

# Modelos de elementos finitos sobre los campos de paleoesfuerzos terciarios en el borde oriental de la cuenca del Tajo (España central)

*Finite element models of Tertiary paleostress fields in the eastern part of the Tajo basin (Central Spain)*

A. Muñoz Martín (\*), S. Cloetingh (\*\*) y G. De Vicente (\*)

(\*) Depto. de Geodinámica, Fac. CC Geológicas, Universidad Complutense, Madrid 28040, España.

(\*\*) Institute of Earth Sciences, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, Holanda.

## ABSTRACT

Two groups of finite element models have been carried out over Tertiary paleostress fields deduced from fault-slip data in the eastern part of the Tajo Basin. The first group corresponds to cover paleostress modelling, and the second one to basement paleostress modelling. Three different paleostress fields have been made for each group. Obtained results from two regional stress fields models show that maximum horizontal stresses ( $S_{HMAX}$ ) are controlled by two factors: limits geometry and boundary conditions applied on these limits. A local stress field ("Altomira") appears by means of an addition of the two major paleostress fields ("Ibérico" and "Guadarrama"). Different paleostress fields due to reological contrasts between different basement blocks have been investigated. Results on this kind of models show that a decouple between the cover and the basement paleostress fields could have been possible, specially for the "Altomira" paleostress field. Finally, model results are discussed related to Altomira Range origin.

**Key words:** finite element modelling, stress tensor, paleostress field, boundary conditions, Altomira Range, Iberian Range, Tertiary.

*Geogaceta*, 23(4) (1996), 838-841  
ISSN: 0213683X

## Introducción

En el interior de la península Ibérica se desarrollan a lo largo del Terciario una serie de cinturones de deformación (Sistema Central, Cordillera Ibérica, Montes de Toledo, Sierra de Altomira) y cuencas intraplaca (cuencas del Duero y del Tajo). Todas estas grandes estructuras están originadas por los esfuerzos transmitidos desde los bordes activos de la placa Ibérica (Pirineos y Béticas), y su geometría está muy condicionada por la presencia de grandes fallas corticales.

Por otra parte, y durante los últimos años, se han realizado numerosos trabajos sobre modelizaciones de esfuerzos (Richardson *et al.*, 1979; Cloetingh y Wortel, 1986; Gölke *et al.*, 1994; Bada *et al.*, 1996). Estos trabajos demuestran que es posible analizar la influencia de los procesos tectónicos sobre los esfuerzos intraplaca mediante la realización de modelos simples.

En este trabajo se describen una serie de modelos con elementos finitos de los campos de paleoesfuerzos deducidos en la cobertera mesozoica del borde oriental de la cuenca de Madrid durante el Terciario a partir de métodos de inversión de esfuerzos (Muñoz y De Vicente, 1996). La zona estudiada comprende el borde oriental de la cuenca del Tajo, incluyendo el borde SO de la

Cordillera Ibérica y la Sierra de Altomira, así como las cuencas terciarias de Madrid y de Loranca (fig. 1). Durante la realización de los modelos se ha puesto especial interés en estudiar los efectos que producen sobre las orientaciones de los esfuerzos la geometría y las condiciones de contorno aplicadas en los límites de los modelos.

Se han propuesto dos objetivos diferentes: por un lado, comprobar la hipótesis de que el campo de paleoesfuerzos responsable de la estructuración de la Sierra de Altomira es un campo local, fruto de la superposición espacial y temporal de los dos campos de paleoesfuerzos regionales relacionados con los bordes activos de la placa Ibérica durante la compresión alpina (Pirineos y Béticas; Muñoz Martín *et al.*, 1994). Un segundo objetivo planteado durante la modelización es estudiar la posible presencia de cambios en los campos de esfuerzo en el basamento respecto a los deducidos en la cobertera, debido a la actuación de un nivel de despegue, tal y como se ha detectado en el Jura (Becker, 1989). Estos cambios en los esfuerzos en el basamento pueden haberse generado debido a la presencia de bloques con propiedades mecánicas diferentes, limitados por zonas de fractura. Finalmente, se discuten los resultados de los modelos en relación al origen de los paleoesfuerzos que estructuraron la Sierra de Altomira.

