

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

**CENTRO NACIONAL DE DATOS GEOFISICOS
SISMOLOGIA**



EL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 23 DE JUNIO DE 2001

Informe Preliminar

Hernando Tavera

H. Salas, C. Jimenez, Y. Antayhua, L. Vilcapoma

J. Millones, I. Bernal, Y. Zamudio, J. Carpio

C. Agüero, I. Perez-Pacheco, S. Rodriguez

**Lima – Perú
Junio, 2001**

1.- Introducción

El día sábado 23 de junio de 2001 y cerca de las 15 horas con 33 minutos (hora local), un terremoto de magnitud mb igual a 6.9 ($M_s=7.9$) afectó toda la región Sur de Perú, incluyendo las ciudades de Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. El epicentro del terremoto fue localizado en la región Sur y cerca de la línea de costa; esto es, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña, Departamento de Arequipa. Este terremoto tuvo características importantes entre las que destaca la complejidad de su registro, el mismo que evidencia un proceso de ruptura por demás heterogéneo, observado en estaciones de banda ancha de la red sísmica nacional y mundial, así como el modo de propagación de la onda sísmica, que al ser el terremoto de carácter superficial produjo el ondulamiento de la superficie. Asimismo, el terremoto produjo a la fecha 134 réplicas, siendo las de mayor magnitud localizados al Sureste del evento principal, mostrando una clara propagación de la ruptura en esa dirección.

Las localidades más afectadas por el terremoto del 23 de junio fueron las de Ocoña, Camaná, Mollendo, Arequipa, Moquegua y Tacna. De acuerdo con la destrucción de los daños materiales, personales y otros efectos, la intensidad máxima observada quedó restringida en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada. El sistema de Defensa Civil y los diversos medios de comunicación, informaron de la muerte de al menos 35 personas en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna. Asimismo, se ha observado daños materiales de importancia en casi todas las localidades distribuidas cerca de la costa, desde Nazca hasta Iquique en Chile y Cusco, La Paz (Bolivia) hacia el interior del continente.

El objetivo del presente informe es presentar de manera precisa los parámetros hipocentrales del terremoto del 23 de junio, sus posibles implicancias sismotectónicas y efectos del mismo basándose en los cálculos y evaluaciones preliminares realizadas por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú.

2.- Principales 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 8-10 cm/año (Minster y Jordan, 1978). El margen continental 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. Como resultado de este proceso se ha formado la fosa peruano-chilena y la Cordillera Andina en diferentes procesos orogénicos. La alta velocidad de convergencia de las placas permite que se genere un fuerte acoplamiento entre ellas, produciendo sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad.

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 en superficie y en función de su profundidad. En la Figura 1 se puede observar en detalle las características de esta sismicidad.

Por otro lado, en el borde Oeste de Perú, los terremotos de magnitud elevada que producen diferentes grados de destrucción en superficie, presentan focos superficiales con mecanismos que obedecen a procesos compresivos, siendo los mismos asociados a la colisión de la placa de Nazca y Sudamericana. Sin embargo, la frecuencia de estos terremotos es menor en la región Sur ya que por lo general, aquí se ha venido produciendo terremotos con focos intermedios (profundidad de 100 km) que generaban en superficie intensidades del orden de IV a V en la escala MM (terremoto del 3 de Abril de 1999, $m_b=6.0$). El terremoto del 23 de junio de 2001, se produce a una distancia de 70 km aproximadamente al Sureste del ocurrido el 12 de noviembre de 1996 (terremoto de Nazca) y al igual que este, el terremoto del 23 de junio presenta eje de presión horizontal orientado en dirección NE-SW, perpendicular a la dirección de la fosa peruano-chilena y coherente con las fuerzas que controlan el desplazamiento de las placas de Nazca y Sudamericana.

