

Grandes Terremotos y Areas de Ruptura en la Región Sur de Perú: Terremoto de Arequipa del 23/06/2001

*Hernando Tavera e Isabel Bernal
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Resumen

El 23 de junio de 2001, la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 8.2Mw. Este terremoto ocurre después de 133 años de silencio sísmico y su área de ruptura cubre solamente el 75% del área fracturada por el terremoto ocurrido en esta misma región en 1868 (9.0Mw). Sin embargo, es posible que el terremoto del 23 de Junio sea el inicio de un nuevo periodo de ocurrencia de grandes terremotos en la región Sur de Perú y Norte de Chile. La ocurrencia de otros terremotos alrededor del área de ruptura de los terremotos de 1868 (Sur de Perú) y 1878 (Norte de Chile) a diferentes niveles de profundidad, sustentan esta hipótesis.

Abstract

On June 23, 2001, an earthquake of magnitude 8.2Mw affected southern Peru. This earthquake occurs after 133 years of seismic silence and its rupture area covers only 75% of the area fractured by the earthquake that took place in this same region in 1868 (9.0Mw). However, it is possible that the June 23 earthquake is just the beginning of a new period of great earthquakes in southern Peru and northern Chile. The occurrence of other earthquakes around the rupture area of the 1868 earthquake (south of Peru) and 1878 (north of Chile), at different depths, support this hypothesis.

Introducción

La sismotectónica del borde Oeste de Sudamérica y por ende del Perú, es dominada por la convergencia de las placas de Nazca y la Sudamericana, la misma que se realiza con una velocidad relativa del orden de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). El reacomodo de las placas da origen a un proceso de compresión típico de fallas inversas y en la cual, la placa Sudamericana se remonta por encima de la placa de Nazca con un ángulo de inclinación que varía entre 25° a 30° y buzamiento en promedio en dirección NE. Este proceso es denominado como Subducción. La fricción que se produce en la interface de ambas placas, es el origen de todos los terremotos de magnitud elevada que ocurren frente a la costa de Perú, siendo los más recientes los de 1966 (Mw=8.1), 1974 (Mw=8.1) y 1996 (Mw=7.7). Otros terremotos se han producido por la deformación interna de la placa de Nazca a niveles superficiales como el de Mayo de 1970 (Mw=7.9) y deformación interna a niveles intermedios como los ocurridos el Octubre de 1988 (6.0Mw) y Abril de 1999 (6.2Mw).

El terremoto ocurrido el 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$), al igual que todos los ocurridos frente a la costa de Perú, tiene su origen en la fricción que se produce en la interface de las placas de Nazca y Sudamérica. Este terremoto, en términos de energía sísmica liberada, es el mayor ocurrido en la última centuria en Perú y el más grande en el mundo desde 1965 en que se produjo el terremoto de Alaska. El epicentro del terremoto del 23 de Junio fue ubicado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Arequipa) y su relación con otros terremotos con el mismo origen, es que su epicentro se localiza en el extremo Norte de una área de aproximadamente 1000 km de longitud que permanecía irrompible desde hace 133 años. Esta área corresponde a las rupturas producidas por los terremotos de 1868 y 1877 y que es conocida como “Zona de Silencio Sísmico”. Estos terremotos son de mayor potencial sísmico que el ocurrido el 23 de Junio.

En este estudio se analiza y evalúa la situación sísmica actual en la que se encuentra la región Sur de Perú y Norte de Chile después de los terremotos de 1868 y 1877, en relación del terremoto ocurrido el 23 de Junio de 2001.

Grandes Terremotos

En el Perú, la distribución de los sismos en superficie y profundidad, permite distinguir claramente la existencia de dos fuentes sismogénicas y si se toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor, estas pueden ser clasificadas en fuente principal y secundaria principalmente para los sismos de foco superficial.

