

Modelización análoga del desprendimiento de una raíz litosférica. ¿Puede un oroclinal producir el desprendimiento del manto litosférico?

Analogue modeling of detachment of a lithospheric root. Do oroclines trigger lithospheric detachment?

Daniel Pastor-Galán¹, Gabriel Gutiérrez-Alonso¹, Carlo Dietl² y Friedhelm Zanella³

¹ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias, 37008 Salamanca, España. dpastorgalan@usal.es,

² Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität, Campus Riedberg, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Germany.

³ Institut für Neuroradiologie, Goethe-Universität, Schleusenweg 2-16, Haus 95, 60528 Frankfurt am Main, Germany.

ABSTRACT

The behavior and evolution of mantle lithosphere during tectonic events is not yet fully understood. In addition, while some processes, such as continental collision or subduction are better known, other features like orocline formation or lithospheric mantle removal are poorly understood. We report a series of analogue modeling experiments that study the influence of gravity in a lithospheric root. The preliminary results obtained in the experiments suggest that a thick mantle lithospheric root detach in a mechanism combining delamination and dripping. The obtained results are useful to understand the late stage process that thicken the lithosphere as it is interpreted to have happened in the Ibero-Armorican Arc, Vrancea arc, Sierra Nevada or New Zealand.

Key-words: Analogue modeling, lithospheric-mantle detachment, oroclinal buckling.

RESUMEN

Aún no se comprende completamente el comportamiento y la evolución del manto litosférico durante los distintos procesos tectónicos. Mientras algunos procesos como la subducción son relativamente bien conocidos, otros aún están poco estudiados como el desprendimiento del manto litosférico ya sea por delaminación o por goteo. Hemos realizado una serie de experimentos de modelización análoga para comprobar la influencia de la gravedad sobre una gran raíz litosférica. Los resultados preliminares obtenidos en los experimentos indican que tal raíz se desprendería combinando los mecanismos de delaminación y goteo. Estos resultados ayudan a comprender las etapas finales de procesos que engrosan la litosfera como el plegamiento oroclinal o las colisiones intraplaca. Algunos ejemplos donde se ha interpretado un desprendimiento de una raíz litosférica son el Oroclinal Ibero-Armoricano, el Arco de Vrancea (Cárpatos) o Nueva Zelanda.

Palabras clave: Modelización análoga, desprendimiento del manto litosférico, plegamiento oroclinal.

Geogaceta, 52 (2012), 29-32.
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 6 de febrero de 2012

Fecha de revisión: 26 de abril de 2012

Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

Introducción

Durante los procesos relacionados con la tectónica de placas es necesario que parte de la litosfera se recicle en el manto sublitosférico para compensar el balance de masas global. La subducción es el más conocido de los procesos de reciclaje litosférico, sin embargo, existen otros como el desprendimiento del manto litosférico (Ducea, 2011), ya sea en un proceso conocido como delaminación (*delamination*) (Bird, 1979) u otro conocido como goteo (*dripping*) (Molnar *et al.*, 1998). Diversos autores proponen que durante la convergencia de placas (Houseman *et al.*, 1981), convergencia intraplaca (Pysklywec y Cruden, 2004) o plegamiento

oroclinal (Gutiérrez-Alonso *et al.*, 2011a) el acortamiento en el manto litosférico se acomoda formando raíces litosféricas ya sea por subducción y acuñamiento de una placa bajo otra en casos de colisión o por plegamiento litosférico en casos de acortamiento intraplaca y plegamiento oroclinal (Fernández-Lozano *et al.*, 2011, Pastor-Galán, 2012). Si la raíz litosférica formada adquiere suficiente volumen se hace gravitatoriamente inestable (Leech, 2001) y termina por hundirse en la astenosfera, desprendiéndose del resto de la litosfera (Schott y Schmeling, 1998).

La modelización análoga es un método sencillo y útil para estudiar procesos geológicos en 3D siempre que los modelos se es-

calen correctamente (Weijmars y Schmeling, 1986). Algunos autores han modelizado analógicamente procesos de desprendimiento del manto o subducción utilizando diferentes clases de siliconas como análogos de la litosfera y astenosfera (Pysklywec y Cruden, 2004; Luth *et al.*, 2010). En este artículo se utiliza el centrifugado de modelos de plastilina para estudiar el proceso de desprendimiento litosférico. Los resultados obtenidos se comparan con los modelos analógicos anteriormente citados y los modelos teóricos propuestos para la evolución litosférica de lugares como el arco de Vrancea en los Cárpatos (Fillerup *et al.*, 2010), bajo el orógeno Varisco en el Arco Ibero-Armoricano (Gutiérrez-Alonso *et al.*, 2004).

