

ANÁLISIS DEL MECANISMO DEL SISMO DE FOCO PROFUNDO DEL 20 DE JUNIO DE 2003 (LÍMITE PERÚ-BRASIL)

Hernando TAVERA, María MANRIQUE, Henry SALAS & Efraín FERNÁNDEZ

*Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología
Instituto Geofísico del Perú
Calle Calatrava 216, Urb. Camino Real – La Molina
Telefono/Fax: 436-1683, jtavera@geo.igp.gob.pe*

RESUMEN

En Sudamérica, los sismos de foco profundo se concentran cerca de los límites entre Chile y Argentina, y Perú con Bolivia, Brasil y Colombia. La frecuencia de estos sismos es mayor en el límite Perú-Brasil y a la fecha el sismo de mayor magnitud ($M_w=8.3$) se ha producido en el límite Perú-Bolivia. El sismo del 20 de Junio de 2003 ocurrió cerca del límite Perú-Brasil ($M_w=6.8-7.0$) y generó intensidades del orden de IV (MM) en la ciudad de Pucallpa ubicada a una distancia epicentral de 320 km en dirección Oeste. La distribución espacial de los sismos con foco profundo ocurridos entre 1995 y 2003 con magnitudes $M_w>6.0$, sugiere una migración de los sismos de Sur a Norte y la presencia de hasta 4 zonas que aun no han experimentado ruptura. Las formas de onda y el modelado de los registros de la onda P utilizando estaciones de la red IRIS, indican la ocurrencia de hasta tres eventos separados del primero por 7 y 10 segundos, además de sugerir la propagación de la ruptura en dirección SE. El mecanismo de foco corresponde a esfuerzos extensionales que se desarrollan en dirección paralela a la convergencia de placas y con una componente compresiva casi vertical. El momento sísmico escalar es del orden de 2.2×10^{19} Nm, equivalente a una magnitud de $M_w=6.8$.

ABSTRACT

In South America, the deep focus earthquakes are concentrated near the boundary between Chile-Argentina, and those of Peru with Bolivia, Brazil and Colombia. The frequency of occurrence of this kind of earthquakes is greater in the limit Peru-Brazil and up today the earthquake of greatest magnitude ($M_w=8.3$) was located in the Peru-Bolivia limit. This earthquake occurred in June 20, 2003 near the Peru-Brazil limit ($M_w=6.8-7.0$) and produced intensities about IV (MM) in Pucallpa located 320 km west of the epicenter. The spatial distribution of the deep earthquakes occurred between 1995 and 2003 with $M_w>6.0$, suggests a northward migration of earthquakes, and the presence of 4 zones that has not yet experienced rupture. Waveform and P-wave analyses of this earthquake as registered by IRIS network stations, indicate the occurrence of three events, the two later separated 7 and 10 seconds from the first one, suggesting a propagation of the rupture in SE direction. The focal mechanism corresponds to an extensional stress component parallel to the direction of plate convergence, and an almost vertical compressional component almost vertical. The scalar seismic moment is about 2.2×10^{19} Nm, equivalent to a magnitude of $M_w=6.8$.

INTRODUCCIÓN

El borde Oeste de Sudamérica es considerado como una de las regiones de más alto potencial sísmico en el mundo, donde ocurren sismos entre la superficie y profundidades del orden de 700 km. En general, los sismos llamados superficiales (profundidades menores a 60 km) están asociados a la superficie acoplada de contacto sismogénico entre las placas de Nazca y de Sudamérica, e incluye también a los sismos corticales bajo la zona continental. Los sismos de profundidad intermedia (profundidades entre 60 y 350 km) permiten configurar la geometría de la placa de Nazca por debajo de la superficie de contacto interplaca. Los sismos de foco profundo (profundidades mayores que 350 km) se distribuyen en superficie cerca de los límites geográficos Chile-Argentina,

Perú-Bolivia, Perú-Brasil y Perú-Colombia, y su naturaleza, desde el punto de vista geofísico es aún discutido por muchos investigadores, pero en general se aceptan dos hipótesis: la primera considera la existencia de un trozo de corteza oceánica remanente de una paleo-subducción (Chandra, 1970; Isacks y Molnar, 1971; Kikuchi y Kanamori, 1994; Okal y Bina, 2001) y la segunda, el desarrollo de importantes procesos mineralógicos asociados a cambios de fases (Green y Burnley, 1989; Geller, 1990; Kirby et al, 1991; Kikuchi y Kanamori, 1994).

