

## ÁREAS PROBABLES DE RUPTURA SÍSMICA EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERÚ, A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO “b”

### LIKELY AREAS OF SEISMIC RUPTURE IN WESTERN BORDER PERU, FROM THE VARIATION OF THE b PARAMETER.

Cristobal Condori<sup>1</sup> y Hernando Tavera<sup>2</sup>

#### RESUMEN

El presente estudio evalúa la presencia de zonas de acoplamiento en la zona de contacto interplacas que definen áreas con niveles significativos de asperezas en el borde occidental de Perú. Estas zonas son propensas a generar sismos de gran magnitud, como consecuencia del proceso de subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Se aplica la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997) para evaluar la variación espacio-tiempo del parámetro “b” haciendo uso del catálogo sísmico del IGP para el periodo de 1970 a 2010, considerando sismos con magnitudes  $M_s \geq 3.8$ . Los resultados permiten inferir la presencia de 5 asperezas ubicadas entre los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, a saber: una zona de fricción al Norte del departamento de Arequipa; dos áreas de asperezas frente a la costa de Lima y Ancash; y otra zona entre los departamentos de Piura y Lambayeque. Los potenciales sismos asociados a estas asperezas presentan periodos de ocurrencia de entre 40 a 70 años, considerando sismos con magnitudes iguales o mayores a 7Ms.

*Palabras claves:* asperezas, valores de “b”, método de Wiemer y Wyss

#### ABSTRACT

We assessed the presence of the coupling interface seismic source that defines areas of high levels of asperities in western border of Peru. The identified zones could potentially generate future large earthquakes as a consequence of the subduction process of the oceanic Nazca plate beneath the continental South American plate. The Wiemer and Wyss (1997) methodology is used considering the space-time variation of the “b” parameter and the IGP catalog data for earthquakes  $M_s \geq 3.8$ , and the period ranging from 1970 to 2010. We identified five (5) areas of high level of asperity located in the departments of Arequipa, Moquegua and Tacna; namely: one zone to the north of Arequipa, two asperity zones off the coast of Lima and Ancash, and other zone between the departments of Piura and Lambayeque. The analysis indicates that the asperities could potentially trigger earthquakes with magnitudes  $\geq 7Ms$  associated with 40- to 70-year return periods.

*Keywords:* asperities; b-values; Wiemer and Wyss Methodology

#### INTRODUCCIÓN

El Perú forma parte de una de las regiones sísmicas más activas del mundo debido a que se encuentra ubicado dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, en donde se libera más del 80% de la energía sísmica a nivel mundial. En Perú la actividad sísmica está directamente asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la

Sudamericana, el cual se desarrolla a una velocidad promedio relativa de entre 7 a 8 cm/año (DeMets et al., 1990; Norabuena et al., 1999; Kendrick, et al., 2003, Villegas, 2009). Este proceso dio origen a los sismos más grandes ocurridos en el Perú, como los del 17 de octubre de 1966 (8.0Mw Lima) Beck and Ruff (1989), 31 de mayo de 1970 (7.5Mw Ancash) Silgado, E. (1978), 3 de octubre de 1974 (8.1Mw Lima) Langer and Spence (1995). 12 noviembre

<sup>1</sup> Dirección de Sismología/Instituto Geofísico del Perú. E.mail: cristobal.condori@igp.gob.pe

<sup>2</sup> Dirección de Sismología/Instituto Geofísico del Perú. E.mail: hernando.tavera@igp.gob.pe

de 1996 (7.7Mw Nazca) Swenson J. L. and Beck S. (1999), 23 de junio de 2001 (8.2Mw Arequipa) Tavera et al., (2006) y 15 de agosto de 2007 (7.9Mw Pisco) Tavera, H. (2008). Todos estos sismos produjeron cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas.

En la actualidad se tiene un conocimiento más detallado respecto del peligro sísmico, más no se sabe cuándo ha de ocurrir. Es por eso que durante los últimos años varios investigadores han desarrollado diversos métodos de predicción, sin lograr el objetivo de conocer la fecha de recurrencia de los grandes sismos (Tavera, 2003). Sin embargo, sí ha sido posible caracterizar y localizar las áreas probables donde podría generarse un futuro terremoto de magnitud elevada (por ej.  $\geq 7.0$ Ms).

Una de las metodologías propuestas para identificar estas áreas fue desarrollada por Wiemer y Wyss (1997) que se basa en la distribución frecuencia-magnitud de los sismos  $\text{Log}N=a-bM$  (Gutenberg y Richter, 1944). Los autores indican que las zonas con alta concentración de deformación interplaca (áreas de traba, fricción o aspereza) se caracterizan por presentar valores bajos del parámetro “b”, asociados a niveles altos de recurrencia sísmica, siendo la cantidad de energía liberada proporcional a las del área de ruptura asociada y a la magnitud del sismo. Asimismo, el método permite calcular el periodo de retorno de los sismos asociados a dichas asperezas.

El término “aspereza” define el área de una superficie de fricción entre placas tectónicas que no presenta una ruptura asociada a un sismo de gran magnitud en el pasado geológico reciente. Este fenómeno ocasiona una acumulación de energía elástica por deformación suficiente como para producir un gran sismo cuando se produzca el desplazamiento tectónico.

El método propuesto por Wiemer y Wyss (1997) fue aplicado en diversas zonas de subducción en el mundo, tal es el caso de Zúñiga y Wyss (2001) que buscaron localizar las grandes asperezas a lo largo de la Costa occidental de México. Asimismo, Katsumata, (2006) aplicó la metodología al borde oriental de Japón, específicamente en la región de Hokkaido. En ambos casos, el objetivo fue identificar la presencia de asperezas o áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud  $\geq 7.2$ Ms. En el Perú, el método fue aplicado por Heras y Tavera (2002) a su borde occidental, llegándose a

identificar la presencia de asperezas ubicadas frente a los departamentos de Arequipa e Ica. La primera dio origen el sismo el 23 de junio del 2001 y la segunda, el sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007.

En el presente estudio, se emplea el método de Wiemer y Wyss (1997) para reanalizar la distribución espacial del parámetro “b” en el borde occidental del Perú (Figura 1), y a partir de los resultados, identificar la presencia de nuevas asperezas que en el futuro podrían dar origen a grandes sismos en el Perú.

## MÉTODO

La distribución frecuencia-magnitud (Ishimoto e Iida, 1939; Gutenberg y Richter, 1944), describe la relación entre la frecuencia de ocurrencia y magnitud de los sismos, siendo definido por:

$$\text{Log } N = a - bM \quad (1)$$

Donde: N es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M, “a” y “b” son parámetros constantes que caracterizan los niveles de sismicidad de una región.

El estudio en detalle de la variación temporal-espacial del valor del parámetro “b”, permite inferir la presencia de futuras áreas de ruptura, o de áreas con alta concentración de deformaciones generadas por las asperezas interplaca. En una zona de subducción como la del Perú, el valor del parámetro “b” está asociado con el estado de los esfuerzos presentes en la superficie de acoplamiento entre las placas de Nazca y Sudamericana; por tanto, en las áreas donde se han acumulado esfuerzos mínimos y máximos se presentan diferentes distribuciones para la relación frecuencia-magnitud de los sismos (Wiemer, 1996). El valor del parámetro “b” que caracteriza a estas áreas permitirían identificar aquellas con altos niveles de deformación y consecuentemente, con posibles sismos de gran magnitud, asociado a valores bajos de “b” con alta recurrencia sísmica. Contrariamente, valores más altos de “b”, denotan una frecuencia menor en la generación de sismos y estarían asociados a zonas con niveles de menor deformación interplaca (Figura 2).

