



Neotectonic and Paleoseismic Onshore-Offshore integrated study of the Carboneras Fault (Eastern Betics, SE Iberia)

***Estudio integrado tierra-mar de la Neotectonica y Paleosismología
de la Falla de Carboneras (Béticas Orientales, SE Península Ibérica)***

Ximena Moreno Mota

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

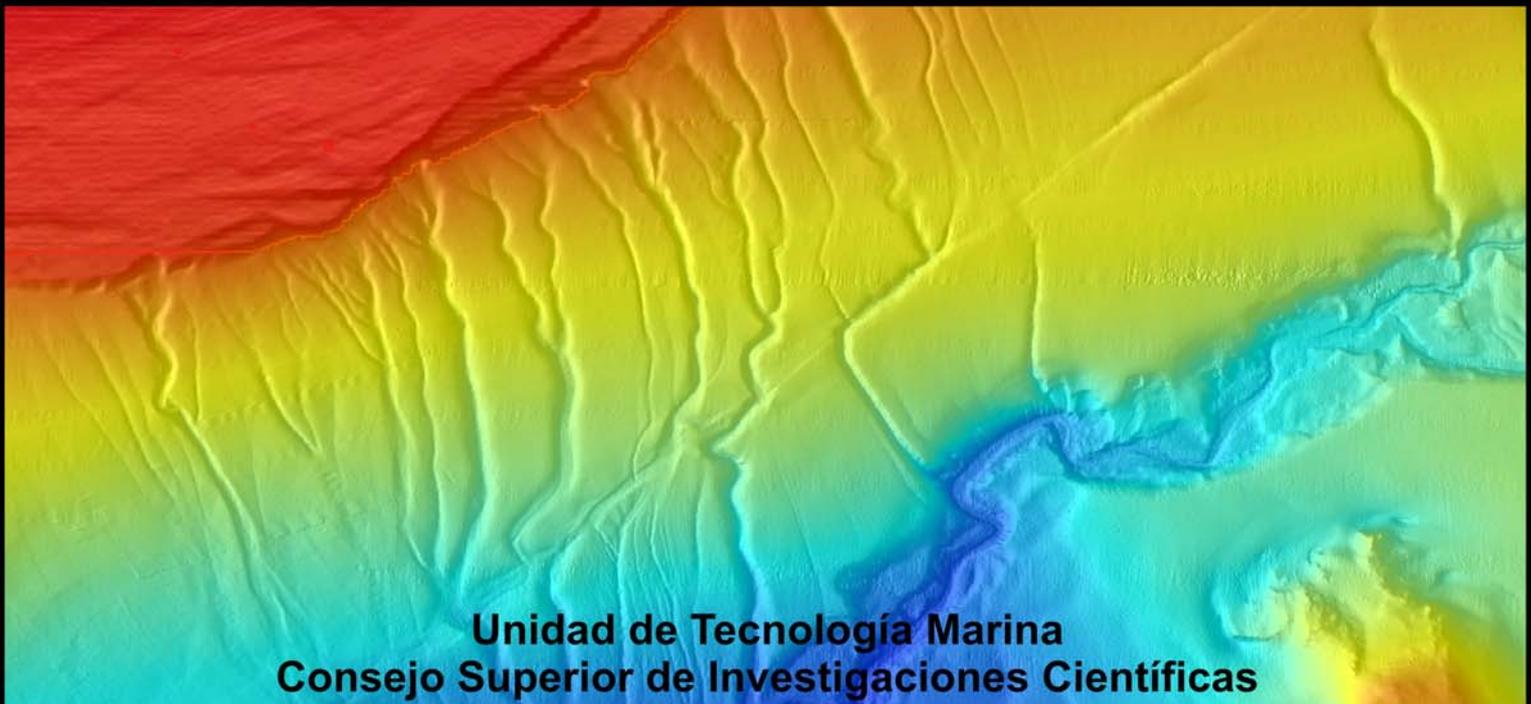
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

**Departament de Geodinàmica i Geofísica
Universitat de Barcelona**



**Neotectonic and Paleoseismic
onshore-offshore integrated study
of the Carboneras Fault
(Eastern Betics, SE Iberia)**

Ximena Moreno Mota
Memoria de tesis doctoral
Julio 2011



**Unidad de Tecnología Marina
Consejo Superior de Investigaciones Científicas**



RISK NAT
Departament de Geodinàmica i
Geofísica
Universitat de Barcelona

**Barcelona Center for Subsurface
Imaging**
Unidad de tecnología Marina
*Consejo Superior de Investigaciones
Científicas*

**Neotectonic and Paleoseismic Onshore-Offshore
integrated study of the Carboneras Fault (Eastern
Betics, SE Iberia)**

***Estudio integrado tierra-mar de la Neotectónica y Paleosismología
de la Falla de Carboneras (Béticas Orientales, SE Península Ibérica)***

Memoria presentada por

Ximena Moreno Mota

para optar al grado de Doctora en Geología

Esta memoria se ha realizado dentro del programa de Ciències de la Terra
(bienio 2005-2006) de la Universitat de Barcelona bajo la dirección de las
Doctoras Eulàlia Masana Closa y Eulàlia Gràcia Mont

Barcelona, Julio de 2010

*A Teresa, Roberto y Lluç
Pasado, presente y futuro
Pero siempre juntos*



"Just because something happens rarely does not mean it will never happen. It should have been obvious that the faults along that range were sleeping dragons that would awake some time. But researchers have only so much time and money to spend on seismic-risk assessments, and they therefore focus on areas that are known to have major quakes every few hundred years – not ones that might stay quiet for 5,000 years."

The Sleeping Dragon
Alexandra Witze
Nature 459, 153-157
14 May 2009

Agradecimientos - Agraïments - Acknowledgements

Quisiera empezar estos agradecimientos dedicándoselos a mis directoras de tesis, las Eulàlias, que me han acompañado de la mano a lo largo de esta aventura. Gracias por empezar este proyecto y darme la oportunidad de implicarme en él. Les agradezco todo el apoyo que me han dado, así como haber compartido conmigo sus conocimientos y haberme transmitido su pasión por la geología y en particular por la caza de terremotos antiguos. Junto a ellas ha sido un lujo y un verdadero placer poder trabajar, aprender, crecer, reír y llorar. Para ellas, mi más sincera gratitud.

Esta tesis me ha permitido aventurarme en dos medios muy diferentes, el marino y el terrestre. Dos mundos, el *departament de Geodinàmica i Geofísica* de la UB y la *Unidad de Tecnología Marina* del CSIC, donde he vivido infinidad de momentos junto a becarios, profesores, científicos, técnicos, administrativos y demás. Tanta gente por nombrar que necesitaría varias páginas. A todos ellos, gracias por compartir conmigo su día a día.

Sí quería hacer especial mención a algunas de las personas con las que he compartido despacho, así como sonrisas y lágrimas. Héctor, Ángel, María, Patricia, Susana, Elena, Alexis, Zoraida, Sara (¡siempre al pie del cañón!), Manel... Y a otros con los que a pesar de no compartir despacho, han sido grandes (enormes) compañeros todos estos años, a Pati, Oskar, Marc, Jordi, Agnese, Mar, Juanlu, Carine, Elena2, Claudio, Rafa... Y me dejo en el tintero muchos nombres, pero me los llevo en el recuerdo. ¡Que suerte he tenido de coincidir con tanta gente bonita!

La obtención de los datos utilizados en esta tesis hubiese sido imposible sin la colaboración de un gran número de estudiantes, doctorantes, profesores, investigadores, técnicos y otros expertos que me han ayudado a lo largo de sucesivas campañas terrestres y marinas.

A lo largo de estos años, han sido numerosas las discusiones científicas entorno al estudio que aquí presento, para lo cual he tenido el placer de contar con la inestimable colaboración de grandes expertos en distintas materias, gracias a Pere Santanach, a Ramón Julià, a Pilar Villamor, a Ferran Estrada, a Albert Solé, a Isa Cacho, a Geoffroy Lamarche, a Nick Debenham. Igualmente, quería agradecer a los miembros de los grupos de investigación consolidados en los que he tenido el placer de colaborar, el Risknat de la UB y el Barcelona-CSI del CSIC. Un gran número de grandes científicos. Gracias por brindarme vuestro conocimiento y por las largas charlas científicas.

During this thesis, three short stays along the world were undergone. The first one at the USGS in Menlo Park (California) together with David Schwartz and his

collaborators, who offered me an unbeatable initiation to onshore paleoseismology. I am grateful to Tom Fumal, Tim Dawson, Carol Prentice, and the rest of the USGS group for taking me to the field and showing me the San Andreas Fault secrets. The second stage was yielded at the Oregon State University in Corvallis, together with Chris Goldfinger and Anne Trehu. Thank you for your support on marine research and tips with the kingdom suite software. The last “short” stay allowed me to visit the antipodes, the amazing New Zealand. A warm thanks to Kelvin Berryman and Pilar Villamor for hosting me from the first moment and becoming a family in the other side of the world. Warm thanks to the rest of the GNS “paleoseismic team”: Rob Langridge, Nicola Litchfield, Kate Wilson, Will Ries, Russ Van Dissen, Laura Wallace. Also to the others around: Lizz Kennedy, Jean and Dick Beetham, and many happy kiwis there.

Mi eterna gratitud a mi pequeña gran familia, por esta y tantas aventuras juntos. A mi padre, por su apoyo incondicional en todo momento. A mi hermana Lucía, por estar siempre ahí y por poner tres soles en mi vida, Alba, Sofía y Elena, tres sonrisas en mi corazón. A los que están más lejos, en el otro continente, especialmente a mi abuela Chichita, por transmitirme sus genes científicos. Y a Lluç, que aún está de camino, pero que con su luz ha iluminado mi camino en esta recta final.

Mi último y más afectuoso gracias va para Eduard. Por un lado, gracias por tu implicación en este proyecto, desde el trabajo de campo hasta la compilación final. Gracias por la comprensión, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Pero sobre todo, gracias por tu presencia cuando más lo he necesitado, por tu energía y positivismo. Simplemente, gracias por ser y estar.

Funding:

The author of the thesis benefited from a four-year National CSIC-I3P PhD fellowship (I3P-BPD2004) between 2005 and 2008. Within the framework of the I3P program, three short-stay grants allowed the author to complement her study at the United States Geological Survey (USGS) in Menlo Park, San Francisco (CA, USA) in 2006 (3 months), at the Oregon University in Corvallis (OR, USA) in 2007 (1.5 months), and at the Geological and Nuclear Sciences Institute (GNS) in Wellington (New Zealand) in 2008 (6 months).