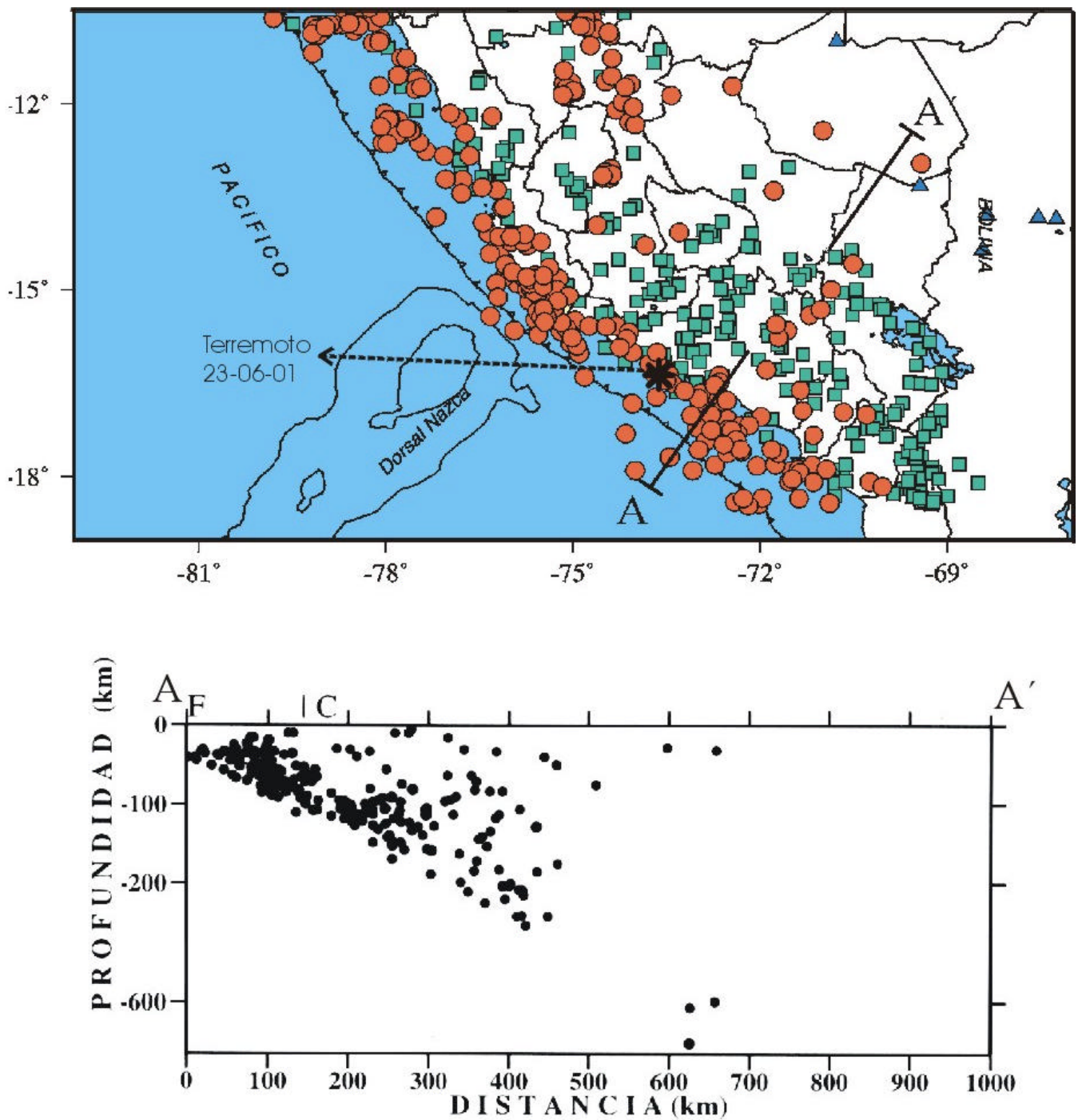


Figura 1.- Sismicidad en la región Sur de Perú para el periodo 1964-1996 ($M > 5.0$) y sección vertical según la línea A-A'. Los círculos muestran los sismos de foco superficial, los cuadrados con foco intermedio y los triángulos con foco profundo.

