
Capítulo 7 TECTONICA DE INVERSION

7.1 INTRODUCCIÓN

Glennie y Boegner (1981) figuran entre los primeros autores en aplicar este término para describir la modificación de la geometría extensiva de cuencas del Mar del Norte. En palabras de Glennie (1990): "la Inversión no implica un alzamiento del tipo que crearía un *horst* sencillo...en vez de eso parece implicar un alzamiento vertical diferencial del relleno sedimentario de una cuenca o graben de forma que la parte axial de la cuenca deviene el centro del alzamiento positivo (inversión); la cantidad de alzamiento disminuye hacia los flancos de la cuenca que pueden haber experimentado escaso o ningún movimiento vertical durante la inversión". En una definición más concisa, la inversión tectónica se define como un cambio de elevación estructural relativo al nivel regional por una fase subsecuente de deformación (ej. Cooper *et al.*, 1989). Una inversión estructural positiva ocurre cuando las fallas extensivas que limitan cuencas sedimentarias cambian el sentido de movimiento durante la tectónica compresiva y las cuencas resultan elevadas en diferentes grados (Williams *et al.*, 1989).

Geometrías de inversión tectónica se han observado en familias de cuencas tan diferentes como rifts o cuencas intracratónicas, en áreas sumergidas con inversión suave (Mar del Norte, Indonesia), o en cordilleras de plegamiento donde las cuencas pueden estar suave o fuertemente invertidas (ej. Alpes, Pirineos), y han sido reproducidas en modelos analógicos y teóricos (Brun and Nalpas, 1986; Buchanan y McClay, 1991; Mitra y Islam, 1994). Las geometrías que resultan del proceso de inversión tectónica son razonablemente conocidas: 1) anticlinales sobre el alto estructural de la falla reactivada; 2) desplazamiento de los depocentros desde una posición adyacente a la falla a lejos de la falla; 3) arqueamiento y elevación de la sección transversa de la cuenca; 4) giro del sentido de basculamiento de los bloques rotados sobre fallas; 5) formación de retrocabalgamientos en el bloque superior de la falla invertida; 6) estructuras de tipo "*buttressing*" (contrafuerte) o de *pop-up* desarrolladas en el área del bloque superior adyacente a la falla extensiva; 7) expulsión de material por cabalgamientos hacia fuera del graben debido a problemas volumétricos; 8) estructuras en flor; 9) estructuras de tipo arpón que resultan de la inversión parcial de un semigraben; 10) fallas de *bypass* de bloque superior.

En este capítulo se examinan las estructuras de inversión formadas previamente a la discordancia del Cenomaniense superior y durante la etapa compresiva finicretácica del Santoniense superior-Maastrichtiense. Ambas modifican la estructura extensiva del Cretácico inferior resultando geometrías muy diferentes. Las estructuras pre-cenomanienses se caracterizan un plegamiento suave de gran longitud de onda que ha alzado partes de la cuenca extensiva sobre el nivel de base, resultando extensas discordancias. Su interpretación como estructuras contractivas puede ser delicada en algunos casos ya que modifican bloques previamente rotados en extensión que tienen pendientes de orden comparable. Este estilo de "inversión suave" se ha reconocido además de los Pirineos centrales en la cuenca de Aquitania, la cordillera Cantábrica y la cuenca del Maestrazgo, con edades entre el Aptiense y el Albiense (Fig. 7.1). En contraste, las estructuras finicretácicas de inversión consisten en grandes pliegues y cabalgamientos asociados a la formación de una cuenca de antepaís rellena por turbiditas.

