



¿Qué sabemos y qué desconocemos sobre el motor de las placas litosféricas?

AA.VV.*

PALABRAS CLAVE

- CONVECCIÓN
- FLUJO TÉRMICO
- GEOTERMA
- TECTÓNICA DE PLACAS

Uno de los mayores retos de la comunidad científica de ciencias de la Tierra es mejorar el conocimiento relativo a la dinámica en el interior del planeta y, en particular, sobre el motor de las grandes placas litosféricas. La gravedad y la convección en el manto juegan un papel esencial. Enormes columnas de material fluyen por el interior del manto gracias a las particulares características reológicas, composicionales y térmicas de la litosfera, la astenosfera, la mesosfera y la capa D". Las dos capas de mayor gradiente geotérmico, la litosfera y la capa D", disparan el flujo convectivo. Las placas litosféricas impulsan su propio movimiento y protagonizan, en lugar de sufrir, la convección en el manto (modelo «Top-Down»).

La teoría de la tectónica de placas, desde su desarrollo hace casi cincuenta años, ha conseguido explicar razonablemente bien la dinámica y cinemática de la parte más superficial del planeta: la litosfera. Esta teoría

ofrece una visión sistémica de nuestro planeta y permite comprender, entre otros aspectos, la actividad volcánica y sísmica, el relieve terrestre, el magmatismo y el metamorfismo, la distribución de rocas y estructuras geológicas y algunas varia-

La tectónica de placas aún no ha conseguido dar respuesta a todas las preguntas



ciones significativas del nivel del mar o del clima (Alfaro y otros, 2013).

Sin embargo, la tectónica de placas aún no ha conseguido dar respuesta a todas las preguntas. **Una de las mayores incertidumbres está relacionada con el motor capaz de suministrar la energía para mover estas grandes placas litosféricas.** Antes de que se formulase esta teoría, cuando se buscaban explicaciones a las ideas precursoras de la deriva continental, uno de los interrogantes que los científicos se plantearon fue ¿por qué se mueven? Encontrar una solución adecuada está resultando una tarea compleja. En este artículo se hace una puesta al día de la idea que tiene a este respecto la mayoría de la comunidad científica. El cuadro 1 recoge las preguntas y respuestas que constituyen la estructura de este trabajo.

¿QUÉ MUEVE LAS PLACAS LITOSFÉRICAS?

La gravedad y la convección en el manto terrestre son aspectos clave para explicar cómo y por qué se mueven las placas, pero como apuntan Fernández Alonso-Chaves y Anguita (2013), las placas son parte integral (activa, no pasiva) de la convección.

En el aula se transmite la idea de que el motor de las placas es el efecto de «arrastre» de las corrientes de convección del manto sublitosférico (imagen 1, arriba). Existen varias pruebas que rechazan esta vieja hipótesis de las celdas de convección que mueven las placas litosféricas (ver detalles en Alfaro y otros, 2013). En realidad, la litosfera es parte integral, la zona más superficial de estas grandes estructuras de convección. **Las placas no son arrastradas por ninguna célula infrayacente sino que se mueven a merced de la gravedad, y su movimiento es causa de, al menos, parte del flujo convectivo del manto** (imagen 1, abajo).

¿Qué mueve las placas litosféricas?	La gravedad y/o la convección. La litosfera es parte «activa» y no pasiva del flujo convectivo.
¿Cómo funciona la convección en el manto?	Existen dos modelos: - Un patrón convectivo en todo el manto. - Patrones individualizados manto superior y manto inferior.
¿Qué origina la convección en el manto terrestre?	Inducida por el hundimiento de las placas en el manto o por el enfriamiento del planeta.
¿Cuáles son los requisitos para que exista la convección terrestre?	El planeta está estratificado reológica, composicional y térmicamente (litosfera, astenosfera, mesosfera, capa D'').
¿Qué fuerzas actúan en las placas?	Fuerzas gravitacionales (fuerza de tirón de la placa, de empuje de la dorsal...).