The data used in this work was acquired and interpreted within the framework of Spanish *Plan Nacional I+D+I* Projects IMPULS (REN 2003-05996-MAR) funded by the *Ministerio de Ciencia y Tecnología* (MCYT), and EVENT, consisting of two sub-projects (CGL2006-12861-C02-01 (land) and CGL2006-12861-C02-02 (marine)) funded by the *Ministerio de Educación y Ciencia* (MEC). In addition, the work was also supported by the Consolider-Ingenio 2010 program under the “Topo-Iberia” project (CSD 2006-0004). The COCSABO-MEC allocated ship-time on national large-scale facilities, such as the RV Hesperides, RV Garcia del Cid and RV Sarmiento del Gamboa, which allowed carrying out the IMPULS (2006), EVENT-SHELF (2008) and EVENT-DEEP (2010) marine cruises. The *Acción Complementaria* “Trincheras” (CGL2004-20214-E) of the MCYT enabled the performance of an extensive trenching survey and a subsequent dating analysis. *Acciones complementarias* “Streamer” (CTM2004-21203-E), “EVENT-Shelf” (CTM2008-03346-E/MAR) and “Sparker” (CTM2008-03208-E/MAR) from the MEC made it possible renting specific high-resolution seismic equipments to achieve the resolution required in marine paleoseismology.

Contents

Resumen extendido.....	vii
Foreword.....	xxxi
Part I: Introduction	
Chapter 1: Approach and objectives.....	3
1.1. Interest of the study: Paleoseismology of slow structures	3
1.2. Objectives	5
1.2.1. Main objectives	5
1.2.2. Specific Objectives	5
1.3. Terminology	7
1.4. Paleoseismology: background	11
1.5. Strike-slip faults and active strike-slip faults	15
Chapter 2: Geological Setting	19
2.1. Tectonic framework	19
2.2. The Eastern Betic Shear Zone	22
2.3. The Carboneras Fault: background	25
2.4. Seismicity	31
2.4.1. Implications of fault gouges for the seismic behaviour of the Carboneras Fault	31
2.4.2. Historical seismicity	31
2.4.3. Instrumental seismicity	33
2.5. Previous paleoseismic results in the Eastern Betic Shear Zone	36
2.5.1. Bajo Segura Fault	36
2.5.2. Carrascoy Fault	36
2.5.3. Alhama de Murcia Fault / Albox Fault	36
2.5.4. Palomares Fault	38
2.5.5. The Carboneras Fault	38
2.6. The CuaTeNEo GPS network	42
Chapter 3: Methods	43
3.1. Indirect techniques	43
3.1.1. Surface analysis (geomorphological evidence)	43
3.1.1.1. Digital Elevation Models (DEM)	44
3.1.1.2. Swath-bathymetry and acoustic backscatter	44
3.1.1.3. Teledetection (airphotos and orthophotos)	46
3.1.1.4. Micro-topography	47
3.1.1.5. Onshore-Offshore geomorphologic cartography	47
3.1.2. Sub-surface analysis (stratigraphic evidence)	48
3.1.2.1. Reflection seismology	49
3.1.2.2. Magnetotellurics	53
3.1.2.3. Ground Penetrating Radar	54
3.1.2.4. Electrical Resistivity Tomography	55

3.2. Direct techniques	56
3.2.1. Trenching	56
3.2.2. Marine sediment cores	57
3.2.3. Radiometric dating methods	58
3.2.3.1. Radiocarbon (^{14}C)	59
3.2.3.2. Uranium-series disequilibrium method (U/Th)	60
3.2.3.3. Thermoluminescence (TL)	61
3.2.3.4. Terrestrial cosmogenic nuclides: ^{10}Be	62

Part II: The Carboneras Fault onshore

Chapter 4: Geomorphological analysis of La Serrata section.....	67
4.1. Introduction	67
4.2. Quaternary units	70
4.2.1. Alluvial fans	71
4.2.2. Fluvial terraces and paleo-channel at La Serrata	74
4.3. Dating the geomorphological units	76
4.3.1. Geological constraints on the ages	76
4.3.2. Radiometric dating	77
4.3.2.1. U-series disequilibrium dating (U/Th)	77
4.3.2.1.a. Considerations concerning dating calcrete crusts	77
4.3.2.1.b. Dating the calcrete crusts at La Serrata	80
4.3.2.2. Luminiscence dating	80
4.3.2.3. ^{14}C dating	83
4.3.2.4. ^{10}Be dating	84
4.3.3. Discussion: Precise age of the Quaternary units at La Serrata	85
4.4. Morphological evidence of Quaternary tectonic activity	89
4.4.1. Faulted and folded Quaternary units	89
4.4.2. NWSB pressure ridges	92
4.4.3. Deflected drainage at La Serrata	93
4.4.4. Relative distribution of alluvial fans	96
4.5. Discussion	98
4.5.1. Chronology of the Quaternary units: Alluvial fans and climate changes	98
4.5.2. Quaternary Tectonic evolution of La Serrata	99
4.5.3. Slip-rates deduced from geomorphological evidence	100
4.6. Conclusions	102

Part III: The Carboneras Fault offshore

Chapter 5: Paleoseismic study at La Serrata.....	105
5.1. Introduction	105
5.2. El Hacho area	106
5.2.1. Geographic and geological setting	106
5.2.2. Overview	107
5.2.3. Near fault geomorphological analysis	107
5.2.4. Subsurface structural analysis using geophysical techniques	109
5.2.4.1. Introduction	109
5.2.4.2. Imaging the sub-surface by Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography at the El Hacho site	110
5.2.4.3. Conclusions	113

5.2.5.	Trenches perpendicular to the fault zone	113
5.2.5.1.	Description of trenches	113
5.2.5.2.	Event horizons and dating analysis	116
5.2.5.3.	Paleoseismic results	118
5.2.5.4.	Summary	120
5.2.6.	3D trenching: parallel to the fault zone	120
5.2.6.1.	Description of trenches	122
5.2.6.2.	Dating analysis	122
5.2.6.3.	Paleoseismic results	123
5.2.6.4.	Summary	124
5.2.7.	El Hacho Gully trench	125
5.2.7.1.	Description of trenches	125
5.2.7.2.	Dating analysis	126
5.2.7.3.	Paleoseismic results	127
5.2.8.	Paleoseismic results obtained at El Hacho: Integration and discussion	127
5.2.9.	Summary	129
5.3.	Los Trances area	130
5.3.1.	Geographic and geological setting	130
5.3.2.	Overview	130
5.3.3.	Description of trenches	130
5.3.4.	Dating analysis	134
5.3.5.	Event horizons and mean recurrence period	135
5.3.6.	Summary	137
5.4.	Other trenching sites	138
5.4.1.	Pecho de los Cristos site	138
5.4.1.1.	Geographic and geological setting	138
5.4.1.2.	Motivation for the study	138
5.4.1.3.	Description of trenches and discussion	138
5.4.2.	La Pared Alta site	141
5.4.2.1.	Geographic and geological setting	141
5.4.2.2.	Motivation for the study	142
5.4.2.3.	Description of trenches and discussion	143
5.4.3.	The Cerro Blanco site	145
5.4.3.1.	Geographic and geological setting	145
5.4.3.2.	Motivation for the study	145
5.4.3.3.	Description of trenches and discussion	146
5.5.	Imaging the depth structure at La Serrata using magnetotelluric methods	148
5.5.1.	Overview	148
5.5.2.	Description and interpretation of the resistivity inversion model	149
5.5.3.	Discussion and conclusions	151
5.6.	Integration of paleoseismic results obtained along the NW boundary of La Serrata	153
5.6.1.	Synthesis of paleoseismic results	153
5.6.2.	Discussion and conclusions	153

Part III: The Carboneras Fault offshore

Chapter 6: Seismostratigraphic and neotectonic analysis of the Carboneras Fault offshore.....	159
6.1. Introduction	159
6.2. Physiography of the Almería Margin	162

6.2.1.	Morphostructural elements of the Almería Margin	162
6.2.2.	The Carboneras Fault Zone offshore	166
6.3.	Seismostratigraphic units of the Almería Margin	167
6.3.1.	Previously defined seismostratigraphic units	167
6.3.2.	New seismostratigraphic sequences identified in IMPULS seismic profiles	172
6.3.2.1.	Facies and key horizons identified in TOPAS profiles	172
6.3.2.2.	High-resolution MCS seismic units	174
6.3.3.	Ages of MCS seismic horizons based on analyses of commercial wells	176
6.4.	Characterization of structures at depth	179
6.4.1.	The submarine North Carboneras Fault segment	179
6.4.2.	The South Carboneras Fault segment	188
6.4.3.	Other CFZ-related structures in the area	196
6.4.4.	Basement paleo-relief	197
6.5.	Discussion	202
6.5.1.	Tectonic evolution of the offshore Carboneras Fault Zone	202
6.5.2.	Segmentation and evolution of the deep architecture of the offshore Carboneras Fault Zone	202
6.5.3.	Estimate of moment magnitude for the Carboneras Fault Zone segments	204
6.5.4.	Southern end of the Carboneras Fault Zone and strain transfer to nearby structures	205
6.5.5.	Structure of the Almería Canyon and Turbidite Channel System	208
6.6.	Conclusions	209
Chapter 7: Paleoseismic study along the offshore Carboneras Fault Zone		211
7.1.	Dating key TOPAS horizons	211
7.1.1.	Analysis of sediment cores from the Almería Margin slope	211
7.1.1.1.	Sedimentary facies	213
7.1.1.2.	Dating analysis and sedimentation rates	218
7.1.2.	Age model for the TOPAS seismostratigraphic units	220
7.1.2.1.	Proposed ages for TOPAS units based on local sedimentation rates	221
7.1.2.2.	Correlation between TOPAS seismic units and climatic variability	222
7.2.	Morphological and stratigraphic evidence of recent tectonic activity	224
7.3.	Discussion	227
7.3.1.	Strike-slip rate analysis from geomorphological offset evidence	227
7.3.2.	Dip-slip rate analysis from seismostratigraphic offset evidence	228
7.3.3.	Does the turbidite paleoseismology concept work in the CFZ? Implications for recurrence intervals	235
7.4.	Conclusions	237
Part IV: Discussion and conclusions		
Chapter 8: Discussion. Onshore-offshore integration of the results.....		241
8.1.	Neotectonics of the Carboneras Fault Zone	241
8.1.1.	Activity of the CFZ: From the Miocene to the Present day	241
8.1.2.	Evidence of block tilting along the CFZ	242

