

TEMBLOR BOLIVIANO DA UN RARO REFLEJO DEL INTERIOR DE LA TIERRA

Ray Ladbury

Physics Today, American Institute of Physics

Muchas preguntas interesantes pueden derivarse del estudio del temblor de magnitud 8.2 que ocurrió en el Altiplano Boliviano en junio de 1994. La mas interesante no consiste en explicar el mínimo de daños causados siendo que el evento fue lo bastante fuerte como para sentirse a travez de la mayor parte del hemisferio oeste, sino el hecho de que la liberación de energía pudo exitar modos normales de la vibración de la Tierra nunca antes vistos y con ello proporcionar datos potenciales para que los geofísicos puedan mejorar el mapa del interior terrestre con resolución de 50 km. Esto suele esperarse al ocurrir un terremoto de gran magnitud, pero la profundidad que tuvo el terremoto boliviano (640 km) lo pone en una rara clase de terremotos llamada "eventos de foco profundo" cuyo hipocentro cae entre 75 km y 670 km bajo la superficie de la Tierra.

La pregunta esencial es? Como pueden ocurrir estos eventos de foco profundo en el manto?, donde las altas presiones y temperaturas causan que las rocas bajo esfuerzo puedan fluir como liquidos muy viscosos en lugar de fracturarse. Esta ha sido una pregunta de gran interés y controversia desde que la existencia de este tipo de terremotos fue establecida a finales de los años 20.

La importancia del temblor Boliviano se ha incrementado porque es el primer evento realmente grande y muy profundo que ocurre desde el desarrollo y operación de las grandes redes de sismógrafos digitales. Tres redes de sismógrafos portátiles de banda ancha, recientemente colocados, en Sud-América prometen proveer un mirada sin precedente de este tipo de temblores. Los investigadores esperan que los datos del terremoto nos den mayor información respecto al interior de la Tierra así como también, que nos permita mejorar nuestro entendimiento respecto a como ocurren los "eventos de foco profundo".

UN MECANISMO ALTERNO

La dificultad para entender los terremotos de foco profundo estriba en el hecho de que ellos ocurren a presiones y temperaturas a las cuales el mecanismo convencional no puede operar. El mecanismo de fallamiento elástico, que usamos para explicar los terremotos mas superficiales, nos permite visualizar la

ruptura de las rocas a lo largo de fallas estructurales y el movimiento a lo largo del plano de la falla. Un aspecto desconcertante estriba en que el patrón de energía sísmica que radia un evento de foco profundo parece muy similar al de los eventos superficiales.

La mayoría de temblores de foco profundo ocurren en áreas donde la Litósfera está en subducción. Por ello los geofísicos cuentan con un mecanismo plausible para estos temblores, el cual explica el patrón de radiación sísmica observado; el mecanismo está desarrollado en términos del comportamiento de los minerales comunes de la Litósfera terrestre cuando se someten a altas presiones y temperaturas al descender hacia el manto terrestre.

Experimentos llevados a cabo por Ch. Meade del Instituto Carnegie en Washington y R. Jeanloz de la Universidad de California en Berkeley han mostrado que muy posiblemente, los terremotos entre 75 y 300 km bajo la superficie terrestre ocurren cuando minerales tales como la serpentina - $(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - libera moléculas de agua líquida. El agua expande los poros en la roca y permite movimientos a lo largo de fallas pre-existentes. Sin embargo, este mecanismo no ha sido observado a presiones correspondientes con profundidades superiores a los 300 km. Es necesario establecer otro mecanismo para explicar los terremotos a mayor profundidad. Una posibilidad es una repetición del ciclo de hidratación-dehidratación a presiones mas altas; minerales hidratados pueden formarse en el manto a altas presiones y al deshidratarse permitir la lubricación de movimientos a lo largo de fallamientos pre-existentes.

