

## La Cordillera Bética: un orógeno activo

### *The Betic Cordillera: an active orogen*

CARLOS SANZ DE GALDEANO<sup>1</sup>, LOURDES GONZÁLEZ-CASTILLO<sup>2</sup>, JESÚS GALINDO-ZALDÍVAR<sup>1,2</sup> Y PEDRO ALFARO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC – Univ. Granada). Avda. de las Palmeras, 4 - 18100 Armilla (Granada), Email: csanz@ugr.es

<sup>2</sup> Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada. 18071 Granada. Email: jgalindo@ugr.es /lgcastillo@ugr.es

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante. 03069 San Vicente del Raspeig (Alicante). Email: pedro.alfaro@ua.es

**Resumen** Desde un punto de vista sísmico y tectónico la Cordillera Bética constituye la parte más activa de la península Ibérica. Este orógeno es el resultado de la interacción entre dos placas mayores o principales (Nubia y Eurasia) y una mucho más pequeña, la placa de Alborán, que se individualizó y desplazó hacia el Oeste por el proceso de apertura de la cuenca Argelo-Provenzal. El resultado de esta expulsión fue el desplazamiento hacia el Oeste de la zona de subducción que se había formado previamente, la creación del arco de Gibraltar y una colisión oblicua en el Sur de Iberia. En el Tortonense se amortiguó considerablemente la apertura de la cuenca Argelo-Provenzal. Se inició entonces la situación geodinámica que se mantiene actualmente. Desde ese momento, domina la compresión, que en el sector oriental es acomodada por un corredor de fallas de salto en dirección, la Zona de Cizalla de la Bética oriental, y en el sector central produce, entre otras estructuras, importantes pliegues E-O. Simultáneamente, existe extensión en el sector central de la cordillera que es acomodada por fallas normales NNO-SSE. Esta extensión ha dejado de ser activa en el mar de Alborán que, en la actualidad, también está sometido a compresión. En este contexto geodinámico, el relieve de la Cordillera Bética no ha parado de crecer, aumentando progresivamente la superficie de las zonas emergidas, y la altitud media del orógeno. Precisamente, esta larga y compleja historia geológica de la Cordillera Bética es lo que la convierte en un magnífico ejemplo para el aula, ya que el alumnado puede entender cómo en muy pocos millones de años el mapa de las placas tectónicas en esta región del planeta se ha modificado sustancialmente, y lo seguirá haciendo en el futuro. Además, puede analizar el debate actual entre la existencia o no de subducción en el arco de Gibraltar (y los modelos alternativos propuestos) o por qué existe extensión en el sector central de la cordillera, en un contexto de convergencia entre las placas principales de Nubia y de Eurasia.

**Palabras clave:** Cordillera Bética, tectónica activa, tectónica de placas.

**Abstract** From a seismic and tectonic view, the Betic Cordillera constitutes the most active region of the Iberian Peninsula. This orogen results from the interaction between two main plates (Nubia and Eurasia) together with the Alboran plate, which was individualized and westward displaced by the opening of the Argelo-Provenzal basin. As a consequence of this expulsion, the westward movement of the subduction zone, the origin of the Gibraltar Arc and an oblique collision in southern Iberia were undertaken. During the Tortonian, the opening of the Argelo-Provenzal basin attenuated given rise to a new geodynamic setting which still remains. Thereafter, the compression dominates, accommodated by a strike-slip fault corridor in the eastern sector of the Cordillera, the Eastern Betic Shear Zone, and by regional E-W folds, among other structures, in the central sector. Simultaneously, an extension occurs in the central sector of the Cordillera dimmed by normal NNW-SSE faults. This extension is no longer active in the Alboran Sea, which is currently under compression. In this geodynamic context, the relief of the Betic Cordillera is continuously growing, increasing the surface of the emerged areas, and the average altitude of the orogen with time. The long and complex geological history of the Betic Cordillera is what makes it a significant example for teaching. Students can understand how the tectonic plate map in this region of the planet has substantially changed only in a few million years, and it will go on doing it in the future. In addition, the current debate between the existence of subduction in the Gibraltar Arc and why extension in the central sector of the mountain range occurs in a context of convergence between the main plates of Nubia and Eurasia can be analyzed.

**Keywords:** Betic Cordillera, active tectonics, plate tectonics.

## INTRODUCCIÓN

En Iberia el principal motor geodinámico desde el Cretácico superior, hace algo más de 80 millones de años, ha sido la convergencia entre las placas de Eurasia y Nubia<sup>1</sup> (Noquet, 2012). Durante el Paleoceno y Eoceno, esta convergencia fue responsable de la formación de los orógenos de los Pirineos, la Cordillera Ibérica o la Cordillera Costero-Catalana, cuando aún existía un límite de placas entre Iberia y Eurasia al Norte de la península (Capote et al., 2002). Las últimas deformaciones importantes de la tectónica compresiva alpina en esos sectores finalizaron entre el Oligoceno y el Mioceno Inferior, cuando Iberia quedó unida (acrecionada en términos tectónicos) a Eurasia, y ese límite de placas dejó de existir.

Desde entonces, en la península Ibérica se han producido procesos tectónicos activos como el rejuvenecimiento del relieve en el centro y Norte peninsular (ver p.ej. De Vicente y Vegas, 2007; Fernández-Lozano et al., 2009), o la extensión en el Golfo de Valencia y la Cordillera Ibérica (ver p.ej., Simón, 2007). Sin embargo, estas evidencias de actividad tectónica y sísmica ocurrida en los sectores central y septentrional de la península son de menor importancia si se comparan con lo acontecido en los últimos 20 millones de años en el sur y sureste de Iberia. Durante este periodo de tiempo se formaron muchos de los rasgos geológicos de la Cordillera Bética, enmarcados en un proceso geodinámico que todavía no ha finalizado y que, además, ha creado su actual relieve.

En este trabajo se analiza la evolución geodinámica reciente de la Cordillera Bética, cómo se ha creado su actual relieve y cuál es su situación geodinámica actual en el marco de la Tectónica de Placas. No se incluye una descripción detallada de la geología de la Cordillera Bética, ni tampoco un análisis de los procesos tectónicos más antiguos (solo se citan algunos rasgos previos para que sirvan como contexto). Los lectores interesados pueden consultar información mucho más detallada en los capítulos dedicados a la Cordillera Bética de los libros “Geology of Spain” (Ed. Gibbons y Moreno, 2002), “Geología de España” (Ed. Vera, 2004) o “Geología de España, una historia de 600 millones de años” (Meléndez Heviá, 2004). Recientemente, en “Regional Geology Reviews” se han publicado varios volúmenes sobre la geología de la península (Eds. Quesada y Oliveira, 2019 y 2020). En el tercer volumen, coordinado por Jaume Vergés y José Carlos Kullberg, se incluye la evolución alpina de la Cordillera Bética. En el

<sup>1</sup> Nubia es el nombre que recibe toda la parte central y occidental de la antigua placa africana que en los modelos geodinámicos actuales está dividida en dos por el rift africano oriental, con Nubia al Oeste y Somalia al Este. Es decir, con el nombre de placa de Nubia se entiende a casi toda África, salvo la zona del Cuerno de África y poco más (Argus et al., 2011). Se podría decir que no es un nombre bien elegido. Por otra parte, en este trabajo no utilizamos el término de placa Ibérica porque nos referimos a la evolución más reciente de la Cordillera Bética y de la península Ibérica. Iberia dejó de ser una placa independiente cuando finalizó la orogenia alpina en Pirineos, y quedó unida tectónicamente al resto de Eurasia.

quinto y último volumen de la colección (The Geology of Iberia: A geodynamic approach, coordinado por Azañón y Cardoso Cabral) se incluye un capítulo sobre fallas activas de la Cordillera Bética (Sanz de Galdeano et al., en prensa).

