

LOCALIZACIÓN DE ÁREAS PROBABLES A SER AFECTADAS POR GRANDES SISMOS EN EL BORDE OESTE DE PERÚ: ESTIMACIÓN A PARTIR DE PERÍODOS DE RETORNO LOCAL BASADO EN LA DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE “*b*”

Hernán HERAS & Hernando TAVERA

Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología. Instituto Geofísico del Perú
E-mail: heras@axil.igp.gob.pe; jtavera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

Se realiza un análisis espacial de la sismicidad ocurrida a lo largo del borde Oeste de Perú (0°S - 20°S), con la finalidad de identificar las áreas con mayor y menor probabilidad para la ocurrencia de un sismo de magnitud elevada en el futuro. Para tal objetivo se utiliza una base de datos que corresponde a la extraída de los catálogos del Instituto Geofísico del Perú y de Engdahl para el período 1964-1999 con un umbral mínimo para la magnitud 3.5 Ms. A partir de esta base de datos se calcula los valores anómalos de “*b*” ($b < 0.6$) y períodos de retorno local para sismos de una determinada magnitud utilizando la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997). La distribución espacial de los valores anómalos de *b* y períodos de retorno permite configurar la geometría de las asperezas. Los resultados obtenidos muestran la presencia de siete (7) asperezas con diferentes dimensiones y con períodos de retorno entre 50 y 150 años para sismos con magnitud $M_s \geq 7.2$. Las asperezas de mayor tamaño se localizan frente a la costa de Arequipa (17°S - 18°S), costa de Ancash (10°S - 11°S) y costa Norte de Lima (12°S - 13°S). Asperezas de un menor tamaño y resolución se localizan entre el límite de Lima e Ica (13.5°S - 14°S), costa de Ica (15°S - 16°S), costa Sur de Piura (6.5°S - 7°S) y en el límite de Perú y Ecuador (2.5°-3°S). De acuerdo a los resultados, estas zonas serían las que presentan la mayor probabilidad de ser afectadas por un sismo en el futuro.

ABSTRACT

In this study is accomplished a spatial analysis of the seismicity locate in the West border of Peru (0°S - 20°S), in order to identify the areas with greater and smaller probability of occurrence of large earthquakes in the future. The data used is extracted from the catalogues of the Geophysical Institute of Peru and of Engdahl for the period 1964-1999. The minimal magnitude is 3.5 Ms. The data permit to calculate the anomalous values of «*b*» ($b < 0.6$) and local return periods for earthquakes of a determines magnitude using the methodology proposed by Wiemer and Wyss (1997). The spatial distribution of the anomalous values of *b* and local return periods permit to configure the asperities geometry. The obtained results show the presence of seven (7) asperities with different dimensions and with return periods between 50 and 150 years for earthquakes with magnitude $M_s \geq 7.2$. The greater asperities are located the coast along of Arequipa (17°S - 18°S), coast of Ancash (10°S - 11°S) and northern coast of Lima (12°S - 13°S). Asperities of smaller size and resolution are located between the limit of Lima and Ica (13.5°S - 14°S), coast of Ica (15°S - 16°S), southern coast of Piura (6.5°S - 7°S) and in the boundary between Peru and Ecuador (2.5°-3°S). According to the results, these zones would present the higher probability to be affected by an earthquake in the future.

INTRODUCCIÓN

El borde Oeste de Perú se caracteriza por ser una de las regiones de mayor potencial sísmico en el mundo y en ella, es frecuente la ocurrencia de sismos de magnitud elevada (Tavera y Bufo, 1998), los mismos que tienen su origen en el proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental y cuyo proceso se realiza con una velocidad del orden de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). En los últimos 60 años, el borde Oeste de Perú ha sido testigo de la ocurrencia de siete (7) grandes sismos

(1940, 8.1Mw; 1942, 8.2Mw; 1966, 7.7Mw; 1970, 8.0Mw; 1974, 7.9Mw y 1996, 7.7Mw; 2001, 8.2Mw), los mismos que tuvieron longitudes de ruptura entre 75 y 200 km. La distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos grandes ha permitido identificar la existencia de 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 entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996. Desde el punto de vista de la complejidad de los procesos de ruptura

asociados a un sismo, los Gaps Sísmicos presentes en una zona de subducción son explicados mediante el modelo de asperezas (Kanamori, 1981 y Aki, 1984), el mismo que sustenta la hipótesis de que los sismos de magnitud elevada tienden a repetirse en el mismo lugar después de un determinado período de tiempo. 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 sismos 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 sismo. Además, la metodología permite conocer los períodos de recurrencia de los sismos asociados a las asperezas.

En este estudio se realiza una aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss para evaluar la presencia de asperezas en el borde Oeste de Perú utilizando una base de datos previamente calificada que considera sismos ocurridos entre el período 1964-1999, todos con magnitud M_s igual o mayor a 3.5. El objetivo principal consiste en identificar la presencia de asperezas a partir de la distribución espacial de los valores anómalos de " b " y los períodos de recurrencia de los sismos asociados a las asperezas. Asimismo, se pretende probar si las asperezas identificadas mediante períodos de recurrencia local coinciden con las propuestas a partir de la distribución de las áreas de ruptura de sismos históricos.

MÉTODO

Para el cálculo de los valores de a y b , se utiliza la relación frecuencia - magnitud de los sismos definida por:

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

donde, N es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M .