Sin embargo, la posible existencia de procesos de este tipo han sido establecidos solo muy recientemente y se ha hecho muy poco trabajo experimental, hasta ahora, como para demostrar la aplicabilidad de tal modelo para terremotos abajo de los 300 km. Mientras tanto algunos investigadores han estado buscando explicaciones alternativas.

Debido a que la olivina - $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ -, un constituyente mayor de la litósfera, se vuelve inestable y presenta una transición de fase cambiando a una mineral mas denso (espinela), a una profundidad de 300 - 400 km, S. Kirby del Servicio Geológico de los E.U.A.,

entre otros, ha propuesto dicha transición como un posible mecanismo para estos terremotos de foco mas profundo que los 300 km. Basado en resultados de investigaciones de laboratorio respecto a tal mecanismo, H. Green de la Universidad de California en Riverside y P. Burnley de la Universidad de Colorado propusieron que a lo largo de la placa fria que desciende dentro de el manto mas caliente, pueden existir grandes "cuñas" de pocas decenas de kilometros de espesor, o zonas compuestas principalmente de olivina metastable, las cuales pueden persistir dentro de la placa a profundidades superiores a los 400 km. El colapso catastrófico de una de estas zonas metaestables, debido al cambio de fase, podría producir un sismo con la consecuente liberación de energía sísmica, pero con una distribución bastante diferente de lo que se observa.

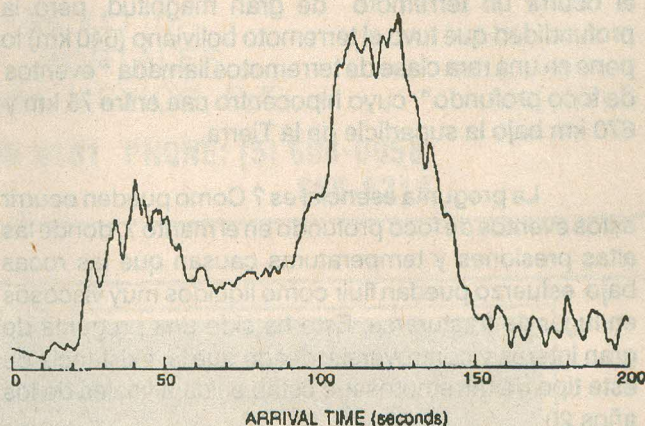
Green y Burnley afirman que la zona metaestable cede provocado por un mecanismo llamado fallamiento "anticrack" (anticrack faulting), en el cual la olivina metaestable se transforma en espinela microcristalina a lo largo de regiones de fracturas, las cuales se propagan en dirección perpendicular al de máximo esfuerzo. Cuando este "anticrack" ocupa una porción bastante grande de la placa en subducción, los microcristales se tornan superplásticos y son capaces de moverse rapidamente. Este mecanismo lubrica el movimiento de una región de la cuña de olivina relativa a otro, generando el terremoto. Este fallamiento a lo largo de zonas de fracturamiento o "anticrack" ha sido observada en experimentos de laboratorio a alta presión relacionados con el mineral germanato $(Mg,Fe)_2GeO_4$, el cual se transforma a mucha mas baja presión que la olivina, y el fallamiento anticrack ha sido también observado en la olivina natural a presiones muy altas. Sin embargo, esto aun permanece sin poder mostrar si este mecanismo puede ser la causa de los terremotos bajo los 300 km de profundidad.

MODELOS DE PRUEBA

Distinguir entre modelos de terremotos de foco profundos es difícil, porque la zona de falla no es observable y porque la señal sísmica de terremotos profundos proveen pocas pistas para descifrar su mecanismo. La gran magnitud del temblor Boliviano y la presencia de una red de sismómetros de lo mas avanzado justo sobre su foco representa la mejor oportunidad para aprender mas acerca del mecanismo de tales terremotos. Una esperanza para probar que el mecanismo de fallamiento anticrack puede ser válido, consiste en detectar la presencia de la cuña de olivina metaestable dentro de una placa de subducción. Debido a que la olivina es menos densa que la espinela, a temperatura similar, la velocidad de las ondas debe ser diferente en ambos medios. Takashi Lidaka y Daisuke Suetsugu de la Universidad de Tokyo aseguran haber

encontrado evidencias de la caída de velocidad de las ondas sísmicas, analizando las ondas sísmicas de los temblores cercanos a Japón. Sin embargo para emitir sus conclusiones, Lidaka y Suetsugu tuvieron que asumir modelos específicos para la tierra abajo de las estaciones sísmicas; lo cual hace que sus resultados sean poco convincentes.

