

Influencia de volcanes o altos submarinos en la deformación supra-sal en márgenes pasivos con tectónica gravitacional: Resultados experimentales y aplicación al Mediterráneo Occidental

Submarine volcanoes or seamounts influence on the supra-salt deformation of passive margins with gravitational tectonics: Experimental results and application to the Western Mediterranean

O. Ferrer¹, O. Gratacós¹, E. Roca¹ y J.A. Muñoz¹

¹ 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

Resumen: Este trabajo analiza el papel de los volcanes o altos submarinos en la deformación supra-sal de márgenes pasivos con tectónica gravitacional mediante modelos analógicos utilizando el Mediterráneo occidental (Cuenca Provençal) como análogo natural. Los experimentos han permitido caracterizar que factores intrínsecos a los volcanes (forma, altura y/o orientación respecto al margen) controlan el desarrollo de estructuras menores superpuestas a la arquitectura general del margen. También se ha caracterizado la deformación interna de la sal, destacando como la presencia del volcán modifica el flujo de la sal por el efecto de contrafuerte que ejerce contra la tectónica gravitacional. Destacar finalmente que si bien estos volcanes y sus estructuras asociadas han sido interpretados a partir de datos sísmicos 2D, los experimentos permiten su caracterización tridimensional y proponer una evolución cinemática para los mismos.

Palabras clave: Mediterráneo occidental, margen pasivo, tectónica salina, volcanes submarinos, modelización analógica.

Abstract: Using an experimental approach (analogue models) to reproduce some features of the Western Mediterranean (Provençal Basin), this research analyzes the role of former submarine volcanoes or seamounts in the overburden deformation during the gravitational failure of passive margins. The experiments have allowed characterize what factors related to the seamounts (orientation, shape and height) control the development of minor structures superimposed on the overall margin architecture. We also describe the internal deformation of salt highlighting how the seamounts modify the salt flow by buttressing. Finally note that while these seamounts have been interpreted from 2D seismic data, the experiments allow proposing their three-dimensional geometry and kinematic evolution.

Key words: Western Mediterranean, passive margin, salt tectonics, seamounts, analogue modeling.

INTRODUCCIÓN

El colapso gravitacional de márgenes pasivos con sal post-rift por deslizamiento (*gliding*) y/o por aplastamiento gravitacional (*spreading*) genera típicamente sistemas de tectónica de piel fina con una zonación estructural. Ésta se caracteriza por amplios cinturones dominados por procesos extensivos en la parte proximal del margen y por procesos compresivos en la parte distal (Fig. 1; Rowan et al., 2004). Entre ambos y dependiendo de la características del margen, puede desarrollarse un cinturón en el que predomina la traslación de la cobertera a favor del pendiente. Esta zonación puede verse interrumpida por la presencia de “obstáculos”

que dificultan el flujo de sal desde las áreas proximales hacia las distales. Estos “obstáculos” se relacionan con relieves previos a la deposición de la sal y pueden incluir desde fallas infra-sal a edificios volcánicos. Como resultado, se generan una serie de estructuras secundarias superpuestas a esta zonación estructural.

A partir de datos sísmicos 2D de la Cuenca Provençal (Mediterráneo Occidental), esta investigación analiza y muestra como estos relieves afectan a la tectónica gravitacional en márgenes pasivos. Utilizando esta cuenca como análogo natural se han realizado modelos analógicos que han permitido caracterizar la deformación interna de las

evaporitas en respuesta a estos edificios volcánicos y como su orientación, forma y altura constriñen el desarrollo de estructuras extensivas/contractivas así como el flujo de sal a través del margen. Los modelos también han permitido caracterizar tridimensionalmente estas estructuras mejorando la interpretación previa.

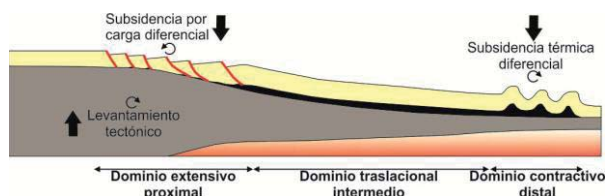


FIGURA 1. Esquema sinóptico de un margen pasivo con un despegue salino buzando hacia cuenca responsable del colapso gravitacional del margen. Se indican los parámetros que controlan el basculamiento hacia cuenca así como la típica zonación del margen pasivo con un dominio extensivo proximal, uno contractivo distal y uno traslacional intermedio (modificado de Rowan et al., 2004.)

