

**Proceso de Ruptura del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
y de tres de sus Réplicas de Magnitud Mayor
(Resultados Preliminares)**

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

La orientación de la fuente y las características del proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_L=6.9$, $M_w=8.2$) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor (25 de Junio, $M_w=6.8$; 5 de Julio, $M_w=6.5$; 7 de Julio, $M_w=7.5$), es analizado a partir del modelado de ondas de volumen a distancias teleseísmicas. Los resultados sugieren que el terremoto de Arequipa y las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio fueron producidos por fuentes con mecanismos de tipo inverso con el plano nodal que buza en dirección ENE casi horizontal. Los ejes de presión (P) se orientan en dirección ENE-WSW. Para la réplica del 5 de Julio el mecanismo es de tipo normal con planos nodales orientados en dirección NE-SW. Las características de la función temporal de la fuente sísmica (STF) sugieren que el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa tuvo una duración del orden de 85 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas aleatorias, siendo la tercera la de mayor tamaño. El momento sísmico es del orden de $1.3E+21$ Nm, equivalente a una magnitud $M_w=8.2$. Las réplicas analizadas en este estudio, muestran un STF relativamente simple y de menor duración. El terremoto de Arequipa tuvo su origen en el proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, siendo esta fuente sísmogénica la más importante en el Perú.

Abstract

The orientation of the source and the characteristics of the rupture process of the June 23, 2001 Arequipa earthquake ($M_L=6.9$, $M_w=8.2$) and of three of its aftershocks of larger magnitude (June 25, $M_w=6.8$; July 5, $M_w=6.5$; July 7, $M_w=7.5$), is subject to analysis based on the modeling of P-waves at teleseismic distances. The results suggest that the Arequipa earthquake, as well as the June 25 and July 7 aftershocks, present focal mechanism of inverse type, with the nodal plane dip in the ENE-direction almost horizontal. The P-axes are oriented in the ENE-WSW direction. The June 5 aftershock has a mechanism of the normal type with nodal planes oriented in the NE-SW direction. The characteristics of the source time function (STF) suggest that the Arequipa earthquake had duration of 85 seconds and the occurrence of three ruptures, being the third that of greater size. The seismic moment is of the order of $1.3E+21$ Nm, equivalent to a magnitude $M_w=8.2$. The aftershocks analyzed in this paper show a STF that is relatively simple and shorter in duration. The Arequipa earthquake originated in the subduction process of the Nazca plate beneath the South American plate, being this seismogenic source the most important in Peru.

Introducción

La actividad sísmica en el borde Oeste de América del Sur y por ende en el Perú, tiene su origen en el proceso conocido como subducción y por el cual la placa de Nazca se introduce bajo la Sudamericana con una velocidad relativa de 8 cm/año en dirección $N80^\circ$ (DeMets et al, 1990). Esta alta velocidad de convergencia genera un fuerte acoplamiento de placas que produce sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Las características de la sismicidad generada por este proceso y

principalmente la que se produce en la región Sur de Perú, han sido analizadas y evaluadas por diversos autores (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodriguez y Tavera, 1991; Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001; Bernal, 2002), siendo las principales las relacionadas con su distribución en superficie y con la profundidad de sus focos.

Por otro lado, en la región Sur de Perú la energía sísmica liberada por terremotos de magnitud mayor asociados al proceso de subducción, es menor en comparación con la observada en la región Central del Perú debido a la poca frecuencia de ocurrencia de terremotos de magnitud elevada. Según Dorbath et al., (1990), en la región Sur los terremotos destructores presentan periodos de retorno del orden de 100 años, siendo más común la ocurrencia de sismos de profundidad intermedia, los mismos que frecuentemente producen daños leves en superficie, tal como ocurrió con los terremotos del 8 de Octubre de 1998 y 3 de Abril de 1999 (Tavera et al., 2000). El último terremoto de magnitud elevada y foco superficial, ocurrió el del 13 de Agosto de 1868 ($M_w=9.0$) y es considerado como el más destructivo del cual se tiene información confiable. Otros terremotos que produjeron destrucción en menor escala fueron los de 1913, 1942 y recientemente el de 1996 que generó en gran parte de la región sur intensidades del orden de V en MM.