La fuente principal agrupa a todos los terremotos que ocurren, de Norte a Sur, frente a la línea de costa y por lo tanto, considera a los más grandes de los cuales se tiene información histórica o instrumental. Estos terremotos deben su origen al proceso de subducción y son mas frecuentes en el tiempo, así los más importantes ocurridos en los últimos 100 años son:

- .- Región Norte: terremoto de 1916
- .- Región Central: terremotos de 1940, 1942, 1966, 1970, 1974 y 1996.
- .- Región Sur: terremotos de 1913 y 2001.

De todos estos terremotos, el que liberó mayor energía es el ocurrido el 23 de Junio 2001 ($1.3E+24$ ergios); sin embargo, el terremoto ocurrido en 1970 en la región Central de Perú continua siendo el más catastrófico, debido a que el número de víctimas fue de 50000 muertos, 20000 desaparecidos y 150000 heridos. De acuerdo al número de terremotos ocurridos en los últimos 100 años, es evidente que la región Central es la de mayor potencial sísmico. Contrariamente, en la región Sur la no-ocurrencia continua de terremotos indicaría que estos al producirse liberarían mayor cantidad de energía y por ende alcanzarían magnitudes mayores a 8. La historia sísmica de la región Norte es incompleta ya que solo se cuenta con información de la ocurrencia de un solo sismo, de ahí que se asuma la hipótesis que los sismos de magnitud elevada ocurrirían con periodos superiores a los 500 años.

La fuente secundaria, considera a todos los terremotos que ocurren en el interior del país, los mismos que son menos frecuentes y presentan magnitudes moderadas; es decir, menores a 6.5mb. Estos terremotos se distribuyen principalmente, de Norte a Sur, a lo largo de la zona Subandina y están directamente asociados a sistemas de fallas activas que se distribuyen en esta zona y en los altos andes (Tavera y Buforn, 2001). Sin embargo, es necesario mencionar que en el Perú pueden ocurrir terremotos de diversa magnitud a diferentes niveles de profundidad, como el que se produjo cerca del límite Perú-Bolivia el 9 de Junio de 1994 ($M_w=9.0$) a una profundidad de 700 km. Este terremoto libero tanta energía como la que liberan todos los sismos ocurridos durante un año en el mundo. De ocurrir un terremoto de tal magnitud cerca de la superficie ($h < 60$ km), este sería catastrófico

Complejidad de la Ruptura

A la ocurrencia de un terremoto, la propagación de su frente de ruptura sobre el plano de falla, es por lo general heterogénea y muchas veces difícil de describir. Dos modelos han sido desarrollados para explicar la complejidad y heterogeneidad de la fuente sísmica: el modelo de Barreras y el de Asperezas. El primero se define como la parada de la ruptura debido a la presencia de un medio muy resistente como el contacto entre dos tipos de roca o un salto lateral de falla. Este medio limita la dimensión del frente de ruptura, pero si el esfuerzo es continuo es posible saltar la barrera y continuar con la ruptura y al final es posible que resten pequeñas zonas de la falla sin romperse, y

que al hacerlo producirán las réplicas. El modelo de aspereza, es definido como el lugar donde se inicia el proceso de ruptura en un medio muy heterogéneo, debido a que ya hubo terremotos anteriormente, entonces la zona se encontraría libre de esfuerzos. Una idea clara, es que el terremoto se inicia en una zona en donde no se ha producido por un tiempo terremotos, lo que sugiere la presencia de zonas en la cual se esta produciendo una gran acumulación de energía y que son llamadas “Zonas de Silencio Sísmico”. En estas condiciones, el tamaño del terremoto por ocurrir dependerá de las dimensiones de la zona y del tiempo transcurrido desde el último terremoto.

El terremoto ocurrido el 23 de Junio, presento un proceso heterogéneo de ruptura evidenciado por la complejidad de su señal observada en registros de diversas estaciones, así como a partir de la generación de registros teóricos (Tavera, en este informe), distribución espacial de las réplicas (Antayhua et al., en este informe) y mediciones de GPS (Ruegg et al., 2001). Todos estos estudios sugieren que el proceso de ruptura de este fue prácticamente unilateral en dirección SE y con una duración de aproximadamente 100 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas importantes separadas de la primera por 6 y 40 segundos respectivamente. La tercera ruptura y por ende la mayor, se habría producido frente a la localidad de Camaná, coincidiendo con las intensidades máximas observadas y con la ocurrencia de un tsunami de carácter netamente local.