TECTÓNICA GRAVITACIONAL EN LA CUENCA PROVENÇAL

La Cuenca Provençal (Mediterráneo occidental) incluye una potente secuencia salina formada por tres unidades evaporíticas (Unidades Inferior, Móvil y Superior de acuerdo a Lofi et al., 2011) depositadas en un ambiente de cuenca profunda durante el Messiniense (Mioceno Superior). La Unidad Inferior (UI) se caracteriza sísmicamente por un conjunto de reflectores continuos de elevada amplitud que onlapan a los materiales miocenos infra-yacentes (Fig. 2). La Unidad Móvil (UM) presenta facies sísmicas transparentes (Fig. 2) y está formada por halita. Finalmente, la Unidad Superior (US), que se caracteriza por reflectores paralelos, continuos y de elevada amplitud (Fig. 2), puede presentar importantes variaciones litológicas a lo largo de la cuenca incluyendo margas dolomíticas, margas y anhidrita (Lofi et al., 2011).

De estas unidades, la UM es el nivel que se deforma más fácilmente controlando fuertemente el estilo estructural así como la tectónica salina del margen. La base de esta unidad no muestra variaciones topográficas significativas y se caracteriza por una superficie que buza suavemente hacia cuenca. Esto favorece que actúe como despegue gravitacional facilitando el deslizamiento de los materiales de la cobertera margen abajo. Este proceso viene controlado por la combinación de deslizamiento y aplastamiento gravitacional (Dos Reis et al., 2008). Como resultado, el margen muestra un patrón estructural con extensión proximal (fallas lítricas enraizadas en la UM buzando hacia cuenca)

y acortamiento distal (acumulación de sal, pliegues de despegue o diapiros estrangulados) que acomoda la extensión proximal (Dos Reis et al., 2008) (Fig. 1). Ambos dominios están separados por un dominio traslacional intermedio (Dos Reis et al., 2008) en el que la cobertera es transportada pasivamente sobre el nivel de despegue sin que se produzcan deformaciones importantes en la misma. Esta arquitectura estructural ha sido descrita en otros márgenes pasivos con sal post-rift (ej. márgenes Sud-Atlánticos de Brasil y Angola) (Fort et al., 2004).

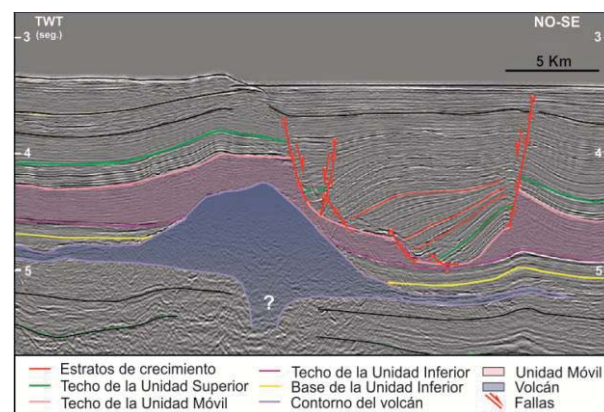


FIGURA 2. Interpretación de un perfil de dirección NO-SE de la Cuenca Provençal mostrando la interacción entre un volcán (polígono azul oscuro) y la tectónica gravitacional generada por la Unidad Móvil (polígono rosado).

Sin embargo, la secuencia de la Cuenca Provençal incluye diversos volcanes submarinos enraizados en la secuencia pre-sal, y localizados entre la parte baja del dominio extensional y el dominio plenamente traslacional. Estos relieves rompen el buzamiento regional hacia cuenca de la base de la UM dificultando el flujo de sal. Los volcanes, con una dirección NNE-SSO y previos a la deposición de la sal Mesiniense (Martí et al., 1992), actuaron como barreras pasivas durante el colapso gravitacional del margen, permitiendo la nucleación de una serie de estructuras secundarias. El perfil sísmico de la figura 2 muestra como el volcán actuó de contrafuerte dificultando la transmisión de la deformación extensiva de la parte proximal hacia la parte distal del margen. Como resultado se acumuló sal y se generaron estructuras contractivas en el flanco proximal (NO) del volcán (Fig. 2). Además parte de la extensión fue transmitida hacia la parte distal del margen favoreciendo el desarrollo de un sistema de fallas lítricas con su correspondiente rollover de bloque superior en el flanco distal (SE) del volcán (Fig. 2). Lamentablemente la poca cobertura de los datos sísmicos estudiados no permite caracterizar la geometría 3D de estas estructuras secundarias.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Utilizando el Mediterráneo Occidental como análogo natural se ha procedido a la realización de un programa experimental con modelos analógicos para determinar cuáles son los factores que controlan la formación, el estilo estructural y la cinemática de estas estructuras secundarias relacionadas con la presencia de volcanes submarinos. Para ello se han realizado seis modelos analógicos en los que se varían diferentes parámetros tales como la forma, la altura o la orientación de los volcanes respecto al buzamiento general del margen.