Un trabajo reciente hecho por Charles Meade, Paul Silver y David James de la Institución Carnegie, en conjunto con Susan Beck, Terry Wallace y Stephen Myers de la Universidad de Arizona puede significar un reto serio para la teoría del anticrack. Sus hallazgos provocan duda sobre si la postulada cuña de olivina pudiera ser lo bastante larga para contener el plano de la falla del temblor Boliviano. Este trabajo, empleando datos de las tres redes de estaciones sísmológicas sudamericanas (BANJO, SEDA y BLSP92) parece determinar que el plano de la falla fue esencialmente horizontal con dimensiones aproximadas de 35 km x 50 km.



Analisis independientes de Thorne Lay de la Universidad de California en Santa Cruz y de Masyuki Kikuchi de la Universidad de Yokahoma y Hiroo Kanamori de Caltech, encontraron que un plano de falla horizontal del orden de 40 km x 40 km era la mejor solución a los datos recabados con la red de sismómetros IRIS de banda ancha. Pero la placa de Nazca, en la zona donde ocurrió el terremoto Boliviano, se cree que desciende hacia el manto con un ángulo de 45 grados y la mayoría de los modelos tienen el espesor de la cuña de olivina aproximándose a cero conforme alcanza la discontinuidad sísmica de los 670 km, bajo la cual ya no hay terremotos. De esta forma, es difícil visualizar como la placa puede contener el plano de la falla del terremoto a menos que la placa haga una doblamiento para volverse horizontal cerca de la profundidad de la discontinuidad. Silver asegura que, las propiedades de la ruptura de este terremoto provee una prueba particularmente rigurosa para las teorías del fallamiento transformacional. Esto requiere que este modelo sea modificado o se abandone y, si esto ocurre, entonces muestra que hemos verdaderamente aprendido de estos

terremotos. Otros investigadores encuentran que la dirección y medida de el plano de la falla no descartan necesariamente la teoría del anticrack. Heidi Houston de la Universidad de California en Santa Cruz menciona el hecho de que aunque varios investigadores favorecen un plano de la falla horizontal para el terremoto Boliviano, algunos sugieren un arreglo mas complejo de multiples fallas horizontales y verticales. Houston y Green tambien citan evidencias respecto a que el espesor de la placa de subducción se contorsiona conforme desciende dentro del manto, especialmente cerca de los 670 km, en la discontinuidad sismica, donde la spinela y la olivina se transforman en perovskitas mas densas. Ellos aseguran que la cuña de olivina puede permanecer bastante grande en espesor inclusive abajo de los 670 km. Esto es debido a que podría quedar aislada del manto caliente dentro de una placa ancha.

En esta interpretación los terremotos podrian cesar bajo los 670 km no porque la cuña de olivina desaparezca, sino porque la transición endotérmica de la espinela o la olivina a perovskite mitiga la formación del fallamiento anticrack. Green asegura que los experimentos con CdTiO_3 , cuya transición para a una fase es similar a la de la espinela, es endotérmica y no produce fallamiento anticrack. Afortunadamente, debido a que ambas, temperatura y densidad, afectan las velocidades de las ondas sismicas, los sismólogos podrian resolver la pregunta de si un espesor ancho y frio de la cuña de olivina continua existiendo a profundidades suficientes como explicar la profundidad del terremoto Boliviano. Varios grupos estan actualmente tratando de usar las ondas sismicas del temblor principal y sus réplicas para mejorar la geometría de la placa y el plano de la falla.