Estructuras de edad finicretácica se han descrito en el noroeste de Europa, al sur y oeste de Gran Bretaña y en el Mar del Norte (ej. Coward y Dietrich, 1989). El origen de la compresión está en la convergencia de placas en los Pirineos y en el frente de deformación alpino. Esta última región ha proporcionado interesantes ejemplos de estructuras de inversión (Gillcrust *et al.* 1987). Aunque en los Pirineos la etapa orogénica del final del Cretácico representa el 30% de la duración de la fase compresiva, todavía muchos autores sitúan equívocamente el inicio de la orogenia Pirenaica en el Eoceno, tal vez porque las estructuras del Cretácico superior totalizan poco acortamiento en comparación con las terciarias. Los ejemplos pirenaicos que se describen a continuación muestran la importancia que la inversión tectónica finicretácica ha tenido en la estructuración de los Pirineos. En Aquitania, los principales *plays* de hidrocarburos derivan de la inversión tectónica cretácica, que ha modificado la estructura de las cuencas extensivas previas, creando nuevas oportunidades para el desarrollo de las rocas madre, reservorios y trampas (Le Marrec *et al.*, 1995).

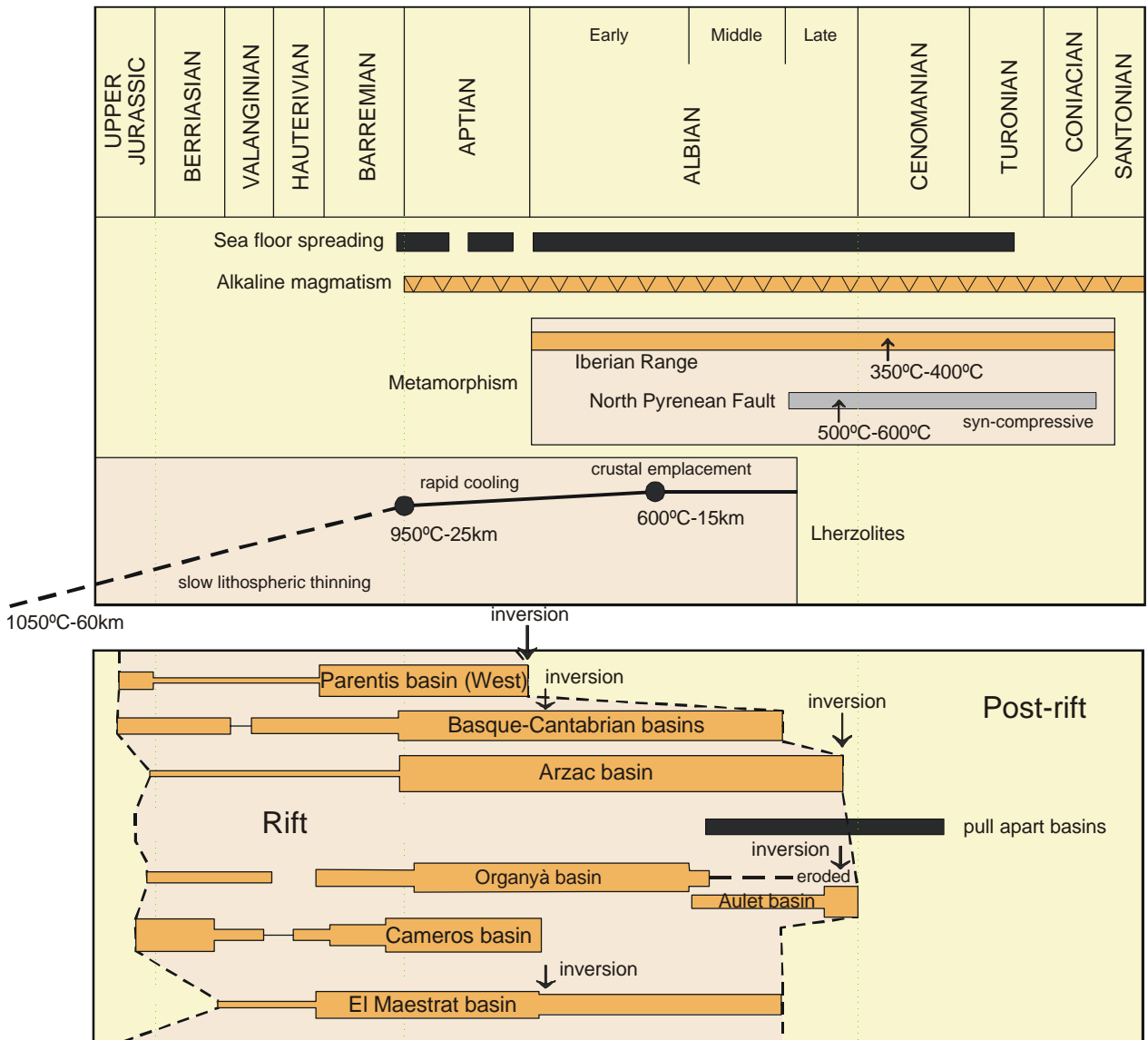


Fig. 7.1 Diagrama que muestra los principales eventos tectónicos en la evolución de las cuencas cretácicas del norte de Iberia y sur de Francia. Modificado de Vergés y García-Senz (2001).

7.2 LA INVERSION PRE-CENOMANIENSE SUPERIOR

La modificación de la estructura extensiva de la cuenca de Organyà antes del cenomaniense superior queda de manifiesto en el mapa de isoclinas de erosión bajo la discordancia del cenomaniense (Fig. 2.52) y en los cortes geológicos restituidos a la base de la Formación de Santa Fe (Figs. 3.7 y 3.8). El área de máxima erosión se sitúa al este del río Segre, aproximadamente en el centro sedimentario de la cuenca de Organyà. La dirección NO-SE de las estructuras de deformación, indicada por las líneas de erosión, es oblicua a la falla extensiva E-O de Organyà, interpretada como una falla de basamento (Cap. 6.1). El estilo de deformación de los cortes restituidos esquematizado en la figura 