

## **El Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001: Aspectos Sismológicos**

*Hernando Tavera*

*Henry Salas, César Jiménez, Yanet Antayhua, Efraín Fernández  
Luis Vilcapoma, José Millones, Isabel Bernal, Yolanda Zamudio, Julia Carpio  
Consuelo Agüero, Ivonne Pérez-Pacheco, Simeón Rodríguez y Hector Aleman*

*Centro Nacional de Datos Geofísicos*

### **Resumen**

*El 23 de Junio de 2001 a horas 15 y 33 minutos (hora local), la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud elevada ( $M_L=6.9$ ) que en algunos segundos produjo muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna. Los primeros resultados indican que la intensidad máxima observada fue de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Después de ocurrido el terremoto, siguió un gran número de réplicas que produjeron en superficie intensidades del orden de IV-V en la escala MM. En este informe se resumen las principales características del terremoto en relación con su fuente, tamaño, réplicas y área total de ruptura. El terremoto del 23 de Junio se constituye como el de mayor magnitud ocurrido en esta región después de 133 años.*

### **Abstract**

*On June 23, 2001 at 15:33 (local time), southern Peru was shaken by an earthquake of large magnitude ( $M_L=6.9$ ) that in few seconds caused death and destruction in Arequipa, Ayacucho, Moquegua and Tacna city. The first results indicate that the maximum intensity observed was VII-VIII in the Modified Mercalli scale (MM) After of the earthquake, a large number of aftershocks produce in surface intensities in the order of IV-V in the MM scale. In this report, the main characteristics of the earthquake are summarized: source, size, aftershocks and total rupture area. The June 23 earthquake is the largest that has occurred in this region in the last 133 years.*

### **Introducción**

El día sábado 23 de Junio de 2001 y cerca de las 15 horas con 33 minutos (hora local), un terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter afectó a los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna, además de las ciudades de Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. El epicentro del terremoto fue localizado a 82 km al NW del Departamento de Arequipa y cerca de la línea de costa. Este terremoto tuvo características importantes entre las que se puede mencionar su gran duración debido a la complejidad de su registro que inicialmente podría evidenciar un proceso de ruptura muy heterogéneo, así como el modo de propagación de la energía que produjo el ondulamiento de la superficie y la generación de un tsunami de carácter netamente local. Este terremoto, de carácter superficial, produjo en las primeras 24 horas un total

de 134 réplicas ( $M_L \geq 3.0$ ), todas localizadas al SE del epicentro del terremoto principal y sugiriendo la propagación de la ruptura en esa dirección.

En general, las localidades más afectadas por el terremoto del 23 de Junio fueron las de Ocoña, Camaná, Mollendo, Arequipa, Moquegua y Tacna. Asimismo, se ha observado daños materiales de importancia en casi todas las localidades distribuidas cerca de la costa, desde Nazca en Perú hasta Iquique en Chile y hacia el interior del continente, hasta La Paz en Bolivia. De acuerdo con la información obtenida sobre los daños materiales, personales y otros efectos, la intensidad máxima ha sido estimada en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada. Según informes de Defensa Civil y de los diversos medios de comunicación, en las primeras 48 horas de ocurrido el terremoto se contabilizó un total 35 personas muertas en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna.

En este trabajo se presenta los parámetros hipocentrales del terremoto del 23 de Junio, sus posibles implicancias sismotectónicas y efectos del mismo basándose en los cálculos y evaluaciones preliminares realizados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú.

### **Características Sismotectónicas de la Región Sur de Perú**

La actividad sísmica en Perú es debida principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, presente de Norte a Sur en su borde Oeste, con una velocidad relativa de 8 cm/año (DeMets, 1990). El margen Oeste de Sudamérica, donde la litosfera oceánica subduce bajo la continental, es uno de los más activos y de los bordes de placa el mayor en la Tierra, siendo su alta velocidad de convergencia la que permite que se genere un fuerte acoplamiento entre ellas, produciendo sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Como resultado de este proceso se ha formado la fosa peruano-chilena y la Cordillera Andina en diferentes períodos orogénicos.

