

## EVALUACION DE LA SISMICIDAD Y DISTRIBUCION DE LA ENERGIA SISMICA EN PERU

Isabel BERNAL, Hernando TAVERA & Yanet ANTAYHUA

*Centro Nacional de Datos Geofísicos. Instituto Geofísico del Perú. E-mail: Ibernal@axil.igp.gob.pe*

### RESUMEN

En este estudio se hace uso de una base de datos sísmicos extraída de los catálogos de Engdahl (período 1964-1995) y del Instituto Geofísico del Perú (año 1996) para analizar las características de la distribución espacial de los sismos y su relación con el proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana ( $m_b \geq 5.0$ ). Asimismo, se evalúa y cuantifica los niveles máximos de energía liberada por los sismos ocurridos a diferentes rangos de profundidad. Los resultados muestran la existencia de tres fuentes sismogénicas que dan origen a los sismos de foco superficial, intermedio y profundo. Los sismos asociados al contacto de placas y deformación de la placa oceánica, han permitido configurar la geometría del proceso de subducción, llegando a verificarse la presencia de dos modos de subducción, una denominada subhorizontal y otra normal, ambas sugeridas por diversos autores (Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001). Asimismo, los datos sugieren que a la latitud  $10^\circ S$ , a una distancia de 700 km desde la fosa y a profundidades de 120-150 km, la placa de Nazca estaría soportando un proceso de doblamiento debido a fuerzas derivadas de su mismo peso. La distribución de las curvas de iso-energía coincide con la geometría de las fuentes sismogénicas, siendo los valores máximos de energía sísmica liberada debido a la ocurrencia de sismos de magnitud elevada. La evaluación del número de sismos y sus respectivos porcentajes de energía, sugieren que la frecuencia sísmica y la cantidad de energía sísmica liberada dependen de la magnitud de los sismos.

### ABSTRACT.- ASSESSMENT ON THE SEISMICITY AND SEISMIC ENERGY DISTRIBUTION IN PERU.

Seismic data from the Engdahl (period 1964-1995) and the Geophysical Institute of the Peru (year 1996) catalogues, have been used to analyze the spatial distribution of earthquakes and their relationship with the subduction process between the Nazca and the South American plates ( $m_b \geq 5.0$ ). Also, the maximum strain release values of the earthquakes occurred at different depth ranges are evaluated and quantified. The results show the existence of three seismic sources that give origin to the shallow, intermediate and deep seismicity. The earthquakes associated to the contact of plates and oceanic plate deformation have allowed to characterize the subduction process, verifying the presence of two subduction types, subhorizontal and normal, both proposed by Cahill and Isacks (1992), Tavera and Buforn (1998) and Tavera and Buforn (2001). These data also suggest that by  $10^\circ S$  and depths of 120-150 km, the Nazca plate is developing a bending process due to stress derived from his own weight. The distribution of the strain release curves coincides with the seismogenic sources geometry. The evaluation of the earthquake number and their respective percentages of energy suggest that seismic frequency and the quantity of strain release depend of the earthquake magnitude.

### INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado, existe suficiente evidencia para asegurar la presencia de una litósfera conformada por una docena de placas rígidas cuyos espesores pueden alcanzar hasta 70 km en algunas zonas. Cada una de estas placas, con diferentes características físicas y químicas, se encuentran en constante movimiento dando origen a diversos procesos tectónicos como la formación de nueva corteza en los fondos oceánicos y la pérdida de la misma en las zonas de subducción (Barazangi y Isacks, 1976; Gubbins, 1996). Una zona típica de subducción, es la conformada por la interacción de la placa de Nazca y la placa Sudamericana, la misma que afecta directamente al borde oeste de Sudamérica. En este proceso, conforme la placa de Nazca

(litósfera oceánica) subduce debajo de la Sudamericana (litósfera continental) genera un gran número de sismos de diversas magnitudes a diferentes profundidades. En éstas condiciones, los sismos que ocurren en Perú tendrían su origen en el proceso de subducción de placas, siendo éste la principal fuente sismogénica causante de la ocurrencia de un gran número de sismos de magnitud elevada. Muchos de los sismos ocurridos en Perú han producido un alto grado de destrucción y mortalidad en las ciudades que se distribuyen, de Norte a Sur, cerca de la línea de costa. La distribución y ocurrencia poco frecuente de sismos en el interior del continente permite identificar la presencia de una segunda fuente sismogénica con sismos de magnitud menor, pero que al ser más superficiales, son tan dañinos como los debidos al proceso de subducción. Las características generales de esta

sismicidad, han sido ampliamente analizadas y evaluadas por diversos autores ya sea para configurar la geometría del proceso de subducción o para definir las zonas de mayor deformación continental (Suárez et al, 1983; Grange et al, 1984; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001). Sin embargo, estos estudios han sido realizados utilizando bases de datos telesísmicos y regionales para diferentes períodos de tiempo. Al utilizarse información telesísmica, debe tenerse en cuenta que la base de datos será reducida debido principalmente a que sólo se dispondrá de sismos con magnitudes mayores a la de corte del catálogo ( $\approx 4.5$  mb); mientras que, para magnitudes menores dicho catálogo no será completo. Los estudios realizados con información sísmica regional permiten tener mayor resolución sobre los parámetros hipocentrales y en el caso del Perú, éstos quedaron restringidos a estudios realizados en las regiones Centro y Sur (Hasegawa y Sacks, 1981; Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera 1991). A la fecha, no se conoce de algún estudio detallado para la región Norte.