8.2. Paleoseismology of the Carboneras Fault Zone	242
8.2.1. The CFZ as a seismogenic and tsunamigenic fault	242
8.2.2. Sedimentation rates and climatic stages: Implications for paleo-earthquake recurrence intervals	244
8.2.3. Slip-rates	246
8.2.4. Estimations of the mean recurrence period	248
8.3. Tectonic architecture of the Carboneras Fault Zone and its implications for earthquake segmentation	249
8.3.1. Sub-surface tectonic architecture of the CFZ	249
8.3.2. The southern and northern ends of the CFZ: strain transfer to other nearby structures	250
8.3.3. Segmentation of the CFZ	250
8.3.4. Maximum moment magnitude estimations	254
8.4. The Carboneras Fault Zone in its geodynamic context: the Eastern Betic Shear Zone and the Trans Alboran Shear Zone	256
8.5. Perspectives for future research along the Carboneras Fault Zone	257
Chapter 9: Conclusions	259
References.....	263
Annex.....	283

Resumen extendido

1.- Introducción

Interés del estudio

La paleosismología trata del estudio de los grandes terremotos prehistóricos con el objetivo de extender el catálogo sísmico atrás en el tiempo. Esto es especialmente importante en regiones donde las tasas de deslizamiento son lentas y los periodos de recurrencia largos, regiones en las cuales el catálogo sísmico no llega a abarcar un ciclo sísmico completo (Santanach y Masana, 2001). Además, la incertidumbre en la localización de terremotos históricos suele ser importante, y más aún cuando el epicentro se localiza en mar, lo cual dificulta la relación entre terremotos históricos y estructuras concretas. Si queremos estar preparados para futuros terremotos, es imprescindible detectar y caracterizar todas las posibles fuentes sísmicas de una región, incluyendo aquellas que no hayan roto durante el periodo histórico.

El SE de la Península Ibérica está caracterizado por la convergencia entre las placas Africana y Euroasiática, con una sismicidad moderada y un acercamiento lento de dirección NO-SE (4-5 mm/a) (Argus et al., 1989; DeMets et al., 1990). En el SE de la Península Ibérica, esta convergencia es absorbida por un sistema de fallas de salto en dirección sinistrorsas llamado el Sistema de Cizalla de las Béticas Orientales (SCBO). A pesar de que varios terremotos históricos han sido causados por estructuras a lo largo de este sistema, su potencial sísmico sigue siendo poco conocido (Masana et al., 2005). Estudios a lo largo de la Falla de Alhama de Murcia (Martínez-Díaz et al., 2003; Masana et al., 2004), hasta ahora la única estructura del sistema en la que se ha demostrado una actividad sismogénica, demuestran que se trata de una estructura con periodos de recurrencia largos. Esto sugiere que otras estructuras del sistema pueden ser activas a pesar de no haber generado terremotos significativos durante el periodo histórico. Esta región de la Península Ibérica está actualmente densamente poblada, por lo que un terremoto de elevada magnitud podría ser catastrófico para la región.

En el presente trabajo se presenta un estudio sobre la actividad tectónica más reciente de la Zona de Falla de Carboneras (ZFC), una estructura sísmicamente silenciosa pero morfológicamente expresiva, y una de las más largas del SCBO. Para

ello, se ha desarrollado un estudio multidisciplinar a diversas escalas, integrando el análisis de la parte emergida y la parte sumergida de la falla.

Objetivos

Los principales objetivos de esta tesis son:

1) Caracterizar la evolución neotectónica de la ZFC a través de un estudio geológico y geofísico integrado y multidisciplinar a lo largo y en los alrededores de la zona de falla.

2) Determinar la actividad sísmica pasada de la ZFC a través de un análisis paleosísmico con el fin de obtener sus parámetros sísmicos: geometría, tasas de deslizamiento, periodos de recurrencia, tiempo transcurrido desde el último terremoto y máxima magnitud de un terremoto.

La caracterización de los parámetros sísmicos de la falla permitirá evaluar el potencial sísmico de esta estructura, contribuyendo al catálogo sísmico y a las bases de datos de fallas activas, lo cual es esencial para un análisis realista de la peligrosidad sísmica de la región.

Para alcanzar los objetivos principales descritos, se han llevado a cabo paralelamente estudios en tierra y en mar. Los objetivos específicos del estudio terrestre constan de:

- Un análisis geológico y geomorfológico regional de la traza de la falla y de los depósitos involucrados en la deformación, complementado por estudios geofísicos locales. Este análisis permitirá 1) entender la geometría y estructura de la falla, 2) establecer su actividad neotectónica a corto y largo término, 3) detectar las localidades más favorables para realizar futuros análisis paleoseismológicos de detalle.

- Un estudio paleosismológico de detalle centrado en los sitios seleccionados a lo largo de la traza de la falla. Este estudio se basa en una cartografía geomorfológica de detalle, levantamiento microtopográfico, prospección geofísica de alta resolución, apertura de trincheras y dataciones. Estos análisis permitirán determinar la naturaleza sismogénica de la falla así como sus parámetros sísmicos mediante la identificación de terremotos prehistóricos observados en el registro geológico.

Los objetivos específicos del estudio marino constan de:

- Un análisis de la geomorfología y sismoestratigrafía del Margen de Almería, con el objetivo de observar la arquitectura de la ZFC en profundidad, así como su evolución

tectonosedimentaria a lo largo del Neógeno. Para ello, se ha desarrollado un análisis multidisciplinar a diversas escalas mediante el uso de batimetría multihaz y una densa red de perfiles sísmicos con diversos grados de resolución vertical.

- Un análisis paleosismológico basado en observaciones geomorfológicas y estratigráficas mediante el uso de técnicas de muy alta resolución, con tal de obtener los parámetros paleosismológicos de la falla en mar.

El objetivo final de este trabajo es combinar los resultados de tierra y de mar con tal de integrar, comparar y complementar la información obtenida en ambos sectores de la falla. Esto permitirá tener una idea global de la ZFC y caracterizar su completa estructura contribuyendo de una manera realista a los análisis de peligrosidad sísmica.

2.- Marco Geológico

El Sur de la Península Ibérica está caracterizado por una amplia banda de deformación activa, de unos 400 km de ancho (p.e. Sartori et al., 1994). Esta deformación se distribuye a lo largo de una serie de estructuras que absorben la convergencia entre las placas Africana y Euroasiática. En el SE de la Península Ibérica, este acortamiento es acomodado por el SCBO de orientación NE-SO, formado principalmente por fallas de salto en dirección sinistrosas (Bousquet, 1979; Sanz de Galdeano, 1990). El SCBO se extiende en el Mar de Alborán (Bousquet et al., 1975) y pasa a tomar el nombre de Sistema de Cizalla de Trans-Alborán (SCTA) (Frizon de Lamotte et al., 1980; De Larouzière et al., 1988), el cual está probablemente relacionado con las fallas del norte de África de dirección NE-SO (Martínez-Díaz y Hernández-Enrile, 2004). La ZFC es la estructura más meridional del SCBO, con 50 km en tierra (provincia de Almería) y 90 km en mar (Margen de Almería), con lo cual representa una de las estructuras más largas de este sistema.

La ZFC es una estructura transpresiva sinistrosa formada por diversas ramas subverticales (p.e. Bousquet et al., 1975; Bousquet y Philip, 1976; Woodside y Maldonado, 1992) que se extienden por lo menos hasta la corteza inferior (Pedrera et al., 2010). El ancho de la zona de falla varía desde una traza simple hasta unos 2 km y está principalmente formado por un relevo de trazas dispuestas en “*en-échelon*” con características típicas de estructuras transpresivas, las cuales han sido observadas tanto en tierra como en mar (Gràcia et al., 2006; Moreno et al., 2007). En base a cambios de

orientación de la traza de la falla, Gràcia et al., (2006) distinguen dos segmentos para la parte sumergida de la ZFC: el segmento N045° al norte y el segmento N060° al sur.

Sismicidad histórica e instrumental

La actividad sísmica de la ZCBO queda evidenciada por la presencia de terremotos históricos de gran intensidad, como los terremotos de Vera (AD 1518, I=VIII-IX), Almería (AD 1522, I=VIII-IX), Baza (AD 1531, I=VIII-IX), Dalías (AD 1804, I=VIII-IX) y Torrevieja (AD 1829, I=IX-X) (Martínez-Solares, 1995). Igualmente, en épocas más recientes, series sísmicas como la de Adra de 1910, o el reciente terremoto de Lorca del 11 de mayo del 2011 (Mw 5.1) demuestran la necesidad de tener en cuenta la peligrosidad sísmica asociada a estas estructuras.

La ciudad de Almería ha sido devastada históricamente por diversos terremotos (AD 1487, AD 1522, AD 1659, AD 1804) (p.e. Udías et al., 1976; Bousquet, 1979). La ZFC ha sido sugerida como causante de estos eventos, especialmente el de AD 1522 (p.e. Reicherter and Hübscher, 2006). Sin embargo, la incertidumbre relacionada con la localización de los epicentros históricos y la proximidad de otras estructuras sismogénicas (como por ejemplo las estructuras con dirección NW-SE situadas al norte de la ZFC) impiden una relación directa entre estos terremotos históricos y una estructura determinada, para lo cual son necesarios estudios de paleosismicidad. En cuanto a la sismicidad instrumental a lo largo de la ZFC, son escasos los registros de terremotos, siempre de magnitud baja a moderada. Sin embargo, la clara expresión morfológica de la falla en superficie sugiere que se trata de una estructura activa. Esto junto a la falta de sismicidad instrumental sugieren un aumento de deformación acumulada, aumentando así su peligrosidad sísmica en un futuro próximo.

3.- Métodos

Este estudio se ha desarrollado mediante un análisis multidisciplinar y a varias escalas de resolución, tanto en tierra como en mar. Esto ha supuesto un reto ya que se han precisado un gran número de métodos diferentes, lo cual, a su vez, ha permitido combinar las ventajas del ambiente marino (p.e. buena preservación de la falla frente a la acción antrópica y sedimentación continua, Pantosti y Gràcia, 2010), con las ventajas del ambiente terrestre (p.e. observaciones y mediciones *in situ*).