A partir de la relación (1) se puede estimar el período de tiempo necesario para que se produzca un sismo con magnitud M_{max} utilizando la siguiente ecuación:

$$\Pr(M_{max}) = \Delta T / 10^{(a - bM_{max})} \quad (2)$$

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

Los parámetros b y $\Pr(M)$ pueden ser calculados a partir de la técnica de grillado introducida por Wiemer (1996) y codificado en el programa ZMAP (Wiemer y Zuñiga, 1994). De acuerdo a Wiemer (1996), sobre el área de estudio se procede a crear una malla o grilla de modo

que se conozca la distancia existente entre los puntos de cada nodo de la celda o espaciado de la grilla (dada en grados), además de determinar el radio de muestreo a partir del vértice de cada celda (radio en km). Con estos parámetros de entrada, la curva acumulativa del número de sismos es calculada para cada volumen de acuerdo a la longitud del radio de muestreo contiene un determinado número de celdas y a la vez, estas tienen una cantidad suficiente de sismos para realizar un buen cálculo de b . A partir de la curva de frecuencia-magnitud (ecuación 1), los valores a y b pueden ser obtenidos utilizando los métodos de máxima verosimilitud ó ajuste de mínimos cuadrados.

El espaciado en cada grilla y el radio del volumen son muy importante en el cálculo de los valores de b ; por lo tanto, estos valores deben ser tomados a partir de las características sísmicas de la región que se estudia y de la densidad de los datos contenidos en el catálogo. El tamaño de la grilla condiciona el número de sismos que serán utilizados en el cálculo del valor de b ; mientras que, el radio de volumen o muestreo es proporcional a las dimensiones de la aspereza que se desea localizar. En consecuencia, si r es menor que las dimensiones de la aspereza existente, el método estima correctamente la extensión de la anomalía (valor bajo de b), si esta existe. Si r es más grande que la aspereza existente, los datos sísmicos de la aspereza y sus alrededores se combinarían, reduciendo la amplitud de la anomalía de b y esto afectaría en la estimación del período de recurrencia de la aspereza. Por lo tanto, se debe considerar valores óptimos para estos parámetros a fin de realizar un estudio significativo del valor de b y al mismo tiempo obtener resultados aceptables para toda la zona de estudio.

La información disponible sobre las características de los procesos de ruptura de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú, ha permitido considerar que todos presentan en promedio longitudes de ruptura del orden de 150 a 200 km (Figura 1), principalmente los sismos ocurridos en los últimos 100 años (Heras, 2002). Por lo tanto, se ha visto por conveniente considerar un radio de muestreo de 150 km y de acuerdo a la densidad de los datos disponibles se han creado grillas con espaciado de 10km (0.1°), de tal manera que en cada volumen se cuente como mínimo de un total de 40 sismos. Para la presentación de los resultados, el valor de b estimado para cada volumen y para cada celda toma un determinado color, siendo azul para los valores bajos de b (anómalos) y rojo para los valores altos.

Las asperezas, según Wiemer y Wyss (1997) se caracterizan por presentar valores anómalos de b ($b < 0.6$) en la relación frecuencia – magnitud de los sismos, contrastando con valores altos presentes en otros segmentos de la superficie de contacto de placas. Es decir, los esfuerzos se acumularían mayormente dentro de la misma aspereza; mientras que, en sus alrededores serían menores debido a que presentarían menor resistencia a la ruptura. Por lo tanto, los procesos físicos que se desarrollan dentro de la aspereza controlarían el tiempo de ocurrencia del sismo de magnitud elevada.

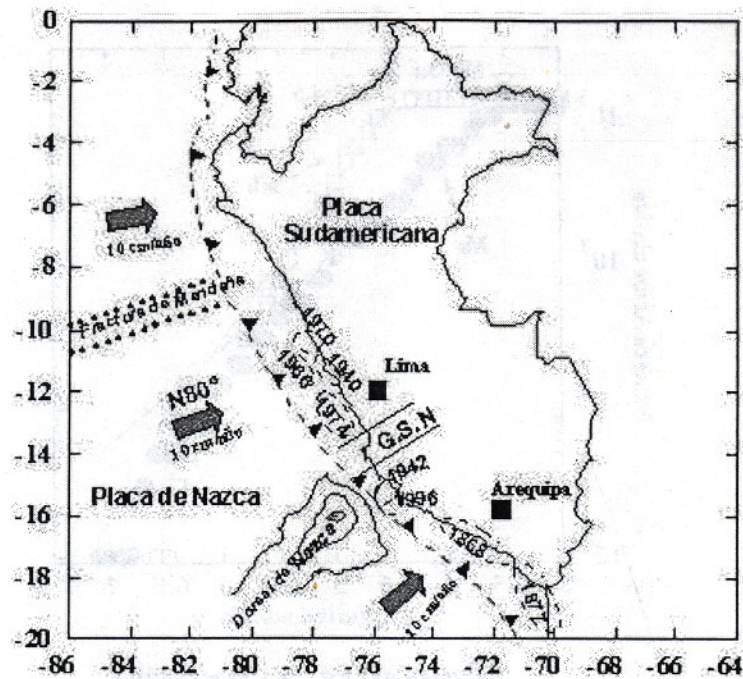


Figura 1: Mapa de áreas de ruptura para los grandes terremotos ocurridos en el borde Oeste de Perú. GSN, Gap sísmico de Nazca. Las flechas indican la dirección y velocidad de desplazamiento de la placa de Nazca.