Predicción Sísmica

Uno de los objetivos primordiales de las investigaciones en sismología, es tratar de predecir los terremotos; sin embargo, esta meta debe ser considerada a largo plazo debido a la complejidad de las características de este fenómeno. Actualmente, los resultados más confiables han sido obtenidos a partir del análisis y evaluación de la historia sísmica de una determinada región, información que permite identificar a las zonas sísmicas con mayor y menor potencial, así como conocer su posible influencia en las ciudades. Estas apreciaciones son tomadas en cuenta en el método de Predicción Tectónica, el mismo que a partir de las zonas de “Silencio Sísmico” y fallas activas permite conocer el lugar y el tamaño del terremoto por ocurrir, pero no la fecha del mismo.

En general, los terremotos de magnitud elevada pueden tener periodos de retorno de muchos años y mientras tanto, las zonas comprometidas son consideradas como “Zonas de Silencio Sísmico”. En el caso de Sudamérica y por ende en el Perú, la distribución de los grandes terremotos ocurridos en los últimos 100 años y sus respectivas áreas de ruptura muestran claramente donde se ubican las zonas de silencio sísmico, las mismas que deberán ser afectadas por futuros terremotos en algún momento en el tiempo.

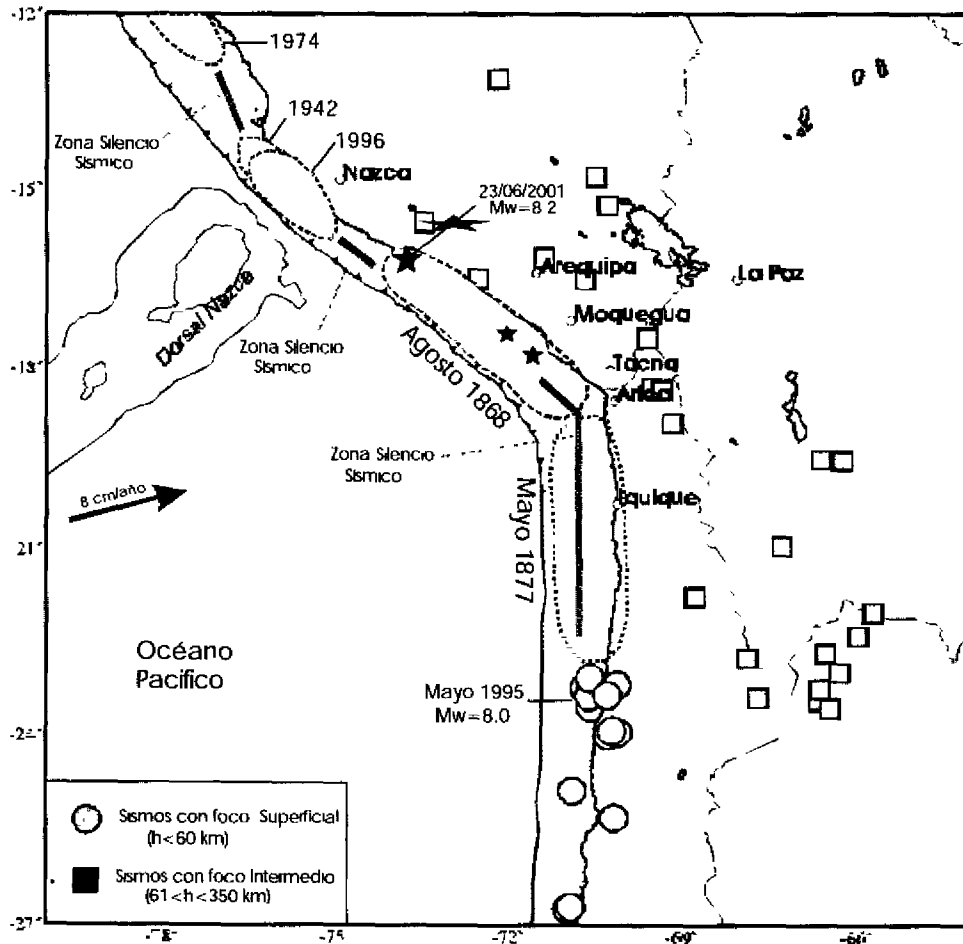


Figura 1. Distribución de las áreas de ruptura de grandes terremotos asociados al proceso de subducción y ocurridos en la región sur de Perú y norte de Chile durante los siglos XIX y XX. La zona sombreada de gris oscuro corresponde al área de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (estrella grande) y su serie de replicas (replicas mayores con estrellas pequeñas).

En el Perú, las zonas más relevantes y comprometidas para la ocurrencia de terremotos son (Figura 1): Zona de 150 km de longitud que se ubica entre las áreas de

ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996, y zona de 500 km de longitud que prácticamente considera toda la región Sur de Perú. La zona de mayor longitud es asociada al área de ruptura del gran terremoto de 1868 (9.0Mw), el mismo que produjo intensidades del orden de IX (MM) y un tsunami con olas que alcanzaron alturas de 16 metros (Silgado, 1978). En el año 1877 la región Norte de Chile fue afectada por un terremoto de gran magnitud (Mw=9.0) que continuó con la ruptura del área iniciada por el terremoto de 1868 hasta alcanzar una longitud final de 1000 km aproximadamente.