Las características de la sismicidad en Perú y en detalle para la región Sur, ha sido realizada por diversos investigadores (Grange et al., 1984; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001), siendo las principales relacionadas

con la distribución de los focos sísmicos en superficie y en función de su profundidad, tal como se muestra en la Figura 1. En el borde Oeste de Perú, entre la fosa y la línea de costa se concentran los sismos con foco superficial ( $h < 60$  km), que al presentar magnitudes elevadas producen diferentes grados de destrucción en superficie y deben su

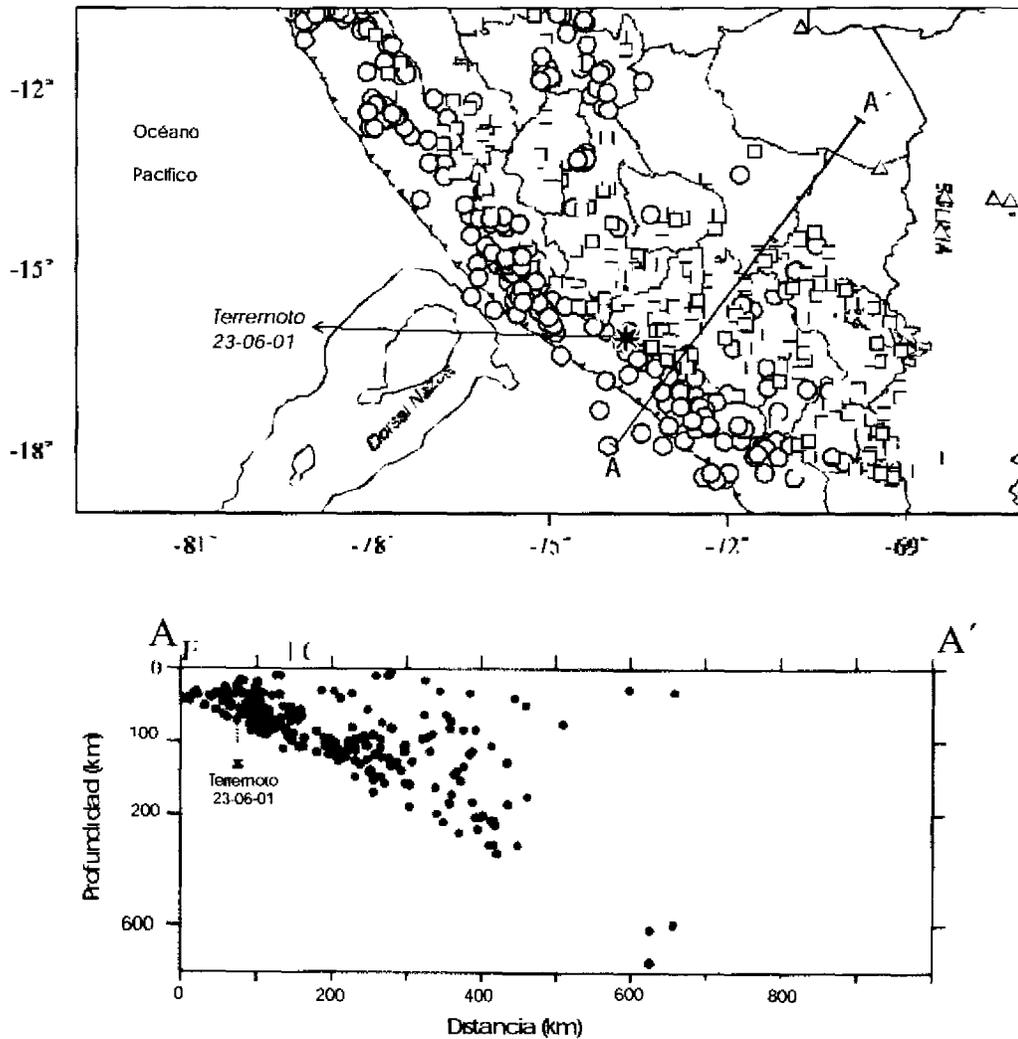


Figura 1.- Sismicidad en la región Sur de Perú para el periodo 1964-1996 ( $M > 5.0$ ) y sección vertical según la línea A-A'. Los círculos muestran los sismos de foco superficial, los cuadrados con foco intermedio y los triángulos con foco profundo.