El cálculo del valor de los parámetros “a” y “b” pueden ser determinados aplicando los métodos de máxima verosimilitud (Aki, 1965; Utsu, 1965) o el método de mínimos cuadrados. Siendo el primero el que presenta mejores límites de confianza en el cálculo de “a” y “b” (Aki, 1965); por lo tanto, en este estudio se hará uso de dicho método. El cálculo

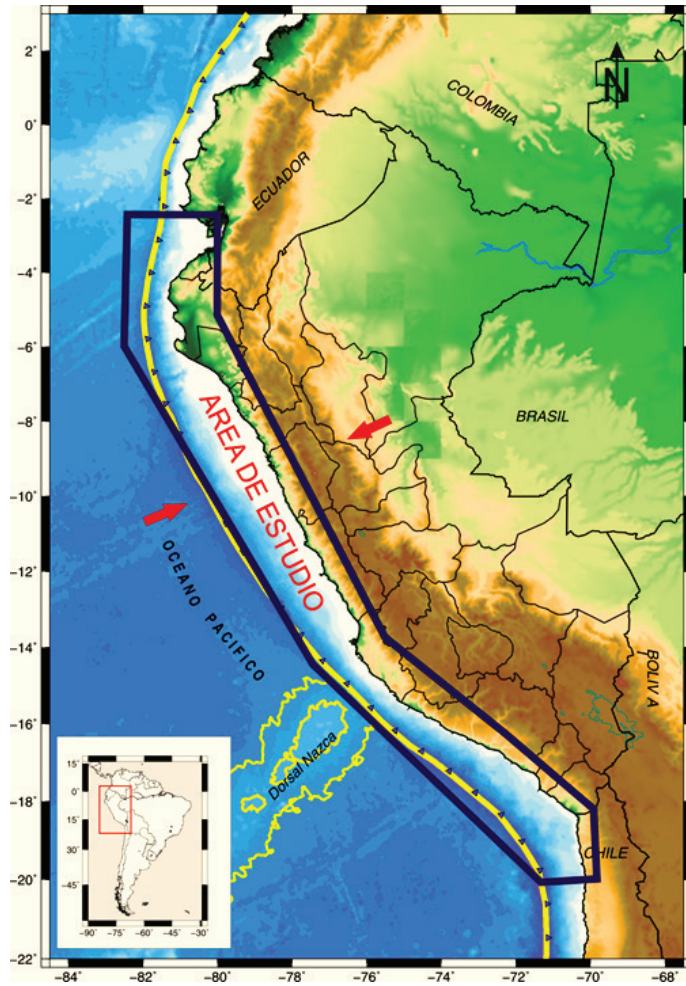


Figura 1. Mapa topográfico del Perú mostrando la ubicación del área de estudio delimitado con el polígono de color azul, y que comprende todo el borde Occidental del Perú. Las flechas rojas indican la dirección del movimiento de placas.

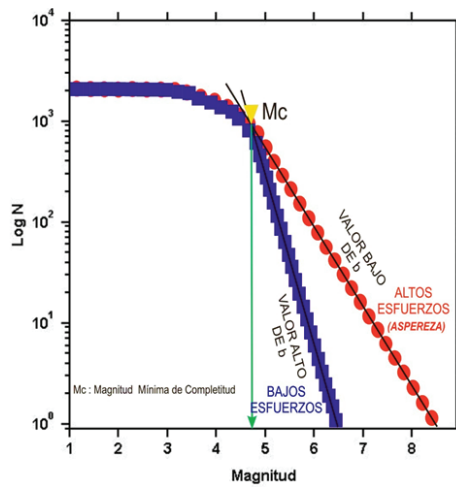


Figura 2. Distribución de frecuencia-magnitud de los sismos. Valores bajos del parámetro "b" son asociados a áreas o regiones con altos esfuerzos (asperezas) y valores altos, a regiones con bajos esfuerzos.  $M_c$  es la magnitud mínima de completitud del catálogo sísmico.

del periodo de retorno de futuros sismos para un intervalo determinado de magnitud, es calculado con base en los valores de “a” y “b” utilizando la siguiente relación:

$$P_r(M) = T_L(M) = \Delta T / 10^{(a-bM)} \quad (2)$$

Donde:  $\Delta T$  es el periodo de datos considerado;  $M$ , la magnitud máxima del sismo cuyo periodo de recurrencia se desea conocer.

La probabilidad de recurrencia sísmica para un periodo de tiempo ( $T$ ) determinado, puede ser calculado empleando la relación (3), que esta expresado en la forma exponencial  $e^{-NT}$ , donde  $NT$  es la relación Gutenberg y Richter expresado de la forma:  $N_1 = 10^{(a_1+b)}$ .

La constante  $a_1$  es asumida para una corrección de tiempo  $t_c$ , valor correspondiente al periodo de tiempo del catálogo sísmico utilizado en el estudio, así  $a_1$  será expresado de la forma:  $a_1 = a - \log t_c$

$$P(M) = 1 - e^{-N_1 T} \quad (3)$$

Donde:  $N_1$  es el número de sismos esperado por año.  $T$  el periodo de tiempo en años.

Para la elaboración de los mapas de valores del parámetro “b” (Figura 7), de los mapas de Periodos de Retorno (Figura 8) y los mapas de Probabilidad de Recurrencia (Figura 9), se utilizó la técnica de grillado codificada en el programa ZMAP (Wiemer y Zúñiga, 1994). El espaciamiento de los nodos en el área de estudio fue de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (latitud sur-longitud oeste), con un radio constante de 150 km alrededor de cada nodo. El radio constante es un valor promedio asumido a partir de la longitud de ruptura de los principales sismos ocurridos en el periodo de 1970 a 2010.

## DATOS

La base de datos utilizada en este estudio corresponde al catálogo sísmico del IGP para el periodo 1970-2010 (con una compleción del catálogo de 40 años) y considera un total de 1367 sismos con epicentros distribuidos a lo largo del borde occidental del Perú (Figura 3), para magnitudes  $M_s \geq 3.8$  cuyo valor define la magnitud mínima de completitud del catálogo sísmico definida por la curva de recurrencia frecuencia-magnitud de toda la sismicidad ocurrida

en el borde occidental del Perú (Figura 4a). Se adopta un intervalo de profundidad menor a 60 km. pues se asume que es donde podría producirse la mayor concentración de esfuerzos por fricción entre placas y consecuentemente, la mayor liberación de energía a lo largo de toda la superficie de acoplamiento sísmico, dentro del proceso de subducción (Guardia y Tavera, 2010).

Los valores dependientes o réplicas fueron depurados aplicando el algoritmo de Reasenberg (1985) y cuyos resultados de análisis estadístico se muestran en las Figuras 4 y 5. En la Figura 4a se muestra el gráfico de número acumulativo de sismos vs magnitud calculado a partir de la relación Gutenberg y Richter (1944), determinándose el valor de  $b=0.661 \pm 0.02$  con una magnitud mínima de completitud de 3.8Ms para la base de datos a utilizarse en este estudio. En la Figura 4b se muestra el gráfico de la distribución espacial de la sismicidad, donde los valores de la magnitud son considerados desde la magnitud de completitud ( $M_c$ ) igual a 3.8Ms. En la figura se observa una distribución homogénea de la sismicidad para magnitudes mayores a  $M_c$ .