En Perú, los sismos de foco profundo se concentran en el límite con Bolivia, Colombia y Brasil, siendo en este último en donde se producen con mayor frecuencia. Sin embargo, en el límite Perú-Bolivia el sismo de mayor magnitud registrado instrumentalmente en los últimos 20 años es el ocurrido el 9 de Junio de 1994 con

una magnitud de $M_w=8.2$, siendo ampliamente estudiado por diversos autores y cuyos principales resultados fueron compilados en una edición especial del "Geophysical Research Letters" (Volumen, 22, N° 16, Agosto de 1995). De manera similar, en el límite de Perú con Brasil, el sismo de mayor magnitud fue registrado el 20 de Junio de 2003 ($M_w=7.1$). Los parámetros hipocentrales de este sismo y su relación con la distribución espacial de otros ocurridos en la misma región se analizan en este estudio, además de los valores de intensidad máxima que produjo en superficie. Asimismo, haciendo uso de registros de las redes IRIS y del Instituto Geofísico del Perú se determinó el mecanismo focal y los parámetros de la fuente. El modelado y análisis de las formas de onda es realizado para estimar el tamaño del sismo y analizar la posible ocurrencia de eventos múltiples asociados a este sismo.

PARÁMETROS HIPOCENTRALES

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la

localización del epicentro del sismo del 20 de Junio de 2003 utilizando información de la Red Sísmica Nacional en las coordenadas 7.59°S , 71.70°W ; esto es, a 320 km al Este de la ciudad de Pucallpa, la más cercana al epicentro. Esta localización difiere poco de la obtenida por el National Earthquake Information Center (NEIC) utilizando estaciones de la red IRIS (Tabla 1). La profundidad del foco obtenida por ambas instituciones es similar, al igual que la magnitud expresada en función de las ondas de volumen (mb). El momento sísmico obtenido por el NEIC a partir del tensor de momento es de 4×10^{19} Nm, siendo equivalente a una magnitud $M_w=7.0$.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SISMICIDAD EN EL LÍMITE PERÚ-BRASIL

En la Figura 1 se observa que en el límite entre la región Central de Perú y Brasil, los sismos de foco profundo ocurridos entre los años 1995 y 2003 se alinean en dirección norte-sur sobre una longitud de 600 km

TABLA 1

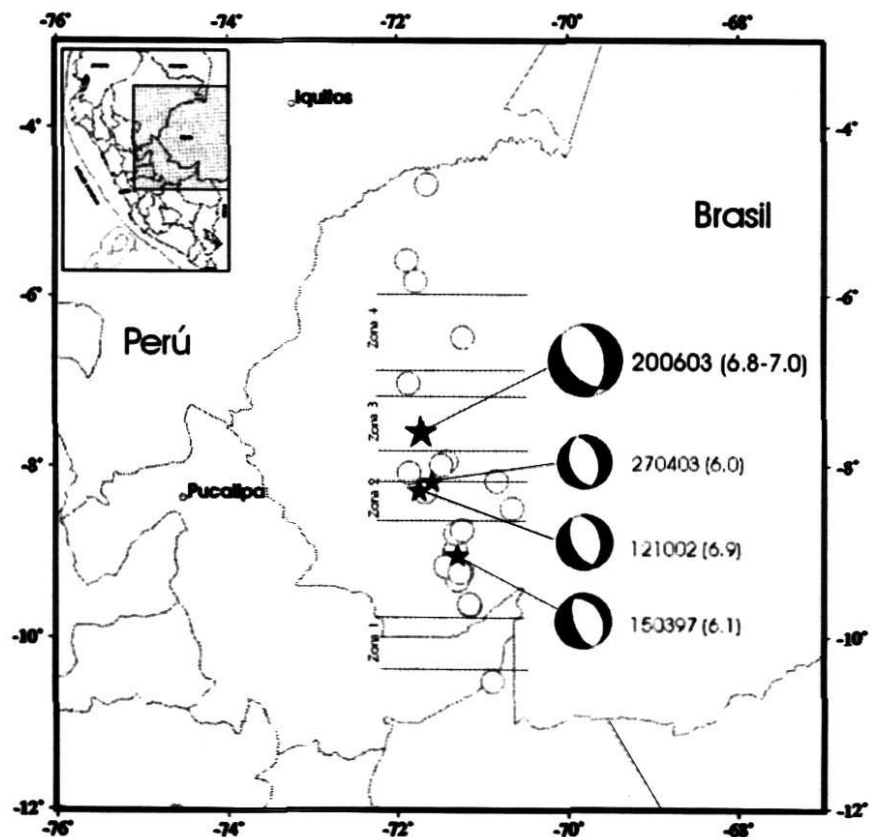
Parámetros hipocentrales del sismo del 20 de Junio de 2003

Tiempo Origen	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud	Fuente
06h 19min 38.6seg.	-7.61°	-71.72°	558 km	$M_w=7.1$ mb=6.4	NEIC
06h 19min 37.9seg	-7.59°	-71.70°	556 km	mb=6.5	IGP

