



Evaluación del impacto de la interacción de mareas en la evolución térmica del manto terrestre

S.H. Luna¹, M.G. Spagnuolo¹ & H.D. Navone^{2,3}

¹ Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber”, UBA-CONICET, Argentina

² Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, Argentina

³ Instituto de Física de Rosario, CONICET-UNR, Argentina

Contacto / santiagohluna@gmail.com

Resumen / Existen diversas evidencias geológicas, como las ritmitas o las conchillas de bivalvos, que dan cuenta de la evolución temporal tanto de la velocidad de rotación de la Tierra como del semieje mayor de la órbita lunar. Sin embargo los datos son escasos y aún se discute la evolución orbital de la Luna. El objetivo de este trabajo es evaluar cuál habría sido el impacto de las mareas sólidas en la evolución térmica del manto terrestre. Para tal fin, desarrollamos diferentes modelos de evolución térmica del interior terrestre, considerando los regímenes de tectónica de placas y de *stagnant lid*. Estos modelos tienen en cuenta las fuentes de calor radiogénico y por interacción de mareas. Hallamos que el impacto de esta última en la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna habría sido especialmente considerable en los primeros cientos de millones de años de la Tierra, considerando que el manto se encontraba a mayor temperatura.

Abstract / Several geological evidences, such as tidal rhythmites and bivalve shells, allow to track back the evolution paths of both the major semiaxis of the Moon's orbit and the Earth's spin rate. However, the data is scarce and the orbital evolution of the Moon is still controversial. The aim of this work is to evaluate how significative could have been the effect of bodily tides on the Earth's mantle thermal evolution. To this end, we developed different thermal models of the Earth's interior, considering both the plate tectonics and *stagnant lid* regimes. These models take into account both radiogenic and tidal interaction heat sources. We find that the impact of the latter would have been particularly considerable during the first hundreds million of years of the Earth's history, provided that the mantle was at a higher temperature.

Keywords / planets and satellites: dynamical evolution and stability — planets and satellites: physical evolution — planets and satellites: tectonics — planets and satellites: individual (Earth, Moon)

1. Introducción

Actualmente se cuenta con evidencias geológicas que ofrecen pistas acerca de la evolución temporal tanto de la órbita lunar como de la velocidad de rotación de la Tierra. Estas consisten en rocas estratificadas llamadas ritmitas, comúnmente halladas en estuarios, cuyos estratos registran la frecuencia y amplitud de los cambios de niveles de mares y océanos a lo largo de la historia terrestre. Existen también evidencias paleontológicas, a partir del estudio de corales y bivalvos, que dan cuenta de la evolución de la rotación terrestre (Williams, 2000; López de Azarevich & Azarevich, 2017). Sin embargo estas evidencias no van más allá de los 2500 Ma. La posición de la Luna desde su formación hasta los 2500 Ma surge a partir de modelos orbitales (Spalding & Fischer, 2019).

Tal como puede apreciarse en la Fig. 1, se observa que a lo largo de toda su historia, el semieje mayor (a) de la órbita de la Luna, con respecto a la Tierra, se ha ido incrementando. Simultáneamente, fue disminuyendo la velocidad de rotación de la Tierra, esto es, se incrementó paulatinamente la duración del día (LOD). En dicha figura, a_0 y LOD_0 corresponden a los valores actuales ($t = 0$ corresponde al presente).

Las características de la evolución dinámica del sis-

tema Tierra-Luna antes mencionadas, se explican adecuadamente con la teoría de mareas (Murray & Dermott, 1999). Como la Tierra y la Luna no son cuerpos perfectamente rígidos, las fuerzas de atracción gravitatoria que se ejercen mutuamente tienden a deformarlos. Se sabe además que los materiales que componen los planetas y satélites rocosos no son perfectamente elásticos sino que poseen también comportamiento anelástico. La fricción interna que da origen a dicha anelasticidad, se convierte en una fuente de calor que puede resultar apreciable en determinadas condiciones (Efroimsky & Makarov, 2014).