3.- El terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

3.1. Parámetros hipocentrales.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la localización preliminar del epicentro del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001, en las coordenadas 16.08°S , 73.77°W ; esto es a 82 km al NW de la localidad de Ocoña. Mayor información permitió realizar el recalcado del epicentro, siendo la localización final la que se muestra en la Figura 2 y cuyas coordenadas se presenta en la Tabla 1, en comparación con las reportadas por el National Earthquake Information Center (NEIC). Según estos valores, la diferencia existente en las coordenadas del epicentro es mínima y se estima que estas se encuentren dentro de los márgenes de error propios del cálculo. Asimismo, en la Figura 2 se observa que el epicentro del terremoto del 23 de junio se ubica entre las localidades de Ocoña y Chala, y sobre la línea de costa. Una explicación para las diferencias observadas en las coordenadas epicentrales del terremoto de Arequipa, es que los epicentros localizados basándose en datos telesísmicos, para el borde Oeste de Sudamérica, se encuentran algo desplazados hacia el continente en comparación con las determinaciones sobre la base de datos de redes sísmicas locales o regionales (Lomnitz, 1971; Spence et al., 1979); siendo estas últimas, de mayor precisión. De ahí que se considere como óptimo al epicentro obtenido por el IGP.

En la Figura 2, también se muestra la ubicación epicentral de tres de las réplicas de mayor magnitud ocurridas durante las 24 horas siguientes al terremoto. Estas réplicas se ubican frente a las localidades de Ocoña, Mollendo e Ilo respectivamente y sugieren que la propagación de la ruptura del terremoto de Arequipa se realizó en dirección Sureste sobre una longitud de aproximadamente 270 km. La réplica de mayor magnitud se ubica frente a la localidad de Mollendo (6.3 Ms).

Durante las primeras 24 horas de haber ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de junio, el IGP ha registrado un total de 123 réplicas, muchas de las cuales han producido intensidades entre III y V en MM en la ciudad de Arequipa. Como es normal, el número de réplicas viene disminuyendo paulatinamente.



Figura 2. Ubicación del epicentro y 3 replicas de Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Tabla 1.

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

Fecha .dd:mm:aa	H. Origen .hh:mm:ss.s	Lat.-S	Long.-W	Prof. Km	Mag.	Agencia
23:06:01	20:33:04.4	16.20°	73.75°	29	6.9mb, 7.9Ms	IGP
23:06:01	20:33:13.0	16.15°	73.40°	33	7.6Ms	NEIC
23:06:01	21:27:35.00	17.09°	72.37°	33	6.3Ms	NEIC
23:06:01	23:10:00.00	16.68°	73.31°	33	6.2Ms	NEIC
24:06:01	01:22:52.0	17.52°	71.71°	33	5.5Ms	NEIC

3.2.- Estimación de la Profundidad del Foco.

La profundidad de foco del terremoto de Arequipa del 23 de junio, no pudo ser determinada con precisión, debido a que la mayor parte de los registros sísmicos utilizados en la localización del mismo 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° y 56°. En la Figura 3 se presenta un ejemplo del registro en velocidad y desplazamiento del terremoto de Arequipa correspondiente a la estación de SSPA, la misma que esta ubicada a una distancia de 56° y 356° de acimut y en ella se indica con flechas de color azul, la llegada de las fases pP y P. De acuerdo a los valores obtenidos, la diferencia promedio de TpP-TP 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 km. Esta profundidad pone en evidencia el carácter superficial del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