## Campos de paleoesfuerzos terciarios y estructura del basamento

Muñoz Martín y De Vicente (1996), han deducido tres campos de paleoesfuerzos en el borde oriental de la cuenca del Tajo, a partir de fallas con estrías medidas en la cobertera mesozoico-terciaria. Estos campos de paleoesfuerzos son diferentes por las orientaciones de los ejes principales, así como por la edad de actuación de los mismos (De Vicente *et al.*, 1996a):

a) *Mapa de Paleoesfuerzos "Ibérico" (Oligoceno)*. Este es un campo de paleoesfuerzos compresivo que se puede explicar por un tensor de esfuerzos regional con  $s_1$  orientado N55E,  $s_2$  vertical y un  $R = 0.2$  ( $R = (s_2 - s_3) / (s_1 - s_3)$ ). La actividad de este campo de paleoesfuerzos está asociada con el borde SO de la Cordillera Ibérica y la mitad meridional de la zona de estudio. Este campo sería el equivalente a la fase  $C_2$  de Simón Gómez (1984). El límite de actuación de este campo de paleoesfuerzos hacia el norte en el interior de la cuenca de Loranca está marcado por la zona de falla de Tarancón (Capote, 1983), de orientación SO-NE (figs. 1 y 3A).

b) *Campo de paleoesfuerzos "Altomira" (Oligoceno superior - Mioceno inferior)*. Se trata de un campo de paleoesfuerzos compresivo, con

un tensor medio que presenta un  $s_1$  horizontal según N100E,  $s_2$  subvertical y un valor medio de  $R=0.13$ . El mapa de trayectorias suavizadas de  $S_{HMAX}$  es homogéneo y sólo presenta rotaciones de pocos grados con sentido horario en el extremo SE del área estudiada (fig. 3B).

c) *Campo de paleoesfuerzos "Guadarrama" (fase "Guadarrama", Mioceno medio-Actualidad)*. En el área de estudio, este campo de paleoesfuerzos se caracteriza por presentar estados de esfuerzo de tipo desgarre, con  $s_1$  horizontal según N155E, siendo el R medio en torno a 0.3 (fig. 3C). Las trayectorias de  $S_{HMAX}$  son muy homogéneas a lo largo de toda la zona, y la distribución espacial de los paleoesfuerzos asignados a este campo abarca desde el Sistema Central hasta las Béticas (Galindo *et al.*, 1993; De Vicente *et al.*, 1996b).

Los datos geofísicos (Querol, 1989; Perucha *et al.*, 1995) permiten definir una serie de bloques en el basamento por debajo de las cuencas terciarias, con diferentes características litológicas y estructurales. De este modo se han definido tres bloques principales en el basamento de la zona estudiada: bloque de la Cuenca de Madrid, bloque de Valdeolivas y bloque de Cuenca (figs. 1 y 3). El Bloque de la cuenca de Madrid (BCM) está compuesto por rocas graníticas y gneísicas, y tiene una baja densidad de fracturación. El bloque de Valdeolivas (BV) está compuesto de rocas metamórficas paleozoicas, que presentan una mayor densidad de fracturación que el bloque de Madrid. Finalmente, el bloque de Cuenca (BC) tiene una composición heterogénea, y se caracteriza por presentar una densa red de fallas normales con importante salto vertical. El límite entre los bloques de la cuenca de Madrid y de Valdeolivas lo constituye la falla de Sacedón, mientras que la zona de falla de Tarancón separa a estos dos bloques del de Cuenca (fig. 1).

