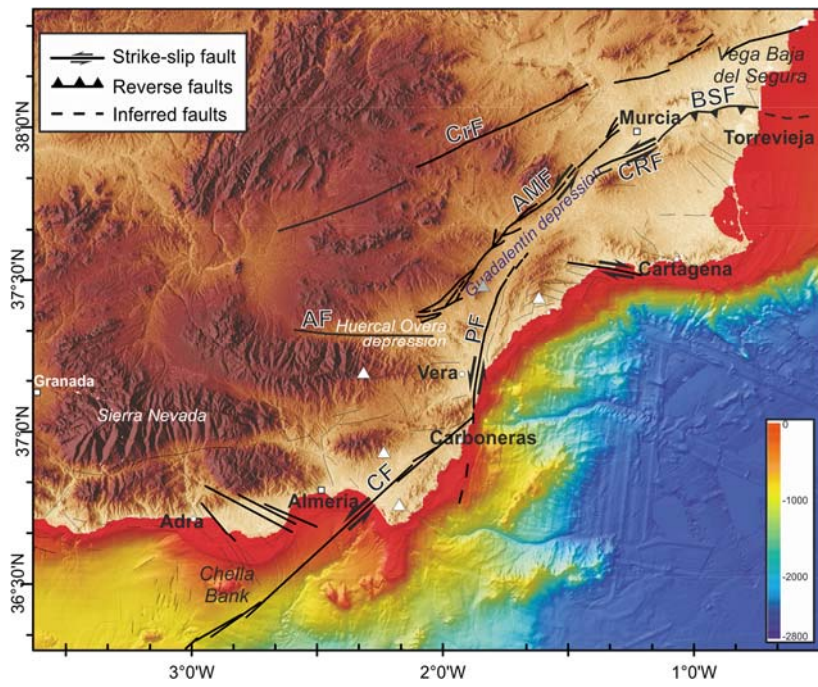




### FAULT2SH-Betics Working group –Madrid 13-14 November 2017





Scope-RESUMEN .....	3
PARTICIPANTES .....	3
RESUMEN DE INTERVENCIONES CON PRESENTACIÓN .....	4
<b>Lunes 13 noviembre- sesión de tarde</b> .....	4
Oona Scotti.....	4
Thomas Cartier.....	5
Alessandro Valentini .....	6
Gia Khazaradze.....	7
Iván Martín-Rojas.....	8
<b>Martes 14 Noviembre- Sesión de mañana. SEGMENTACIÓN (slip rates)</b> .....	9
Juan-Miguel Insua-Arévalo (Y grupo UCM-UAM-IGME).....	9
Jose Antonio Álvarez .....	10
Iván Medina/Iván Rojas.....	11
Octavi Gómez-Eulalia masana-Robert López .....	13
María Ortuño-Eulalia Masana .....	14
<b>Sesión de tarde</b> .....	15
Julián García Mayordomo .....	15
MESA redonda (temas surgidos a lo largo de las tres sesiones)- resumen de “puntos clave” .....	18
DUDAS sobre el FISH y el SHERIFS.....	20
CONCLUDING REMARKS-PUNTOS CONCLUIDOS .....	21
OPEN QUESTIONS-cuestiones para tratar de cerrar-Trabajar .....	21

---



## SCOPE-RESUMEN

El objetivo de la reunión fue el de discutir los datos geológicos disponibles en la actualidad sobre las fallas que conforman la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), y consensuar el valor medio e incertidumbre de los mismos, con objeto de construir una tabla de datos consistente que pueda implementarse en fases posteriores en modelos de peligrosidad sísmica de fallas propuestos en el grupo Fault2SH (FiSH, SHERIFF) (Pace et al., 2016; Cartier et al., 2017).

Se planteó la discusión de dos aspectos fundamentales:

### 1. Criterios de segmentación de fallas: Magnitud Máxima

El criterio empleado en la segmentación de una falla controla finalmente las dimensiones de las potenciales roturas, el máximo momento sísmico disponible, y, por ende el valor del parámetro magnitud máxima. Discutir las particularidades de cada falla de la ZCBO y consensuar un criterio de segmentación común es necesario para realizar un cálculo de peligrosidad sísmica consistente.

### 2. Cálculo del slip rate: procedimientos e incertidumbres

El cálculo del slip rate de una falla está fuertemente controlado por las incertidumbres en los datos de partida y, especialmente, por la extensión de la ventana temporal que se contemple en su cálculo. Resulta imprescindible consensuar un procedimiento común y consistente con los datos disponibles en las fallas de la ZCBO.

## PARTICIPANTES

Se contó con 18 participantes de 5 instituciones diferentes españolas: Universidad de Alicante (UA), Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Universidad Complutense de Madrid (UCM), Instituto geológico y Minero (IGME), Universitat de Barcelona (UB); de Francia e Italia.

Robert López (UB)

Emilio Rodríguez (UAM)

Carolina Canora (UAM, IGME, UCM)

Jorge Henar (UCM)

José Martínez-Díaz (UCM)

Jose Antonio Álvarez (UCM)



Paula Herrero (UCM)

Gia Khazaradze (UB)

Eulàlia Masana (UB)

Iván Medina (UA)

Iván Martín-Rojas (UA)

José Moratalla (IGME, Iberdrola)

Julián García Mayordomo (IGME)

Juan Miguel Insua-Arévalo (UCM)

María Ortuño (UB)

**Por Skype** (dia 13 de Noviembre):

Oona Scotti (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Francia)

Thomas Cartier (Ecole Normale Supérieure, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Francia)

Alessandro Valentini (Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, Italia)

## RESUMEN DE INTERVENCIONES CON PRESENTACIÓN

### LUNES 13 NOVIEMBRE- SESIÓN DE TARDE

#### OONA SCOTTI

(por conferencia via Skype, sin presentación asociada)

Oona hizo una presentación del grupo Fault2SHA. Cómo surgió, que objetivos sigue y cuáles son los principales pasos ya dados.

**Intercambio.** Recordó los temas claves que nos unen. Se trata de facilitar el intercambio de información entre “geological data providers” y “modellers” que producen modelos de peligrosidad sísmica. Para ello, es importante que los primeros entiendan qué información geológica es mas importante, y cómo afecta (como se propaga) la incertidumbre asociada a esa información en los modelos de peligrosidad.



