

Anomalías del valor de b y el Terremoto de Arequipa del 23 Junio de 2001

Hernán Heras y Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este estudio se analiza las características de la distribución espacial de los sismos con foco superficial ($h \leq 60\text{km}$) ocurridos a lo largo de la costa de Perú entre 1964 y 1999 ($M_s \geq 3.5$) a fin de evaluar la existencia de áreas con valores anómalos de b (asperezas) cerca o próximo donde ocurrió el terremoto del 23 de Junio del 2001. Para tal fin, se realiza una aplicación de la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997) para el cálculo de los valores de b y periodos de retorno de grandes terremotos. Los resultados muestran la presencia de hasta siete (7) asperezas distribuidas, de Norte a Sur, a lo largo de la costa de Perú. De estas asperezas la más importante, debido al tiempo transcurrido (mas de 100 años), se ubica en el borde Oeste de la región Sur de Perú y cuya geometría y ubicación coincide con el epicentro y área de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Según estos resultados, el terremoto de Arequipa fue predecido por la metodología aplicada en este estudio.

Abstract

This paper analyses the characteristics of the spatial distribution of the seismic events with superficial focus ($h \leq 60\text{km}$) that occurred along the coast of Peru between 1964 and 1999 ($M_s \geq 3.5$) in order to evaluate the existence of areas with anomalous b values (asperities) near or close to the location of the June 23, 2001 earthquake. For that purpose, we apply the methodology proposed by Wiemer and Wyss (1997) to calculate the b values and return periods of large earthquakes. Results show the presence of seven asperities distributed, from north to south, along the coast of Peru. Among these asperities the most important, due to the time elapsed (over 100 years), is the one located on the west border of the southern region of Peru and whose geometry and location coincides with the epicenter and rupture area of the June 23, 2001 Arequipa earthquake. According to these results, the Arequipa earthquake was predicted by the methodology applied in this study.

Introducción

En el borde oeste de Perú, son frecuentes los terremotos de magnitud elevada con origen en el proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental con una velocidad del orden de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). Como resultado de la continua fricción entre ambas placas, en los últimos 60 años la zona costera de Perú ha sido testigo de 6 grandes terremotos (1940, 8.1Mw; 1942, 8.2Mw; 1966, 7.7Mw; 1970, 8.0Mw; 1974, 7.9Mw y 1996, 7.7Mw), los mismos que tuvieron longitudes de rupturas entre 75 y 200 km. La distribución espacial de estas rupturas ha permitido identificar áreas que no han experimentado ruptura alguna, siendo estas denominadas como "Zonas de Gap Sísmico". De estas zonas las más importantes se ubican frente a la línea de costa entre Arequipa y Tacna, y la otra entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996. Desde el punto de vista de la complejidad de los procesos de ruptura

asociados a un terremoto, los Gaps Sísmicos presentes en una zona de subducción son explicados mediante el modelo de Asperezas (Kanamori, 1981 y Aki, 1984). Este modelo se sustenta sobre la hipótesis de que los terremotos de magnitud elevada tienden a repetirse en el mismo lugar después de un determinado periodo de tiempo. Por lo tanto, en el desarrollo del presente estudio el término “gap sísmico” será reemplazado por el de “Aspereza”.

Las asperezas pueden ser identificadas a partir de la distribución espacial de los sismos de acuerdo a un determinado rango de magnitud, distribución de las áreas de ruptura de grandes terremotos y estudios estadísticos utilizando catálogos sísmicos. Recientemente, Wiemer y Wyss (1997) han propuesto una nueva metodología para identificar la presencia de Asperezas basados en la distribución frecuencia – magnitud de los sismos ($\log N = a - bM$). Estos autores, señalan que las Asperezas se caracterizan por presentar valores de b menores a 0.6 ($b \leq 0.6$), siendo sus dimensiones proporcionales a las del área de ruptura y a la magnitud del terremoto. Además, la metodología permite conocer los periodos de recurrencia de los sismos asociados a las asperezas.

Recientemente, Heras (2002) realiza una aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss para evaluar la presencia de asperezas en la zona de subducción de Perú utilizando una base de datos previamente calificada que considera sismos ocurridos entre el periodo 1964-1999, todos con magnitud M_s igual o mayor a 3.5. Parte de los resultados obtenidos por Heras (2002), permitió identificar si existió una aspereza o área con valores anómalos de b cerca o próxima de la zona en donde ocurrió el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_s=7.9$; $M_w=8.2$), los mismos que son resumidos en el presente estudio.

