

NUEVOS DATOS SOBRE LA TECTÓNICA RECIENTE DEL SECTOR ORIENTAL DE LA CUENCA DEL DUERO (BURGOS-SORIA)

A.L. Cortés Gracia¹, A. Maestro González¹ y F. Nozal Martín²

¹ Dpto de Geología, Universidad de Zaragoza, Plaza San Francisco s/n, 50009 Zaragoza

² Instituto Tecnológico Geominero de España, Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid

Resumen: El estudio de las deformaciones recientes en el sector oriental de la Cuenca del Duero ha permitido reconocer varias macroestructuras neógenas relacionadas con la reactivación de fallas y pliegues previos. En esta zona, los depósitos subhorizontales del Mioceno superior muestran una importante fracturación a escala de afloramiento. Mediante el análisis de paleoesfuerzos aplicado a poblaciones de fallas se han determinado dos direcciones de extensión (NE-SW y NW-SE) y direcciones de compresión entre NW y NE de carácter local. El campo de esfuerzos regional, responsable de la formación de las macro y mesoestructuras cambió de un carácter compresivo (Mioceno medio-superior) a un carácter marcadamente distensivo desde el Plioceno a la actualidad.

Palabras clave: tectónica reciente, pliegue, falla, análisis de paleoesfuerzos, Neógeno, Cuenca del Duero

Abstract: The study of recent deformations in the eastern border of the Duero Basin (N Spain) allows to determine some Neogene macrostructures related to the reactivation of previous folds and faults. In this area the Upper Miocene unfolded deposits shows an important fracturing at the outcrop scale. From palaeostress analysis of fault populations two extensional directions (NE-SW and NW-SE) and local NW to NE compressional directions have been obtained. The regional stress field, responsible for the meso- and macrostructures, changed from a compressional character (Middle-Upper Miocene) to a dominant extensional character from the Pliocene to Present.

Key words: recent tectonics, fold, fault, palaeostress analysis, Neogene, Duero Basin

Cortés Gracia, A.L., Maestro González, A. y Nozal Martín, F. (1999): Nuevos datos sobre la tectónica reciente del sector oriental de la Cuenca del Duero (Burgos-Soria). *Rev. Soc. Geol. España*, 12 (1): 17-27.

La Neotectónica es una rama de las ciencias geológicas que estudia las deformaciones recientes. Para muchos autores (Vita-Finzi, 1986; Slemmons, 1991) correspondería al estudio de la tectónica entre el Mioceno y la actualidad, aunque otros consideran que este intervalo se debería reducir al Plioceno-Actualidad o simplemente Cuaternario. En función de las características geodinámicas de una región concreta, para otros autores, como Angelier (1989), la mejor definición de Tectónica Reciente o Neotectónica se debe basar en la continuidad y homogeneidad de los mecanismos geodinámicos regionales y no en una subdivisión cronoestratigráfica arbitraria. En la Cuenca del Duero, con una configuración neógena temprana aproximadamente similar a la actual (Santisteban *et al.*, 1996), hemos considerado recientes aquellas deformaciones posteriores al Mioceno medio, momento en el que dejan de actuar los principales cabalgamientos en el Sistema Central y en el borde norte del Macizo de Cameros-Demanda, que pasan a constituir bordes pasivos sobre

los que se disponen en *onlap* los materiales neógenos (post-Mioceno medio).

Desde el punto de vista geológico, la región estudiada se sitúa en el borde oriental de la Depresión del Duero, en su límite con los materiales mesozoicos que constituyen el sector noroccidental de la Cordillera Ibérica (Macizo de Cameros-Demanda), y en el corredor de Aranda de Duero-Burgo de Osma, que sirve de pasillo de enlace entre las Cuencas del Duero y de Almazán (Fig. 1). Los depósitos que la ocupan con mayor representación son fundamentalmente neógenos (Mioceno), correspondiendo a sedimentos aluviales y lacustres en sentido amplio.

Durante el Neógeno, la Cuenca del Duero estuvo caracterizada por una «etapa de relativa calma tectónica» (en relación a otras zonas de la península) en la que los movimientos de las principales fallas de zócalo apenas se manifestaron en superficie. El efecto de estas grandes fallas produjo, sin embargo, una subsidencia diferencial en la cuenca que controló el relleno endorreico de la misma y la formación de sistemas

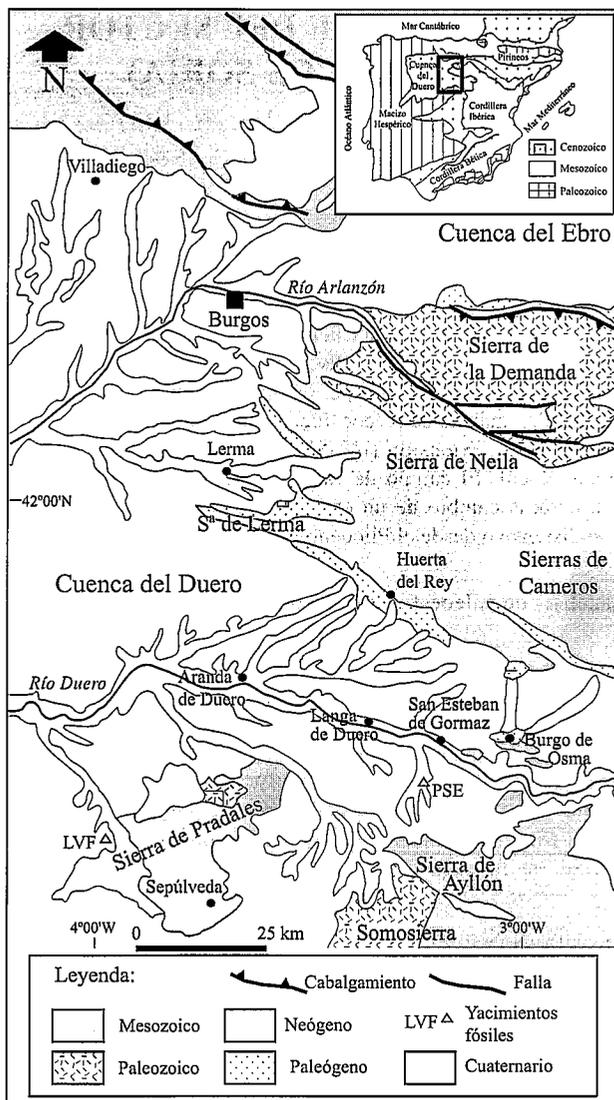


Figura 1.- Localización geológica general del sector estudiado.

menores de fracturación (Santisteban *et al.*, 1996). De esta manera, las deformaciones neógenas a escala macroestructural presentan una escasa expresión cartográfica y están relacionadas con los últimos estadios compresivos, que dieron lugar a la estructuración de la Cordillera Ibérica y Sistema Central, así como con la extensión generalizada que se registra a partir del Mioceno superior en la parte septentrional de la Península Ibérica.

Los objetivos de este trabajo son: 1) mostrar las principales deformaciones a escala macroestructural que afectan a los materiales neógenos del sector oriental de la Cuenca del Duero, caracterizadas a partir del trabajo de campo y fotografía aérea y apoyadas por la interpretación de datos geofísicos (perfiles de reflexión sísmica y sondeos profundos); 2) determinar los estados de esfuerzos que han actuado en esta región desde el Mioceno superior. Para ello se ha realizado la medida sistemática de la orientación de fallas con estrías, con las que poder inferir, mediante diferentes técnicas de análisis, la orientación de los tensores de esfuerzos que las generaron. El muestreo se llevó a cabo fundamentalmente en materiales del Mioceno superior.

