

Club de revistas

Reseña sobre el artículo

Quiroga, D. E., Currie, C. A.,
Pearse, J. (2024). Lithosphere
Removal in the Sierra Nevada de
Santa Marta, Colombia. *Journal
of Geophysical Research: Solid
Earth*, 129(1), e2023JB027646.

La Sierra Nevada de Santa Marta, una topografía dinámica The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo rocoso aislado de la cordillera de los Andes. Su topografía comienza en la costa del mar Caribe hasta alcanzar una altura de más de 5.500 m s.n.m., cubriendo casi todos los pisos térmicos. ¿Qué procesos geológicos permitieron que la SNSM tenga estas características? ¿Qué hace que este macizo mantenga su altura tan cerca a la costa?

La parte más superficial del planeta Tierra está conformada por dos capas. La capa más externa, la litósfera, es una capa elástica, fría, sobre la cual estamos parados. Debajo de la litósfera está una capa más densa, la astenósfera, que se comporta de forma dúctil por el aumento de la temperatura y presión, por lo cual las rocas pueden fluir. En la práctica, la litósfera (10-100 km de espesor) se comporta como un material elástico. Cuando se le aplica un esfuerzo se deforma, pero vuelve a su forma original, como la tabla de una mesa o una regla. Si el esfuerzo supera cierto límite, se rompe de forma frágil y genera terremotos. La astenósfera (50-200 km de espesor), en cambio, responde fluyendo lentamente al sentir un esfuerzo y su resistencia a la deformación es mucho menor que la de la litósfera.

Debido a su peso, la litósfera ejerce una fuerza gravitacional sobre la astenósfera y dada su menor densidad, tiene flotabilidad. Puesto que puede fluir, la astenósfera siempre está buscando el equilibrio entre peso y flotabilidad, lo que se conoce como equilibrio isostático. Si la litósfera se hace más gruesa, o más densa, o se acumula una gran cantidad de sedimentos en una cuenca, la astenósfera responderá permitiendo un reajuste para que el equilibrio se mantenga.

Aunque la analogía no debe ser tomada literalmente, puede emplearse el ejemplo de un bloque de madera que flota en un vaso de agua (**Figura 1**). El peso del bloque ejerce un esfuerzo sobre el agua, pero su menor densidad hace que flote. El equilibrio se da cuando el 25 % del bloque está por debajo del nivel del agua y el 75 % por encima. Si ponemos un peso adicional al bloque de madera, por ejemplo una montaña de plastilina, el 60 % del bloque queda por debajo del agua. Ese exceso de madera en el agua (35 % adicional) es lo que llamamos la raíz de la montaña; dicha raíz soporta el peso adicional de la montaña, lo que se manifiesta en una anomalía gravimétrica negativa de Bouguer.

Al sentir ese esfuerzo adicional, el agua que está debajo del bloque fluye permitiendo que el bloque se “hunda” un poco (**Figura 1C**). La diferencia con la astenósfera es que su viscosidad es 23 órdenes de magnitud mayor que la del agua. Es decir que la búsqueda del equilibrio puede tardar miles o millones de años en la Tierra en vez de los pocos segundos que se toma en el vaso de agua.

Volviendo a la SNSM, ¿cuál es el problema científico? La SNSM tiene una altura máxima de más de 5.500 m s.n.m., pero los datos geofísicos, con una anomalía positiva de Bouguer de >100 mGal, muestran que la montaña no tiene la raíz que esperaríamos. En otras palabras, no está en equilibrio isostático. Entonces, ¿cómo podemos explicar su altura?

Una posibilidad es que la densidad de la columna de rocas de la SNSM sea menor que la típica corteza continental (**Montes et al., 2005; Villagomez et al., 2011**). Otra posibilidad es que la SNSM sí haya tenido una raíz, pero que esta fuera removida desde la base de la litósfera (**Decelles et al., 2015**). Cualquiera que sea el mecanismo que resuelva la pregunta científica, debe poder explicar lo que actualmente observamos (altura y anomalía de Bouguer) y debe ajustarse a los procesos dinámicos de la astenósfera en su intento por mantener el equilibrio.