En los modelos presentados en este trabajo los volcanes se han construido con plastilina para permitir

el seccionado final de los mismos. El volcán se fija a la base del modelo permaneciendo inmóvil a lo largo del experimento. En el estadio inicial de los modelos se depositan 4 niveles de arena de 2.5 mm de grosor de varios colores para simular los materiales pre-evaporíticos y se construye una cuña proximal para simular la terminación de los niveles evaporíticos hacia la parte proximal del margen (Fig. 3a). Posteriormente se añaden los niveles de silicona equivalentes a la UI (polímero rosa) y a la UM (polímero transparente) con propiedades mecánicas diferentes tal y como ocurre con sus análogos reales. La US se modela con arena de sílice verde y blanca. Los modelos finalmente se cubrieron con una capa de arena azul pre-tectónica gravitacional.

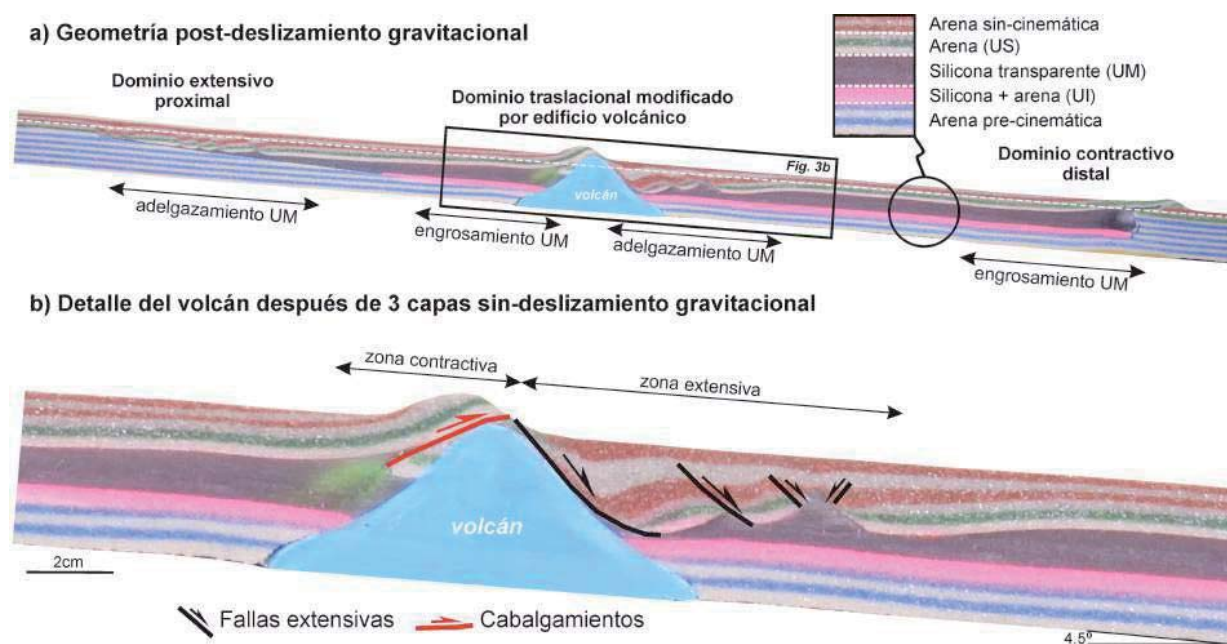


FIGURA 3. a) Sección longitudinal de un modelo mostrando la estructura general del margen con un dominio extensivo proximal con fallas lístricas y un dominio contractivo distal con el desarrollo de cabalgamientos. b) Detalle del dominio traslacional de la figura a) en donde se ilustra como el volcán controla la formación de estructuras secundarias extensivas y contractivas en cada uno de sus flancos.

Posteriormente, la mesa de modelación se bascula 4,5° para iniciar el flujo de silicona hacia la cuenca y por tanto, la estructuración del margen. Durante el colapso gravitacional se añaden diferentes niveles sin-cinemáticos de arena roja y blanca a intervalos constantes de dos horas, realizando también escáneres de la topografía del modelo. Al final, el modelo se cubre con una capa de arena post-cinemática para prevenir movimientos indeseados de la silicona y se preserva con agua para proceder a su corte en secciones longitudinales de 3 mm de grosor. Destacar que durante la realización del modelo se toman fotografías laterales y cenitales para registrar la evolución del mismo, así como fotografías de cada una de las secciones longitudinales del modelo final con cámaras digitales de alta resolución.