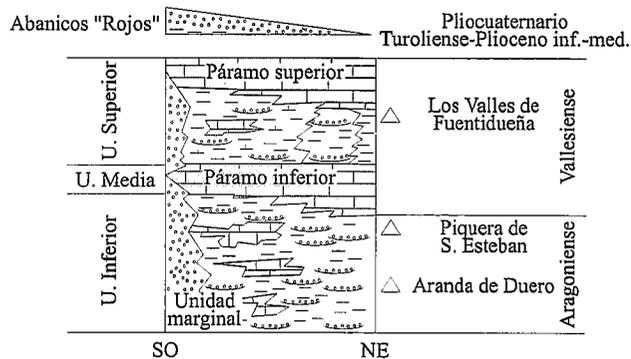


Figura 2.- Columna estratigráfica general del sector oriental de la Cuenca del Duero y localización de los principales yacimientos paleontológicos. Modificado de Armenteros (1986).

Estratigrafía

A grandes rasgos, el registro sedimentario del sector oriental de la Cuenca del Duero se puede dividir en tres Secuencias o Complejos Tectosedimentarios de litologías variadas (Guimerà *et al.*, 1995; Santisteban *et al.*, 1996), con espesores que oscilan entre 1000 y 3000 m de potencia, estimados a partir de sondeos y perfiles sísmicos (Lanaja, 1987; Guimerà *et al.*, 1995). El carácter «marginal» del área estudiada conlleva que la mayor parte de los sedimentos correspondan a depósitos detríticos de abanicos aluviales y a sistemas fluviales, en parte derivados de aquellos, con abundantes horizontes carbonatados de tipo caliche. Hacia el techo de la serie, y en determinadas zonas, se sitúan los ambientes lacustres con calizas bien desarrolladas.

Los dos primeros complejos (Cretácico Superior-Oligoceno) afloran de forma discontinua junto a los márgenes de la cuenca, excepto en la zona de Burgo de Osma (Ruiz Fernández, 1991; Ramos Martín y Alonso Gavilán, 1990), donde materiales atribuidos a los dos complejos ocupan una posición central dentro del corredor. La presencia de materiales paleógenos en otros sectores no marginales de la cuenca está probada mediante datos sísmicos y sondeos profundos de investigación. El tercer complejo, con más de 200 m de potencia y considerado de edad Mioceno-Plioceno, se dispone horizontal y discordante sobre los dos anteriores. Para este conjunto se han venido diferenciando, en los sectores centrales de la cuenca, o bien las tres unidades litoestratigráficas ya clásicas del Mioceno castellano: «arcillas de la Tierra de Campos», «margas yesíferas de las Cuestas» y «calizas de los Páramos» (Hernández Pacheco, 1915; Royo Gómez, 1926; Portero *et al.*, 1982), o bien cuatro unidades (Mediavilla y Dabrio, 1988), o hasta 8 Unidades Tectosedimentarias (Mediavilla *et al.*, 1996). Este complejo está constituido por depósitos detríticos, carbonatados y evaporíticos formando secuencias decrecientes, correspondientes a abanicos aluviales en los bordes y de carácter fluvial y lacustre-palustre en las zonas más internas o deprimi-

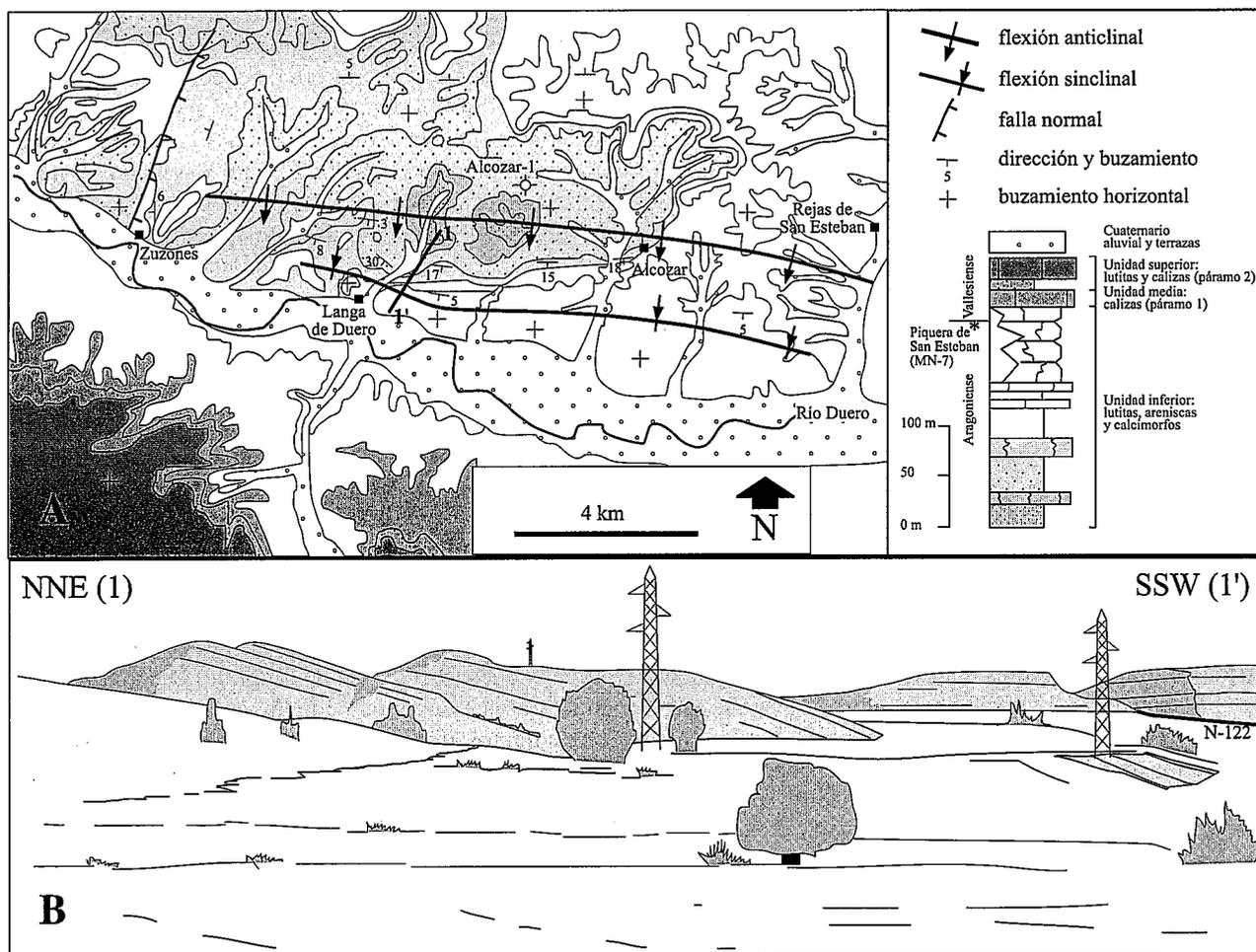


Figura 3.- A) Mapa geológico de detalle de los alrededores de Langa de Duero (modificado de F. Nozal, en preparación). La traza 1-1' corresponde a la panorámica mostrada en la figura 3B. B) Esquema a partir de fotografía de la flexión de Langa de Duero en el que se observa cómo los materiales del Mioceno medio-superior buzan $15-17^{\circ}\text{S}$ en el flanco inclinado del monoclinal y se disponen horizontales hacia el sur (taludes de la carretera N-122).

das, que rellenaron una cuenca conformada prácticamente con la configuración actual. Los depósitos conglomeráticos cuarcíticos culminantes del piedemonte, también denominados «rañas», se consideran pliocuaternarias y en general no superan la decena de metros de espesor (García del Cura, 1974; Armenteros, 1986).