Los métodos empleados se pueden dividir en dos grandes categorías dependiendo de si el análisis se ha desarrollado de manera directa o indirecta. En cuanto a los métodos indirectos utilizados, se pueden distinguir aquellos empleados para el análisis de la superficie terrestre de aquellos empleados para el análisis del subsuelo. Los métodos indirectos empleados para el análisis de la superficie terrestre han permitido obtener evidencias geomorfológicas de la actividad tectónica de la falla y constan de: Modelos Digitales del Terreno (MDT), batimetría multihaz y retrodifusión acústica, fotografías aéreas y ortofotos, y levantamientos microtopográficos. Los métodos indirectos empleados para el análisis del subsuelo han permitido obtener evidencias estratigráficas de la actividad tectónica de la falla y constan de: sísmica de reflexión de diversas escalas (multicanal de alta resolución, Sparker y perfilador de sedimentos TOPAS), magnetotelúrica, GPR (*Ground Penetrating Radar*) y tomografía de resistividad eléctrica. En cuanto a las técnicas directas empleadas, han permitido el análisis directo del material involucrado en la deformación, y constan de: análisis mediante la apertura de zanjas (trincheras), análisis de sedimentos marinos mediante la obtención de testigos de gravedad, y métodos de datación absoluta (^{14}C , U/Th, termoluminiscencia, ^{10}Be).

4.- Desarrollo del estudio en tierra: Análisis geomorfológico y paleosísmico a lo largo de La Serrata

En tierra, después de analizar la totalidad de la parte emergida de la traza de la ZFC mediante fotografías aéreas y reconocimiento de campo, se identificó el área de La Serrata como la zona con mayor número de evidencias de actividad tectónica Cuaternaria. La Serrata es una sierra alargada de 14 km de longitud y 1 km de ancho delimitada por dos fallas paralelas (Weijermars, 1991; Bell et al., 1997; Silva et al., 2003) con evidencias de desplazamientos horizontales (sinistrorsos) y verticales. Ello junto con el desarrollo de unidades Cuaternarias a lo largo de las fallas hace que a lo largo de La Serrata se hayan identificado numerosas evidencias geomorfológicas de actividad tectónica Cuaternaria, así como numerosas localidades para desarrollar un análisis paleosismológico de detalle.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una cartografía geomorfológica de detalle de La Serrata mediante el uso de fotografías aéreas, ortofotos, mapas topográficos de alta resolución (1:5.000) y modelos digitales del terreno, junto a un meticuloso

reconocimiento de campo a lo largo de la zona de falla. Este análisis geomorfológico ha permitido identificar evidencias geomorfológicas de actividad tectónica reciente, como unidades Cuaternarias falladas y plegadas o un drenaje sistemáticamente desviado en sentido levógiro. Las edades de las unidades sedimentarias descritas han sido analizadas por un lado mediante una aproximación geológica (desarrollo de suelos y de costras calcáreas), y por otro mediante dataciones radiométricas. A continuación, estos datos han servido para crear un modelo de edades donde cada unidad sedimentaria se la relaciona con un estadio climático asociado a un estadio isotópico marino (MIS, *Marine Isotopic Stage*). Por último, el análisis de las evidencias geomorfológicas de actividad tectónica reciente junto con el modelo de edades propuesto, ha permitido desarrollar un estudio sobre la evolución tectónica Cuaternaria de La Serrata y obtener tasas de deslizamiento para este sector de la ZFC.

En cuanto al análisis paleosismológico de detalle, se ha llevado a cabo siempre a lo largo del borde NO de La Serrata debido a que es allí donde se han encontrado mayor número de evidencias de actividad tectónica reciente. En total, se han analizado 5 zonas de detalle (de sur a norte: El Hacho y el barranco de El Hacho, El Cerro Blanco, Los Trances, Pecho de los Cristos y la Pared Alta) donde se han llevado a cabo estudios de geomorfología de detalle basados en levantamientos microtopográficos, apertura de trincheras y dataciones de los depósitos involucrados en la deformación. Además, en la zona de El Hacho, también se han desarrollado análisis del subsuelo mediante técnicas geofísicas (GPR y tomografía eléctrica) que han permitido identificar y localizar las distintas unidades en profundidad así como las zonas de fracturas. El análisis paleosismológico de detalle ha permitido evidenciar el carácter sismogénico de la falla, observar paleoeventos y acotarlos en el tiempo, y por último obtener parámetros paleosismológicos para la ZFC (tiempos de recurrencia medio, máximo desplazamiento por evento y magnitudes momento máximas).

Por último, se ha llevado a cabo un modelo 2D de magnetotelúrica a través de La Serrata con el objetivo de observar la estructura en profundidad y evaluar si las trazas que conforman el relieve de La Serrata convergen en profundidad, y en consecuencia interpretar los resultados paleosismológicos como resultados mínimos ya que conciernen únicamente a una traza en superficie de la zona de falla.

5.- Desarrollo del estudio en mar: Análisis sismoestratigráfico, neotectónico y paleosísmico de la parte sumergida de la Falla de Carboneras

En mar, el estudio de la arquitectura en profundidad, así como de la neotectónica y paleosismología de la ZFC se ha llevado a cabo mediante un análisis multidisciplinar de datos obtenidos a lo largo de diversas campañas marinas. Este estudio está basado en datos de batimetría multihaz, sísmica de reflexión, muestreo y datación de sedimentos marinos. Con tal de obtener una visión completa de la ZFC, se han empleado 3 sistemas de sísmica de reflexión. Por un lado, una densa red de sísmica multicanal de alta resolución junto a perfiles de sísmicos Sparker adquiridos en la zona de plataforma, han permitido observar la arquitectura de la zona de falla en los primeros kilómetros bajo el superficie marina. Por otro lado, el perfilador del subsuelo TOPAS ha proporcionado una visión de hasta un centenar de metros por debajo del fondo marino. Con estos datos, se han definido las unidades sísmicas para el Margen de Almería cuyas edades han sido correlacionadas con estudios previos de sísmica de reflexión y de pozos comerciales, a los que se ha añadido un análisis de testigos de sedimentos marinos para las unidades más superficiales (TOPAS). En el caso de estas unidades más superficiales, también se ha establecido un modelo de edades relacionado con variaciones climáticas permitiendo acotar las edades de las unidades sísmicas con las de los MIS.

Los datos sísmicos han permitido observar la evolución de la estructura de la ZFC a lo largo de su trazado, pudiendo distinguir diversos segmentos y subsegmentos, así como analizar la terminación SO de la falla. Por otro lado, estas observaciones, junto al modelo de edades de las unidades sísmicas han permitido analizar la evolución tectónica de la parte sumergida de la ZFC, obtener tasas de deslizamiento para distintos periodos, y por último estimar la magnitud momento máxima asociada a cada segmento.

6.- Discusión de los resultados obtenidos

Actividad tectónica de la ZFC desde el Mioceno hasta el presente

Tanto en el Margen de Almería como en La Serrata, la ZFC se muestra como un alto de basamento formado por fallas que delimitan a cada lado sub-cuencas de edad Miocena. La zona de falla se estrecha en los paquetes sedimentarios Cuaternarios comparada con el ancho de la zona de falla observado en el basamento. Las observaciones de perfiles sísmicos sugieren que la actividad de la ZFC se inició por lo menos a partir del Mioceno Superior. La deformación creciente observada de techo a

base en las unidades sismoestratigráficas que rellenan las sub-cuencas sugiere que la actividad ha sido continua a lo largo del Plioceno y del Cuaternario.

En La Serrata, los ápices de los abanicos aluviales de edad Pleistocena Superior y Holocena se encuentran gradualmente más alejados del frente montañoso en consecuencia a un decrecimiento del frente montañoso posterior a 71 ka BP. Estas observaciones sugieren: 1) un decrecimiento en la actividad de la falla, o 2) un cambio en la cinemática de la falla, con una disminución de la componente vertical del movimiento.

La actividad más reciente también ha quedado evidenciada en la parte sumergida de la falla mediante observaciones sísmicas que muestran los reflectores más superficiales desplazados por la falla, así como por pequeñas deformaciones en superficie. En tierra, el paleocanal observado en las trincheras de El Hacho demuestra una actividad Holocena y el último evento observado queda acotado inferiormente en AD 775 (el cual podría corresponder al terremoto histórico de Almería de 1522).

Evidencias de un basculamiento de bloques a lo largo de la ZFC

En mar, se ha podido confirmar un movimiento vertical en forma de tijera a lo largo del bloque NO previamente sugerido por Gràcia et al. (2006). Este movimiento vertical muestra un levantamiento relativo hacia el SO y subsidencia hacia el NE a lo largo de varios sub-segmentos. Estas observaciones concuerdan con el modelo de escape de bloques multi-fracturados propuesto por Martínez-Díaz (1998) donde los bloques limitados por la ZFC, la Zona de Falla de las Alpujarras y fallas normales con dirección NW-SE delimitan sub-bloques basculados hacia el este.

En tierra, la distribución relativa de los depósitos Cuaternarios situados a los pies de La Serrata sugiere dos episodios de levantamiento regional, el primero localizado en la parte NE de La Serrata y ocurrido entre ca. 1 Ma y 130 ka BP, y el segundo localizado en la parte SO y ocurrido con posterioridad a 71 ka BP. Siguiendo la hipótesis de Martínez-Díaz, los levantamientos observados en La Serrata también pueden ser interpretados como consecuencia del basculamiento hacia el este del modelo de escape de bloques. En este caso habría que considerar dos sub-bloques, uno situado hacia el NE de la Serrata responsable del primer levantamiento, y otro situado hacia el SO responsable del segundo levantamiento. Estos dos sub-bloques quedarían limitados

por una falla normal de dirección N140°-160° con poca expresión en superficie, tal como ya sugirieron Goy y Zazo (1983).

La Falla de Carboneras como una estructura sismogénica y tsunamigénica

Las cuñas coluviales observadas en las trincheras de El Hacho y Los Trances, formadas como consecuencia del degradado de un escarpe de falla, demuestran el comportamiento sismogénico de la ZFC. Esto contrasta con estudios previos que cuestionan la capacidad de la ZFC de generar terremotos en base a la presencia de *fault gouges* (harina de falla) a lo largo de su traza. Sin embargo estas *fault gouges* se interpretan como generadas por el deslizamiento extensional de edad Miocena entre los complejos metamórficos que conforman las unidades Béticas Internas. La ZFC habría intersectado posteriormente este material incluyéndolo en parte de su estructura. Sin embargo, no se ha demostrado la presencia de *fault gouges* a lo largo de una parte significativa de la traza de la falla en profundidad por lo que no descartan que la falla se comporte de manera sismogénica tal como demuestran las cuñas coluviales.