En la Figura 5a se muestra el histograma para los eventos sísmicos seleccionados y utilizados en el estudio y en el cual se observa que las áreas con mayor número de eventos coincide con aquellas áreas en donde ocurrieron los sismos de Nazca (1996), Arequipa (2001) y Pisco (2007). El número de eventos independientes acumulados en la región de estudio (periodo de 1970-2010), es mostrado en la Figura 5b, y en ella se observa que la pendiente es relativamente constante en el tiempo, lo cual sugiere que puede asumirse que la frecuencia de eventos es homogénea en el tiempo para toda la región de estudio. Esta distribución valida la calidad del catálogo utilizado en este estudio.

## RESULTADOS

### Distribución de Valores del Parámetro “b”

Para el borde occidental del Perú, los valores del parámetro “b” varían entre 0.5 a 1.1, tal como se muestra en el histograma de la Figura 6. La distribución espacial de estos valores, ha permitido caracterizar y localizar geográficamente zonas de alta recurrencia sísmica a lo largo del borde occidental de Perú. Esto podría indicar la presencia de hasta cinco áreas con alta concentración de energía elástica (áreas de color rojo), debido a la fricción y acoplamiento de



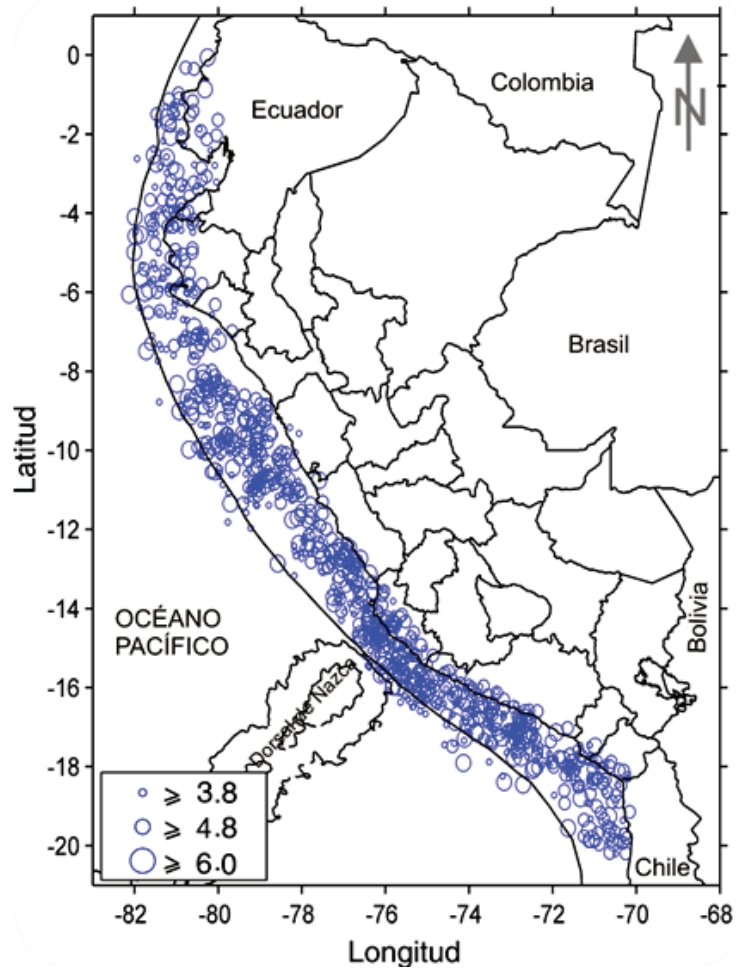


Figura 3. Distribución epicentral de los eventos sísmicos que constituyen el catalogo utilizado en este estudio: periodo 1970-2010.

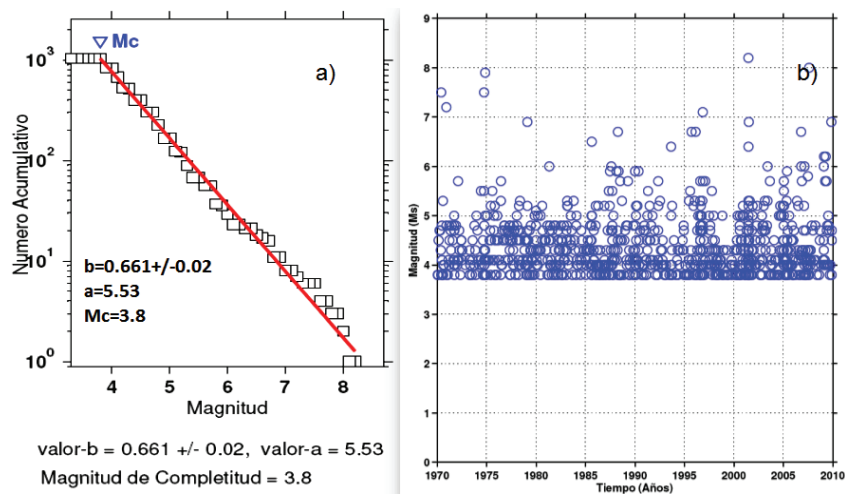
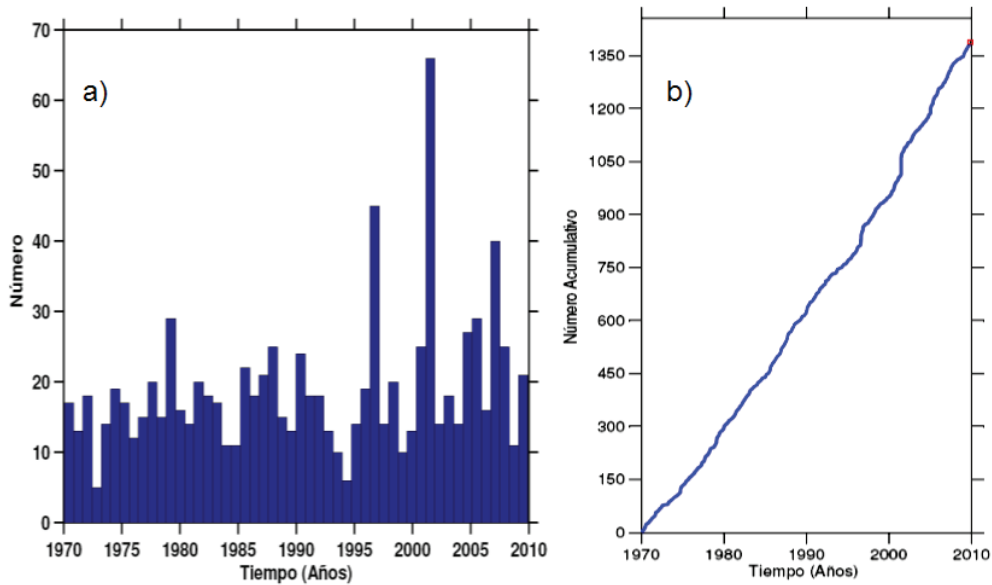
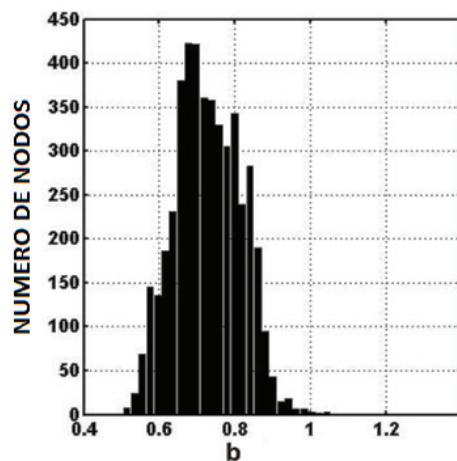


Figura 4. a) Distribución frecuencia-magnitud b). Distribución espacial de la sismicidad para la base de datos del catálogo sísmico del IGP para el periodo 1970-2010.