origen a los procesos compresivos que se desarrollan debido a la colisión de la placa de Nazca y Sudamericana. En la región Sur de Perú, la frecuencia de estos terremotos es menor ya que por lo general, se producen a profundidades intermedias ( $h > 60$  km) y generan en superficie intensidades del orden de IV a V en la escala de Mercalli Modificada (por ejemplo, el terremoto del 3 de Abril de 1999,  $m_b = 6.0$ )

Asimismo, en la Figura 1 se observa que los sismos se distribuyen en función de la profundidad de sus focos siguiendo una alineación, desde la fosa, con un ángulo de  $30^\circ$  hasta alcanzar una profundidad del orden de 250-300 km. Los terremotos con foco superficial se concentran cerca de la costa hasta una distancia de 400 kilómetros desde la fosa (F); mientras que, a mayor distancia estos prácticamente desaparecen.

El terremoto del 23 de Junio de 2001, se produce a una distancia de 70 km aproximadamente al SE del ocurrido el 12 de Noviembre de 1996 (terremoto de Nazca) y al igual que este, tiene su origen en el proceso de colisión y fricción de placas. En la región Sur de Perú, son notables los terremotos ocurridos en 1868 ( $M_s = 8.6$ ) y 1913 ( $M_s = 7.7$ ), y desde entonces hasta la ocurrencia del terremoto del 23 de Junio ha transcurrido 133 años.

### **El terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.**

#### ***Parámetros hipocentrales.***

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la localización del epicentro del terremoto del 23 de Junio de 2001, en las coordenadas  $16.20^\circ S$ ,  $73.75^\circ W$ ; esto es, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña, tal como se muestra en la Figura 2 y en la Tabla 1. Estos resultados en comparación con los reportados por el National Earthquake Information Center (NEIC), presentan diferencias mínimas y se estima que estas se encuentran dentro de los márgenes de error propios de los cálculos realizados. Asimismo, en la Figura 2 se observa que el epicentro del terremoto del 23 de Junio se ubica sobre la línea de costa y entre las localidades de Chala y Ocoña. Además, sobre la Figura 2 se muestra la ubicación epicentral de tres de las replicas de mayor magnitud ocurridas el 25 de Junio ( $M_w = 6.8$ ), 5 ( $M_w = 6.6$ ) y 7 de Julio ( $M_w = 7.5$ ), las mismas que se ubican frente a las localidades de Ilo y Mollendo sugiriendo que la ruptura iniciada

por el terremoto del 23 de Junio se propagó en dirección SE. La réplica del 5 de Julio se ubica al NE del epicentro del terremoto principal, pero a mayor profundidad.