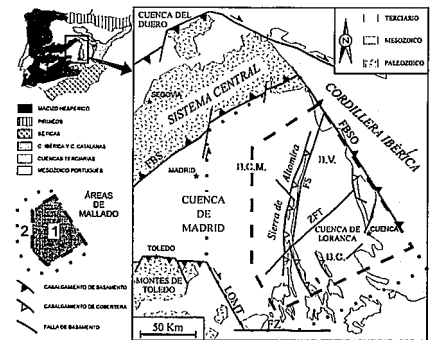
**Modelos de elementos finitos**

Para desarrollar los objetivos planteados, se han realizado dos grupos de modelos. En el primero se han simulado los esfuerzos en la cobertera, considerándola como una placa elástica homogénea (Modelo 1). En el segundo caso (Modelo 2) se han modelizado los esfuerzos en el basamento. Para ello, se ha caracterizado a éste por medio de tres placas elásticas homogéneas con diferentes propiedades mecánicas, y suponiendo las mismas condiciones de contorno que para la cobertera.

La geometría y los límites de los modelos de los campos de paleoesfuerzos se muestran en la figuras 1 y 2. La malla 1 se corresponde con la zona donde se han obtenido los datos de paleoesfuerzos, y es en la que se van a mostrar los resultados de las modelizaciones. Debido a la gran distancia entre este área y algunos de los límites geológicos mas importantes del centro peninsular, ha sido necesario construir una segunda malla (2) alrededor de la primera, de tal manera que sus límites coincidan con las principales estructuras geológicas. Aunque se han utilizado diferen-

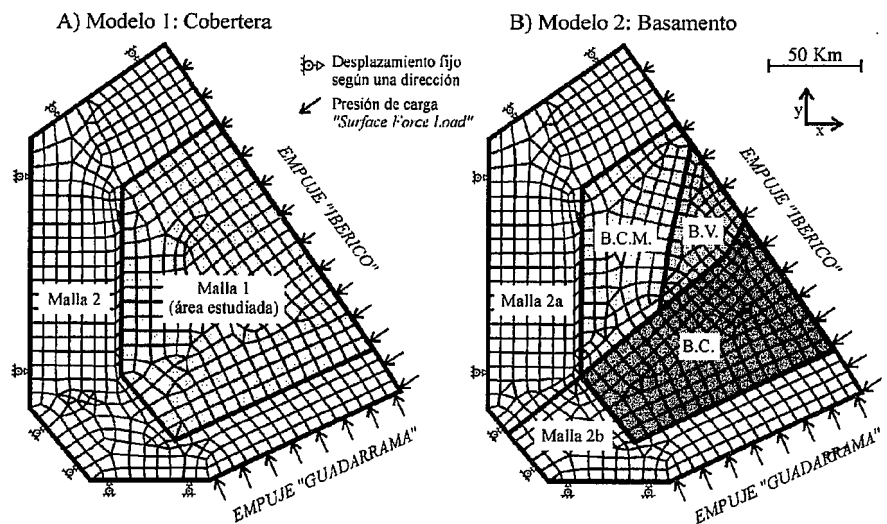
tes geometrías, los modelos que se han ajustado mejor a los datos de paleoesfuerzos deducidos de los datos geológicos han sido los que presentaban unos límites coincidentes con las principales estructuras geológicas del centro peninsular (figs. 1 y 2). Todas las modelizaciones se han realizado en planta (2D), suponiendo un comportamiento mecánico de tipo elástico, y considerando las fuentes de esfuerzos como presiones aplicadas sobre superficies ("Surface Force Loads"). Los cálculos se han realizado en una estación de trabajo con el paquete de elementos finitos ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc.) y los parámetros mecánicos utilizados se muestran en la Tabla 1. En el análisis de los resultados se muestran las trayectorias de los esfuerzos, y no las magnitudes, debido a que los métodos de inversión de esfuerzos proporcionan las magnitudes relativas de los ejes principales, y no sus valores absolutos.