NEIC: National Earthquake Information Center

IGP: Instituto Geofísico del Perú

Fig. 1: Distribución espacial de los sismos con foco profundo ocurridos en el límite Perú-Brasil entre 1995 y 2003. Las estrellas indican los epicentros de los sismos con magnitudes $M_w > 6.0$ y la estrella mayor, al sismo del 20 de Junio de 2003 ($M_w=7.1$). Los mecanismos focales son asociados a fallamientos normales y fueron extraídos de la base de datos de la Universidad de Harvard (Centroide Moment Tensor). Para el sismo del 20 de Junio, la solución corresponde a la obtenida en este estudio. Para cada mecanismo focal se indica la fecha (día, mes y año) y magnitud del sismo (M_w).



aproximadamente, además de mostrar la presencia de algunas áreas en la cuales no han ocurrido sismos y otras en donde el número de sismos es mayor. Esta distribución de sismos sugiere la presencia de pequeñas brechas sísmicas, con la particularidad que frente a dichas brechas y a una distancia del orden de 60 a 70 km en dirección Este, ha ocurrido por lo menos un sismo durante el periodo de tiempo antes indicado (zonas 2 y 4 en la Fig. 1). En la Figura 1 se han identificado aquellos sismos con $M_w=6.0$, los que sugieren una migración de los sismos de sur a norte, con la particularidad que dichos sismos ocurrieron en áreas en donde la frecuencia de sismos es mayor (Tabla 2). El epicentro del sismo del 20 de Junio se ubica en la parte central del alineamiento de sismos y en una de las áreas que podría haber sido considerada previamente como una brecha sísmica (zona 3 en la Fig. 1). Dentro de este contexto, es posible que la energía liberada por los sismos ocurridos en Octubre de 2002 y Abril de 2003, estén asociados a la ocurrencia del sismo del 20 de Junio en la zona continua.

La distribución en profundidad de estos sismos, siguiendo una sección vertical en dirección SO-NE, se presenta en la Figura 2 y en ella se observa que los sismos alcanzan profundidades entre 500 a 660 km, siendo mayor el número de sismos con profundidades menores a 570 km. En esta distribución vertical de los hipocentros, los tres últimos sismos de magnitud mayor se han producido a niveles de profundidad en los cuales no habían ocurrido sismos y sugieren la continuidad en los procesos de ruptura.

DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDADES

El sismo del 20 de Junio presentó una magnitud $m_b=6.5$ ($M_w=7.1$) y fue percibido en un radio del orden de 1000 km en torno al epicentro. En la Figura 3 se observa que la ciudad en la cual la intensidad fue mayor corresponde a Pucallpa (III-IV en la escala Mercalli Modificada). En las ciudades y localidades distribuidas en la denominada zona Sub-Andina, la intensidad fue del orden de II-III y cerca de la línea de costa, el sismo fue sentido con intensidad de II entre las ciudades de Lima y Piura. En general, los sismos de foco profundo no son sensibles en superficie, sin embargo, el sismo del 20 de Junio es uno de los pocos que producen intensidades elevadas debido posiblemente a procesos complejos de ruptura, tal como ocurrió con el sismo del 9 de Junio de 1994 en el límite Perú-Bolivia.

ANÁLISIS DEL MECANISMO FOCAL

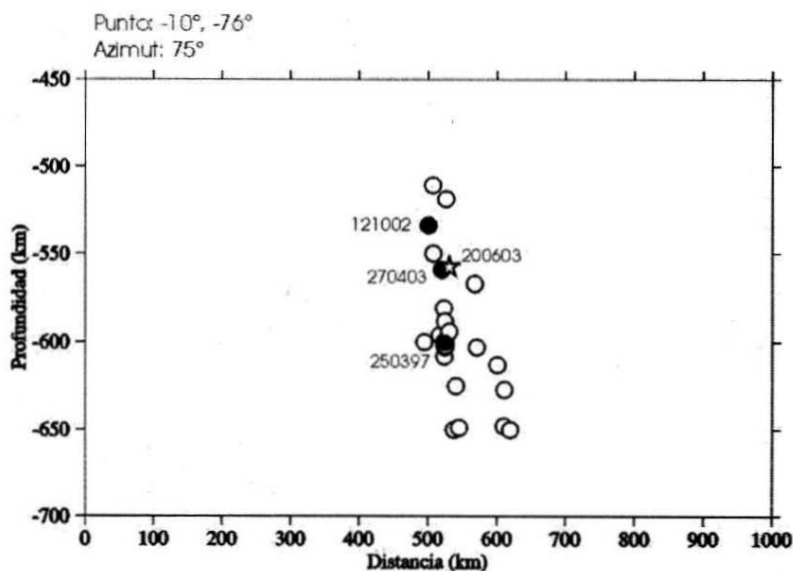
Los planos nodales asociados al mecanismo focal del sismo del 20 de junio fue determinado utilizando el algoritmo desarrollado por Brillinger et al (1980) y Udias y Buforn (1988), y 119 polaridades del inicio de la onda P, leídas en registros de la red IRIS, Red Sísmica del Perú (Instituto Geofísico del Perú) y de algunas estaciones sísmicas del Instituto Politécnico del Ecuador y del Observatorio Geofísico de La Paz-Bolivia. La solución obtenida se presenta en la Figura 4 y corresponde a un mecanismo focal de tipo normal con planos nodales

TABLA 2

Parámetros hipocentrales de los sismos con magnitud M_w mayor a 6.0 ocurridos en la zona de estudio entre 1995 y 2003.