**Terminología común.** También es importante tener claro cómo se usa la terminología. Oona revisó el significado de fuente sísmogénica, sección de falla, subsección de falla.

**Métodos FISH y SHERIFS.** Estos métodos constriñen los datos que luego se incorporan a cálculos de peligrosidad. Es decir, no producen los cálculos. Oona enseñó el resultado de un ejercicio en el que se han comparado los modelos que se consiguen con ambos métodos. Llegan a producir resultados muy diferentes (aunque no tanto para secciones intermedias de la falla).

**SURE.** Invita a los asistentes a contribuir y consultar la base de datos de rupturas superficiales de fallas, que coordinan ella y Stephane Baize.

Aquí algunos links a la web donde se actualizan noticias relativas a SURE:

[https://zenodo.org/record/154767#.WhK\\_ioiCHDE](https://zenodo.org/record/154767#.WhK_ioiCHDE)

[https://zenodo.org/record/154767#.WhK\\_ioiCHDE](https://zenodo.org/record/154767#.WhK_ioiCHDE)

THOMAS CARTIER

(por conferencia via Skype, tiene una presentación asociada).

Thomas hizo una presentación del método SHERIFS (Seismic Hazard and Earthquake Rate In Fault Systems), que es un programa para evaluar los escenarios de ruptura más “factibles” a partir de combinaciones de secciones de falla diferentes.

De esta presentación destaca la explicación de las diferentes maneras de **construir la curva Gutenberg Richter** para un escenario concreto (para Magnitudes grandes, por ejemplo  $\geq 5$ ). Esto lo probará para escenarios de ruptura diferentes. Esto significa la combinación de secciones de falla diferentes, cada una caracterizada por un Slip Rate diferente (Slip Rate Budget).

El primer paso es calcular la **curva de variación de la tasa del momento sísmico para la magnitud**, a partir de la curva de la tasa de sismos para la magnitud que se debe tener (información previa) para el sistema completo (target MFD).

A continuación, se generan **curvas de MFD para los diferentes escenarios** que se prueban. Esa combinación de rupturas que se genera por iteración (el programa funciona con OpenQuake en Python), va generando una tasa de terremotos. En el momento que una de las fallas se queda sin “Budget”, la recta de GR se queda fija, y las magnitudes menores se van completando con lo que les quede a las otras fallas. Thomas presentó los resultados que se obtienen para varios modelos (F1; F1 + F2; F2), y cómo el programa va construyendo esa



curva. Se asigna un incremento de slip pequeño para cada paso del cálculo (aquí,  $d_{sr} = 0.0001$  mm/yr). El programa elige una magnitud aleatoriamente, entonces elige una combinación de secciones que la pueden generar. Llega un momento en que ya no puede generarla (esto solo ocurre para magnitudes grandes, que son las que se “completan” antes).

Por último, se completa la curva MFD para que cuadre con la curva “target MFD”. Esto se hace sumando un slip que no se consigue a base de sismos, sino con after-slip, aftershocks, creep...Se denomina “**Non main shock Slip**”.

De todas las curvas que se obtienen para diferentes modelos, se evalúa más positivamente la que encaja con una curva generada con varios puntos de anclaje dados por la  $M_{max}$  observada o la  $M$  observada en paleosismología. Esto se hace con unas gráficas de tasa de sismos anual vs magnitud generadas con árboles lógicos. En estos árboles se contemplan diferentes combinaciones de falla, diferentes relaciones escalares (magnitud-longitud), y diferentes módulos de cizalla.

Thomas acabó la presentación con un ejemplo de cómo se aplicó SHERIFS en el Golfo de Corinto (Aigion).

Por último, hizo un resumen de los **parámetros y datos que se necesitan** para ejecutar el programa:

Necessary input information:

- For each fault: geometry (Trace + Dip), estimation of the slip-rate, mechanism.
- Hypothesis of possible complex multifault ruptures.
- Shape of the MFD at the system level (several can be explored).
- Local catalog, paleo-earthquake rate for reality checks.

## ALESSANDRO VALENTINI

(por conferencia via Skype, tiene una presentación asociada).

Alessandro mostró en qué consiste FISH (MATLAB Tools to Turn Fault Data into Seismic-Hazard Models) mediante un ejemplo práctico.

Este programa lo que nos da son parámetros claves “conseguidos y evaluados de manera geológica y estadística”. Esos parámetros se usan luego en el cálculo de la peligrosidad sísmica mediante otros programas.



**Los tres parámetros que calcula**, mediante tres herramientas diferentes son MB (moment Budget); RP (recurrence period, la calcula a partir de datos históricos y de paleosismología) y AR (tasa de actividad).

En la presentación puede verse cada una de las herramientas y qué datos de input se tienen en cuenta. Para la AR, se genera un árbol lógico de curvas MFD siguiendo tres modelos; **i)** valor único de magnitud (con tres variantes, Poisson, BPT, probabilidad definida por el usuario); **ii)** modelo característico (con las tres variantes del anterior); **iii)** Modelo mixto (con dos variantes, GR clásica y GR truncada).

Alessandro preparó un **ejemplo para la Falla de Alhama de Murcia (FAM)** a partir de los datos que le había pasado Julián.

Uno de los datos que más llamó la atención fue la curva de tasa anual (cumulativa) vs magnitud, para cada una de las secciones (o combinaciones de secciones). La ruptura de todo el sistema está situada en medio de los diferentes escenarios. Esto se debe a que esta curva es muy sensible a la tasa de deslizamiento, y para la ruptura de todo el sistema, las tasas elegida tienen un valor máximo igual al máximo de una sección particular ( $SR_{max} = 1$  mm/a) pero el mínimo es la media de los diferentes segmentos ( $SR_{min} = 0.24$  mm/a). Esa mínima es menor que la de uno de los segmentos centrales, por ejemplo,  $SR_{min}(F1) = 0.5$ .

## GIA KHAZARADZE

(tiene presentación asociada)

Gia presentó los datos más actuales que se tienen de velocidades GPS en la ZCBO. Hizo una breve introducción para aclarar qué estaciones miden en continuo y cuales son de campaña (CGPS vs SGPS) y alertó de que hay que tener cuidado cuando se comparan datos obtenidos en redes diferentes. Se pueden compartir los datos pero para homogeneizarlos, los cálculos son complicados.

