

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ÁREAS DE RUPTURA Y LAGUNAS SÍSMICAS EN EL BORDE OESTE DEL PERÚ

HERNANDO TAVERA & ISABEL BERNAL

*Centro Nacional de Datos Geofísicos –Sismología. Instituto Geofísico del Perú
Calatrava 216, La Molina, Lima 12 - E-mail: jtavera@geo.igp.gob.pe*

RESUMEN

La información contenida en el Catálogo Sísmico de Perú ha sido utilizada para analizar y evaluar la distribución espacial de las áreas de ruptura producidas por sismos de gran magnitud ocurridos en el borde Oeste de Perú. La distribución temporal de las áreas de ruptura han permitido visualizar, desde al año 1500, la presencia de diversas lagunas sísmicas de diferentes dimensiones que han dado origen a sismos de gran magnitud en el pasado. Las características espacio-tiempo de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas proporcionan herramientas importantes para identificar posibles áreas propensas a ser afectadas por un sismo. En la actualidad, en el borde oeste de Perú se ha identificado la presencia de hasta 3 lagunas sísmicas que en el futuro darían origen a igual número de sismos. Estas lagunas se ubican entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996 (150 km de longitud); 2001 y 1996 (90 km de longitud); y al Sur del área de ruptura del sismo de 2001 (150 km de longitud). Esta última puede involucrar a la gran laguna sísmica presente en la región Norte de Chile (500 km de longitud).

ABSTRACT

The information contained in Seismic Catalogue of Peru has been utilized to analyze and evaluate the spatial distribution of associated areas of rupture to great earthquakes occurred in the Western border of Peru. The temporary distribution of the rupture areas have permitted to visualize, the presence of diverse seismic gaps of different dimensions which have caused earthquakes of great magnitude in the past from 1500. The space-time characteristic of rupture areas and seismic gaps provide important tools to identify possible areas which be affected by an earthquake. Currently, in the western border of Peru has themselves identifying the presence of 3 seismic gaps which would cause equal number of earthquakes in the future. These gaps are located among the areas of rupture of 1974 and 1942/1996 earthquakes (150 km of length), 2001 and 1996 (90 km of length), and in South direction from the area of rupture of earthquake occurred in 2001 (150 km of length). The last one could be involve a great gap seismic present in the North region of Chile (500 km of length).

INTRODUCCIÓN

Dentro de la Tectónica de Placas, el borde Oeste de Sudamérica se constituye como una de las más importantes fuentes sismogénicas en el mundo debido a la alta velocidad con la cual convergen las placas de Nazca (oceánica) y Sudamérica (continental). Esta velocidad es del orden de 8 cm/año (DeMets et al, 1990; Norabuena et al, 1999). La continua fricción entre dichas placas da origen con mayor frecuencia a los más violentos sismos conocidos en la historia sísmica de Perú y Sudamérica. Por ejemplo, el sismo ocurrido en Mayo de 1960 frente a la ciudad de Concepción, en la región Sur de Chile, con una magnitud de 9.5Mw y que afectó

una longitud máxima de 1000 km. Una consecuencia de este sismo es que dio origen a uno de los tsunamis transoceánicos más dañinos conocidos por la humanidad; además, permitió, por primera vez, que muchos investigadores observaran las oscilaciones propias de la Tierra, sin considerar que su eje de rotación varió ligeramente. En el Perú, es importante el sismo ocurrido en la región Sur en Agosto de 1868 con una magnitud de 9.0Mw y que produjo daños considerables a lo largo de 500 km aproximadamente. Este sismo, también generó un tsunami con olas del orden de 16 metros. Para ambos sismos se estima un periodo de retorno del orden de 100 años.

La ocurrencia de sismos en los bordes de las placas es debido a que el proceso de fricción entre ambas es continuo en el tiempo geológico. Cuando

las fuerzas que movilizan a las placas es mayor al total de las fuerzas que se oponen, entonces el deslizamiento de una de las placas se realizará de manera violenta produciendo un sismo y cuyo tamaño dependerá de la longitud de dicho deslizamiento y de las dimensiones del área afectada. El proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana se realiza a lo largo de toda su superficie de contacto; es decir, sobre una longitud de 5,000 km aproximadamente, pero los deslizamientos que dan origen a los sismos solamente involucran segmentos de longitud menor permitiendo considerar áreas pequeñas de ruptura. En el caso de estas zonas de convergencia, conocidas como «zonas de subducción», las superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar; sin embargo, sus dimensiones pueden ser estimadas a partir de la distribución de sus réplicas y en caso de sismos históricos, a partir de las áreas de intensidad máxima.

Debe entenderse que debido a la heterogeneidad de la superficie de ambas placas (Nazca y Sudamericana), la distribución espacial de las áreas involucradas en la ruptura no es aleatoria como para producir el avance lineal de las dos placas. Por el contrario, los sismos ocurren de manera indistinta sobre la superficie de fricción, de ahí su peligrosidad al no saber en que parte de toda la superficie se producirá el siguiente sismo. Sin embargo, la distribución espacial de los grandes sismos o de sus áreas de ruptura permite prevenir la presencia de otras áreas con diferentes geometrías que podrían estar comprometidas en producir, en el futuro, un sismo de gran magnitud. Esta particularidad, ha llevado a investigadores como Kelleher (1972), Kelleher et al (1973), Kelleher y McCann (1976), McCann et al (1979), Nishenko (1985), Nishenko, (1991) a proponer y sustentar una teoría observacional a largo plazo para la predicción de sismos, la misma que se basa en evaluar la presencia temporal de las llamadas «lagunas sísmicas». Una laguna sísmica puede ser definida como aquella área en la cual no se ha producido, durante un período determinado de tiempo, un sismo de magnitud elevada y que en la actualidad se encuentra rodeada por otras áreas que si produjeron sismos. Las dimensiones de las lagunas sísmicas permiten aproximar el tamaño del sismo que se produciría en el futuro, así como las dimensiones del área a ser afectada. La hipótesis de las lagunas sísmicas en su definición moderna fue introducido por Fedotov (1965) y aplicado en la región conocida como Cinturón de Fuego del Pacífico por Sykes (1971), Kelleher et al., (1973), McCann et al., (1979), y Nishenko y Sykes (1993). En general, la hipótesis de la laguna sísmica implica que el peligro de ocurrir un sismo, inmediatamente después de haberse producido otro grande, es mínimo y aumenta con el

pasar del tiempo pudiendo producirse en un nuevo segmento de la falla o límite de placas (WGCEP, 1988).

La hipótesis de las lagunas sísmicas ha tomado mayor relevancia y nuevos grupos de investigación vienen evaluando los trabajos realizados por Nishenko (1989a, 1989b, 1991) utilizando diversos catálogos como base de datos (Catálogo Preliminar de Epicentros del USGS, PDE y el CMT de la Universidad de Harvard) y diferentes escalas de magnitud, además de pruebas estadísticas que consideran el número total de zonas afectadas por un sismo característico y la probabilidad de que alguna de las zonas que podría ser afectada por un sismo, coincida con la probabilidad especificada Nishenko (1989a, 1989b, 1991). En conjunto, las nuevas bases de datos y las pruebas estadísticas realizadas, sustentan una nueva hipótesis definida por Kagan y Jackson (1991, 1994, 1995) como «New Seismic Gap Hipótesis» y que permite re-evaluar la existencia de lagunas sísmicas en todo el Cinturón de Fuego del Pacífico.

En este estudio, se realiza un análisis detallado de la distribución espacial de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas presentes en el borde Oeste de Perú a fin de identificar otras con mayor probabilidad de dar origen a un nuevo sismo en el futuro. Para tal fin, se estudia y discute las características de las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde el año 1500 a la fecha y cuya información se encuentra en los catálogos sísmicos del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2001; Agüero y Tavera, 2004).