## EVOLUCIÓN GEODINÁMICA EN EL MIOCENO INFERIOR Y MEDIO

Gran parte del proceso de formación de la Cordillera Bética ha estado ligado a la interacción entre las dos grandes placas de Eurasia y Nubia, y una tercera más pequeña, la placa de Alborán. Pero para comprender su evolución geológica también es necesario tener en cuenta la progresiva apertura de la cuenca Argelo-Provenzal, con formación de nueva corteza oceánica, ocurrida desde finales del Oligoceno en el Mediterráneo occidental (Fig. 1) (Boillot et al., 1984). Este hecho provocó en esa región una importante extensión, alterando allí el cuadro de convergencia general entre Eurasia y Nubia.

La cuenca Argelo-Provenzal comenzó a abrirse tras concluir la tectónica de superposición de mantos ocurrida en la Zona Interna Bético-Rifeña (es común en ambas cordilleras). Conforme se abría la cuenca, sus bordes fueron fuertemente comprimidos y expulsados. Parte de este borde fue expulsado hacia el Sur y hacia el Oeste, dando lugar a la zona interna argelina (buena parte de las Kabilias), y a la Zona Interna Bético-Rifeña, respectivamente. Contemporáneamente se formaba el actual mar de Alborán que es la prolongación suroeste de la cuenca Argelo-Provenzal. Esos sectores que se individualizaron, separaron y fueron expulsados durante la apertura de esta cuenca Argelo-Provenzal, constituyen lo que se ha llamado AlKaPeCa (Alborán, Kabilias, Montes Peloritano y Calabria (Bouillin et al., 1986), o bloque Mesomediterráneo. De ellos, nos interesa el sector que dará lugar a la Zona Interna Bético-Rifeña, también denominado Dominio de Alborán, dominio Sudsardo (Sanz de Galdeano, 1990a) o placa de Alborán. En este trabajo, utiliza-

Fig. 1. Situación de la Cordillera Bética y el Rif en el ámbito del Mediterráneo occidental. El recuadro rojo marca la posición de la figura 2. Se recomienda consultar la versión digital.

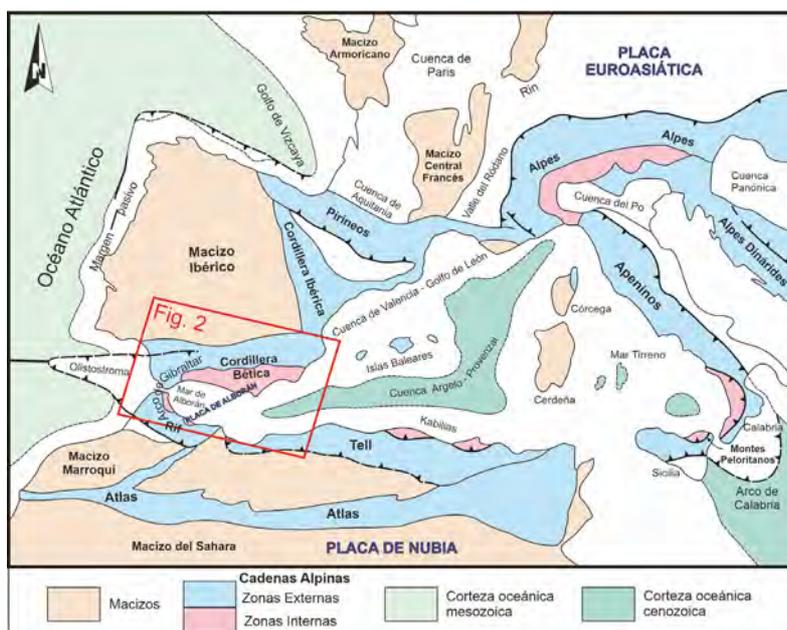
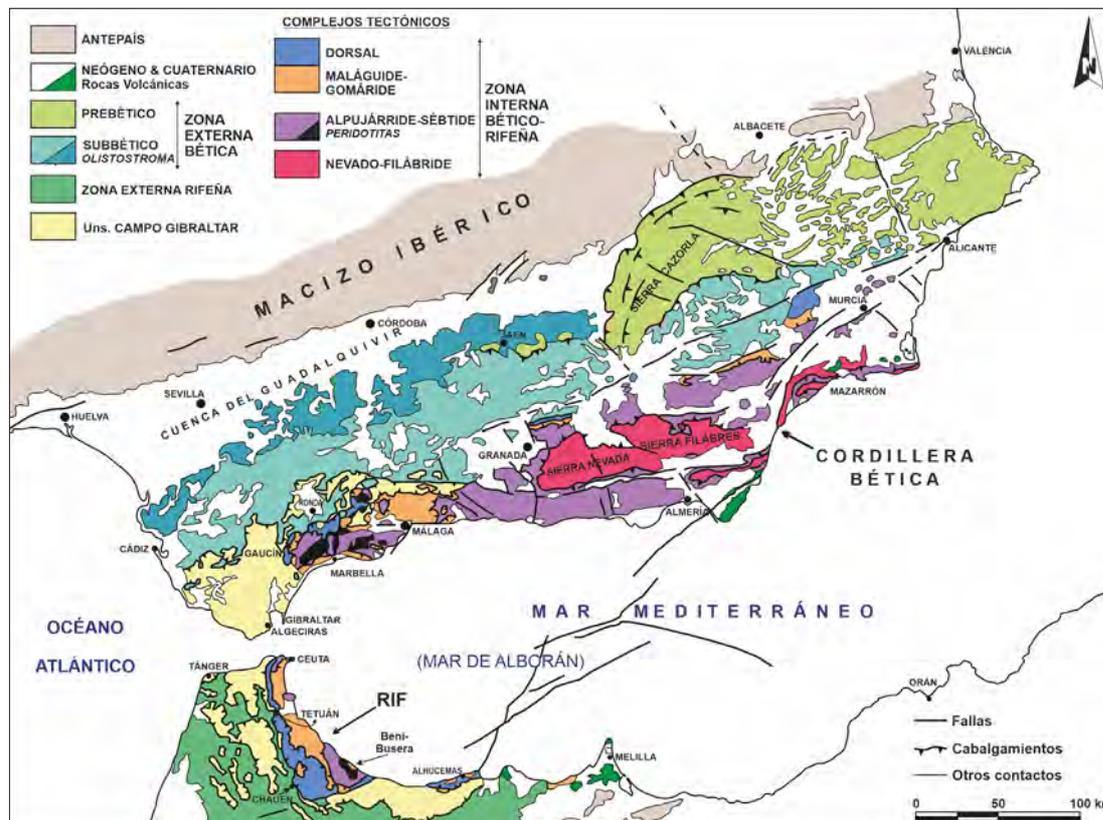


Fig. 2. Esquema geológico de la Cordillera Bética y el Rif. Su situación se indica en la figura 1. Tomada de Sanz de Galdeano (2019). Se recomienda consultar la versión digital.



mos el término de placa de Alborán, aunque tiene la singularidad de haber sufrido una intensa deformación interna.