En virtud de lo indicado anteriormente, el objetivo de este trabajo es entonces evaluar cuál habría sido el impacto de la producción de calor por interacción de mareas en la evolución térmica del manto terrestre. Para tal fin, se han desarrollado distintos modelos de evolución térmica del interior terrestre. Estos se describen en la próxima sección. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos y, por último, se ofrecen algunas conclusiones y perspectivas de trabajo futuro.

2. Metodología

Para poder evaluar el impacto de la interacción de mareas en la evolución térmica de la Tierra, se desarrolla-

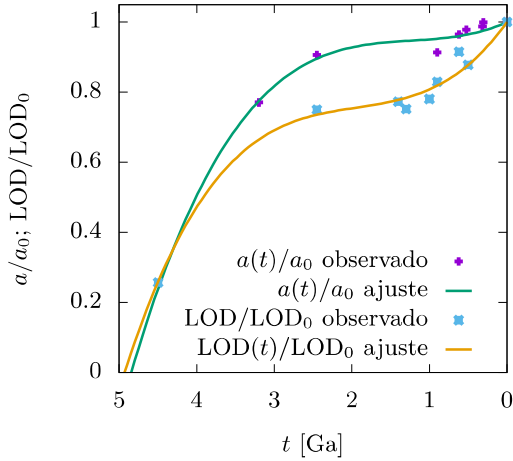


Figura 1: Valores normalizados del semieje mayor (a) de la órbita lunar y de la duración del día (LOD) estimados a partir del estudio de las ritmitas mareales y evidencias paleontológicas (puntos) a lo largo de la historia de la Tierra. Las curvas de trazo continuo muestran los correspondientes ajustes polinomiales.

ron distintas estrategias analíticas y numéricas basadas en modelos basadas en modelos paramétricos unidimensionales (Schubert et al., 2001), en los que se tiene en cuenta el transporte de calor por convección en el interior terrestre. En estos modelos, la Tierra se asume formada por el núcleo, el manto y, eventualmente, un capa externa llamada litósfera. Los mismos dan expresiones analíticas de las derivadas temporales de las temperaturas medias del núcleo (T_n) y del manto (T_m) terrestres, las cuales se integran numéricamente para cada modelo considerado.

En todos los modelos se consideraron las fuentes de calor radiogénico, esto es, por decaimiento de isótopos radiactivos (Turcotte & Schubert, 2014). Se asumió que dichas fuentes se distribuyen de forma homogénea en el manto. Asimismo, estos tienen en cuenta la fuerte dependencia de la viscosidad media del manto con la temperatura (Stamenković et al., 2012). En algunos de ellos se incluye la producción de calor originada por la interacción de mareas antes mencionada.

La tasa de producción de calor por interacción de mareas se calcula siguiendo el trabajo de Efroimsky & Makarov (2014). Se asumió que las mareas corporales se deben a la deformación de la Tierra debida a las fuerzas de atracción gravitatoria ejercidas por la Luna.

La expresión de la cantidad de calor producida por unidad de tiempo debido a la interacción de mareas incluye las funciones de calidad mareales como factores (Makarov, 2012). Estas funciones determinan la amplitud del potencial de mareas en función de la amplitud y frecuencia del potencial que tiende a deformar la Tierra (Efroimsky, 2015). Se decidió utilizar la reología de Maxwell-Andrade para describir la respuesta de aquél ante las fuerzas que lo deforman (Efroimsky, 2012).

A los efectos de poder evaluar la tasa de producción de calor por interacción de mareas, se propuso un modelo de ajuste polinomial a partir de los datos obser-