Fecha	Tiempo Origen	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud
25.03.97	16h44min32.6seg.	-9.06°	-71.29°	602 km	$M_w=6.1$
12.10.02	20h09min11.4seg	-8.30°	-71.74°	534 km	$M_w=6.9$
27.04.03	22h57min44.8seg	-8.19°	-71.59°	559 km	$M_w=6.0$

Fig. 2: Distribución en profundidad de los sismos con foco profundo de la Figura 1 en una sección vertical orientada en dirección perpendicular a la convergencia de placas.



orientados en dirección NNO-SSE y buzando ambos planos con ángulos de 46° y 48° respectivamente. El eje de tensión (T) se orienta en dirección ENE-OSO; mientras que, el eje de presión (P) es prácticamente vertical.

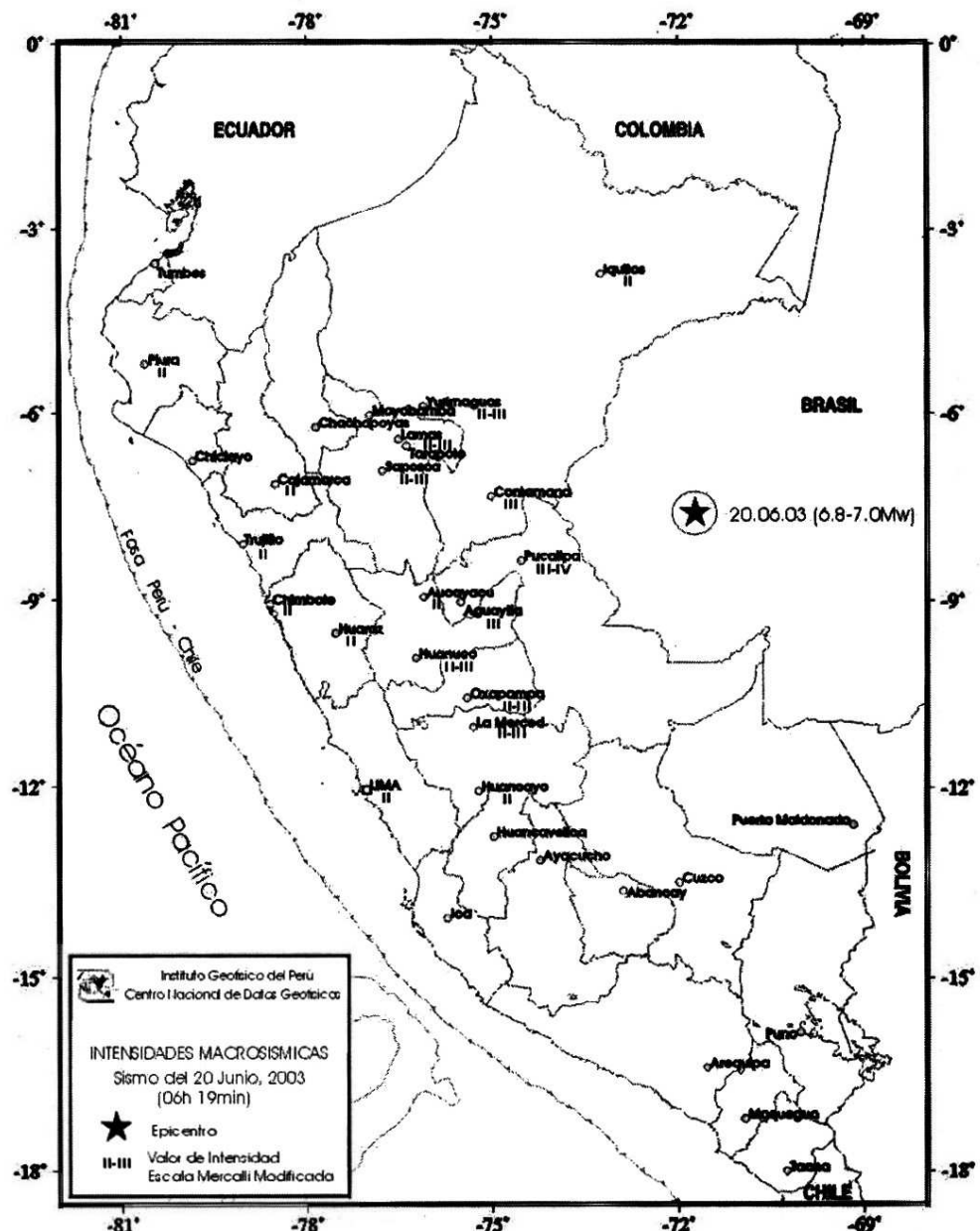
El mecanismo focal determinado para el sismo del 20 de Junio es similar al obtenido para otros sismos ocurridos en la misma región, tal como se muestra en la Figura 1, los mismos que indican la ocurrencia de procesos netamente extensivos que se desarrollan en dirección ENE-OSO y compresivos en dirección vertical. Este proceso se desarrolla sobre planos nodales con ángulos de inclinación del orden de 45° a 50° , siendo similar a lo largo de 600 km (Fig. 1). Estos resultados son coherentes con los obtenidos para otros sismos ocurridos en la misma región por Isacks y Molnar (1971), Fukao (1972), Tavera y Buforn (2001).