PRINCIPALES ELEMENTOS TECTÓNICOS

El proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana se realiza acompañada de algunos elementos tectónicos que a su vez han dado origen a la formación de otros que hoy en día, controlan toda la geodinámica del borde Oeste de Sudamérica. Estos elementos son la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa Peruano-Chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes Sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente, tal como se muestra en la Figura 1.

La Dorsal de Nazca, es reconocida como una cordillera oceánica de forma asimétrica que se localiza en el extremo NO de la región Sur de Perú con una orientación NE-SO (entre 15° y 24° Sur). El extremo NE de la Dorsal se ubica frente al departamento de Ica a una distancia del orden de 50 km de la línea de fosa, teniendo aquí y sobre la cota de 2000 metros, un ancho de 220 km aproximadamente. El ancho y la altitud de esta cordillera disminuye considerablemente en dirección SO y se considera

que cotas menores ya subducieron bajo la placa continental (Sebrier et al., 1985). Estudios sobre anomalías magnéticas, permiten considerar la hipótesis de que la Dorsal de Nazca debe su origen a una antigua zona de creación de corteza que cesó su actividad hace 5 a 10 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980; Sebrier et al, 1985).

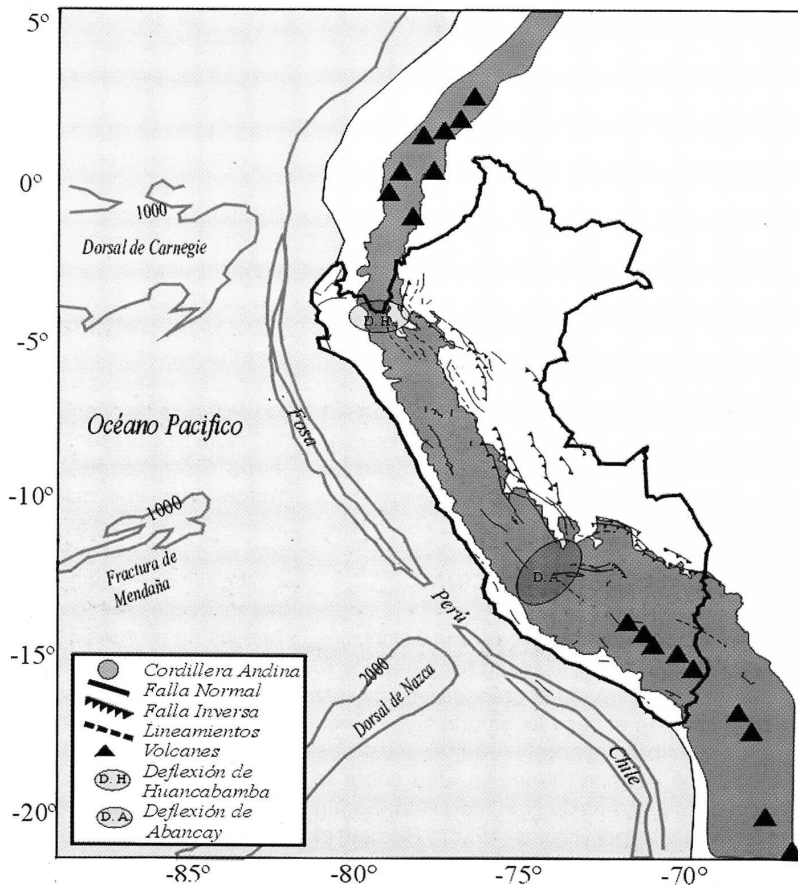
La Fractura de Mendaña corresponde a una posible discontinuidad de la corteza oceánica que se localiza en el extremo NO de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash (10° - 12° de latitud Sur). En la actualidad, esta fractura tiene una orientación NE-SO y un ancho de 80 km aproximadamente sobre la cota de 1000 metros y según la Figura 1, la estructura se localizaría a una distancia de 180 km de la línea de fosa. No existe mayor información sobre el origen y otras características de esta estructura.

La Fosa Perú-Chile delimita el inicio de la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, y esta formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas pre-existentes. Frente al borde Oeste de Perú, la fosa

presenta profundidades máximas de hasta 6000 metros en la región Norte y Sur; mientras que, en la región Centro es del orden de 5000 metros. La orientación de la fosa es en dirección NNO-SSE en la región Norte y Centro, y NO-SE en la región Sur de Perú. El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca.

La Cordillera Andina se distribuye sobre el borde Oeste de la placa sudamericana y tiene una extensión de 7000 km aproximadamente con alturas máximas del orden de 6000 msnm. En Perú, de Norte a Sur, la Cordillera de los Andes esta bien definida y muestra además, la presencia de dos deflexiones importantes: la primera a la altura de 5° Sur llamada deflexión de Huancabamba y la segunda en 14° Sur, conocida como deflexión de Abancay (Figura 1). Estas deflexiones cambian la orientación de la cordillera en dirección NE-SO y Este-Oeste respectivamente. Transversalmente, la Cordillera Andina presenta diversas unidades morfoestructurales (Costa, Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental y zona Subandina) y anchos que oscilan entre 250 km en la región Norte y Centro de Perú hasta 500 km en región Sur y en los límites entre Perú, Chile y Bolivia (Marocco, 1980; Tavera y Buforn, 1998).

Fig. 1:
Principales
elementos
tectónicos
superficiales
presentes en
continente y en
el borde Oeste
de Perú. Los
triángulos
indican la
localización de
los volcanes y
las líneas de
color azul, los
principales
sistemas de
fallas según
Sebrier et al,
(1985)



La Cadena Volcánica se ubica en la región Sur de Perú por debajo de la deflexión de Abancay hasta los 25°S en Chile. Esta cadena se distribuye sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento con orientación NO-SE en Perú y N-S en el extremo Norte de Chile. Las características geométricas de cada uno de los volcanes que integran esta cadena, muestran que la actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimenta la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al, 1985). En las regiones Norte y Centro de Perú, la actividad volcánica desapareció hace 8 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980).

Los Sistemas de Fallas presentes en el Perú, son el resultado del continuo proceso de deformación de la corteza continental, estando presentes en mayor número sobre la zona Subandina de la región Norte y Centro, todas de tipo inverso que evidencian el acortamiento de la corteza. En la Alta Cordillera y sobre la Cordillera Occidental, el número de fallas es menor en número y tamaño, siendo en general de tipo normal y estarían asociados al levantamiento de la corteza.

Dentro de la geodinámica del borde Oeste de Perú, los elementos tectónicos descritos anteriormente parecen controlar las características físicas de los procesos de acumulación de energía y posterior deformación. Por ejemplo, se ha observado que al Norte de la Fractura de Mendaña, la ausencia de sismos de magnitud elevada podría sugerir que el proceso de fricción de placas se realiza de manera asísmica, de ahí que la placa sea más continua por debajo del continente y alcance distancias del orden de 700 km desde la fosa (Tavera y Buforn, 2001). Entre la Fractura de Mendaña y la Dorsal de Nazca, la ocurrencia continua de sismos indicaría mayor fricción y por ende mayor deformación de la placa subducente. Asimismo, la presencia de la Dorsal de Nazca parece controlar la presencia de la deflexión de Abancay y el cambio en el modo de la subducción de la placa. Además, se ha observado que los procesos de ruptura de los sismos que ocurren en la región Sur de Perú tienden a propagarse en dirección Sur-Este. Estas apreciaciones son explicadas a continuación.