Algunas estaciones nuevas podrán aclarar el movimiento de ciertas estructuras, como Falla de Alhama de Murcia (FAM) y Palomares, de las que ahora sólo se conoce el vector que resulta del movimiento de ambas.

Enseñó un trabajo reciente de un equipo del IGN (Moscoso et al. 2017) que da resultados ligeramente diferentes. Es para toda Andalucía.

En cuanto a la ZCBO, lo que se sabe con más seguridad es:

### **FAM (+ Palomares):**

$0.8 \pm 0.4$  mm/a compresivo (perpend. A la falla)

$1.3 \pm 0.2$  mm/a lateral siniestro (paralelo a la falla)



$1.5 \pm 0.3$  mm/a horizontal (valor independiente a cualquier estructura)

### Carboneras:

Presenta un movimiento completamente lateral izquierdo.

1.5 – 2 mm/a NW

3 mm/a SW

Da un slip max. de  $1.3 \pm 0.2$  mm/a

Presentó también los resultados de una modelización que hizo en su tesis Anna Echevarría sobre la **profundidad de bloqueo de la FAM** para ajustar los datos de GPS antes y después del sismo de Lorca del 2011. Estos datos se ajustan con tres profundidades diferentes, parece que solo estuviera bloqueada la parte más superficial. De todos modos, insiste en que se tienen que revisar estos modelos pues sólo probó a bloquearse la FAM, y no se incorporó la de Palomares

Finalmente enseñó unos modelos también publicados con Anna Echevarría se “rigid block domains” para explicar el movimiento en Carboneras y en la zona falla de las Alpujarras. Ambas estructuras limitarían un curepo rígido de la corteza que escapa hacia el SW, presentando una aceleración de las velocidades hacia el SW. Piensan que puede ser debido a una fuerza que tira (un “pull”), quizá por la subducción en esa zona. Uno de los resultados es que no parece que se trate de bloques tan rígidos (quizá haya micro-bloques) en la zona del SE de la península.

Gia comentó que hay una base de datos que homogenizan y recogen todos los datos publicados (posibles), se llama GEM GSRM. También presentó los resultados de trabajos recientes en la zona, como el de Neres et al., 2016 (Solid Earth), que dan a Moreras 0.08 mm/a y a la falla de Yussuf 0.49 mm/a.

Trabajos más antiguos son los de Vernant et al., 2010 y Koulali et al., 2010.

### IVÁN MARTÍN-ROJAS

(tiene presentación asociada)





Iván presentó los resultados de una campaña que lleva ya 11 años en la zona norte de la ZCBO. Con ella pueden obtenerse ya algunos valores para la falla de Bajo Segura (FBS) y la de Crevillente. Los pliegues asociados a la FBS tienen velocidades de acortamiento de 0.73 (Hurchillo), 0.53 (Benejúzar) y 0.25 mm/a.

Existe un trabajo de nivelamiento que apunta a un basculamiento del sustrato (se levanta se S a N).

Respecto a la falla de Crevillente, da valores de falla lateral izquierda, aunque se debe de mover poco. Comentó que hay un valor en un punto del paseo marítimo (sobre basamento) que se mueve mucho, con valores anómalamente altos, hacia el ENE.

## **MARTES 14 NOVIEMBRE- SESIÓN DE MAÑANA. SEGMENTACIÓN (SLIP RATES)** **JUAN-MIGUEL INSUA-ARÉVALO (Y GRUPO UCM-UAM-IGME)**

(tiene presentación y audios asociados)

En su presentación, Juanmi hizo una introducción a los conceptos que se tratarán en la reunión y a los problemas terminológicos que se nos presentan como proveedores de datos (DP, *data providers*). Se pueden consultar las actas de las dos reuniones de preparación que tuvieron en la UCM coordinadas por Juanmi y Julián para tratar segmentación y velocidad de las fallas. En las diapositivas pueden verse las cuestiones que se fueron tratando.

Destacamos varias:

1. **Cómo usar los términos** propuestos por Boncio et al. 2004 (fallas normales), en UCERF3 (fallas laterales) o en Cartier et al. 2017. Falla maestra/sección de falla. Es diferente a “fault segment” y “fault section” tal y como se emplean en Sherifs. Se entiende como falla maestra (main fault o fault section) aquella sección o segmento de falla que es continua a profundidades sismogénicas, que puede romper en su totalidad dado un determinado evento y con unos límites claros que lo separan de otra estructura o main fault. Estos límites de una sección o segmento de falla (ambos conceptos se apuntan como sinónimos, juntamente con main fault), se pueden definir en base a los criterios mencionados (Boncio et al., 2004; UCERF3). Se habla de que las fallas de la EBSZ que se estudian son strike-slip, con lo que aparentemente los criterios de Boncio et al. (2004) no queda muy claro si se pueden aplicar. Aun así se destaca que estas fallas eran antiguamente fallas normales, reactivadas como strike-slip en el período neotectónico: terreno mixto entre cinemáticas distintas. Se apunta a que la definición de segmentos para SHERIFS introduce el concepto de subsección (adoptado de UCERF3) y que FiSH no considera. Una subsección es una división de



una sección o segmento de falla (de una main fault) que no tiene entidad sismogénica o geológica propia, sino que únicamente se define para plantear distintos escenarios de rotura y para los propios requisitos computacionales del código (en este caso SHERIFS; segmentos no más largos que 2 veces el grosor sismogénico). Octavi plantea que entonces se tendrían que diseñar distintos modelos de segmentación para cada método (FiSH: fault sections; SHERIFS: fault sections y fault subsections).