MODELADO DE FORMAS DE ONDA

Con el objeto de verificar la solución obtenida para el mecanismo focal del sismo del 20 de Junio a partir de las polaridades de la onda P, de estimar el momento sísmico escalar (M_0) y de evaluar la posible ocurrencia de eventos múltiples, se realizó el análisis y modelado de las formas de onda para el grupo de la onda P registrada en estaciones ubicadas a distancias mayores a 30° .

En la Figura 5 se presentan los registros en desplazamiento de la onda P correspondientes a estaciones de la red IRIS, las mismas que según su azimut estarían distribuidas alrededor del epicentro del sismo: 0.15° (HRV), 9.2° (BBSR), 91° (MSKU), 190° (SBA), 319° (TUC), 324° (ANMO) y 353° (SSPA). Según las formas de onda de los

Fig. 3. Mapa de intensidades macrosísmicas evaluadas para el sismo del 20 de Junio de 2003. La estrella indica la ubicación del epicentro del sismo.



registros de la Figura 5, el proceso de ruptura del sismo del 20 de Junio ha sido complejo y de gran duración. En estos registros es fácil correlacionar el tiempo de inicio de la ruptura o de la ocurrencia de un primer evento (E1), así como identificar la presencia de un segundo pulso correspondiente a otro evento que se habría producido 7 segundos después de ocurrido el primero (E2). Sin embargo, únicamente los registros de las estaciones MSKU y SBA, a diferencia de los otros, presentan formas de onda más complejas pudiendo identificarse la presencia de dos eventos; sin embargo, después de aproximadamente 13 segundos de registro se observa la presencia de máximos de gran amplitud que sugieren la ocurrencia de un tercer evento (E3). En las demás estaciones, el registro de este último evento presenta amplitudes atenuadas y periodos largos. Estas características en las formas de onda, indicarían la ocurrencia aleatoria de tres eventos sísmicos separados del primero en 7 y 13 segundos, además de sugerir la posible propagación de la ruptura en dirección de las estaciones MSKU y SBA.

Posteriormente, se realizó el modelado de la amplitud y forma del registro de la onda P en estaciones ubicadas en el campo lejano ($30^\circ < D < 90^\circ$) utilizando siete estaciones de la red IRIS y siguiendo la metodología propuesta por Nabelek (1984). Este método permite ajustar mediante la técnica de mínimos cuadrados el grado de correlación entre los registros observados y teóricos generados para una fuente puntual cuya orientación es definida previamente. Las amplitudes de las fases teóricas son corregidas por los factores de expansión geométrica y atenuación utilizando el operador de Futterman. El procedimiento seguido para modelar el grupo de la onda P es similar a la de Taymaz et al (1990) y Tavera y Buforn (2001), así se logra ajustar el mecanismo focal y la profundidad del foco, estimar el momento sísmico escalar y la función temporal de la fuente sísmica (STF) construida por una serie de triángulos isósceles cuyo número y duración son definidos a priori (Nabelek, 1984).

Para modelar los registros de la onda P del sismo del 20 de Junio de 2003, se normalizaron las amplitudes de los registros considerando una amplificación de 5000 y una distancia epicentral de 40° . El proceso de modelado se inicia fijando los valores que definen el mecanismo focal obtenido a partir de la polaridad de la onda P, de igual modo se fijaron los parámetros hipocentrales obtenidos por el IGP. El único parámetro libre es la función temporal de la fuente sísmica que va variando en cada iteración hasta obtener un mínimo valor para el RMS del ajuste, el mismo que define el grado de correlación entre los registros teóricos y observados.

Fig. 5: Registros de formas de onda para el grupo de la P. El orden de los registros está en función del azimut estación-epicentro. La letra E indica el número del eventos sísmico y las flechas el inicio del segundo evento. Al costado izquierdo de cada señal se indica el código de la estación, la distancia epicentral y el azimut en grados. Las amplitudes de los registros han sido normalizadas.