Escalado y descripción de los modelos.

Los 4 experimentos se realizaron en el laboratorio de deformación de la Universidad Goethe de Frankfurt am Main, Alemania. Las propiedades reológicas de las plastilinas usadas (Fig. 1) han sido estudiadas y resultan óptimas para modelizar astenosfera y litosfera a las temperaturas utilizadas los experimentos realizados (Tabla I, Zualuf y Zualuf, 2004; Pastor-Galán *et al.*, 2012). Todos los experimentos se precalentaron a diferentes temperaturas (50, 55 y 60°C) y se ejecutaron en una centrifugadora térmica bajo condiciones de 100G. La centrifugadora usada (Rotosilenta 630 RS) es capaz de mantener la temperatura hasta 60°C y de centrifugar por encima de 300G. A dichas temperatura, y respetando las leyes de escalado (Davy y Cobbold, 1991), los materiales usados equivaldrían a una litosfera fuerte y a una astenosfera superior común (ver Tabla I). Los experimentos se realizaron utilizando una geometría que siguiendo las mismas proporciones que las obtenidas en los modelos análogos de plegamiento oroclinal publicados por Pastor-Galán *et al.*, (en prensa) pero simplificados y escalados al tamaño de la caja-soporte de la centrifugadora (Fig. 1). Estos modelos iniciales se envolvían en un film de plástico con el objetivo de reducir lo máximo posible los efectos de borde y facilitar su extracción.

Los modelos resultantes de los experimentos fueron examinadas mediante tomografía computerizada en el instituto de neurociencias de la Universidad Goethe de Frankfurt (en una máquina Phillips CT brilliance 6 slice) La tomografía es un método de obtención de imágenes no destructivo que realiza una serie de imágenes seriadas 2D (Fig. 2A) con las que se puede hacer reconstrucciones 3D (Fig. 2B).

| | T (°C) | ρ (kg/m ³) | μ (Pa·s) | n | $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹) | $\sigma_1 - \sigma_3$ (Pa) |
|---------------|--------|-----------------------------|--------------|------|-------------------------------------|----------------------------|
| Beck's Orange | 50 | 1250 | 7330 | 3.93 | 0,01 | 0.733 |
| | 55 | | 1700 | 3.77 | 0,01 | 0.17 |
| | 60 | | 590 | 3.41 | 0,01 | 0.059 |
| Weible red | 50 | 1400 | 36500 | 3.81 | 0,01 | 3.65 |
| | 55 | | 21900 | 3.85 | 0,01 | 2.19 |
| | 60 | | 16600 | 4.61 | 0,01 | 1.66 |
| Litosfera | | 3360 | 5x1021 | | | |

Tabla I.- Propiedades de las plastilinas.

Table I.- Plasticines properties.

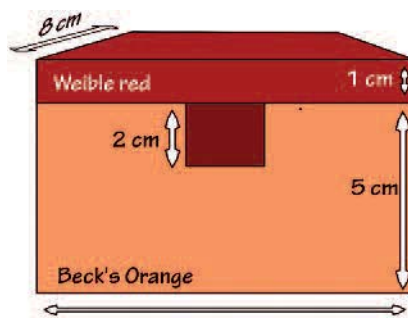


Fig. 1.- Disposición inicial de los modelos. La raíz consistió en un cubo de 2x2x2 situada en el centro de la capa que modela la litosfera.

Fig. 1.- Initial set-up of the experiments. A 2x2x2 cube in the middle of the model lithosphere layer represent the lithospheric root.

Resultados

Los principales resultados de los experimentos están expuestos en la Tabla II. Esta tabla revela que el hundimiento de la litosfera en la astenosfera bajo las condiciones análogas seleccionadas en la sólo es posible a partir de 60°C, independientemente del tiempo y el número de revoluciones a las que se sometiesen los experimentos. No obstante, en el experimento realizados a 55°C se observa flexión litosférica hacia la raíz (Fig. 2A). En el experimento realizado a 50°C no se observaron cambios.