La deriva hacia el Oeste de la Zona Interna Bético-Rifeña ya fue propuesta por Andrieux et al. (1971) para explicar la disposición arqueada de la Cordillera Bética y el Rif, unidos –o si se quiere, separados– en el Estrecho de Gibraltar (Fig. 2). Esa deriva produciría una colisión oblicua entre la Zona Interna y la parte sudoccidental de Eurasia (en el Sur de Iberia) y con la parte nororiental de África, formándose el orógeno Bético-Rifeño (Fig. 3). Esto ocurrió a partir del Mioceno inferior. Este complejo proceso determinó que las deformaciones no se limitaran a una fina línea de contacto entre las placas, sino que se extendieron a una amplia zona de varios centenares de kilómetros de anchura.

Caben destacar dos rasgos geológicos importantes, ligados entre sí, que ayudan a comprender las características de la Cordillera Bética (y el Rif): la subducción en el arco de Gibraltar, y la colisión oblicua entre la placa de Alborán y Eurasia.

#### Subducción en el arco de Gibraltar

Al desplazarse hacia el Oeste la Zona Interna Bético-Rifeña (o placa de Alborán) se superpuso sobre la corteza sudibérica, produciéndose un proceso de subducción (Gutscher et al., 2002). Esto sucedió al mismo tiempo en relación con la corteza de la parte africana adyacente, que también comenzó a hundirse.

Este proceso de subducción es, sin duda, singular, pues bajo el arco que se está formando hay dos placas concernidas: la Euroasiática en su parte sudibérica hundiéndose hacia el S o SE, y un sector de la de Nubia, hundiéndose hacia el N o NE. El hecho de

afectar a dos placas lo hace diferente de otros arcos. Así, por ejemplo, en los arcos que hay en Japón o Filipinas, entre otros, es únicamente la placa pacífica la que subduce. Por eso, las características del arco de Gibraltar no son habituales.

Simultáneamente a la deriva deriva de la placa de Alborán, también fue migrando de Este a Oeste la propia zona de subducción. Este contexto geodinámico complicado dio lugar a que en la Cordillera Bética existieran al mismo tiempo zonas sometidas a compresión y otras a extensión. Así, en la cuenca de Alborán se produjo una importante extensión con un gran adelgazamiento cortical (Comas et al., 1999), mientras que en otros sectores predominó una tectónica de desgarre con desplazamientos oblicuos, y en el frente predominó la compresión.

#### Colisión entre la Zona Interna Bético-Rifeña e Iberia y el amortiguamiento de su deriva al O

Además del proceso de subducción señalado, a niveles menos profundos hay que indicar que, en su deriva hacia el Oeste, la placa de Alborán colisionó de forma oblicua con la plataforma sedimentaria mesozoica y cenozoica del S y SE de Iberia, es decir, con la actual Zona Externa Bética. En esta colisión la Zona Externa resultó muy deformada, dando lugar a cabalgamientos y pliegues. Muchas de las unidades tectónicas entonces creadas fueron rotadas, generalmente en el sentido de las agujas del reloj. Los materiales salinos de sus series triásicas facilitaron los despegues de las unidades y sus rotaciones, dando lugar a una típica tectónica de cobertera, totalmente independiente del basamento sobre el que se deslizaban.

La deriva hacia el Oeste –con colisión oblicua–, muy importante durante el Mioceno inferior, fue

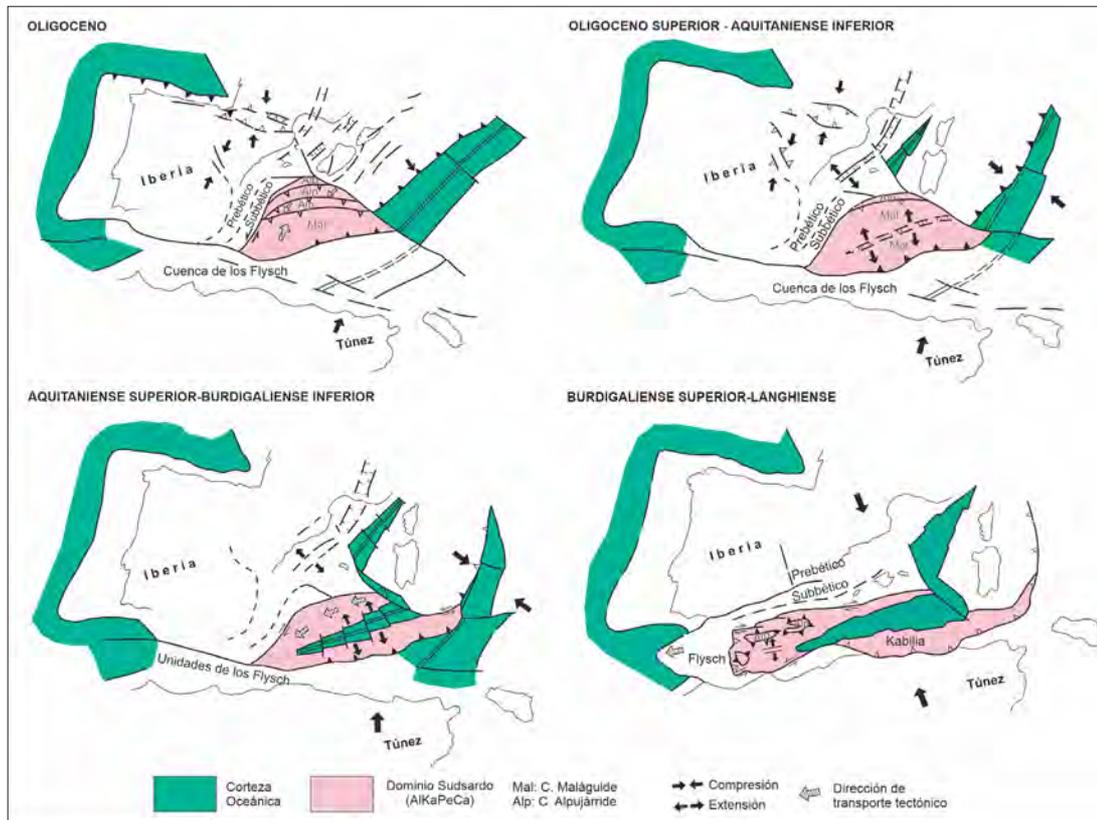


Fig. 3. Evolución geológica del Mediterráneo occidental durante el Mioceno. Modificado de Sanz de Galdeano (1990).

poco a poco amortiguándose, de manera que cuando se llegó al inicio del Mioceno Superior, hace unos 10 millones de años, cesó en gran medida. Este hecho significó que la compresión entre las placas de Nubia y de Eurasia, predominó de nuevo en la región, y se restableció la situación geodinámica anterior al proceso de apertura de la cuenca Argelo-Provenzal. Pero para entonces ya la placa de Alborán había quedado accionada a Iberia (y si se considera la parte rifeña, a África, a la placa de Nubia), dando lugar a la Zona Interna Bético-Rifeña.