RESULTADOS

El análisis de los resultados experimentales pone de manifiesto que en el modelo de referencia (sin volcán) se generan los tres dominios estructurales típicos descritos en los análogos naturales (Rowan et al., 2004). En el dominio proximal extensivo se desarrollan una serie de fallas lístricas buzando hacia cuenca y despegadas en el nivel de silicona transparente (análogo a la Unidad Móvil Mediterránea) con *rollovers* asociados en su bloque superior y remanentes de silicona conocidos como *rollers* en el inferior (Fig. 3a). El acuñaamiento y terminación del nivel de silicona transparente hacia tierra coincide con la localización de la falla lístrica más proximal. La extensión producida en la parte proximal del margen se transmite margen abajo y es

absorbida por estructuras contractivas en la parte distal. Inicialmente se generan pliegues con una gran longitud de onda que posteriormente evolucionan a cabalgamientos (Fig. 3a). En los experimentos con más extensión proximal, se llega a desarrollar un sistema de cabalgamientos imbricados emplazados fuera de secuencia en el límite distal de la silicona.

Además de esta zonación estructural a lo largo del margen, en los modelos con volcanes también se desarrollan estructuras secundarias diferentes a ambos flancos de los volcanes considerados (Fig. 3b). Los modelos muestran que tanto la altura como la geometría de los volcanes son críticas en el desarrollo de las estructuras secundarias durante el colapso gravitacional del margen. Así, cuando el volcán no supera el grosor del polímero transparente se produce un pequeño anticlinal por hinchamiento de silicona sobre el volcán.

Localmente se pueden desarrollar paredes salinas pasivas en la charnela del *rollover* cuando la extensión es importante. Las propiedades mecánicas del polímero rosado (menos dúctil que el transparente) inhiben su condición de despegue, llegando a fluir únicamente durante las etapas finales de deformación posteriormente al agotamiento del polímero transparente y a la consiguiente formación de soldaduras primarias.

Los marcadores pasivos fabricados con polímeros de diferentes colores incluidos en el nivel transparente y que se sitúan alrededor del volcán, han permitido determinar cómo éste obstaculiza el flujo del polímero en la parte proximal del margen obligándolo a rodear el volcán durante el colapso gravitacional. En cambio, en el flanco distal se aprecia como el flujo es mucho mayor debajo del *rollover* que aparece en las áreas adyacentes más alejadas del volcán en las que no se genera cuenca.

DISCUSIONES/ CONCLUSIONES

La interpretación de los datos sísmicos de la Cuenca Provençal ha permitido caracterizar una zonación regional para el margen pasivo, controlada por la presencia de evaporitas post-rift relacionada con el colapso gravitacional del margen. Se ha interpretado la zonación típica de estos márgenes con tres dominios estructurales (extensivo, traslacional y contractivo). El dominio extensivo y el

traslacional pueden presentar estructuras secundarias debido a la presencia de edificios volcánicos previos al depósito de las evaporitas mesinienses. Éstos dificultan el deslizamiento gravitacional del margen sobre el despegue salino.

Los resultados experimentales han permitido caracterizar tridimensionalmente las estructuras que se generan en la cobertera sedimentaria en relación a la presencia de estos edificios volcánicos así como la cinemática del margen. Además de las estructuras contractivas y extensivas interpretadas en la sísmica, en los modelos analógicos también se han desarrollado diapiros en la charnela del *rollover* del flanco distal del volcán. Aunque no hayan sido cubiertos por la sísmica 2D, no se descarta su existencia en la zona de estudio, lo que otorga a los modelos analógicos un carácter predictivo muy importante y que completa la información existente.

REFERENCIAS

- Dos Reis, A.T., Gorini, C., Weibull, W., Perovano, R., Mepen, M. y Ferreira, E. (2008): Radial gravitational gliding indicated by sub-salt relief and salt-related structures: the example of the Gulf of Lions, Western Mediterranean. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26, 347-365.
- Fort, X., Brun, J-P. y Chauvel, F. (2004) : Salt tectonics on the Angolan margin, syn-sedimentary deformation processes. *AAPG Bulletin*, 88, 1523-1544.
- Lofi, J., Déverchère, J., Gaullier, V., Gillet, H., Gorini, C., Guennoc, P., Loncke, L., Maillard, A., Sage, F., y Thinon, I. (2009) : Atlas of the Messinian seismic markers in the Mediterranean and Black Seas. Geological French Society, World Geological Map Commission, *Mémoires de la Société Géologique de France*, 179, 72 p, 1CD.
- Martí, J., Mitjavila, J., Roca, E. & Aparicio, A. (1992): Cenozoic magmatism of the Valencia Trough (western Mediterranean): relationship between structural evolution and volcanism. *Tectonophysics*, 203, 145-165.
- Rowan, M.G, Peel, F.J. y Vendeville, B.C. (2004): Gravity-driven fold belts on passive margins. En: *Thrust tectonics and hydrocarbon systems* (K.R. McClay ed.). AAPG Memoir, 82, 157-182.