Otro procedimiento frecuentemente utilizado para analizar las características de la sismicidad de una determinada región, considera la energía sísmica liberada por los sismos; sin embargo, este parámetro al estar asociado al tamaño de los sismos, obliga que se realice una correcta determinación de la magnitud de los mismos. El análisis de la energía sísmica liberada por los sismos puede realizarse a partir de la evaluación de los valores de energía representados en mapas de curvas de iso-energía y de la energía sísmica acumulada en diversos períodos de tiempo, siendo esta información útil para intentar predecir la ocurrencia de sismos de magnitud elevada (Carmona y Castano, 1970; Tsuboi, 1962; Duda, 1989). En general, el análisis de la energía sísmica liberada a partir de las curvas de iso-energía, han permitido a escala mundial identificar las regiones de mayor potencial sísmico y cuantificar la cantidad de energía liberada en un período de tiempo determinado. En el caso del Perú, sólo se tiene información de los estudios realizados por Ocola (1966) y Silgado (1978) utilizando este procedimiento.

En el presente estudio se realiza el análisis y una evaluación detallada de las características de la distribución en profundidad y en superficie de los sismos ocurridos en Perú entre 1964 y 1996, siendo esta base de datos compuesta por sismos con magnitudes mb igual o mayor a 5.0 extraída de los catálogos de Engdahl et al. (1998) y del IGP. Asimismo, esta misma base de datos es utilizada para cuantificar la energía sísmica liberada por los sismos ocurridos durante el período de estudio utilizando el criterio seguido por Carmona y Castano (1970).

## CARACTERÍSTICAS DE LA SISMICIDAD

### Datos

Los resultados que se obtenga de cualquier estudio que considere una base de datos, dependerán de

la calidad de los mismos; por lo tanto, esta debe cumplir ciertas condiciones antes de ser utilizada. Cualquier base de datos debe ser calificada y evaluada de manera cualitativa y cuantitativa a fin de constituir un conjunto de datos homogéneo. Además, en el caso de datos sísmicos, estos deben tener un rango de magnitud aceptable que permita contar con el mayor número de datos para un período determinado, pudiéndose determinar la magnitud de corte a partir de curvas de frecuencia sísmica. Asimismo, esta información debe ser lo más actual posible ya que solo así se tiene la seguridad de que los parámetros focales de los sismos han sido mejor determinados.

En este estudio, se hace uso de dos bases de datos extraídos del catálogo de Engdahl et al., (1998) y del Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2000). El catálogo de Engdahl et al., (1998) considerada como información base la proporcionada por el National Earthquake Information Center (NEIC) para el período comprendido entre 1964 y 1995, siendo los parámetros de estos sismos relocalizados por los autores utilizando fases sísmicas P y S a distancias regionales y telesísmicas, además de considerar las fases pP, pWP y sP para lograr un mejor ajuste para la profundidad del foco. Este procedimiento permitió a los autores elaborar una base de datos sísmicos homogénea. Para el año 1996, los datos fueron extraídos del catálogo sísmico del IGP y seleccionados siguiendo el criterio establecido por Cahill y Isack (1992), el mismo que considera los errores en el cálculo hipocentral para cada parámetro focal y el RMS de la solución en función de la magnitud de los sismos.

Una vez organizada la base de datos, se procedió a evaluar el umbral mínimo de magnitud a partir del cual se puede asumir que los datos son homogéneos en cuanto a su tamaño. Se debe tener en cuenta que si la magnitud de los sismos es elevada (aproximadamente  $\geq 5.0$  mb), estos serán registrados por un número mayor de estaciones sísmicas, así los errores en sus parámetros hipocentrales serán menores. Bajo esta premisa, para escoger el umbral mínimo de magnitud se procedió a elaborar gráficos de frecuencia sísmica y de variación temporal para diferentes períodos de tiempo considerando el total de los datos y clasificando los sismos en superficiales, intermedios y profundos. Los resultados obtenidos permitieron considerar como umbral mínimo de magnitud mb el valor de 5.0, lográndose de esta manera construir una base homogénea de datos.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SISMICIDAD

En la Figura 1a, se presenta la sismicidad con foco superficial ( $h \leq 60$  km), la que en general se distribuye formando dos grupos: el primero considera todos los sismos que se ubican, de Norte a Sur, entre la fosa peruano-chilena y la línea de costa. Dentro de este grupo se observa una mayor concentración de sismos sobre las latitudes de  $10^{\circ}$ S y  $15^{\circ}$ S, pudiendo estar relacionado este último con la incidencia de la Dorsal de Nazca al continente.

