

# Modelizando el control de las evaporitas y la geometría de falla en desarrollo de cuencas sinclinales y en su posterior inversión: Aplicación a cuencas ibéricas

## *Modeling the control of evaporites and fault geometry in the development of synclinal basins subsequently inverted: Application to Iberian basins*

O. Ferrer<sup>1</sup>, K. McClay<sup>2</sup>, N.C. Sellier<sup>2</sup>, M. Roma<sup>1</sup>, E. Roca<sup>1</sup> y J.A. Muñoz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geomodels Research Institute, Departament de Dinàmica de la Terra i l'Oceà, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona. [joferrer@ub.edu](mailto:joferrer@ub.edu)

<sup>2</sup> Fault Dynamics Research Group, Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London, Egham, Surrey, TW20 0EX, Reino Unido.

**Resumen:** En los sistemas de rift con evaporitas, la sal juega un papel clave durante la extensión desacoplando la deformación de los materiales infra- y suprayacentes. Si posteriormente estas cuencas son invertidas, la compresión inicial está fuertemente condicionada por la arquitectura extensiva heredada así como por la continuidad del nivel evaporítico. A partir de una serie de modelos analógicos esta investigación se centra en el papel que juega la sal en sistemas de rift y en su posterior inversión. Se analizan también otros parámetros clave en la deformación como la geometría de la falla principal, la potencia del nivel evaporítico y la tasa de extensión/inversión. Los resultados experimentales muestran que independientemente de la geometría de la falla principal, la presencia de un nivel dúctil potente o una tasa de deformación lenta favorecen el desacople entre los materiales infra- y supra-silicona desarrollándose dos estilos estructurales claramente diferentes. Mientras la formación de fallas es común en los materiales infrayacentes al nivel dúctil, la cobertera mimetiza la geometría de estos mediante amplios pliegues. Estos resultados se comparan con diversas cuencas sinclinales ibéricas con diferentes grados de inversión.

**Palabras clave:** Cuencas sinclinales, extensión e inversión tectónica, tectónica salina, modelos analógicos.

**Abstract:** In rift systems with evaporites, salt plays a key role during extension because it decouples the supra- and sub-salt deformation. If these basins are then inverted, the initial compression will be strongly conditioned by the inherited rift architecture as well as the continuity of evaporitic layer. Using scaled analogue models this research focuses on the role of salt in rift systems subsequently inverted. Other key factors as the main fault geometry, the thickness of the evaporitic unit and the extension/inversion rates have been also analysed. The experimental results show that regardless the main fault geometry, the presence of a thick ductile layer or a slow deformation rate favour the decoupling between supra- and sub-polymer units developing two different structural styles. While faulting is common in the materials underlying the viscous layer, the cover mimics their geometry developing broad folds. These results are compared with several Iberian synclinal basins with different degrees of inversion.

**Key words:** Syncline basins, extension and inversion, salt tectonics, analogue modeling.

## INTRODUCCIÓN

En los sistemas de rift la extensión generalmente se acomoda por la propagación de las fallas hacia arriba a lo largo del relleno de la cuenca (Fig. 1a) (ej. McClay, 1989, Withjack y Callaway, 2000). En cambio, si presentan evaporitas, la sal, mecánicamente más débil que el resto de rocas sedimentarias, localiza los esfuerzos despegando la deformación supra- e infra-sal (ej. Jackson y Vendeville, 1994; Withjack y Callaway, 2000). Como resultado, el estilo estructural de la cobertera es considerablemente diferente al de los materiales infra-sal. Los materiales de la supra-sal mimetizan la geometría de las fallas desarrolladas en las unidades infra-sal generandocuenas sinclinales en el bloque superior de la falla principal (Soto et al., 2007, Ferrer et al., 2014). La geometría de estas cuencas está controlada por la potencia y la deformación de la uni-

dad salina y de la cobertera así como por la forma de las fallas extensivas, su magnitud y su tasa de movimiento (Withjack y Callaway, 2000).