A 60°C el proceso de desprendimiento del manto litosférico análogo ocurría con facilidad (Tabla II, Fig. 2A) y la litosfera se hundía completamente. Uno de los experimentos (Fig. 2A y 2B) se paró durante el proceso de hundimiento del manto litosférico para observar los mecanismos que actuaban durante el mismo.

Discusión y conclusiones

La modelización preliminar presentada en este artículo muestra que por encima de

| | D1 | D2 | D8 | D7 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| T (°C) | 50 | 55 | 60 | 60 |
| G | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Minutos | 20 | 10 | 1 | 3 |
| Un minuto son (millones de años) | 2,3 | 4,3 | 5,7 | 5,7 |

Tabla II.- Principales resultados.

Table II.- Main results.

60°C el desprendimiento de la litosfera es posible y ocurre con facilidad. Sin embargo, por debajo de 60°C este proceso no ha ocurrido. Interpretamos que a temperaturas menores de 60°C y bajo las condiciones aplicadas (100G) no se ha producido el hundimiento de la litosfera en la astenosfera es porque bajo dichas condiciones no se ha superado el límite elástico o de fluencia de la plastilina (Beck's Orange) que se ha utilizado para modelizar la astenosfera (Zualuf y Zulauf, 2004).

El modelo D3 (Fig. 2A) muestra cómo toda la litosfera que originalmente era más densa que la astenosfera se hunde adquiriendo una forma tabular condicionada por la parte inferior de la caja de centrifugado. El modelo D2 se puede observar que el desprendimiento de la litosfera comienza como una inestabilidad de Rayleigh-Taylor (Molnar *et al.*, 1998) pero en el que la litosfera no se comporta como un fluido puro, sino que la litosfera se fractura y la raíz litosférica comienza a desgajarse del resto de la litosfera a la vez que la astenosfera fluye hacia arriba aprovechando las fracturas desarrolladas (Fig. 2B). Este experimento muestra cómo los procesos de goteo y delaminación parecen actuar a la vez. Interpretamos que el desprendimiento de la litosfera como el observado en los Cárpatos bajo el arco de Vrancea (Fillerup *et al.*, 2010) puede ocurrir de una manera similar a la observada en estos experimentos. Además, siguiendo las normas de escalado para procesos litosféricos (Davy y Cobbold, 1991) este proceso duraría unos 8Ma. para estar en un estadio intermedio y unos 15Ma. para la completa sustitución de la raíz litosférica por la astenosfera, datos que están en concordancia con los resultados de Pysklywec y Cruden (2004), aunque en este último caso el desprendimiento litosférico ocurría sólo por goteo debido a las características de los materiales usados, siliconas con mucha menor viscosidad. Asimismo, estos resultados geométricos y temporales también están de acuerdo con los modelos teóricos propues-