### SITUACIÓN GEODINÁMICA EN EL PERIODO NEOTECTÓNICO (DESDE EL TORTONIENSE) Y EN LA ACTUALIDAD

El restablecimiento generalizado de la compresión NNO-SSE inició un nuevo periodo de acortamiento en esa dirección. La tasa de convergencia estimada entre las placas de Nubia y de Eurasia es de unos 5 mm/año (ver revisión en Nocquet, 2012) (Fig. 4). La mayor parte de esta convergencia es acomodada en el Norte de África, donde la actividad tectónica y sísmica es mayor que en el Sur de Iberia. Aun así, la Cordillera Bética acomoda en torno a un tercio de la convergencia (Serpelloni et al., 2007). Por tanto, el límite de placas no es estrecho y neto, sino que se distribuye en una amplia zona de deformación que incluye el norte de África, el mar de Alborán y la Cordillera Bética, tal y como se puede observar en el mapa de sismicidad (Fig. 5).

A la citada convergencia se asocia una extensión perpendicular, ENE-OSO, de manera que actualmente coexisten zonas en las que fundamentalmente se observa acortamiento en la dirección aproximada

N-S, mientras que hay otras en las que predomina la extensión, o, incluso, sectores que están caracterizados por grandes fallas de salto en dirección.

A continuación, describimos la situación geodinámica más reciente (desde el Tortoniense) en el mar de Alborán y en tres sectores de la Cordillera Bética que destacan por tener rasgos tectónicos singulares.

#### Mar de Alborán

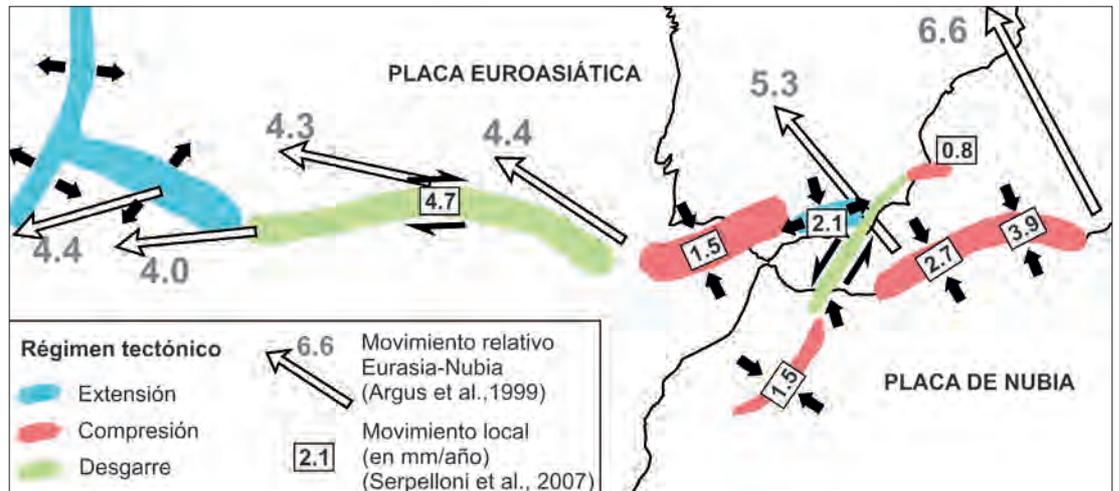
En el mar de Alborán, originalmente formado por extensión, ocurrió a partir del Mioceno superior una notoria inversión tectónica, con un neto predominio de las estructuras compresivas. Algunos autores (Crespo-Blanc et al., 2017) indican que el arco tectónico de Gibraltar se ha apretado en gran medida convirtiéndolo en uno de los más cerrados del planeta.

La observación de la distribución de profundidades de sismos actuales en el mar de Alborán contribuye al conocimiento de la situación actual de esta región (Fig. 6). La distribución arqueada de los terremotos con profundidades mayores de 40 km, localizados bajo lo que correspondería a una corteza normal, puede interpretarse ligada a la posición de la subducción (Fig. 7). Según estos datos de sismicidad de acuerdo con algunos investigadores, este proceso continuaría en la actualidad.

#### Sector oriental: la Zona de Cizalla de la Bética Oriental

Uno de los rasgos tectónicos, a escala cortical, de mayor relevancia en la evolución reciente de la Cordillera Bética es la Zona de Cizalla de la Bética Oriental (Bousquet, 1979; Silva et al., 1993), (Eastern Betic Shear Zone, EBSZ por su denominación

Fig. 4. A. Valor y dirección de la convergencia entre las placas de Nubia y Euroasia desde el extremo occidental del Mediterráneo a la cordillera Centro Atlántica. Datos de Argus et al. (1989) en Noquet (2012). B. Esquema con las principales características cinemáticas y tectónicas del límite de placas entre Eurasia y Nubia. Las tasas de deformación se expresan en mm/año. Modificado de Serpelloni et al. (2007). Se recomienda consultar la versión digital.



en inglés). En realidad, esta zona de cizalla es parte de una estructura mayor pues se continúa en las fallas que atraviesan el mar de Alborán (Trans-Alboran Shear Zone, TASZ) descrita, entre otros, por Larouzière et al. (1988). Se prolonga incluso con el Norte de Marruecos, en el entorno de Alhucemas y algo más al Oeste (Fig. 2). Precisamente, cerca de esa población marroquí se ha producido una importante actividad sísmica tanto en tierra como en mar, destacando los terremotos de 1994 (Mw=6.0), 2004 (Mw=6.3) y 2016 (Mw=6.3).

La EBSZ, está formada por un conjunto de fallas de desgarre sinistrorsas (Fig. 8) de unos 250 km de longitud. Se extiende en tierra entre Almería y Alicante, y estudios de geología marina han confirmado su prolongación al ENE en Alicante. A lo largo de la EBSZ se suceden varias fallas activas entre las que destacan las de Carboneras, Palomares, Alhama de Murcia, N de Carrascoy, Crevillente y Bajo Segu-

ra, citadas de SSO a NNE. En realidad, consideradas todas esas fallas a una escala más general, hacia el SSO alcanzan las islas Canarias, mientras que por el NNE llegan al mar del Norte. Es una zona de debilidad que tiende a cortar la placa Euroasiática por el centro de Europa y también a parte de la de Nubia por Marruecos (Sanz de Galdeano, 1990b).

En el trazado de la EBSZ se han localizado varios terremotos históricos importantes (en 1522 en Almería, en 1526 en Vera y en 1829 en Torre Vieja). Además, se han producido otros terremotos de menor magnitud, pero de consecuencias catastróficas, como el reciente de Lorca de 2011 (Mw=5.2) (Martínez-Díaz et al., 2012). En la parte central y meridional de la EBSZ se han medido con GPS las mayores tasas de desplazamiento de una falla en la península Ibérica, con valores de desplazamiento que oscilan entre 1.3 y 1.5 mm/año (Echeverría et al., 2013, 2015).