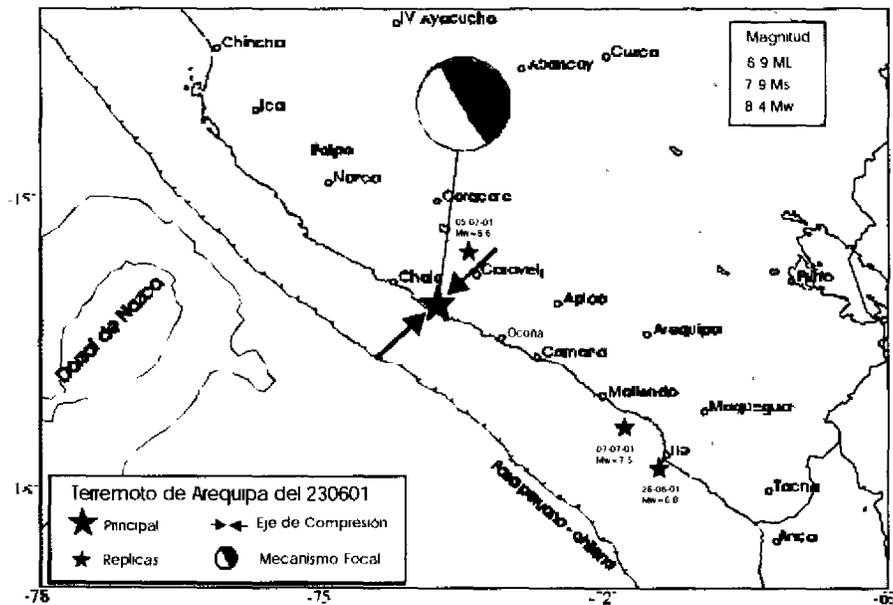


Figura 2. Mecanismo Focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de Junio de 2001. Se indica la ubicación de 3 réplicas principales y los valores de magnitud en diferentes escalas.

Tabla 1.

Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales.

Fecha .dd:mm:aa	H. Origen .hh:mm:ss.s	Lat.-S	Long.-W	Prof. km	Mag.	Agencia
23:06:01	20:23:04.4	16.20°	73.75°	29	6.9 ML	IGP
23:06:01	20:33:13.0	16.15°	73.40°	33	8.4 Mw	NEIC
26:06:01	04:18:31.6	17.73°	71.34°	31	6.8 Mw	NEIC
05:07:01	13:53:49.7	15.56°	73.45°	69	6.6 Mw	NEIC
07:07:01	09:38:43.0	17.38°	71.78°	26	7.5 Mw	NEIC

Durante las primeras 24 horas de haber ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de Junio, la Red Sísmica Nacional registró un total de 134 réplicas ( $ML \geq 3.0$ ), muchas de las cuales han producido intensidades entre III y V en MM en la ciudad de Arequipa.

### **Estimación de la Profundidad**

La profundidad de foco del terremoto de Arequipa, no pudo ser determinada con precisión debido a que la mayor parte de los registros sísmicos utilizados en su localización presentaban su señal totalmente saturada, de ahí que los algoritmos utilizados proporcionaran por defecto un valor de 33 km, igual al reportado por el NEIC (Tabla 1). A fin de cuantificar la profundidad del foco del terremoto de Arequipa, se procedió a utilizar un método directo basado en el cálculo de la diferencia de tiempos de llegada de las fases pP y P. Para tal objetivo, se ha leído los tiempos de llegada de estas fases en los registros de tres estaciones de la red mundial localizadas a distancias entre  $40^\circ$  y  $56^\circ$ . En la Figura 3 se presenta un ejemplo del registro en velocidad y desplazamiento del terremoto de Arequipa correspondiente a la estación de SSPA (ciudad de Pennsylvania U.S.A) ubicada a una distancia de  $56^\circ$  desde el epicentro del terremoto y en ella se indica con flechas la llegada de las fases pP y P. De acuerdo al análisis realizado, la diferencia promedio de  $T_{pP} - T_P$  es de 9.1 segundos. Utilizando las tablas de recorrido-tiempo del IASPEI (Kennett, 1991), la diferencia en los tiempos de llegada equivale a una profundidad para el foco sísmico de 29-31 km. Esta profundidad pone en evidencia el carácter superficial del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

### **Características de la Señal Sísmica**

Los registros del terremoto del 23 de Junio, obtenidos de la red sísmica nacional, han permitido inicialmente observar su carácter complejo, el mismo que sugiere la posible ocurrencia de rupturas aleatorias propias de terremotos de magnitudes elevadas. En la Figura 4 se presenta el registro de la estación de Pucallpa (PUC) ubicada a 800 km aproximadamente en dirección Norte con relación al epicentro del terremoto. En esta figura se observa que el grupo de la fase P tiene una duración del orden de 100 segundos, tiempo durante el cual es posible identificar la presencia de varios cambios de frecuencias y amplitudes equivalentes a igual número de fases sísmicas. Es posible que muchas de estas fases correspondan a diferentes rupturas, a ondas reflejadas o

refractadas en las capas granítica y basáltica; por lo tanto, es necesario filtrar la señal a fin de eliminar las altas frecuencias o considerar registros obtenidos en el campo lejano.