2. **Escenarios de Rotura.** Se plantean los escenarios de rotura y la M que implica. En las Béticas, usaríamos una anchura (W) entre 10 y 12 km (relación 1:1 de la longitud respecto al grosor sismogénico), y buzamientos entre 90º y 60º.  
Los escenarios máximos implicarían roturas de fallas completas (de main faults según Boncio o fault sections según UCERF y Chartier) o de múltiples fallas completas a la vez. Comentarios sobre los escenarios de rupturas más largas para los segmentos de Carrascoy-Bajo Segura. Para el caso de rotura de la FAM con las dos anteriores, hay que tener en cuenta que su separación excede los 5 km que se considera distancia máxima para rotura co-sísmica en UCERF-3. Las otras fallas, FAM y Carboneras especialmente, podrían romper en su longitud completa ya que no cumplen los criterios para definir segmentos según Boncio et al. (2004) ni UCERF3. Juanmi plantea que es necesario considerar las zonas de fallas que no se han estudiado con profundidad (El Hinojar, Sierra de Almenara, etc.) → ¿son un “gap” sin deformación reciente o son zonas activas con potencial sísmico?
3. **Modelos de conexión de fallas en profundidad.** Juanmi planteó una **cuestión interesante**: la posibilidad de que la FAM (F2) y Carrascoy-Bajo Segura (F3) puedan estar conectadas en profundidad mediante un gran “detachment” o plano basal. Ese escenario había sido planteado también por Eulalia Masana y es difícil de probar, pero geológicamente se considera viable. Juanmi comenta que se trataría de una zona de despegue común de las antiguas fallas normales que actuaron en el neógeno.

JOSE ANTONIO ALVÁREZ

(tiene presentación asociada)



José Antonio presentó los resultados de un ejercicio del uso de la variación de esfuerzos estáticos de Coulomb para valorar la viabilidad de rupturas a lo largo de la ZCBO. La intervención constó de varias partes:

1. Una introducción de en qué consiste la modelización de esfuerzos estáticos frente a la de esfuerzos dinámicos (son los que “se deberían modelizar”), que pueden asimilarse a un “pulso”, con más capacidad para activar rupturas en fallas vecinas. Estos esfuerzos dinámicos suponen variaciones superiores, y siempre positivas. Sin embargo, los esfuerzos dinámicos solo “pasan” (hacen variar el estado de esfuerzos, se acelera la rotura si la variación es positiva, se inhibe si es negativa). Resumió las asunciones que se toman. Algunas de estas son muy críticas, como la capacidad de reflejar en nuestras medidas (como las cinemáticas) la realidad, ya que los modelos son muy sensibles a ellas. Atendiendo a trabajos previos (como los de Belardinelli et al. (2003)) se infiere que las geometrías de ambas modelizaciones son equiparables, pues los lóbulos que generan son parecidos.
2. Resultados de un ejercicio preliminar para la EBSZ. Usando los simuladores de sismos similares a los que usan en UCERF-3 (Parson et al., 2012). Ha usado 1 m de desplazamiento como valor estandar para todo el ejercicio.. Aunque no sea ese el desplazamiento que implicaría una gran rotura es indiferente porque sigue siendo útil para evaluar cómo interaccionan las roturas de estas secciones. Presenta una serie de ejercicios, según la rotura se inicie en una sección o en otra. Si comienza al sur (FAM segmento Goñar-Lorca), la ruptura parece que si se puede propagar a Carrascoy y Bajo Segura. En este caso la falla de Los Tollos es el puente de unión para las roturas en Carrascoy y Bajo Segura desencadenadas por la actividad de la FAM. Por otro lado, una rotura en la falla de Bajo Segura no desencadenaría una rotura en la FAM, solo en el tramo NE de Carrascoy y en Los Tollos.

El desencadenamiento de una rotura en la FAM por actividad de la falla de Carrascoy parece más difícil que en la dirección inversa y sólo se ve posible si la rotura inicial se diera en el tramo SW de la falla de Carrascoy.

3. Limitaciones. José Antonio remarcó que se necesita hacer una revisión importante de la geometría en profundidad, la profundidad de rotura y la cinemática. Para estar más seguros. La variación de estos parámetros hace viable o no viable la rotura conjunta de F2-F3 (FAM y Carrascoy/BS). Los modelos de esfuerzos estáticos son muy sensibles a los parámetros cinemáticos y geológicos de las fallas.

IVÁN MEDINA/IVÁN ROJAS

(tiene presentación asociada)



La presentación de Iván sobre la falla del Bajo Segura se estructuró en una parte sobre las terminaciones de la falla al sur y al norte, y otra parte sobre las características de la falla, y en especial, la posibilidad de que funcione como una falla única sismogénica o como secciones independientes.

- 1) Los **límites** de la FBS tal y como está definida ahora (27 km de longitud) se definen en el Sur por un cambio de azimuth (cerca de la localidad de Zeneta). Entre los asistentes se comentó que este límite es poco claro, y que es muy posible que la FBS (segmento Torremendo) conecte allí con la falla de Carrascoy. El límite Este es menos claro. Los pliegues en superficie parecen continuar en mar a lo largo de 30 km, dando a la falla una longitud total de casi 62 km. Se refirió aquí a los trabajos de Alfaro et al. y Perea et al. La sismicidad, según comentó Julián, se hace más difusa en el mar.
- 2) **Segmentación.** Se ve plausible una rotura completa de la FBS como una main fault (o fault section) ya que en toda su traza no se cumplen los criterios de Boncio y UCERF3 para definir segmentos. Aun así, destacaron el papel de las fallas transfer. Se plantearon las dudas que existen sobre las estructuras transversas que parecen afectar la traza de los pliegues de FBS. Si estas puedan actuar como barreras que impidan la propagación de la rotura en la FBS o no. Estas estructuras (llamadas San Miguel, Torrevieja y Guardamar) son largas (más de 20 km) y podrían también actuar, en caso de estar activas, como fallas sismogénicas independientes. Su identidad se basa principalmente en que durante la etapa neotectónica anterior limitaron depocentros. Sin embargo, no se han observado al norte de la FBS, aunque esto podría deberse al gran espesor de sedimentos en la cuenca del Segura, según comentaron los asistentes. A esto se respondió que la geofísica no las muestra en esa zona.
- 3) **Pliegues.** Tampoco se sabe con certeza si los pliegues de Hurchillo/Torremendo, Benejúzar y Guardamar son de arrastre o de acomodación. El buzamiento general de la FBS se asume que es 60° en tierra. Dada la posición de los pliegues en esta zona se especula sobre la posible posición de las fallas en profundidad (cabe recordar que la FBS es una falla ciega). Son pliegues relacionados con la actividad en profundidad de la falla, con lo que la posición de esta falla puede variar algunos kilómetros más al sur de lo que se cartografía, dentro de una franja posible. Esto tendría incidencia en la definición de segmentos en esta zona en relación con las fallas transfer y su posible conexión con la falla de Carrascoy.
- 4) **Magnitudes máximas.** Presentaron los valores que se obtienen para cada segmento, que varían entre M 6.6 y 7.1 si rompen por separado, o entre 7.2 y 7.4 si rompe toda la falla de Bajo Segura.