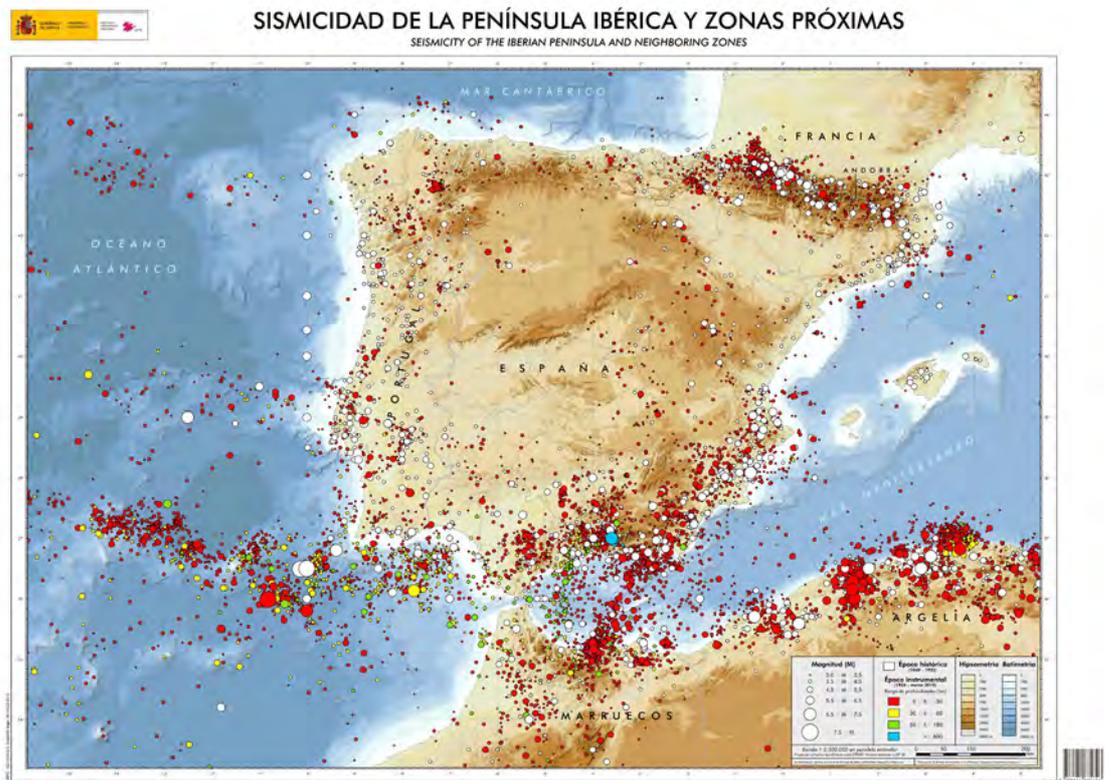


Fig. 5. Mapa de sismicidad de la península Ibérica actualizado hasta 2015. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).

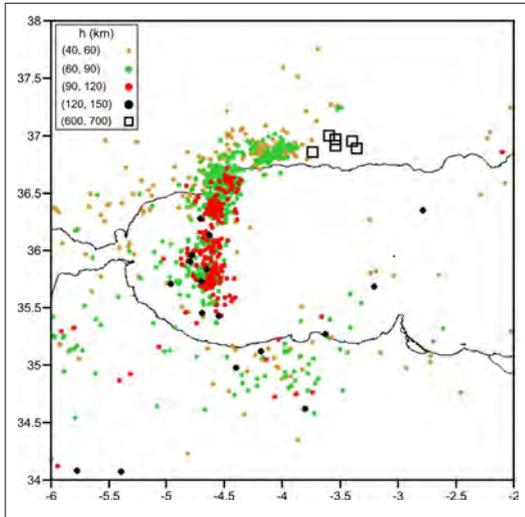


Fig 6. Distribución de sismos intermedios y profundos, con indicación de sus profundidades, en el mar de Alborán y áreas próximas. Corresponden al periodo 1952-2011. Tomada de López-Casado y Henares (2011). Se recomienda consultar la versión digital.

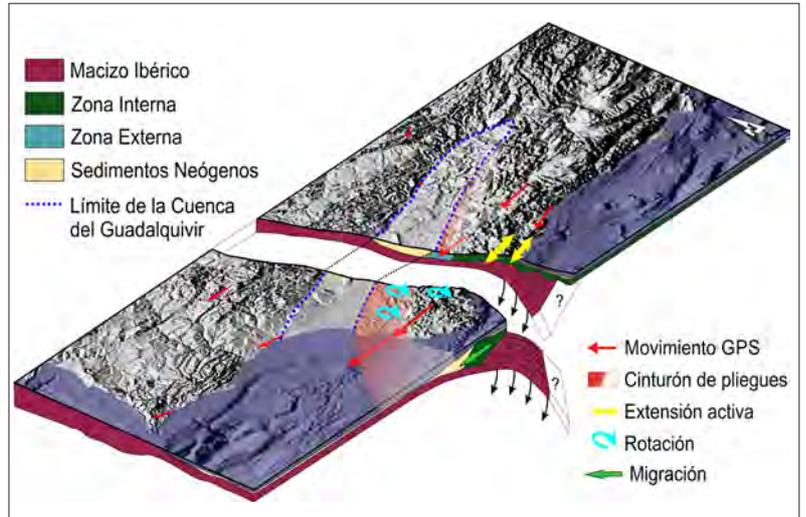


Fig. 7. Modelo tectónico del extremo occidental de la Cordillera Bética con datos CGPS integrados. La tectónica de slab-rollback determina el desplazamiento más rápido del extremo occidental hacia el O y el desarrollo de rotaciones dexas. Simultáneamente, se produce una extensión E-O moderada en el sector SE de la cordillera. Modificado de González-Castillo et al. (2015). Se recomienda consultar la versión digital.

### Sector central: grandes pliegues E-O y extensión ENE-OSO de la Zona Interna

En el sector central dominan dos rasgos diferentes: los grandes pliegues de dirección E-O, entre los que destacan los antiformes de Sierra Nevada y de la Sierra de los Filabres, formados desde el Mioceno superior, y la extensión ENE-OSO, claramente visible en las cuencas de Granada y Guadix-Baza (Fig. 9). Consideradas en su conjunto, en el sector central de la Cordillera Bética se han obtenido valores de extensión que oscilan entre 2 y 4 mm/año.

Las fallas normales que acomodan esta extensión tienen una dirección aproximada NNO-SSE. Entre ellas citamos las fallas del borde oriental de la cuenca de Granada (fallas de Víznar/Alfacar, El Fargue-Jun, Granada, Pinos Puente-Atarfe-Dílar, Gábía) (Sanz de Galdeano et al., 2012), que en los últimos millones de años suman un salto vertical de más de 2000 metros. Como curiosidad, la falla activa de Granada es responsable del escalón topográfico que existe en la ciudad que separa el bloque levantado, donde se encuentra el barrio del Albaycín y la Alhambra, del bloque hundido, donde se sitúa la ciudad moderna. Otra falla importante es la de Padul-Nigüelas, que fue declarada monumento natural por la Junta de Andalucía. En la cuenca de Guadix-Baza destaca la falla de Baza, que suma un desplazamiento vertical de unos 2000-3000 m.