Una vez definida la geometría de los modelos, se establecieron las condiciones de contorno en cada límite, y se aplicaron diferentes fuentes de esfuerzo (con valores de presión constantes y con gradiente), hasta obtener unas orientaciones de esfuerzos similares a las obtenidas en los campos de paleoesfuerzos «Ibérico» y «Guadarrama» (Modelo 1). Las fuentes de esfuerzo utilizadas para generar los dos campos de paleoesfuerzos regionales se han aplicado desde la falla del borde SO de la Cordillera Ibérica (empuje "Ibérico"), y desde el límite SE de la malla 2 (empuje "Guadarrama"). Esta última se ha aplicado fuera de la malla 1, debido a que tiene su origen lejos del área de estudio, en la Cordillera Bética.



**Fig. 1 - Localización geológica y geográfica del área de estudio.** La malla 1 corresponde a la zona donde se muestran los resultados. La malla 2 rodea a la anterior hasta alcanzar los límites del modelo. FBS - Falla del borde S del Sistema Central, FBSO - falla del borde SO de la C. Ibérica, FZ - falla del Záncara, LOMT - límite oriental de los Montes de Toledo, ZFT- Zona de falla de Tarancón, BCM- bloque de la cuenca de Madrid, BV - bloque de Valdeolivas, BC - bloque de Cuenca.

**Fig. 1 - Geographic and geological location of the studied area.** Mesh 1 corresponds with the zone where results are shown. Mesh 2 is located around mesh 1, and extends until model limits. FBS - Central System southern border fault, FBSO - Iberian Range south western border fault, FZ - Záncara fault, LOMT - Toledo Mountains eastern limit, ZFT - Tarancón fault zone, BCM - Madrid basin block, BV - Valdeolivas block and BC, Cuenca block.



**Fig. 2 - Geometría de las mallas y condiciones de contorno aplicadas en los modelos de elementos finitos de campos de paleoesfuerzos.** BCM - Bloque de la cuenca de Madrid, BV - Bloque de Valdeolivas y BC - Cuenca block. Las flechas indican las presiones aplicadas para generar los dos campos de paleoesfuerzos regionales. Los parámetros mecánicos utilizados se muestran en la Tabla 1.

**Fig. 2 - Meshing areas geometry and boundary conditions applied to paleostress finite element models.** BCM - Madrid basin block, BV - Valdeolivas block, BC - Cuenca block. Arrows indicate applied pushes to model two regional paleostress fields. Mechanical parameters are shown in Table 1.

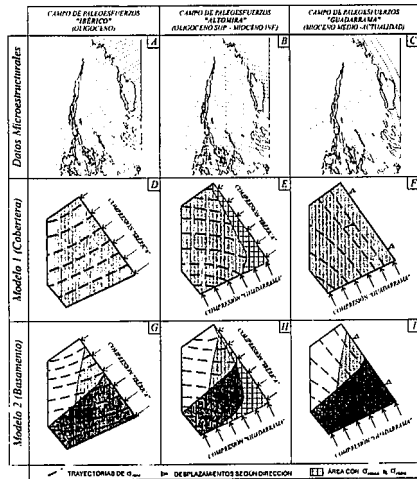


Fig. 3 - A, B, C) Mapas de trayectorias de  $S_{HMAX}$  obtenidos del análisis microestructural (Muñoz Martín y De Vicente, 1996). Resultados de los modelos para de los tres campos de paleoesfuerzos en la cobertera (D, E, F), y en el basamento (G, H, I). Los parámetros mecánicos utilizados se muestran en la Tabla 1 (ver texto para la explicación).

Fig. 3 - A, B, C)  $S_{HMAX}$  trajectories maps obtained from fault-slip data (Muñoz Martín and De Vicente, 1996). Model results obtained for the cover (D, E, F), and for the basement (G, H, I). Mechanical parameters are shown in Table 1 (see text for explanation).