El 23 de Junio de 2001 y después de 133 años, la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de foco superficial y magnitud elevada ($M_L=6.9$, $M_w=8.4$ CMT), el mismo que produjo intensidades máximas del orden de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Este terremoto fue conocido como "Terremoto de Arequipa" tuvo gran duración y de acuerdo a las características de los daños observados, es posible que se haya debido a un complejo proceso de ruptura.

En este estudio se presenta los resultados preliminares obtenidos para conocer la orientación de la fuente del terremoto de Arequipa y analizar su proceso de ruptura utilizando información sísmica de la red mundial. La disponibilidad y la buena calidad de esta información ha permitido analizar la complejidad de este terremoto, así como estimar la profundidad de su foco, la orientación de la fuente sísmica y su tamaño.

Similar procedimiento se sigue para analizar los procesos de ruptura y orientación de la fuente de tres réplicas de mayor magnitud ocurridos el 25 de Junio, 5 y 7 de Julio de 2001.

Orientación de la Fuente Sísmica

Metodología

A fin de cuantificar la orientación de la fuente (mecanismo focal), la profundidad del foco (h), la función temporal de la fuente sísmica (STF) y el momento sísmico escalar (M_0), se realiza el modelado de la amplitud y forma de las ondas P registradas en estaciones sísmicas localizadas a distancias telesísmicas ($30^\circ < d < 90^\circ$) siguiendo la metodología desarrollada por Nabeleck (1984). Este método, permite ajustar mediante la técnica de mínimos cuadrados el grado de correlación existente entre los registros observados y teóricos generados para una fuente puntual cuya orientación es definida previamente. Es decir, mediante un proceso iterativo se pretende hacer mínima la desviación estándar de los residuos de la correlación existente entre los registros observados y teóricos, siendo este evaluado a partir de la “raíz media cuadrática (RMS)” del ajuste. Los registros teóricos son construidos a partir de las fases directas P y S combinadas con las reflejadas en la superficie libre (pP, sP y sS) y cuyas amplitudes son corregidas por los factores de expansión geométrica y atenuación usando el operador de Futterman. A fin de facilitar el modelado de las ondas de volumen, las amplitudes de los registros han sido normalizadas a una amplificación de 5000 y a una distancia epicentral de 40° .

El procedimiento seguido durante el modelado es similar al de Taymaz et al., (1990), Tavera y Buform (1998) y Tavera y Buform (2001). El proceso se inicia considerando como orientación para la fuente la obtenida a partir de la polaridad de la onda P (Tavera, en este informe) y los parámetros hipocentrales presentados en la Tabla 1 según Tavera et al., (en este informe). Como parte del procedimiento de inversión, inicialmente la orientación de la fuente es fijada; mientras que, los valores para la profundidad del foco y la función temporal de la fuente sísmica varían de manera independiente hasta lograr obtener un valor mínimo para el RMS del ajuste entre los registros observados y teóricos.