Asimismo, es notoria la presencia de áreas sin actividad sísmica entre las latitudes 7°S y 9°S lo cual puede ser asociado a la presencia de algunas zonas de vacío sísmico. En general, esta sismicidad está asociada al proceso de interacción de placas a niveles superficiales y es causante de los más grandes sismos que se hayan producido en Perú, tales como los de 1966, 1970, 1974, 1996, todos con magnitudes  $m_b$  mayores a 6.0. El segundo grupo de sismos superficiales considera a los que se distribuyen en el interior del continente sobre los principales sistemas de fallas y siguiendo una orientación NW-SE a lo largo de 1500 km aproximadamente. La mayor concentración de estos sismos se produce sobre las latitudes de 5.5°S y 12°S y son causantes de sismos importantes ocurridos en el interior del continente en 1968, 1969, 1990 y 1991. En el resto del territorio los sismos con foco superficial se distribuyen de manera dispersa, algunos de ellos posiblemente asociados a fallas de longitud menor.

Los sismos con foco intermedio se distribuyen en el interior del continente formando tres agrupamientos (Figura 1b). El primer grupo está formado por los sismos que se ubican cerca de la línea de costa por debajo de 9°S, siendo algunos de estos sismos sentidos en superficie,

principalmente cerca de la latitud 12°S (por ejemplo, el sismo del 18 de abril de 1993,  $h=92$  km,  $m_b=6.1$ ). El segundo grupo considera a los sismos que se distribuyen en la región Norte y Centro sobre una longitud de 1200 km con orientación NW-SE. En este grupo sobresalen los agrupamientos ubicados en ambos extremos del alineamiento de sismos. En esta región la actividad sísmica prácticamente cesa a una distancia de 700 km desde la fosa y en la región central, a una distancia del orden de 500 km. El tercer grupo está formado por los sismos que se distribuyen sobre la región sur, los que alcanzan una distancia del orden de 450 km desde la línea de fosa.

Los sismos con foco profundo ( $h>300$  km) se distribuyen próximos a los límites de Perú con Brasil y Bolivia (Figura 1a). En el primer grupo los sismos se alinean en dirección N-S sobre una longitud de 500 km; mientras que, en el segundo el número de sismos es menor y tienden a distribuirse de manera muy dispersa en dirección E-W. Por lo general, estos sismos, debido a la profundidad a la cual se producen, no generan daños en superficie aunque el sismo ocurrido el 9 de junio de 1994 generó intensidades entre IV y V (MM) en toda la región Sur de Perú.