En el sector oriental y suroriental de la Cuenca del Duero, Armenteros y Corrochano (1983) y Armenteros (1986) establecen la litoestratigrafía regional diferenciando varias unidades (Fig. 2): 1) Unidad Marginal, correspondiente a facies detríticas de abanicos aluviales que orlan los bordes de la cuenca neógena; 2) Unidad Inferior, constituida por facies fluviales (lutítico-arenosas) y lacustres (carbonáticas) alternantes que forman la sedimentación de centro de cuenca. Los yacimientos de Aranda de Duero (Crusafont y Celorrio, 1959) y Piquera de San Esteban (Mazo y Jordá, 1994) proporcionan unas edades Aragoniense medio-superior y Aragoniense superior (MN 7), respectivamente; 3) Unidad Media, predominantemente calcárea que a techo presenta un nivel constante de calizas y/o dolomías que dan resalte estructural, conocido como páramo inferior; y 4) Unidad Superior, que

presenta un tramo detrítico-carbonatado basal coronado por otro nivel de calizas lacustres correspondientes al páramo superior. El yacimiento de Los Valles de Fuentidueña (Alberdi *et al.*, 1981), ubicado en los niveles altos de la unidad calizas del páramo inferior, proporciona una edad Vallesiense inferior (MN 9). Por encima de la Unidad Superior y discordantes, se sitúan depósitos fango-arenosos y conglomeráticos rojos tipo «raña» a los que se atribuye una edad pliocuaternaria (Ordóñez *et al.*, 1976; Molina y Armenteros, 1986)

En el área de San Esteban de Gormaz-Burgo de Osma, Ramos Martín y Alonso Gavilán (1990) estudian y caracterizan los depósitos terciarios y establecen varias unidades litoestratigráficas de rango local, aunque correlacionables con las de Armenteros (1986).

En el sector nororiental (alrededores de Burgos), Pol y Carballeira (1986) diferencian dos grandes ciclos sedimentarios continentales de edades Cretácico superior-Paleógeno y Mioceno. En ellos se pueden establecer tres secuencias de depósito; las dos primeras integran el Primer Ciclo, y la tercera el Segundo. Del mismo modo, establecen 14 Unidades Litoestratigráficas; las 9 primeras corresponden al Primer Ciclo, y se van sustituyendo en el tiempo. Al Ciclo Superior correspon-

den las 5 restantes (Sistemas deposicionales de Ura, Retuerta, Cuevaburgos, Mecerreyes-Nebreda y Sistema de los Ausines), que se interdigitan, siendo coetáneas o casi coetáneas. Las unidades del Ciclo Superior corresponden a sedimentos fundamentalmente detríticos prácticamente horizontales. Se apoyan mediante una discordancia con paleorrelieve sobre todas las anteriores, ocupando la mayor extensión del sector citado a pesar de su escasa potencia, que en general no supera los 100 m de espesor.

Deformaciones a escala macroestructural

Los materiales de Mioceno superior-Plioceno que aparecen en este sector de la Cuenca del Duero apenas presentan deformaciones importantes a escala macroestructural. Gracia Prieto *et al.* (1990) estudian la deformación de dos superficies de erosión neógenas en el sector oriental de la Cuenca del Duero. La primera superficie, denominada S1, enlaza con depósitos del Mioceno medio («facies Cuestas») bajo las calizas de los páramos. La superficie de erosión S2, a la que asignan una edad Turolense-Plioceno, enlaza con las calizas de los páramos y es correlacionable con la «Superficie de Erosión Fundamental» de la Cordillera Ibérica (Solé Sabarís, 1978). Estos autores indican que en el sector oriental de la Cuenca del Duero (Sierra de Lerma y borde NW de la Cuenca de Almazán) la superficie S2 presenta un suave descenso hacia el sur, es decir, hacia el centro de la cuenca, mostrando igualmente que en este borde de la cuenca no aparecen deformaciones a gran escala.

Mediavilla *et al.* (1996) deducen una serie de fallas activas durante el Neógeno que habrían controlado la sedimentación en el sector central y oriental de la Cuenca del Duero. Las principales fallas representan la reactivación de fracturas tardihercínicas en el zócalo que dieron lugar a una fracturación en superficie, cambiando la configuración de la cuenca y creando o modificando las áreas de subsidencia.

En este trabajo se muestran algunas macroestructuras que afectan a los materiales neógenos del borde oriental de la Cuenca del Duero. Estas se localizan fundamentalmente en el corredor de Aranda de Duero-Burgo de Osma, que constituye la zona de enlace entre las cuencas del Duero y de Almazán.

La macroestructura más importante de la zona estudiada es una flexión monoclinas de orientación aproximada E-W y vergencia sur que afecta a los materiales del Mioceno medio-superior en las proximidades de Langa de Duero (Fig. 3). Presenta una longitud mínima de 15 km, con un flanco de unos 2 km de anchura que muestra buzamientos medios hacia el sur de 10-15° y un buzamiento máximo de 30° junto a esta localidad. Hacia el norte las capas se disponen subhorizontales o suavemente basculadas (4-5° N); hacia el sur las capas aparecen prácticamente horizontales. En profundidad, la flexión de Langa de Duero se puede relacionar con

un importante accidente en el basamento pre-Terciario. A partir de la interpretación de perfiles sísmicos apoyados por el sondeo petrolífero de Alcozar-1 (ver Lanaja, 1987), Philips Oil Co.-España (1982) realizó un mapa de isobatas del techo del Cretácico (Fig. 4) que muestra un anticlinal de orientación general WNW-ESE cortado en su flanco sur por una falla de orientación E-W a ESE con el bloque sur hundido. La estructura neógena visible en superficie ha sido interpretada como una adaptación de los materiales del Mioceno medio-superior a la reactivación en profundidad de esta falla con movimiento inverso o inverso-direccional.

Al NW de Langa de Duero (Fig. 3), los materiales neógenos están afectados por una falla normal de dirección NNE-SSW con el bloque E hundido y un salto vertical de unos 10 m. Esta falla es subparalela a otra interpretada en profundidad a partir de datos sísmicos que corta perpendicularmente la estructura anticlinal de Langa de Duero (ver figura 4).

En el sector de San Esteban de Gormaz, al sur del río Duero, aparece una serie de pliegues de menores dimensiones (0,5 a 2 km de longitud) que afectan a los materiales neógenos, con dirección WNW-ESE y buzamientos que oscilan entre 10 y 45° (Fig. 5). La existencia de niveles de terrazas cuaternarias discordantes sobre los materiales neógenos plegados dificulta la observación de estas estructuras en fotografía aérea, por lo que han sido cartografiadas únicamente a partir de datos de campo. Estos pliegues se podrían relacionar lateralmente con el anticlinal de similar orientación que aparece en el paleorrelieve de materiales cretácicos situado al SE de San Esteban. Sin embargo, los materiales neógenos que fosilizan este relieve apenas están deformados, por lo que la relación genética entre ambos no parece tan clara.