CARACTERÍSTICAS DE LA SISMICIDAD

Para analizar las características de la distribución espacial de la sismicidad que se produce en el Perú, es importante considerar a los grandes sismos que se han producido en el pasado, ya que solo de esa manera es posible intentar realizar estudios estadísticos que permitan tener una idea sobre la recurrencia de los sismos de gran magnitud. Según la recopilación hecha por Silgado (1978) y Dorbath et

al (1990), la mayoría de los sismos históricos para los cuales existe información se han producido frente al borde Oeste de Perú, esto debido a que en la costa se encontraban ubicadas las ciudades más importantes desde el punto de vista político. Así, el sismo más antiguo para el cual se dispone de información confiable data del año 1513, con epicentro probable frente a la línea de costa del departamento de Arequipa. Entre los sismos más importantes se puede mencionar los ocurridos en 1619 y 1953 que afectaron a los departamentos de La Libertad, Lambayeque y Piura con intensidades del orden de VIII (MM). En la región Central sobresalen los sismos ocurridos en 1586 (IX MM), 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) que destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima. Este último produjo un tsunami con olas de 15-20 metros de altura que inundó totalmente al puerto del Callao. En la región Sur, ocurrieron terremotos importantes en 1604 (IX MM), 1784 (X MM) y 1868 (X MM) que produjeron daños considerables principalmente a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Puno y Norte de Chile. El sismo de 1868 habría producido una longitud de ruptura del orden de 500 km y un tsunami con olas del orden de 16 metros de altura. Para la mayoría de estos sismos, algunos autores como Silgado (1978), Comte y Pardo (1991) y Dorbath et al, (1990) les atribuyen periodos medios de retorno del orden de 100-130 años.

La sismicidad instrumental data de 1960 aproximadamente y sus características han permitido realizar los primeros análisis y evaluaciones de la sismicidad que ocurre en Perú y así, identificar la presencia de fuentes sismogénicas, tanto en superficie como en profundidad (Barazangi y Isacks, 1979; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Bernal, 2002). Estudios recientes realizados por Cahill y Isacks (1992), Tavera y Buforn (2001), Bernal et al (2001) y Bernal (2002), han permitido concluir que la distribución espacial de los sismos en el Perú es por demás compleja; sin embargo, es posible identificar la presencia de diferentes fuentes sismogénicas. En la Figura 2 se presenta la sismicidad ocurrida en Perú entre los años 1960 y 2002 con sismos cuyas magnitudes son mayores a 4.5mb, y en ella se observa que los sismos con foco superficial ($h > 60$ km) se distribuyen principalmente frente a la línea de costa, siendo en número, tamaño y frecuencia mucho mayor que los sismos que se producen a los mismos niveles de profundidad en el interior del continente (Figura 2a). Esta sismicidad está asociada al proceso de fricción de placas y se constituye como la principal fuente sísmica presente en el Perú ya que dio origen a los más grandes sismos para los cuales se cuenta con información histórica y actual. En la Figura 2b, se muestra la distribución de los sismos con foco intermedio ($60 > h \leq 300$ km), los mismos que se pueden

agrupar en tres fuentes, una paralela a la línea de costa por debajo de los 9° Sur, otra en la zona Subandina de la región Norte y Centro, y la tercera sobre toda la región Sur, siendo esta última la que considera a un mayor número de sismos. Los sismos con foco profundo ($h > 300$ km) son parte de dos fuentes, la primera se encuentra en el límite de Perú con Brasil y la segunda entre Perú y Bolivia (Figura 2b).

La distribución en profundidad de los sismos con foco superficial ubicados entre la fosa y la línea de costa, más los de foco intermedio permiten configurar la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, así como la geometría de la primera por debajo del continente (Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992). Estudios realizados por Tavera y Buforn (2001), y Bernal et al (2002) han permitido tener una idea general de la forma de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción, tal como se muestra en la Figura 3. En dicha figura se observa que la placa subduce, de norte a sur, con un ángulo medio de 30° hasta una profundidad del orden de 100-120 km a partir de la cual, en la región Norte y Centro continúa de manera casi horizontal hasta distancias de 700 km desde la línea de fosa. Contrariamente, en la región Sur el ángulo de inclinación de la placa es continuo hasta una profundidad de 300 km. Obsérvese que a la altura de la latitud de 15°

aproximadamente, se estaría produciendo la contorsión de la placa para pasar de un proceso de subducción casi horizontal a otro continuo denominado comúnmente como «normal». Estos dos modos de subducción de la placa, junto a la presencia de la Dorsal de Nazca y de la Fractura de Mendaña parecen ser importantes al momento de producirse un sismo ya que controlan las características físicas de los diferentes procesos de ruptura. Por ejemplo, en la región central de Perú y entre la Dorsal de Nazca y la Fractura de Mendaña, en los últimos 100 años se ha producido hasta 7 sismos con magnitudes Mw mayores a 7.0 (1940, 1942, 1966, 1970, 1974, Febrero y Noviembre de 1996); mientras que, en la región Sur después de 133 años solamente se ha producido el sismo del año 2001 (8.2Mw). Para la región Norte únicamente se podría considerar el sismo ocurrido frente al departamento de Tumbes en el año 1970 (7.2Mw). En estas condiciones, se considera que en la región Central el acoplamiento de las placas es máximo, en la región Sur se produciría un acoplamiento medio y en la región Norte, sería casi nulo. Otra característica importante, es que en la región Sur los procesos de ruptura de los grandes sismos tienden a propagarse en dirección SE involucrando superficies más lineales sobre las cuales los daños y efectos son mayores. En la región Central, las áreas de ruptura y de daños en superficie son menores en tamaño.

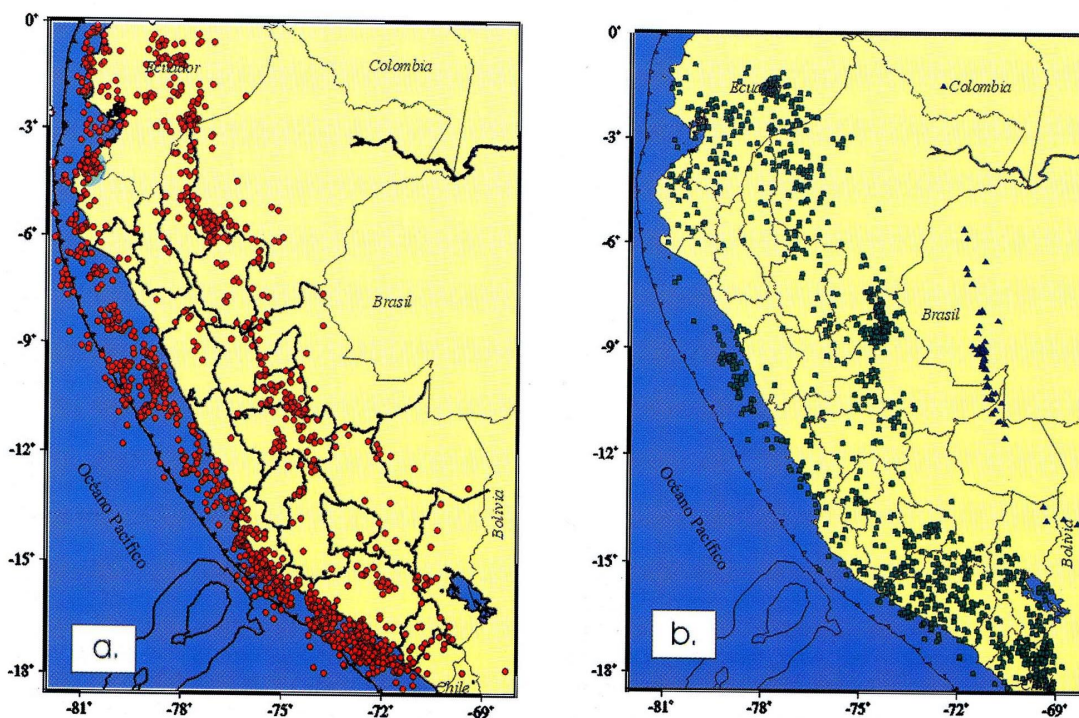


Fig. 2: Distribución espacial de los sismos con foco superficial (círculos rojos), intermedio (cuadrados verdes) y profundos (triángulos azules) ocurridos en Perú entre 1960 y 2002 ($m_b > 4.5$) según los catálogos de Engdahl et al, (1997) y IGP (2002)