7.2a, muestran que el bloque superior de la falla de Organyà se hallaba basculado hacia el sur y deformado por pliegues de amplitud muy baja y longitud de onda kilométrica. Se interpretan como *buckle folds* de flancos desiguales formados por acortamiento longitudinal del bloque superior contra el contrafuerte producido por las fallas extensivas de alto ángulo. No hay indicios de que las fallas de basamento hayan invertido su movimiento normal de manera significativa. Estos pliegues parecen ser los precursores de los pliegues más amplios de la lámina cabalgante de Bóixols formados posteriormente durante la inversión del Santoniense superior-Maastrichtiense. La oblicuidad entre pliegues y fallas maestras (Fig. 7.2b) sugiere una dirección de contracción entre NE-SO y NNE-SSO. Con la información disponible no es posible determinar si estos pliegues se disponen con una geometría *en echelon*. Se concluye que entre el Albiense superior y el Cenomaniense superior la cuenca de Organyà ha experimentado una ligera contracción longitudinal con una orientación oblicua a las fallas extensivas principales que limitan la cuenca. La orientación entre NE-SO y NNE-SSO obtenida es coherente con un modelo de transpresión producido por el movimiento levógiro de la placa Ibérica respecto a la placa Europea en el Albiense superior-Cenomaniense (Fig. 7.2c).

La cuenca de Aulet es otra área donde se ha inferido una modificación de la estructura extensiva de edad pre-Cenomaniense superior, aunque esta interpretación depende de la construcción en profundidad del corte geológico nº 17 (Fig. 5.8b). La estructura propuesta, con forma de arpón, justifica la omisión de todo el Cretácico inferior por truncación de la sección del Cretácico inferior elevada sobre la rampa de bloque superior de la falla extensiva lítrica que se interpreta limita por el sur la cuenca de Aulet. La causa de la inversión sería en este caso un esfuerzo compresivo horizontal. Otras soluciones posibles son el plegamiento por expulsión de evaporitas del Keuper desde el depocentro de la cuenca de Aulet hacia los márgenes, ya sea en un contexto pre o sincompresivo.