Análisis mesoestructural

La determinación de los estados de esfuerzos recientes en el sector oriental de la Cuenca del Duero se ha realizado a partir del análisis de poblaciones de fallas a escala de afloramiento. Hemos considerado deformaciones tectónicas recientes aquéllas que tuvieron lugar a partir del Mioceno medio-superior, por lo que se han medido únicamente las fallas que afectan a estos materiales. A partir de los modelos que relacionan los estados de esfuerzos con los sistemas de fracturas y discontinuidades naturales, se dispone de una serie de métodos que permiten, partiendo de las observaciones de las mesoestructuras frágiles, inferir los estados de esfuerzo responsables de su génesis (análisis dinámico).

Metodología del análisis mesoestructural

En este trabajo se han medido 218 planos de falla con estrías, correspondientes a 13 estaciones distribuidas por el borde oriental de la cuenca. En general, se observa un dominio de las fallas normales a escala de afloramiento, aunque en el sector SE de la zona estudiada apa-

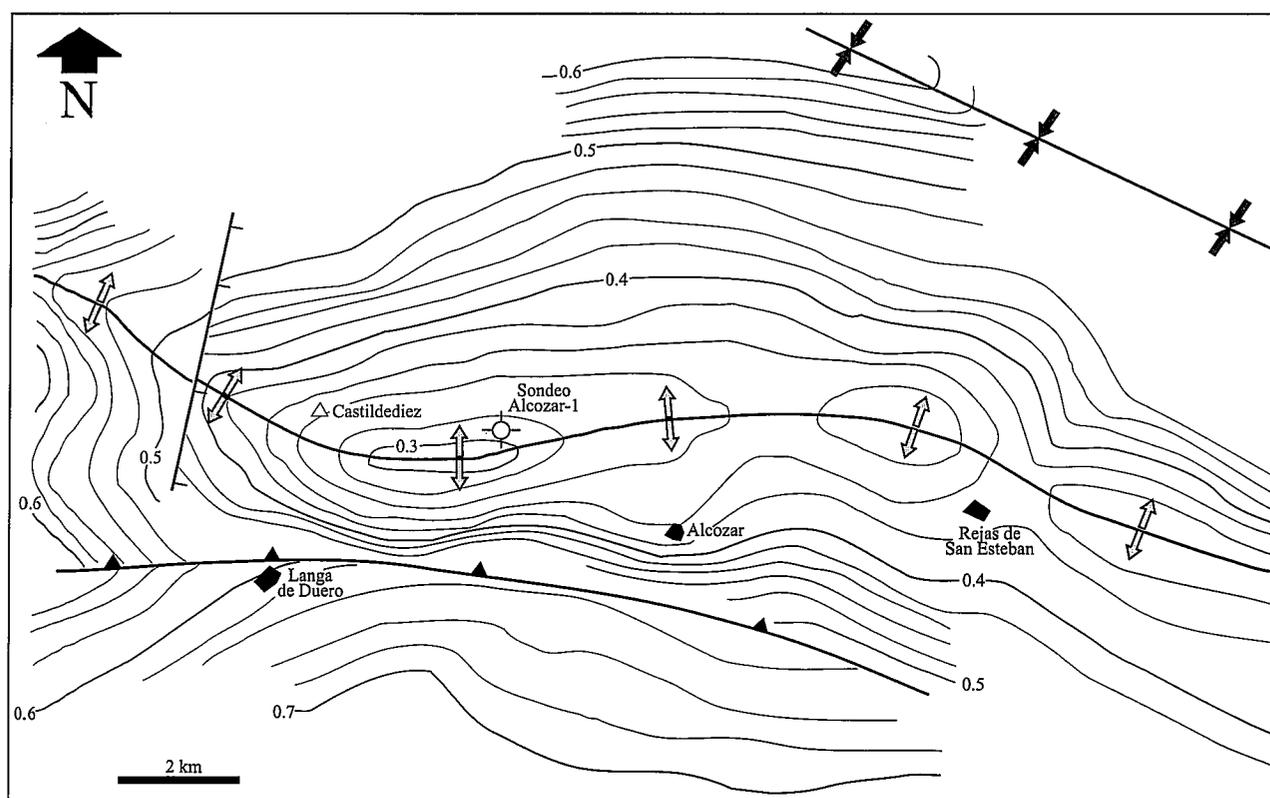


Figura 4.- Mapa de isobatas del techo del Cretácico Superior y principales estructuras interpretadas a partir de perfiles de sismica de reflexión correspondientes a la prospección sísmica de 1982 para Philips Oil Co.-España. Intervalo entre isobatas: 0.020 segundos.

recen numerosas fallas subverticales con movimiento direccional. La mayoría de los afloramientos presentan una estratificación subhorizontal, a excepción de tres de ellos que muestran buzamientos en torno a 5° relacionados con basculamientos asociados a fallas mayores y pliegues suaves de escala cartográfica. Las medidas han sido realizadas fundamentalmente sobre materiales carbonatados (calizas lacustres y margas con lignitos) y más raramente en detríticos (lutitas y areniscas).

Aunque actualmente existen numerosos métodos para el análisis poblacional de fallas, en este trabajo se ha seguido el procedimiento analítico propuesto por Casas Sainz *et al.* (1990), utilizando el método de los Diedros Rectos (Pegoraro, 1972; Angelier y Mechler, 1977), el diagrama y-R (Simón, 1986) y el método de Etchecopar (Etchecopar *et al.*, 1981; Etchecopar, 1984). Estos dos últimos métodos permiten conocer la forma y orientación del elipsoide de esfuerzos mediante los parámetros $R = (\sigma_z - \sigma_x) / (\sigma_y - \sigma_x)$ (Bott, 1959), y $Re = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ (Etchecopar *et al.*, 1981).

Resultados del análisis mesoestructural

El análisis de las poblaciones de fallas medidas en los 13 afloramientos estudiados ha permitido determinar 17 tensores de esfuerzos (Tabla I), 10 de carácter distensivo y 7 en régimen de desgarre-compresión uniaxial. Las direcciones de los esfuerzos obtenidos en cada una de las estaciones se muestran en la figura 6.

En la mayor parte de las estaciones estudiadas los estados de esfuerzo poseen un carácter distensivo, con

valores de la relación $R = (\sigma_z - \sigma_x) / (\sigma_y - \sigma_x)$ dentro de un régimen de extensión triaxial tendente a radial. Para los tensores de esfuerzo distensivos se observan dos tendencias claras en la dirección de σ_3 : NE-SW a NNE-SSW y NW-SE (Fig. 7A). En cuatro estaciones se han determinado estados de esfuerzos con σ_1 horizontal en régimen de desgarre a compresión uniaxial, obteniendo varias direcciones de σ_1 : NE-SW, NW-SE, WNW-ESE, N-S y NNW-SSE. La cronología relativa entre estructuras compresivas y distensivas ha podido ser establecida únicamente en la estación 11, donde se observan fallas normales de dimensiones métricas que cortan fallas direccionales previas.

Independientemente del carácter distensivo, desgarre o compresivo de los estados de esfuerzos obtenidos en este trabajo, las direcciones principales del esfuerzo horizontal máximo (σ_y) presentan un máximo absoluto NW-SE y máximos relativos NE-SW, WNW-ESE y N-S, en orden de importancia relativa (Fig. 7B). A partir de los resultados mostrados se observa que no existe una relación clara entre los distintos tipos de tensores de esfuerzo, las orientaciones de los ejes de esfuerzo y la edad de los materiales donde han sido determinados. Aunque el número de datos es pequeño, los tensores de esfuerzo con σ_1 horizontal (desgarre-compresión uniaxial) parecen restringidos al sector SE de la zona estudiada, entre el Macizo de Cameros-Demanda y la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica en su límite con el Sistema Central.