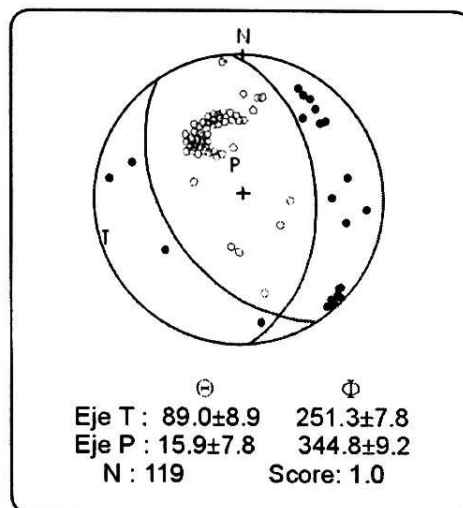
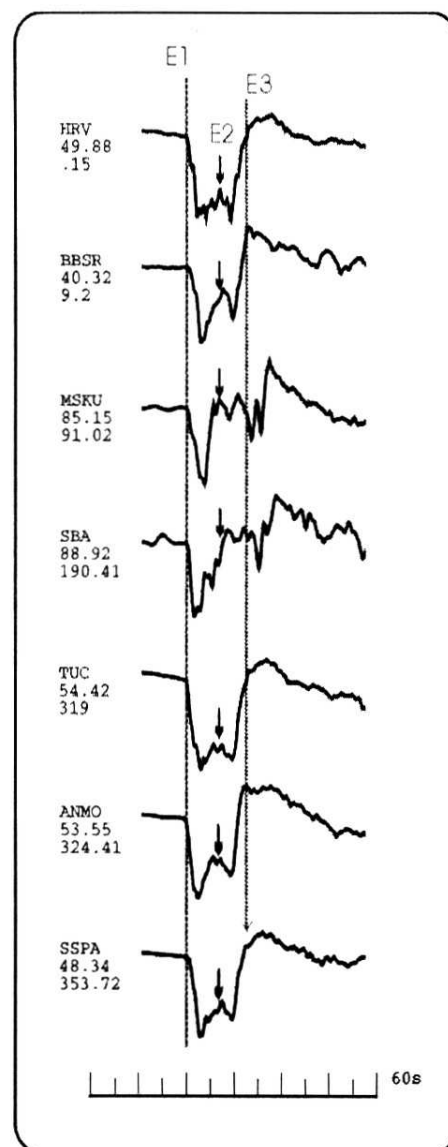


Fig. 4: Mecanismo focal obtenido para el sismo del 20 de Junio de 2003. Los círculos en negro indican compresión y los blancos dilatación. P y T corresponden al eje de presión y tensión respectivamente. Q y F indican el ángulo de inclinación y azimut de los ejes T y P.



Después de realizar un número determinado de iteraciones, la mejor correlación entre los registros observados y teóricos de la onda P para el sismo del 20 de Junio presenta un $RMS=0.20$. En la Figura 6 se presenta los resultados obtenidos y en ellos se observa que existe una buena correlación entre los registros observados y teóricos, siendo posible verificar la ocurrencia aleatoria de hasta dos eventos sísmicos (E1 y E2). Según la función temporal de la fuente sísmica (STF en la Fig. 6), el segundo evento habría ocurrido 7 segundos después y presentaría menor tamaño, pero similar duración. El momento sísmico

total sería de 2.2×10^{19} Nm equivalente a una magnitud de $M_w=6.8$.

Además, en la Figura 6, se observa que dicha solución no permite modelar en su totalidad las formas de onda de las estaciones MSKU y SBA, por lo que se modelaron únicamente estos registros en las mismas condiciones en que se generó la solución anterior. Los resultados se presentan en la parte inferior de la Figura 6, observándose una buena correlación entre los registros observados y teóricos; mientras que, la STF parece ser más compleja pero es posible identificar la ocurrencia de

