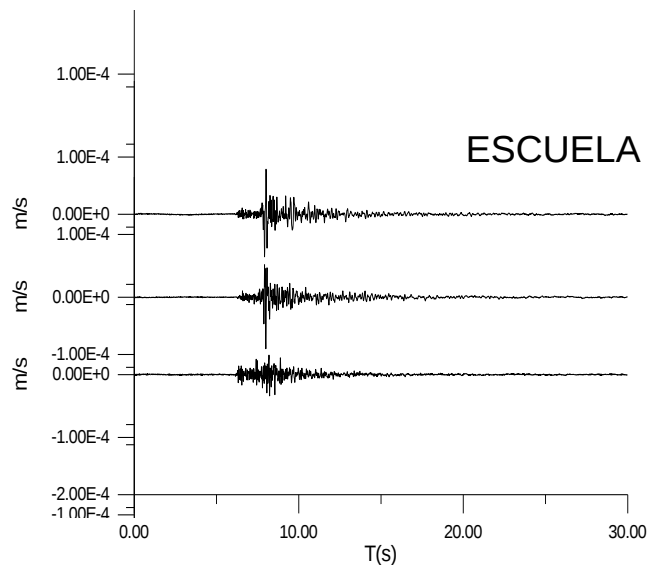
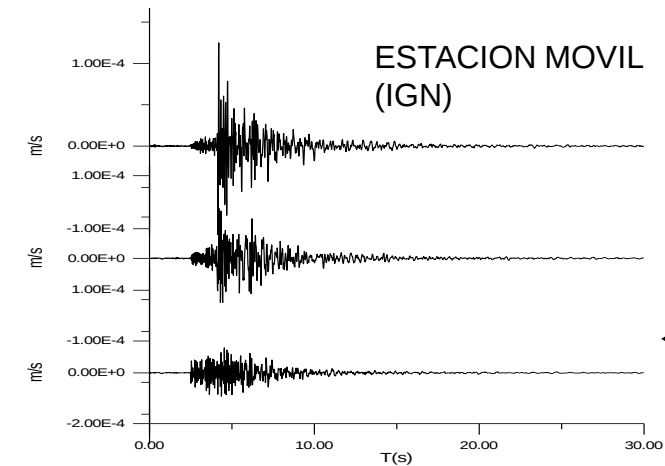


Registro de réplicas

Emplazamientos:

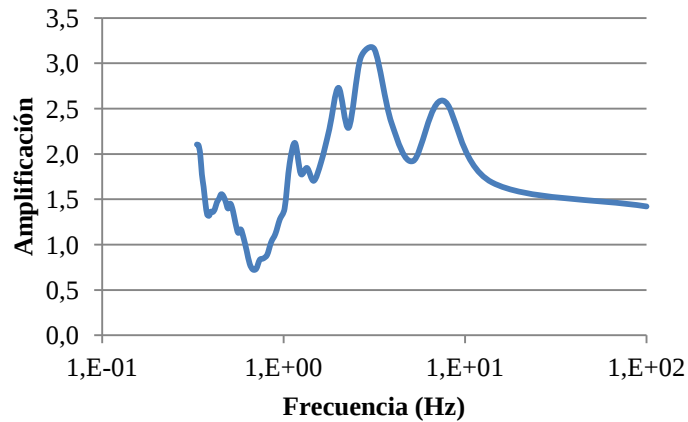
Escuela Pérez de Hita (Roca, A)
Ayuntamiento (Suelo duro, B)
Centro médico y UMV6 (Suelo
blando, C)



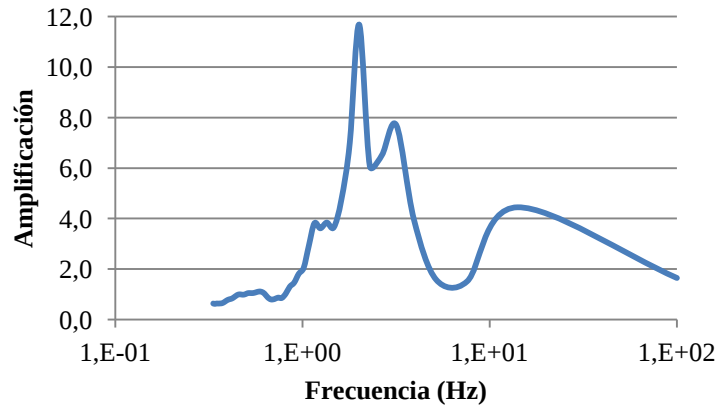


(Navarro et al., 2006)