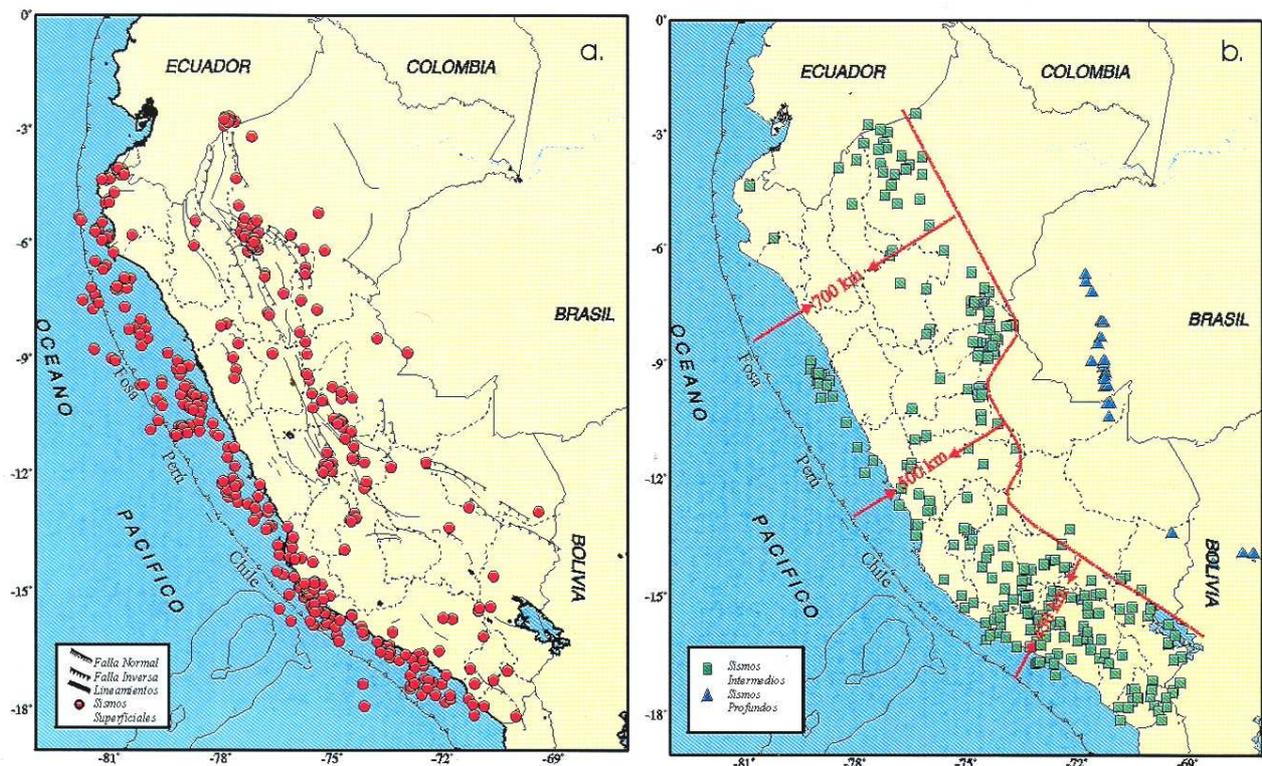


Fig. 1: Distribución espacial de los sismos ocurridos en Perú entre 1964 y 1996 ( $m_b \geq 5.0$ ). a) Sismos con foco superficial ( $h \leq 60$  km), b) Sismos con foco intermedio ( $60 < h \leq 300$  km) y profundo ( $h > 300$  km).

## GEOMETRÍA DEL CONTACTO DE PLACAS

De acuerdo al origen de los sismos, en Perú estos pueden ser reagrupados en sismos que se producen debido al proceso de interacción de placas y deformación de la placa oceánica a profundidades y distancias mayores desde la fosa, y en sismos asociados a las deformaciones superficiales que se producen en el interior del continente debido a la presencia de importantes sistemas de fallas. De estos dos grupos, el más importante es el que considera la sismicidad asociada a la placa oceánica de Nazca y para evaluar su distribución espacial, en la Figura 2a se presentan los sismos que se ubican entre la fosa y la línea de costa asociados al proceso de fricción de placas y los sismos de profundidad intermedia de la Figura 1b. Se debe asumir que toda esta sismicidad está directamente asociada a la placa oceánica de Nazca y su distribución espacial permitirá definir su posible geometría. Para tal fin, se ha considerado conveniente elaborar una serie de 18 perfiles sísmicos perpendiculares a la línea de la fosa. De estas secciones, las 10 primeras tienen un ancho de 100 km y abarcan las regiones Norte y Centro de Perú; mientras que, en la región Sur las secciones tienen un ancho de 50 km. Esta diferencia es debido a que en la región Sur es notoria la presencia de un número mayor de sismos. En cada perfil sísmico se ha evaluado la tendencia

lineal de los sismos a fin de tener información sobre la posible geometría de la placa de Nazca a lo largo de cada sección. Tal como se observa en la Figura 2a, no se ha considerado los sismos superficiales con focos en el continente ni los de foco profundo. Los resultados obtenidos son presentados en la Figura 3.

De acuerdo a las tendencias medias de la sismicidad, en la Figura 3 se observa que para la región Norte de Perú la placa oceánica aumenta su profundidad de Oeste a Este, estando ésta a menos de 50 km cerca de la fosa hasta alcanzar una profundidad de 150 km en el interior del continente. A partir de la distancia de 250 hasta 780 km, la placa oceánica subduce bajo el continente de manera casi horizontal, mostrando en el perfil número 4 (sobre la latitud  $10^{\circ}\text{S}$ ) un posible cambio en su geometría al aumentar su profundidad hasta 160 km. En la Figura 3b, la geometría de la placa oceánica sigue el mismo patrón descrito anteriormente. En ambos perfiles se observa que la placa oceánica, desde la fosa, inicia su inclinación con un ángulo de  $25^{\circ}$  hasta alcanzar la profundidad de 110-150 km a partir de la cual la placa prácticamente subduce de manera horizontal hasta alcanzar una distancia de 500 km. La Figura 3c muestra la forma de la placa de Nazca para la región Sur y en ella se observa que esta subduce inicialmente con un ángulo constante del orden de  $30^{\circ}$  hasta una profundidad de 100 km a partir de la cual en su