**Figura 5.** a) Histograma de sismos de la base final de datos. b) Distribución acumulada de sismos en función del tiempo para el periodo 1970-2010.

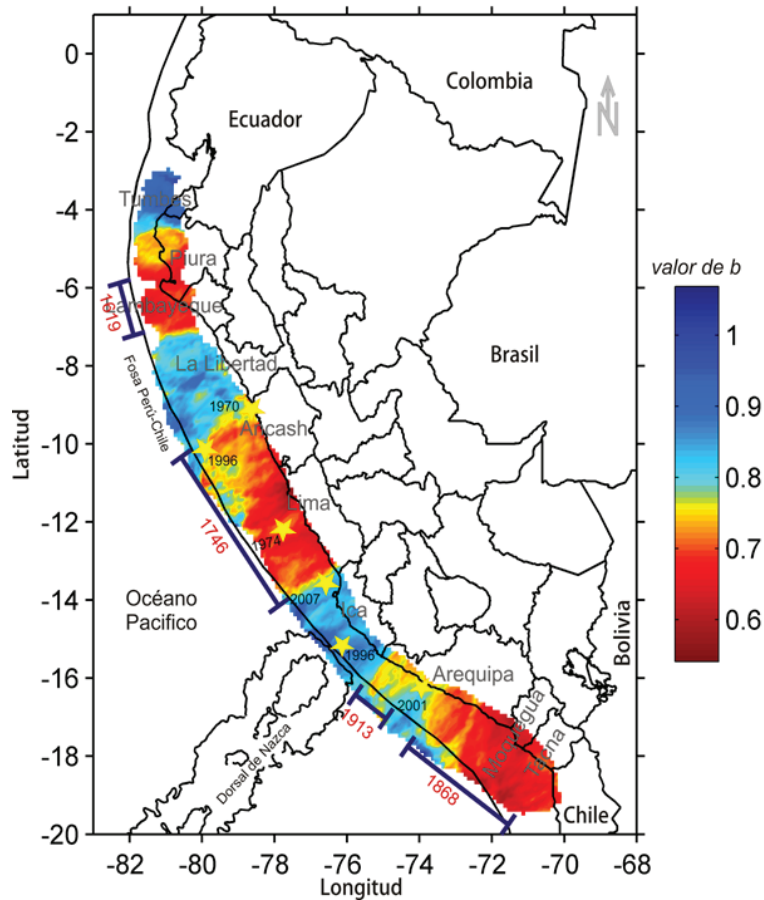


**Figura 6.** Histograma de los valores del parámetro "b" observados en cada nodo de la malla para toda el área de estudio.

las placas de Nazca y Sudamericana (Figura 7). Estas áreas de acoplamiento entre placas, denominadas asperezas, serían potenciales fuente de futuros sismos que por sus características, tendrían magnitudes  $M_s$  superiores a 7.0. De acuerdo a la Figura 6 las áreas con valores bajos de parámetro "b" se ubican en:

1. Región Sur del Perú, cubriendo las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte sur del departamento de Arequipa.

2. Al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad de Yauca.
3. Exactamente frente a la costa del departamento de Lima.
4. Al norte del departamento de Lima y frente al departamento de Ancash.
5. Frente a las costas de los departamentos de Lambayeque y Piura.



**Figura 7.** Distribución espacial de los valores del parámetro “b” en el borde occidental del Perú. Las barras indican las longitudes de ruptura estimadas para los sismos históricos y las estrellas amarillas los epicentros de los sismos ocurridos en el periodo 1970-2010

Sobre el mapa de valores del parámetro “b” se han indicado los epicentros de los sismos con magnitudes  $\geq 7.0$  (estrellas) ocurridos en los últimos 40 años, estando los sismos de 1970 y 1996 en el límite de la zona de menores valores de “b” en la región centro-norte de Perú. Sólo el terremoto de 1974 se encuentra dentro del área de aspereza ubicada frente al departamento de Lima, y en este caso, podría asumirse que dicho terremoto no llegó a liberar el total de la energía acumulada en esta región. Los epicentros de los sismos de Nazca, Arequipa y Pisco (1996, 2001, 2007), se distribuyen dentro de las áreas de color azul; es decir, coincidentes con zonas de baja recurrencia sísmica asociada a altos valores de “b”. Esto indicaría que los sismos ya ocurridos habrían permitido el desacoplamiento interplaca liberando la energía de deformación contenida, y que

se encontrarían en una nueva etapa de acumulación de deformación. De acuerdo con estos resultados, las áreas con valores bajos del parámetro “b” (áreas de color rojo), quedan bien determinadas a partir de los análisis desarrollados y sugieren longitudes de ruptura equivalentes a los sismos históricos, ocurridos en 1746 en el caso de Lima (~Ms 8.4), y 1868 y 1913 para la zona sur de Perú, con magnitudes estimadas entre Mw 8.5 y 8.8, aproximadamente. La zona de acoplamiento o aspereza identificada en la zona norte de Perú, no es posible asociarla con algún sismo histórico importante, aunque el sismo de Trujillo de 1619 (con magnitud estimada en Mw 8.5) según Silgado (1978), habría tenido una longitud de ruptura de 100 a 150 Km, evento que no se repite desde hace aproximadamente 400 años.

## PERIODOS DE RETORNO

El mapa de periodos de retorno (Figura 8), fue obtenido a partir de la ecuación 2 para sismos con magnitudes de  $M_s \geq 7.0$  considerando la distribución de los valores del parámetro “b”. El resultado proporciona un mapa con áreas o asperezas definidas con mayor resolución, siendo las mismas coherentes con el mapa de valores del parámetro “b” (Figura 7). Las áreas con valores mínimos de tiempo de recurrencia local oscilan entre 40 y 70 años.

**Aspereza (A1).**- Aspereza localizada en la región sur del Perú, frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y Parte Sur del departamento de Arequipa, ( $16.436^\circ$  a  $19.129^\circ$  S): periodo de retorno de 50 años.