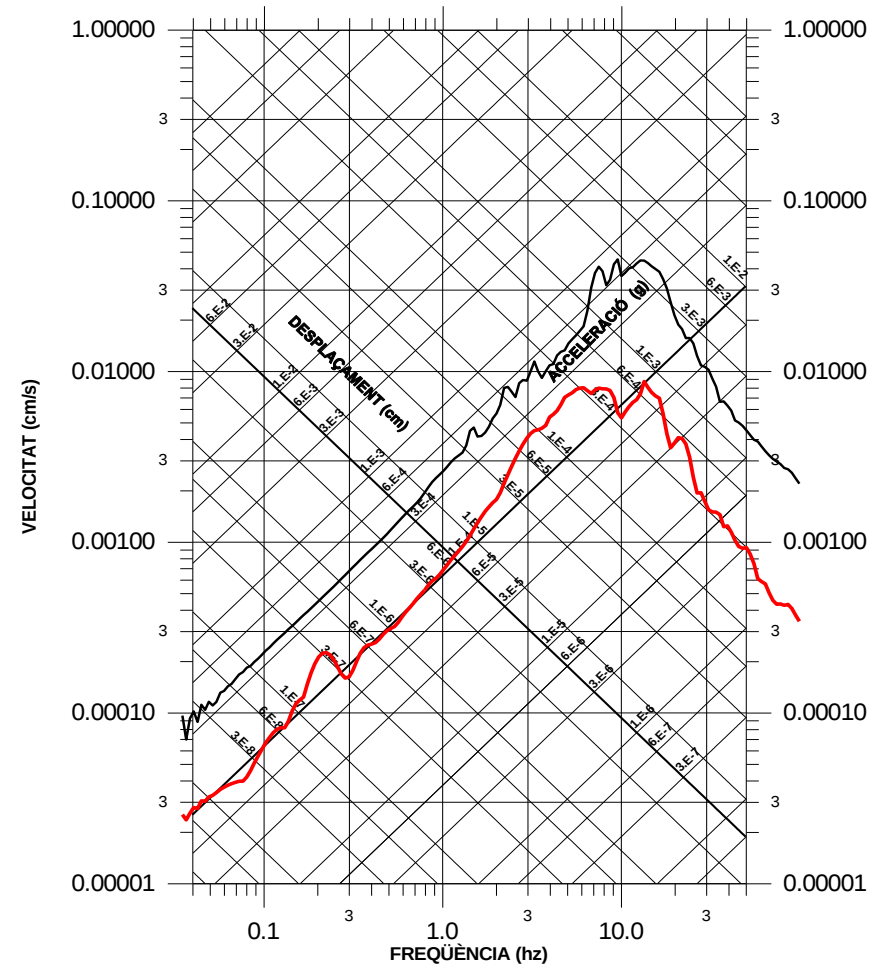
Suelo B/Suelo A



Suelo C/Suelo A

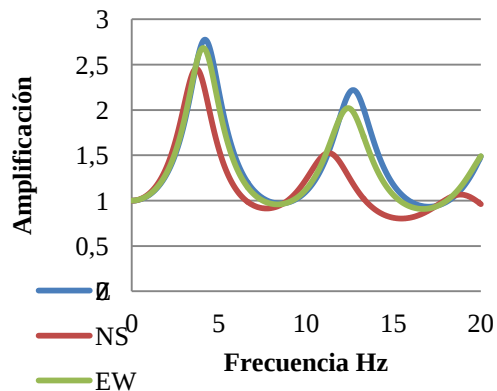


Comp EW

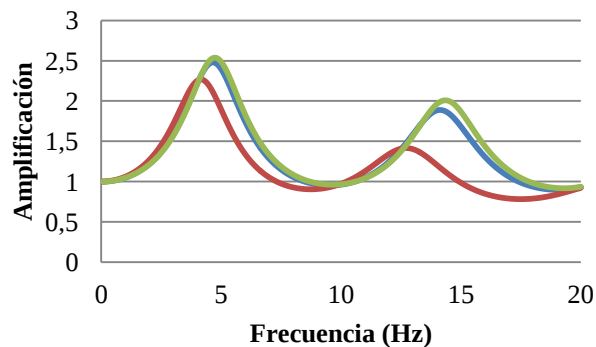


— Unidad Móvil **C**
 — Escuela Pérez Hita **A**

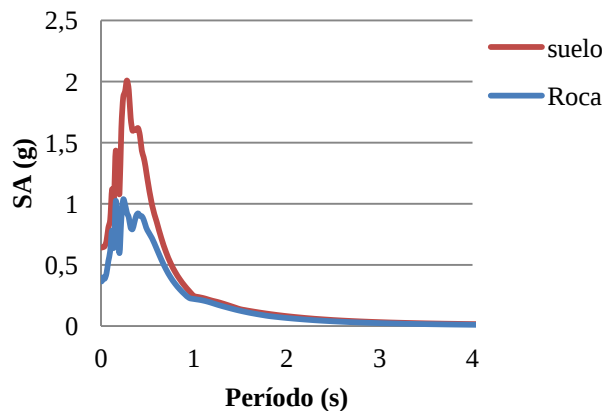
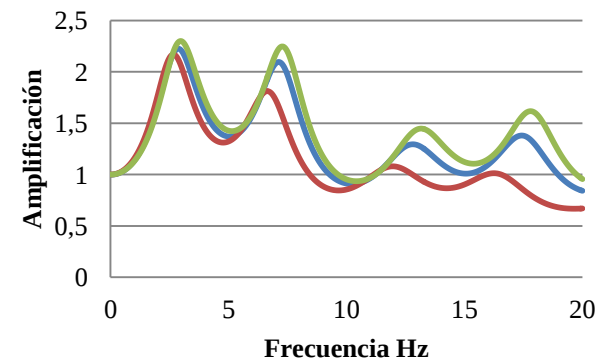
Plaza Toros



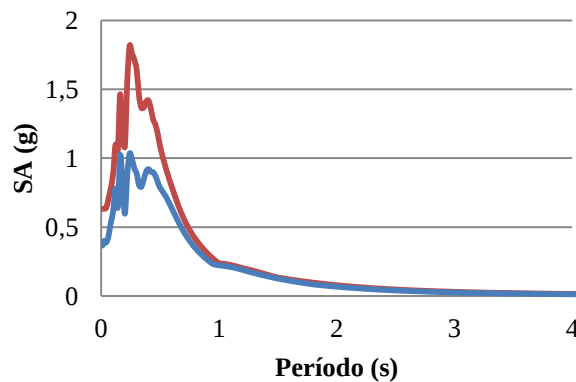
Centro médico



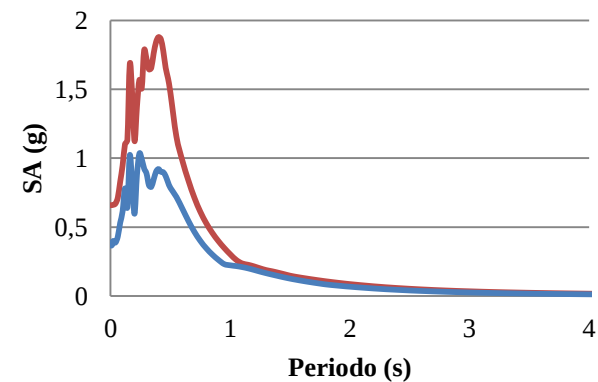
Recinto Ferial



Suelo tipo B-C
 $\Delta I = 0.5$



Suelo tipo B-C
 $\Delta I = 0.5$



Suelo tipo C
 $\Delta I = 1$

Conclusiones

- **Técnica del cociente espectral H/V**

Valores bajos de la frecuencia fundamental.

No se aprecian contrastes importantes suelo/roca.

No sugiere un efecto de suelo destacable.

- **Técnica de “array”**

Las capas de suelos más superficiales tienen Vs bajas.

Suelos tipo C (EC8), capacidad de amplificar el movimiento sísmico.

- **Registro de réplicas**

Amplificación de un factor 3 (5Hz) en suelos tipo B (EC8),

Amplificación de un factor 6 (5 Hz) en suelos tipo C (EC8), III (NCSE)

- **Modelización de la respuesta del suelo**

$\Delta I = 0.5$ en suelos tipo B-C (EC8), II-III (NCSE)

$\Delta I = 1$ en suelos tipo C (EC8), III (NCSE)

Los efectos de suelo pueden haber contribuido al aumento de daños en los edificios del valle del Guadalentín.

Efectos sísmicos locales

Inestabilidades del terreno



Muchas gracias

Dentro de la normalidad:

- seismo de magnitud moderada, $M_w 5,1$, considerado en los estudios previos de Peligrosidad
- no se han observado desplazamientos co-sísmicos en el terreno
- influencia de los efectos de amplificación comprendidos sólo parcialmente => poco contraste entre las capas del terreno (H/V), pero amplificación confirmada mediante los registros de una réplica

Observaciones sin precedentes en España:

- movimiento vibratorio particularmente intenso en Lorca (PGD= 3 cm; PGA= 0,37g) => efecto de campo próximo, debido a la ruptura muy superficial y muy próxima a la ciudad (debajo?)
- observación de desplazamientos co-sísmicos a partir de datos GPS y de InSar,

Factores atenuantes del balance de víctimas:

- hora del terremoto: 18h47, después del cierre de las escuelas,
y 1h40 después de un precursor de $M_w 4,5$
- duración muy corta del terremoto: 1,5s