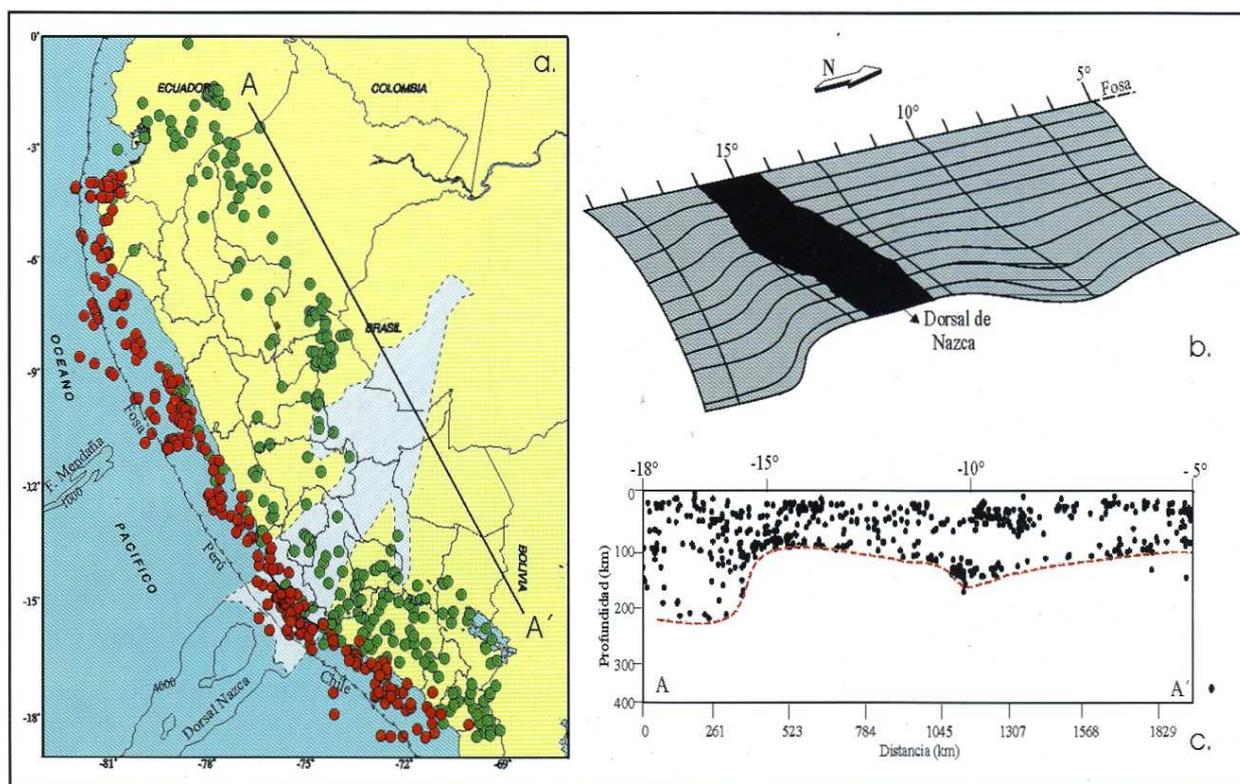


Fig. 2: a) Distribución espacial de los sismos asociados al contacto de placas y a la deformación de la placa oceánica por debajo del continente. El área sombreada corresponde a la proyección de la Dorsal de Nazca según Spence et al. (1998). b) Esquema 3D para la geometría de la placa de Nazca y c) Sección vertical paralela a la fosa Peru-Chile según la línea A-A' de la Figura 2a.

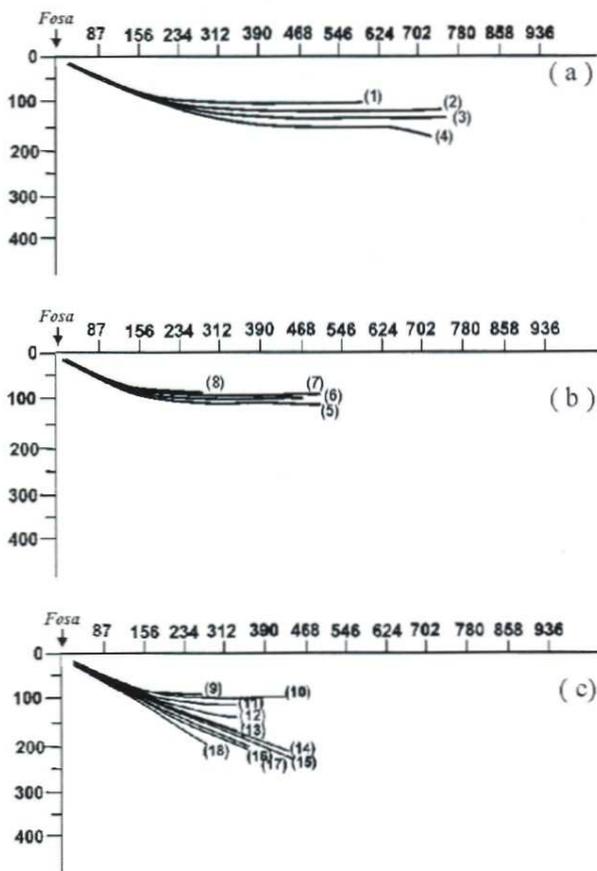


Fig. 3: Tendencias medias de la sismicidad asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca debajo del continente (ver texto). (a) Región Norte, (b) Centro y (c) Sur.

extremo norte aún la placa subduce de manera horizontal y conforme avanza hacia el sur, la placa soportaría un proceso de contorsión hasta alcanzar una profundidad final del orden de 250 km. En superficie y desde la línea de fosa, la placa alcanza distancias de 450 km.