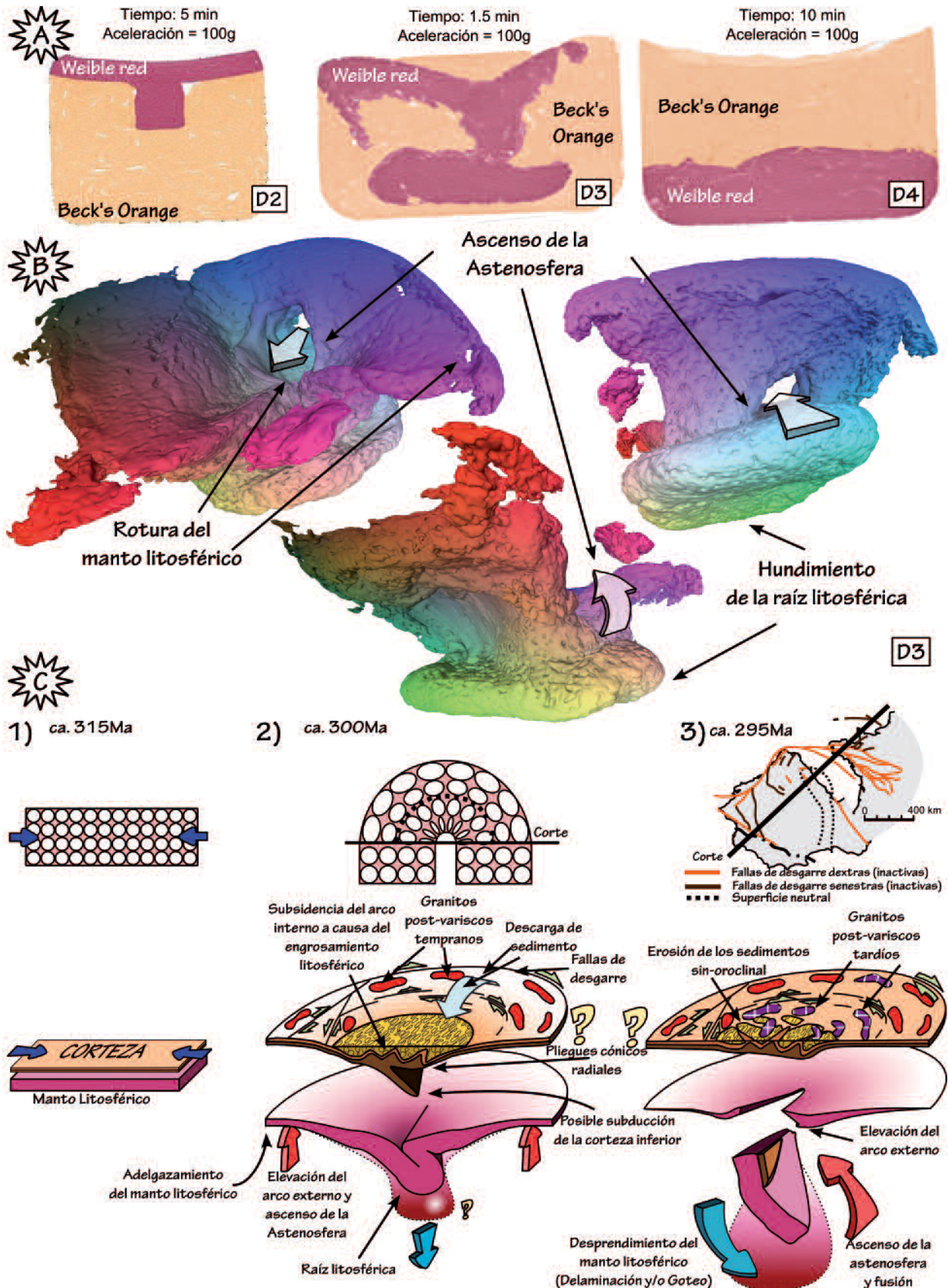


Fig. 2.- A) Secciones de Tomografía de 3 de los experimentos realizados con su respectiva organización inicial. B) Modelo 3D del experimento que fue parado durante el proceso de desprendimiento litosférico. Los colores son una interpolación por ordenador para representar mejor el relieve C) Bloques diagramas mostrando la evolución del Oroclinal Ibero Armoricano. Para más información mirar texto.

Fig. 2.- A) Computed Tomography sections of models three of the models showing the initial set up. B) 3D model of the experiment stopped during the mantle removal. Colours are a computer pattern to better illustrate the relief C) Diagram blocks showing the evolution of the Ibero-Armorican Orocline. For further information see text.

tos para el Oroclinal Ibero Armoricano (Gutiérrez-Alonso *et al.*, 2011b).

¿Puede un oroclinal producir el desprendimiento del manto litosférico?

Como se ha mencionado, los experimentos preliminares presentados en este artículo fueron diseñados en función de los resultados que Pastor-Galán *et al.* (en prensa) obtuvieron para la modelización de un oroclinal. Aquellos experimentos mostraban como durante un plegamiento oro-clinal a escala litosférica, se formaba una raíz con un grosor entre 2,5 y 3 veces más que la litosfera original debido al acortamiento mientras que el arco externo del oroclinal se extendería. Una raíz de ese tipo sería más densa que la astenosfera debido al metamorfismo que sufriría (Leech, 2001). Cuando la raíz dejase de ser estable desprendería, provocando el ascenso de la astenosfera como apoyan los modelos preliminares presentados en este artículo. La modelización análoga apoya así la hipótesis planteada por Gutiérrez-Alonso *et al.*, (2004, 2011a) para el Oroclinal Ibero Armoricano basada en deformación longitudinal-tangencial a escala litosférica. La figura 2C muestra la evolución de este oro-clinal teniendo en cuenta los resultados de la modelización análoga presentados en Pastor-Galán *et al.* (en prensa) y las presentadas en este artículo, durante el Carbonífero superior y el Pérmico inferior. Así, en la figura 2C-1 se muestra un orógeno originalmente lineal que es plegado hace entre 310 y 300 Ma (Fig. 2C-2) (Pastor-Galán *et al.*, 2011). Este plegamiento produciría una gran raíz litosférica bajo el núcleo del oro-