Datos

Para la aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss (1997), se utiliza la base de datos del Catálogo Sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para el periodo de 1964 a 1999, debidamente complementado con los catálogos del National Earthquake Information Center (NEIC) y de Endghal (Engdhal et al., 1997). Esta base de datos considera 1,200 sismos con foco superficial ($h < 60$ km) y una magnitud M_s mínima de

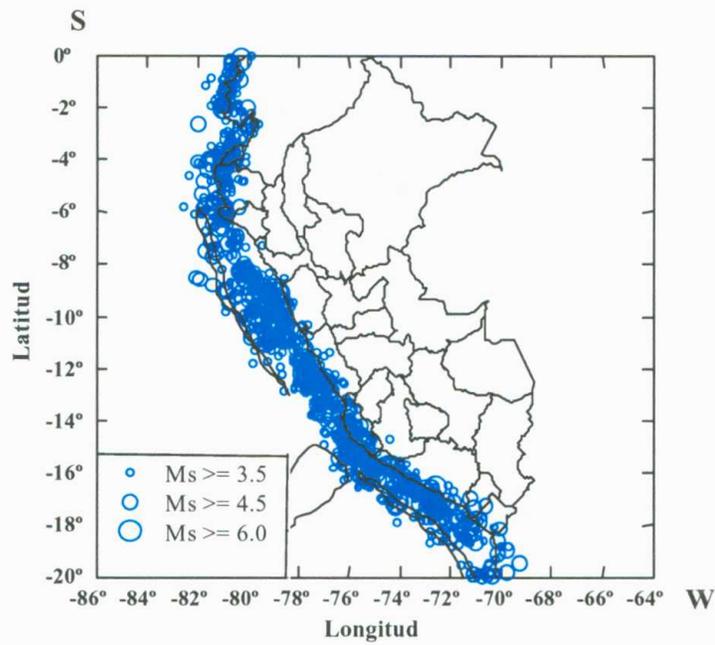
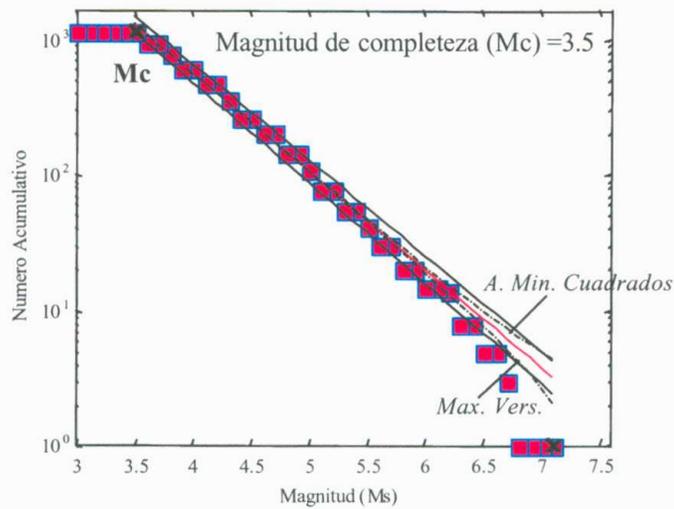


Figura 1. Mapa de sismicidad con foco superficial presente en el borde Oeste de Perú para el periodo 1964-1999 ($M_s \geq 3.5$)



Valor de b (A. Min Cua. $M_c \geq 3.5$): -0.726 ± 0.04 , Valor a = 5.6591

Valor de b (Max Ver. $M_c \geq 3.5$): -0.657 ± 0.017 , Valor a = 5.3672

Figura 2. Completitud de la base de datos en función del número acumulativo de sismos y la magnitud M_s . Los valores de b y a en el extremo inferior de la figura corresponde a los ajustes de mínimos cuadrados (línea discontinua) y máxima verosimilitud (línea negra y roja).

3.5, tal como se muestra en las Figuras 1 y 2. La restricción de los datos en cuanto a su nivel máximo de profundidad, es debido a que se estima que a la profundidad de 60 km se encuentra el límite de contacto entre las superficies de las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso de subducción.