Cuadro 1. Principales incertidumbres sobre la causa del movimiento de las placas litosféricas

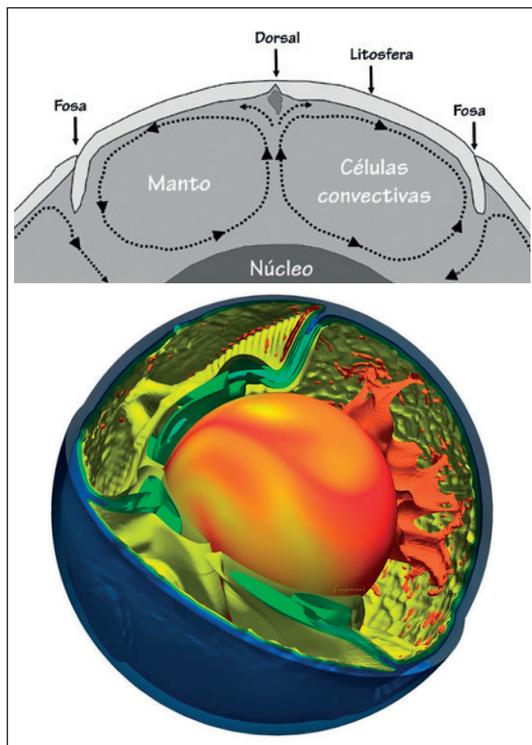


Imagen 1. Dos modelos de convección en el manto: a) patrón clásico de células convectivas y b) imagen moderna de la convección mantélica

¿CÓMO FUNCIONA LA CONVECCIÓN EN EL MANTO?

Para comprender cómo funciona la convección en el manto terrestre es necesario conocer la geoterma, o variación de la temperatura con la profundidad. Cuando se considera la temperatura media a ciertas profundidades, el gradiente de esta geoterma tiene una pendiente aproximadamente uniforme desde los algo más de 6.500°C del centro del planeta, hasta las temperaturas de la superficie terrestre. En la imagen 2 se observa la geoterma entre la superficie y la capa D^{''}. La clave de que exista convección es la existencia de dos zonas con fuertes variaciones en el gradiente geotérmico

La clave de que exista convección es la existencia de dos zonas con fuertes variaciones en el gradiente geotérmico



(*thermal boundary layers*), en las que la variación de la temperatura con la profundidad es mucho más elevada: la litosfera, situada en el tramo más superficial de la parte sólida de la Tierra, que es conocida como *cold thermal boundary layer*, y la capa D^{''}, todavía mal conocida, que se sitúa en la base del manto, en transición al núcleo externo líquido, que tiene un espesor muy irregular y corresponde a la *hot thermal boundary layer*.

Estas capas de fuerte gradiente térmico, la litosfera y la capa D^{''}, de pequeño espesor si las comparamos con el sistema completo (imágenes 1, 2 y 3), disparan el flujo convectivo. Pero éste no es celular ni consta de corrientes en el sentido mostrado en la imagen 1a, idea desfasada entre la comunidad científica. Las pruebas geológicas, geofísicas y experimentales disponibles indican que el patrón convectivo es mucho más complejo, compuesto (en su escala mayor) por grandes columnas ascendentes, de diferentes tamaños y geometrías, compensadas por el descenso (laminar a través del manto superior, más columnar en el manto inferior) de la litosfera subducente (imagen 1, abajo).

El flujo principal está originado, por tanto, por la combinación de láminas litosféricas que subducen y columnas ascendentes desde sectores concretos de la capa D^{''}. En estos sectores, llamados LLVSP (*large low shearwave provinces*), la capa

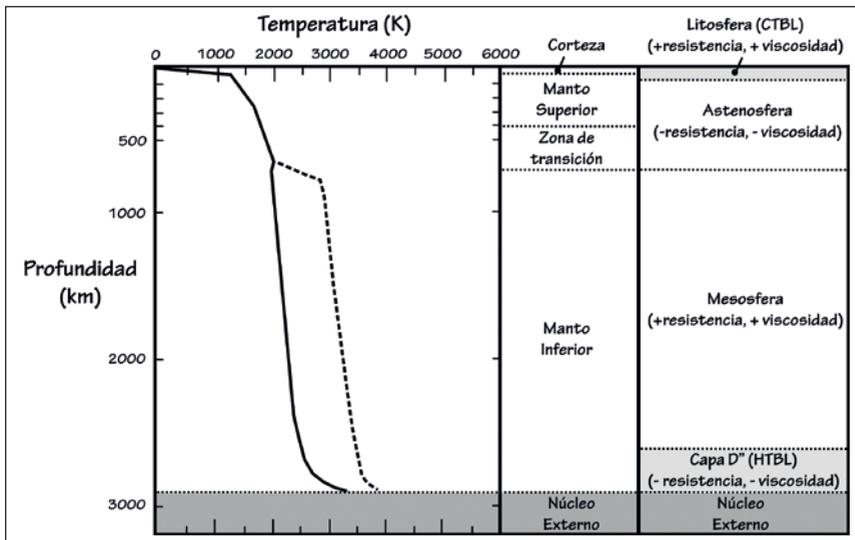


Imagen 2. Geotermas típicas del manto

D'' tiene una mayor potencia; en la actualidad existen dos, uno debajo del Pacífico y otro debajo de África (imagen 3), que son responsables de la geometría actual del geode.