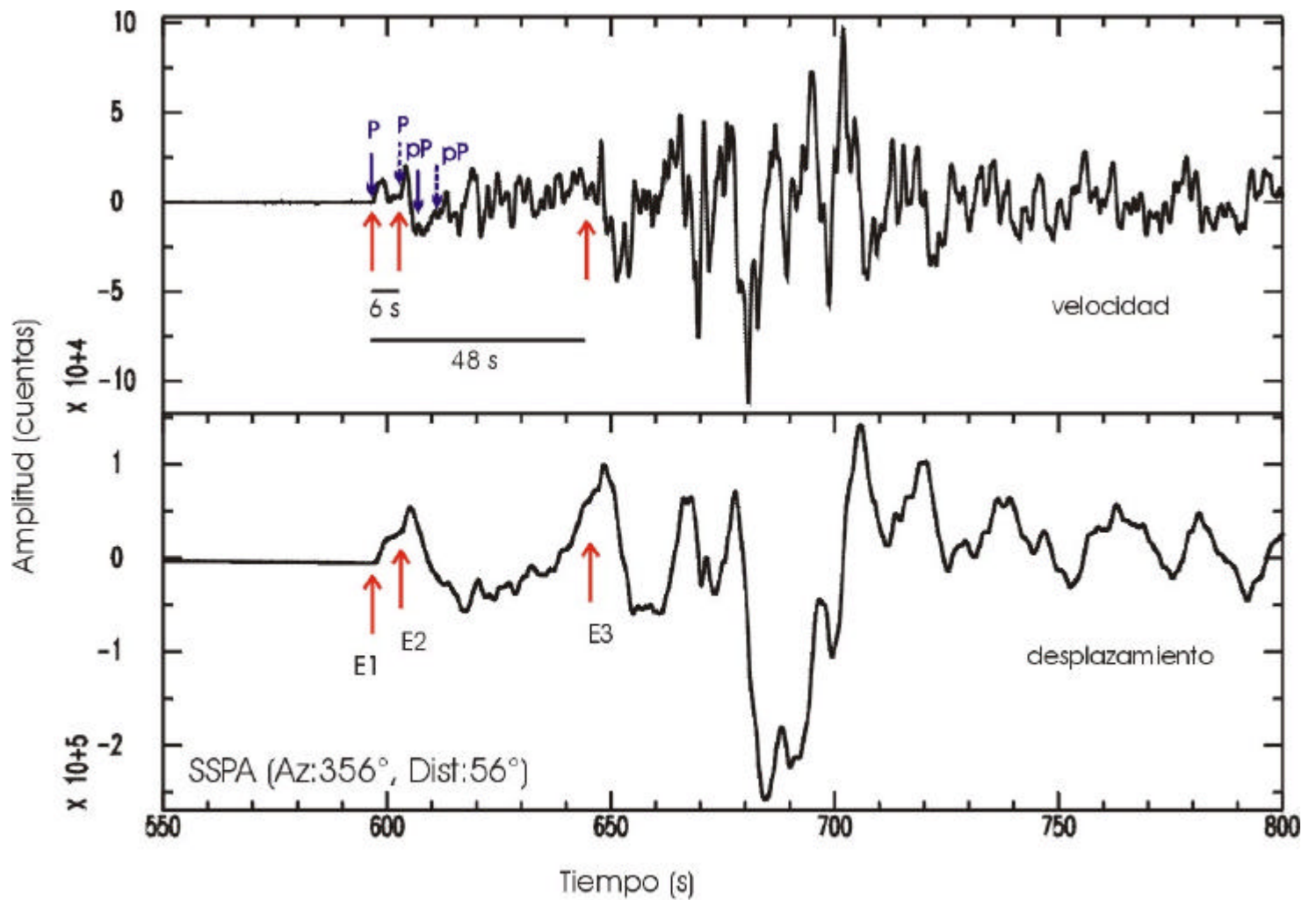


Figura 3. Registros sísmicos del Terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 en la estación SSPA. Las flechas indican el número de rupturas y las barras el intervalo de ocurrencia a partir del primer arribo de la onda. Las flechas en azul indican el tiempo de llegada de las fases utilizadas en el cálculo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

3.3.- Características de la Señal Sísmica y del Proceso de Ruptura.