DATOS

Para la aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss (1997) al borde Oeste de Perú, se utiliza la base de datos del catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2000) debidamente complementado con la información contenida en los catálogos del National Earthquake Information Center (NEIC) y de Engdhal et al, (1997). Esta base de datos considera 1,200 sismos con foco superficial ($h \leq 60$ km) y una magnitud mínima de 3.5

M_s ocurridos entre 1964 y 1999 (Figura 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 Sudamericana dentro del proceso de subducción (Heras, 2002).

En general, el valor de b promedio a nivel mundial es igual a 1 (Frohlich y Davis, 1993); sin embargo, este va a depender básicamente de la definición de la escala de magnitud. En el Sur de California, la definición original de

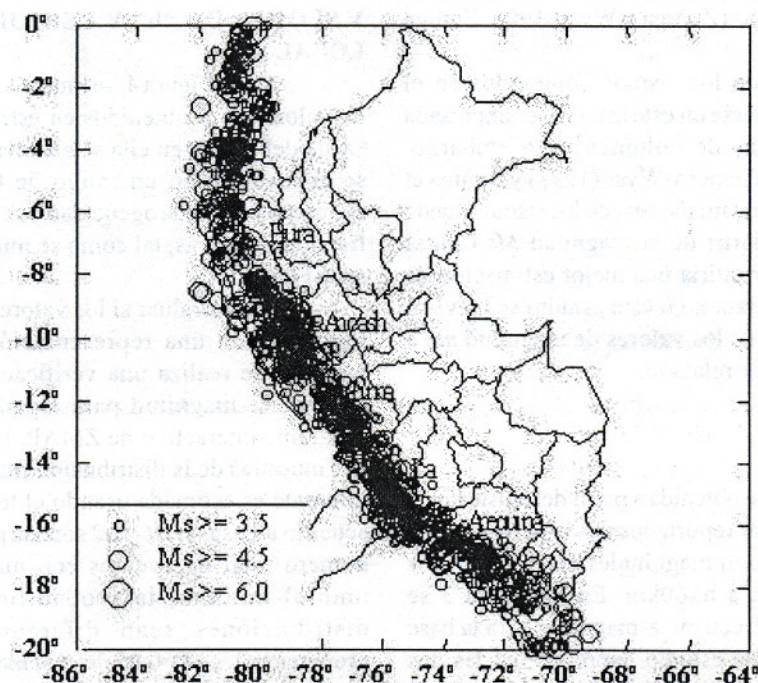
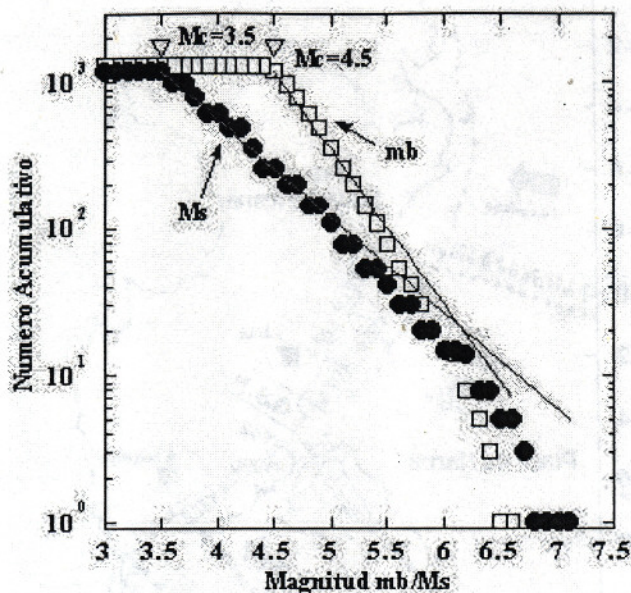


Figura 2: Mapa de sismicidad a lo largo del borde Oeste de Perú para el periodo 1964-1999 ($M_s \geq 3.5$).



Solución por Máxima Verosimilitud

mb: valor de $b = 1.1 \pm 0.03$, valor de $a = 7.81$

Ms: valor de $b = 0.7 \pm 0.01$, valor de $a = 5.36$

Figura 3: Curva acumulativa de sismos en función de la magnitud para la base de datos utilizado en este estudio. Símbolos cuadrados para la magnitud *mb* y círculos para la magnitud *Ms*. El rango de completitud del catálogo es indicado con *Mc*.

la escala de magnitud dada por Gutenberg y Richter (1944) muestra que el promedio de b es igual a 0.9. Asimismo, la experiencia ha mostrado que el valor de b varía considerablemente de acuerdo al tipo de escala utilizada para medir la magnitud de los sismos, ya que las diferentes escalas al utilizar la amplitud del registro de los sismos, resultan ser frecuentemente afectadas debido a las propiedades físicas de cada región que atenúan en mayor o menor grado a las ondas (Zuñiga y Wyss, 1995; Zuñiga y Wiemer, 1999).

La magnitud de los sismos contenidos en el catálogo sísmico a utilizarse en este estudio, es expresada en *mb* (magnitud ondas de volumen); sin embargo, algunos autores como Wiemer y Wyss (1997) y Zuñiga et al. (1999) sugieren que el tamaño real de los sismos puede ser mejor estimado a partir de la magnitud *Ms* (ondas superficiales) y esta permitiría una mejor estimación de los valores de b . Por lo tanto, en este estudio se ha visto por conveniente convertir los valores de magnitud *mb* a *Ms* a partir de la siguiente relación:

$$Ms = 1.71mb - 4.23 \pm 0.5 \quad (3)$$

Esta relación fue obtenida a partir del ajuste lineal entre los valores *mb* y *Ms* reportados desde el NEIC para un total de 250 sismos con magnitudes mayores a 4.5 y profundidades menores a $h \leq 60$ km. En la Figura 3 se muestra la distribución frecuencia-magnitud para la base de datos utilizada en este estudio expresada en las dos escalas de magnitud. Si se utiliza la base de datos expresada en magnitudes *mb*, el valor promedio de b sería de 1.1;

mientras que, en la magnitud *Ms* el valor promedio sería de 0.7 con un rango de error menor. En tal sentido, en este estudio se utiliza la base de datos expresada en la escala *Ms*, además el valor de b es próximo a 0.9 obtenido para California a partir de la magnitud original y porque también se desea estimar periodos de retorno local para sismos de magnitud elevada en el borde Oeste de Perú.