Si posteriormente estas cuencas se invierten, tal y como ocurre en muchos orógenos alpinos, la estructura extensiva heredada y la continuidad del nivel evaporítico, controlan de forma dramática la deformación contractiva (Ferrer et al., 2016). Durante la inversión tiene lugar la reactivación de las principales fallas extensivas heredadas del rift. En la inversión de cuencas sin evaporitas las fallas principales se propagan hacia arriba produciendo anticlinales asimétricos, estructuras en arpón y retrocambalgamientos de bloque superior o *short-cuts* de bloque inferior (Fig. 1b) (McClay, 1989). Por el contrario, en las cuencas con evaporitas la presencia de un nivel salino puede producir el desacople parcial o total de la deformación entre los materiales supra- e

infra-sal. Pero, ¿qué factores controlan la inversión de una cuenca con evaporitas? ¿cuál es el papel que juega la sal durante la inversión?

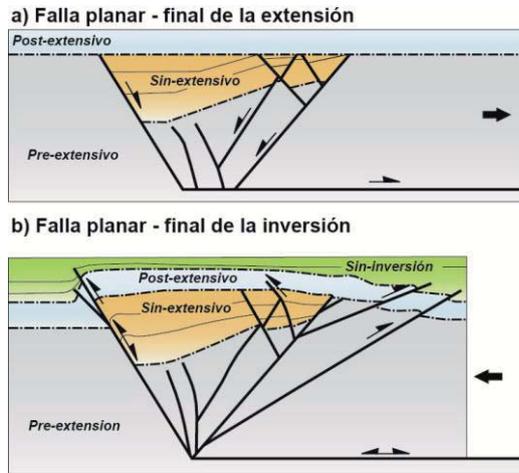


FIGURA 1. Modelos sinópticos de la extensión a) e inversión b) de una falla planar buzando 60° (modificado de McClay, 1995).

Para responder a estos interrogantes, esta investigación utiliza modelos analógicos a escala para analizar la interacción entre las estructuras infra-sal y las unidades supra-sal durante la extensión y la inversión. Los resultados experimentales se comparan con diversas cuencas sinclinales ibéricas con diferentes grados de inversión, incluyendo ejemplos de cuencas ligeramente invertidas (ej. Cuenca de Parentis) a cuencas totalmente invertidas e incorporadas en un orógeno (ej. Cuenca de Cameros).

## CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Los modelos se han construido en una caja con tres paredes fijas (dos cristales laterales y una pared de metal) y una pared móvil a la que se fijó un bloque rígido con diferentes geometrías de falla (lítrica simple, lítrica compleja, planar simple y planar con dos paneles con diferente buzamiento). Como despegue entre el bloque rígido y los materiales del bloque superior se ha utilizado un film de plástico fijado a la pared fija del modelo (Fig. 2a). El relleno sedimentario del bloque superior se ha construido con niveles de arenas de 2.5 mm de grosor de colores blanco, azul y negro con propiedades mecánicas similares (análogos a los materiales frágiles de la corteza superior) y un nivel de silicona en la parte superior del modelo (5 o 10 mm de grosor dependiendo del modelo) recubriendo tanto el bloque superior como el inferior (análogo a la sal en la naturaleza). La unidad preextensiva termina con 4 niveles más de arena blanca, azul y negra (Fig. 2a).

Durante la realización de los modelos (Fig. 2) se aplican diferentes grados de estiramiento y acortamiento considerando también dos velocidades diferentes. La más lenta (3mm/hora), permite que la silicona actúe como un despegue muy efectivo, ya que puede migrar a

lo largo del modelo durante la deformación. Con la más rápida (15mm/hora) el polímero tiene un comportamiento más frágil y la migración a lo largo del modelo queda tan favorecida. Durante la extensión se añaden niveles de arena cada 5 mm de extensión levantando la regional 1mm para cada nuevo nivel (polígono de color rojo en la figura 2b). Posteriormente a la etapa extensiva, los modelos se han invertido sobrepasando el punto nulo y entrando en contracción pura (Fig. 2c). Con esto se favorece que la silicona actúe de despegue contractivo transfiriendo parte de la deformación a los materiales que se encuentran sobre el bloque inferior (Fig. 2c). Durante la inversión y dependiendo del modelo se consideró sedimentación sin-contractiva. Del mismo modo, en algunos de los modelos, se aplica erosión con una aspiradora durante la inversión para testear el efecto de la erosión en la naturaleza.