Procedimiento

Para el cálculo de los valores a y b a partir de la relación $\log N = a - bM$, se procedió en primer lugar a crear una malla o grilla sobre el área de estudio, de modo que se pueda determinar la distancia en grados existentes entre los puntos de cada nodo de la celda (espaciado de la grilla). En segundo lugar y conocida la distancia entre los nodos, se estima la longitud del radio de muestreo de cada nodo. Con estos parámetros, la curva acumulativa del número de sismos es calculada para cada volumen esférico de radio con origen en el vértice de cada celda. A partir de esta curva, los valores a y b pueden ser obtenidos con los métodos de máxima verosimilitud ó mínimos cuadrados (Figura 2).

De acuerdo a la distribución espacial de los sismos considerados en este estudio, se ha creído conveniente crear una grilla espaciada en 10 km (0.1°). Asimismo, la historia sísmica muestra que los terremotos de magnitud elevada ocurridos en el borde Oeste de Perú han producido áreas de ruptura con radios mayores a 150 km (radio de muestreo), de ahí que este valor sea considerado como dato de entrada para el cálculo de b . Finalmente, los valores de b son estimados para cada volumen esférico y representados en un rango de colores que va desde el azul para los valores bajos (valores anómalos de b) hasta el rojo para los valores altos.

Para el cálculo de los periodos de recurrencia de los terremotos asociados a las asperezas, se utiliza la siguiente relación (Wiemer y Wyss, 1997):

$$\Pr(M_{max}) = \Delta T / 10^{(a-bM)}$$

donde, ΔT es el periodo de datos que se ha considerado en el estudio, \Pr el periodo de recurrencia y M_{max} la magnitud del sismo para el cual se desea conocer su periodo de recurrencia.

Resultados e Interpretación

En la Figura 3, se muestra los resultados obtenidos para la zona de subducción de Perú. En esta figura se observa que los valores anómalos de b han permitido identificar la presencia de hasta siete (7) asperezas, las mismas que son delimitadas por líneas discontinuas. La ubicación geográfica de estas asperezas coincide con las áreas afectadas en el pasado por la ocurrencia de grandes terremotos; por lo tanto, es posible que estas sean el origen de otros terremotos con las mismas características en cuanto a su ubicación epicentral y tamaño (magnitud).

De estas asperezas, una de las más importantes, debido al periodo de tiempo transcurrido (más de 100 años), es la que se ubica en la región Sur de Perú (norte del departamento Arequipa) entre la línea de fosa y la costa con un área de $350 \times 150 \text{ km}^2$ aproximadamente. Esta aspereza presenta periodos de retorno del orden de 75 años, lo cual indica que la región estaba propensa a ser afectada por un terremoto con magnitud mínima de 7.2 Ms desde el año 1943, debido a que el último gran terremoto ocurrido en la región Sur fue en 1868 (9.0Ms). La existencia de esta aspereza fue confirmada con la ocurrencia del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (7.9Ms, 8.2Mw) y cuyo epicentro se ubica en el extremo norte de la aspereza (Figura 4). Si se considera que el proceso de ruptura del terremoto se desarrollo de manera unilateral en dirección SE, tal como sugiere Tavera et al., (2001), el área correspondiente a la aspereza es prácticamente la misma que la obtenida para el terremoto del 23 de Junio a partir de la distribución de replicas (Antayhua et al., en este informe); es decir, $370 \times 150 \text{ km}^2$. Estas características sugieren que el terremoto de Arequipa del 23 de Junio fue prácticamente pronosticado por el método propuesto de Wiemer y Wyss (1997).

El mapa de periodos de retorno de la Figura 4 permite corroborar la ubicación y la geometría de otras asperezas presentes en el borde Oeste de Perú con periodos de retorno del orden de 50 años.

Conclusión

La distribución de valores de b , junto con la estimación del periodo de recurrencia local para terremotos de magnitud elevada proporciona una importante información de