VALORES DE "b" Y PERIODOS DE RETORNO LOCAL

En la Figura 4, se muestra el mapa de distribución de valores de b obtenidos en este estudio para el borde Oeste del Perú y en ella se observa que localmente estos se encuentran en un rango de 0.5 a 1.2, mostrando claramente su heterogeneidad sobre toda la superficie de fricción de placas, tal como se muestra en el histograma de la Figura 5.

Para evaluar si los valores de b mostrados en la Figura 4 son una representación significativa de la realidad, se realiza una verificación de la distribución frecuencia-magnitud para algunos lugares usando el programa interactivo de ZMAP. La probabilidad de que dos muestras de la distribución frecuencia-magnitud sea diferente es estimada usando el test de Utsu (1992). De acuerdo a Utsu, si b_1 y b_2 son las pendientes y n_1 y n_2 el número total de eventos con magnitudes mayores al umbral mínimo, la probabilidad P para que dos distribuciones sean diferentes tienen que ser proporcionales a $P=0.05$, lo cual indicaría que las muestras no son iguales con un nivel de confianza de 95%. Si se obtiene un valor de $P=0.01$, el nivel de confianza sería de

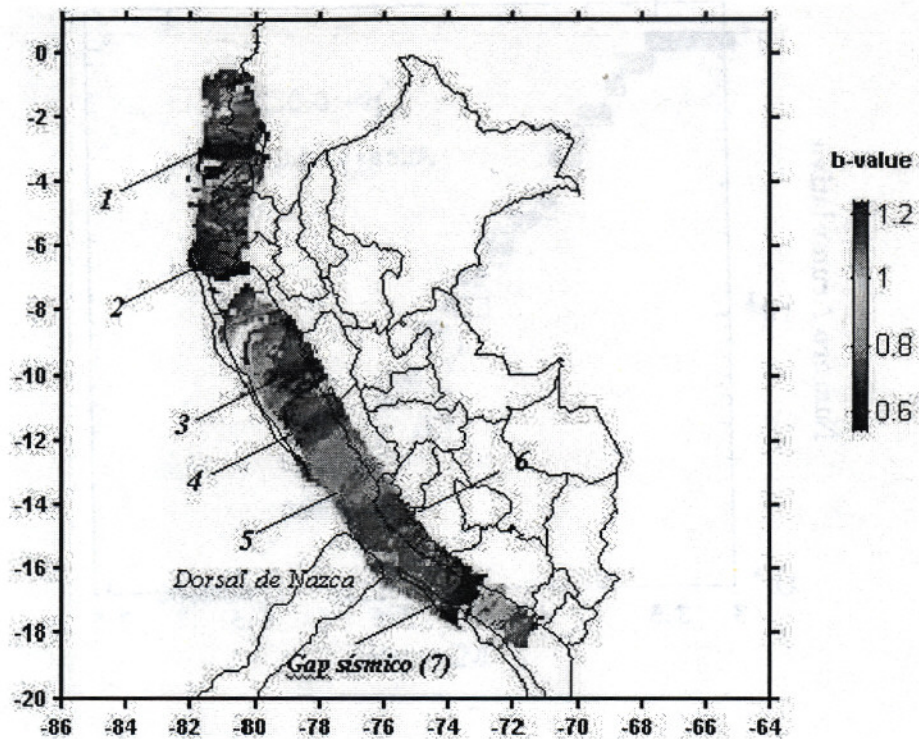


Figura 4: Mapa de valores locales de " b " a lo largo del borde Oeste del Perú. Las asperezas son enumeradas del 1 al 7 y se encuentran delimitadas con círculos de línea discontinua.