La monitorización durante la deformación de los modelos se realiza mediante escáneres de la topografía así como con fotografías cenitales y laterales con cámaras de alta resolución. Al final de la deformación, el modelo se cubre con una capa de arena postcinemática para prevenir movimientos indeseados de la silicona y se empapa con agua para proceder a su corte en secciones longitudinales de 3mm de grosor. Durante el seccionado del modelo se realizan fotografías de cada una de las secciones longitudinales que serán utilizadas para construir modelos digitales 3D y proceder al análisis de las estructuras.

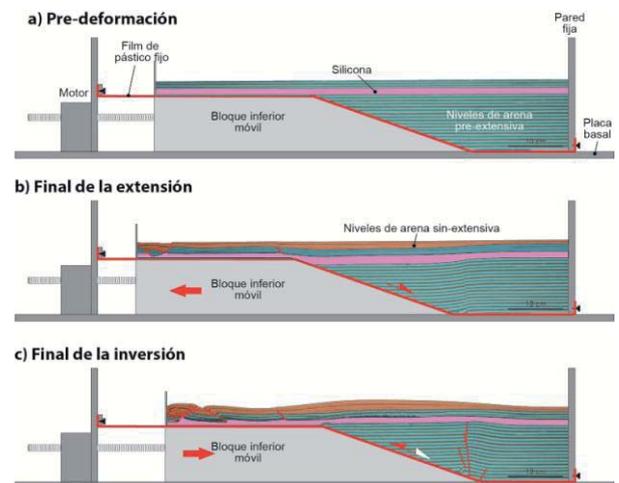


FIGURA 2. Configuración experimental y relleno sedimentario para cada episodio de deformación: a) geometría pre-deformación, b) configuración al final de la extensión, y c) configuración al final de la inversión (modificado de Ferrer et al., 2016).

Finalmente, destacar que si bien la mayor limitación de esta configuración experimental es que el bloque rígido no se puede deformar durante la inversión tal y como ocurre en la naturaleza (Bonini et al., 2012), es la única opción de modelar el papel que juega la geometría de la falla y como ésta afecta a la deformación del bloque superior ya que se mantiene invariable a lo largo de todo el experimento.

## RESULTADOS

Por razones de espacio, en este apartado no se mostraran los resultados de todo el programa experimental, ilustrando la explicación con el experimento más representativo que incluye una falla planar buzando  $60^\circ$  (Fig. 3). En este experimento, al igual que en el resto, se aprecia claramente que la deformación extensiva en el bloque superior de la falla forma típicamente estructuras desacopladas con un sinclinal extensivo sobre la silicona y fallamiento en los materiales infrayacentes (Fig. 3a). El desacoplamiento junto con el flujo de silicona durante la extensión controla la formación de un monoclinal de bloque superior durante las primeras fases de extensión. La silicona del bloque superior de la falla principal migra desde el depocentro hacia los márgenes de la cuenca desarrollando zonas ligeramente levantadas por su acumulación. Dependiendo de la geometría de la falla principal y del grosor del nivel de silicona, esta migración puede favorecer el desarrollo de soldaduras primarias por agotamiento del nivel de silicona sobre los márgenes de la cuenca infra-silicona (Fig. 3a). A partir de este momento la deformación en este punto pasa a ser totalmente acoplada y las estructuras de los materiales infra-silicona se propagan hacia los materiales supra-yacentes. En los modelos con menos extensión los materiales pre-extensivos suprayacentes a la silicona no llegan a desconectarse (Fig. 3a). En cambio a mayor extensión los materiales preextensivos por encima de la silicona son estirados fuertemente sobre el plano de falla principal desarrollándose un conjunto de fallas normales despegadas en el nivel de silicona. A medida que la extensión avanza estas fallas rotan hacia el bloque superior adquiriendo una forma curvada. En los márgenes de la cuenca se pueden desarrollar estructuras extensivas buzando hacia cuenca que enraízan en el techo de la silicona (Fig. 3a). Es común también el desarrollo de estructuras salinas entre las que destacan diapiros y paredes salinas. En la parte distal de los modelos, justo sobre el bloque inferior se desarrollan grabens con fallas despegadas en el nivel de silicona (Fig. 3a).