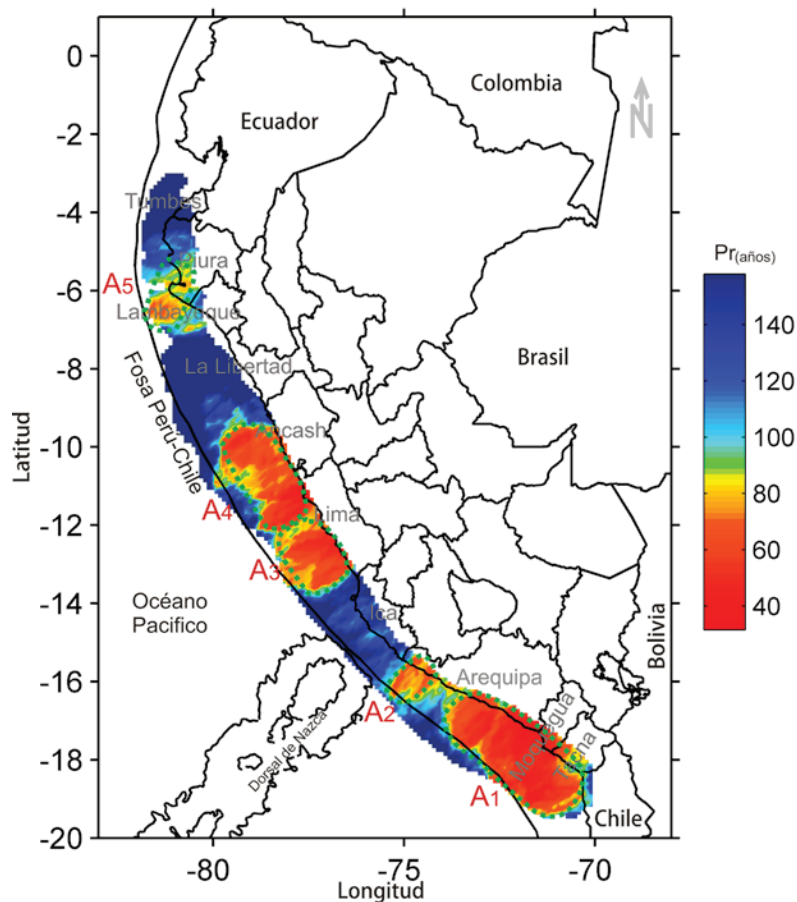
**Aspereza (A2).**- Aspereza localizada al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad

de Yauca, ( $15.564^\circ$  a  $16.147^\circ$  S): periodo de retorno entre 60 y 70 años.

**Asperezas (A3).**- Aspereza ubicada en la región centro del Perú, frente a la costa del departamento de Lima ( $12.130^\circ$  a  $13.367^\circ$  S): periodo de retorno de 50 y 70 años.

**Asperezas (A4).**- Aspereza ubicada frente a las costas de los departamentos de Ancash y parte norte del departamento de Lima ( $9.417^\circ$  a  $11.914^\circ$  S): periodo de retorno de 50 a 70 años.

**Asperezas (A5).**- Aspereza ubicada en la parte norte del Perú, exactamente frente a las costas de los departamentos de Piura y Lambayeque ( $5.397^\circ$  a  $7.132^\circ$  S): periodo de retorno de 60 años.



**Figura 8.** Mapa de periodos de retorno local y estimación de la magnitud en función del área para las asperezas identificadas en este estudio, todas enumeradas como: A1, A2, A3, A4 y A5.



## PROBABILIDAD DE RECURRENCIA

Adicionalmente, se procedió a calcular la probabilidad de ocurrencia a partir de la ecuación (3) para sismos con magnitudes  $M_{max} \geq 7.0$  y para un periodo de tiempo  $T = 50$  años. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9, que define el mapa de probabilidad de recurrencia anual, para un periodo de retorno promedio de 50 años. De acuerdo con la escala de colores, las áreas de color rojo corresponden a las zonas acopladas o con mayores asperezas que presentan la más alta probabilidad de producir sismos con magnitudes asociadas  $M_s \geq 7.0$  y que se encuentran ubicadas:

- Frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte sur del departamento de Arequipa (Aspeza 1).

- Frente a los departamentos de Lima y Ancash que en conjunto forman una gran superficie de acoplamiento (Aspeza 3 y 4).

Conforme lo observado en la Figura 9, existiría aproximadamente un 30% de probabilidad de excedencia en 50 años, equivalente a considerar un periodo de retorno de aproximadamente 40 a 70 años para sismos  $M_s \geq 7.0$  (Figura 8), en estas zonas de alto acoplamiento interplacas.

La aspereza A5 ubicada en la región norte del Perú, estaría asociada a sismos con una baja probabilidad de ocurrencia en 50 años. La Figura 9, presenta en esta región una probabilidad de excedencia de aproximadamente 50% en 50 años, equivalente a un periodo de retorno de aproximadamente 70 a 100 años para sismos  $M_s \geq 7.0$  (Figura 8).

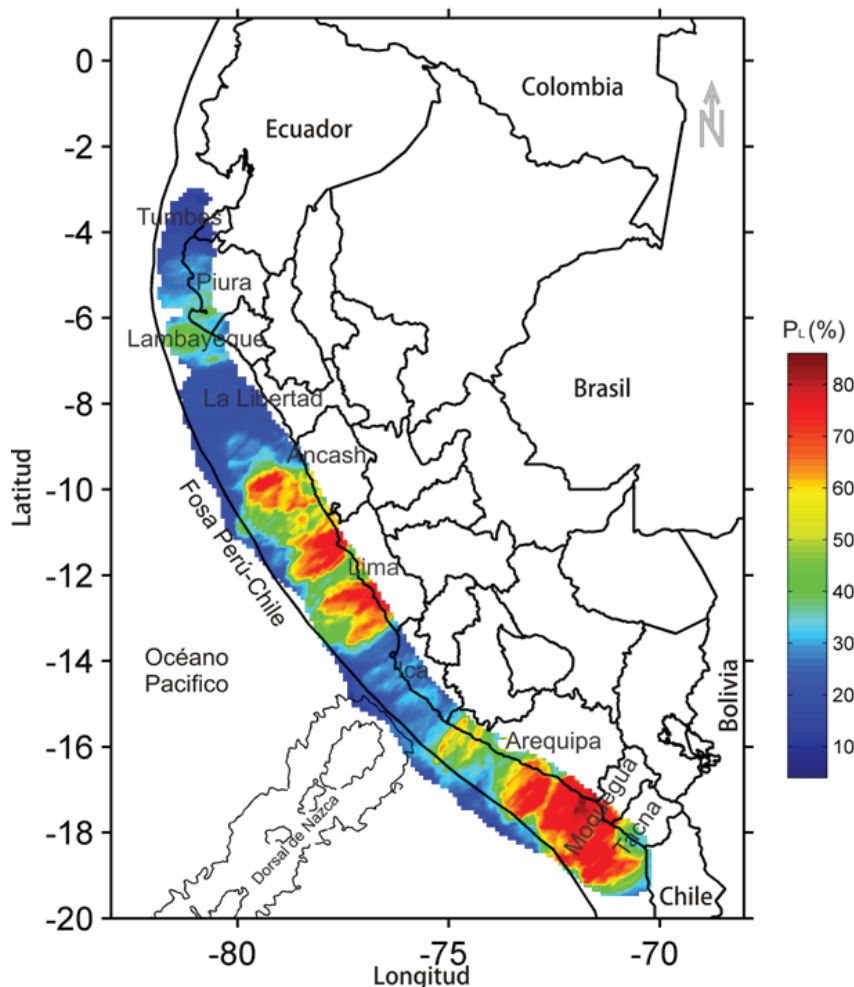


Figura 9. Mapa de probabilidad de recurrencia anual para un periodo de retorno promedio de 50 años.

## ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD

La distribución espacial de los valores del parámetro “b” y de periodos de retorno, permitió determinar la ubicación geográfica y la geométrica de las zonas que presentan un alto nivel de acoplamiento entre placas, asociadas a fuertes niveles de fricción o aspereza interplaca (áreas con alta concentración de esfuerzos) presentes en el borde occidental del Perú. De manera complementaria, es posible determinar la magnitud de los sismos que se producirían a partir de las dimensiones del área involucrada en las zonas de asperezas identificadas. Para ello se asume que el área total de aspereza estaría involucrada en la ruptura. La magnitud momento  $M_w$  puede ser estimada utilizando la ecuación de Kanamori y Anderson (1975).

$$M_0 = 0.70 \times 10^{22} S^{3/2} \text{ dina} - \text{cm}, S \text{ en Km}^2 \quad (4)$$

$$M_w = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 16.1) \quad M_0 \text{ en dina} - \text{cm} \quad (5)$$

En este estudio se ha procedido a ajustar el área de las asperezas a un rectángulo a fin de facilitar el cálculo de las respectivas magnitudes (Figura 10):

**Aspereza (A1).**- El área estimada para esta aspereza es de 89,797 km<sup>2</sup> y la magnitud que podría alcanzar el sismo sería del orden de 8.8Mw.

**Aspereza (A2).**- Esta aspereza presenta un área aproximada de 4,912 km<sup>2</sup> equivalente a una magnitud estimada de 7.5Mw.

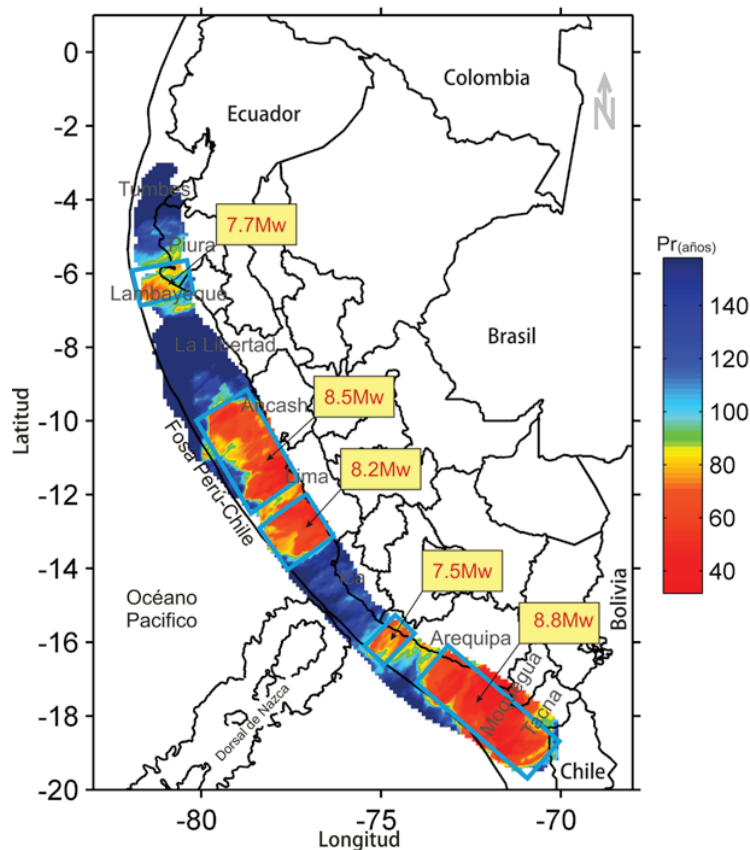
**Aspereza (A3).**- Esta aspereza presenta un área de 23,943 km<sup>2</sup> y su magnitud estimada es de 8.2Mw.

**Aspereza (A4).**- Esta aspereza presenta un área de 46,650 km<sup>2</sup> y su magnitud estimada es de 8.5Mw.

**Aspereza (A5).**- Esta aspereza presenta un área de 8,207 km<sup>2</sup> y su magnitud estimada es de 7.7Mw.

## DISCUSIÓN

En la actualidad, los estudios sobre la predicción de sismos sigue siendo una gran controversia; sin



**Figura 10.** Estimación de la magnitud en función del área de las asperezas identificadas en este estudio utilizando la ecuación de Kanamori y Anderson (1975).

embargo, es conocido que para predecir un terremoto se debe disponer de la siguiente información: Predicción = Lugar + Tamaño + Fecha.

De estos parámetros, sólo los dos primeros han sido posibles de identificarse y cuantificarse, restando aún definir la fecha de ocurrencia de los eventos. En tal sentido, es factible afirmar que la ciencia sólo ha llegado a pronosticar la ocurrencia de los sismos aplicando métodos estadísticos con el uso de catálogos sísmicos y recientemente, métodos cuantitativos con el uso de información sísmica, GPS e interferometría.

Para Perú, este tipo de estudios y sobre todo, los que consideran el seguimiento de los grandes sismos y sus respectivas áreas de ruptura, se iniciaron en

los años 70 con los primeros mapas de “Lagunas Sísmicas” propuestos por Kelleher (1972) para todo el borde de la placa del Pacífico. Desde estos años, se identificaron como futuras áreas a ser afectadas por sismos las que se encuentran en la región sur del Perú, norte de Chile y frente a la costa del departamento de Ica. Estudios posteriores, realizados por Heras y Tavera (2000) haciendo uso de la metodología de Wiemer y Wyss (1997), llegaron a identificar la presencia de zonas de acoplamiento asociadas a áreas de asperezas que podrían dar origen a futuros sismos en la costa, frente a los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa, Lima e Ica (Figura 11a). Posteriormente, revisiones más detalladas sobre la distribución espacial de las áreas de ruptura de grandes sismos, permitieron a Tavera y Bernal