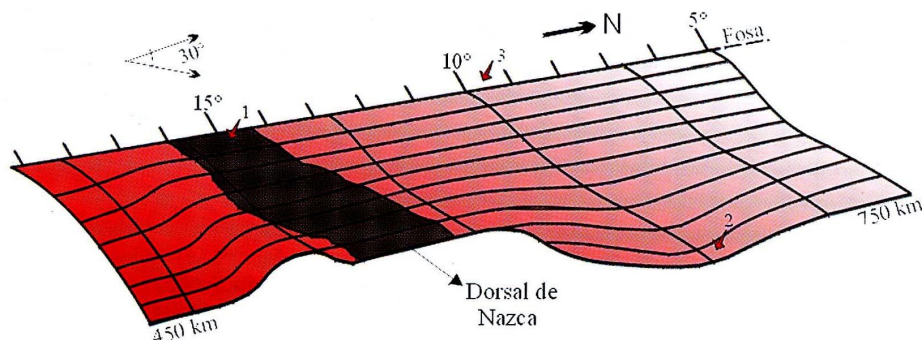


Fig. 3: Esquema 3D para la geometría de la placa de Nazca bajo la Sudamericana frente al borde oeste de Perú. Los números del 1 al 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la mayor ocurrencia de sismos, ver Figura 2

DISTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS DE RUPTURA Y LAGUNA SÍSMICAS

La ocurrencia continua de sismos de gran magnitud frente al borde Oeste de Perú, ha permitido a través de la historia evaluar el real potencial de esta principal fuente sismogénica. Lamentablemente, en los diferentes catálogos sísmicos del Perú solo se encuentra información a partir del año 1500, no siendo la base de datos suficiente como para intentar realizar estudios estadísticos que permitan obtener resultados con un alto grado de confiabilidad. Sin embargo, desde el punto de vista observacional es posible identificar diversas áreas en la cuales existiría la probabilidad de que ocurra un sismo en el futuro, siendo las áreas conocidas como «lagunas sísmicas». Estas áreas están rodeadas de otras en las cuales ya ocurrieron sismos importantes, lo cual permite afirmar que la energía liberada por estos sismos se habría acumulado en dichas áreas. En estas condiciones, resultaría fácil en cierto modo, identificar en el tiempo la presencia de lagunas sísmicas en función de la distribución de las áreas de ruptura asociadas a sismos de gran magnitud.

En la Tabla 1 se presenta los parámetros hipocentrales y valores de magnitud e intensidad de los sismos más importantes ocurridos en el borde Oeste de Perú desde el año 1500. Según la fecha de ocurrencia de estos sismos, podría aceptarse periodos de recurrencia que oscilan entre 50 y 150 años. En la Figura 4 se presenta 6 periodos de tiempo en los cuales se han producido sismos importantes con intensidades mayores a VIII en la escala de Mercalli Modificada. La primera figura corresponde al periodo 1500 y 1650, tiempo durante el cual se produjeron hasta 3 sismos y entre cada área de ruptura, se observa la presencia de lagunas sísmicas

con diferentes tamaños y ubicadas frente a los departamentos de Ancash, Ica y extremo Norte y Sur de Arequipa. Las longitudes mayores de estas áreas de ruptura oscilan entre 100 y 450 km. Seguidamente, durante el periodo comprendido entre los años 1651 y 1700, se produce un sismo frente al departamento de Ancash, otro frente a Ica y uno pequeño pero importante, frente a Tacna. Obsérvese que estos sismos ocurrieron en las áreas reconocidas en el periodo anterior como lagunas sísmicas. Del mismo modo, durante el periodo 1701 y 1800, se producen 2 de los más grandes sismos conocidos en el Perú, ambos produjeron tsunamis con olas que alcanzaron alturas del orden de 17 metros. En el caso de la región Central, el sismo de 1746 involucra una superficie cuya longitud máxima es de 350 km y abarca la pequeña laguna sísmica identificada en el periodo anterior frente al departamento de Lima. Para la región Sur, el sismo de 1784 prácticamente cubre toda el área de la laguna sísmica. Durante el periodo 1801 y 1850, solo se produce un sismo en la región Sur, estando el resto del borde Oeste de Perú en situación de acumulación de energía. En el periodo 1851 y 1900, en la misma región sur y después de 84 años se produce nuevamente un gran sismo, el más grande para el cual se cuenta con información detallada (longitud de ruptura del orden de 500 km). Este sismo produjo tsunamis con olas del orden de hasta 16 metros de altura en Tacna y Arica en Chile. El sismo de 1833 puede ser considerado como un precursor de este último. Es necesario mencionar que durante 194 años, en la región Central no ocurrió ningún sismo importante, al igual que en la región Norte en la que no ocurre un sismo desde 1619. Durante el siglo XIX, prácticamente todos los sismos se producen en la región Central (7 sismos) y solamente uno en el extremo norte de la región Sur (1913), pudiendo ser

toda la región Norte y Sur reconocida como lagunas sísmicas.

Este simple análisis espacial de las áreas de ruptura ha permitido observar que los grandes sismos son repetitivos en el tiempo, ya que las áreas que en algún momento liberaron energía, vuelven a pasar por un periodo de acumulación de la misma para dar origen a otro sismo en el futuro. Es obvio suponer que el tamaño de estos sismos dependerá del periodo de acumulación de dicha energía y de las dimensiones del área involucrada en la ruptura o de la laguna sísmica. A priori, este tipo de análisis permite reafirmar que las regiones Centro y Sur de Perú, son las de mayor potencial sísmico en razón de que en ambas los sismos parecen repetirse con periodos de tiempo comprendidos entre 50 y 150 años. Contrariamente, es posible que en la región Norte sea necesario periodos de acumulación de energía mayores a 500 años para que se produzca un gran sismo.

Similar análisis puede hacerse con ayuda de la Figura 5. Aquí, los sismos han sido representados en función de su longitud de ruptura y por su ubicación en latitud vs periodo de ocurrencia. En dicha figura puede observarse claramente el diferente potencial sísmico de cada región. Por ejemplo, durante todo el periodo de estudio, en la región Norte solamente se tiene información sobre la ocurrencia del sismo de 1619, para luego mantenerse toda la región en

silencio sísmico hasta el presente. En la región Central, se observa la ocurrencia continua de hasta 3 sismos entre 1678 y 1746, para luego aparecer un periodo de silencio sísmico del orden de 194 años que se rompe con la ocurrencia de 7 sismos hasta el año 1996, a partir del cual volvería a iniciarse el periodo de acumulación de energía o de silencio sísmico. Contrariamente, en la región Sur, pareciera que los grandes sismos estuvieran precedidos por otros de menor tamaño. Así, antes del sismo de 1604 (450 km de longitud de ruptura) ocurre otro menor en 1582; antes del sismo de 1868 (500 km de longitud de ruptura) se produce otro en 1784 también de menor tamaño y finalmente, en el año 2001 de produce otro sismo pequeño que puede ser el precursor de uno mucho mayor. Obviamente, es difícil el poder precisar el periodo más probable o la fecha de ocurrencia del próximo sismo. En esta figura, también puede observarse que existen periodos en los cuales se producen sismos en la región Sur y otros en los cuales la ocurrencia es nula, siendo esta distribución contraria a la que se observa en la región Central.