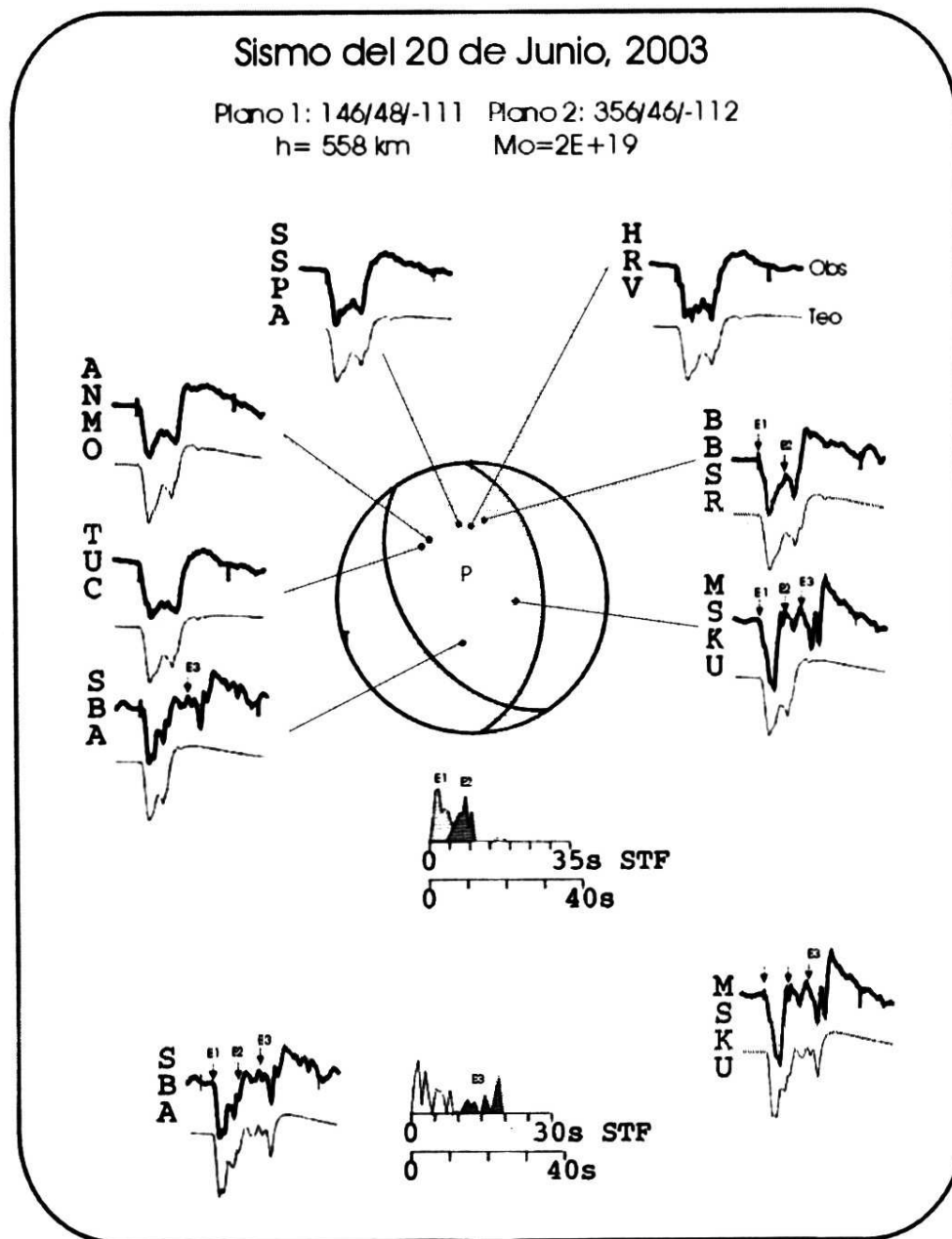


Fig. 6: Modelado de la onda P para el sismo del 20 de Junio de 2003. En la parte superior se muestra los registros observados (Obs) en desplazamiento y en la parte inferior los teóricos (Teo). El código de la estación se presenta a la izquierda de cada registro. Las letras T y P indican la ubicación de los ejes de tensión y presión. En la parte central de la figura se muestra la función temporal de la fuente sísmica y la escala en segundos para los registros utilizados. En la parte superior se indica, además de la fecha del sismo, la orientación de los planos nodales (azimut, buzamiento y ángulo de deslizamiento), profundidad del foco y el momento sísmico escalar.

los eventos E1 y E2. Sin embargo, la STF también sugiere la ocurrencia de un tercer evento aproximadamente 11 segundos después del primero (E3), siendo a su vez muy complejo y con una duración del orden de 9 segundos. Según la STF para las estaciones MSKU y SBA, el momento sísmico escalar sería del orden de 2.6×10^{19} Nm y correspondería a una magnitud de $M_w=6.9$. Si se realiza la diferencia entre los valores obtenidos para el momento sísmico, al tercer evento le correspondería un valor de 0.4×10^{19} Nm y una magnitud de $M_w=6.3$.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la parte central de Sudamérica, los sismos de foco profundo se concentran cerca del límite fronterizo de Perú con Brasil y Bolivia, siendo mayor la frecuencia de los mismos en el límite Perú-Brasil. Sin embargo, a la fecha el sismo de foco profundo para el cual se cuenta con información instrumental ocurrió en el límite Perú-Bolivia el 9 de Junio de 1994 (8.3 M_w). Este sismo fue de mucha importancia en consideración a la gran cantidad de información disponible y que permitió aceptar que los terremotos de foco profundo presentan procesos complejos de ruptura y efectos de directividad (Beck et al, 1995), así como la presencia de una importante componente isotrópica (Kikuchi y Kanamori, 1994; Hara et al, 1995).