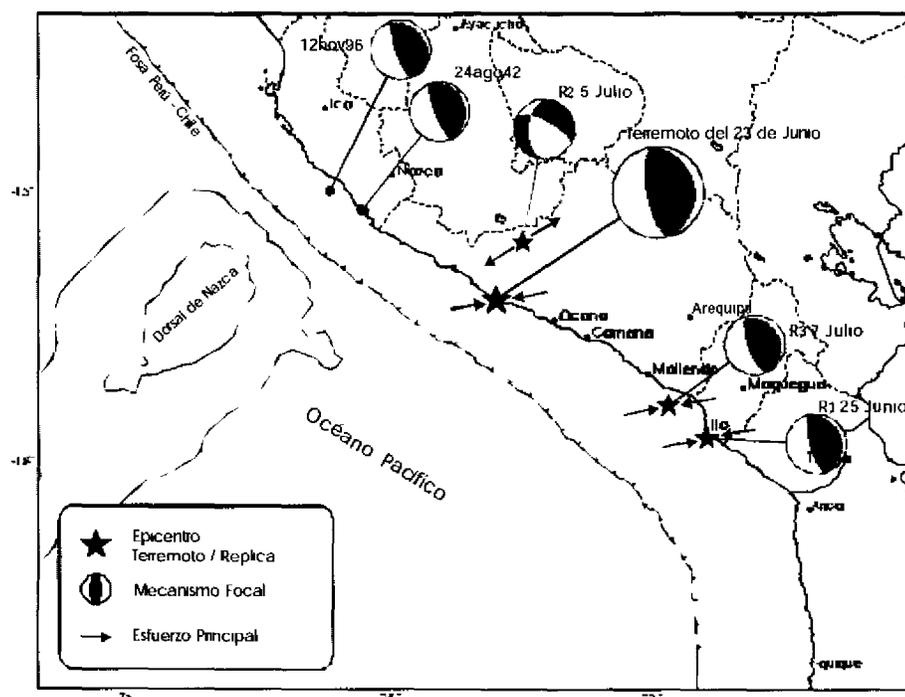


Figura 1. Localización epicentral del terremoto de Arequipa y replicas de magnitud mayor, así como de los terremotos de Nazca de 1942 y 1996. Además se presenta los mecanismos focales y orientación de los esfuerzos principales (compresión y tensión).

Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

El epicentro del terremoto de Arequipa fue localizado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña en el departamento de Arequipa (Figura 1) y presentó una magnitud de $M_L=6.9$ y $M_w=8.4$ según el CMT (Universidad de Harvard). La calidad de los registros obtenidos para este terremoto (relación señal/ruido mayor a 150), permitió analizar y evaluar la complejidad de la señal correspondiente al grupo de la onda P, tal como se observa en la Figura 2 y cuyos registros corresponden a las estaciones de DBIC y SJG, ambas de la red mundial y ubicadas en la Cote d'Ivoire y Puerto Rico. En la Figura 2a, se observa que el registro del terremoto de Arequipa presente al inicio de la señal, dos pulsos de amplitud pequeña (E1, E2) separados por 6 segundos y un tercer pulso de mayor amplitud aproximadamente 40 segundos después. Estas características sugieren que el terremoto de Arequipa se inicia con dos rupturas menores y después de 40 segundos se produce otra de mayor tamaño liberando mucha más energía.

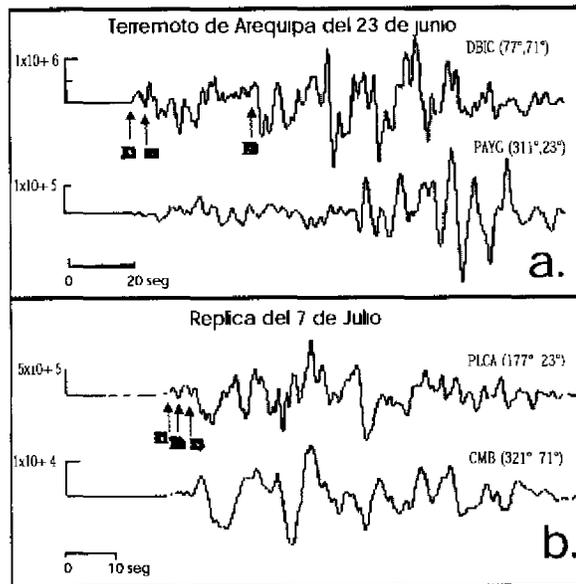


Figura 2 Registros telesísmicos del grupo de la onda P para el terremoto de Arequipa (a) y replica del 7 de Julio (b). La amplitud de la señal esta expresada en cuentas. En paréntesis se indica el azimut y la distancia epicentral en grados para cada estación sísmica. E1..E3, indica el número de evento o ruptura