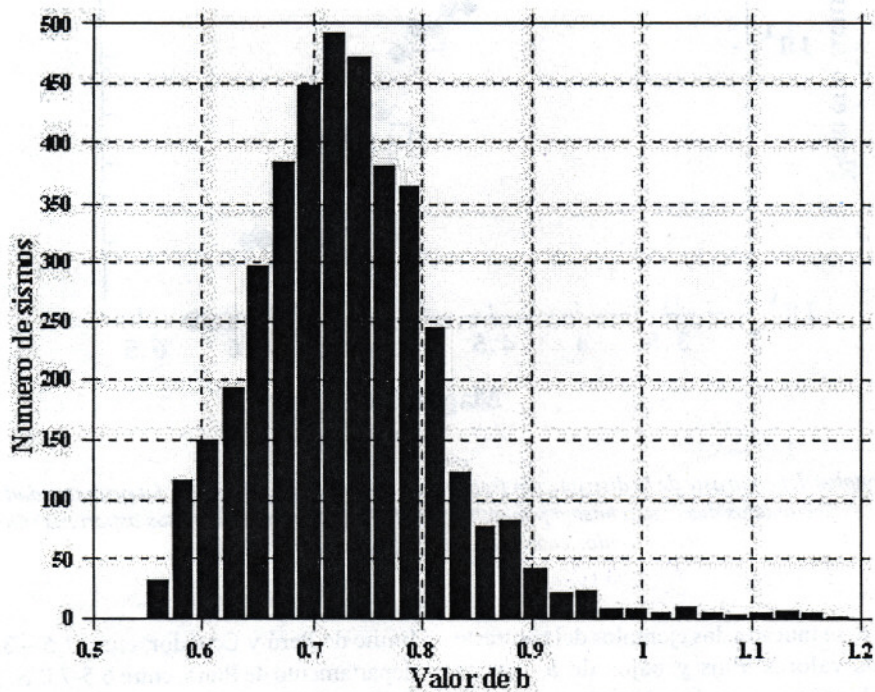


Figura 5: Histograma de valores de b observados en los nodos de la grilla usada para el cálculo de los valores de b de la Figura 4.

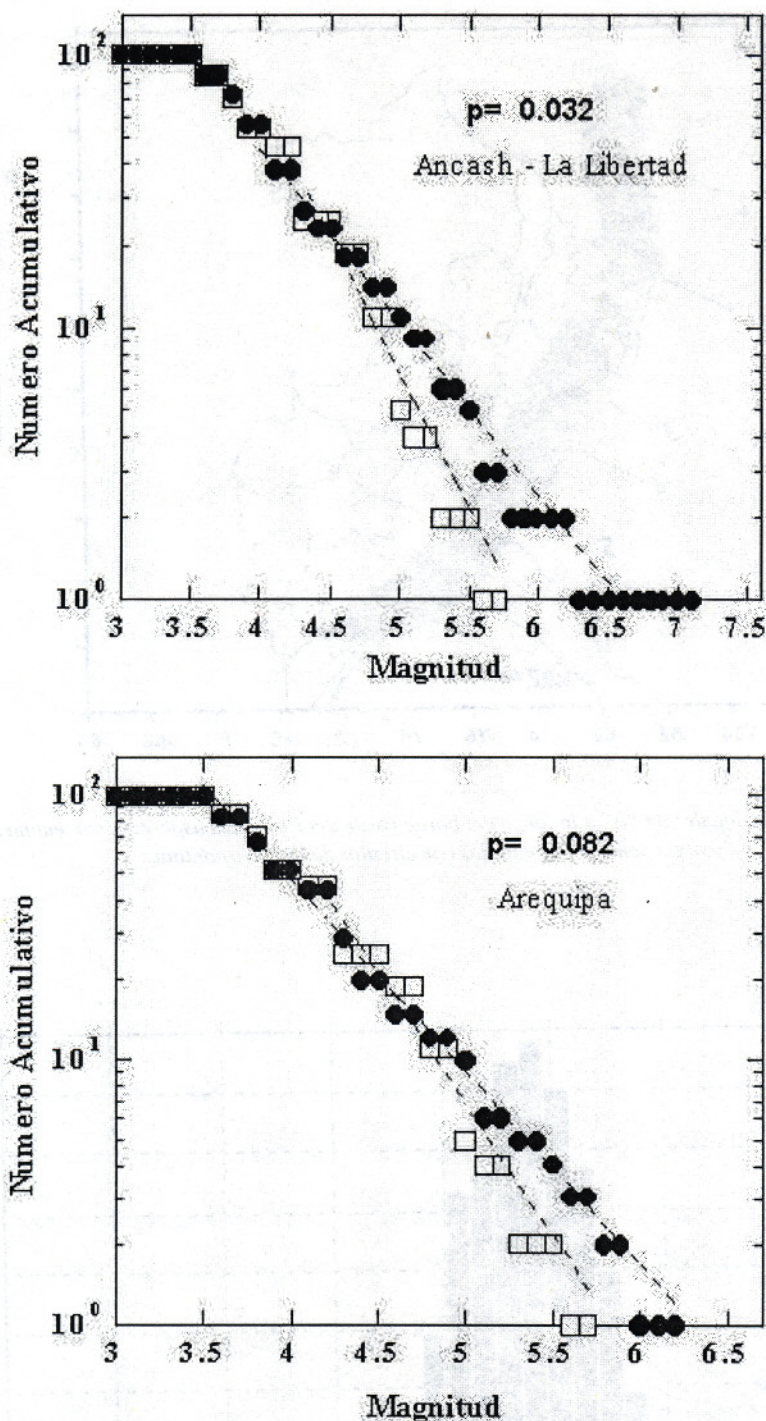


Figura 6: Ejemplos del contraste de la distribución frecuencia-magnitud de los sismos. La probabilidad (P) de que dos muestras sean seleccionadas desde una misma población son dadas en cada Figura. Las asperezas son representadas con círculos en negro y los volúmenes con cuadrados.

99%. En la Figura 6, se muestra dos ejemplos del contraste existente entre los valores altos y bajos de b , así las probabilidades obtenidas para los departamentos de Ancash, La Libertad y Arequipa se encuentran entre 0.03 y 0.08, lo cual sugiere que el cálculo del valor de b fue realizado de forma correcta (Figura 6).

Según los resultados mostrados en la Figura 4, las zonas anómalas de b o asperezas se ubican en: (1)

limite de Perú y Ecuador, entre $2.5 - 3.0^{\circ}\text{S}$; (2) al sur del departamento de Piura, entre $6.5 - 7.0^{\circ}\text{S}$; (3) frente a la costa de Ancash, entre $10 - 11^{\circ}\text{S}$; (4) en la costa norte de Lima de $12 - 13^{\circ}\text{S}$; (5) al sur de Lima, entre $13.5 - 14^{\circ}\text{S}$; (6) en la costa del departamento de Ica, entre $15^{\circ} - 16^{\circ}\text{S}$ y (7) en la costa del departamento de Arequipa, entre 17 a 18°S . Todas estas asperezas son delimitadas sobre la Figura 4 con círculos de línea discontinua y descritas en la Tabla 1.