Tal como se discutió anteriormente, en la Figura 2a se presenta la sismicidad asociada con la placa oceánica de Nazca y sobre ella se ha proyectado la posible geometría de la Dorsal de Nazca por debajo del continente según Spence et al. (1998). En esta figura se observa que los sismos con foco intermedio prácticamente bordean a la imagen de la Dorsal de Nazca por debajo del continente sugiriendo que ésta cumple un rol importante al momento de definir su geometría. Sobre la Dorsal de Nazca y cerca de la línea de costa, el número de sismos con foco intermedio se incrementa notablemente debido a que en esta área existiría mayor resistencia al desplazamiento de ambas placas asociado a la presencia de la Dorsal de Nazca en el proceso de subducción. Asimismo, es importante observar la ausencia de sismos de foco intermedio a distancias mayores de 400 y 500 km desde la fosa, lo cual sugiere que la Dorsal de Nazca como parte de la placa oceánica sería más resistente a la deformación.

A fin de tener una idea generalizada de la geometría de la placa oceánica de Nazca, las tendencias medias de la sismicidad mostradas en la Figura 3 han sido utilizadas para construir un esquema 3D de la misma. En la Figura 2b se observa que la geometría de la placa de Nazca por debajo de la continental no es homogénea ya que en las regiones Norte y Centro la placa subduce con un ángulo de inclinación promedio de  $25^\circ$  hasta una profundidad del orden de 120 km para luego continuar de manera horizontal hasta una distancia, desde la fosa, del orden de 700 km en la región norte y de 500 km en la región central. En la región Sur, la placa subduce con un ángulo constante de  $30^\circ$  aproximadamente hasta alcanzar una profundidad de 250 km. Entre ambos modos de subducción se observa la presencia de una área de 150 km de largo sobre la cual la placa de Nazca soportaría una contorsión. En la Figura 2b la zona sombreada corresponde a la posible ubicación y geometría de la Dorsal de Nazca por debajo del continente.

En la Figura 2c se muestra el perfil que incluye toda la sismicidad asociada a la placa de Nazca a lo largo de la línea A-A' (Figura 2a) y en ella se observa que la placa de Nazca, entre las latitudes de  $5^\circ$  a  $15^\circ$ S alcanza profundidades medias de 120 km con un ligero aumento en la profundidad a la latitud de  $10^\circ$ S debido posiblemente a un doblamiento de la placa por el peso de la misma, tal como se muestra en la Figura 2b. Al sur de  $15^\circ$ S se observa directamente la distribución de los sismos sobre el extremo de la placa de Nazca que está comprometida en la contorsión de la misma hasta alcanzar profundidades del orden de 250 km. Asimismo, sobre la latitud  $15^\circ$ S se observa la presencia de un número mayor de sismos posiblemente asociados a la presencia de la Dorsal de Nazca en el proceso de subducción.

### Distribución de la Energía Sísmica

Es bien sabido que dentro del proceso geodinámico de la Tierra, las placas soportan una lenta deformación derivada de la mayor o menor cantidad de energía acumulada antes de ser liberada. En general, se acepta que a mayor tiempo de acumulación de energía, mayor será el tamaño del sismo a producirse o viceversa; por lo tanto, existe una relación directa entre la energía liberada y el tamaño o magnitud del sismo, de ahí que frecuentemente se utilice este parámetro para estimar la cantidad de energía liberada por los mismos. La energía liberada por un sismo considera la que se transmite en forma de ondas elásticas y la que se transforma en calor, aunque esta última es absorbida y disipada en las proximidades del hipocentro. En estas condiciones, únicamente la energía liberada en forma de ondas elásticas es la que llega a ser registrada por los sismógrafos. Gutenberg y Richter (1964) indican que en una región dada, la energía sísmica liberada es prácticamente en su totalidad debida a la ocurrencia de sismos de magnitud elevada y que los menores, sólo representan una pequeña proporción del total de esta energía. Evidentemente, la mayor o menor cantidad de energía que se libere dependerá

de la mayor o menor resistencia de los materiales para acumular energía. A fin de estimar la energía liberada por los sismos, Gutenberg y Richter (1964), Kanamori y Anderson (1975) y Duda (1989) sugieren las siguientes expresiones:

$$\text{Log } E_s = 5.8 + 2.4 mb \quad (1)$$

$$\text{Log } E_s = 11.8 + 1.5 M_s \quad (2)$$

donde,  $mb$  y  $M_s$  representan la magnitud del sismo obtenido a partir de ondas de volumen y superficiales respectivamente.