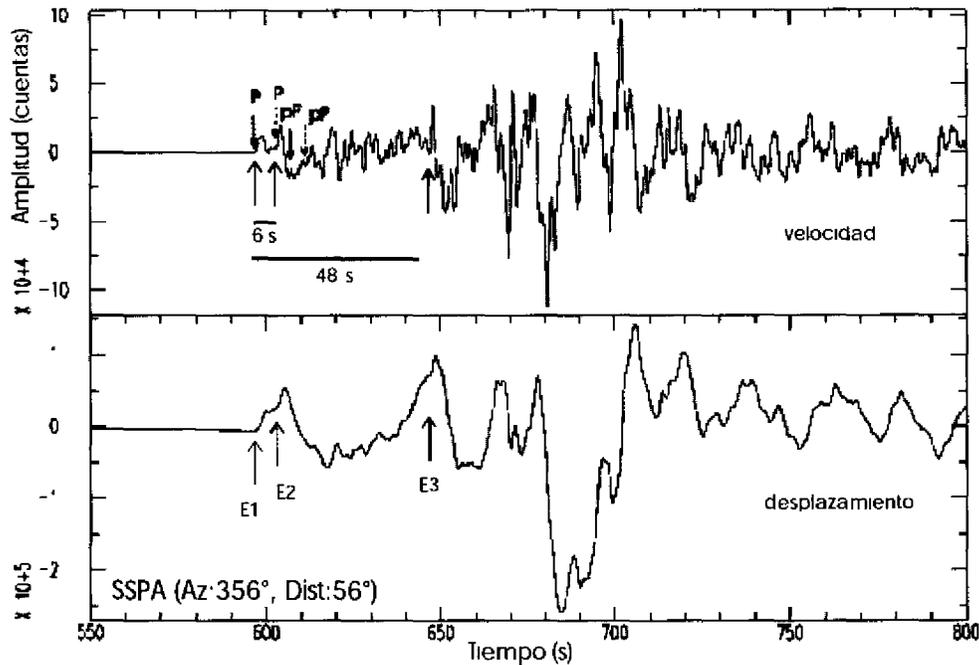


Figura 3. Registros sísmicos en velocidad y desplazamiento del Terremoto del 23 de junio de 2001 en la estación SSPA. Las flechas en gris indican el número de rupturas y las barras horizontales el intervalo de ocurrencia de las rupturas a partir del primer arribo de la onda. Las flechas discontinuas indican el tiempo de llegada de las fases utilizadas en el cálculo de la profundidad del terremoto.

El registro en velocidad y desplazamiento de la estación SSPA (distancia epicentral de  $56^\circ$ ) es posible observar que el tren de onda correspondiente a la fase P tiene una duración de aproximadamente 100 segundos y en ella se puede distinguir la presencia de hasta tres cambios importantes de frecuencia y amplitud, las mismas que pueden ser asociadas a la ocurrencia de otros terremotos o rupturas secundarias que se producirían después de 6 y 38 segundos de la primera. El último terremoto o ruptura es mayor debido a que la amplitud de su señal es mayor que los dos anteriores. En la Figura 3, las posibles rupturas son indicadas con las letras E1, E2 y E3.