clinal que a su vez provocaría subsidencia en el núcleo del oroclinal y extensión de la litosfera en el arco externo, produciendo el ascenso de la astenosfera y consecuentemente la fusión y ascenso de rocas ígneas (Gutiérrez-Alonso *et al.*, 2011a). Además en la corteza la deformación se acomodaría en el arco externo con grandes cizallas como las observadas en el Oroclinal Ibero-Armoricano (Gutiérrez-Alonso, 2004) mientras que en el la corteza superior del arco interno el acortamiento se acomodaría mediante pliegues cónicos y el rejuego de cabalgamientos y estructuras anteriores (Fig. 2C-2). Después, la raíz litosférica producida se haría inestable y finalmente se desprendería, provocando el ascenso de la litosfera y la fusión y ascenso de rocas ígneas (Fig. 2C-3). Este proceso se interpreta que es responsable de las características observables en el Oroclinal Ibero Armoricano y que tuvo lugar en el Pérmico inferior hace entre 300 y 285 Ma. (Gutiérrez-Alonso *et al.*, 2011b).

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto IGCP 574 y ha sido financiado con el proyecto ODRE II (Oroclinales, Delaminación, Relaciones y Efectos) N° CGL2009-1367 del Ministerio de Ciencia e Innovación. Daniel Pastor-Galán fue financiado con una beca predoctoral de la Junta de Castilla y León y con una estancia de investigación financiada por el Ministerio de Educación. Nos gustaría agradecer a Mark Peinl por su ayuda con el *software* 3D. Francisco Pereira y un revisor anónimo ayudaron a mejorar sustancialmente este manuscrito.

Referencias

Bird, P. (1979). *Journal of Geophysical Research*, 84, B13, 7561-7571.

- Davy, P. and Cobbold, P. (1991). *Tectonophysics*, 188, 1-25.
- Ducea, M.N. (2011). *Geology*, 39, 191 -192.
- Fernández-Lozano, J., Sokoutis, D., Willingshofer, E., Cloetingh, S. y Vicente, G.D. (2011). *Tectonics*, 30, TC1001.
- Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Suárez, J. y Weil, A. B. (2004). *Geological Society of America Special Paper*, 383, 121-131.
- Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Suárez, J., Jeffries, T.E., Johnston, S.T., Pastor-Galán, D., Murphy, J.B., González, M.P.F. y Gonzalo, J.C. (2011a). *Tectonics*, 30, tc5008.
- Gutiérrez-Alonso, G., Murphy, J. B., Fernández-Suárez, J., Weil, A. B., Franco, M.P. y Gonzalo, J.C. (2011b). *Geology*, 39, 155-158.
- Fillerup, M.A., Knapp, J.H., Knapp, C.C. y Raileanu, V. (2010). *Lithosphere*, 2, 333-340.
- Houseman, G.A., McKenzie, D.P. y Molnar, P. (1981). *Journal of Geophysical Research*, 86, 6115-6132.
- Leech, M.L. (2001). *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 149-159.
- Molnar, P., Houseman, G.A. y Conrad, C.P. (1998). *Geophysical Journal International*, 133, 568-584.
- Pastor-Galán, D., Gutiérrez-Alonso, G. y Weil, A. (2011). *Tectonophysics*, 507, 31-46.
- Pastor-Galán, D., Gutiérrez-Alonso, G., Zulauf, G. y Zanella, F. (en prensa). *Geological Society of America Bulletin*.
- Pysklywec, R.N. y Cruden, A.R. (2004). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, 22 p.
- Schott, B. y Schmeling, H. (1998). *Tectonophysics*, 296, 225-247.
- Weijermars, R. y Schmeling, H. (1986). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 43, 316-330.
- Zulauf, J. y Zulauf, G. (2004). *Journal of Structural Geology*, 26, 725-737.