En este estudio se realiza el modelado de 11 registros de la onda P distribuidos en su mayoría en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal. Según el procedimiento descrito anteriormente, el mejor ajuste entre los sismogramas observados (línea oscura) y teóricos (línea gris) fue obtenido para un RMS de 0.30 y la solución se presenta en la Figura 3. En esta figura se observa que el mecanismo focal corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, buzando uno de los planos 26° hacia el ENE y el otro 65° hacia el WSW respectivamente. En general, la correlación obtenida entre los registros observados y teóricos es buena; sin embargo, algunos picos de amplitud al final de la señal no han sido correctamente modelados, lo cual sugiere la existencia de un posible efecto de directividad de la ruptura; es decir, correspondería a un proceso de ruptura unilateral. Asimismo, en la Figura 3 se observa que la función temporal de la fuente (STF) es compleja (área sombreada) y tiene una duración de 85 segundos, tiempo durante el cual la energía se ha liberado en varias etapas y por fuentes distribuidas sobre el mismo plano de falla. Las dos primeras fuentes corresponden a rupturas menores con duraciones de 6 y 9 segundos; mientras que, la tercera corresponde a una ruptura mayor que se inicia con

una lenta liberación de la energía y una duración total de 70 segundos. Estos resultados son similares a los observados directamente sobre la señal sísmica (Figura 2). Esta metodología ha permitido estimar la profundidad del foco del terremoto en 28 km y obtener un momento sísmico escalar de $1.3E+21$ Nm equivalente a una magnitud M_w de 8.2.