Tabla 1

N°	Localización	Rango Latitud Sur	Pr (años)
1	Límite entre Perú y Ecuador	2.5° a 3.0°	~50
2	Zona Sur de Piura	6.5° a 7.0°	~50
3	Frente a la costa de Ancash	10.0° a 11.0°	~50
4	Costa norte de Lima	12.0° a 13.0°	~50
5	Límite entre Lima e Ica	13.5° a 14.0°	~50
6	Costa de Ica	15.0° a 16.0°	~50
7	Costa de Arequipa	17.0° a 18.0°	~50

Tabla 1: Asperezas identificadas en el borde Oeste del Perú para sismos con periodos de retorno de 50 años.

El mapa de periodo de retorno mostrado en la Figura 7 fue calculado usando la ecuación (2) para un sismo con magnitud $M_s \geq 7.2$, un radio de 150km y considerando los valores de b y a respectivamente. Este mapa, muestra similares características al mapa de valores de b , pero muestra una mejor definición y delimitación de las asperezas identificadas en la Figura 4. Según estos resultados, los periodos de recurrencia para un sismo con una magnitud $M_s \geq 7.2$, oscilan entre 50 y 150 años. Obsérvese que las zonas que presentan periodos de retorno de 50 años se localizan exactamente sobre los valores anómalos de b que identifican a las asperezas, las mismas que han sido enumeradas del 1 al 7. Zonas caracterizadas por presentar sismos en periodos de recurrencia mayores a los 100 años se localizan en la costa central de Piura (5-5.5°S), en la costa de La Libertad (9-10°S), costa central de Lima (13-13.5°S) y en la costa norte

de Ica (16-16.5°S), tal como se indica en la Tabla 2.

Las diferencias en los periodos de retorno local para sismos que ocurren a lo largo de la costa de Perú es muy variado y estos pueden ser mejor evaluados si se utiliza una escala logarítmica para presentarlos en un histograma (Figura 8). De acuerdo a Zuñiga y Wyss (2000), las diferencias en los Pr junto con las diferencias en los valores de b , indican que las propiedades físicas de la corteza varían fuertemente de un lugar a otro. Asimismo, señalan que los mínimos periodos de retorno local se correlacionan con mínimos valores de b ; es decir, que los lugares que presentan mínimos periodos de retorno local les corresponde zonas con altos esfuerzos, siendo estas definidas como asperezas. Estas apreciaciones han permitido identificar la presencia de siete (7) asperezas en el borde Oeste de Perú, las mismas que darían origen a futuros sismos.

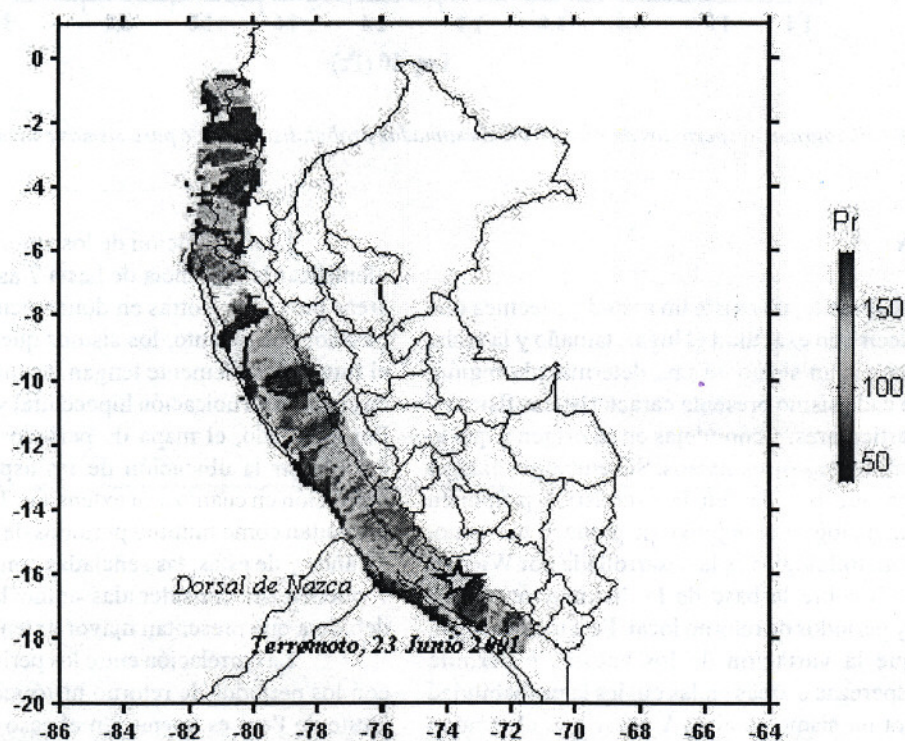
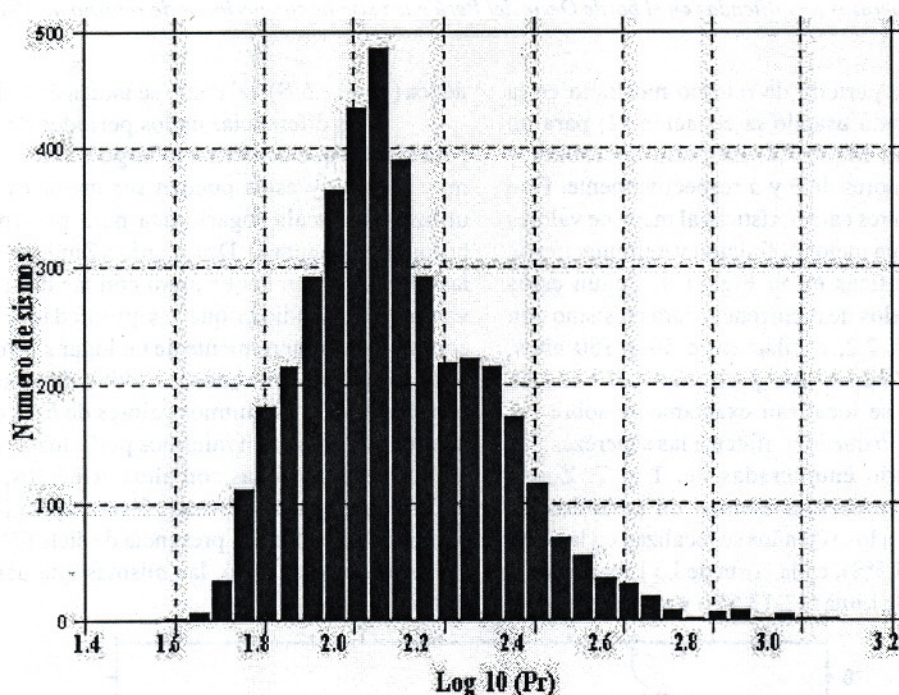
Figura 7: Mapa de periodos de recurrencia para terremotos con magnitud $M_s \geq 7.2$ obtenidos a partir de los valores de la curva de frecuencia sísmica.