## OCTAVI GÓMEZ-EULALIA MASANA-ROBERT LÓPEZ

(tiene presentación asociada y audio)

Octavi presentó la segmentación que propone el grupo de la UB de las fallas de Carboneras y Palomares, que se ha hecho siguiendo los criterios de SHERIFS, ya que se destaca que con los criterios de Boncio et al y UCERF3 no se pueden definir segmentos (fault sections) dentro de estas dos fallas (las fallas de Carboneras y Palomares son las únicas main faults o fault sections). Han incluido criterios geológicos. Por recomendación de Thomas Cartier, cuando los segmentos eran muy largos ( $\geq$  espesor corteza sismogénica), se han subdividido en dos (o más) en base a criterios geológicos. Es una segmentación aleatoria que permite la generación de sismos pequeños, y donde el programa automáticamente las une para generar sismos más grandes. Se pueden ver las propuestas en la presentación.

- 1) **Carboneras.** (Longitud total 140 km). Octavi explica cómo la segmentación que propone Ximena Moreno en su tesis no se ajusta del todo a los criterios que usamos aquí. Por ejemplo, cambios de estilo estructural no se ven ahora relevantes, ya que se entienden como una respuesta a ligeras variaciones en la dirección de la falla. Eulalia aclara cómo diferenció cada segmento Ximena

Si se mantienen las divisiones por cambios en velocidad de la falla. Se distinguen dos grandes (los que figuran en la QAFI), que se pueden subdividir en 10 segmentos. Las subsecciones que se presentan tienen una longitud mínima que se corresponde con el grosor sismogénico (10-12 km) y una longitud máxima que es 2 veces este grosor sismogénico (20-24 km). De esos 10, algunos nodos son algo “aleatorios” porque no podían ser segmentos tan largos (como el nodo 5-6).

Se destaca que es necesario simplificar las trazas, incluso en esas partes donde la traza se divide en dos ramas (La Serrata), ya que en profundidad estas ramas seguramente se unen.

Julián comentó que en esta zona se produce un gradiente térmico, cambio de composición, velocidad etc. hacia el mar de Alborán y que la corteza sismogénica pasa a tener un espesor menor (8km). Esto tiene implicaciones en los segmentos mínimos (serían de 8 km y no de 9-10/10-12 como en tierra).

- **Palomares.** (Longitud total 70 km). La traza de la QAFI ya es problemática. No es una estructura tan obvia. Se reconocen dos segmentos, que luego se van subdividiendo



en más. Aquí de nuevo algunos nodos son aleatorios (1-2). Julián explica que Palomares es una zona de deformación de unos 10 km de ancho, y que no se observa una traza clara y continua. Josechu propuso una versión “idealizada” de la falla. Cree que puede conducir a error a efectos de introducirla en una modelización. Según la división en secciones propuesta, se puede dividir en 5 segmentos. De estos segmentos, Julián opina que los dos del sur (1 y 2) si son más creíbles (y necesarios) pero que al norte no se ven tan claros y que como está la FAM, ésta podría estar tomando el relevo. Aquí Julián propone dar menos importancia a fallas menos activas o poco estudiadas. Para el caso de estudio, Julián plantea que sería óptimo simplificar a una traza única (a diferencia de cómo se expone en la QAFI) con un máximo de 5-6 subsecciones (para SHERFIS). María propone no equipara esos dos casos, y propone asignar parámetros similares a fallas vecinas cuando una falla no está bien estudiada. Julián insiste en que no hace falta para los modelos. Eulalia propone dar pesos diferentes. Emilio opina que, ante la duda, hay que pintarla (claramente es un punto a discutir todo este tema, que como tema general-ya no solo para esta falla- se resume en qué hacer cuando las fallas están poco claras y además, poco estudiadas). Eulalia dice que en la morfología se ven cosas. Julián aquí admite que debe corresponder con un accidente profundo, quizá activo como desgarre durante un tiempo, pero igual ya no tanto en el presente.

NOTA: Aquí nos dimos cuenta de que segmentos paralelos han de simplificarse como uno único (en profundidad se unen)

## MARÍA ORTUÑO-EULALIA MASANA

(tiene presentación asociada)

María hizo un resumen de lo que se sabe de la falla de Palomares, con información recogida en los artículos de Silva et al., Booth-rea et al.. El resumen de evidencias puede verse en la presentación. También comentó cómo hay publicaciones que sugieren que no se observa en la batimetría de mar.

Anteriormente Eulalia había comentado que se sabe poco de la falla, que quizá no está lo suficientemente estudiada. Aún no son públicos los datos de las trincheras que ha debido hacer el equipo de Silva en el norte de la traza. En el Cuaternario parece que no produce grandes roturas. Si parece tener mas actividad en el Plioceno.



Julián comenta que la única evidencia que aparece en la QAFI son las terrazas Thyrrenienses de la costa, que aparecen rotas (Goy-Zazo 1986). Pleistocenas/Holocenas (según lo cita pedrera)

Lo que propone Booth-rea son 4 km de ancho pero comentamos que puede ser mas. María expone las evidencias recopiladas en la literatura de actividad de la falla. Sobre todo se ha determinado que controló depocentros...Se distinguen 4 fallas paralelas:

- 1) Palomares ss (traza discontinua, limita un horst que se eleva al Este). María ha calculado una tasa de 0.9 mm/a según datos de literatura para la parte Sur (con grandes incertidumbres). En la parte del N es donde Silva hizo las descripciones de una estructura en flor negativa afectando a Pleistoceno medio (o fallas con dip slip asociadas a mov. Lateral-oblicuo que hacen que se hunda el bloque Este-depresión de Pulpí)
- 2) Herrería (falla corta pero parece desplazar un glacis cuaternario algunos metros)
- 3) Arteal
- 4) Villaricos-Conecta con la falla de Terreros. Arteal y Villaricos serían los límites del relieve que forma la sierra de Almagro. Desplazan hasta 23 km el relieve de S<sup>a</sup> Cabrera. Esta falla controla aparentemente la línea de la costa

En el trabajo de Booth-rea del 2004 se comentan algunas características que hacen pensar que sea sismogénica: cantos “explotados”, brechas mineralizas (implosivas, quizá equiparables a los cuarzos pulverizados que observa Emilio en la FAM), diques clásticos.