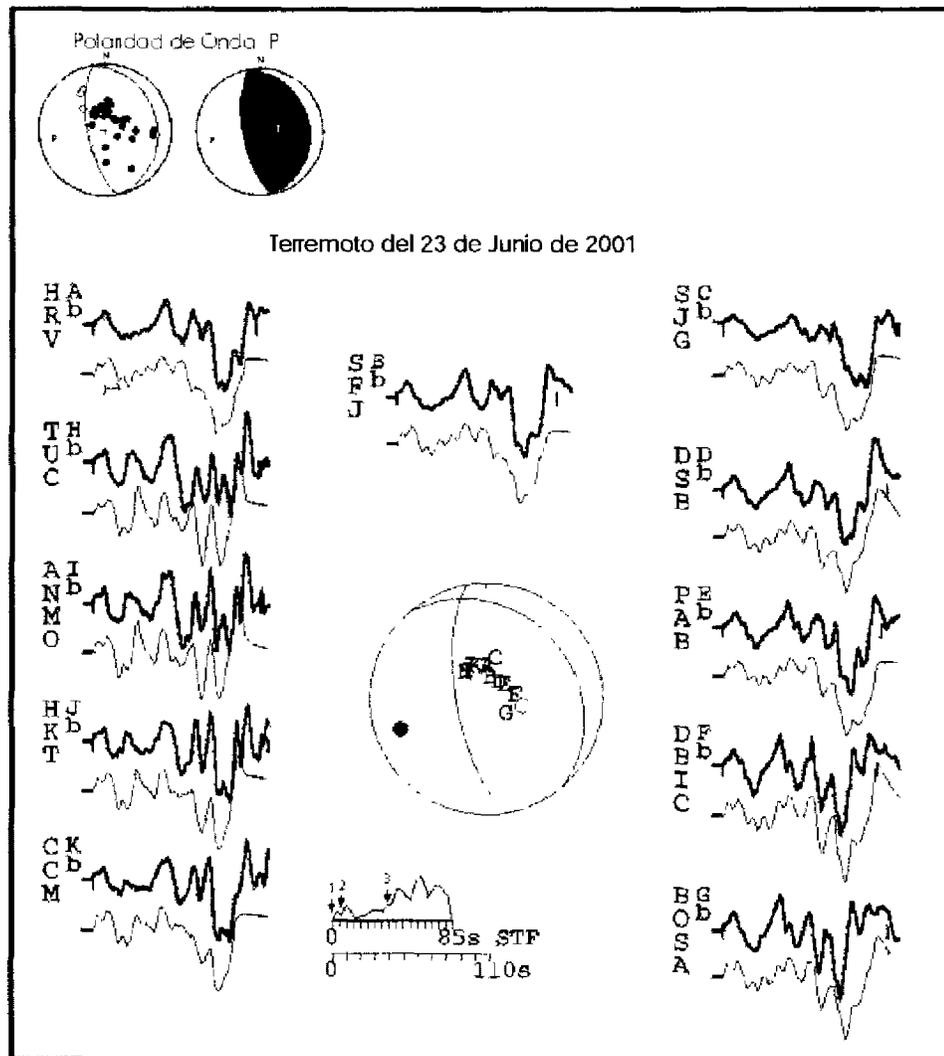


Figura 3. Resultado del modelado de ondas P para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Las estaciones son presentadas con una letra sobre la esfera focal. Registros observados en negro y teóricos en gris. El área sombreada indica la Función Temporal de la Fuente Sísmica (STF). La escala inferior corresponde a la longitud del registro. Los círculos en negro identifica al eje de tensión (T) y el vacío al eje de compresión (P). Los registros han sido normalizados a una magnificación de 5000. Arriba se muestra el mecanismo focal obtenido por Tavera (este volumen) a partir de la polaridad de la onda P. El cuadrante negro corresponde al de compresión y el blanco a dilatación.

Réplica del 25 de Junio de 2001

El epicentro de esta réplica fue ubicado a 11 km al Sur de la localidad de Ilo (Figura 1) y para el modelado de ondas de volumen se utiliza 10 registros de la onda P distribuidos en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal. El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30 y su solución se presenta en la Figura 4a. En dicha figura se observa que el mecanismo focal es similar al obtenido para el terremoto de Arequipa y la correcta correlación entre las señales teóricas y observadas permite obtener una profundidad para el foco de 25 km. La STF es simple y tiene una duración de 8 segundos aproximadamente y un momento sísmico escalar de $9.5E+18$ Nm equivalente a una magnitud Mw de 6.8.

Réplica del 5 de Julio de 2001

La réplica del 5 de Julio tuvo su epicentro a 25 km al NW de la localidad de Caravelí, Departamento de Arequipa (Figura 1). Para esta réplica se realiza el modelado utilizando 5 registros de la onda P distribuidos en el primer y segundo cuadrante de la esfera focal (Figura 4b). El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30, siendo la solución obtenida correspondiente a un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección N-S y NW-SE y buzamientos próximos a 45° (Figura 4b). La buena correlación entre los registros observados y teóricos permite ajustar la profundidad del foco en 64 km. La STF es simple y tiene una duración de 7 segundos. El momento sísmico escalar es de $5.8E+18$ Nm equivalente a una magnitud Mw de 6.5.

Réplica del 7 de Julio de 2001

Esta réplica es la de mayor tamaño de todas las ocurridas después del terremoto de Arequipa, siendo su epicentro ubicado a 23 km al Sur de la localidad de Punta de Bombón en Arequipa (Figura 1). Al igual que para el terremoto de Arequipa, se ha realizado el análisis de las características del registro de esta réplica en estaciones ubicadas a distancias telesísmicas. Así en la Figura 2b se presenta el registro correspondiente a la estación de PLCA y CMB ubicados a distancias epicentrales de 23° y 71° (Argentina y California, EEUU), y en ellas se observa que esta réplica presenta una secuencia de hasta tres pulsos iniciales de baja amplitud (E1, E2, E3) y al menos otras tres de mayor amplitud pero de corta duración.