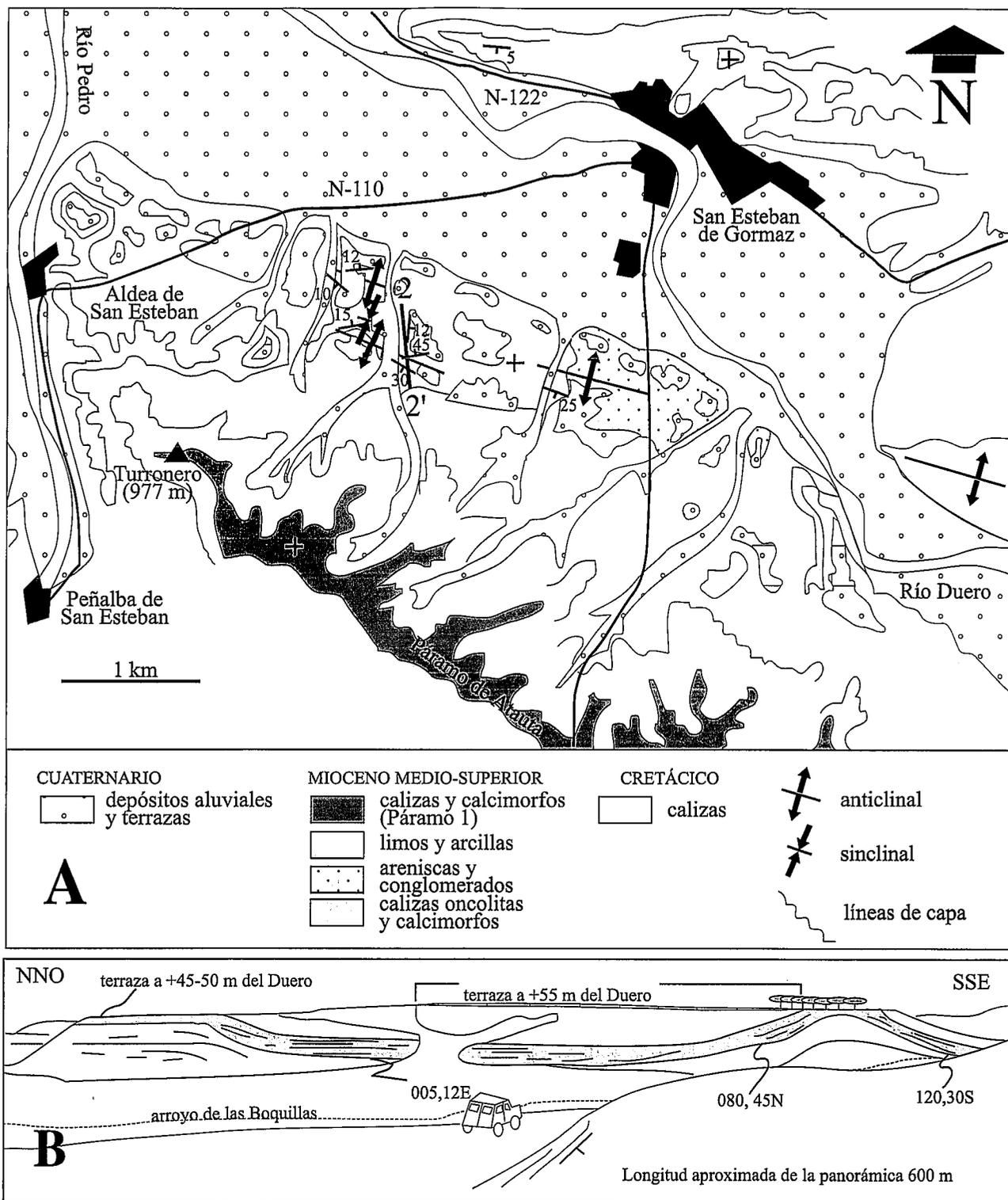


Figura 5.- A) Mapa geológico de detalle de los alrededores de San Esteban de Gormaz (modificado de F. Nozal, en preparación). La traza 2-2' corresponde a la panorámica mostrada en la figura 5B. B) Esquema a partir de fotografía de los pliegues que afectan al Neógeno al SE de San Esteban de Gormaz (margen izquierda del río Duero). El nivel de referencia gris en el corte permite observar el grado de deformación de los materiales neógenos.

Interpretación y discusión

Durante el Neógeno, el norte de la Placa Ibérica estuvo sometido a un campo de esfuerzos regional de carácter compresivo al menos hasta el Mioceno medio-

superior. La compresión dominante durante este periodo presenta dirección N-S a NNE-SSW en la Cuenca del Ebro y NNE-SSW a NE-SW en el interior de la Cordillera Ibérica, perpendicular a las principales macroestructuras (Cortés *et al.*, 1996; Arlegui, 1996;

Estación	Edad	So	σ_1	σ_2	σ_3	Re	R	Estruct.	n/N	n.e.	e. σ_y	e. σ_3
1	MS1	horizontal	146,78	301,11	032,05	0,07	14,28	fallas	10/11	1	28	27
2	MS1	horizontal	149,80	286,07	017,06	0,23	4,35	fallas	7/7	0	3	3
3	MS2	horizontal	215,85	324,01	054,04	0,15	6,66	fallas	15/18	3	18	17
4	MS2	horizontal	263,80	142,05	052,08	0,05	20	fallas	10/12	2	39	36
5	MS1	horizontal	276,89	114,01	024,00	0,02	50	fallas	7/8	1	-	-
6	MS1	110,05N	089,77	216,08	307,10	0,02	50	fallas	11/12	1	60	61
7	MS2	horizontal	193,83	325,05	055,05	0,02	50	fallas	13/15	2	40	40
8	MS1	horizontal	339,87	232,00	142,02	0,18	5,55	fallas	14/20	6	8	8
9	MS1	horizontal	222,04	125,78	312,11	0,09	0,09	fallas	14/17	3	7	7
10	MS2	horizontal	142,05	232,03	353,85	0,01	-0,01	fallas	13/20	2	-	-
			242,10	106,77	334,09	0,32	0,32	fallas	5/20	2	3	3
11	MS1	055,05E	187,02	277,05	074,84	0,00	0,00	fallas	20/32	7	19	-
			344,19	181,70	075,05	0,89	0,89	fallas	5/32	7	3	2
12	MS1	horizontal	138,08	317,82	048,00	0,93	0,93	fallas	28/40	1	15	15
			284,33	075,54	185,14	0,52	0,52	fallas	6/40	1	15	15
			204,54	338,27	080,22	0,70	1,43	fallas	5/40	1	1	1
13	MS1	137,04N	144,86	237,00	327,04	0,34	2,94	fallas	6/6	0	6	6
					130,00			g.ext.	37			10

Tabla I.- Resultados del análisis de paleoesfuerzos a partir de las mesoestructuras medidas en los depósitos neógenos del sector oriental de la Cuenca del Duero. Las estaciones se localizan en la figura 1. Edad de las rocas: MS1: Aragoniense superior-Vallesiense; MS2: Vallesiense-Turoliense. So: orientación de la estratificación en la estación: dirección/buzamiento. El tensor de esfuerzos está definido por el azimuth e inmersión de σ_1 , σ_2 , σ_3 y valor de $Re = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. n/N: número de fallas explicadas por el tensor de esfuerzos resultante / número total de fallas para cada estación. n.e.: número de fallas no explicadas por ningún tensor en cada estación. El error en el azimuth de σ_y (σ_1 ó σ_2 : esfuerzo máximo horizontal) y σ_3 (e. σ_y / e. σ_3) ha sido estimado de los resultados obtenidos del método de Etchecopar.