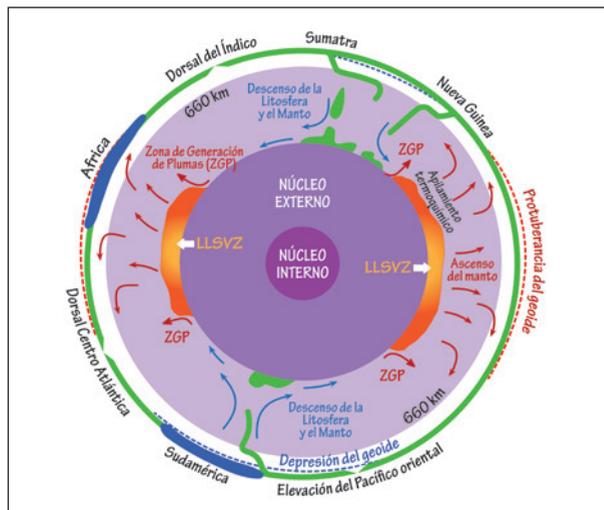


Imagen 3. Sección aproximadamente ecuatorial de la Tierra indicando el flujo principal en el manto (modificada de Trønnes, 2010)

Hay que resaltar que el flujo de material en el manto terrestre se produce en estado sólido. Pero gracias a su ductilidad, el interior del planeta es capaz de comportarse como un fluido a escalas de tiempo geológicas.

Fernández y otros, (2013) ofrecen una explicación detallada de este mecanismo de flujo en estado sólido.

¿QUÉ ORIGINA LA CONVECCIÓN EN EL MANTO TERRESTRE?

El motor de la convección es la acción conjunta del flujo térmico y la gravedad. La Tierra está considerada como una máquina térmica que libera calor interno originado a partir de dos fuentes principales: el enfriamiento secular de la Tierra y la transferencia de calor desde el núcleo, y el calentamiento debido a la desintegración radiactiva de los isótopos inestables de elementos como U, Th y K. Nuestro planeta desprende este calor interno mediante conducción, radiación, convección y advección, siendo la convección el mecanismo más eficaz.

Teniendo en cuenta que el flujo térmico ha disminuido progresivamente desde el origen de nuestro planeta, también han debido producirse cambios importantes en el patrón convectivo del manto, al menos en sus primeras etapas. Algunas estimaciones interpretan que al comienzo, hace 4.600 millones de años, el flujo térmico fue del orden



de 4,5 veces superior al actual, y que al inicio del Arcaico todavía era 2,5 veces mayor que ahora. Kearey (2007) plantea el inicio de una «proto» tectónica de placas hace unos 3.000 millones de años, durante el Arcaico, que evolucionó progresivamente hasta llegar a lo que conocemos como tectónica de placas, en sentido estricto. Durante esta larga etapa evolutiva de más de 2.000 millones de años, el progresivo enfriamiento del planeta fue transformando su funcionamiento. Algunos elementos clave que cambiaron desde el Arcaico hasta la actualidad son: el incremento del espesor y rigidez de las placas litosféricas, la disminución del número de placas, el aumento del tamaño de los cratones, y la disminución del área y número de orógenos, que cada vez son más estrechos y elevados.

Interpretar qué había antes del inicio de esta «proto» tectónica de placas, durante el resto del Arcaico y el Hádico, y estimar cómo evolucionará la dinámica de nuestro planeta es una ardua tarea para los científicos.

¿CUÁLES SON LOS REQUISITOS PARA QUE EXISTA LA CONVECCIÓN TERRESTRE?

Deben darse unas circunstancias particulares para que en la Tierra se desarrolle el modelo de tectónica de placas. De hecho, nuestro planeta es el único en el que se ha documentado este funcionamiento, al menos a lo largo de un período considerable de su historia. Hay un debate abierto sobre si Marte, en sus primeras etapas, pudo tener un funcionamiento similar. No obstante, el resto de planetas terrestres, como Venus, Marte y Mercurio, aparentemente poseen una sola placa litosférica inmóvil que cubre todo el cuerpo planetario (modelo *Stagnant Lid*).