Tal como se ha descrito, analizado y discutido en los diferentes artículos de este informe, el 23 de Junio de 2001 y después de 133 años, la región Sur del Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 8.2Mw causando muerte y destrucción en toda la región Sur de Perú y Norte de Chile. Este terremoto tuvo su epicentro a 82 km al NW de la localidad de Ocoña y de acuerdo a los resultados obtenidos a partir del análisis de las formas de onda registradas a diferentes distancias, a la generación de sismogramas teóricos, distribución de réplicas y mediciones de GPS, presentó un proceso de ruptura muy heterogéneo con eminente propagación en dirección SE. El tiempo promedio de duración de la ruptura fue de 100 segundos, tiempo durante el cual se habría producido hasta tres rupturas importantes, siendo la tercera la de mayor tamaño y con posible epicentro próximo a la localidad de Camaná. La distribución espacial de las réplicas producidas durante un periodo de 30 días muestra una longitud de ruptura del orden de 370 km en dirección SE.

En la Figura 1, se presenta la ubicación epicentral y el área de ruptura del terremoto del 23 de Junio, así como de los terremotos de 1868, 1877, 1942, 1974 y 1996, además de los epicentros de los terremotos de magnitud mb igual o mayor a 6.0 ocurridos entre 1990 y 2001. Obsérvese que el epicentro del terremoto del 23 de Junio se ubica en el extremo Norte del área de ruptura del terremoto de 1868 y el total de las réplicas ocurridas en los 30 días siguientes (incluye las 3 réplicas de magnitud mayor) se distribuyen sobre un área que cubre aproximadamente el 75% del área de ruptura del terremoto de 1868. Esta característica indicaría que el próximo terremoto a producirse debe comprometer a esta área y posiblemente parte del área asociada al terremoto de 1877, hipótesis que no permitiría tener idea del tamaño del terremoto a ocurrir, pero este debe ser al menos comparable o mayor al ocurrido el 23 de Junio.