Cortés y Maestro, 1997). Estos esfuerzos serían inducidos por un campo primario de intensidad moderada con dirección de σ_1 N a NNE, probablemente relacionado con la colisión en el borde pirenaico, que fue funcional durante todo el Neógeno tras la etapa de estructuración principal de la Cordillera Ibérica (Simón Gómez y Paricio Cardona, 1988). Así mismo, tanto en la Cordillera Ibérica como en las cuencas terciarias adyacentes, se registraron durante este período estados de esfuerzos compresivos con direcciones entre NW-SE y NNW-SSE. El campo compresivo NW-SE, procedente del margen bético y responsable del levantamiento del Sistema Central durante el Mioceno inferior-medio, fue el dominante en la Cuenca del Tajo (De Vicente *et al.*, 1996) y quedó registrado en otras cuencas neógenas

interiores de la Cordillera Ibérica (Cortés y Maestro, 1997; Cortés y Simón, 1997). La existencia de dos direcciones de compresión dominantes (NNE a NE y NW-SE, alternantes o sucesivas en el tiempo dentro de una región determinada) parece indicar la actuación a lo largo del Neógeno de dos fuentes de esfuerzos tectónicos a gran escala (Zoback *et al.*, 1989) ligadas al movimiento de la placa ibérica y a la colisión en sus márgenes (Pirineos y Béticas).

El régimen compresivo general evolucionó a partir del Mioceno superior-Plioceno a otro con un mayor carácter distensivo que quedó registrado en amplias zonas del norte de la Península Ibérica. La extensión neógena, especialmente importante en el margen oriental de la placa (Catalánides, Cuenca de Valencia) y en

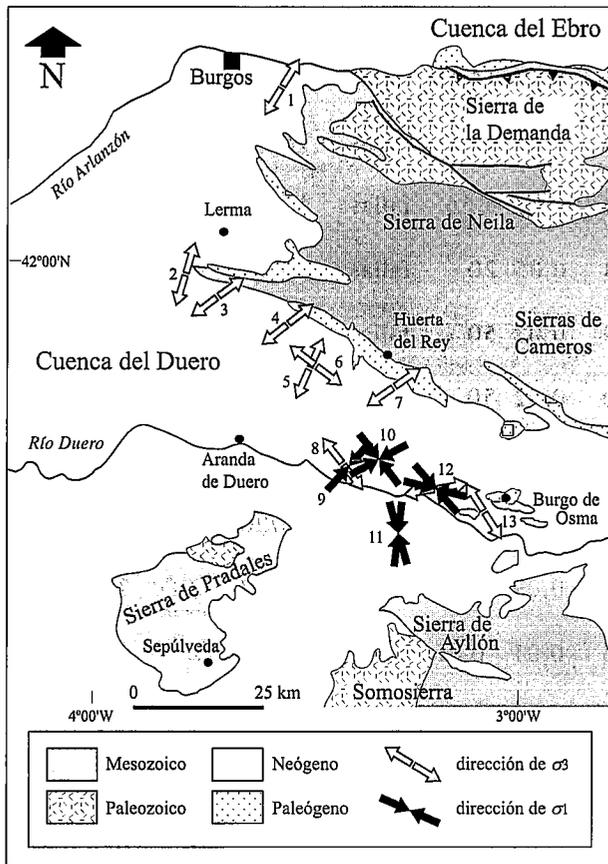


Figura 6.- Direcciones de extensión y compresión obtenidas en las 13 estaciones de análisis mesoestructural.

las fosas interiores de la Cordillera Ibérica Oriental (Simón, 1989), presenta direcciones de σ_3 entre ESE y ENE. En la Cuenca del Ebro, borde norte de la Cordillera Ibérica y sector NE de la Cuenca del Duero, además de las direcciones anteriores, se ha interpretado un campo distensivo de carácter casi radial y dirección NE-SW para el eje σ_3 que debió actuar a partir del Plioceno (Simón, 1989, 1990; Arlegui, 1996). Al mismo tiempo, el resto de la Placa Ibérica estaba sometida a un régimen compresivo generalizado, caracterizado por una dirección de compresión en torno a NW-SE originada en el margen bético (Sanz de Galdeano, 1996; De Vicente *et al.*, 1996).

En el sector oriental de la Cuenca del Duero, al menos durante el Mioceno superior, actuó un campo de esfuerzos regional de carácter compresivo que en la región estudiada no presenta una orientación definida (compresión NW-SE a NE-SW) y estaría controlado por los campos de esfuerzos dominantes durante el Neógeno en la Placa Ibérica. Una disminución de la intensidad del campo compresivo primario NNE-SSW, dominante hasta el Mioceno superior, con respecto al campo NW-SE, dominante a partir del Mioceno superior, daría lugar a una variación espacio-temporal en la orientación de los ejes principales de esfuerzos del campo regional resultante. Aunque el campo compresivo funcional durante el Mioceno superior tendría mucha menor intensidad que el campo responsable de la

estructuración de la Cordillera Ibérica y el Sistema Central, en este período tuvo lugar la formación de numerosas mesoestructuras (fundamentalmente fallas direccionales) y la reactivación de grandes estructuras, posiblemente formadas durante la estructuración paleógena, que dieron lugar a macroestructuras compresivas neógenas de cierta importancia.

La distensión generalizada que aparece a partir del Mioceno superior-Plioceno y especialmente en zonas internas de la Placa Ibérica como la Cuenca del Duero, alejada de los márgenes activos de la placa, puede ser explicada mediante un modelo tectónico similar al propuesto por Tapponier y Molnar (1976). La variación espacial de intensidades, a medida que nos alejamos del margen de placa, se traduce en una zonación de los esfuerzos como consecuencia del intercambio de los ejes principales (cambio de posición relativa al cambiar la magnitud). De esta manera, mediante un cambio de la posición de los ejes manteniendo la coaxialidad podemos pasar de un régimen de compresión triaxial en el margen a desgarre y distensión triaxial en el interior de la placa (Sassi y Faure, 1997). En este caso, la anisotropía en la horizontal del campo de esfuerzos regional distensivo estaría controlada por la orientación del campo compresivo dominante en cada momento a escala de placa (Cortés y Maestro, 1997).

En estas condiciones de extensión a escala de cuenca tiene lugar la formación de distintos sistemas de fallas normales que no pueden ser explicados mediante un único campo de esfuerzos regional. La extensión NW-SE se dispondría aproximadamente perpendicular al campo compresivo NNE a NE, dominante hasta el Mioceno superior (Cortés *et al.*, 1996). Las direcciones de extensión NE-SW, coaxiales con los tensores compresivos NW-SE, podrían estar además relacionadas con los fenómenos distensivos generalizados que quedan registrados a partir del Mioceno superior-Plioceno en buena parte del norte y noreste de la Península Ibérica (Simón, 1989; Sanz de Galdeano, 1996).