Una manera de evaluar la energía sísmica liberada por uno o más sismos, es mediante su análisis sobre mapas de iso-energía para diferentes períodos de tiempo y así identificar las áreas o regiones de mayor potencial sísmico. Utilizando este criterio, muchos autores han realizado estudios sobre la energía sísmica liberada por sismos a escala mundial y regional (Utsu y Seki, 1954; Richter, 1958; Tsuboi, 1962; Otero, 1972; Carmona y Castano, 1970; Duda, 1989). Para el Perú, se han realizado pocos trabajos para analizar este parámetro destacándose los estudios de Ocola (1966) y Silgado (1978). En este caso, ambos autores utilizan información extraída del catálogo del U.S.C.G.S para un período de tiempo de 14 años, Ocola (1966) entre 1949-1963 y Silgado (1978) entre 1960-1974. El umbral mínimo de magnitud  $mb$  utilizado por estos autores fue de 6.0 y a pesar que sus resultados definen bien las zonas potencialmente sísmicas, es necesario evaluar estos valores utilizando una mayor base de datos homogéneos y para un período de tiempo reciente.

A diferencia de Ocola (1966) y Silgado (1978, en este estudio se utiliza un período de datos de 33 años y un umbral mínimo de magnitud de 5.0  $mb$ . Para estimar la energía sísmica liberada se utiliza la magnitud  $mb$  ya que para todos los sismos considerados en nuestra base de datos, a diferencia de la magnitud  $M_s$ , siempre presentan este valor, incluso para los sismos de magnitud elevada. Según la ecuación (1), un sismo de magnitud  $mb$  igual a 5.0 liberaría una energía equivalente a  $6.309E+17$  ergios y si se considera que esta magnitud es la mínima en nuestra base de datos, es válido utilizar su valor de energía liberada como una unidad "ue" a fin de poder compararla con la liberada por otros sismos de diferente magnitud, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Magnitud (mb)	Energía (ergios)	Unidad de Energía
5.0	6.3E+17	1 ue
5.5	1.0E+19	15.8 ue
6.0	1.5E+20	251.8 ue
6.5	2.5E+21	3981.1 ue
7.0	3.9E+22	63095.8 ue

Tabla 1.- Equivalencias entre la magnitud  $mb$  y la energía liberada en "ue".

Una vez establecido el criterio de medida de la energía sísmica liberada, se procede a construir una malla de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  que cubra todo el Perú, de tal manera que la energía liberada por el total de los sismos que se localizan dentro de cada área, es sumada a fin de considerar este valor como la energía liberada en el punto medio del área. Los valores de energía así obtenidos, son interpolados a fin de construir curvas de iso-energía para sismos con foco superficial ( $h \leq 60$  km), intermedio ( $60 < h \leq 300$  km) y profundo ( $h > 300$  km). Para un mejor análisis de los resultados, se ha estimado conveniente elaborar los mapas de iso-energía para períodos de 11 años para cada nivel de profundidad.

#### Energía liberada durante el período 1964-1974

En la Figura 4a se presenta las curvas de iso-energía para sismos con foco superficial ocurridos en el período 1964-1974 y en ella se observa que las mayores concentraciones de estas curvas se presentan a lo largo de la costa de Perú, sugiriendo que en esta zona se ha liberado la mayor cantidad de energía sísmica durante el período considerado. Además, en esta figura se aprecia que las curvas de iso-energía, al norte de  $6^\circ S$  y al sur de  $15^\circ S$ , tienden a alejarse de la costa para distribuirse sobre el continente. En el interior del continente las curvas de iso-energía se distribuyen formando dos grupos, uno ubicado en la región Norte y otro en la región Centro sobre la latitud de  $12^\circ S$ . Desde el punto de vista cuantitativo, la mayor cantidad de energía sísmica fue liberada frente a la línea de costa entre  $9^\circ S$  y  $12^\circ S$  (2300 y 2200ue), la misma que correspondería a la liberada por los sismos ocurridos en octubre de 1966 y mayo de 1970, ambos con una magnitud  $mb$  igual a 6.4. Asimismo, al Sur de  $4^\circ S$  se ha liberado energía del orden de 1400 y 700ue respectivamente y gran parte se debe a los sismos ocurridos en diciembre de 1970 ( $mb=6.3$ ) y octubre de 1974 ( $mb=6.2$ ). En el interior del continente, la mayor cantidad de energía ha sido liberada en la región Norte (870ue) y probablemente sea debido al gran número de sismos que se ha producido en esta región ya que durante este período, no ocurrieron sismos de magnitud elevada. Menor cantidad de energía se ha liberado en la región Central de Perú con un máximo de 280ue, a pesar que se produjeron los sismos de julio y octubre de 1969 ( $mb=5.9$ ).