La distribución espacial de los terremotos de magnitud mb igual o mayor a 6.0 ocurridos entre 1990-2001 (sin considerar a los terremotos de 1996 y 2001), muestran que la mayor deformación y por ende la mayor liberación de energía se ha producido a profundidades mayores a 60 km y estos prácticamente bordean a las áreas involucradas en los procesos de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877. Asimismo, en la Figura 1 se observa una gran acumulación de sismos con foco intermedio al Este del epicentro del terremoto de Chile de 1995, de manera similar en la región Sur de Perú la mayor concentración de este tipo de sismos se ha producido entre las latitudes de 16° y 19° Sur coherente con parte del área afectada por el terremoto del 23 de Junio, restando romperse entre las latitudes 17° y 19° Sur. A fin de evaluar esta hipótesis, en la Figura 2 se muestra las curvas de las isosistas de los terremotos de 1868 y 2001 y en ella se puede observar que el área correspondiente a las isosistas VII y VIII (MM) del terremoto de 1868, es al menos dos o tres veces mayor que las del terremoto de 2001, lo cual sugiere que la energía equivalente a la liberada por el terremoto de 1868 no ha sido liberada en su totalidad por el terremoto de 2001.

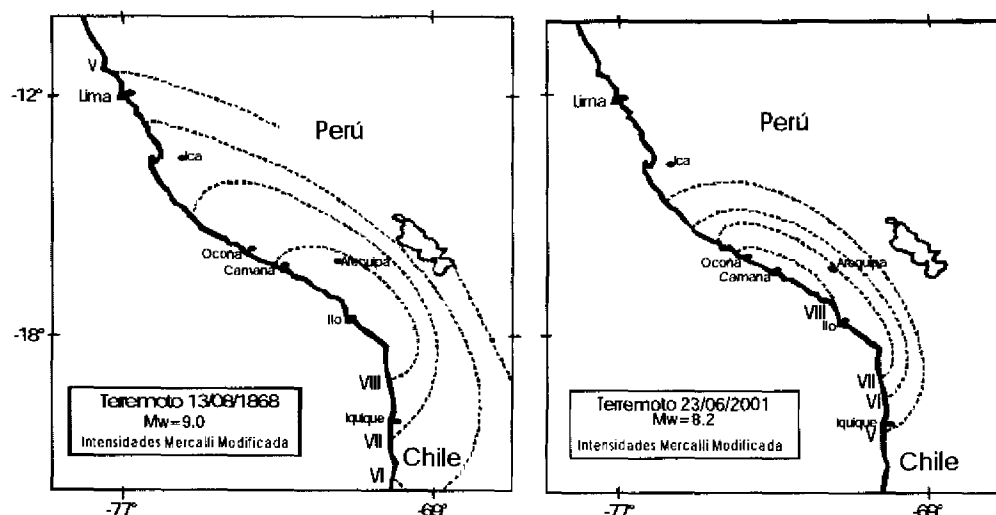


Figura 2. Mapas de isosistas regionales para los terremotos de Agosto de 1868 (Kausel, 1986) y Junio de 2001 (Tavera et al, 2001).

Por otro lado, también es posible evaluar los periodos de retorno de grandes terremotos en el borde Oeste de Perú ($M > 7.0$) y principalmente para la región Sur a

partir de la distribución epicentral y longitudes de ruptura de los terremotos ocurridos en los últimos 500 años, tal como se muestra en la Figura 3.

- En la *región Norte*, el único terremoto para el cual se dispone de información ocurrió en 1619 y después de este, la región Norte no ha vuelto a experimentar la ocurrencia de un nuevo terremoto. En esta situación, se estima que los periodos de retorno para los terremotos de magnitud elevada son mayores a 500 años.
- En la *región Centro*, se identifica dos agrupamientos de sismos que han generado longitudes de ruptura entre 100 y 350 km. El primer grupo considera los sismos ocurridos entre los años 1650 y 1750 haciendo un total de 100 años, posteriormente se observa un periodo de 190 años de calma o silencio sísmico, para luego producirse hasta 6 terremotos en un periodo de 60 años y a partir de 1996, toda esta región permanece en calma.