Si se considera el análisis de la ocurrencia de sismos en el borde Oeste de Perú y Chile para los siglos XIX, XX y XXI (Figura 6), puede observarse que en el siglo XIX los más grandes sismos ocurrieron en la región Sur de Perú (1868) y Norte de Chile (1877), ambos con magnitudes M_w de 9.0. Hacia el norte y sur de ambas áreas de ruptura es notoria la ausencia

TABLA 1

Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú desde al año 1500, según Silgado (1978) y Dorbath et al (1990)

<i>Fecha dd:mm:aa</i>	<i>Latitud (S°)</i>	<i>Longitud (W°)</i>	<i>Prof. (km)</i>	<i>Magnitud M_w</i>	<i>L r (km)</i>
22:01:1582	16.6	71.6		7.5	80
10:07:1586	12.1	72.0		8.1	175
24:11:1604	17.0	70.9		8.4-8.7	450
14:02:1619	7.9	79.0		7.8-8.0	100-150
12:05:1664	14.1	75.8		7.5	75
16:06:1678	12.3	77.8		8.0	100-150
20:10:1687	13.2	76.5		8.2-8.4	300
21:10:1687	16.4	71.6		8.0	150
23:08:1715	17.3	70.8		7.5	75
07:01:1725	9.2	79.3		7.5	75
29:10:1746	11.9	77.1		8.5-8.6	350
13:05:1784	16.5	72.0		8.0	300
18:09:1833	18.2	71.0		7.7	50-100
13:08:1868	18.2	70.5	25	9.0	500
24:05:1940	11.2	77.7	50	8.1-8.2	180
24:08:1942	15.5	74.7	33	8.2	200
17:10:1966	10.3	78.6	37	7.7-8.1	100
31:05:1970	9.2	78.8	42	7.9	130
03:10:1974	12.2	77.5	21	7.9-8.1	140
12:11:1996	15.3	76.4	18	7.7	150
23:06:2001	16.2	73.7	29	8.2	350

Lr = Longitud de ruptura *Mw* = Magnitud momento

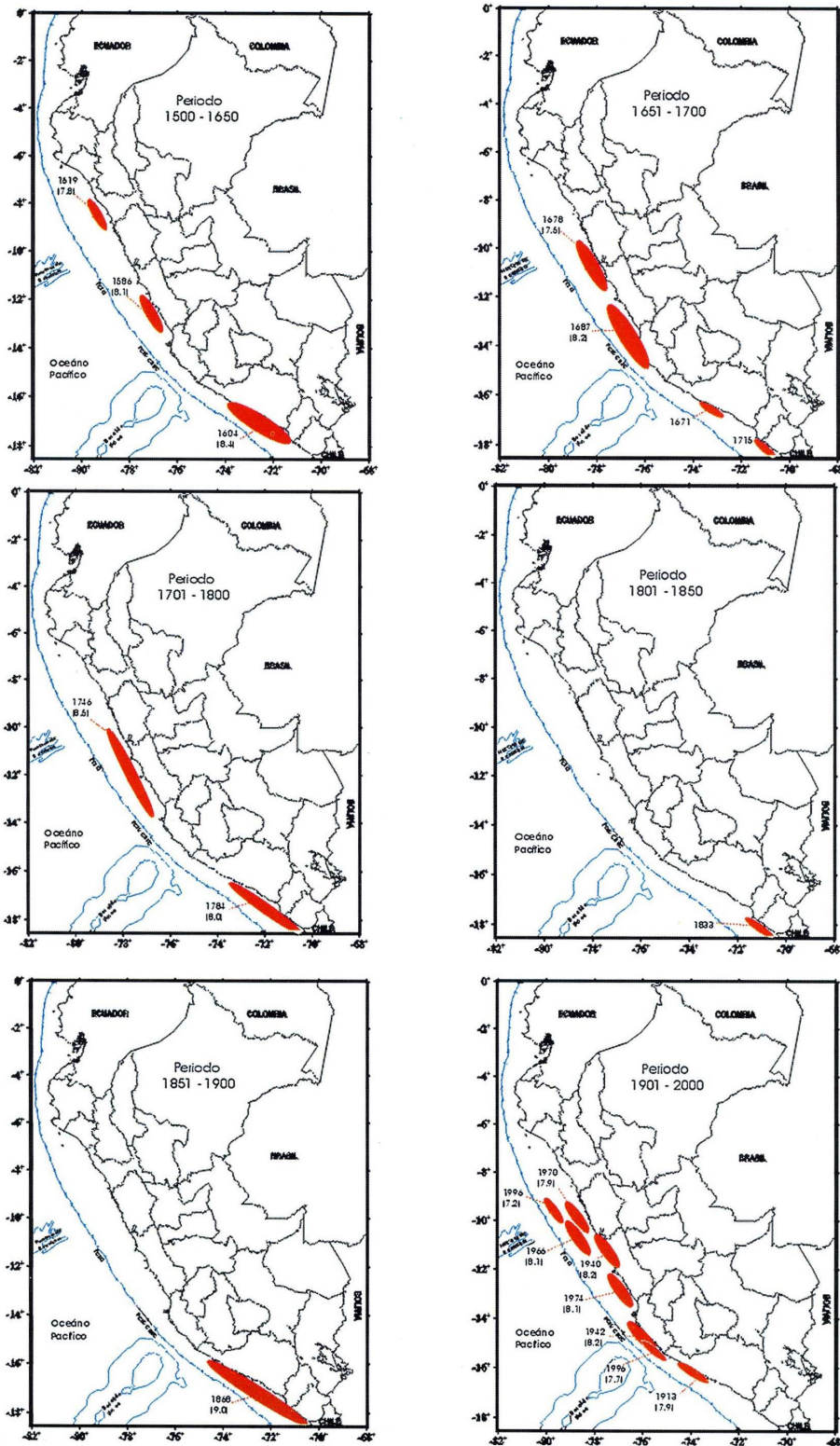


Fig. 4: Distribución espacial de las áreas de ruptura asociados a los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en el borde Oeste de Perú a partir del año 1500

total de sismos. Durante el siglo XX, todos los sismos ocurrieron al norte y sur de las áreas involucradas con los sismos de 1868 y 1877, sobresaliendo el gran sismo de Chile de 1960, quizás el más grande para el cual se tiene información sísmica instrumental (magnitud M_w de 9.5). También, es notoria la presencia de una importante laguna sísmica en la región Norte de Perú; mientras que, en el presente siglo solamente se ha producido un sismo en el año 2001 y por sus características y longitud de ruptura (Tavera et al, 2002; Giovanni et al, 2002), se espera que ocurra un sismo de mayor tamaño en esta región o en todo caso, en la región Norte de Chile a fin de cubrir en su totalidad el área de ruptura de las renombradas lagunas sísmicas correspondientes a los sismos de 1868 y 1877.

Para la región Sur de Perú, Giovanni et al (2001), realiza un análisis subjetivo basado únicamente en las áreas de intensidad máxima producidas por los sismos de 1604, 1784, 1868 y 2001. En la Figura 7 se observa que la intensidad máxima estimada para el sismo de 1604 es de IX-X (MM) y considera un área que abarca parte de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Posteriormente y luego de 180 años, esta misma área es afectada con intensidades de VIII producidas por el sismo de 1784. Del mismo modo y después de 84 años, el área es afectada nuevamente con intensidades de IX-X (MM) y en este caso son producidas por el gran sismo de 1868. Transcurridos

133 años, la misma área es otra vez afectada con intensidades de VIII debido a la ocurrencia de un sismo en el año 2001. Según esta simple representación, dicha área debería ser nuevamente afectada por un sismo capaz de producir intensidades de IX-X (MM), similar a los anteriores grandes sismos ocurridos en esta misma región.