Durante la inversión se produce la reactivación contractiva de la falla principal que conlleva el levantamiento, plegamiento y despegue de la cuenca sinclinal sobre el nivel de silicona (Fig. 3b). Tal y como ocurre durante la extensión, la presencia del nivel de silicona produce un desacople entre la unidad infra- y supra-silicona. También tiene lugar una reducción de la potencia del nivel dúctil por migración de silicona. La presencia de soldaduras primarias en algunos modelos al final de la extensión, controla de forma dramática el estilo estructural al final de la inversión (Fig. 3b). Las soldaduras primarias inhiben además que el polímero pueda actuar de despegue favoreciendo el levantamiento de la unidad precinemática infrayacente. Del

mismo modo, favorecen la propagación de las estructuras hacia los materiales supra-silicona tal y como ocurre con la falla principal. Las fallas normales desarrolladas en los márgenes de las cuencas sinclinales pueden invertirse o bien desarrollarse fallas de atajo en el bloque inferior de las mismas (Fig. 3b).

Del mismo modo, los diapiros y/o paredes de silicona desarrolladas a ambos márgenes de la cuenca durante la etapa extensiva son estranguladas durante la inversión disparando la extrusión de silicona sobre el modelo, lo que genera glaciares de silicona. Parte de la deformación contractiva se transmite también a través de la silicona sobre el bloque inferior que actúa de despegue provocando la inversión de los grabens existentes en la parte distal del modelo (Fig. 3b).

## CUENCAS IBÉRICAS INVERTIDAS CON NIVELES SALINOS

Entre las cuencas mesozoicas ibéricas es común la presencia de grandes sinclinales desarrollados sobre un nivel de evaporitas de edad Triásico Superior (Keuper) (ej. Cameros, Organyà, Columbrets, Parentis...). Si bien el origen de todas estas cuencas es durante la etapa de rift Jurásico Superior-Cretácico Inferior relacionada con la apertura del Atlántico Sud, muchas de ellas fueron posteriormente modificadas contractivamente durante la Orogenia Alpina (Cretácico tardío-Cenozoico) cuando se invirtieron parcial- (cuencas de Parentis y Columbrets) o totalmente llegando incluso a ser incorporadas a diversos cinturones de pliegues y cabalgamientos como los Pirineos (Cuenca de Organyà) o la Cordillera Ibérica (Cuenca de Cameros). Los datos de campo obtenidos en estas cuencas en combinación con la sísmica existente (muchas veces de insuficiente calidad para constreñir una buena interpretación) han permitido determinar su geometría. Sin embargo, la geometría de las fallas extensivas que las originaron se ha propuesto en general utilizando criterios geométricos a partir de la arquitectura de los materiales pre- y sincinemáticos sin tener en cuenta que la presencia de evaporitas desacopla la deformación entre basamento y cobertera (tectónica de piel gruesa vs. tectónica de piel fina).

La comparación de estas cuencas con los resultados del programa experimental pone de manifiesto que, dependiendo de la cuenca, su estructura es compatible con la inversión de fallas con diversas geometrías como las estudiadas en nuestros experimentos. Tal y como ocurre en los modelos, todas estas cuencas están rellenas de potentes sucesiones sin-extensivas que muestran diferentes geometrías sinclinales en función de la geometría de la falla maestra que las generó. Los modelos analógicos muestran una variación en la posición de los depocentros durante la extensión que puede ser aplicable a los ejemplos naturales para determinar con mayor exactitud la geometría de las fallas extensivas que los originaron.