Dentro de este contexto, el sismo del 20 de Junio presentó gran duración y de acuerdo a la información recopilada de personas que viven cerca de la zona epicentral, posiblemente el sismo produjo hasta tres remezones consecutivos, de ahí que haya sido sentido en superficie con intensidades del orden de IV (MM) en las ciudades y localidades cercanas al epicentro. Esta información fue confirmada al analizar las formas de onda de los registros del sismo, siendo este muy complejo y con una duración de 20 a 25 segundos.

Espacialmente, el sismo del 20 de Junio ocurrió en la parte central del alineamiento de sismos presente en el límite fronterizo de Perú-Brasil y en un área que previamente podría haber sido considerada como una brecha sísmica. Este sismo es el último de una serie de 4 con magnitudes $M_w > 6.0$ que se producen en esta región entre 1995-2003 y que muestran una evidente migración espacio-tiempo de Sur a Norte. Esta distribución de los sismos sugieren la presencia de nuevas lagunas de sismicidad que podrían dar origen a otros sismos en el futuro (Figs. 1 y 2).

Las formas de onda del sismo del 20 de Junio sugieren la ocurrencia aleatoria de al menos 3 eventos sísmicos separados del primero por 7 y 10 segundos, y las formas de onda registradas en las estaciones MSKU y SBA sugieren la propagación unilateral de la ruptura en dirección SE. Los efectos de directividad en los procesos de ruptura ya fueron observados durante la ocurrencia de otros sismos con foco profundo (Fukao y Kikuchi 1987). El mecanismo focal sugiere un proceso extensivo en dirección ENE-OSO paralelo la dirección de convergencia de placas, contrario a los sismos de foco profundo que

ocurren en el límite Perú-Bolivia (eje de tensión orientado en dirección norte-sur). Estas características podrían deberse a la diferente geometría de la placa de Nazca por debajo del continente en ambas regiones (Tavera y Buforn, 2001). Ante la ausencia de sismicidad a niveles de 300 y 550 km de profundidad (Cahill y Isacks, 1991; Tavera y Buforn, 2001), podría ser aceptable la hipótesis de que los sismos con foco profundo se producen debido al fracturamiento de un trozo de corteza que flota en el manto y que aún se mantiene lo suficientemente fría.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección Técnica del IGP por su apoyo en la realización del presente estudio. La información utilizada corresponde a la Red Sísmica Nacional del IGP y a la red mundial IRIS. Nuestro agradecimiento a Mónica Segovia y Jesús Berrocal por proporcionar registros sísmicos de las estaciones de Ecuador y Brasil. La revisión y comentarios de la Dra. Diana Comte han permitido mejorar los resultados obtenidos en este estudio. Contribución N°016-2003/CNDG-IGP.

BIBLIOGRAFÍA

- BECKS., SILVER P., WALLACE T. & JAMES D.** (1995).- Directivity analysis of the deep Bolivian earthquake of June 9, 1994. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2257-22690.
- BRILLINGER D. UDIAS A. & BOLT B.** (1980).- A probability model for regional focal mechanism solution. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 1479-1485.
- CHANDRA U.** (1970).- The Perú-Bolivia border earthquake of August 15, 1963. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 60, 639-646.
- FUKAO Y.** (1972).- Source process of a large deep-focus earthquake and its tectonic implications – The Western Brazil earthquake of 1963. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 5, 61-76.
- GÉLLERR.** (1990).- Metastable phases confirmed. *Nature*, 347, 620-621.
- GREEN H. & BURNLEY P.** (1989).- A new self-organizing mechanism for deep-focus earthquakes. *Nature*, 341, 733-737.
- HARA T., KUGE K. & KAWAKATSU H.** (1995).- Determination of the isotropic component of the 1994 Bolivia deep earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2265-2268.
- ISACKS B. & MOLNAR P.** (1971).- Distribution of stress in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solutions of mantle earthquake. *Rev. Geophys. Space. Phys.*, 9, 103-174.
- KIKUCHI M. & KANAMORI H.** (1994).- The mechanism

of the deep Bolivian earthquake of June 9, 1994. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2341-2344.

KIRBY S., DURHAM W. & STERN L. (1991).- Mantle phase changes and deep-earthquake faulting in subducting lithosphere. *Science*, 252, 216-225.

NABELEK J. (1984).- *Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves*. Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 361pp.

OKAL E. & BINA C. (2001).- The deep earthquakes of

1997 in Western Brazil. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 161-164.

TAVERA H. & BUFORNE E. (2001).- Source mechanism of earthquake in Peru. *Jour. Seism.*, 5, 519-540.

TAIMAS T., JACKSON J. & WESTAWAY R. (1990).- Earthquake mechanism in the Hellenic Trench near Crete. *Geophys. J. Int.*, 102, 695-731.

UDIAS A. & BUFORNE E. (1988).- Single and joint fault-plane solutions from first motion data. *In*: D. Doornbos. Seismological algorithms. Academic Press, Londres, 443-453.