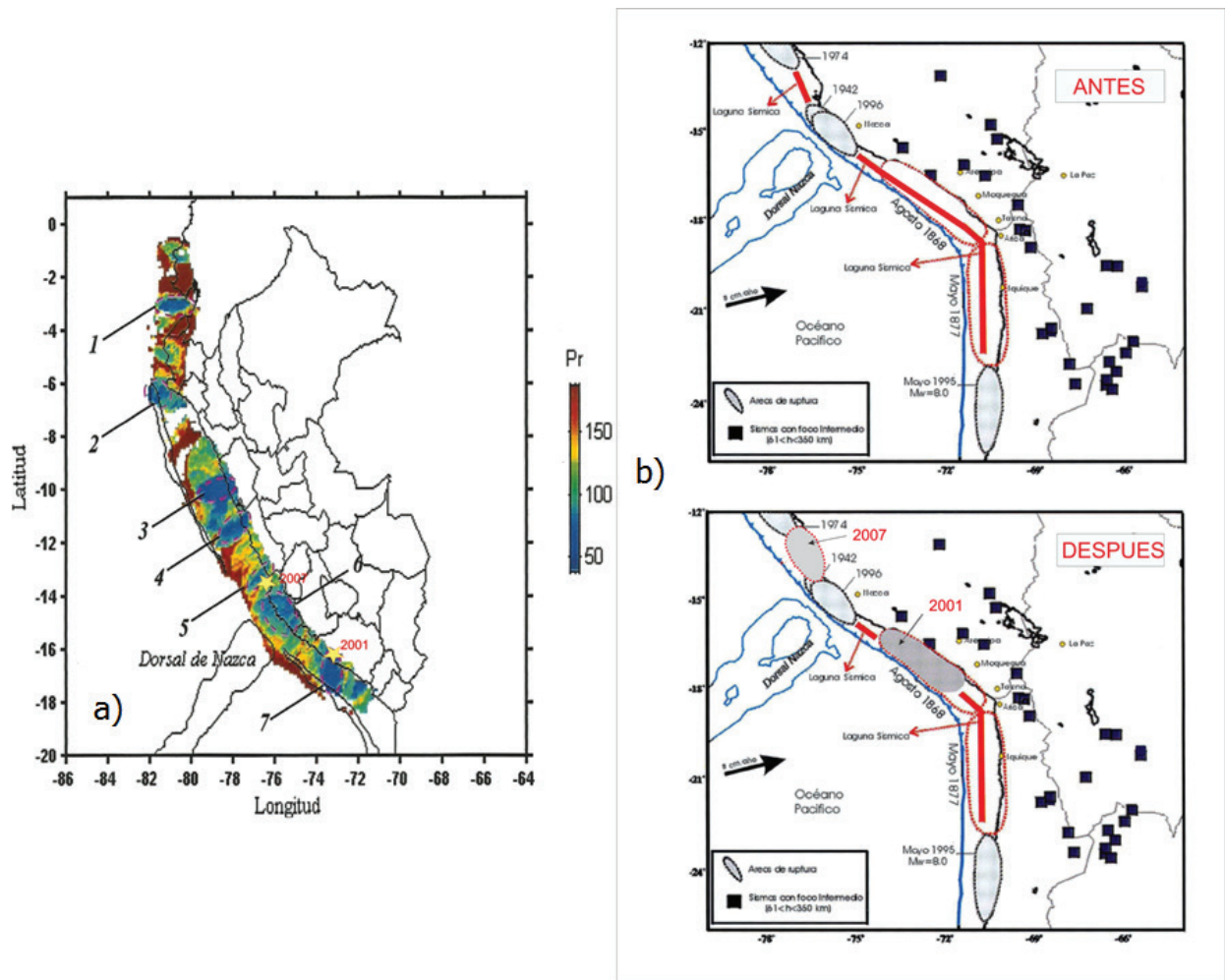


Figura 11. Lagunas sísmicas antes y después de los sismos de 2001 y 2007. a) Distribución de las áreas de ruptura y asperezas asociadas al proceso de subducción definidas por Heras y Tavera (2002), y b) Distribución de lagunas sísmicas según Tavera y Bernal (2005).

(2005) definir con mayor precisión la presencia de áreas de futuros sismos en la costa de Arequipa, Moquegua y Tacna (Figura 11b), y otra en la costa norte del departamento de Ica. De estas asperezas, las que se encuentran frente a los departamentos de Ica y Arequipa dieron origen a los sismos del 2001 y 2007, respectivamente.

En este estudio, se continúa con el trabajo iniciado por Heras y Tavera (2000) llegándose a reevaluar la presencia de las asperezas ya identificadas y proponer otras que podrían presentarse después de ocurrido los sismos del 2001 y 2007. Los resultados obtenidos en este estudio, permiten definir con mayor precisión la presencia de asperezas ubicadas frente a los departamentos de Arequipa-Moquegua-Tacna, Lima-Ancash y Lambayeque. De acuerdo a las dimensiones de las áreas de las asperezas, se estima el tamaño de los sismos que podrían ocurrir y afectar a estos departamentos. Por otro lado, estudios realizados con mediciones de GPS en las regiones norte y centro de Perú (Figura 12), han permitido a Villegas (2009), identificar la presencia de dos áreas de máximo acoplamiento sísmico frente a la costa de Lima, estas áreas son similares, en cuanto a su ubicación a las propuestas en este estudio. Del mismo modo, estudios realizados en la región centro y sur de Perú con datos de GPS, ha permitido a Perfettini, (2010), identificar nuevas áreas de acoplamiento sísmico frente a las costas de los departamentos de Lima, Arequipa, Moquegua, Tacna, Arica e Iquique (Figura 13), así como frente al departamento de Lima, siendo la ubicación de las áreas propuestas similares a las identificadas en este estudio.

## CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997), en el borde occidental del Perú, permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Los valores del parámetro “b” a lo largo del borde occidental del Perú varían entre 0.5 a 1.1 y los periodos de recurrencia para sismos con magnitud mayor a 7.0Ms, oscilan entre 50 y 70 años. Estos valores sugieren que la región de estudio es, por demás, compleja y heterogénea en su proceso de deformación y acumulación de energía.
- La distribución espacial de los valores del parámetro “b”, han permitido identificar la ubicación geográfica de 5 zonas de acoplamiento asociado con altos niveles de asperezas, probables de generar sismos con magnitudes mayores a 7.0Ms. Estas áreas han sido identificadas como:
  - Asperza ubicada en la región sur del Perú, frente a las costas de los departamentos de Tacna, Moquegua y parte Sur del departamento de Arequipa, (16.436 ° a 19.129 ° S).
  - Asperza ubicada al norte del departamento de Arequipa, frente a la localidad de Yauca, (15.564° a 16.147° S).
  - Asperza ubicada en la región centro del Perú, frente a la costa del departamento de Lima (12.130° a 13.367° S).
  - Asperza ubicada frente a las costas de los departamentos de Ancash y parte norte del departamento de Lima (9.417° a 11.914° S).
  - Asperza ubicada en la parte norte del Perú, exactamente frente a las costas de los departamentos de Piura y Lambayeque (5.397° a 7.132°S).
- Las probables áreas de ruptura asociadas a los grandes sismos ocurridos en el periodo histórico (1619, 1746, 1868, 1913), coinciden con la distribución de las áreas asociadas a valores bajos del parámetro “b”; es decir, con mayores niveles de recurrencia sísmica, las mismas zonas que presentan geometrías y ubicaciones geográficas similares a los propuestos por otros autores basados en datos de GPS.
- Las asperezas con mayor probabilidad a generar un sismo de gran magnitud se encuentran frente a los departamentos de Lima, Ancash y frente a los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna.