El paso siguiente consistió en comprobar si la actuación conjunta de los dos campos de paleoesfuerzos regionales origina esfuerzos similares a los definidos en el campo "Altomira". Para ello, se superpusieron, con las mismas geometrías y condiciones mecánicas, las dos fuentes de esfuerzo de los campos regionales pero modificando sus intensidades relativas (fig. 2).

Para realizar el segundo conjunto de modelos se diseñaron una serie de mallas sobre la geometría del modelo inicial (fig. 2), asignando a cada uno de los bloques un comportamiento homogéneo y elástico, con unos valores de *coeficiente de Poisson* ( $\nu$ ) y de *módulo de Young* ( $E$ ) acordes con sus características geológicas (tabla 1). El objetivo de este modelo tan simple, es comprobar si el contraste entre materiales de diferentes características mecánicas es capaz, por sí sólo, de producir cambios significativos en las trayectorias de esfuerzos.

**Resultados de los modelos**

Los mapas de trayectorias de  $S_{HMAX}$  obtenidos tras el proceso de modelización de los esfuerzos en la cobertera (modelo 1) son muy similares a los mapas deducidos a partir de los datos de campo (fig. 3). Los modelos de esfuerzos muestran trayectorias de  $S_{HMAX}$  bastante regulares, aunque se pueden observar algunas perturbaciones y rotaciones menores. La variación de las magnitudes relativas de las compresiones aplicadas a lo

largo de los límites del modelo, así como la posición de éstos, han sido determinantes para ajustar los modelos a los datos geológicos. Por el contrario, los valores de los parámetros mecánicos, así como los valores absolutos de las presiones aplicadas han influido en las magnitudes de las componentes de los esfuerzos obtenidos durante la modelización, pero no en su orientación.

*Modelo 1 (Esfuerzos en la cobertera)*

a) Modelo de esfuerzos del campo "Ibérico" (fig. 3D): Se ha simulado con una compresión aplicada directamente sobre la falla del borde SO de la Cordillera Ibérica. Para ajustar el modelo a los datos, ha sido necesario reducir la magnitud de la compresión hacia el norte del límite oriental (de 10 Mpa en el extremo S del límite a 5 Mpa en extremo norte de la Malla 2). De otro modo, aparecen fuertes esfuerzos extensivos asociados a la falla del borde S del Sistema Central, que no se han encontrado en el registro geo-

MODELO I PLACA HOMOGÉNEA (COBERTERA)		
AREA	$\nu$	E (Pa)
Malla 1	0.25	8e+09
Malla 2	0.25	8e+09

MODELO II BLOQUES DE BASAMENTO		
AREA	$\nu$	E (Pa)
Bloque Cuenca de Madrid	0.25	8e+09
Bloque de Valdeolivas	0.25	5e+09
Bloque de Cuenca	0.25	4e+09
Malla 2a	0.25	8e+09
Malla 2b	0.25	4e+09

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los elementos asignados a cada malla.

Table 1: Mechanical parameters applied to the mesh elements.

lógico. Esta disminución de la compresión está justificada por la desaparición hacia el NO de las estructuras orientadas NO-SE, así como por la ausencia de tensores de paleoesfuerzos compatibles con este campo desde la zona de falla de Tarancón hacia el NO. Las trayectorias de  $S_{HMAX}$  del modelo presentan una suaves rotaciones en el sentido horario en el límite NO del área de estudio. Esta rotación puede estar originada por la presencia de fallas de dirección N-S en el centro de la cuenca de Madrid (De Vicente *et al.*, 1996a).