También hay que destacar la falla del Norte de Sierra Tejeda, en el borde Sur de la cuenca de Granada. Esta falla, de dirección aproximada E-O, es la probable fuente sismogénica del terremoto de Andalucía de 1884 (I=X), el más devastador ocurrido en la península Ibérica desde que existen datos históricos e instrumentales. Esta falla en realidad forma parte del conjunto de fallas E-O que pasan al Sur de Sierra Nevada (determinan la existencia del corredor de las Alpujarras, Sanz de Galdeano et al., (1985), y llegan al mar en la provincia de Almería).

Los estudios geodésicos están aportando en estos últimos años los primeros resultados sobre la velocidad de desplazamiento individualizado de algunas de estas fallas, es decir, de la extensión que producen. Por ejemplo, la falla de Padul-Nigüelas tiene una velocidad de 0,5 mm/año (Gil et al., 2018).

### Sector occidental

Comprende el sector situado desde el Oeste de la cuenca de Granada hasta la terminación occidental de la cordillera. Es el menos conocido desde el punto de vista de la tectónica activa pues, principalmente situado sobre la Zona Externa, en él predominan materiales fácilmente erosionables, en los que es más difícil observar las deformaciones. Desde el Mioceno Superior hasta la actualidad, la región ha estado caracterizada por un régimen de esfuerzos compresivo, que en superficie se manifiesta por pliegues abiertos. Crespo-Blanc et al. (2017) han calculado rotaciones de determinados bloques de has-

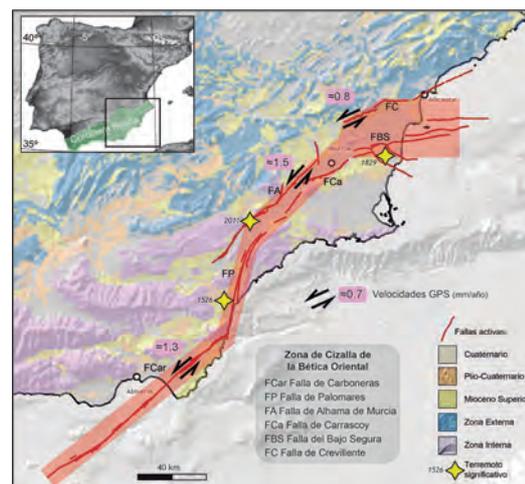
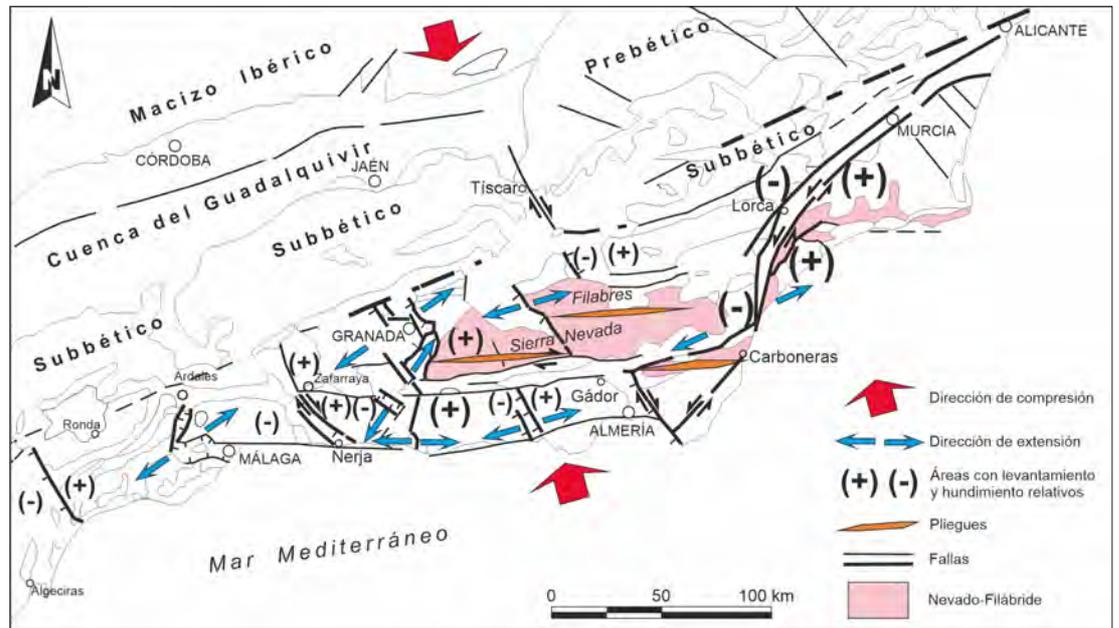


Fig. 8. Esquema tectónico de la Zona de Cizalla de la Bética Oriental, con su prolongación hacia el NE y el SO (Trans-Alboran Shear Zone). Se indican las principales fallas activas y los terremotos más significativos. Imagen cortesía de Iván Martín-Rojas. Se recomienda consultar la versión digital.

Fig. 9. Mapa esquemático de la Cordillera Bética indicando la actual situación de compresión y extensión. Se muestran tres pliegues importantes formados desde el Mioceno superior y los principales juegos de fallas, con indicación de las que son activas. El sector oriental se extiende desde Almería hasta Alicante. Y el sector central ocupa la área comprendida entre Almería y Málaga y, por el N, hasta Jaén.



ta 53° desde el Tortonense hasta la actualidad. Los mecanismos focales y los datos geodésicos indican que el desarrollo del arco de Gibraltar sigue siendo activo (Mancilla et al., 2013; González-Castillo et al., 2015). Recientemente, González-Castillo et al. (2015) han calculado un acortamiento medio en la zona de 2.6 mm/año en la dirección ONO-ESE.

En definitiva, la Cordillera Bética, ha tenido una historia tectónica compleja, de la que cada vez se conocen más detalles, aunque siguen abiertos muchos debates científicos apasionantes como, por ejemplo, si la subducción ha finalizado o todavía es activa al Oeste del estrecho de Gibraltar, o si solo le quedan los últimos movimientos antes de quedar fosilizada.

### INFLUENCIA DE LA TECTÓNICA RECIENTE EN EL RELIEVE

Debido a esta actividad tectónica reciente descrita se ha producido una progresiva elevación del relieve, con el consiguiente retroceso marino (Fig. 10). Esta elevación no ha sido homogénea (Fig. 11). Se relaciona sobre todo con los sectores que han desarrollado los pliegues más importantes antes citados y también con nuevos cabalgamientos de unidades en la Zona Externa.

Durante el Mioceno Superior existían pasillos marinos que conectaban el océano Atlántico y el Mediterráneo, tanto en el Rif como al norte de la cordillera Bética (Estrecho Norbético), que debido a

Fig. 10. Levantamiento del relieve de la cordillera Bética desde el Mioceno Superior. Modificado de Sanz de Galdeano y Alfaro (2004). Se recomienda consultar la versión digital.