Un análisis más detallado para ambas regiones puede hacerse utilizando la Figura 8. Esta figura considera las áreas de ruptura de los sismos ocurridos en Perú en 1942, 1974, 1996 y 2001, y el ocurrido en Chile en 1995. Por todo lo discutido anteriormente, es necesario aceptar que las regiones Sur de Perú y Norte de Chile han sido reconocidas como eminentes lagunas sísmicas que deben dar origen a sismos con características y tamaños similares a los ocurridos en 1868 y 1877. El interés fue mayor cuando en los años 1995 y 1996, se produjeron 2 sismos con epicentros ubicados en ambos extremos de las áreas de ruptura de los sismos de 1868 y 1877. También fue notorio el incremento de sismos con foco intermedio ($61 < h \leq 300$ km) al frente de las áreas de ruptura de estos sismos. Se debe considerar que la deformación de la placa de Nazca, por debajo de la superficie de fricción, es causada por la fuerza de la gravedad que tira de la placa hacia el interior del manto tratando de vencer la resistencia que ofrecen las placas al desplazamiento sobre su superficie de fricción, la misma que al ser superada produciría un sismo a niveles superficiales. En tales condiciones,

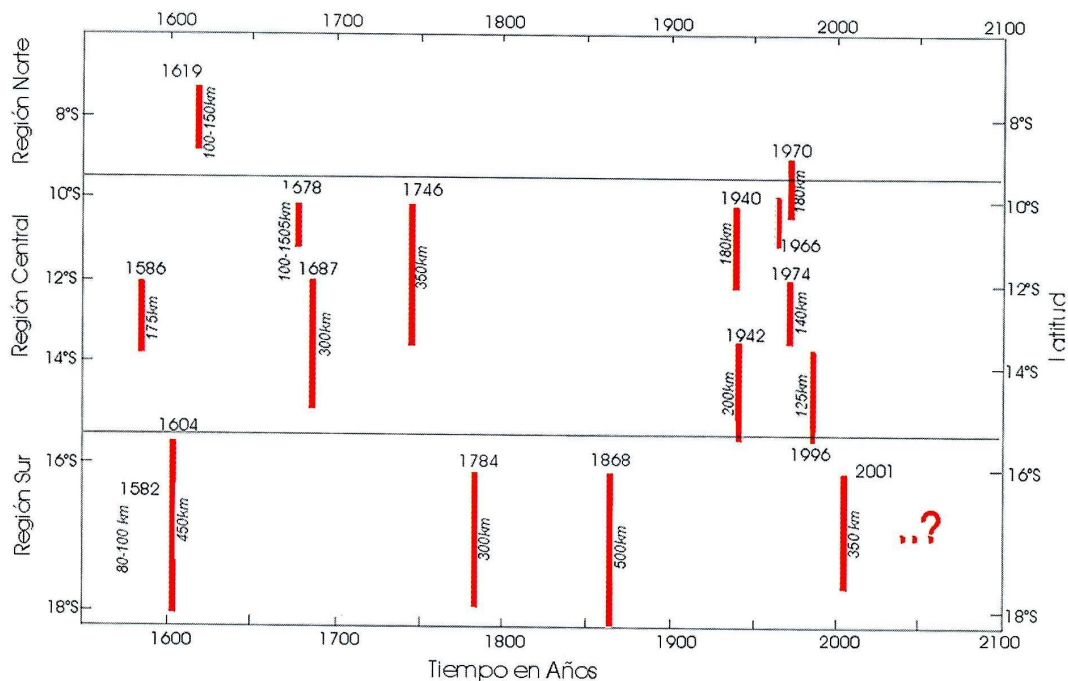


Fig. 5: Grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú en función de su ubicación en latitud, fecha de ocurrencia y longitud de ruptura (modificado de Dorbath et al, 1990)