La discordancia del Albiense superior en la Serra de Pegà es otro de los ejemplos comentados en la introducción a este capítulo en que resulta difícil separar los bloques rotados en extensión y la tectónica salina pre-contractiva de las rotaciones y elevación sobre el nivel regional ocasionadas por cantidades pequeñas de contracción. La geometría al restituir la discordancia a la horizontal es de un plegamiento suave que afecta a series previamente extendidas por fallas, con truncación de las crestas de los pliegues antiformales (Figs. 5.12b, 4.15). Si se valora la elevación sobre el nivel regional en relación a la columna de sedimento erosionada, las elevaciones máximas se sitúan respectivamente sobre el engrosamiento de Keuper que divide la cuenca y en el bloque inferior de la falla lítrica de Las Aras. Ambas estructuras forman parte de largas extrusiones formadas en la etapa extensiva previa al Albiense superior (Fig. 6.1). Un dato revelador es que la geometría de plegamiento de la superficie que trunca al Jurásico ya se manifiesta durante la sedimentación de la Formación de San Roque, como indica el adelgazamiento de las calizas de plataforma hacia la cresta anticlinal incipiente desarrollada sobre la falla de Las Aras (Fig. 5.12c). Otro dato significativo es que el centro de sedimentación de la Caliza de San Roque (situado en el bloque superior de la falla antitética que limita la extrusión de Keuper, continuación de la falla de Sirès) constituye un alto sedimentario ocupado por arrecifes durante la sedimentación de la Formación de Cruz, cuyo depocentro se sitúa desplazado hacia el sur.

La conclusión es que el plegamiento de las series bajo la discordancia de la base del Albiense superior es sinextensivo, producido por movimientos transversos a las capas forzados por el flujo de sal en los bloques inferiores de las principales fallas. Este no se considera un caso de inversión tectónica.