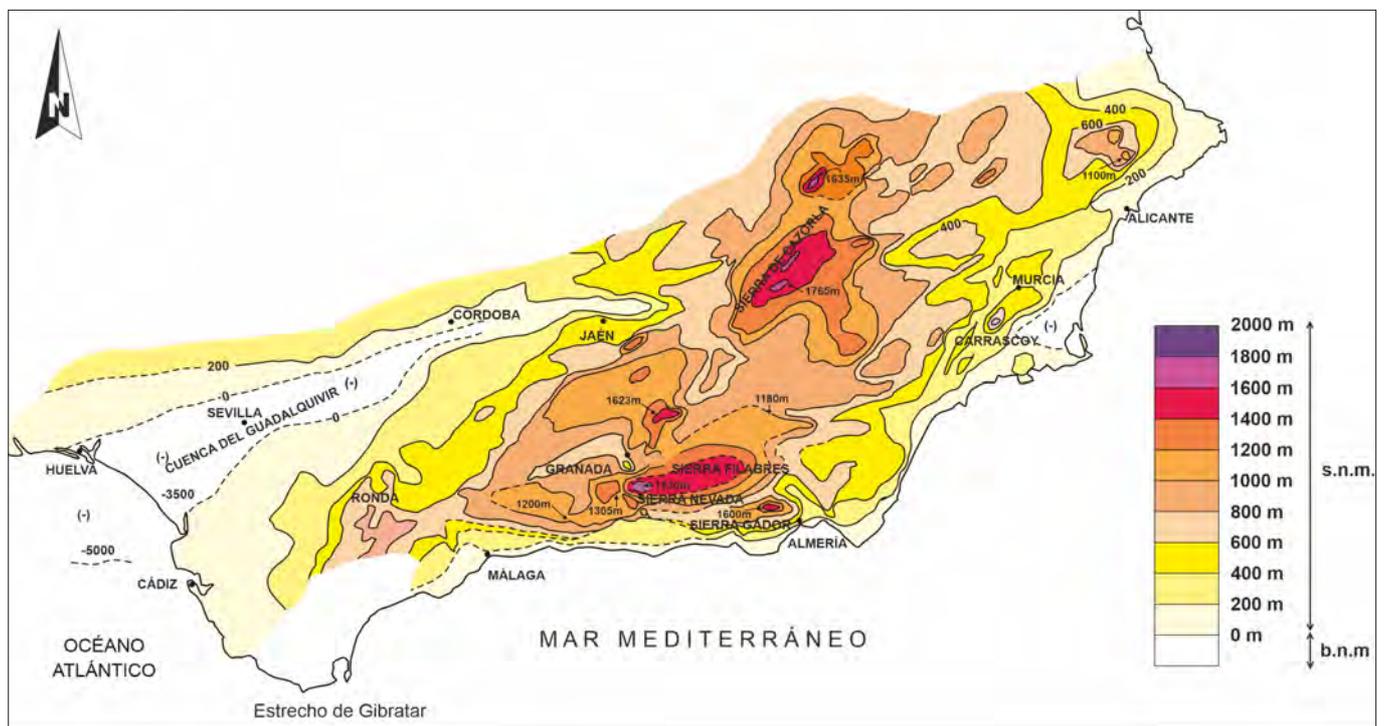




Fig. 11. Evolución del relieve emergido-sumergido en la Cordillera Bética y el Rif desde el Mioceno Superior hasta el Plioceno Inferior (Fuente: Martín et al., 2009).

la actividad tectónica se cerraron en el Messiniense (Martín et al., 2009). La elevación del relieve ha provocado la emersión de antiguas cuencas marinas y el retroceso de la costa (Fig. 10).

## CONSIDERACIONES FINALES

Desde un punto de vista sísmico y tectónico la Cordillera Bética constituye la parte más activa de la península Ibérica. En el marco de la tectónica de placas, es un magnífico ejemplo para el aula. A continuación, se exponen algunos de los motivos que justifican su interés.

- Es el resultado de la interacción entre dos placas mayores o principales (Nubia y Eurasia) y una de mucho menor tamaño, la placa de Alborán (Zona Interna Bético-Rifeña) que se individualizó y desplazó hacia el Oeste por el proceso de apertura de la cuenca Argelo-Provenzal. La placa de Alborán quedó unida a la placa Euroasiática tras colisionar oblicuamente con ella, y en parte con la de Nubia. Es un buen ejemplo para que el alumnado comprenda cómo las placas pueden crearse y desaparecer, y cómo el mapa de las placas tectónicas está en continuo cambio.
- Sirve de ejemplo para explicar que algunos límites de placas pueden dar lugar a la formación de amplias bandas de deformación. Por tanto, no corresponden a líneas netas dibujadas en un mapa de placas tectónicas. En nuestro caso, la Cordillera Bética forma parte de un límite de placas difuso de varios centenares de kilómetros de anchura, en el que la deformación tectónica y la actividad sísmica se distribuye entre la Cordillera Bética, el mar de Alborán y el Norte de África (Rif y Tell).
- Permite comprender cómo la formación del arco de Gibraltar o la colisión oblicua que ha formado la Cordillera Bética está muy influenciada por procesos tectónicos que ocurrieron en zonas vecinas (apertura de la cuenca Argelo-Provenzal).
- Aunque la región en estudio se encuentra en un límite de placas convergente de dirección NNO-

SSE, la apertura de la cuenca Argelo-Provenzal, provocó, la expulsión hacia el Oeste de la Zona Interna Bético-Rifeña. Su resultado, entre otros efectos, fue la formación del arco de Gibraltar, junto con una colisión oblicua con la corteza sudibérica.

- Permite comprender cómo en un contexto convergente pueden existir zonas con una tectónica de desgarre, compresiva o extensional.
- Permite al alumnado comprender la evolución reciente del relieve ya que hace apenas 10 millones de años buena parte de su territorio estaba sumergido y los relieves emergidos eran mucho más modestos.
- Sirve de ejemplo para que el alumnado conozca controversias científicas como la discusión viva sobre la existencia actual o pasada de subducción en el arco de Gibraltar.
- La Cordillera Bética se une al Rif a través del arco de Gibraltar. Se trata de uno de los oroclinales más cerrados del planeta.

Estas y otras singularidades de la Cordillera Bética permiten contextualizar la tectónica de placas en un entorno más próximo para el alumnado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrieux, J., Fontboté, J.M. y Mattauer, M. (1971). Sur un modèle explicatif de l'Arc de Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 12, 191-198.
- Argus, D.F., Gordon, R., DeMets, C. y Stein, S. (1989). Closure of the Africa Eurasia North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault. *Journal of Geophysical Research*, B5 (94), 5585-5602.
- Argus, D.F., Gordon, R.G. y DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, Q11001. doi:10.1029/2011GC003751.
- Azañón, J.M. y Cardoso Cabral, J.M.L. (Eds.) (en prensa). *Active processes: seismicity, active faults and relief*. En: *The Geology of Iberia: a geodynamic approach*, vol. 5. Regional Geology Reviews, Springer.
- Boillot, G., Montadert, L., Lemoine, M. y Biju-Duval, B. (1984). *Les marges continentales actuelles et fossiles autour de la France*. Masson, Paris, 342 p.