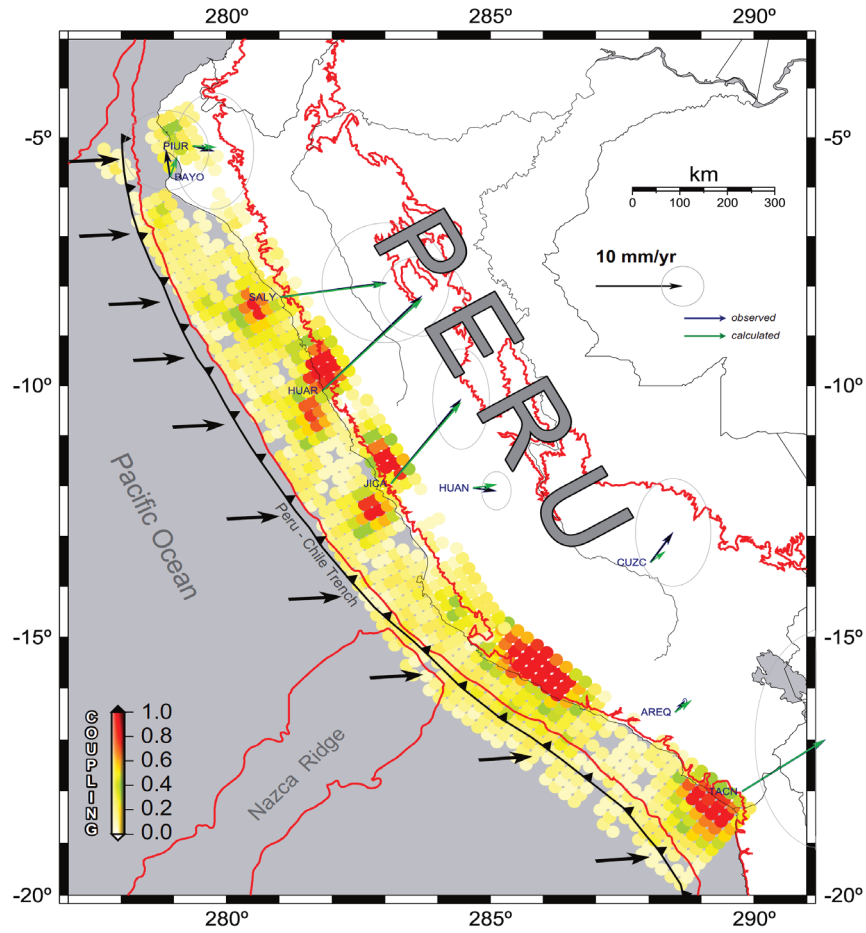


Figura 12. Resultados obtenidos con datos de GPS según Villegas (2009). Las áreas de color rojo indican zonas de mayor acoplamiento de placas.

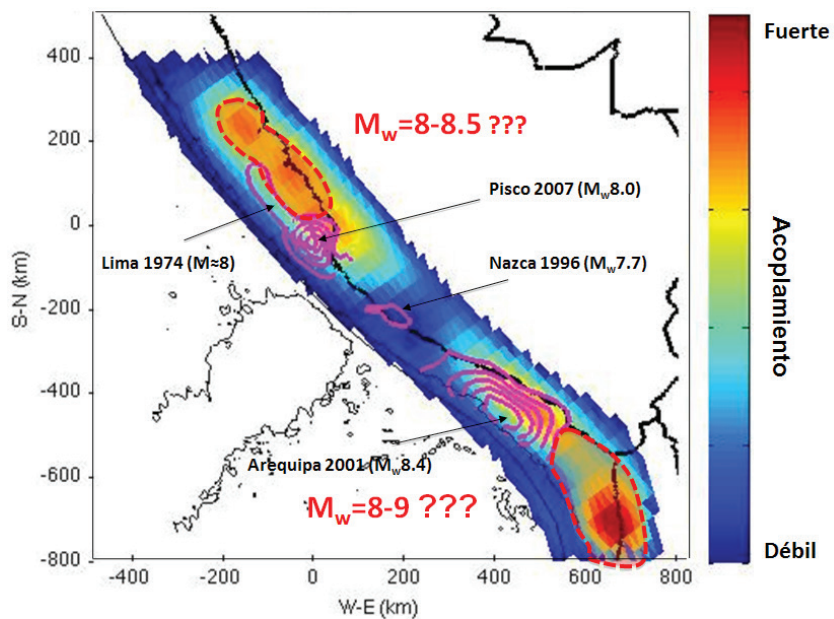


Figura 13. Resultados obtenidos con datos de GPS según Perfettini, 2010.



## REFERENCIAS

- Aki K. (1965). Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. Vol. 43 pp.237 – 239.
- Beck, S. L., and L. J. Ruff (1989), Great earthquakes and subduction along the Peru trench, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 57(3–4), 199–224.
- DeMets C., Gordon, R., Arhus, A., Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425–478.
- Guardia P., Tavera H. (2010). Inferencias sobre la superficie de contacto entre placas en Perú: Nazca y Sudamericana. XV Congreso peruano de Geología Cusco-2010.
- Gutenberg R. y Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- Heras H. y Tavera H. (2002). Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de periodos de retorno local basado en distribución de valores de “ $b$ ”. *Centro Nacional de Datos Geofísicos, boletín de la S.G.P.* pp. 7-16.
- Ishimoto, M., Iida, K. (1939). Observation of earthquakes registered with the micro seismograph constructed recently. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ Tokyo*, 443-478.
- Kanamori, H., Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismology. Soc. Amr.*, 65, 1073-1096.
- Katsumata, K. (2006). Imaging the high  $b$ -value anomalies within the subducting plate in the Hokkaido corner. *Earth Planets Space*, 58,-e49-e52.
- Kendrick, E., Bevis R., Smalley, B., Brooks, B., Vargas, E., Lauria, L., Souto, F. (2003). The Nazca-South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences* Volume 16, Issue 2, Pages 125-131. doi:10.1016/S0895-9811(03)00028-2.
- Kelleher, J. (1972). Rupture Zones of large South American earthquakes and some predictions. *J. Geophysics. Res.*, 77, 2087-2103.
- Langer C. J. and Spence W. (1995). The 1974 Peru Earthquake Series. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 3, pp. 665-687, June 1995.
- Norabuena, E., Timothy, H., Dixon., Seth Stein., Christopher, G., Harrison, A. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 26 pp. 3405-3408.
- Perfettini, U. (2010). Desplazamiento Sísmico y Asísmico en la zona del terremoto de Pisco: Avances en la Comprensión del Ciclo Sísmico. XV Congreso peruano de Geología Cusco-2010.
- Reasenber, P. (1985). “Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982”. *Journal Geophysical Research*, vol. 90, No. B7, Pages 5479-5495.
- Tavera, H. (2003). La Predicción Tectónica. *Centro Nacional de Datos Geofísicos. (CNDG)* p. 23 - 25.
- Tavera, H., Bernal, I. (2005). Distribución Espacial de áreas de Ruptura y lagunas sísmicas en el Borde Oeste del Perú. *Volumen Especial N° 6 Alberto Giesecke Matto* p. 89-102.
- Tavera, H., Fernandez, E., Bernal, I., Antayhua, Y., Agüero, C., Rodriguez, H.S.S., Vilcapoma, L., Zamudio, Y., Portugal, D., Inza, A., Carpio, J., Ccallo, F. and Valdivia, I. (2006). The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology* 10:2, 171-195.
- Tavera, H. (2008). El Terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007(7.9Mw), *Instituto Geofísico del Perú Dirección de Sismología – CNDG*.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974. *Instituto Geológico Minero del Perú, Lima*, 131 pp.
- Swenson J. L. and Beck S. (1999). Source Characteristics of the 12 November 1996 Mw 7.7 Peru Subduction Zone Earthquake. *Pure appl. geophys.* 154 (1999) 731–751.
- Wiemer S. y Wyss M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.
- Wiemer S. y Zuñiga R. (1994). ZMAP a software package to analyze seismicity, *EOS, Transactions, Fall Meeting, AGU*, 75, 456.
- Wiemer, S. (1996). Analysis of seismicity: New techniques and case studies. *Dissertation thesis*, 151 pp, University of Alaska, Fairbanks, Alaska.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of  $b$  in a formula  $\log N = a - bM$  showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophy Bull. Hokkaido Univ.*, 99-103.
- Villegas, J. C. (2009). Processing and Analysis of the LISN permanent GPS network, *Master’s theses Université de Nice - Sophia Antipolis-France*.
- Zuñiga R. y Wyss M. (2001). Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of Mexico, estimate from local recurrence times based on  $b$ -values, *Bulletin of the Seismological Society of America* December 2001 vol.91 no. 61717-1728.