Los registros del terremoto de Arequipa 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 de manera clara en los primeros 60 segundos de registro, la presencia de hasta tres pequeños grupos de fases marcados por sus cambios de frecuencia. Sin embargo, debido a las distancias cortas estación_epicentro, es posible que estos trenes de onda se deban a fases reflejadas o refractadas en las capas granítica o basáltica. A fin de evitar la presencia de frecuencias altas en el registro del terremoto, se ha considerado analizar el obtenido de la estación SSPA. En la Figura 3, se presenta el registro del terremoto en velocidad y desplazamiento debidamente correlacionados en tiempo. En estos registros se observa que el tren de onda correspondiente a la fase P tiene una duración de aproximadamente 100 segundos incluyendo las fases reflejadas pP y sP; sin embargo, se distingue la presencia de hasta tres rupturas principales, las mismas que están separadas de la primera en 6 y 48 segundos respectivamente, siendo la última de mayor tamaño y duración. Estas rupturas son indicadas en la figura con las letras E1, E2 y E3 (flechas rojas).

3.4. Orientación de la Fuente Sísmica, Esfuerzo Principal y Momento Sísmico

La orientación de la fuente que dio origen al terremoto de Arequipa 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 obtenidos de las estaciones de la red sísmica nacional y mundial. La solución para el mecanismo focal se presenta en la Figura 5, el mismo que 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 del mecanismo focal, el que buza de manera casi horizontal (buzamiento de 7°) en dirección NE correspondería al plano de falla. La orientación del eje de esfuerzo principal de presión es en dirección $N55^\circ$ (flechas rojas), coherente con la dirección de convergencia de las placas en la región Sur de Perú.