Como estructura sismogénica, la ZFC es una candidata potencial para el terremoto histórico de Almería de 1522, tal como proponen Reicherter y Hübsher (2006). El evento Holoceno descrito en El Hacho (posterior a AD 775) con un desplazamiento lateral de 1,5 m podría corresponder a este terremoto histórico. Sin embargo, existen otras posibles fuentes, como la parte sumergida de la ZFC (que podría haber roto conjuntamente o por separado a la parte emergida) u otras estructuras marinas como la Falla de la Cresta de Adra o las fallas con dirección NO-SE.

De acuerdo con su carácter sismogénico y por contener una parte sumergida, la ZFC también es una potencial fuente de tsunamis para la región. A pesar de ser predominantemente de salto en dirección, la ZFC tiene la capacidad de generar un salto vertical de acuerdo con su localización en la pendiente del Margen de Almería. Además, su pequeño componente vertical podría verse incrementado localmente de acuerdo con el modelo de basculamiento de sub-bloques. Por último hay que añadir, que un terremoto asociado a esta falla podría desencadenar un deslizamiento marino el cual generase un tsunami en las costas del Sur de Iberia y Norte de África (Álvarez-Gómez et al., 2011).

Tasas de sedimentación y estadios climáticos: implicaciones para la obtención de periodos de recurrencia de paleo-terremotos

Un total de cuatro generaciones de abanicos aluviales (A1, A2, A3 y A4) y dos terrazas fluviales secundarias (Tp y Th) han sido identificadas en La Serrata. Asimismo, diversos grados de evolución de costras calcáreas y estadios de desarrollo de suelo han sido asociados a cada una de estas unidades. En el Margen de Almería, las unidades sedimentarias del Cuaternario Superior han sido descritas como una alternancia de facies transparentes y bien estratificadas mediante el perfilador de sedimentos TOPAS. Todas las unidades sedimentarias Cuaternarias observadas a lo largo de la traza de la falla (las cuatro generaciones de abanicos aluviales con sus costras calcáreas, las dos terrazas fluviales y las unidades sedimentarias observadas en los perfiles TOPAS) han sido analizadas mediante métodos radiométricos (^{14}C , TL, U/Th, ^{10}Be) en la medida de lo posible. Sus resultados junto a suposiciones geológicas y climáticas (correlación de estas unidades con patrones climáticos de sedimentación) han permitido correlacionar las unidades sedimentarias con las fluctuaciones climáticas definidas por los estadios isotópicos marinos (MIS). Esto ha permitido acotar algunas unidades del Pleistoceno Medio y Superior cuyas edades quedaban mal acotadas o inciertas mediante métodos radiométricos. Esta suposiciones conllevan a un posible error de decenas de miles de años, lo cual ha quedado evidenciado en el caso de la unidad superior observada en los perfiles TOPAS (unidad IV) cuya base teóricamente debería corresponder a la base del último interglacial (14 ka BP) y está datada por ^{14}C en 31,1 Cal ka BP. Sin embargo, la correlación de las unidades sedimentarias con los estadios isotópicos marinos ha sido esencial para acotar la edad de algunas de las unidades del Pleistoceno Medio y Superior, lo cual a su vez ha sido clave para obtener resultados paleoseismológicos a lo largo de la ZFC.

Del análisis de los patrones de sedimentación se puede deducir que las tasas de sedimentación son mayores durante los periodos fríos (agradación de abanicos aluviales en tierra y alternancia de paquetes turbidíticos y hemipelágicos en mar) que durante los periodos cálidos (estabilización o degradación de las unidades aluviales en tierra y predominio de sedimentación hemipelágica en mar). Una tasa de sedimentación alta implica una mejor resolución para identificar paleoterremotos que una tasa de sedimentación baja (poca resolución) o discontinua (omisión de registro). Esto tiene importantes implicaciones en el análisis paleosísmico, ya que una tasa de sedimentación

baja favorece la omisión de eventos en nuestro estudio, contribuyendo a obtener periodos de recurrencia más largos de los reales y por lo tanto subestimar la actividad sísmica de la región. Los periodos de recurrencia medios son considerados normalmente valores máximos ya que algunos terremotos pueden no haber quedado preservados en el registro geológico, pero en zonas con periodos de sedimentación baja, la probabilidad de sobreestimar la recurrencia (especialmente de fallas lentas) a partir del registro geológico es aún mayor.

Tasas de deslizamiento

Las tasas de deslizamiento de una falla representan la media del desplazamiento total a lo largo de una falla y a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Estos valores son usados para estimar el grado de actividad de una falla y por lo tanto del peligro que representa en un área. A lo largo de la ZFC se han podido calcular tasas de sedimentación a partir de la observación de desplazamientos laterales y verticales de estructuras morfológicas. A parte del valor mínimo calculado para el paleocanal (0,05 mm/a desde 32,1 ka BP) que ha sido interpretado como ampliamente subestimado, el resto de tasas de deslizamiento mínimas son coherentes entre sí, con valores entre 1,1-1,3 mm/a. Igualmente, el valor máximo de tasa de deslizamiento calculado a partir del paleocanal nos da un resultado de 1,3 mm/a. Se proponen tres posibles interpretaciones: 1) las tasas de deslizamiento Holocenas son inferiores a las Pliocenas y Pleistocenas, 2) la tasa de deslizamiento Holocena es cercana a su valor máximo (1,3 mm/a), o 3) la tasa de deslizamiento es realmente 1,1-1,3 mm/a para la traza que delimita La Serrata hacia el NO, a la cual hay que añadir un deslizamiento absorbido por la traza SE (la cual no ha sido analizada en este estudio pero que se interpreta como parte de la misma estructura sismogénica). En este último caso, los valores de 1,1-1,3 mm/a corresponden a valores mínimos y la tasa de deslizamiento total es superior a 1,3 mm/a tal como sugieren las cárcavas marinas. Estudios de GPS apoyan esta última opción con resultados preliminares de tasas de deslizamiento sinistrorsas de $1,5 \pm 0,7$ mm/a y una componente compresiva menor de $1,0 \pm 0,7$ mm/a (Khazaradze et al., 2010). Por lo tanto, se propone una tasa de deslizamiento mínima de 1,3 mm/a para el segmento Norte de la Falla de Carboneras, ya que todas las observaciones de deslizamiento lateral se restringen a este sector.

Las tasas de deslizamiento vertical muestran una gran variabilidad de resultados dependiendo de la zona de estudio y del tiempo considerado (entre 0,01 y 0,3 mm/a calculados para varios intervalos de tiempo). Esto concuerda con a) la gran variabilidad esperada de desplazar una topografía irregular mediante una estructura de salto lateral, y b) la variabilidad esperada de acuerdo con el modelo de basculamiento de sub-bloques propuesto para el bloque NO de la ZFC. En cualquier caso, se confirma que la tasa de deslizamiento vertical es entre uno y dos órdenes de magnitud inferior que la tasa de deslizamiento horizontal, lo que apoya que la idea de que la ZFC es una estructura predominantemente sinistrorsa con una componente vertical menor.

Estimación de los periodos de recurrencia medios

Se han evidenciado un mínimo de 7 eventos desde 191 ka BP a lo largo del extremo NO de La Serrata, siendo el último evento posterior a AD 775. Con estos datos, el periodo de recurrencia medio calculado es de 27,3 ka para los últimos 191 ka BP. Sin embargo, las edades de los últimos eventos están mal acotadas, lo cual influye probablemente incrementando el periodo de recurrencia medio calculado. Si se tiene en cuenta únicamente los últimos tres eventos, ocurridos desde 41,5 ka BP, el periodo de recurrencia medio calculado disminuye a 13,8 ka. Este resultado es muy similar a la recurrencia calculada para la Falla de Alhama de Murcia (14 ka según Martínez-Díaz et al., 2001; Masana et al., 2004) situada al norte de la ZFC. Sin embargo, las observaciones geomorfológicas relacionadas con los dos últimos eventos observados en las trincheras de El Hacho sugieren un intervalo de tiempo entre estos dos eventos consecutivos considerablemente menor, del orden de pocos miles de años. Esto último podría interpretarse, bien como evidencias de un periodo de recurrencia para la ZFC considerablemente inferior al calculado mediante observaciones en trincheras, bien como un efecto de clúster de los dos últimos eventos observados.

No ha sido posible obtener resultados de la recurrencia media para la parte sumergida de la ZFC ya que no se han podido identificar terremotos individuales a partir de los datos sísmicos y acústicos. Para esto, se necesitaría de sistemas de muy alta resolución como los que se incluyen en los ROV (*Remotely Operated Vehicles*) para inspección visual, microbatimetría y sísmica de muy alta resolución. Sin embargo, en base a estudios previos de testigos de sedimentos marinos en el Cañón de Almería (Bozzano et al., 2009), se ha especulado sobre un posible análisis de paleosismología de

turbiditas con resultados sorprendentemente similares a los obtenidos en tierra para la zona de El Hacho. Estos resultados muestran que la última turbidita, considerada sismogénica, es posterior a 1,3 ka (AD 650) sugiriendo un terremoto reciente ocurrido con posterioridad a esta fecha. Igualmente, si se descartan las turbiditas relacionadas con eventos climáticos, se obtiene un posible intervalo de recurrencia de turbiditas sismogénicas de 13 ka. Sin embargo, para que estos resultados tomen significado, se debería confirmar que estas turbiditas son realmente sismogénicas.

En resumen, el valor de recurrencia media obtenidos mediante el análisis de trincheras (13,8 ka) concuerda con los resultados obtenidos para la Falla de Alhama de Murcia (14 ka) y el valor especulativo obtenidos mediante el análisis de turbiditas (13 ka). Asumiendo un comportamiento característico para la ZFC, también es posible estimar un intervalo de recurrencia a partir de dividir el desplazamiento ocurrido durante un terremoto por la tasa de deslizamiento calculada (Wallace, 1970). Asumiendo una tasa de deslizamiento horizontal mínima de 1,3 mm/a y un salto por evento máximo de 1,5 m, se obtiene un periodo de recurrencia medio de 1150 años. Este resultado es coherente con el periodo aparente entre los dos últimos eventos observados en El Hacho, de pocos miles de años. De este modo, un análisis global de los resultados obtenidos a lo largo de la traza de la falla sugiere que la recurrencia media real (alrededor de 1,1 ka) es un orden de magnitud inferior a la recurrencia obtenida mediante el análisis del registro geológico (alrededor de 13,8 ka).