Tabla 2

N°	Localización	Rango Latitud Sur	Pr (años)
1	Costa central de Piura	5.0° a 5.5°	~100
2	Costa de la Libertad	9.0° a 10.0°	~130
3	Costa central de Lima	13.0° a 13.5°	~150
4	Costa norte de Ica	16.0° a 16.5°	~140

Tabla 2: Asperezas identificadas en el borde Oeste de Perú para sismos con periodo de retorno mayores a 100 años.

Figura 8.- Histograma de periodos de retorno local estimados probabilisticamente para sismos con magnitud $M_s \geq 7.2$.

DISCUSIÓN

Actualmente, no existe un método o técnica que permita predecir con exactitud el lugar, tamaño y la fecha en que va ocurrir un sismo en una determinada región, debido a que cada sismo presenta características físicas y tectónicas particulares, y complejas en su origen y que lo hacen muy diferente a otros sismos. Sin embargo, existen metodologías que basadas en la estadística proponen hipótesis a fin de lograr el objetivo de predecir un sismo. Una de estas metodologías es la desarrollada por Wiemer y Wyss (1997) sobre la base de la distribución de los valores de b y periodos de retorno local. Esta metodología, considera que la variación de los valores b permite identificar asperezas o áreas en las cuales la probabilidad de que ocurra un sismo es alta. A pesar que el método sigue siendo evaluado por sus autores, este proporciona información importante y puede dar indicios para la predicción de futuros sismos en el Perú.

La distribución de los valores de b ha permitido identificar la presencia de hasta 7 asperezas ubicadas en áreas próximas a otras en donde ocurrieron sismos en el pasado; por lo tanto, los sismos que pudieran ocurrir en el futuro posiblemente tengan las mismas características en cuanto a su ubicación hipocentral y tamaño (magnitud). Por otro lado, el mapa de periodos de retorno permite corroborar la ubicación de las asperezas y mejora su definición en cuanto a su extensión. Todas estas asperezas presentan como mínimo periodos de retorno del orden de 50 años y de estas, las señaladas con los números 3,4,6 y 7 pueden ser consideradas como las más importantes debido a que presentan mayor extensión de ruptura.

La correlación entre los periodos de retorno local con los periodos de retorno histórico para todo el borde Oeste de Perú es buena. En el caso del sismo de Nazca ocurrido el 12 de Noviembre 1996 ($M_s=7.2$), la información histórica indica que en esta misma área anómala en 1942 ocurrió un sismo de magnitud elevada y si se asume como

período medio de retorno de 50 años, tal como se ha obtenido en este estudio, dicho sismo debería haberse repetido en 1992. La diferencia en la fecha de ocurrencia de este sismo se encontraría dentro de los rangos de error propio del método. Para el caso del sismo del 31 de Mayo de 1970 (departamento de Ancash), a la fecha ha transcurrido 32 años y de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, el sismo debe repetirse en el año 2020 aproximadamente. Similares casos se presentan para los sismos de 1966 y 1974, ocurridos en el extremo norte de la ciudad de Lima.