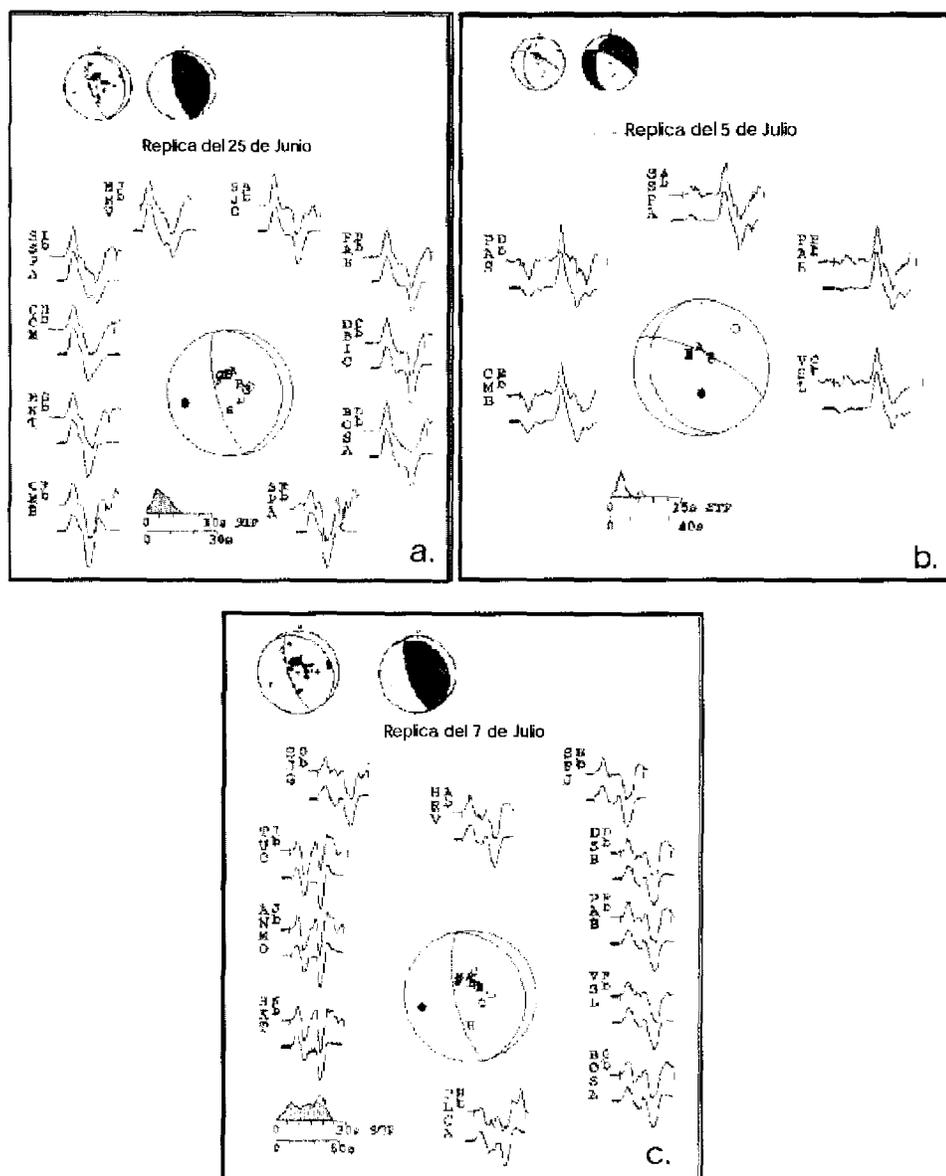


Figura 4. Resultados del modelado de ondas P para las replicas del 25 de Junio (a), 5 de Julio (b) y 7 de Julio (c). Otros, ver Figura 3.

El modelado de ondas de volumen se realiza con 11 registros de la onda P distribuidos en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal (Figura 4c). El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30, siendo la solución para el mecanismo focal igual a la obtenida para el terremoto de Arequipa. La correlación entre los registros observados-teóricos ha permitido estimar una profundidad para el foco de 19 km. La STF muestra la complejidad del proceso de ruptura asociado a esta réplica (área sombreada) con una duración de 25 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas aleatorias que liberaron en total una energía equivalente a un momento sísmico escalar de $1.9E+20$ Nm, el mismo que corresponde a una magnitud Mw de 7.5.