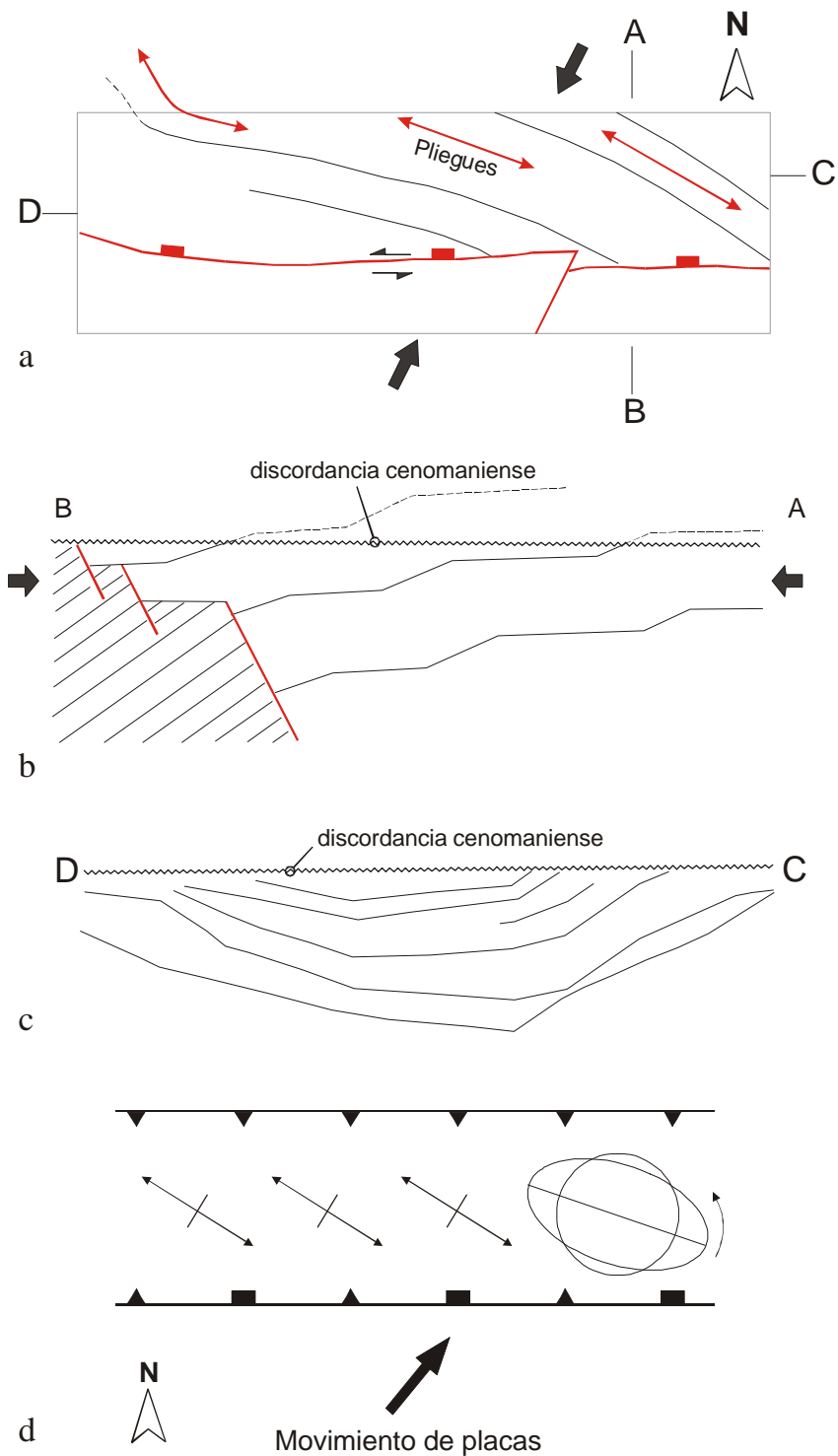


Fig. 7.2 a.- Esquema mostrando las relaciones entre las direcciones de pliegues, orientación de fallas extensivas que limitan la cuenca de Organyà y la dirección de acortamiento; b.- corte esquemático transverso que muestra el basculamiento hacia las fallas extensivas de los estratos pre-cenomanienses y su plegamiento por pliegues de baja amplitud; c.- corte longitudinal a la cuenca de Organyà que muestra la inversión del depocentro de la cuenca (capas truncadas a la derecha) y el mínimo alzamiento del margen (izquierda); d.- relación entre la orientación de los ejes de la deformación y el vector de convergencia del movimiento de las placas (comparar con el esquema obtenido en -a-). Este vector es coherente con el movimiento levógiro de Iberia en el Albiense superior-Cenomaniense.

7.3 LA INVERSIÓN DEL SANTONIENSE SUPERIOR-MAASTRICHTIENSE

La convergencia en los Pirineos es resultado de movimiento hacia el norte de las placas Africana e Ibérica contra la placa Europea entre el Santoniense superior y el Mioceno. Como resultado las cuencas extensivas de los Pirineos centrales fueron primero invertidas y después incorporadas en el sistema de cabalgamientos pirenaicos.

Los principales efectos de la compresión del Santoniense superior-Maastrichtiense fueron la elevación de las cuencas extensivas del Cretácico inferior y la depresión de las áreas situadas enfrente de las fallas extensivas invertidas. El resultado es la formación de un surco alargado E-O relleno por turbiditas y margas, que se halla compartimentalizado en su zona interna por pliegues oblicuos y en el área próxima a la plataforma del antepaís por un largo pliegue longitudinal asociado al cabalgamiento de Bóixols (Fig. 7.3). La forma *en echelon* de los pliegues y cabalgamientos del surco turbidítico interno se relaciona directamente con distribución espacial de las cuencas extensivas de Organyà, Aulet y Cotiella que como se ha visto se han formado en distintas edades y presentan geometrías extensivas diferentes (Cap. 6) y también con la existencia de relevos oblicuos en el sistema extensivo del Cretácico inferior.

Este apartado analiza brevemente de este a oeste algunas de las estructuras que resultan de la inversión de las cuencas extensivas del Cretácico inferior:

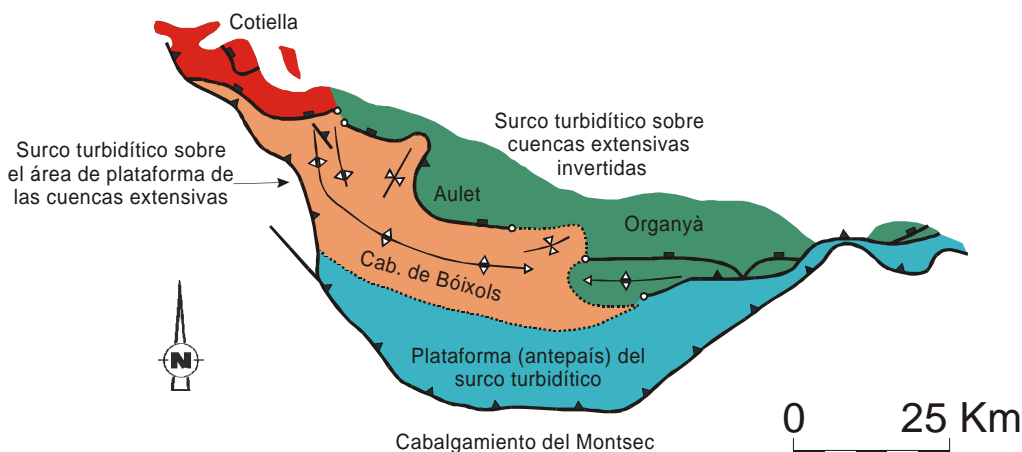


Fig. 7.3. Influencia de la distribución espacial de las cuencas extensivas cretácicas en la orientación de los pliegues y cabalgamientos de la cuenca de antepaís del Santoniense superior-Maastrichtiense.

La cuenca de Organyà está situada en el bloque superior del cabalgamiento de Bóixols con una rampa que coincide con la posición de las fallas extensivas del margen sur de la cuenca.. El cabalgamiento corta siempre a los bloques basculados y fallados del margen como un *short-cut* de bloque inferior (Fig. 7.4). El corte geológico del Pedraforca (Figs. 3.1, 7.4a) revela que el fondo del graben de Organyà ha recuperado prácticamente los niveles pre-extensivos (Jurásico casi continuo a ambos lados de la falla extensiva I de Organyà) por reactivación de la citada falla como un cabalgamiento. Ambos, bloque superior y bloque inferior, se hallan deformados por un gran pliegue de *buckling* formado por contracción longitudinal de los sedimentos del Cretácico inferior contra el obstáculo de las fallas extensivas que los limitan. El ángulo de *onlap* adquirido en extensión se ha distorsionado por rotación. El cabalgamiento de Bóixols corta a estas estructuras indicando un desarrollo más tardío.

La estructura característica al este del río Segre se muestra en la figura 7.4b, que esquematiza los cortes geológicos 2 y 3 (Fig. 3.1). El anticlinal desarrollado contra la falla extensiva I de Organyà sigue presente, la diferencia con el Pedraforca es que la falla extensiva no parece haber invertido su movimiento de forma significativa. Un retrocabalgamiento pasivo acomoda la deformación en ambos bloques de la falla extensiva,

caracterizados por secciones de espesor muy diferente. A diferencia del corte del Pedraforca, el bloque inferior está plegado en sinclinal por adaptación a la rampa de bloque inferior del cabalgamiento de Bóixols. El estilo de inversión descrito al este del Segre presenta afinidades con las estructuras contractivas obtenidas por Dubey and Bhakuni (1998) en modelos experimentales cuya característica más importante es un plegamiento sin reactivación de la falla extensiva.