- Bouillin, J., Durand Delga, M. y Olivier, P. (1986). *Betic-Rif and Tyrrhenian distinctive features, genesis and development stages*. En: The origin of arcs (Ed.: F.C. Wezel). Elsevier, 281-304.
- Bousquet, J.C. (1979). Strike-slip faults in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 52, 277-286.
- Comas, M.C.; Platt, J.P.; Soto, J.I. y Watts, A.B. (1999). *The origin and tectonic history of the Alboran Basin: insights from Leg 161 results*. En: Proceedings of the Ocean Drilling Program (Eds.: R. Zahn, M.C. Comas y A. Klaus), Scientific Results, Vol. 161, pp. 555-580
- Capote, R., Muñoz, J. A., Simón, J. L., Liesa, C. L. y Arlegui, L. E. (2002). Alpine tectonics I: the Alpine system north of the Betic Cordillera. *The Geology of Spain*, 367-400.
- Crespo-Blanc, A., Comas, M.C. y Balanyá, J.C. (2017). El Arco de Gibraltar: un poco más cerca de entender su evolución tectónica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25.2, 244-246.
- De Vicente, G. y Vegas, R. (2007). La extraña topografía de la península Ibérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15.2, 124-134.
- Echeverría, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Martín-Dávila, J. y Suriñach, E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*, 608, 600-612.
- Echeverría, A., Khazaradze, G., Asensio, E. y Masana, E. (2015). Geodetic evidence for continuing tectonic activity of the Carboneras Fault (SE Spain). *Tectonophysics*, 663, 302-309
- Fernández-Lozano, J., De Vicente, G., Sokoutis, D., Willingshofer, E. y Cloetingh, S. (2009). De los Pirineos al Atlas: topografía y modelación análoga. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.1, 86-92.
- Gibbons, W. y Moreno, T. (2002). *The Geology of Spain*. Geological Society London, Series of Geology.
- Gil, A.J., Galindo-Zaldívar, J., Sanz de Galdeano, C., Borque, M.J., Sánchez-Alzola, A., Martínez-Martos, M. y Alfaro, P. (2017). The Padul normal fault activity constrained by GPS data: Brittle extension orthogonal to folding in the central Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 712-713, 64-71.
- González-Castillo, L., Galindo-Zaldívar, J., de Lacy, M.C., Borque, M.J., Martínez-Moreno, F.J., García-Armenteros, J.A. y Gil, A.J. (2015). Active rollback in the Gibraltar Arc: Evidences from CGPS data in the western Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 663, 310-321.
- Gutscher, M.A., Malod, J.A., Réhault, J.P. y equipo SIS-MAR (2002). Evidence of active subduction beneath Gibraltar. *Geology*, 30, 1071-1074.
- Larouzière F.D. de, Bolze J., Bordet P., Hernandez J., Montenat Ch. y Ott d'Estevou, Ph. 1988. The Betic segment of the lithospheric Trans-Alboran shear zone during the Late Miocene. *Tectonophysics*, 152: 41-52.
- López Casado C. y J. Henares Romero J. (2011). *Rasgos sísmicos generales y estado de esfuerzos de la Cordillera Bética*. En: Fallas Activas de la Cordillera Bética (Eds.: C. Sanz de Galdeano y J.A. Peláez). Universidad de Granada. 31-67.
- Mancilla, F., Stich, D., Berrococo, M., Martín, R., Morales, J., Fernández-Ros, A., Paéz, R. y Pérez-Peña, A. (2013). Delamination in the Betic Range: Deep structure, seismicity and GPS motion. *Geology*, 41, 307-310.
- Martín, J.M., Braga, J.C., Aguirre, J. y Puga-Bernabéu, A. (2009). History and evolution of the North-Betic Strait (Prebetic Zone, Betic Cordillera): A narrow, early Tortonian, tidal-dominated, Atlantic-Mediterranean marine passage. *Sedimentary Geology*, 216, 80-90.
- Martínez-Díaz, J.J., Béjar-Pizarro, M., Álvarez-Gómez, J.A., Lis Mancilla, F., Stich, D., Herrera, G. y Morales, J. (2012). Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture: The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake. *Tectonophysics*, 546-547, 28-37.
- Meléndez Heviá, I. (2004). *Geología de España: una historia de más de 600 millones de años*. Ed. Rueda.
- Nocquet, J.M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: a comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579, 220-242.
- Quesada, C. y Oliveira, J.T. (en prensa). The Geology of Iberia: A geodynamic approach. *Regional Geology Reviews*. Ed. Springer.
- Sanz de Galdeano, C. (1990a). Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the Present. *Tectonophysics*, 172, 107-119.
- Sanz de Galdeano, C. (1990b). La prolongación hacia el sur de las fosas y desgarres del Norte y Centro de Europa: Una propuesta de interpretación. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3 (1-2), 231-241.
- Sanz de Galdeano, C. (2019). Paleogeographic reconstruction of the Betic-Rif Internal Zone: An attempt. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2), 107-128.
- Sanz de Galdeano C. y Alfaro P. (2004). Tectonic significance of the present relief of the Betic Cordillera. *Geomorphology*, 63, 178-190.
- Sanz de Galdeano C., Rodríguez Fernández J. y López Garrido A.C. (1985). A strike slip fault corridor within the Alpujarra Mountains (Betic Cordilleras, Spain). *Geol. Rundschau*. 74, 3, 641655.
- Sanz de Galdeano, C., García-Tortosa, F.J., Peláez, J.A., Alfaro, P., Azañón, J.M., Galindo-Zaldívar, J., López-Casado, C., López-Garrido, A.C., Rodríguez-Fernández, J. y Ruano, P. (2012). Main active faults in the Granada and Guadix-Baza Basins (Betic Cordillera). *Journal of Iberian Geology*, 38.1, 209-223.
- Sanz de Galdeano, C., Azañón, J.M., Ruano, P., García-Mayordomo, J., Massana, E., Alfaro, P., Ferrater, M., García Tortosa, F.J., Gràcia, E., Insua-Arévalo, J.M., Jiménez Bonilla, A., Marín-Lechado, C., Martín-Banda, R., Martínez-Díaz, J.J., Martín-Rojas, I. y Pedrera, A. (en prensa). *Active Faults in the Betic Cordillera*. En: Active processes. Seismicity, Active Faulting and Relief, vol. 5. Geology Regional Reviews (Eds. J.M. Azañón y J.M.L. Cardoso Cabral). Springer.
- Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Balde, P. y Gasperini, P. (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169, 1180-1200.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Somoza, L., Zazo, C. y Bardaji, T. (1993). Landscape response to strike-slip faulting linked to collisional setting: Quaternary tectonics and basin formation in the Eastern Betics, southeastern Spain. *Tectonophysics*, 224 (4), 289-303.
- Simón, J.L. (2007). La construcción y el modelado del relieve en la Cordillera Ibérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15.2, 164-174.
- Vera, J.A. (Ed.). *Geología de España*. IGME. ■

*Este artículo fue recibido el día 20 de abril de 2019 y aceptado definitivamente para su publicación el 2 de septiembre de 2019.*