## SESIÓN DE TARDE

### JULIÁN GARCÍA MAYORDOMO

(tiene presentación asociada y audio)

Julián hizo una presentación doble, con una primera parte introductoria para recordar por qué es tan importante el slip rate y para poner en común las incertidumbres que acompañan a las medidas que presentamos como “proveedores de datos”. Y una segunda parte hablando de los posibles modelos de ruptura en la ZCBO.

#### PARTE 1- SLIP RATES e INCERTIDUMBRES

En el caso de las velocidades de falla, es importante saber con qué error las definimos por: **i)** la propia importancia de conocer bien el valor de la velocidad, para caracterización de la propia estructura (cuál es el marco geodinámico, cómo pueden afectar a otras estructuras,



cuanto de activa es, con respecto a las que le rodean..), **ii)** en el cálculo probabilista, interviene porque pueden usarse los datos geológicos “sin apenas atender” a la sismicidad instrumental...De la slip rate se deriva la recurrencia  $PR = D/SR$ . Esta relación se equipara con la liberación de momento sísmico ( $M_o/ M_g$ ). Frecuencia del terremoto máximo, dada con una distribución probabilista.

Unas relaciones que se usan a menudo son las de Anderson y Luco de 1983, solo a partir de datos geológicos se puede construir la curva de GR, para magnitudes sobre 5.

En los modelos de peligrosidad, es crítico **cuantificar las incertidumbres**. Tipos de Incertidumbres: Aquí Julián profundizó en qué son las incertidumbres aleatorias (proceden del error de la medida, cómo medimos, que método de datación usamos, de la calidad de la muestra..) y las epistémicas, y de donde provienen. Es una cuantificación que se olvida a menudo. Las aleatorias se minimizan, por ejemplo, con un número mayor de medidas a partir de las que se calcula la media.

Variación del slip rate. Asumimos que es constante. Si no lo hacemos, muchos de los cálculos se van a invalidar. Aquí Julián hace un repaso de los modelos de tamaño predecible y tiempo predecible. ¿Desde qué momento consideramos que se ha mantenido constante? Comenta que se puede discutir, pero que él propone Pleistoceno superior. Este tema es clave, y dio lugar a una discusión de las diferentes situaciones que se pueden dar y cómo lo que medimos en el campo tiende a ser un valor máximo. Se le suma la complicación de por qué darle ese valor máximo a la falla. ¿Es representativo? O ¿se debería hacer una media de varias medidas?.

Umbral mínimo que hace detectables a las fallas. Julián explica lo que se usó en el mapa de peligrosidad sísmica de España. Se asumió que si han generado 1 m de salto en 10 ka (0.1 m/ka mínimo), ese salto se puede preservar. Si se mueve menos, no esperaríamos que se preservara, que fueran evidentes. Sin embargo, después del TFM de Paula se ha demostrado que secciones como la de Alcantarilla de la FAM se mueven más rápido de lo que se había estimado.

A media exposición se abrió un debate sobre cómo incorporan FISH y SHERIFS el slip rates. Entre todas las personas que participaban acabaron aclarando como se incorpora, con ayuda de las presentaciones que nos habían pasado el día anterior. Julián aclaró que ambos métodos buscan como objetivo último la relación de frecuencia/magnitud más probable. Después se construyen árboles lógicos, en el que todas las magnitudes máximas son contempladas según diferentes longitudes, para diferentes relaciones escalares, etc..





En esta parte de la charla Julián explicó cómo él obtuvo curvas para Carboneras y otras combinaciones, como toda la ZCBO (con el programa de Bungum) y con las curvas que obtienes, se calcula después la peligrosidad. Se modeliza la fuente sismogénica, que produce sismos de manera poissoniana (no te hace falta que sea una falla con un terremoto máximo, etc.).

Juanmi aquí pregunta por qué debemos usar las dos herramientas, si una de ellas no nos convence. Julián explica que el interés del grupo es probar diferentes modelos. Juanmi plantea si podemos tener un papel más activo, y proponer datos que nos parezcan más acertados (menos arbitrarios). Eulalia propone que como data providers no debemos tomar decisiones como elegir valores tan rígidos. Que hay que entender que los modelos “no son nuestro campo” y que además no será fácil (ni posible) dar valores representativos. El modelo que Julián preparó no tenía en cuenta el modelo FtF (fault to fault, de interacción entre fallas), y esa es la mejora que da el SHERIFS (comentan Octavi y María). Aquí Julián aclara que, aunque FISH no lo haga directamente, cuando incorpora los resultados sí que lo contempla, el FtF. Carolina aclara que FISH por lo que ella entiende sí que considera rupturas FtF porque le puedes meter rupturas de todo un sistema largo.

Josechu comenta que tenemos que tener cuidado en darles los datos que observamos, no los que vayan a dar resultados más lógicos/esperables. El dato ha de ser el que nos creamos, comenta Eulalia. En general se está de acuerdo que las pruebas que hacemos son para ver qué pueden hacer los programas, pero no para evaluar nuestros datos de partida según los resultados que estos programas dan. Julián aclara que son métodos en desarrollo, y que el ejercicio es usar la ZCBO como laboratorio, no para obtener un mapa oficial.

Julián explica cómo obtuvo la GR para la ZCBO, en un ejercicio que preparó para el Fault2SHA en Barcelonnette, en Mayo 2017, usando el método de Bungum (en Computers and Geosciences). Enseñó como quedan proyectadas las zonas de ruptura. Mostró un mapa de sismicidad revisada “catálogo de proyecto”, muy depurado (de Belén Benito et al.), del que se saca la GR. Por otra parte, eso se combina con los datos que se obtienen de usar las fallas de la QAFI. De ahí se definen las zonas de rotura y magnitudes máximas (usando Stirling et al. 2002). A partir de ahí, se obtiene un coseismic slip (usando la ecuación física de  $M_0$ , que sale de la  $M_w$ ), por eso dice que es la “pescadilla que se muerde la cola”. Se usa dos veces, en dos fórmulas diferentes, la AR. Esto se evitaría si pudiéramos usar el slip por evento ( $D$ ) sale de los datos de las trincheras. El resultado en este modelo es que el slip por evento sale más grande que el que observamos en el campo. Se comenta que esa diferencia es normal, ya que el slip que se obtiene es el que se produce en el centro de la falla. Al final del ejercicio, Julián compara la peligrosidad que daría la ruptura de la mega-falla, y la de las fallas como fuentes por separado. La ruptura de la mega-falla (hace un promedio de tres



ecuaciones) se ajusta mejor a la GR si su velocidad es de 1 mm/a (y no de 0.54) que se obtiene de la sismicidad. En ese caso (1 mm/a) se obtiene un sismo máximo de menor recurrencia (menos de 10 ka, mientras que con 0.54 mm/a da unos 11 ka o mas).