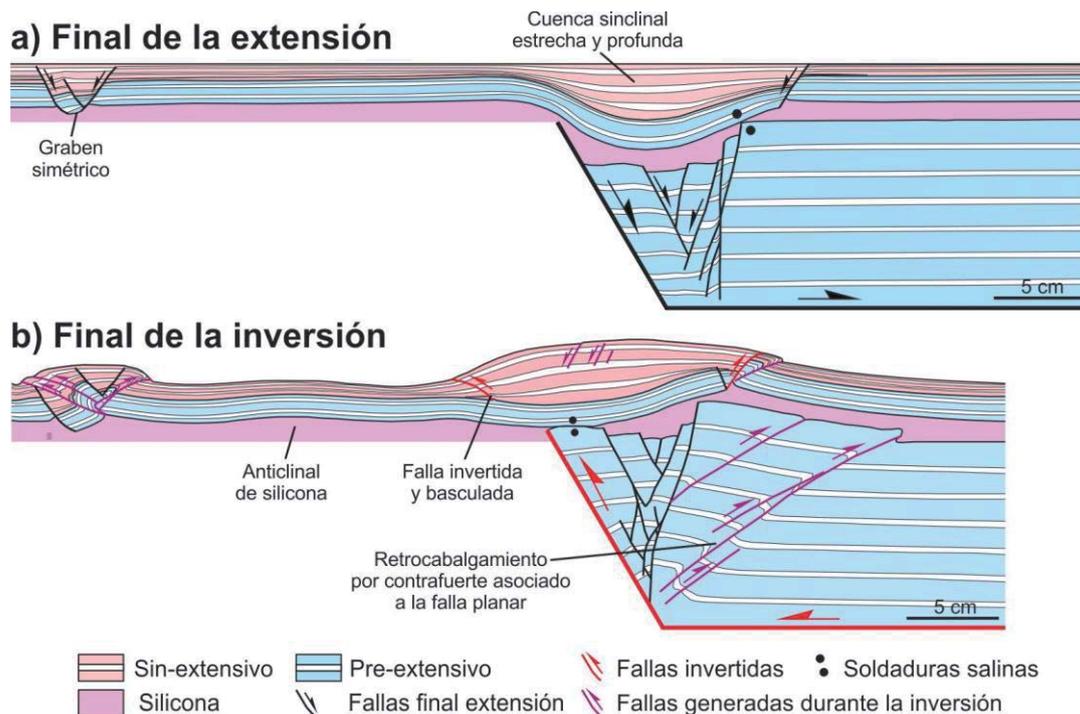


FIGURA 3. Secciones longitudinales del modelo con una falla planar buzando  $60^\circ$  y un nivel de sílica de 12 mm de grosor después de 3 cm de extensión (a) y después de 5 cm de inversión (b) (modificado de Ferrer et al., 2016).

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se inscribe en el proyecto SALTECRES (CGL2014-54118-C2-1-R) así como en el Grup de Recerca Consolidat de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (2014SGR467). Se agradece a SMT, Paradigm y Midland Valley por permitir el uso de su programario (*The Kingdom Suite*, *gOcad*<sup>®</sup> y *Move*<sup>®</sup> respectivamente). El laboratorio de modelización analógica de Geomodels ha sido construido gracias a una Infraestructura Científica (UNBA08-4E-006) co-financiada con Fondos Europeos para el Desarrollo Regional del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de la Nación y Statoil. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de E. Druguet y A. Crespo que han enriquecido el texto final.

## REFERENCIAS

- Bonini, M., Sani, F. y Antonielli, B. (2012): Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults: a review based on previous and new experimental models. *Tectonophysics*, 522-523, 55-88.
- Ferrer, O., Roca, E. y Vendeville, B.C. (2014): The role of salt layers in the hanging wall deformation of kinked-planar extensional faults: insights from 3D analogue models and comparison with the Parentis Basin. *Tectonophysics*, 636, 338-350.

- Ferrer, O., McClay, K. y Sellier N.C. (2016): Influence of fault geometries and mechanical anisotropies on the growth and inversion of hanging-wall synclinal basins: insights from sandbox models and natural examples. En: *The Geometry and Growth of Normal Faults* (C. Childs, R.E. Holdsworth, C.A.L. Jackson, T. Manzocchi, J.J. Walsh y G. Yielding eds.). Geological Society, London, Special Publications, 439, <http://doi.org/10.1144/SP439.8>
- Jackson, M.P.A. y Vendeville, B.C. (1994): Regional extension as a geological trigger for diapirism. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 57-73.
- McClay, K. (1989): Analogue models of inversion tectonics. En: *Inversion Tectonics* (M.A. Cooper y G.D. Williams eds.). Geological Society, London, Special Publications, 44, 41-59.
- McClay, K. (1995): The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue models studies. En: *Basin Inversion* (J.G. Buchanan y P.G. Buchanan, eds.). Geological Society, London, Special Publications, 88, 97-118.
- Soto, R., Casas-Sainz, A.M. y Del Rio, P. (2007): Geometry of half-grabens containing a mid-level viscous decollement. *Basin Research*, 19, 437-450.
- Withjack, M.O. y Callaway, S. (2000): Active normal faulting beneath a salt layer: an experimental study of deformation patterns in the cover sequence. *AAPG Bulletin*, 84, 627-651.