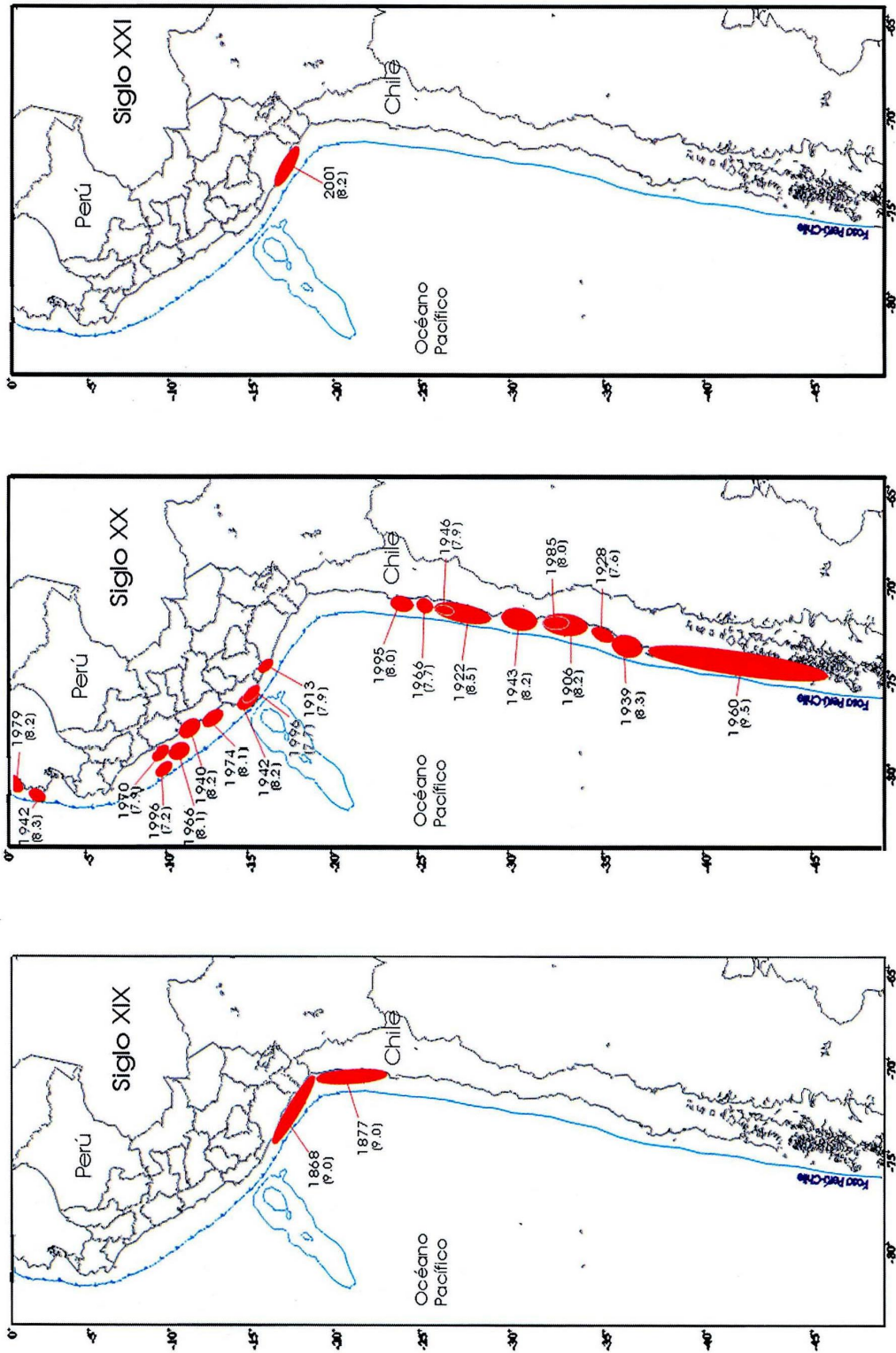


Fig. 6. Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XIX, XX y XXI

todo hacia suponer que pronto debería producirse un gran sismo en cualquiera de estas regiones. El 23 de Junio de 2001, la región Sur de Perú fue afectada por un sismo de gran magnitud que causo importantes daños materiales y/o personales, siendo inicialmente catalogado como el sismo repetitivo del ocurrido en 1868. Estudios posteriores, dieron como resultado que la magnitud de este sismo (8.2Mw) fue mucho menor que el de 1868 (9.0Mw). Se debe considerar que los daños observados en la ciudad de Arequipa y departamentos de Moquegua y Tacna no sobrepasaron el grado VIII en la escala MM, en comparación con el grado IX-X evaluado para el sismo de 1868. Tal como se observa en la Figura 8, la longitud de ruptura producida por el sismo de 2001 fue estimado en 350 km; es decir, 150 km menos que la producida por el sismo de 1868. De acuerdo a la propagación unilateral de la ruptura del sismo de 2001 (en dirección SE), toda la energía liberada por el sismo se habría acumulado al sur de la localidad de Ilo (Moquegua) marcando así el inicio de la nueva laguna sísmica.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis y la evaluación de las áreas de ruptura de los grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Perú, ha permitido aceptar que dicho borde

de convergencia de placas, es uno de los mayores en cuanto a su potencial sísmico se refiere. Sin embargo, a la pregunta *¿...dónde y cuándo se producirá el próximo sismo...?* aún no es posible dar respuesta debido a que los métodos hasta hoy desarrollados para la predicción de sismos requieren conocer en detalle todo el proceso que antecede a la ocurrencia de los mismos, conocimiento que aún se sigue buscando. En la actualidad, se continúa en la investigación, desarrollo y aplicación de diversos métodos geofísicos a fin de poder contar con la mayor cantidad de información sobre las propiedades físicas, geológicas y tectónicas de las regiones propensas a ser afectadas por un sismo. No se debe olvidar que el intentar predecir la ocurrencia de un sismo implica conocer los siguientes parámetros: *Predicción = Lugar + Tamaño + Fecha*. Con todo lo expuesto en este estudio, se puede llegar a la conclusión de que se conoce la ubicación de las áreas potencialmente sísmicas; además, su historia sísmica permite estimar el tamaño de los futuros sismos que en ella pudiera ocurrir; sin embargo, solo la fecha en que se produciría el sismo no puede ser determinada con exactitud. En general, los grandes sismos pueden tener periodos de recurrencia de muchos años y su tamaño suele ser proporcional al periodo de acumulación de energía y a las dimensiones del área comprometida en la futura ruptura.

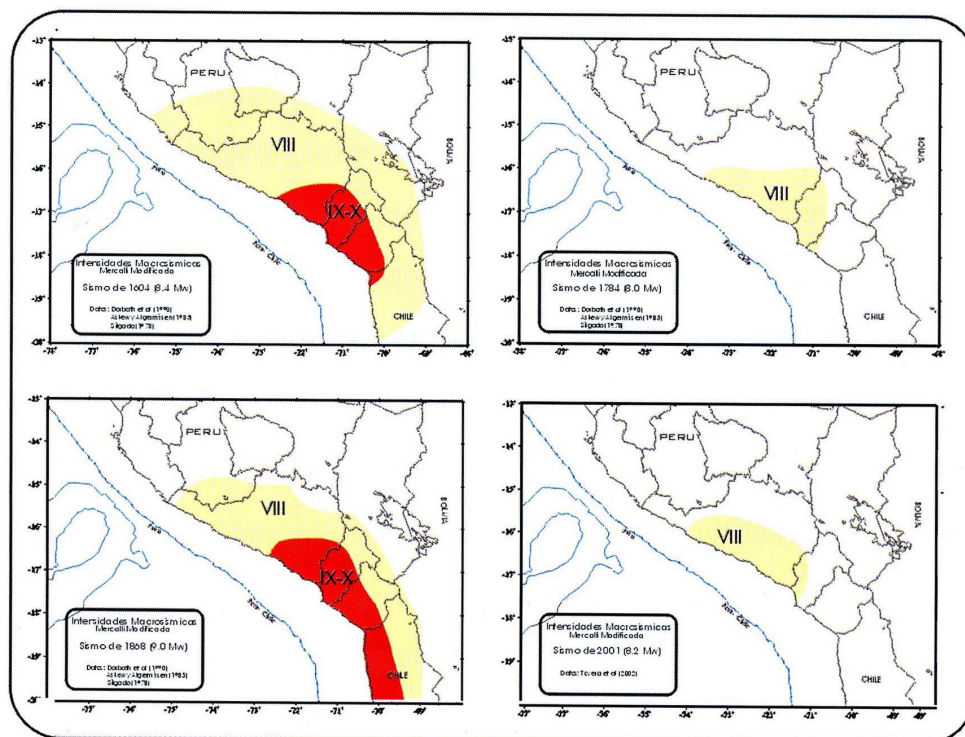


Fig. 7: Áreas de intensidad máxima en la escala Mercalli Modificada para los sismos ocurridos en 1604, 1784, 1868 y 2001 (Giovanni et al, 2001)

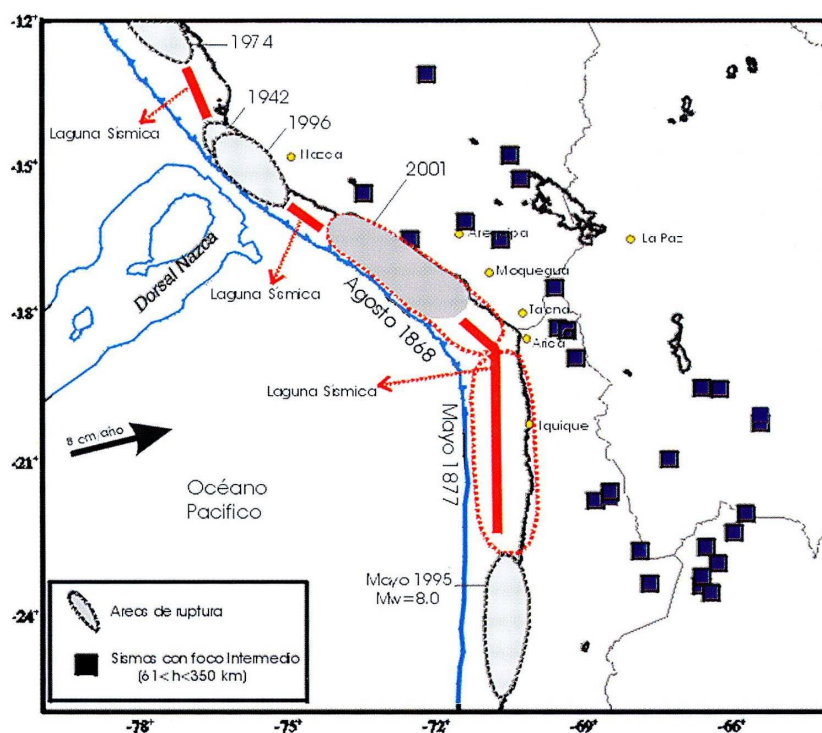


Fig. 8: Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos asociados al proceso de subducción y ocurridos en la región Sur de Perú y Norte de Chile durante los siglos XIX, XX y XXI. Las superficies sombreadas corresponden a las áreas de ruptura y las barras en rojo, a las lagunas sísmicas. Las áreas encerradas con interlineado corresponden a los sismos de 1868 y 1877.