b) Modelo de esfuerzos del campo "Guadarrama" (fig. 3F): Para ajustar este modelo ha sido necesario desplazar la aplicación de la compresión 50 Km hacia el SE de la zona de estudio, siendo la magnitud constante en todo el límite (10 MPa). De este modo se han podido obtener unas trayectorias de esfuerzo homogéneas, tal y como revela el análisis microestructural, evitándose la aparición de estados de esfuerzos extensivos asociados al límite oriental de los Montes de Toledo. Esta fuente de esfuerzos situada al SE del área de estudio es compatible con el origen bético de los esfuerzos. La presencia de una rotación antihoraria de las trayectorias de  $S_{HMAX}$  del modelo respecto a los datos microestructurales en el SO del área estudiada, puede

estar compensada por una compresión N-S deducida al O del límite oriental de los Montes de Toledo (Martín y De Vicente, 1996). Este hecho no se ha comprobado en los modelos debido a la ausencia de datos microestructurales entre los Montes de Toledo y la zona de estudio.

c) Modelo de esfuerzos del campo "Altomira" (fig. 3E): Para obtener un modelo con trayectorias de  $S_{HMAX}$  semejantes a los mapas de paleoesfuerzos se intentó, en una primera aproximación, superponer los dos campos de paleoesfuerzos mayores, manteniendo las magnitudes de las presiones relativas intactas. No obstante, y debido a que los resultados obtenidos no coincidían con los datos geológicos en el N del área de estudio, hubo que reducir la magnitud de la compresión "Ibérica" de 10 Mpa en el S a 1 Mpa en el límite norte de la Malla 2. Por otro lado, la compresión "Bética" se ha mantenido constante, y con igual magnitud, que la necesaria para generar el campo de paleoesfuerzos "Guadarrama". Estas condiciones implican que la compresión «Bética» era constante y provenía desde el SE, mientras que la intensidad del campo de esfuerzos "Ibérico" estaba empezando a disminuir durante el emplazamiento de la Sierra de Altomira durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior. Un hecho destacable es la aparición de una banda adosada al extremo oriental de la malla 1, donde las magnitudes de los esfuerzos principales horizontales son muy parecidos ( $S_{HMAX} = S_{HMIN}$ , fig. 3E). Este área debe corresponderse con el límite oriental de la distribución espacial del campo de esfuerzos "Altomira". Desde este límite hacia el NE, la orientación de  $S_{HMAX}$  debe rotar, disponiéndose NO-SE (compresión "Ibérico-Pirenaica"), tal y como sugieren los estudios microestructurales desarrollados al NE del área de estudio (Rodríguez Pascua *et al.*, 1994). Tanto las trayectorias de  $S_{HMAX}$  obtenidas del análisis microestructural, como de la modelización, presentan una orientación principal según N100E muy constante, excepto desde la zona de falla de Tarancón hacia el S, donde las trayectorias de  $S_{HMAX}$  sufren un giro horario de unos pocos grados. Este hecho sugiere que al S de la zona de estudio, las trayectorias de  $S_{HMAX}$  asociadas el campo de paleoesfuerzos "Altomira" deben cambiar a una orientación NO-SE. Estudios microestructurales situados mas al S, zona de Campos de Calatrava (Vegas y Rincón, 1996), no han detectado la presencia de una compresión E-O, mientras que si aparecen compresiones orientadas según NO-SE y SE-NO.

*Modelo 2 (esfuerzos en el basamento)*

a) Modelo de esfuerzos del campo "Ibérico". El efecto mas importante causado por las inhomogeneidades mecánicas en el basamento es una rotación horaria en la parte norte del área de estudio (fig. 3G). Esta rotación se produce por la presencia de la falla de Sacedón, que es el contacto entre un basamento homogéneo y resistente (bloque de la cuenca de Madrid) con otro menos resistente bajo la cuenca de Loranca (blo-

que de Valdeolivas). También aparecen rotaciones horarias en las trayectorias de  $S_{HMAX}$  asociadas a la zona de falla de Tarancón.

b) Modelo de esfuerzos del campo "Guadarrama". Presenta las menores variaciones respecto al campo de paleoesfuerzos deducido del análisis microestructural. Esto se debe a que la zona de falla de Tarancón tiene una orientación perpendicular a la dirección general de  $S_{HMAX}$ . La falla de Sacedón, por el contrario, presenta una dirección oblicua respecto a las trayectorias de  $S_{HMAX}$ , pero se encuentra demasiado lejos del origen de los esfuerzos, y cerca del límite norte del modelo, para originar perturbaciones de importancia (fig. 3I).