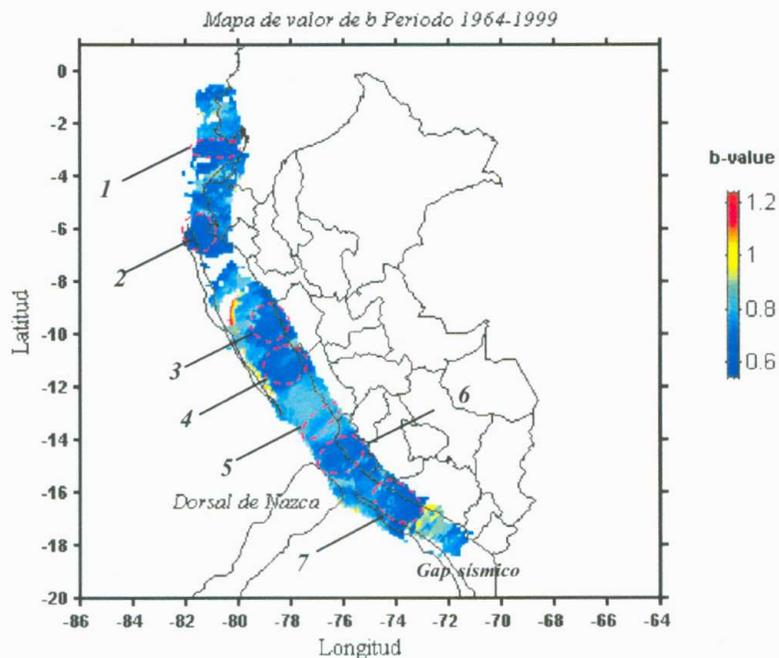
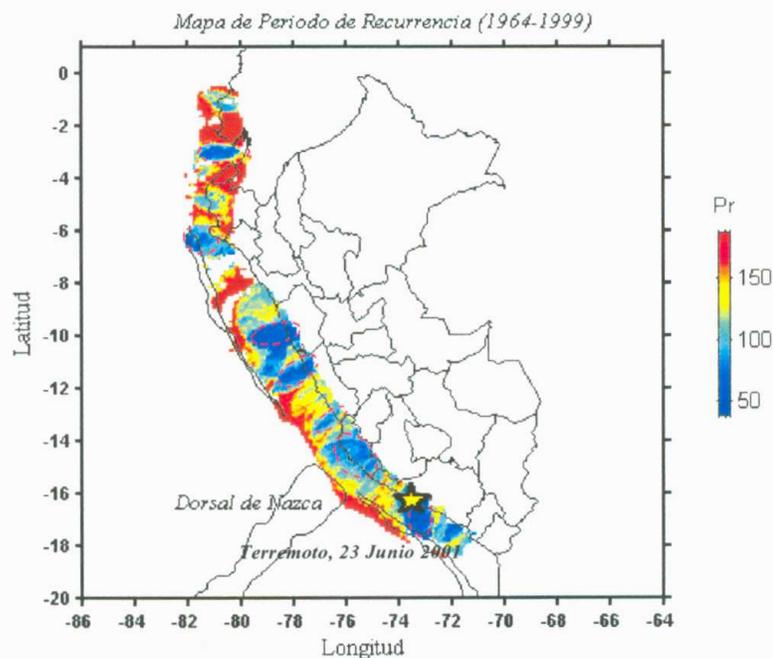


Figura 3. Mapa de distribución de valores de b . Los números indica las áreas identificadas como "gap sísmico". El área 7 corresponde a la aspereza asociada al terremoto del 23 de Junio de 2001.



*Figura 4. Mapa de periodos de recurrencia para terremotos con $M_s > 7.0$.
La estrella indica el epicentro del terremoto del 23 de Junio de
2001 y el círculo con líneas rojas el área total de ruptura.*

Perú, se ha identificado un número de siete asperezas siendo la más importante, por el periodo de tiempo transcurrido (más de 100 años), la que se ubica al norte de la región Sur de Perú. La ubicación y las dimensiones de esta aspereza coincidió con la ubicación del epicentro y área de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001 ($M_s=7.9$). En estas condiciones, la ocurrencia de este terremoto fue puesto en evidencia con la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997).

Bibliografía

- Aki, (1984). Jour. Geophys. Res. 89, 5867-5872.
- DeMets et al., (1990). Geophys. Jour. Int., 101, 425-478.
- Engdahl et al., (1997). Bull. Seism. Soc. Am. 88, 722-743
- Gutenberg y Richter, (1944). Bull. Seism. Soc. Am 34, 185-188.
- Heras, (2002). Tesis de grado. UN San Agustín - Arequipa. 130 pp.
- Kanamori, (1981). Eathquake Prediction. International Review; Maurice Ewing Ser., Ed. D.W., Simpsn P.G Richards, 4, 1-19, Washintong. D.G. Am. Gefhys. Union.
- Tavera y Buforn, (1998). Física de la Tierra, UCM. 10, 187-219.
- Tavera y Agüero, (2000). Centro Nacional de Datos Geofisicos – Sismología IGP, Lima, Perú, 400pags.
- Tavera et al., (2001). Journal of. Seismology, (in press).
- Wiemer y Wyss, (1997). Jour. Geophys. Res. 102, 15115-15128.