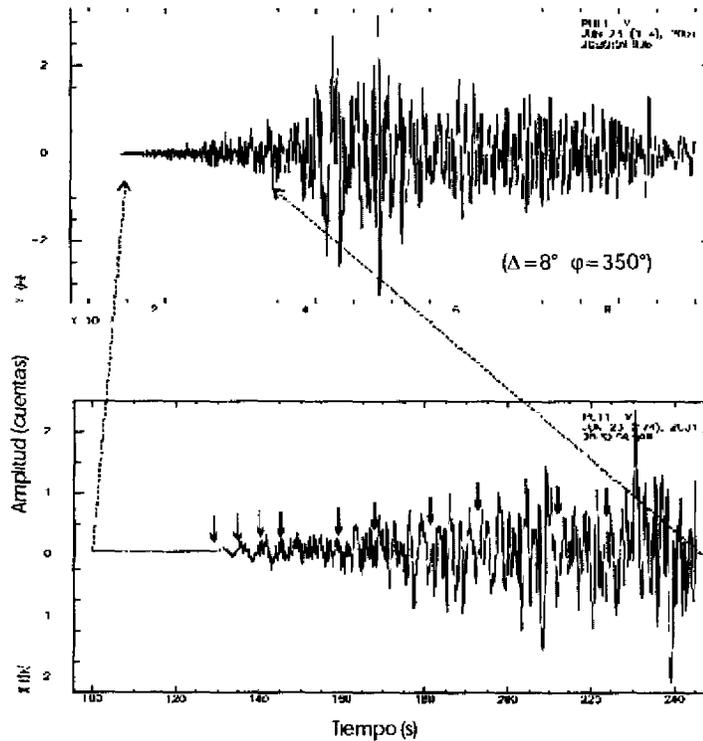


Figura 4.- Registros de la componente vertical (V) del terremoto del 23 de Junio en la estación sísmica de Pucallpa (PUC) perteneciente a la Red Sísmica Nacional. En la figura superior se muestra el registro del terremoto y en la inferior la correspondiente al grupo de la onda P. En esta figura se muestra con flechas los diferentes grupos de ondas que evidencian la complejidad de la señal. En paréntesis se indica la distancia epicentral y azimut en grados.

### Orientación de la Fuente Sísmica y Momento Sísmico Escalar

La orientación de la fuente que dió origen al terremoto del 23 de Junio ha sido conocida a partir de su mecanismo focal, el mismo que fue inicialmente calculado por la Universidad de Harvard (CMT) y corroborada con los valores de polaridad para la onda P obtenidas de las estaciones de la red sísmica nacional y mundial. La solución para el mecanismo focal se presenta en la Figura 2 y corresponde a un mecanismo de tipo inverso con un plano nodal casi vertical y el otro prácticamente horizontal, ambos orientados en dirección NNW-SSE. De acuerdo a las características del proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamérica, de los dos planos nodales, el que buza de manera casi horizontal (buzamiento de  $7^\circ$ ) en dirección E-NE correspondería al plano de falla. En estas condiciones, el eje de esfuerzo principal o eje de compresión P

se orienta en dirección N55° (flecha en la Figura 2), coherente con la dirección de convergencia de las placas en la región Sur de Perú.

Asimismo, la Universidad de Harvard (método del CMT) ha calculado para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio un Momento Sísmico Escalar de  $4.8E+21$  Nm, equivalente a una magnitud  $M_w$  de 8.4.

### **Distribución de Intensidades**

La información utilizada para evaluar las intensidades regionales debidas al terremoto del 23 de Junio, fue obtenida vía línea telefónica inmediatamente después de ocurrido el mismo. En general, el terremoto fue sentido con intensidades de II MM al Norte del departamento de Lima y por el Sur en la ciudad de Antofagasta en Chile. Hacia el interior del continente, el terremoto produjo alarma en la población de la ciudad de La Paz en Bolivia. Las intensidades máximas fueron de VII-VIII y estas corresponden a las localidades de Ocoña, Camaná y Mollendo, de VII en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, siendo en estas últimas en donde se produjo el mayor rango de destrucción y muerte. Es importante resaltar que la mayor parte de las viviendas afectadas estuvieron construidas de adobe y quincha a excepción de la ciudad de Arequipa, en donde las viviendas de material noble sufrieron daños importantes.

Asimismo, la DIREMER Región I de Chile, informó que el terremoto de Arequipa produjo en la ciudad de Arica intensidades del orden de VII, en Iquique de VI y en Calama de IV-V en la escala Mercalli Modificada.