Orientación de los Esfuerzos Principales

Los terremotos de magnitud elevada que frecuentemente ocurren en el borde Oeste de Perú, son debidos a la fricción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso conocido como subducción. En este proceso, los terremotos presentan mecanismos focales de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo el plano que buza en dirección ENE prácticamente horizontal y coherente con el tipo de subducción característico de esta región.

El mecanismo focal del terremoto de Arequipa y de sus réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio presentan características similares a otros terremotos ocurridos en la misma región y con origen en el mismo proceso. La réplica del 5 de Julio corresponde a un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección N-S y NW-SE, siendo el plano con buzamiento hacia el NE próximo a la vertical. En la Figura 1 se presenta los mecanismos focales del terremoto de Arequipa y de sus réplicas, además de los correspondientes a los terremotos de Agosto de 1942 y Noviembre de 1996. De acuerdo a las características sismotectónicas del proceso de subducción en el borde Oeste de Perú, los planos nodales que buzan en dirección NNE a NE corresponden a la superficie de contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana a niveles superficiales.

En la Figura 1 se presenta además, la proyección horizontal de los ejes de presión (P) obtenidos para el terremoto de Arequipa y para dos de sus réplicas de magnitud mayor. Para la réplica del 5 de Julio se proyecta el eje de tensión (T). En todos

los casos, los ejes P y T se orientan en dirección ENE-WSW a NE-SW, coherente con la dirección de desplazamiento de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

Conclusiones

La orientación de la fuente y las características de los procesos de ruptura del terremoto de Arequipa y de tres de sus réplicas de magnitud mayor, han sido obtenidos utilizando datos telesismicos de la red mundial. Los mecanismos focales muestran que el terremoto de Arequipa y las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio corresponden a mecanismos inversos con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo el plano que buza en dirección ENE prácticamente horizontal y coherente con el ángulo de inclinación de la placa e Nazca dentro del proceso de subducción. La orientación del eje de compresión es en dirección ENE-WSW similar con la dirección de desplazamiento de las placas. La réplica del 5 de Julio presenta un mecanismo de tipo normal con planos orientados en dirección N-S, NW-SE, siendo el plano con buzamiento hacia el NE próximo a la vertical. La profundidad para los focos del terremoto de Arequipa es de 28 km; mientras que, para las réplicas es de 25 km (25 de Junio), 64 (5 de Julio) y 19 km (7 de Julio). Los momentos sísmicos escalares son de $1.3E+21$ Nm para el terremoto de Arequipa y para las réplicas del 25 de Junio, 5 y 7 de Julio de $9.5E+18$ Nm, $5.8E+18$ Nm y $1.9E+20$ Nm respectivamente.

La STF para el terremoto de Arequipa muestra el carácter complejo de la ruptura con una duración de 85 segundos, tiempo durante el cual se produjo hasta tres rupturas aleatorias, las dos últimas separadas de la primera por 6 y 40 segundos. La última ruptura fue de mayor tamaño y duración. Las características de la señal sísmica y de la STF muestran una evidente propagación unilateral de la ruptura hacia el SE, la misma que será evaluada en estudios posteriores.

Bibliografía

- Barazangi, M. y Isacks, B. (1976). *Geology*, 4, 686-692.
- Bernal, I. (2002). Tesis de Ingeniería, Univ. Nac. San Agustín de Arequipa, 220 p.
- Brillinger et al., (1980). *Bull. Seism Soc. Am.* 70, 419-436.
- Dorbath et al., (1990). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Grange et al., (1984). *Jour, Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.

Nabeleck, (1984). Tesis PHD, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Rodriguez y Tavera, (1991). *Rev Bras. Geofisica*, 9, 141-159.

Schneider y Sacks, (1987). *Jour, Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.

Stauder, (1975). *Jour. Geophys. Res.*, 80, 1058-1064.

Tavera y Buforn, (1998). *Revista Física de la Tierra*, U.C.M.

Tavera y Buforn, (2001). *Journal of Seismology*, 5, 519-539.

Taymaz et al., (1990). *Geophys. J. Int.*, 102, 695-731.