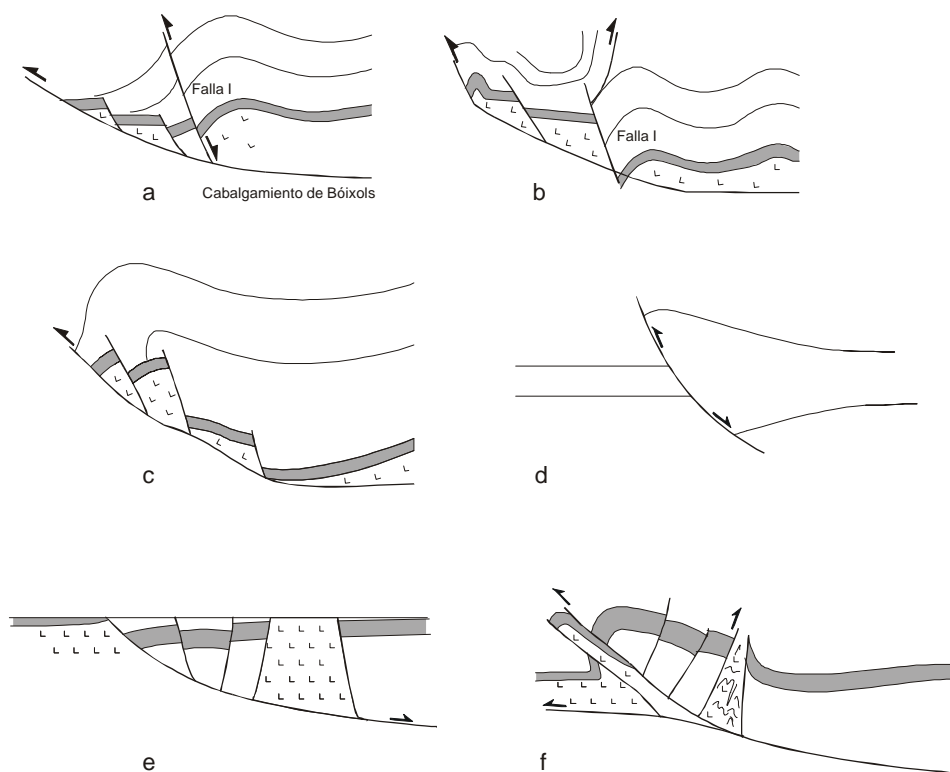


Fig. 7.4 Cortes geológicos esquemáticos que muestran diferentes tipos de inversión presentes en la lámina cabalgante de Bóixols. a.- estructura de inversión de la cuenca de Organyà en el Pedraforca; b.- estructura de inversión al este del río Segre; c.- estructura entre los ríos Segre y Noguera Pallaresa; d.- estructura en arpón, característica de la inversión pre-cenomaniense de la cuenca de Aulet; e y f.- estructura extensiva y de inversión característica de la unidad de Las Aras en Pont de Suert.

Un relevo de estructuras de plegamiento ocurre al oeste del río Segre coincidiendo con la posición de una falla de transferencia del sistema extensivo (Figs. 3.15, 6.2). El cambio principal es la no-formación de pliegues contra la falla extensiva I, que sin embargo mantiene una separación en extensión comparable a ambos lados del río Segre (el esquema de la figura 7.4e es engañoso a este respecto, porque corresponde a una transversal más lejana hacia el oeste, donde la falla extensiva I ha perdido mucho desplazamiento). Retomando el hilo de la argumentación, es lógico relacionar la no-formación de pliegues contra la falla extensiva I con una mayor facilidad de propagación del *short-cut* del cabalgamiento de Bóixols. Tal vez la propagación del cabalgamiento fue dificultada por el basamento hercínico, situado más alto en el bloque oriental de la falla de transferencia que en el bloque occidental.

El pliegue más importante de la lámina cabalgante de Bóixols entre los ríos Segre y Noguera Pallaresa es el anticlinal de San Corneli, situado sobre los bloques fallados que forman el margen de la cuenca (Fig. 7.4c). Las fallas extensivas III y IV son las que acumulan mayor desplazamiento en esta transversal. Su flanco frontal ha deformado por rotación la relación de *onlap* sobre estas fallas adquirida en extensión. El modelo geométrico de inversión Bond y McClay (1995) para la cuenca de Organyà parece aplicable principalmente a este caso. Según estos autores la cuenca extensiva se invierte sobre una falla de *short-cut* que se propaga en el bloque inferior de la falla extensiva. El anticlinal de San Corneli se modeliza como un anticlinal de propagación de falla.

La terminación brusca del anticlinal de San Corneli en el río Noguera Pallaresa y en general la inmersión de los ejes de las estructuras hacia el oeste guardan una relación directa con la disminución de espesor de los sedimentos del Cretácico inferior (Fig. 7.5). El fondo de la cuenca de Organyà se ha elevado sobre el cabalgamiento de Bóixols y el margen occidental de la cuenca se ha deprimido bajo el nivel marino acumulando series de turbiditas.