Conclusiones

El trabajo de campo y fotografía aérea combinado con la interpretación de datos geofísicos ha permitido determinar algunas estructuras de dimensiones kilométricas que afectan a los materiales neógenos del sector oriental de la Cuenca del Duero. La formación de estas estructuras, especialmente la flexión de Langa de Duero y los pliegues de San Esteban de Gormaz, parece estar relacionada con la reactivación en profundidad de fallas y pliegues previos originados durante la estructuración paleógena de la Cordillera Ibérica.

El análisis de mesoestructuras frágiles ha permitido caracterizar los estados de esfuerzos que han actuado en la región estudiada a partir del Mioceno superior. En general, presentan un carácter distensivo con dos modas direccionales: NE-SW y NW-SE, siendo más frecuente la primera de éstas. También se han obte-

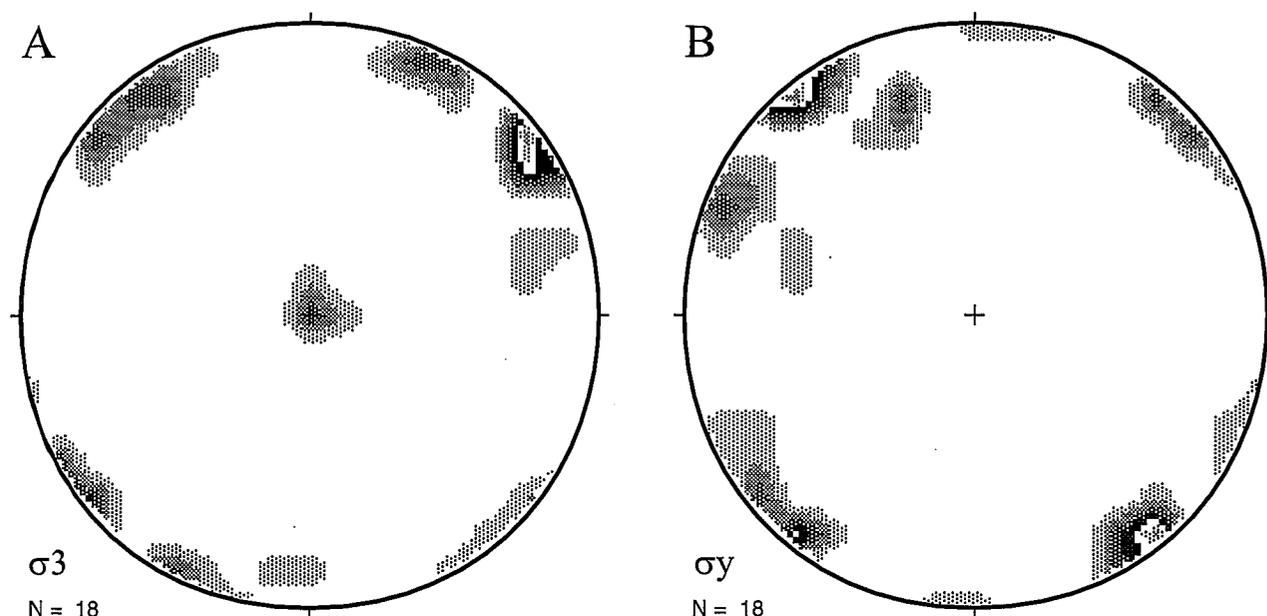


Figura 7.- Diagramas de densidad de los ejes de esfuerzos obtenidos del análisis mesoestructural. A) Direcciones del eje de máxima extensión (σ_3). B) Direcciones del esfuerzo máximo horizontal (σ_y ; σ_1 para el caso de tensores de desgarre-compresivos y σ_2 para tensores distensivos). N: número de datos. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior. Intervalo entre isolíneas: 3%.

nido estados de esfuerzos correspondientes a un régimen de desgarre-compresión uniaxial que se localizan en el corredor de Aranda de Duero-Burgo de Osma. Aunque el número de datos es escaso, se pueden diferenciar dos tendencias en las direcciones de máxima compresión, una en torno a NW-SE y otra NE-SW.

El campo de esfuerzos regional deducido pasa de tener un carácter fundamentalmente compresivo hasta el Mioceno medio-superior a distensivo a partir del Mioceno superior-Plioceno. La orientación de los ejes principales de esfuerzos del campo regional está controlada por la intensidad del campo compresivo primario dominante a escala de placa. De esta manera, encontramos estructuras compatibles con una compresión NNE a NE y una extensión perpendicular a la misma y estructuras compatibles con el campo compresivo NW-SE y la extensión NE-SW. Aunque la cronología de las deformaciones no aparece clara en los afloramientos, la extensión NE-SW, probablemente de edad Plioceno-Cuaternario, bien representada en la zona estudiada y en regiones cercanas, ha debido ser la última en actuar y la dominante en la actualidad, dentro de un régimen general de desgarre (con una dirección del esfuerzo horizontal máximo NW-SE) en el interior de la Placa Ibérica.

Agradecemos a W. Rodríguez Gabela, Jefe del Servicio de Hidrocarburos del MINER, la información sobre la prospección sísmica del sector de Langa de Duero. Así mismo, agradecemos a J.P. Calvo Sorando y dos revisores anónimos las sugerencias realizadas sobre el manuscrito original. Las cartografías de detalle se llevaron a cabo durante la realización de la hoja 376 (San Esteban de Gormaz) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (ITGE). Este trabajo ha sido realizado dentro del marco de los proyectos

SHISTO2-SIGMA (CSN-ENRESA) y PB93-1218 (DGICYT).

Bibliografía

- Alberdi, M.T., López, N., Morales, J., Sesé, C. y Soria, D. (1981): Bioestratigrafía y Biogeografía de la Fauna de Mamíferos de los Valles de Fuentidueña (Segovia). *Estudios Geol.*, 37: 503-511.
- Angelier, J. (1989): Tectonique cassante et néotectonique. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 112 (2): 283-307.
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Geol. France* (7), 19 (6): 1309-1318.
- Arlegui, L.E. (1996): *Diaclasas, fallas y campo de esfuerzos en el sector central de la Cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 308 p.
- Armenteros, I. (1986): *Estratigrafía y sedimentología del Neógeno del sector noroccidental de la Depresión del Duero*. Publ. Diput. de Salamanca. Serie Castilla y León, 426 p.
- Armenteros, I. y Corrochano, A. (1983): El Neógeno del sector sur-oriental de la Depresión del Duero. En: *Geología de España. Libro Jubilar J.M. Ríos* (J.A. Comba, Ed.), Vol II. Comisión Nacional de Geología-IGME, Madrid: 521-526.
- Bott, M.H.P. (1959): The mechanics of oblique slips faulting. *Geol. Mag.*, 96: 109-117.
- Casas Sainz, A.M., Gil Peña, I. y Simón Gomez, J.L. (1990): Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicación. *Estudios Geol.*, 42: 127-136.
- Cortés, A.L., Liesa, C.L., Simón, J.L., Casas, A.M., Maestro, A. y Arlegui, L. (1996): El campo de esfuerzos com-