c) Modelo de esfuerzos del campo «Altomira». Este caso es el que presenta una mayor variación respecto a las trayectorias de esfuerzos calculadas en el modelo 1. En la parte norte del modelo, las trayectorias de  $S_{HMAX}$  orientadas N100E se sitúan desde la falla de Sacedón hacia el O, rotando en sentido antihorario desde este accidente hacia el E hasta disponerse orientadas NE-SO (fig. 3H). Por otra parte, el contacto entre el bloque de Cuenca y los otros dos bloques definidos en la malla 1 (Valdeolivas y cuenca de Madrid) produce una rotación horaria justo sobre la zona de falla de Tarancón. Estos efectos combinados generan un mapa de trayectorias de  $S_{HMAX}$  más irregular que el obtenido para la cobertera. De cualquier modo, aparece una zona con trayectorias de  $S_{HMAX}$  orientadas según N100E (compresión «Altomira») en la mayor parte de la posición en la que se desarrolla la Sierra de Altomira en la cobertera.

### Discusión y conclusiones

La construcción de modelos simples de campos de esfuerzos con elementos finitos ha permitido simular los campos de paleoesfuerzos compresivos terciarios deducidos a partir del análisis microestructural. Además, se confirma la idea de que la geometría de las estructuras y de los límites de los modelos juegan un papel determinante en la orientación de los esfuerzos intraplaca, tal y como sugieren diversos trabajos previos (Cloetingh y Wortel, 1986; Bada *et al.*, 1996). En este sentido, la orientación de las trayectorias de  $S_{HMAX}$  de los tres campos de paleoesfuerzos modelizados está fuertemente condicionada por la geometría de las fallas corticales más importantes del centro peninsular (p.e. fallas del borde S del Sistema Central y del borde SO de la Cordillera Ibérica). El otro factor que produce un efecto significativo sobre los resultados de los modelos es la magnitud relativa de las dos compresiones aplicadas en los límites de los modelos.

Los resultados de obtenidos a partir de la modelización, permiten confirmar la hipótesis desarrollada por Muñoz Martín *et al.* (1994) de que el campo de paleoesfuerzos «Altomira» es un campo de esfuerzos local, generado por la superposición espacial y temporal de dos campos de esfuerzos mayores («Ibérico/Pirenaico» y «Bético/Guadarrama»). Estos dos campos de esfuerzos regionales se transmitieron desde los bordes norte y sur, respectivamente, hacia el interior de la península Ibérica, generando durante el Oligoceno-Mioceno inferior un cinturón de pliegues y cabalgamientos perpendicular a las dos compresiones regionales. Este escape de la cobertera hacia el O, para formar la Sierra de Altomira, se vio favorecido por la presencia de un nivel de despegue (facies «Keuper» triásicas).

Desde un punto de vista geodinámico, el hecho de que haya sido necesario disminuir la intensidad relativa de la compresión «Ibérica» respecto a la compresión «Guadarrama» implica una actividad tectónica tardía en la Sierra de Altomira respecto a la Cordillera Ibérica, lo que confirma los resultados del análisis microestructural (Muñoz Martín y de Vicente, este volumen). Por el contrario, no ha sido posible obtener trayectorias de esfuerzos orientadas E-O según se deduce del análisis micro y macroestructural, a partir de la aplicación de esfuerzos desde la Cordillera Ibérica ni aún generando geometrías y condiciones de contorno poco realistas. Estos resultados contradicen la hipótesis de Guimerá y Álvaro (1990), según la cual la Sierra de Altomira constituiría una rampa oblicua, desarrollada en la cobertera, de las estructuras transpresivas de la Cordillera Ibérica, que constituye el antepaís del orógeno pirenaico.