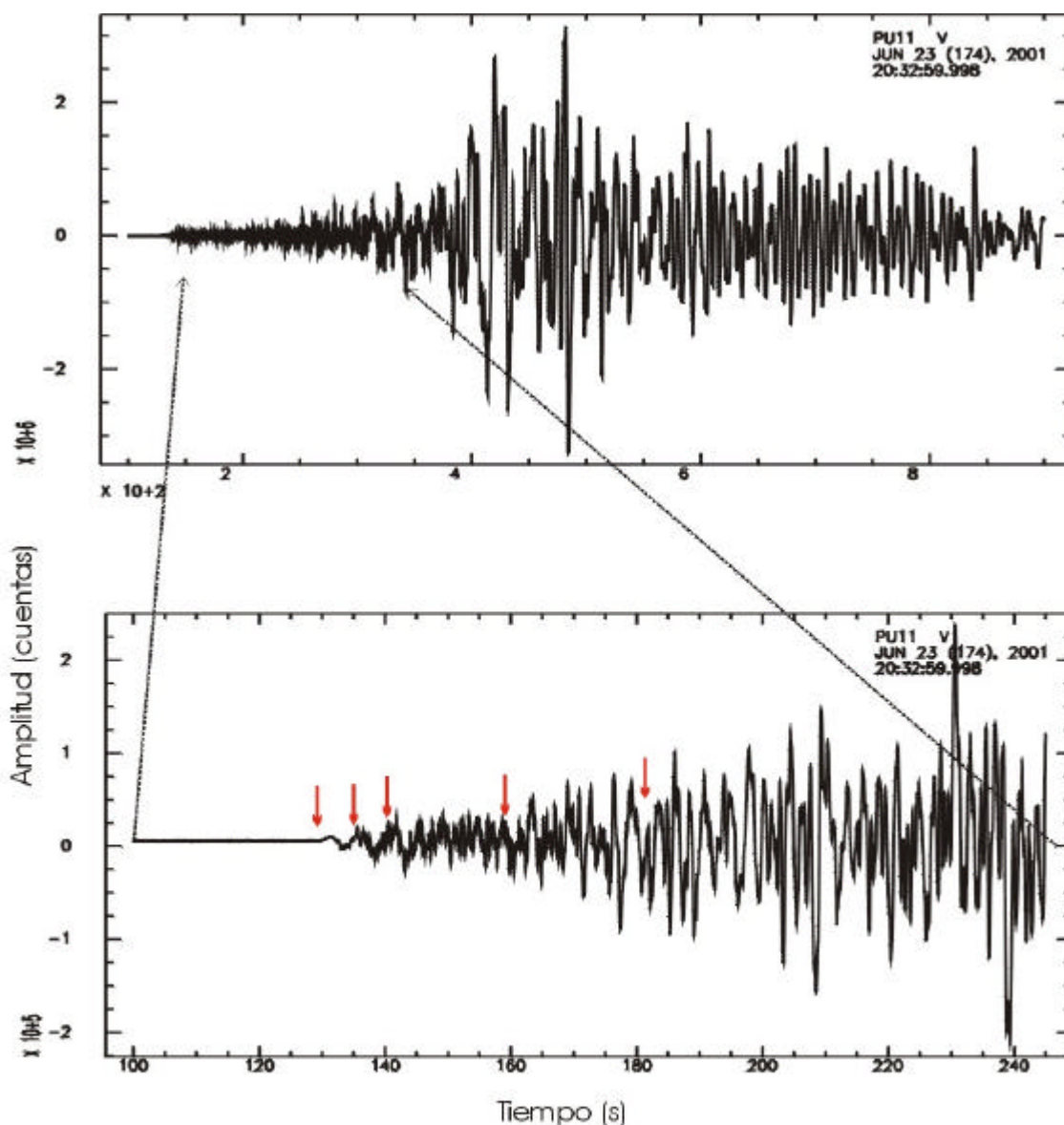


Figura 4.- Registros del terremoto de Arequipa en la estación sísmica de Pucallpa (PUC) componente vertical (Z). En la figura superior se muestra el total del registro del terremoto y en la inferior la correspondiente al grupo de la onda P. En esta figura se muestra con flechas los diferentes grupos de ondas que evidencian la complejidad del proceso de ruptura del terremoto.

Asimismo, los datos del CMT proporcionan para el terremoto de Arequipa del 23 de junio un Momento Sísmico de $1.8E+21$ Nm, equivalente a una magnitud M_w de 7.4.



Figura 5. Mecanismo Focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Se indica la ubicación de 3 replicas principales y los valores de magnitud en diferentes escalas.

3.5. Distribución de Intensidades

El mapa preliminar de distribución de las intensidades regionales, ha sido elaborado partir de la información recopilada vía línea telefónica inmediatamente después de ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de junio. El total de la información ha sido interpretada utilizando la escala Mercalli Modificada. En la Figura 6 se muestra el mapa de isosistas y en el se observa que el terremoto tuvo una longitud de percepción mayor en dirección Sur,

la misma que es coherente con la distribución preliminar de las pocas replicas localizadas a la fecha. El terremoto del 23 de junio fue sentido con intensidades de II en MM hasta el norte del departamento de Lima y por el Sur hasta 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. Como todos los terremotos que ocurren frente a la costa de Sudamérica, las líneas de isosistas siguen una geometría elipsoidal, siendo el eje mayor de la misma paralelo a la línea de costa.

Asimismo, la Figura 6 muestra que las intensidades máximas se presentaron en las localidades de Ocoña, Camaná y Mollendo (VII-VIII en MM), seguidas por la ciudad de Arequipa y las localidades de Aplao e Ilo (VII en MM). En la ciudad de Moquegua y las localidades de Locumba, Toquepala, Coracora, Puquio y Pampacolpa, la intensidad fue de VI en MM; mientras que, en las localidades de Palpa, Nazca, Espinar y Arica en Chile fue de V en MM. Intensidades menores fueron evaluadas en las localidades de Ica, Abancay, Cusco, Puno e Iquique en Chile (IV en MM).

Por otro lado, el Sistema de Defensa Civil informó que durante el terremoto de Arequipa del 23 de junio, se produjo la muerte de aproximadamente 23 personas en las ciudades de Arequipa y Moquegua, así como un gran número de herido y damnificados. Actualmente, se sabe que los daños materiales son muy heterogéneos, siendo estos mayores en las localidades de Ocoña, Camana, Mollendo e Ilo y en las ciudades de Arequipa y Moquegua. Sin embargo, se debe resaltar que la mayor parte de las viviendas afectadas estuvieron construidos de adobe y quincha a excepción de la ciudad de Arequipa, en donde sufrieron daños importantes viviendas de material noble.