Discusión. Jorge comenta que siempre vas a tener un déficit de datos geológicos, por el número de fallas que no incorporas. Josechu también dice que los sismos de menos de 6 no van a estar bien registrados. Juanmi comenta la grave conclusión de que es mas conservador usar la sismicidad solo, que el ejercicio no es de tanta utilidad. Pero J. Antonio si que dice que es importante para convencer a un sismólogo que los datos encajan, y por tanto, aunque no lo observe, el sismo máximo puede darse con mayores recurrencias.

Se llega a la conclusión de lo importante que es el slip rate que se usa. Se entiende que es mejor un rango, que vaya del mínimo al máximo. ¿Por qué no usar el del GPS? No se llega a ningún puerto...Pero como conclusión, comenta Julián, los slips rates están subestimados. Aquí se volvió al tema de la ventana mínima para constreñir bien la slip rate y de cómo una buena GR refleja también los datos geológicos. Se comenta la gran incertidumbre de usar una ecuación y otra, de la de los 3 modelos de Bungum.

## PARTE II- ESCENARIOS DE RUPTURA (SEGMENTACIÓN)

Sobre los **escenarios de ruptura**: Se contemplan varios escenarios más extremos:

- 1) Ruptura de una mega-falla de 400 km (de carbonares a FBS; F1 + F2 + F3). Da una Mmax en torno a 7.9. Este caso podría tratarse de un “evento compuesto” según comenta J. Antonio, que es lo que pasó en el sismo de Cucapah.
- 2) Ruptura de segmentos N y S por separado. Parece más probable y no tan difícil que puedan dispararse por la interacción de esfuerzos:
  - a. F Carboneras + F Palomares (F1)
  - b. FAM (F2)
  - c. F los Tollos + F Carrascoy + FBS (F3)
- 3) Una opción intermedia sería la ruptura de b. + c. (F2 + F3)

## MESA REDONDA (TEMAS SURGIDOS A LO LARGO DE LAS TRES SESIONES)- RESUMEN DE “PUNTOS CLAVE”

- **La necesidad de simplificar las estructuras.** Fallas más grandes, simplificar sistemas complejos, y no quedarnos en las geometrías de detalle o en los datos de superficie solamente, ya que en profundidad se simplifica.



- Hasta ahora no se habían contemplado **“mega-estructuras”**. La única que si se había visto como una única fuente era la FAM. Ahora, viendo los criterios que se usan en California e Italia, casos como Carboneras-Palomares (F1) y Los Tollos-Carrascoy-Bajo Segura (F3) parece que tengan que considerarse como secciones que pueden generar una rotura continua. Además, podrían romper juntas (F1+F2+F3) en un caso extremo.
- Se presentan **dos opciones de “mega fallas”**. Una en la que las trazas se doblan en paralelo (solapamiento de Palomares/FAM al sur y solapamiento de FAM/Carrascoy al norte). Y otra en la que no hay solapamiento, y debemos considerar solo una traza, aquella en la que la expresión sea más evidente (quedarían FAM al sur y Carrascoy al norte).
- Si nos centramos en una rotura con una sola rama, se reconocen dos modelos. Uno de ellos no incluye a la FAM, y el otro la incluye, y solo usa segmentos más discretos de Palomares (segmento sur). El primer modelo es más sencillo en cuanto a que no ha de incorporar fallas con buzamientos opuestos, pero incluye partes de falla muy inciertas (Palomares norte), que conectarían con Los Tollos.
- Durante la presentación de Octavi, se concluyó que por los criterios que usan FISH/SHERIFS ha de considerarse que Carboneras y Palomares pueden romper juntas.

#### MODELOS TECTÓNICOS

- Durante la presentación de Juanmi, se contempla la ruptura de FAM y Carrascoy en paralelo. Aunque sean fallas con buzamiento opuestos, quizá estén unidas en un **despegue basal**.
- Durante la presentación de Iván, se llegó a “visualizar” un modelo de falla de **Bajo Segura que está unida a Carrascoy**. Parece que ambas fallas esten produciendo dos grandes pliegues en el bloque levantado (el “domo” de Carrascoy y el anticlinal de El garruchal, que se extiende hasta Guaradamar aunque allí ya está erodionado). Son pliegues desventrados.

#### DESENCADENAMIENTOS

- De la presentación de Jose Antonio Álvarez: El **“slip per event”** sería uno de los **parámetros que más influye en que sea o no posible la propagación** de una gran rotura conjunta (FAM + FCa + FBS). Se plantea la pregunta de ¿cuál sería el slip que se debería dar a esta mega-rotura para que fuera viable? ¿Es algún slip demasiado bajo como para no desencadenar una rotura de estas características? Según se comenta abajo (próxima sección “otros puntos comentados por octavi”), el slip rate es indiferente, la velocidad de cada sección NO nos va ayudar a decidir si es o no factible la rotura.



- Al final de la presentación de Juanmi se abre una discusión en la que se plantea la posibilidad de que haya una gran rotura que implique todas las principales fallas de la EBSZ (desde Carboneras hasta Bajo Segura). Se ve como un escenario muy poco probable pero que no se debería descartar. La duda es:

## DUDAS SOBRE EL FISH Y EL SHERIFS

-En su presentación Oona enseñaba la división de una fuente sismogénica en secciones que eran largas en profundidad (con longitud de ruptura muy pequeña en comparación con la profundidad de ruptura;  $L = W/2$ ). Nos preguntamos si es así, con que finalidad se segmentan así o si lo hemos interpretado mal..