La base de datos del Catálogo Sísmico ha permitido evaluar la presencia aleatoria, en el borde Oeste de Perú, de diversas áreas de ruptura y otras de lagunas sísmicas desde el año 1500 a la fecha. En la actualidad, las áreas más relevantes o comprometidas con la posible ocurrencia de un sismo en el futuro son (Figura 8): área de 150 km de longitud ubicada al sur del departamento de Lima y norte de Ica, y entre las áreas de ruptura de los sismos de 1974 y 1942/1996; área de 90 km de longitud ubicada al sur del departamento de Ica y entre las áreas de ruptura de los sismos de 1942/1996 y 2001; área de 150 km de longitud ubicada frente a los departamentos de Moquegua y Tacna, y entre las áreas de ruptura de los sismos de 2001 y 1877 (Chile). Para la región Norte de Chile, el área con mayor probabilidad para dar origen a un gran sismo esta ubicada entre las ciudades de Arica y Antofagasta con una longitud de 500 km.

Ahora, la pregunta final que resta por hacer es ¿...y ahora que sabemos donde ocurrirá un gran sismo en el futuro, qué hacemos...?. La respuesta es educación y preparación en todos los niveles a fin de no ser afectados o no sufrir daños de consideración. Ambas tareas pueden ser resumidas en una sola palabra, *Prevención*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. José Arce Helberg por su cordial invitación para desarrollar el presente estudio, así como permitimos ser partícipes del Volumen Especial editado por la Sociedad Geológica del Perú en Homenaje al Ing. Alberto Giesecke Matto. Asimismo, nuestro agradecimiento al Dr. Edgar Kausel por su revisión y comentarios al presente trabajo. Contribución N°020-CNDG-IGP/2004.

BIBLIOGRAFÍA

AGÜERO C. & H. TAVERA (2004).- Catálogo de Mapas de Isosistas de Sismos ocurridos en Perú desde el año 1500. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*, en preparación.

ASKEW B. & T. ALGERMISSEN (1985).- Catalog of earthquakes for South America: Hypocenter and Intensity data. Vol 4,6,7(a,b,c). *Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS)*, Lima-Perú.

BARAZANGI M. & B. ISACKS (1979).- Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial

- distribution of earthquakes. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 57, 537-555.
- BERNAL I.** (2002).- Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: Características y evaluación de la energía sísmica liberada. *Tesis de Ingeniería UNSA*, 170 pag.
- BERNAL I., H. TAVERA & Y. ANTAYHUA** (2001).- Evaluación de la sismicidad y distribución de la energía sísmica en el Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 92, 67-78.
- CAHILL T. & B. ISACKS** (1992).- Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.
- COMTE D. & M. PARDO** (1991).- Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4, 23-44.
- DEMETS C., R. GORDON, A. AARGUS & S. STEIN** (1990).- Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- DORBATH L., A. CISTERNAS & C. DORBATH** (1990).- Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- ENGDAHL R., E. VANDERHILST & R. BULLAND** (1997).- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88, 722-743.
- FETODOV S.** (1965).- Regularities of the distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands and north-eastern Japan. *Tr. Inst. Fis. Zemli. Akad. Nauk SSSR*, 36, 66-93.
- GIOVANNI M., S. BECK & L. WAGNER** (2002).- The June 23, 2001 Peru earthquake and southern Peru subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 14:1-14:4.
- GRANGE F., D. HATZFELD, D. CUNNINGHAM, P. ROECKER & G. SUAREZ** (1984).- Tectonics implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in southern Peru. *J. Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.
- HASEGAWA A. & S. SACKS** (1981).- Subduction of the Nazca beneath Peru as determined from seismic observation. *J. Geophys. Res.*, 86, 4971-1980.
- IGP** (2002).- Catálogo Sísmico Preliminar para el periodo 1985-2002. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*.
- KAGAN Y. & D. JACKSON** (1991).- Seismic gap hypothesis: Ten years after. *J. Geophys. Res.*, 96, 21419-21431.
- KAGAN Y. & D. JACKSON** (1994).- Long-term probabilistic forecasting of earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 99, 13685-13700.
- KAGAN Y. & D. JACKSON** (1995).- New seismic gap hypothesis: Five years after. *J. Geophys. Res.*, 100, 3943-3959.
- KELLEHER J.** (1972).- Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 77, 2087-2103.
- KELLEHER J., L. SYKES & J. OLIVER** (1973).- Possible criteria for predicting earthquake locations and their applications to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean. *J. Geophys. Res.*, 78, 2547-2585.
- KELLEHER J. & W. MCCANN** (1976).- Buoyant zones, great earthquakes and unstable boundaries of subduction. *J. Geophys. Res.* 81, 4885-4908.
- MAROCCHO R.** (1980).- Geologie des Andes peruvienne: un segment E-W de la chaîne des Andes peruvienne, la deflexión d'Abancay. Etude géologique de la Cordillere Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud d'Peru. Doc. *ORSTOM*, 94 pag.
- MCCANN W., S. NISHENKO, L. SYKES & J. KRAUSE** (1979).- Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Pageoph*, 117, 1082-1147.
- NISHENKO S.** (1985).- Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margin of South America: a quantitative reappraisal. *J. Geophys. Res.*, 90, 3589-3615.
- NISHENKO S.** (1989a).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 89-85, 118 pp.
- NISHENKO S.** (1989b).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 89-86, 120 pp.
- NISHENKO S.** (1999).- Circum-Pacific seismic potential 1989-1999. *Pure Appl. Geophys.*, 135, 169-259.
- NISHENKO S.** (1991).- Aspects of Pacific seismicity. *Pageoph*, 135, 169-179.

- NISHENKO S. & L. SYKES** (1993).- Comment on «Seismic gap hypothesis: Ten years after» by Y. Kagan y D. Jackson. *J. Geophys. Res.*, 98, 9909-9916.
- NORABUENA E., DIXON T., STEIN S. & HARRISON C.** (1999).- Deceleration Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions., *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3405-3408.
- RODRÍGUEZ L. & H. TAVERA** (1991).- Determinación con alta resolución de la Geometría de la zona Wadati-Benioff en el Perú Central. *Revista Brasileira de Geofísica*, 9, 141-159.
- SCHNEIDER J. & S. SACKS** (1987).- Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- SEBRIER M., J. MERCIER, F. MEGARD & G. LABAUCHER** (1985).- Quaternary fault and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics*, 4, 739-780.
- SILGADO E.** (1978).- Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. *Instituto Geológico Minero del Perú*, Lima-Perú, 328pp.
- SYKES L.** (1971).- Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquakes prediction for Alaska and the Aleutians. *J. Geophys. Res.*, 76, 8021-8041.
- TAVERA H. & E. BUFORN** (1998).- Sismicidad y sismotectónica de Perú. En: A. Udias y E. Buforn (eds). Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica. *Física de la Tierra UCM*, N°10, 187-219.
- TAVERA H. & C. AGÜERO** (2001).- Catálogo Sísmico del Perú, 1500-1982: Versión revisada y actualizada. *CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú*, 300pp.
- TAVERA H. & E. BUFORN** (2001).- Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- TAVERA H., E. BUFORN, I. BERNAL, Y. ANTAYHUA & L. VILCAPOMA** (2002).- The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6, 279-283.
- WGCEP** (1988).- Working Group on California Earthquake Probabilities: Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 88-398, 62 pp.