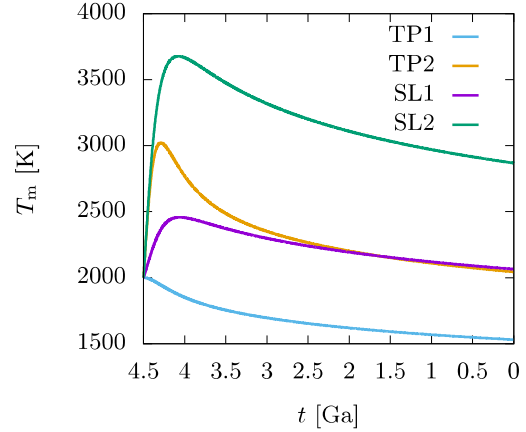


Figura 2: Evolución temporal de la temperatura del manto terrestre a lo largo de 4.5 Ga comparando el aporte de calor por interacción de mareas en el régimen de tectónica de placas (TP) y en el de *stagnant lid* (SL).

vacionales (del semieje mayor de la Luna y de la velocidad de rotación de la Tierra) recabados de las evidencias geológicas antes presentadas. Estas se recopilaron de los trabajos de Williams (2000), López de Azarevich & Azarevich (2017), Hinnov (2018) y Spalding & Fischer (2019) y se muestran en la Fig. 1.

En los modelos de evolución térmica se consideraron dos regímenes: el de tectónica de placas y el de *stagnant lid*, esto es una litósfera (capa externa) elástica y estática (sin movimiento lateral), pero cuyo espesor puede variar en el tiempo (Stamenković et al., 2012). En ambos regímenes las temperaturas iniciales del núcleo y del manto son $T_n(0) = 5000$ K y $T_m(0) = 3000$ K, respectivamente. Para los modelos correspondientes al régimen de *stagnant lid* en particular, el valor inicial del espesor de la litósfera se fijó en $\ell(0) = 50$ km.

3. Resultados

Vale la pena destacar que si bien se integraron las ecuaciones que dan cuenta de la evolución temporal de las temperaturas del manto (T_m) y del núcleo (T_n), el impacto de la interacción de mareas resultó ser mucho más significativo en la evolución térmica del manto que en la del núcleo. Por este motivo, sólo se presentan los resultados obtenidos para el manto.

3.1. Régimen de tectónica de placas

Teniendo en cuenta lo expresado en párrafos anteriores, en la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos de la evolución térmica del manto, distinguiendo el caso en que no se incluye la interacción de mareas (TP1) y en el que sí se considera (TP2).

La curva correspondiente al caso TP1 describe un descenso uniforme de la temperatura del manto. Por el contrario, en el caso TP2 se observa la influencia del calor generado por la interacción de mareas, dado que la temperatura asciende rápidamente en los primeros 400

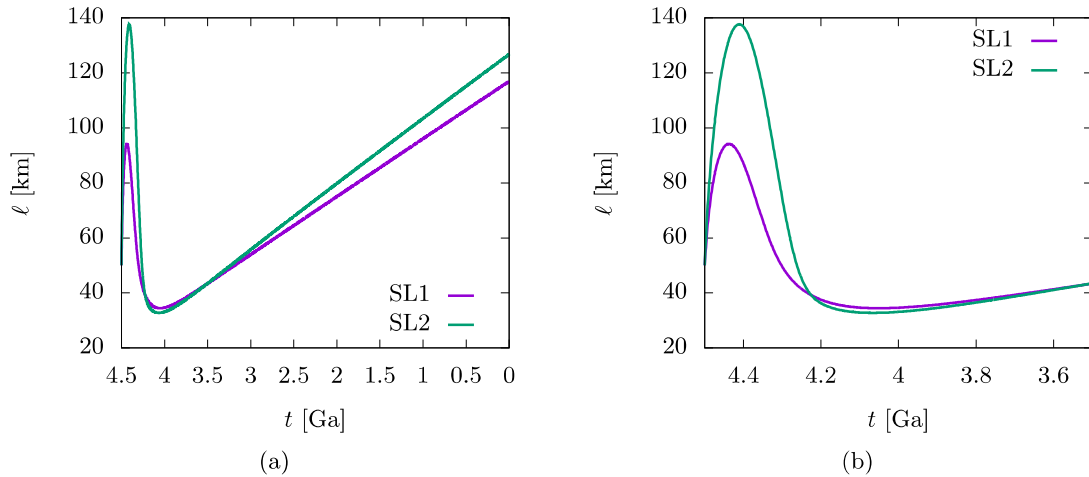


Figura 3: Evolución temporal del espesor de la litósfera para los dos modelos correspondientes al régimen de *stagnant lid* (SL1 y SL2, ver texto). *Panel (a)*: evolución a lo largo de 4.5 Ga. *Panel (b)*: detalle de los primeros 1000 Ma.