UNA VENTANA EN EL INTERIOR DE LA TIERRA

Tal vez el mayor significado estriba en que este terremoto provee a los geofísicos de una ventana sin precedente que se abre al interior de la Tierra. Como todos los sólidos, la Tierra oscila en sus modos normales cuando es excitada. La frecuencia de estos modos y su atenuación contiene una gran cantidad de información sobre la estructura y composición de la Tierra.

Información de los grandes terremotos de foco profundo es importante para modelar la Tierra por varias razones. Porque la zona de la falla tiende a estar mas localizada que en los mas comunes eventos superficiales; los terremotos de foco profundo pueden ser vistos como fuentes puntuales de ondas sismicas de longitud de onda larga de facil modelación. Al contrario de los terremotos superficiales, los temblores profundos excitan eficientemente los modos altos de vibración de la Tierra que muestrean al nucleo y al manto inferior sin

exitar las ondas superficiales que tienden a enmascarar estos modos altos de vibración.

Viendo como las inhomogeneidades y otras distorciones de la simetria esferica de la Tierra dividen los modos normales de vibración, los geofísicos esperan poder modelar esos razgos. De acuerdo con Guy Masters de la Universidad de California en San Diego, si los investigadores pueden determinar con bastante presicion esas divisiones, se podrían aclarar varios problemas referentes a la naturaleza de las homogeneidades en el manto y a la anisotropía del núcleo de la Tierra. Resolviendo los razgos que dividen modos degenerados se permitirá una mejor determinación de la frecuencia degenerada de los modos normales y por lo tanto proveer una mejor entendimiento de la densidad promedio de la Tierra y de su composición como una función de la profundidad, tal vez con una resolución de 50 km a través del manto y del núcleo. Entre las preguntas mas importantes para resolver estan a) Si el manto superior e inferior tienen diferencias químicas significativas y b) Como varia la composición de el núcleo externo con la profundidad. Masters caracteriza la importancia de los terremotos Bolivianos como algo entre "muy util" y "revolucionario", dependiendo de cuantos modos degenerados puedan ser descompuestos. El y la mayoría de otros investigadores que analizan el terremoto estan optimistas en que podrán analizar los datos de cientos de estaciones grabadoras de las redes sismicas en todo el globo, para proporcionar un modelo mejorado de el interior de la Tierra.

Artículo aparecido en la revista Physics Today, octubre de 1994

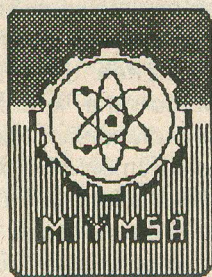
REFERENCIAS

- Meade C. and Jeanloz R. 1991. Science 252:68
- Thompson A,B. 1992. Nature. 358:295
- Kirby S.J. 1987. J. Geophys. Res. 92:13789
- Green H.W. and Burnley P. 1989. Nature.341:733
- Green H.W. et al. 1990. Nature 348:720
- Lidaka T. and Suetsugu D. 1992. Nature 356:593
- Vidale J. 1994. Nature 370:16
- Grand S.P. 1994. J. Geophys. Res. 99:11591

SISTEMAS DE INGENIERIA SISMICA Y DINAMICA ESTRUCTURAL



REPRESENTANTE EXCLUSIVO PARA LA REPUBLICA
MEXICANA:



**MEDIDORES INDUSTRIALES Y
MEDICOS S.A. DE C.V.**

ODESA #1110
COL. PORTALES
03300, MEXICO, D.F.

FAX: (5) 605-9181 PHONE: (5) 604-0058
605-6312

Física del Mar

Un programa de posgrado

CICESE



Departamento de Oceanografía Física
Apartado postal #2732. Ensenada, B.Cfa., México
Teléfono 52 (667) 4 5050 ext. 4010. Fax 52 (667) 4 5154

Fotografía: Van Dyke