### **Otros efectos**

Ocurrido el terremoto del 23 de Junio, este produjo otros efectos secundarios como deslizamientos, derrumbes de tierra y piedras sobre la Panamericana Sur y en algunas vías de penetración a las zonas andinas entre las localidades de Ocoña y Camaná. Fenómenos de licuación de suelos fueron observados en las localidades de Yauca, ocoña, Camaná, Tambo, Locumba y franja costera entre Mejía y Punta de Bombón. En la Panamericana Sur, entre Atico y Pescadores a la altura del kilómetro 727 se observó la presencia de agrietamientos en el suelo, así como en Ilo (Moquegua) y La Yarada (Tacna).

Otro efecto importante es el tsunami de carácter netamente local, que se produjo 15 minutos después de ocurrido el terremoto de Arequipa. Las localidades más afectadas fueron Camaná, Ocoña, Quilca y Matarani. En Camaná, las olas alcanzaron alturas de hasta 7 metros llegando a ingresar por el valle hasta un kilómetro y medio de distancia causando muerte y destrucción, al igual que en el circuito de playas.

Asimismo, pobladores cercanos a los volcanes Misti y Sara Sara informaron que estos incrementaron su actividad fumarólica.

### **Interpretación y Discusión**

La mayor fuente de actividad sísmica en el Perú, la constituye el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana generando con el tiempo, terremotos de diversas magnitudes a diferentes rangos de profundidad. A diferencia de las regiones Norte y Centro de Perú, en la región Sur los sismos se distribuyen, en profundidad, siguiendo una línea con pendiente cercana a  $30^\circ$  en dirección NE hasta una profundidad de 250 km aproximadamente (Figura 1). El terremoto del 23 de Junio se localizaría en la parte inicial de esta alineación de sismos. El epicentro de este terremoto se ubica sobre la línea de costa y entre las localidades de Chala y Ocoña.

La complejidad del proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio, ha permitido que las diversas agencias nacionales e internacionales reporten diferentes valores para la magnitud del mismo, además estos variaban con el tiempo de acuerdo a la mayor información disponible y en función de la escala de magnitud utilizada por las agencias para cuantificar el real tamaño del terremoto. Así, el IGP estima la magnitud del terremoto en la escala de Richter en 6.9; mientras que, el NEIC reporta una magnitud mb de 6.6, magnitud Ms de 7.9 y posteriormente una magnitud Mw de 8.2-8.4.

El terremoto del 23 de Junio tiene su origen en el proceso subducción a niveles muy superficiales; por lo tanto, su fuente es representada mediante un mecanismo focal de tipo inverso debido a la presencia de esfuerzos netamente compresivos orientados, en este caso, en dirección N55°. En general, las características del mecanismo focal

sugieren que el plano de falla se orienta en dirección NW-SE y presenta su buzamiento casi horizontal en dirección ENE.

La distribución espacial de tres de las replicas de mayor tamaño sugieren un proceso de ruptura que se propaga en dirección SE sobre una extensión del orden de 370 km. Esta característica es coherente con la distribución de daños o valores máximos de intensidad evaluados en la región Sur de Perú.

Por otro lado, la calidad de los datos han permitido observar que los terremotos de magnitud elevada siempre obedecen a procesos de ruptura muy complejos, principalmente si estos ocurren sobre la superficie de contacto de las placas. Para el terremoto del 23 de Junio, el proceso de ruptura o fricción de placas fue lento durante los primeros segundos y dado el carácter superficial del mismo, es posible que este haya producido un movimiento horizontal paralelo a la superficie con ligeras ondulaciones de la misma, para que después de aproximadamente 38 segundos se produjeran movimientos mayores debido a la ocurrencia de una ruptura mayor y por ende, la energía liberada se incremento generando mayor destrucción y daño en las diversas localidades distribuidas al SE del epicentro del terremoto.

### **Bibliografía**

- Cahill y Isacks, (1992). *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.  
DeMets et al., (1990). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.  
Grange et al., (1984). *J. Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.  
Kennett (1991). *Res. School Earth. Sci., Camberra*, 167 pp.  
Schneider J. y Sacks S. (1987). *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.  
Tavera y Buforn (2001). *Journal of seismology*, 5, 519-539.