¿Cuáles son esas circunstancias tan especiales que permiten que las placas litosféricas se muevan varios centímetros al año? La respuesta tiene que ver con la reología de los materiales sólidos que forman nuestro planeta. **El interior terrestre está estratificado desde un punto de vista mecánico en capas con distinta resistencia al flujo o viscosidad: litosfera, astenosfera, mesosfera y capa D”.**

Esta diferencia mecánica —expresada como la facilidad de fluir durante largos períodos de tiempo, superiores a 104 años según Ranalli (1995)— entre la litosfera, la astenosfera, el manto inferior o mesosfera y la capa D”, es la que permite el desarrollo de flujo de materiales en el interior de la Tierra y, por tanto, la tectónica de placas. La litosfera resistente se sitúa sobre la astenosfera, que se puede considerar un nivel dúctil de baja resistencia que se mantiene así hasta los 660 kilómetros de profundidad. En ese límite comienza la mesosfera, en donde el manto está compuesto por un mineral denominado perovskita que hace que las características reológicas del mismo sean distintas, con una mayor viscosidad y resistencia. Por debajo de la mesosfera, en contacto con el núcleo externo, se sitúa una capa de potencia irregular y fuerte gradiente térmico, la capa D” o LLSVP. Reológicamente, se trata de una zona compleja de baja viscosidad debida al fuerte aumento de la temperatura, y probablemente de gran heterogeneidad composicional.

¿QUÉ FUERZAS ACTÚAN EN LAS PLACAS?

Tal y como se ha comentado anteriormente, la litosfera es la parte más superficial de grandes patrones convectivos. **Las dos fuerzas principales causadas por la litosfera que contribuyen a la convección mantélica se derivan de la gravedad y de la densidad de la litosfera** (fundamentalmente oceánica). Podemos verlas en la imagen 4 (p. 48):

1. La fuerza debida al empuje hacia abajo de la parte subducente de las placas de litosfera oceánica; es un ejemplo de fuerza debida a la flotabilidad negativa de la litosfera fría (*slab pull*).
2. El empuje lateral que se produce desde el extenso cinturón de dorsales oceánicas, debido tanto al deslizamiento gravitacional como al gradiente de presión asociado con al engrosamiento de la litosfera oceánica a medida que se separa de las zonas de dorsal (*ridge push*).

También existen fuerzas menores y otras que dificultan la convección (ver detalles en Alfaro y otros, (2013) y Fernández, Alonso-Chaves y Anguita (2013)).

CONSIDERACIONES FINALES

Aunque la tectónica de placas se desarrolla profusamente en los libros de texto, la explicación del por qué se mueven las placas suele quedar relegada a un segundo término, entre otros motivos por las numerosas incógnitas que planteaba a la comunidad científica. En la actualidad, la respuesta está en la convección terrestre, pero sin asimilarla con una cazuela en la que hierve agua, sino considerando la nueva imagen de las placas como elemento activo que impulsa su propio movimiento y protagoniza, en lugar de sufrir,

la convección en el manto. Esta idea es conocida como el modelo Top-Down y supone un gran avance para entender el funcionamiento dinámico de nuestro planeta. Aun así, continúa el debate sobre la profundidad a la que las placas tienen una influencia definida sobre la dinámica del manto (ver www.mantleplumes.org).

Los nuevos datos indican la existencia de un límite claro en el manto en torno a los 660 kilómetros de profundidad en el que el olivino, componente principal del manto superior, debido a la presión, se convierte en perovskita. Por otro lado, los cambios mineralógicos que ocurren en la placa que subduce, también debido al aumento de presión, incrementan su densidad, convirtiéndose en eclogita, lo cual facilita su hundimiento. Existe cierta controversia acerca de si la litosfera que subduce es capaz de atravesar esta barrera reológica de los 660 kilómetros, pero las evidencias tomográficas parecen indicar que sí puede hacerlo, continuando su viaje en profundidad hasta llegar al límite con el núcleo, la capa D”, formando lo que se conoce como el «cementerio de placas» («plate graveyard»). Con el tiempo, este «cementerio» constituirá las nuevas zonas engrosadas de la capa D”, que evolucionarán hasta convertirse en fuente de material más caliente que, a su vez, producirá cambios en el geode y en la dinámica de las placas litosféricas.