SISMO DEL 23 DE JUNIO DE 2002

En la región Sur del Perú, la aspereza más importante se ubica en el extremo NW del departamento Arequipa (aspereza 7 en la Figura 4). El sismo ocurrido el 23 de Junio del 2001 ($M_s=7.9$) confirmó la existencia de dicha aspereza. Este sismo tuvo su epicentro a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Tavera et al, 2002); es decir, dentro del área anómala o aspereza identificada en este estudio. Según Tavera et al (2002), el área de ruptura que produjo este sismo se propagó en dirección SE dando forma a una superficie de fractura de $370 \times 180 \text{ km}^2$, siendo estas dimensiones para el área de fractura coherentes con la extensión de la aspereza. La historia sísmica indica que en la región Sur de Perú ocurrieron sismos de magnitud elevada que produjeron longitudes de ruptura del orden de 300-500 km. Así, el sismo de 1868 ($M_w 9.0$), el mayor ocurrido en esta región, no se ha repetido desde hace 134 años, de ahí que dicha región sea identificada como la mayor zona de gap sísmico. Se suponía que el sismo del 23 de Junio del 2001 ponía fin al ciclo de dicho gap; sin embargo, algunos autores como Tavera (2002) indican que el sismo del 23 de Junio únicamente habría liberado el 75% del total de la energía liberada por el sismo de 1868. En estas condiciones, es posible que el sismo del 23 de Junio se constituya como un premonitor de otro de mayor magnitud.

CONCLUSIONES

La distribución de los valores de " b " junto con la estimación de los períodos de retorno local, proporcionó importante información para la identificación de zonas de lagunas sísmicas o asperezas en el borde Oeste del Perú, las mismas que pueden ser susceptibles a producir un sismo de magnitud elevada en el futuro.

En el borde Oeste del Perú, los valores de b se encuentran en el rango de 0.5 a 1.2 y los períodos de recurrencia para sismos de magnitud $M_s \geq 7.2$ oscilan entre 50 y 150 años.

Se ha identificado la presencia de siete (7) asperezas, todas capaces de dar origen a un sismo con períodos de retorno del orden de 50 años. Estas asperezas presentan extensiones variables, las mismas que serían proporcionales a las dimensiones del área de ruptura y al tamaño que tendría el sismo a ocurrir.

Las zonas ubicadas frente a la costa de Arequipa, Ancash y la costa Norte de Lima, son las que presentan la mayor probabilidad de que sean afectadas por un sismo de magnitud $M_s \geq 7.2$. Mientras que, las zonas con menos probabilidad de ser afectadas por un sismo de magnitud elevada se encuentran frente a la costa central de Lima, costa sur de Arequipa y costa de La Libertad. Estas zonas presentan períodos de retorno del orden de 100 y 150 años.

El sismo ocurrido el 23 de Junio de 2001 (8.2Mw), confirma la existencia de la aspereza previamente identificada en este estudio para el borde NW del departamento de Arequipa, región Sur de Perú.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Hernan Montes, Director Técnico del Instituto Geofísico del Perú en el desarrollo de los diferentes trabajos del CNDG. Al Dr. R. Zuñiga y S. Wiemer por sus consejos y orientación en el manejo del programa ZMAP. Al Dr. M. Wyss por incentivarnos a realizar el presente estudio. Estos resultados son parte de los presentados en la disertación de la tesis de uno de los autores (H. Heras). Publicación N°011-2002/CNDG-IGP

BIBLIOGRAFÍA

- AKI K.** (1984).- Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *Jour. Geophys. Res.*, 89, 5867-5872.
- ENGDAHL R., VAN DER HILST R. & BULAND R.** (1998).- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 722-743
- FROHLICH C. & DAVISS.** (1993).- Teleseismic b -Values: Or, Much Ado about 1.0. *Jour. Geophys. Res.* 98, 631-644.
- GUTENBERG R. & RICHTER C. F.** (1944).- Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- HERAS H.** (2002).- Análisis de la distribución del valor de " b " en la zona de subducción de Perú. *Tesis de grado*. Universidad Nacional de San Agustín - Arequipa. 150pags
- KANAMORI H.** (1981).- The nature of seismicity patterns before large earthquake, In *Earthquake Prediction International Review; Maurice Ewing Ser., Ed. D.W., Simpson P.G Richards*, 4, 1-19, Washington. D.G. Am. Geophys. Union.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- Sísmicidad y Sismotectónica de Perú. En: *Sísmicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica; Buforn, E. y Udias A, (eds.), Física de la Tierra*. 10, 187-219.
- TAVERA H. & AGÜERO C.** (2000).- Catálogo sísmico de Perú 1471-1982, versión corregida y actualizada - 2000,

Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología IGP, Lima, Perú, 400pags.

TAVERA H., BUFORNE., BERNALI., ANTAYHUA & VILCAPOMA L. (2002).- The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Jour. Seism.*, 6, 279-283.

UTSU T. (1992).- On seismicity, in Report of the Joint Research Institute for Statistical Mathematics, *Institute for Statistical Mathematics, Tokyo*. 139-157.

WIEMER S. (1996).- Analysis of seismicity: New techniques and case studies. Dissertation Thesis. University of Alaska, Alaska. 200 p.

WIEMERS. & ZUÑIGA F. R. (1994).- ZMAP – a software package to analyze seismicity, *EOS, Transactions, Fall Meeting, AGU*, 75, 456.

WIEMER S. & WYSS M. (1997).- Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An

improved technique to calculate recurrence times?, *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.

ZUÑIGA R. & WYSS M. (1995).- Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: Influence on b-value estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1858-1866.

ZUÑIGA F. R. & WIEMERS S. (1999).- Seismicity patterns: are they always related to natural causes?, *Pure and Applied Geophysics*. in press.

ZUÑIGA F. R., VALDES C. & REYES M. (1999).- A Comprehensive Analysis of the Catalog of Recent Seismicity Compiled by the Mexican Seismological Survey, *Geofis. Intern.* submitted

ZUÑIGA R. & WYSS M. (2000).- Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of Mexico, estimated from local recurrence times based on b-values, *Geophys. Jour. Intern.* 90. in press, 2000.