- presivo neógeno en el NE de la Península Ibérica. *Geogaceta*, 20 (4): 806-809.
- Cortés, A.L. y Maestro, A. (1997): Análisis de los estados de esfuerzos recientes en la Cuenca de Almazán (provincias de Soria y Zaragoza). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (1-2): 183-196.
- Cortés, A.L. y Simón, J.L. (1997): Campos de esfuerzos recientes en la fosa de Alfambra-Teruel-Mira. En: *Aportaciones al conocimiento del Terciario ibérico* (J.P. Calvo Sorando y J. Morales, Eds.), III Cong. G.E.T., Cuenca: 65-68.
- Crusafont, M. y Celorrio, J.M. (1959): Sobre un yacimiento de mamíferos fósiles en Aranda de Duero (Burgos). *Estudios Geol.*, 15: 111-118.
- De Vicente, G., Giner, J.L., Muñoz-Martín, A., González-Casado, J.M. and Lindo, R. (1996): Determination of the present-day stress tensor and the neotectonic interval in the Spanish Central System and the Madrid Basin, Central Spain. *Tectonophysics*, 266: 405-424.
- Etchecopar, A. (1984): *Etude des états de contrainte en tectonique cassante et simulations de déformations plastiques (approche mathématique)*. Thèse d'Etat, U.S.T.L. Montpellier, 269 p.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. y Daignieres, M. (1981): An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault population analysis. *Jour. Struct. Geol.*, 3 (1): 51-65.
- García del Cura, M. A. (1974): Estudio sedimentológico de los materiales terciarios de la zona Centro-Oriental de la Cuenca del Duero (Aranda de Duero). *Estudios Geol.*, 30: 579-597.
- Gracia Prieto, F.J., Nozal Martín, F., Pineda Velasco, A. y Wouters de Vries, F.F. (1990): Superficies de erosión neógenas y neotectónica en el borde NE de la Cuenca del Duero. *Geogaceta*, 7: 38-40.
- Guimerà, J., Alonso, A. y Mas, J.R. (1995): Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N Spain). En: *Basin Inversion* (J.G. Buchanan y P.G. Buchanan, Eds.). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 88: 433-453.
- Hernández Pacheco, E. (1915): *Geología y Paleontología del Mioceno de Palencia*. Junta Ampl. Est. Inv. Cient. Com. Inv. Paleont. Prehist. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, 5, 295 p.
- Lanaja, J.M. (1987): *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*. IGME, Madrid, 465 p.
- Mazo, A.V. y Jordá, J.F. (1994): Los proboscídeos neógenos de Piquera de San Esteban (Cuenca del Duero, Soria). Implicaciones bioestratigráficas. *Estudios Geol.*, 50: 239-245.
- Mediavilla, R.M. y Dabrio, C.J. (1988): Controles sedimentarios neógenos en la Depresión del Duero (Sector Central). *Rev. Soc. Geol. España*, 1 (1-2): 187-196.
- Mediavilla, R.M., Dabrio, C.J., Martín Serrano, A. y Santisteban, J.I. (1996): Lacustrine Neogene systems of the Duero basin: evolution and controls. En: *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics* (P.F. Friend y C.J. Dabrio, Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge: 228-236.
- Molina, E. y Armenteros, I. (1986): Los arrasamientos Plioceno y Plio-pleistoceno en el sector suroriental de la Cuenca del Duero. *Studia Geol. Salmanticensia*, 22: 293-307.
- Nozal, F. (in prep.): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 376 (San Esteban de Gormaz) del Mapa Geológico Nacional a escala 1: 50.000, ITGE.
- Ordóñez, S., López Aguayo, F. y García del Cura, M.A. (1976): Estudio geológico de las «facies rojas» plio-cuaternarias del borde SE de la Cuenca del Duero (provincia de Segovia). *Estudios Geol.*, 32: 215-220.
- Pegoraro, O. (1972): *Application de la microtectonique à un étude de neotectonique. Le golfe Maliaque (Grèce centrale)*. Thèse IIIème cycle. U.S.T.L. Montpellier, 41 p.
- Philips Oil Company - España (1982): *Prospección sísmica del sector de Langa de Duero*. Informe inédito. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- Pol, C. y Carballeira, J. (1986): El sinclinal de Santo Domingo de Silos: Estratigrafía y Paleogeografía de los sedimentos continentales (Borde Este de la Cuenca del Duero). *Studia Geol. Salmanticensia*, 22: 7-35.
- Portero, J.M., Del Olmo, P., Ramírez, J. y Vargas, I. (1982): Síntesis del Terciario continental de la Cuenca del Duero. *Temas Geol. Min.*, IGME, 6 (1): 11-40.
- Ramos Martín, M.C. y Alonso Gavilán, G. (1990): Sedimentología y paleogeografía del Terciario en el área de San Esteban de Gormaz-El Burgo de Osma (Soria). *Rev. Soc. Geol. España*, 3 (1-2): 167-179.
- Royo Gómez, J. (1926): *Terciario continental de Burgos*. XIV Cong. Geol. Intern., Madrid. Guía de Excursiones A-6, 69 p.
- Ruiz Fernández, V. (1991): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 377 (Burgo de Osma) del Mapa Geológico Nacional a escala 1: 50.000, ITGE, 39 p.
- Santisteban, J.I., Mediavilla, R., Martín Serrano, A. y Dabrio, C.J. (1996): The Duero basin: a general overview. En: *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics* (P.F. Friend y C.J. Dabrio, Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge: 183-187.
- Simón, J. L. (1986): Analysis of a gradual change in stress regime (example from the eastern Iberian Chain, Spain). *Tectonophysics*, 124: 37-53.
- Simón, J.L. (1989): Late Cenozoic stress field and fracturing in the Iberian Chain and Ebro Basin (Spain). *Jour. Struct. Geol.*, 11 (3): 285-294.
- Simón, J.L. (1990): *Análisis de paleoesfuerzos tectónicos en los sectores de la plataforma burgalesa y de la banda plegada (N de la provincia de Burgos)*. Informe inédito, Universidad de Zaragoza.
- Simón Gómez, J.L. y Paricio Cardona, J. (1988): Sobre la compresión neógena en la Cordillera Ibérica (algunas precisiones a propósito de los comentarios de J. Guimerà al trabajo «Aportaciones al conocimiento de la compresión tardía en la Cordillera Ibérica centro-oriental: la cuenca neógena inferior del Mijares. Teruel-Castellón»). *Estudios Geol.*, 44: 271-283.
- Slemmons, D.B. (1991): Introduction. En: *The Geology of North America, Decade Map Vol. 1, Neotectonics of North America*. (D.B. Slemmons, E.R. Engdahl, M.D. Zoback y D.D. Blackwell, Eds.). Geol. Soc. Am. Mem., Boulder, Colorado: 1-20.
- Solé Sabarís, L. (1978): La Meseta. En: *Geografía de España*, (M. De Terán, Ed.). Ariel, Madrid: 42-62.
- Tapponier, P. y Molnar, P. (1976): Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319-324.
- Vita-Finzi, C. (1986): *Recent Earth Movements: an introduction to Neotectonics*. Academic Press, London, 226 p.

Zoback, M.L., Zoback, M.D., Adams, J., Assumpção, M., Bell, S., Bergman, E.A., Blümling, P., Brereton, N.R., Denham, D., Ding, J., Fuchs, K., Gay, N., Gregersen, S., Gupta, H.K., Gvishiani, Jacob, K., Kleinn, R., Knoll, P., Magee, M., Mercier, J.L., Müller, B.C., Paquin, C., Rajendran, K., Stephansson, O., Suárez, G., Suter, M.,

Udías, A., Xu, Z.H. y Zhizhin, M. (1989): Global patterns of tectonic stress. *Nature*, 341: 291-298.

Manuscrito recibido el 27 de Mayo de 1998

Aceptado el manuscrito revisado el 17 de Enero de 1999