Arquitectura tectónica superficial de la ZFC

El análisis de sismica de alta resolución ha permitido observar una gran variabilidad de estructuras a lo largo la ZFC. El segmento Norte (NCF) con una dirección N047° muestra una estructura en flor en la zona de plataforma, la cual evoluciona hacia fallas paralelas delimitando una cresta de presión y finalmente termina hacia el sur formando una zona de falla vertical y estrecha. El segmento Sur (SCF) forma en su parte más septentrional dos crestas de presión consecutivas con dirección N059° y evoluciona hacia el sur hacia una zona de falla vertical y estrecha manteniendo la misma dirección. Este segmento continua hacia el sur en forma de en una zona de falla vertical y estrecha pero cambiando su orientación a N050°. En tierra, los datos de magnetotelúrica sugieren la ocurrencia de una estructura en flor en el sector de La Serrata.

Ambos métodos muestran únicamente los últimos 1-2 km más superficiales y ni en tierra ni en mar demuestran una convergencia total en profundidad de las trazas que conforman la zona de falla. Para ello habría que recurrir a sistemas de mayor penetración, con la probable consecuente pérdida de resolución en profundidad, lo cual impediría distinguir dos trazas separadas por pocos km. A pesar de esta limitación, una convergencia en profundidad hacia una única estructura sismogénica es lo más probable para la ZFC teniendo en cuenta la escasa separación entre trazas (< 2 km) para una estructura que rompa toda la corteza frágil manteniendo una estructura subvertical (Pedrera et al., 2010).

Las terminaciones sur y norte de la ZFC y transferencia de la deformación hacia otras estructuras

Hacia el sur, se observa una disminución progresiva de la deformación a lo largo de la ZFC y se ha interpretado como una transmisión gradual hacia la Falla de la Cresta de Adra, primero mediante una zona de cizalla y luego mediante una zona de fracturación densa que forma parte de una estructura en cola de caballo en la terminación septentrional de la Falla de Yussuf.

Hacia el norte, la ZFC parece no continuar bajo el mar según los datos disponibles de batimetría, lo que sugiere que la falla termina de manera abrupta en un punto triple junto a la Zona de Falla del Corredor de las Alpujarras y la Falla de Palomares. Por consiguiente, la deformación sería transferida hacia el norte y el oeste a lo largo de estas estructuras.

Segmentación de la ZFC

La ausencia de un registro significativo de sismicidad histórica e instrumental impide establecer una segmentación sismogénica fiable para la ZFC. En este trabajo se propone dos grados de segmentación con tal de profundizar en el conocimiento de la mecánica de la falla y de evaluar su peligro sísmico. Los segmentos de primer orden se definen en base a observaciones geomorfológicas, principalmente representadas por cambios en la orientación de la traza. En mar, los segmentos de segundo orden se definen en base a variaciones de la estructura de la falla observadas en sus kilómetros más superficiales, y en tierra en base a variaciones geomorfológicas a lo largo de la traza.

Los segmentos de primer orden corresponden al segmento Norte de la Falla de Carboneras (NCF) y al segmento Sur de la Falla de Carboneras (SCF). El segmento NCF tiene una longitud total de 100,4 km y una orientación media de N050° en la parte emergida y N047° en la parte sumergida. El segmento SCF tiene una longitud total de 39 km y una orientación de N059° hacia el norte y N050° hacia el sur. Este cambio en la orientación entre segmentos es interpretada como causa de la interacción de la ZFC con una zona de cizalla de dirección NO-SE localizada al SE del segmento SCF.

Los subsegmentos de segundo orden comprenden un total de 6 subsegmentos en mar, 3 a lo largo del segmento SCF (SCF-4, SCF-5 y SCF-6) y 3 a lo largo de la parte sumergida del segmento NCF (NCF-1, NCF-2 y NCF-3), y 4 subsegmentos en la parte emergida del segmento NCF (NCF-a, NCF-b, NCF-c, NCF-d). Todos estos subsegmentos tienen longitudes variables entre 7 km y 20 km. La variación de estructuras en profundidad y/o superficie de estos subsegmentos se caracterizan de norte a sur por: NCF-d) una amplia y compleja zona de deformación, NCF-c) una zona de falla estrecha, NCF-b) dos trazas paralelas (interpretadas bajo La Serrata como una estructura en flor de acuerdo con datos de MT), NCF-a) una traza simple con poca expresión en superficie, NCF-1) una estructura en flor positiva, NCF-2) una zona de falla vertical formando una cresta de presión, NCF-3) una zona de falla vertical estrecha con orientación N047°, SCF-4) una zona de falla con crestas de presión sucesivas, SCF-5) una zona de falla vertical estrecha con orientación N059°, y SCF-6) una zona de falla vertical estrecha con orientación N050°. Sin embargo, haría falta más información del subsuelo en la parte emergida de la falla para definir mejor los límites de cada subsegmento, ya que el límite entre los subsegmentos NCF-a y NCF-1 se sitúa en la línea de costa debido a una cuestión práctica (diferencias en la disponibilidad de datos y metodologías utilizadas) pero carece de sentido estructural. Sería razonable pensar que no existe tal límite y que el subsegmento NCF-1 (estructura en flor) continúa en tierra donde pierde expresión en superficie al igual que en la plataforma marina y sigue hacia el norte a lo largo de los sub-segmentos NCF-a y NCF-b. Sin embargo, la falta de información del subsuelo impide confirmar esta hipótesis.

Estimación de la magnitud momento máxima

Con tal de obtener magnitudes máximas asociadas a paleoterremotos, frecuentemente se utilizan los parámetros de longitud máxima de ruptura en superficie y desplazamiento máximo (p.e. Bonilla et al., 1984; Wells and Coppersmith, 1994).

Las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994) proporcionan una estimación de la magnitud momento máxima (M_w) relacionada con la longitud máxima de ruptura en superficie. En fallas lentas a moderadas, como la ZFC, los límites de segmentos sismogénéticos son raramente descritos y la longitud de segmentos y subsegmentos geométricos se usa como una aproximación a la longitud máxima de ruptura en superficie.

Discontinuidades espaciales a nivel cortical, como variaciones en la orientación de la falla o saltos en la traza de la falla pueden controlar los límites de los segmentos sismogénéticos. En cambio, variaciones en la estructura superficial se entienden más difícilmente como limitadores de dichos segmentos. Por lo tanto, las magnitudes momento máximas calculadas a partir de los subsegmentos de segundo orden (entre M_w 6.1 \pm 0.2 y M_w 6.7 \pm 0.3) tienen poco significado paleoseismológico. Si consideramos cambios en la orientación de la falla (segmentos de primer orden), las magnitudes máximas calculadas se incrementan a M_w 7.4 \pm 0.3 para el segmento NCF y 7.1 \pm 0.3 para el segmento SCF. A su vez, si tenemos en cuenta los cambios de orientación menor dentro del segmento SCF, se obtienen unas magnitudes momento máximas de M_w 6.2 \pm 0.3 para el segmento SCF con orientación N050° y M_w 7.1 \pm 0.3 para el segmento SCF con orientación N047°. Por último, no existe ninguna razón para descartar una ruptura total de la ZFC. En este caso, con una longitud total de 140 km, se obtiene la magnitud máxima posible alcanzada para la totalidad de la ZFC con un resultado de M_w 7.6 \pm 0.3.

En este trabajo, las magnitudes máximas también se han estimado en base al desplazamiento máximo observado a lo largo del paleocanal de El Hacho y en base al grosor de las cuñas coluviales observadas también en trincheras de la misma localidad. Para ello, las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) han sido utilizadas de nuevo, esta vez usando aquella que relaciona la magnitud momento máxima (M_w) y el desplazamiento máximo. Los resultados son de M_w 6.9-7.0 según el desplazamiento del paleocanal y M_w 6.4->6.9 según el grosor de las cuñas coluviales. Sin embargo, el primer resultado se considera más apropiado debido a que se ha calculado a partir del

desplazamiento lateral de una estructura predominantemente sinistrorsa. Estos valores son considerados para el segmento NCF que abarca la zona de El Hacho y son inferiores al valor de magnitud máxima calculado a partir de la longitud máxima de ruptura en superficie ($M_w 7.4 \pm 0.3$). Esto último puede obedecer a alguna de las siguientes hipótesis: 1) el paleoterremoto que desplazó el paleocanal de El Hacho no corresponde al terremoto máximo que este segmento es capaz de producir, 2) el segmento NCF alberga varios segmentos menores y durante el evento observado en El Hacho solo rompió parte de segmento de primer orden descrito, 3) durante dicho terremoto la deformación se distribuyó en varias trazas a lo ancho de la zona de falla, y por lo tanto, los resultados obtenidos en El Hacho corresponden a valores mínimos.

La ZFC en su contexto geodinámico: La Zona de Cizalla de la Béticas Orientales (ZCBO) y la Zona de Cizalla Trans-Alborán (ZCTA)

Las placas Euroasiática y Africana se acercan siguiendo una dirección NO-SE según una tasa de convergencia de 4.5-5.6 mm/a (según el modelo NUVEL1, Argus et al., 1989; DeMets et al., 1990). Si consideramos que la ZFC tiene un comportamiento predominante de salto en dirección, y una tasa de deslizamiento mínimo de 1.3 mm/a, asumimos que está absorbiendo como mínimo un 23.2% de la convergencia total. El resto de la deformación la deben estar absorbiendo otras estructuras del límite de placas como pueden ser el resto de fallas de la ZCBO al norte, las fallas de la ZCTA al SO, la Falla de Yussuf al SE u otras fallas del margen africano poco conocidas. La ZFC junto con la Falla de Alhama de Murcia y la Falla de Yussuf son las estructuras más largas a lo largo del límite de placas y probablemente son las que absorben la mayor parte de la deformación, pero no se debería subestimar otras estructuras igualmente capaces de generar terremotos de gran magnitud (p.e. Cresta de Alborán).

En la zona, se han realizado diversos estudios paleosismológicos, como es el caso de la Falla de Alhama de Murcia (Martínez-Díaz et al. 2001; Masana et al. 2004), donde el pasado 11 de mayo tuvo lugar el terremoto de Lorca ($M_w 5.1$) que causó víctimas mortales y numerosos daños materiales. Aun así, la gran mayoría de las estructuras del límite de placas están poco estudiadas, como las fallas del Margen Africano (p.e. la Falla de Al Idrissi cerca de Al-Hoceima o la Cresta de Alborán), que deberían ser consideradas en los modelos de cálculo de peligrosidad sísmica.