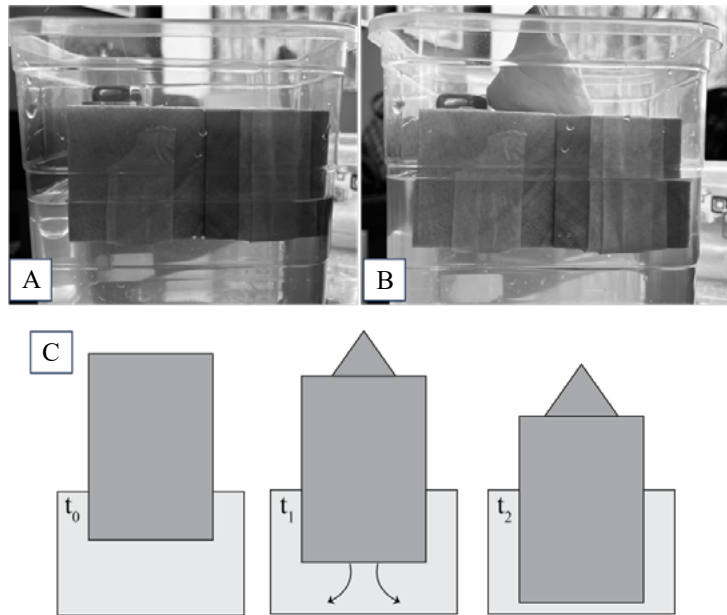


Figura 1. Experimento análogo del proceso isostático de la litósfera (madera) y la astenósfera (agua). **A)** Bloque de madera en equilibrio sobre el agua. **B)** Bloque de madera con una montaña de plastilina en equilibrio sobre el agua. **C)** La respuesta de la astenósfera a un exceso de peso (montaña de plastilina) en un tiempo t_1 , es fluir permitiendo que la litósfera (madera) se hunda hasta llegar a un equilibrio en tiempo t_2 . El tiempo entre t_1 y t_2 depende de la viscosidad de la astenósfera (agua).

El trabajo de **Quiroga et al.** (2024) busca explicar a partir de modelos numéricos cómo pudo haber evolucionado el comportamiento de la litósfera y la astenósfera para así tener, al mismo tiempo, la altura de la SNSM y la anomalía positiva de Bouguer. En el primer experimento numérico se propone una SNSM soportada por una raíz en el manto (similar a la **Figura 1B**), lo cual generaría una anomalía de Bouguer negativa. Con el paso del tiempo, la raíz empieza a erosionarse sin efecto apreciable en la topografía, pero, insuficiente para que la anomalía de Bouguer se vuelva positiva.

Este primer resultado sugiere que la erosión de la raíz debe ser más profunda, es decir, que incluya el manto litosférico y parte de la corteza inferior. El problema es que una vez una cadena montañosa pierde su raíz, la topografía debe empezar a hundirse como respuesta al equilibrio isostático, algo que debe ocurrir en cuestión de unos pocos millones de años. Por lo tanto, este proceso de erosión de la raíz debió ocurrir recientemente, o la SNSM debe estar soportada por una litósfera fuerte o un flujo dinámico del manto. Los autores hicieron múltiples variaciones de los modelos para estudiar la influencia de la composición de la corteza y la litósfera, los efectos de la temperatura y la fusión de las rocas, incluso la influencia de fallas regionales alrededor de la SNSM, y replicar así, en lo posible, la configuración actual.

Aunque los diferentes modelos estudiados por Quiroga y sus colegas no son concluyentes en torno a si hubo una erosión de la raíz, y cuándo tuvo lugar, sí muestran que la erosión de la raíz es necesaria para explicar las observaciones. Los modelos evaluados tienen limitaciones. Tal vez la mayor dificultad es que no tienen en cuenta los posibles efectos de la subducción de la placa del Caribe por debajo del norte de Suramérica, un proceso sobre el que cada día hay más evidencia (**Vargas et al.**, 2020; **Corntwhite et al.**, 2021).

Es importante resaltar que todos los modelos estudiados permiten hacer una predicción de observaciones geofísicas (gravimetría, sismología, flujo de calor, etc.) que se esperarían si en el futuro se llevan a cabo campañas de geofísica de campo que puedan descartar

algunos de los modelos propuestos. Es decir, este tipo de modelos pueden contrastarse con nuevos datos en el futuro, de manera que no se tendría únicamente una hipótesis de la evolución de la SNSM sino también una idea de la dinámica de la litósfera y la astenósfera, lo que implica una comprensión más completa de la geología de nuestro país que combine la información geológica, la geofísica y los modelos.

Germán A. Prieto

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Referencias

- Cornthwaite, J., Bezada, M. J., Miao, W., Schmitz, M., Prieto, G. A., Dionicio, V., Niu, F., Levander, A.** (2021). Caribbean slab segmentation beneath northwest South America revealed by 3-D finite frequency teleseismic P-wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(4), e2020GC009431. <https://doi.org/10.1029/2020gc009431>
- DeCelles, P. G., Carrapa, B., Horton, B., McNabb, J., Gehrels, G. E., Boyd, J.** (2015). The Miocene Arizaro basin, central Andean hinterland: Response to partial lithosphere removal? *Geological Society of America Memoir*, 212, 359-386. [https://doi.org/10.1130/2015.1212\(18\)](https://doi.org/10.1130/2015.1212(18))
- Montes, C., Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, C., Molina, M., Herrera, F.** (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley: Rigid-beam pivot model. Sixth International Symposium of Andean Geodynamics (January) (pp.520-523).
- Quiroga, D. E., Currie, C. A., Pearse, J.** (2024). Lithosphere Removal in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(1), e2023JB027646.
- Vargas, C. A.** (2020). Subduction geometries in Northwestern South America. In J. T. Gómez & A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The geology of Colombia*, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., Lelij, R. V. D.** (2011). Vertical tectonics at a continental crust - Oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, 30(4), TC4004. <https://doi.org/10.1029/2010TC002835>