3.6.- Otros efectos

Ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de junio y basándose en la información del tamaño del mismo, la Dirección de Hidrografía de la Marina dio la “alarma de maremoto”; sin embargo, pasado alrededor de dos horas y media, esta fue anulada debido a que el nivel medio de mar no mostró cambios importantes. Evidentemente, esta alarma

generó pánico en los habitantes del distrito de la Punta y Callao, los mismos que volvieron a la calma cuando se difundió la noticia de que la alarma quedaba sin efecto.

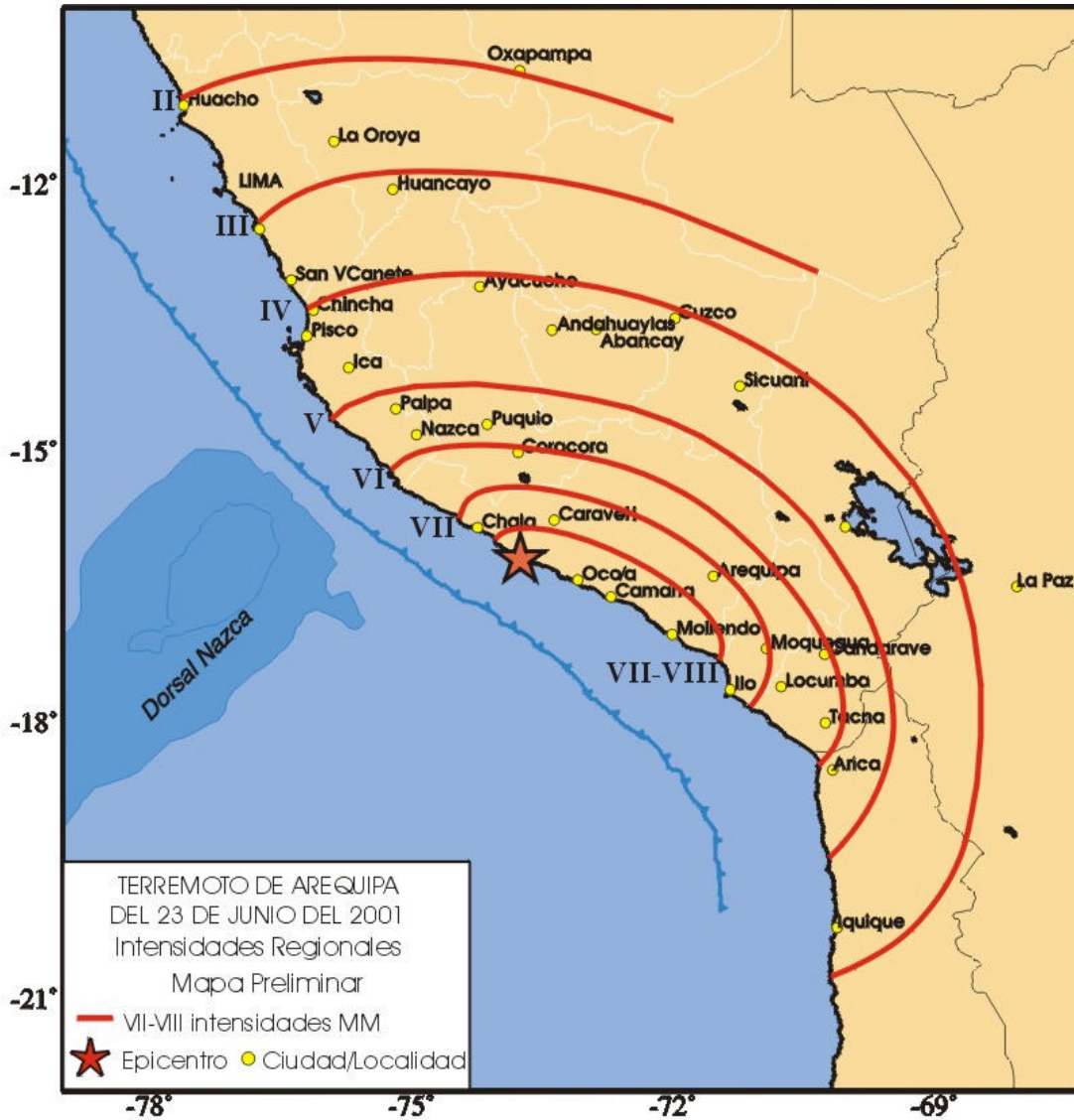


Figura 6. Mapa de intensidades regionales del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001