Futuras líneas de investigación a lo largo de la Falla de Carboneras

Son escasos los estudios que analizan de manera conjunta los segmentos de estructuras que contienen una parte emergida y una parte sumergida. Esto fuerza un límite estructural en la línea de costa. Esta falta de conexión tierra-mar en estudios paleosísmicos puede inducir a una subestimación de los parámetros sísmicos (geometría, número de segmentos, etc.) con serias implicaciones en la modelización de riesgo sísmico para una región. La paleosismología marina, disciplina relativamente reciente, tiene que lidiar con algunas limitaciones (p.e. la falla no es directamente accesible para realizar observaciones, medición y muestreo) pero también goza de claras ventajas (p.e. buena cobertura espacial, sedimentación continua a lo largo del tiempo, erosión minimizada, y muy poca alteración antrópica) (Pantosti and Gràcia, 2010). La combinación de estudios terrestres y marinos a lo largo de una misma estructura nos permite un aprovechamiento total de ambos medios: observaciones directas de la falla en tierra y sedimentación las ventajas descritas en mar.

En el presente estudio se ha presentado un estudio integrado tierra-mar donde queda patente la eficacia de combinar los análisis en ambos ambientes. Gracias a los buenos resultados obtenidos, se plantea la necesidad de continuar con el análisis y acotar mejor los parámetros paleosísmicos de la ZFC, con tal de poder evaluar de manera más rigurosa las implicaciones de la falla en la peligrosidad sísmica de la región.

En tierra, las futuras líneas de investigación deberían estar enfocadas a: a) extender la cartografía detallada de la geomorfología de la falla hacia el NE y el SO de La Serrata, b) realizar estudios adicionales de trincheras 2D y 3D a lo largo de la traza de falla, c) ajustar mejor las edades de los depósitos asociados a la falla a través de un mayor número de dataciones mediante el uso de técnicas clásicas así como la aplicación de otros métodos de vanguardia, y d) adquirir y analizar modelos digitales del terreno (MDT) basados en el sistema LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*).

En mar, se propone el uso de sistemas de muy alta resolución mediante el empleo de ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) que permiten acoplar sistemas para un reconocimiento visual, muestreo *in situ*, cartografía microbatimétrica o la elaboración de perfiles de muy alta resolución del subsuelo marino. Estos sistemas permitirán incrementar la precisión requerida para estudios paleosismológicos marinos, como la observación de rupturas de terremotos recientes (p.e. Armijo et al., 2005), o la

identificación de eventos sísmicos individuales a lo largo de los perfiles sísmicos (Barnes et al., 2011).

7.- Conclusiones

La Zona de Falla de Carboneras (ZFC) inició su actividad por lo menos en el Mioceno Superior y ha tenido una actividad continuada durante el Plioceno y el Cuaternario. Durante el Cuaternario, la ZFC ha concentrado su actividad en una zona de falla más estrecha que en periodos anteriores.

El carácter sismogénico de la ZFC queda evidenciado por la presencia de cuñas coluviales asociadas al escarpe de falla observadas en las paredes de las trincheras analizadas. Por consiguiente, la ZFC es una potencial candidata de ser causante de terremotos históricos y tsunamis en la región. Los tsunamis podrían ser desencadenados bien mediante dislocaciones del fondo marino o bien por la consecuente generación de deslizamientos submarinos en el Margen de Almería.

La actividad tectónica Cuaternaria tardía ha quedado evidenciada tanto en tierra como en mar por la presencia de depósitos fallados. El paleoterremoto más reciente detectado, deducido a partir de un paleocanal fallado, es posterior a AD 775. Este último evento observado podría corresponder al terremoto histórico de Almería ocurrido en AD 1522 y que tuvo un tsunami asociado. Sin embargo, existen otras posibles fuentes para este terremoto que no pueden ser descartadas, como es el caso de los segmentos sumergidos de la propia ZFC, la Falla de la Cresta de Adra o las fallas con dirección NO-SW localizadas al NW de la ZFC.

Las unidades sedimentarias Cuaternarias han sido datadas mediante técnicas radiométricas (^{14}C , TL, U/Th, ^{10}Be) tanto en tierra como en mar. Estos resultados, junto a interpretaciones geológicas y climáticas han permitido correlacionar estas unidades con las fluctuaciones climáticas definidas por los estadios isotópicos marinos (MIS, *Marine Isotopic Stages*). En tierra se han identificado un total de cuatro generaciones de abanicos aluviales (A1, A2, A3 y A4) y dos terrazas fluviales secundarias (Tp y Th). La generación de abanicos A1 ha sido asignada al Pleistoceno Inferior aunque el análisis radiométrico le otorga una edad comprendida ente 214 ka BP y *ca.* 1 Ma BP. La generación de abanicos A2 ha sido interpretada como del Pleistoceno Medio y se asocia a los estadios isotópicos fríos MIS 12-6 (478-130 ka BP), siendo los depósitos analizados en el estudio presumiblemente del último pulso de este estadio, MIS 6 (190-

130 ka BP). Las terrazas fluviales T_p se formaron durante el estadio cálido MIS 5 (130-71 ka BP) y albergan unas edades radiométricas acotadas entre 111,5 ka BP y 59,5 ka BP. La generación de abanicos A_3 se formó durante los estadios fríos MIS 4-2, y la subgeneración superior alberga unas edades radiométricas comprendidas entre 71,6 ka BP y 20,6 ka BP. También se ha observado un paleocanal reciente, y por encontrarse este fallado su edad ha sido analizada radiométricamente, con resultados de entre 1313 Cal a BP y 920 Cal a BP. Las terrazas fluviales T_h corresponden al estadio MIS 1 y sus edades radiométricas difieren ligeramente en función del lugar de análisis, entre 1420 Cal a BP y 560 Cal a BP. Además se ha podido distinguir dos fases, primarias y secundarias, entre las costras calcáreas formadas a techo de las unidades aluviales A_1 y A_2 . Las costras primarias son aquellas formadas durante la primera fase de estabilización siguiente a la fase de agradación propia de cada unidad. Es decir, los caliches primarios de la unidad A_2 se formaron durante el estadio isotópico MIS 5 (130-71 ka BP). Las costras secundarias se formaron sobre las primarias durante sucesivos estadios y únicamente allí donde depósitos más jóvenes las recubrieron. Es decir, las costras secundarias de la unidad A_2 se formaron en estadios sucesivos al MIS 5, a partir de 71 ka BP. En mar, se han identificado un total de cuatro unidades sísmicas del Cuaternario superior caracterizadas por una alternancia de facies bien estratificadas y facies semitransparentes, de base a techo: unidades I, II, III y IV. Se estima que la unidad I, de facies bien estratificada, fue depositada durante el estadio frío MIS 6, estando su base en 191 ka BP. La unidad II, de facies semitransparente se ha asociado al estadio cálido MIS 5, estando su base en 130 ka BP. La unidad III, de facies bien estratificada, se ha asociado al estadio frío MIS 2-4, estando su base en 71 ka BP. Por último, la base de la unidad IV, la más superficial, ha sido datada mediante ^{14}C en 31.1 ka BP.

La ZFC es predominantemente vertical a pesar de enseñar una gran variabilidad de estructuras en los primeros kilómetros del subsuelo. Esta gran variabilidad está representada por estructuras en flor, crestas de presión y zonas de falla estrechas. Hacia el sur, la deformación a lo largo de la falla disminuye y se trasmite gradualmente hacia la Falla de la Cresta de Adra, primero a través de un sistema de cizalla y luego hacia una zona densamente fallada que ha sido interpretada como parte de la estructura en cola de caballo de la terminación septentrional de la Falla de Yussuf. Hacia el norte, la ZFC parece terminar de manera abrupta en un punto triple junto a la Zona de Falla del

Corredor de las Alpujarras y la Falla de Palomares, transfiriendo la deformación hacia estas estructuras. Sin embargo se precisaría de un estudio batimétrico de detalle hacia el NE de la ZFC para confirmar esta hipótesis.

En tierra, la distribución regional de los depósitos Cuaternarios sugieren al menos dos episodios de levantamiento, el primero situado hacia el NE de La Serrata (ocurrido entre *ca.* 1 Ma BP y 130 ka BP), y el segundo situado en su parte SW (ocurrido con posterioridad a 71 ka BP). En mar, se ha confirmado el movimiento vertical en tijera del bloque NW, con un levantamiento relativo hacia el SO y subsidencia hacia el NE. Estas observaciones concuerdan con el modelo de escape de bloque multifracturado propuesto por Martínez-Díaz (1988) con un movimiento relativo y rotación de los sub-bloques limitados por la ZFC, la Zona de Falla del Corredor de las Alpujarras y las fallas normales de orientación NO-SE, siendo estas últimas las que controlan el basculamiento hacia el este.

No se ha podido establecer una segmentación sismogénica de la ZFC debido a la falta de un registro instrumental e histórico suficiente. Sin embargo, se han propuesto un modelo de segmentación basado en observaciones geomorfológicas y estructurales. Dos escalas de segmentación han sido propuestas, la de primer orden basada en el cambio de orientación de la traza de la falla, y la de segundo orden basada en variaciones de la estructura superficial de la falla (primeros kilómetros del subsuelo) en mar y de la estructura en superficie en tierra. De este modo, se han definido dos segmentos de primer orden, el segmento Norte de la Falla de Carboneras (NCF) con una orientación variable entre N047°/050°, y el segmento Sur de la Falla de Carboneras (SCF) con una orientación variable ente N059°/050°. Este cambio de orientación entre segmentos ha sido propuesto como consecuencia de la interacción entre la ZFC y una zona de cizalla oblicua a esta situada al SE del segmento SCF. En cuanto a los segmentos de segundo orden, se han definido un total de siete, de norte a sur: NCF-d, NCF-c, NCF-b, NCF-a, NCF-1, NCF-2, NCF-3, SCF-4, SCF-5, SCF-6. Estos segmentos están caracterizados por variaciones en la estructura superficial (crestas de presión, estructuras en flor y zonas estrechas de falla) y cambios en la orientación de las trazas de la falla. Sin embargo, el límite entre los subsegmentos marinos y terrestres ha sido establecido únicamente a efectos prácticos y carece de sentido estructural, por lo que un estudio más detallado sería necesario en esta zona con tal de definir mejor estos límites de segmentos estructurales.

Los segmentos y subsegmentos descritos no representan forzosamente un límite en la fractura producida durante un terremoto, pero estos sí que se pueden entender como una dificultad en la transmisión de la ruptura. Por este motivo, se han usado las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994) para calcular las magnitudes momento máximas según la longitud de cada segmento y subsegmento con tal de representar diversos escenarios de ruptura. Los segmentos de segundo orden abarcan magnitudes máximas de entre Mw 6.1 +/-0.2 (subsegmento NCF-a) y Mw 6.7 +/-0.3 (subsegmento NCF-3), aunque estas son las que tienen un menor sentido paleosismológico. Los segmentos de primer orden abarcan magnitudes máximas de Mw 7.4 +/-0.3 para el subsegmento NCF, y Mw 7.0 +/-0.3 para el subsegmento SCF. Por último, en el peor de los casos, la ruptura total de la ZFC (140 km) supondría una magnitud máxima de Mw 7.6 +/-0.3.