Las cuencas de Cretácico inferior del área de Pont de Suert están limitadas por fallas extensivas de forma lítrica y dimensiones discretas, compartimentalizadas por extrusiones y muros de sal del Keuper que deforman y elevan las crestas de los bloques inferiores (dibujo esquemático en Fig. 7.4e). Los cabalgamientos invierten las fallas extensivas lítricas que se hallan inclinadas favorablemente hacia el norte. En el bloque superior se forma un anticlinal sobre la falla extensiva, y en algunos casos como el cabalgamiento de Las Aras (Fig. 5.12) un *short-cut* delgado del bloque inferior representado en el esquema de la figura 7.3f. Las extrusiones de sal limitadas por fallas y muros verticales se contraen con formación de pequeños retrocabalgamientos en las fallas antitéticas. El bloque inferior de la falla lítrica principal puede tener un espesor reducido por la erosión de la serie pre-extensiva sobre el engrosamiento de la sal, favoreciendo la formación de pliegues de despegue.

El anticlinal del Turbón es un pliegue en caja caracterizado por flancos isoclinales y con un núcleo de Keuper que alcanza una posición muy alta en la estructura. Se interpreta como un pliegue de despegue desarrollado sobre una acumulación previa de Keuper. Pliegues con forma, origen y edad comparables se han descrito en la cuenca de Aquitania (ej. anticlinal de Saint Marcet).

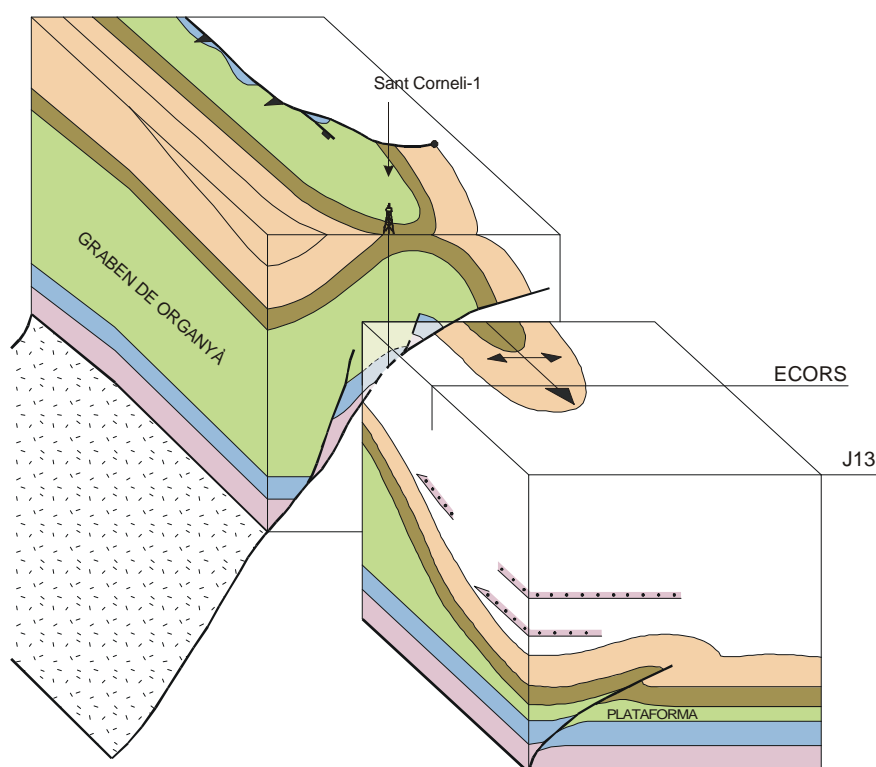


Fig. 7.5 Modelo 3D esquemático de la terminación del cabalgamiento de Bóixols y su anticlinal de rampa asociado. La rampa frontal del cabalgamiento ha elevado e invertido a la cuenca extensiva de Organyà respecto de su plataforma.