Información proveniente de la localidad de Camamá, informaron que la mar se retiró alrededor de 50 metros para luego retornar de manera lenta llegando a invadir gran parte de su costa, la misma que en la zona afectada se encuentra prácticamente al mismo nivel.

4.- 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 de pendiente cercana a 30° en dirección NE hasta una profundidad de 300 km aproximadamente (Figura 1). El terremoto de Arequipa del 23 de junio se localizaría en la parte inicial de esta alineación de sismos. El epicentro de este terremoto se ubica entre las localidades de Ocoña y Chala, y sobre la línea de costa.

La complejidad del terremoto de Arequipa del 23 de junio, ha permitido que los cálculos de su tamaño varíen con el tiempo de acuerdo a la mayor información disponible y en función de la escala de magnitud mas apropiada utilizada para cuantificar el real tamaño del mismo. Sin embargo, la magnitud obtenida a partir del momento sísmico ($M_w=7.4$) es próxima a la de 6.9 mb reportada por el IGP.

El terremoto de Arequipa del 23 de junio tendría 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 $N55^\circ$. En general, las características del mecanismo focal sugiere un plano de falla orientado en dirección NW-SE con buzamiento casi horizontal en dirección NE (7°).

La distribución espacial de tres de las replicas de mayor tamaño ocurridas en las primeras 24 horas, sugieren un proceso de ruptura que se propaga en dirección SE sobre una extensión del orden de 270 km. Esta característica es coherente con la distribución de daños o valores máximos de intensidad evaluados en la región Sur de Perú. Las isosistas de intensidad indican que los mayores daños se han producido en todas las ciudades y localidades ubicadas al SE del epicentro del terremoto y menores en dirección NW. Al igual que para el sismo de Nazca ocurrido el 12 de noviembre de 1996, la presencia de la

Dorsal de Nazca fue importante para que la energía del terremoto se irradie en mayor proporción hacia el SE. En ambos casos, al Dorsal de Nazca se comportó como una unidad que atenúa la energía liberada, de esta manera actúa como una gran barrera para la propagación de la ruptura en esa dirección. Hacia el interior del país, la Cordillera de los Andes es el elemento atenuante más importante, de ahí que el terremoto presente valores de intensidad, mayores a lo largo de la línea de costa.

Por otro lado, la experiencia y 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 de Arequipa del 23 de junio, el proceso de ruptura o fricción de placas durante los primeros 10 segundos fue lento y dado el carácter superficial del mismo, este produjo un movimiento horizontal paralelo a la superficie con ligeras ondulaciones de la misma, para que después de aproximadamente 48 segundos se produjeran movimientos mayores debido a que en ese momento, ocurrió la ruptura mayor y por ende la energía liberada se incremento generando mayor destrucción y daño a las diversas localidades distribuidas en dirección SE.

5.- Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todas las personas de las localidades afectadas por el terremoto de Arequipa del 23 de junio, que a través del cable telefónico, respondieron con amabilidad a nuestro cuestionario de preguntas para elaborar el mapa preliminar de intensidades máximas.

6.- Bibliografía

Cahill y Isacks, (1992). J. Geophys. Res., 97, 17503-17529.

Grange et al (1984). J. Geophys. Res., 89, 6139-6152.

Minster y Jordan (1978). J. Geophys. Res., 83, 5331-5354.

Schneider J. y Sacks S. (1987). J. Geophys. Res., 92, 13887-13902.

Tavera H. y Buform E. (2001). Journal of Sesimology, en prensa.