En los modelos generados para simular los campos de esfuerzos en el basamento, se han obtenido algunas reorientaciones de los esfuerzos principales respecto a los modelizados en la cobertera, debido a la variación de los parámetros elásticos utilizados en cada bloque. Estas variaciones son más importantes en el modelo del campo de paleoesfuerzos «Altomira», debido a la orientación relativa de los límites entre los bloques definidos, y a su distancia respecto a las fuentes de esfuerzos. En cualquier caso, también aparece un área con  $S_{HMAX}$  orientado según N100E en la mayor parte de la zona de estudio. Los resultados de los modelos sugieren que puede haberse producido un desacoplamiento entre el campo de paleoesfuerzos «Altomira» medido en la cobertera y el modelizado en el basamento de las cuencas, si las fuentes de esfuerzos han sido equivalentes. Este desacoplamiento se desarrollaría a favor del nivel de despegue constituido por las facies «Keuper» triásicas.

### Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios y ayuda durante la realización de los modelos de elementos finitos en la Vrije Universiteit (Amsterdam) a M. Gölke, M.E. Janssen y G. Bada.

Este trabajo forma parte de la Tesis Doctoral del primer autor, y ha sido financiado por el proyecto PB94-0242 de la DGICYT (España) y por la GOA (Holanda).

### Referencias

- Bada, G.; Cloetingh, S.; Gerner, P. y Horváth, F. (1996) *Tectonophysics* (in press).
- Becker, A. (1989) *Geol. Rundschau*, 78/2: 459-475.
- Cloetingh, S. y Wortel, M.J.R. (1986) *Tectonophysics*, 132: 49-67.
- Capote, R. (1983) *Libro Jubilar J.M. Ríos (tomo II)*: 108-120.
- De Vicente, G. (1988) *Tesis Doctoral*. Univ. Complutense de Madrid: 198 pp.
- De Vicente, G.; González Casado, J.M.; Muñoz Martín, A.; Giner, J.L. y Rodríguez, M.A. (1996a) *Tertiary Basins of Spain*, P. Friend y C. Dabrio (Eds.) *Cambridge Univ. Press*: 255-259.
- De Vicente, G.; Giner, J.L.; Muñoz Martín, A.; González Casado, J.M. y Lindo, R. (1996b) *Tectonophysics* (aceptado, en prensa).
- Galindo, J.; González Lodeiro, F. y Jabaloy, A. (1993) *Tectonophysics*, 227: 105-226.
- Gölke, M.; Cloetingh, S. y Fuchs, K. (1994) *Tectonophysics*, 240: 45-57.
- Guimerá, J. y Álvaro, M. (1990) *Bull. Soc. Geol. France*, 2: 339-348.
- Martín, S. y De Vicente, G. (1995) *Geogaceta*, 18: 11-14.
- Muñoz Martín, A.; De Vicente, G. y González Casado, J.M. (1994) *Cuad. Lab. Geol. Laxe*, 19: 203-214.
- Muñoz Martín, A. y De Vicente, G. (1996) *IV Cong. Geol. España*.
- Perucha, M.A.; Muñoz Martín, A.; Tejero, R. y Bergamín, J.F. (1995) *Geogaceta*, 18: 15-18.
- Richardson, R.M.; Solomon, S.C. y Sleep, N.H. (1979) *Rev. Geophys.*, 17: 981-1019.
- Rodríguez Pascua, M.A.; De Vicente, G. y González Casado, J.M. (1994) *Cuad. Lab. Geol. Laxe*, 19: 163-174.
- Simón Gómez, J.L. (1984) *Inst. Estudios Turo-lenses (CSIC) Teruel*.
- Querol, R. (1989) *Geología del subsuelo de la Cuenca del Tajo*. ETSI. Minas de Madrid: 46 pp.
- Vegas, R. y Rincón, P. (1996). *Geogaceta*, :31-35.