Ma, aproximadamente, y luego comienza a descender.

3.2. Régimen de *stagnant lid*

El comportamiento de T_m en el caso en que no se tiene en cuenta la interacción de mareas (SL1) y en el que sí se considera (SL2) es similar al caso TP2 antes descrito. Esto se debe a la presencia de la litósfera.

Tanto en el caso SL1 como en el SL2, la temperatura aumenta rápidamente durante los primeros 400 Ma y posteriormente comienza a disminuir. Como puede verse también en la Fig. 2, resulta notorio el efecto del calentamiento del manto producto de la interacción de mareas.

En la Fig. 3(a) se muestra la evolución temporal del espesor de la litósfera, ℓ , a lo largo de todo el intervalo de integración (4.5 Ga), en donde puede observarse diferencias entre los casos SL1 y SL2. En la Fig. 3(b) se observa que el espesor de la litósfera alcanza valores ligeramente menores entre los primeros 400 y 800 Ma de evolución, aproximadamente, cuando se considera la interacción de mareas (SL2). Una litósfera más delgada puede facilitar la subducción y, consecuentemente, la tectónica de placas.

4. Conclusiones y perspectivas

En el presente trabajo, se desarrollaron modelos para describir la evolución térmica del interior terrestre a fin de evaluar el impacto del calor producido por la interacción de mareas en la evolución temporal de la temperatura del manto terrestre, a lo largo de la historia dinámica del sistema Tierra-Luna. Dichos modelos se diferencian entre sí por la ausencia o por la presencia de la litósfera. El primer caso corresponde al régimen de tectónica de placas, mientras que el segundo corresponde al de *stagnant lid*.

A partir de los resultados obtenidos, puede concluirse que la interacción de mareas pudo haber tenido un

papel relevante o, al menos, no despreciable en los primeros cientos de millones de años de evolución del sistema Tierra-Luna. Más aún si se considera la presencia de la litósfera, tal como se aprecia en las Figs. 2 y 3.

En virtud de que existe una interesante interrelación entre la evolución térmica y dinámica del sistema Tierra-Luna, el siguiente paso en esta línea de trabajo será plantear un modelo dinámico adecuado para describir dicha interrelación en términos cuantitativos evaluando diferentes evoluciones orbitales probables.

El parámetro que conecta la evolución dinámica y la térmica es la viscosidad del manto, dado que la misma está presente tanto en el modelo térmico como en las funciones que describen la reología de la Tierra (Efroimsky, 2015). En este sentido, será necesario implementar una exploración más amplia de los valores de los parámetros que intervienen en los modelos.

Referencias

- Efroimsky M., 2012, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 112, 283
- Efroimsky M., 2015, *ApJ*, 150, 98
- Efroimsky M., Makarov V.V., 2014, *ApJ*, 795, 6
- Hinnov L.A., 2018, M. Montenari (Ed.), *Cyclostratigraphy and Astrochronology, Stratigraphy and Timescales*, vol. 3, 1–80, Academic Press
- López de Azarevich V.L., Azarevich M.B., 2017, *Geo-Marine Letters*, 37, 333
- Makarov V.V., 2012, *ApJ*, 752, 73
- Murray C.D., Dermott S.F., 1999, *Solar system dynamics*, Cambridge University Press
- Schubert G., Turcotte D.L., Olson P., 2001, *Mantle Convection in the Earth and Planets*, Cambridge University Press
- Spalding C., Fischer W.W., 2019, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 514, 28
- Stamenković V., et al., 2012, *ApJ*, 748, 41
- Turcotte D., Schubert G., 2014, *Geodynamics*, 3 ed., Cambridge University Press
- Williams G.E., 2000, *Rev. Geophys.*, 38, 37