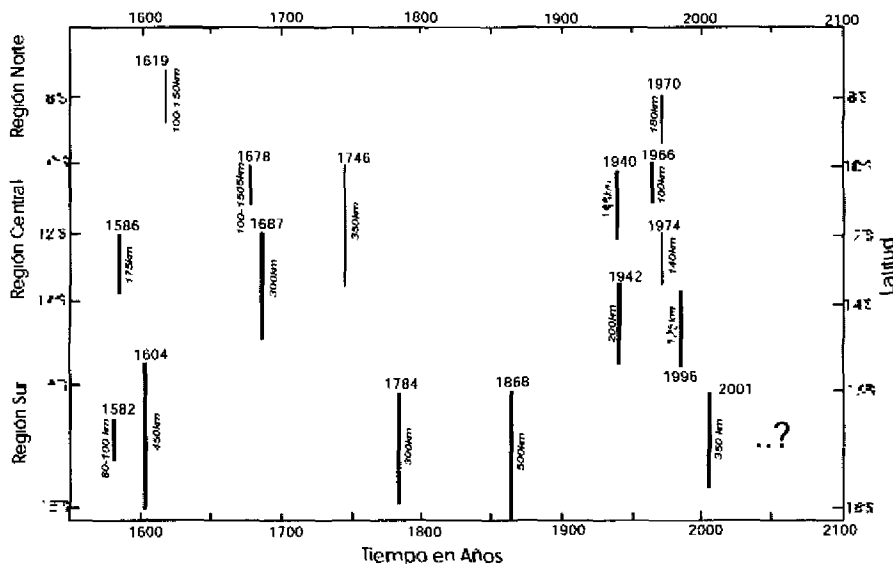


Figura 3 Distribución de los grandes terremotos en el borde Oeste de Perú en función de su ubicación en latitud y fecha de ocurrencia (según Dorbath et al, 1990).

- En la *región Sur*, los terremotos se agrupan definiendo también la presencia de dos agrupamientos. El primer grupo considera los terremotos ocurridos hasta el año 1610 y a partir de esta fecha se observa un periodo de calma de 180 años, para luego ocurrir hasta dos grandes terremotos en un periodo de 84 años. De estos terremotos el mejor documentado y de mayor tamaño es el ocurrido en 1868; mientras que, las

coordenadas epicentrales del terremoto de 1784 son inciertas, aunque se sabe que produjo importantes daños en esta región. Después del terremoto de 1868, le sigue un periodo de calma de 133 años que se interrumpió con la ocurrencia del terremoto del 23 de Junio de 2001. Si se considera que este último terremoto es de tamaño menor al ocurrido en 1868, es posible que este sea el inicio de un nuevo periodo de ocurrencia de grandes terremotos en esta región.

Conclusiones

La zona de silencio sísmico presente en la región Sur de Perú y Norte de Chile fue interrumpida con la ocurrencia, en primer lugar, de dos terremotos con magnitudes M_w de 8.0 y 7.7 y epicentros ubicados exactamente en los extremos Sur y Norte de las áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877. Para estos terremotos se ha propuesto un periodo de retorno del orden de 100 años. El terremoto del 23 de Junio de 2001 con epicentro y área de ruptura ubicada sobre el extremo Norte del área de ruptura del terremoto de 1868, sugiere que en esta región se ha iniciado un periodo de recurrencia de grandes terremotos. Por lo tanto, el potencial sísmico de la región se ha incrementado considerablemente.

La situación actual muestra que al menos existe en la región Centro y Sur de Perú, tres zonas potencialmente sísmicas. La primera de 150 km de longitud se ubica entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996, la segunda de 90 km de longitud entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1942/1996 y 2001; mientras que, la tercera considera una zona de aproximadamente 700 km de longitud ubicada entre las áreas de ruptura de los terremotos de 2001 (región Sur de Perú) y de 1995 en la región Norte de Chile.

Bibliografía

- DeMets et al., (1995). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.
- Dorbath et al., (1990). *Bull. Soc. Sism. Am.*, 80, 551-576.
- Ruegg et al., (2001). *Seism. Res. Lett.* 72, 673-678.
- Silgado, (1978). *Boletín Serie C, Ingeomin, Lima-Perú*, 131 pp.
- Tavera y Buforn, (2001). *Journal of Seismology*, (in press).