Los datos obtenidos en este trabajo también han permitido calcular las magnitudes momento máximas en función del máximo desplazamiento observado para un solo evento. Según el paleocanal de El Hacho, el desplazamiento máximo sería de 1,5 m asociado al segmento NCF, lo que supone una magnitud máxima de Mw 6.9-7.0. Este valor es inferior al calculado según la longitud del segmento NCF, lo cual sugiere uno de las siguientes hipótesis: 1) el paleoterremoto que desplazó el paleocanal de El Hacho no corresponde al terremoto máximo que este segmento es capaz de producir, 2) el segmento NCF alberga varios segmentos menores y durante el evento observado en El Hacho solo rompió parte de segmento de primer orden descrito, 3) durante dicho terremoto la deformación se distribuyó en varias trazas a lo ancho de la zona de falla, y por lo tanto, los resultados obtenidos en El Hacho corresponden a valores mínimos.

Se ha podido calcular diversos resultados para la tasa de desplazamiento horizontal para la ZFC, con valores mínimos comprendidos entre 0,05-1,3 mm/a para distintos periodos de tiempo. Sin embargo, a partir de observaciones geológicas y geodésicas, se ha podido acotar mejor estos valores, estimando un valor mínimo de 1,3 mm/a para el segmento NCF a lo largo del Cuaternario. Esto representa al menos un 23,2% del acortamiento total entre las placas Euroasiática y Africana.

En cuanto a las tasas de desplazamiento vertical obtenidas a lo largo de la ZFC, se ha obtenido una gran variación de resultados (entre 0,01-0,3 mm/a) dependiendo del lugar y el periodo de tiempo observado. Esta variación de resultados seguramente obedece a dos motivos: a) la ZFC es una estructura predominantemente siniestrosa que

desplaza lateralmente una topografía irregular, b) existen variaciones del desplazamiento vertical a lo largo de la falla de acuerdo con el modelo de basculamiento de subbloques situados al NE de la zona de falla. A pesar de la incertidumbre en los valores de la tasa de desplazamiento vertical, se puede deducir que estos son entre uno y dos órdenes de magnitud inferior que la tasa de desplazamiento horizontal.

El análisis de trincheras ha puesto en evidencia un mínimo de 5 eventos en El Hacho (E1: 130-49.9 ka BP, E2: 130-49.9 ka BP, E3: 41.5-26.6 ka BP, Ea: 32.1 ka BP-AD 934 y Eb: AD 775-Presente) y 4 eventos en Los Trances (L1: 191-130 ka BP, L2: 191-130 ka BP, L3: 83-59.5 ka BP y L4: 71-0 ka BP). Algunos de los eventos observados en ambos sitios podrían estar correlacionados entre sí, de modo que quedan un mínimo de 7 eventos desde 191 ka BP, lo cual sugiere un periodo de recurrencia medio de 27,3 ka. Si únicamente tenemos en cuenta los últimos 3 eventos de El Hacho, ocurridos en los últimos 41,5 ka, el periodo de recurrencia disminuye a 13,8 ka. Sin embargo, el periodo de recurrencia se estima que es de un orden de magnitud inferior, aproximadamente 1,1 ka, de acuerdo con la tasa de desplazamiento horizontal mínima ($>1,3$ mm/a) y el salto máximo por evento (≤ 1.5 m). Además, los dos últimos terremotos observados en El Hacho, los cuales ocurrieron aparentemente con pocos miles de años de diferencia apoyan esta interpretación.

En este estudio se ha demostrado que la ZFC, que en un principio no se tenía en cuenta en los catálogos sísmicos por carecer de sismicidad instrumental e histórica, es una estructura sismogénica y capaz de producir terremotos de gran magnitud. Por lo tanto, su potencial sísmico debe ser tenido en cuenta en los análisis de peligrosidad sísmica de la región. El estudio integrado tierra-mar llevado a cabo ha permitido obtener un conocimiento más realista del potencial sísmico de la ZFC y calcular sus parámetros sísmicos, los cuales contribuirán a las base de datos de estructuras activas permitiendo un análisis de la peligrosidad sísmica más realista para la Península Ibérica.

Foreword

The footprint left by ancient earthquakes in the geological record has been used by paleoseismologists to “read” the recent history of faults since the late nineteenth century. Lessons from rocks, sediments and surface morphologies help to mitigate the effects of these often destructive events that cannot be detected by modern seismic monitoring. Since the plate tectonics theory large and great earthquakes, such as the 1906 San Francisco earthquake (moment magnitude, $M_w < 7.7$), have represented a turning point in the study of prehistoric earthquakes. More recently, the December 2004 Sumatra-Andaman earthquake ($M_w > 9$), which was one of the deadliest natural disasters in recorded history (>250,000 fatalities due to tsunamis accompanying the earthquake), inevitably marked a growing interest in paleoseismology worldwide, with special emphasis on submarine occurrence and coastline effects. Recent great earthquakes underline society’s need to assess the probability and severity of future earthquakes, implementing state-of-the-art building codes, Seismic Hazard Assessment and Early Warning Systems. As earthquakes cannot currently be predicted, the vulnerability of the region and the social awareness in the face of natural disasters are essential for enhancing risk attenuation. The Haiti earthquake in January 2010 ($M_w 7$), with over 200,000 fatalities and more than a million people affected, was especially catastrophic because of the country’s poverty, the fragility of the buildings and the lack of public awareness. The same magnitude was attained in the recent September 2010 Christchurch earthquake (New Zealand) without loss of life, mainly because of the awareness of seismic risk on the part of the Newzealanders. Six months later, the same region suffered another shock, this time closer to the city of Christchurch, causing almost 200 fatalities. The effect of surprise of the Christchurch earthquakes served to arouse the interest of scientists worldwide. No large events were expected to happen in this area of New Zealand, so far removed from the main active faults. Some of the earthquakes that have occurred worldwide in the past few decades were caused by faults that had not undergone significant historical seismicity. These faults could only have been identified by paleoseismic studies.

In Europe, catalogues of historical large earthquakes are often considered complete for the last four to five centuries. But historical observations can represent only a tiny fraction of the history of the fault, making it impossible to identify all seismogenic faults (McCalpin, 2009). Events such as the L’Aquila earthquake (Italy) in May 2009 ($M_w 6.3$), which was caused by a poorly known slow fault, resulting in more than 300 fatalities and in considerable damage to the historical heritage of the town, will certainly re-occur if unknown seismogenic faults are not detected by paleoseismic studies and if steps are not taken to reduce the vulnerability of the area.

The South Iberian Peninsula hosts the slow plate boundary between the African and Eurasian plates. Large historical earthquakes such as the 1755 Lisbon earthquake (Modified Mercalli Intensity Scale (MMIS) XI) and tsunami associated, or the 1829 Torrevieja earthquake (MMIS X) are related to this convergence. However, the slow convergence motion causes these events to be occasional, with return periods of 10^3 - 10^5 years. More specifically, in the Eastern Betics (SE Iberian Peninsula), shortening is mainly accommodated by a left-lateral strike-slip fault system known as the Eastern Betics Shear Zone (EBSZ). In the final stages of this thesis, 9 persons lost their lives in the Lorca Earthquake on 11 May 2011 triggered by the Alhama de Murcia Fault, 100 km north of the study area, and forming part of the same fault system. Despite the moderate magnitude (M_w 5.2) of the main shock, the very shallow emplacement (around 2-6 km depth) of the hypocenter together with the site effects producing an unexpected peak ground acceleration, turned this event into a catastrophe. Despite this recent and other large historical events, the seismogenic behaviour of the region is poorly understood, leading to an underestimation of the seismic hazard. The NE-SW trending Carboneras Fault, the southernmost and one of the longest structures of the EBSZ, is a seismologically silent but morphologically expressive structure, constituting a large potential hazard for the area, as evidenced by the Lorca earthquake.

The main aim of the present work is to better understand the Quaternary tectonic activity of the Carboneras Fault as one whole structure including its marine and onland portions. Instead of mixing results obtained separately, an integrated onshore-offshore paleoseismic approach entails combining techniques, interpretations, discussion and results throughout the study. For this purpose, a multidisciplinary and integrated work was proposed in the IMPULS project by experts in each field: Dr. Eulàlia Masana Closa from the Departament de Geodinàmica i Geofísica of the Universitat de Barcelona (UB) supervised the onshore study, and Dr. Eulàlia Gràcia Mont from the Unidad de Tecnología Marina (UTM) from the Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) supervised the offshore part. The satisfactory results obtained during the IMPULS project prompted the scientific group to further extend the investigation through the EVENT coordinated project, where two sub-projects were devoted to the onshore and offshore studies, respectively, including potentially hazardous structures in the Southern Iberian Peninsula. Additional funding from National initiatives helped to carry out extensive trenching surveys and dating analysis (*Acción Complementaria "Trincheras"*), and to rent specific offshore high-resolution seismic systems (*Acciones Complementarias "Streamer", "EVENT-Shelf" and "Sparker"*) crucial for obtaining the resolution required for marine paleoseismic studies.

Results concerning the Carboneras Fault obtained during these projects form part of this study. The thesis is divided into four parts containing a total of nine chapters. The first part (chapters 1 to 3) is a comprehensive introduction to the study

area, the methods employed and to the paleoseismic and strike-slip concepts used. The second (chapters 4 to 5) and third (chapters 6 and 7) parts develop, respectively, the onshore and offshore analysis of the data and the main results. Finally, the fourth part (chapters 8 and 9) integrates all the results and discusses them jointly to obtain the final conclusions related to the evolution of the fault.

Chapters 4, 5, 6 and 7 are structured as independent scientific manuscripts which content will be submitted to citation index journals in a near future. Processing of electric tomography, Ground Penetrating Radar and magnetotellurics (chapter 5) was carried out by geophysicists from the Departament de Geodinàmica i Geofísica (UB). Profiles were designed and analysed together with the aim of complementing the geomorphic and trenching studies onshore. Sedimentology of the marine sediment cores (chapter 7) was undertaken by Graziella Bozzano (previously at the ICM-CSIC and now at the Servicio de Hidrografía Naval of Buenos Aires) within the framework of the IMPULS and EVENT projects. The results will be presented in different papers and are incorporated into this thesis in order to complement the study of the Carboneras Fault.