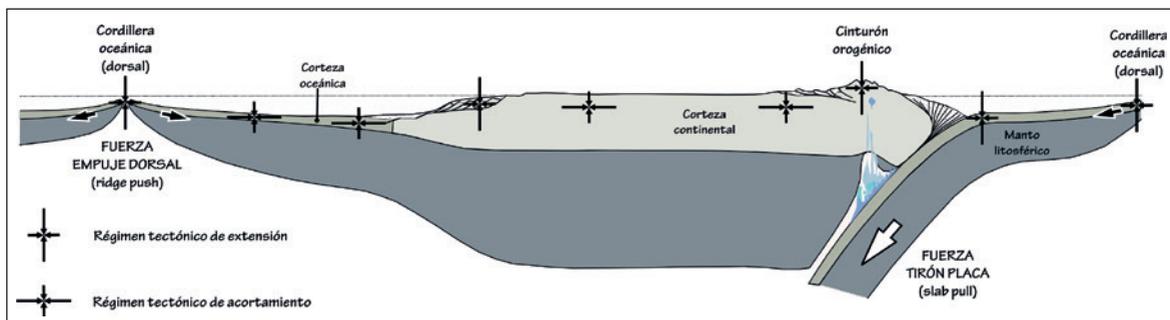


Imagen 4. Las fuerzas de empuje de la dorsal y de tirón de la placa (modificada de Fossen, 2010)



Una teoría geoplanetaria universal, aplicable incluso a los exoplanetas, exige ensanchar las fronteras del conocimiento



El conocimiento de la dinámica en el manto aún es incompleto y cabe preguntarse qué fue antes: el huevo o la gallina. ¿La convección condiciona el movimiento de las placas litosféricas, o es el movimiento de dichas placas quien condiciona la convección? Las ideas más recientes parecen converger en que, en la Tierra, ambos procesos son en realidad el mismo, siendo imposible que se produzca el uno sin el otro. La exploración del sistema solar y la del pasado más remoto de nuestro planeta sugieren, sin embargo, que es posible un modelo convectivo distinto, compatible con la evolución tectónica de una litosfera compuesta por una sola placa, o por muchas placas más débiles y con patrones subductivos distintos de los dominantes en la Tierra. La tectónica de placas no es, por tanto, sino uno de los posibles comportamientos de las geosferas planetarias. Para llegar a obtener la teoría global que los abarque a todos, es decir, para conseguir una teoría geoplanetaria universal aplicable incluso a los exoplanetas, deberemos ensanchar las fronteras del conocimiento en tres sentidos. Dos de ellos deben dirigirse hacia el pasado y hacia el interior de la Tierra, respectivamente. El tercero, urgente e ineludible, debe encaminar nuestros pasos hacia el conocimiento de los restantes cuerpos planetarios del sistema solar, en donde casi todo está por hacer. ◀

Nota

* Son autores de este artículo: Carlos Fernández (Universidad de Huelva), Gabriel Gutiérrez-Alonso (Universidad de Salamanca y Universidad Estatal de

Tomsk (Rusia)), Pedro Alfaro García (Universidad de Alicante) y Francisco Manuel Alonso Chaves (Universidad de Huelva).

Referencias bibliográficas

- ALFARO, P. (2011): «Un modelo para el funcionamiento del interior terrestre y su interacción con la superficie». *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, núm. 67, pp. 20-27.
- ALFARO, P. y otros. (2013): «La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta». *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, núm. 21(2), pp. 168-180.
- FERNÁNDEZ, C.; ALONSO-CHAVES, F.M.; ANGUITA, F. (2013): «Astenosfera: ser o no ser». *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, núm. 21(1), pp. 2-15.
- FOSSEN, H. (2010): *Structural Geology*. Cambridge. Cambridge University Press.
- GUTIÉRREZ-ALONSO, G.; BRENDAN MURPHY, J.; FERNÁNDEZ-SUÁREZ, J. (2008): «El año del planeta Tierra: lo que conocemos y lo que desconocemos de nuestro planeta». *Pliegos de Yuste*, núm. 7-8, pp. 111-122.
- KEAREY, J.F. (2007): «The secular evolution of plate tectonics and the continental crust: An outline», en Hatcher, R.D. y otros. (eds.): *4-D Framework of Continental Crust*. Geological Society of America Memoir, núm. 200, pp. 1-7.
- RANALLI, G. (1995): *Rheology of the Earth*. 2.ª ed. Londres. Chapman & Hall, p. 413.
- TRØNNES, R.G. (2010): «Structure, mineralogy and dynamics of the lowermost mantle». *Geochem*, núm. 99, pp. 243-261.

Dirección de contacto

Carlos Fernández
Universidad de Huelva
fcarlos@dgeo.uhu.es

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en julio de 2015 y aceptado en noviembre de 2015 para su publicación.