-¿Cuál es la longitud mínima en estos programas?. Entendemos que es aproximadamente la que equivale al espesor de la corteza sismogénica.

-En SHERIFS, las secciones más pequeñas, ¿tienen siempre que corresponder con lo que se observa en superficie? O también se contemplan rupturas que no llegan a superficie (las que producen los sismos más pequeños, de 5-5.5?)

-¿Pueden introducirse variaciones en el buzamiento (dip) de las fallas, para una misma fuente?. Si no se puede, pensamos que tal vez una solución sea asignarle el área que daría una estructura de buzamiento cambiante, y a partir de ahí, calcular que buzamiento “único” te da la misma área.

-El slip rate que usa SHERIFS, ¿es el máximo? ¿Se dan diferentes valores para cada sección? Entendemos que en el FISH solo se da un rango por falla (que no combina diferentes fallas), y que en el SHERIFS no funciona con rangos de valor para cada sección, sino con valores únicos. ¿Estamos en lo cierto?

- Comprobar si estamos en lo cierto. Para Boncio (y FiSH) un segmento es una ‘seismogenic master fault’ y, por lo tanto, por su entidad no puede propagar la rotura a otro segmento, es inherente a esta definición de segmento. Entonces los segmentos clásicos, por ejemplo, de la FAM no se deberían considerar segmentos en ese caso, porque asumiríamos que son master faults diferentes y que no pueden romper juntos. Entonces, la FAM sería un único segmento o master fault solo cuando estamos considerando que rompe sola (F2). En el momento que la combinamos en una megaruptura, pasa a ser una sub-sección. Pero ahí no estamos cumpliendo los criterios, ya que hay separaciones de más de 5 km.



## CONCLUDING REMARKS-PUNTOS CONCLUIDOS

-Escenarios de ruptura. Se definen toda una serie de secciones de falla que pueden llegar a romperá a la vez. F1 + F2 + F3. A partir de lo discutido se decidió contemplar

-Para dar una slip rate, se habla de considerar Pleistoceno superior

## OPEN QUESTIONS-CUESTIONES PARA TRATAR DE CERRAR-TRABAJAR

-**Límites de segmentos geológicos.** Para SHERIFS son criterios más libres (significado geológico en sentido amplio) los que se usan para dividir sub-secciones. Aquí podríamos haber hecho un listado propio que refleje las peculiaridades de la ZCBO.

-Cuando hablamos de mayor expresión, **trazas más evidentes**, no debemos de olvidar (opina María) que tramos activos pueden ser menos evidentes por: 1) el tipo de material implicado. Sería el caso del tramo norte de la FAM, parece menos activo pero lo que hay en el bloque levantado es más erosionable. Aquí una pista puede ser el trabajo de final de master de Paula Herrero, que indicaba más actividad que la que se sospecha de la geomorfología; 2) la cinemática de la falla. En el caso de la falla de Palomares, dada su orientación, es la que se espera tenga menos salto vertical. Por tanto, daría menos relieve, y el poco relieve sería más erosionable.

-**Slip rate.** ¿Qué slip rate definir para cada segmento? El que nos dan marcadores de todo el Pleistoceno superior (¿) pueden ser muy variables!. Hablamos de un rango muy amplio, desde 125 ka a 10 ka?. Y si no tenemos marcadores de esa edad, ¿cuál sería la siguiente edad a considerar?. Tendríamos que aclarar quizá un rango de edades preferidas, y un umbral por debajo del cual pueden no ser fiables (pueden no reflejar suficientes ciclos sísmicos).

-**Slip rate.** ¿Por segmentos, se asignan valores medios a cada segmento o valores máximos? En FISH te permite dar un rango, pero puede que dentro de ese rango un valor tenga más peso que otro. SHERIFS si que te pide dar un valor único.

-**Cinemáticas compatibles.** Todas las que analizamos en la ZCBO tienen una cinemática que en caso de rotura conjunta, ¿podría respetarse?

- **Relaciones escalares.** No discutimos cuales son más apropiadas para la ZCBO. Ni



tampoco se habló de un consenso sobre cual hablar. En las presentaciones, se usaban relaciones diferentes según grupo de trabajo. CUIDADO!

**-Como dar diferente peso a los escenarios en el árbol lógico.** ¿Cómo se da peso a este escenario respecto a escenarios más probables (p.e. que rompan subsecciones de las main faults; Góñar-Lorca o Lorca-Totana para la FAM) y como se traslada este peso a los modelizadores?. Julián remarca que se hace con un árbol lógico, pero se comenta que el slip-rate de cada subsección de la falla es en sí mismo una forma de ponderar la probabilidad de una u otra opción (si un segmento tiene el doble de velocidad que otro es más probable que el que rompa sea el primero). Jose Antonio remarca que el slip rate no tiene capacidad para determinar la credibilidad de los distintos escenarios de rotura, solo la cantidad de sismicidad que se genera. El slip rate es distinto a la capacidad de romper de un segmento a romper junto a otro. P.e. una falla con un slip rate muy alto, pero con poca capacidad de romper junto a otros segmentos, dará muchos terremotos pequeños, pero ninguno de gran magnitud. Entonces este escenario no sería el creíble para grandes magnitudes, aunque su slip rate sea el mayor y si lo sería otro segmento más lento pero con capacidad de romper con otros segmentos para dar las magnitudes altas→ Hay que ponderar los escenarios de rotura en función de la compatibilidad cinemática entre segmentos y no del slip rate que tengan. En este sentido José Antonio plantea que los esfuerzos estáticos permitirían hacer esta ponderación ya que te indica los escenarios de rotura más probables y los menos probables.

#### **Temas Locales:**

-Papel de las fallas “transfer” en la zona de la FBS. ¿Se trata de fallas corticales? Están activas?

-Grado de actividad de la falla de Palomares

-Transferencia de actividad entre Palomares y Los Tollos, en la Sierra del Hinojar (falla del Hinojar). ¿La actividad se conecta N-S? O ¿se transfiere hacia el Este, hacia la falla de Moreras?

-Transferencia de la actividad FAM-Albox. ¿Pueden interactuar entre ellas? ¿Es correcto “cerrar” el modelo en la zona de Góñar?

-Crevillente y Socovos, ¿deberían de entrar en el modelo?