Para sismos con foco intermedio (Figura 4b), las curvas de iso-energía se distribuyen principalmente en el interior del continente, aunque en la costa sobre la latitud  $10^\circ S$  se observa una concentración menor de estas curvas. Al sur de  $12^\circ S$ , las curvas de energía tienden a distribuirse desde la línea de costa sobre toda la región sur en donde su densidad aumenta considerablemente. Al norte de  $9^\circ S$ , la mayoría de las curvas de iso-energía tienden a distribuirse en el interior del continente, siendo mayor el número entre  $7^\circ S$  y  $9^\circ S$ . Cuantitativamente, la concentración de curvas de iso-energía se produce en la región Sur en donde alcanzan un máximo 520ue; mientras que, cerca del límite con Ecuador la energía liberada es del

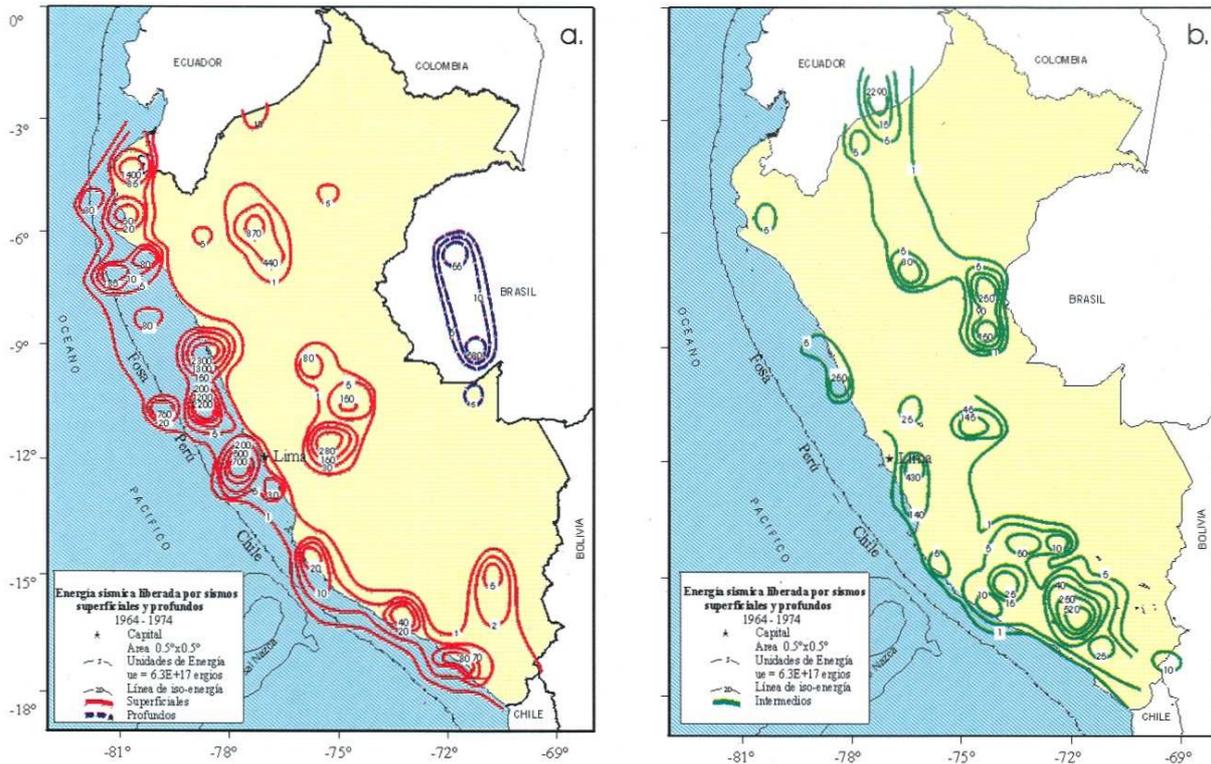


Fig. 4: Mapas de energía sísmica liberada por sismos ocurridos entre 1964-1974. (a) Sismos con foco superficial y profundo, (b) Sismos con foco intermedio.

orden de 2290ue, la misma que corresponde al sismo ocurrido en julio de 1971 ( $m_b=6.4b$ ). Para sismos con foco profundo (Figura 4a), las curvas de iso-energía se concentran en el límite con Brasil llegando a liberar energía en un nivel de 580ue.

#### Energía liberada durante el período 1975-1985

En la Figura 5a se presenta las curvas de iso-energía para el período 1975-1985, las mismas que presentan características similares a lo observado en el período anterior. Sin embargo, para sismos con foco superficial se observa que, entre la fosa y la línea de costa, la máxima cantidad de energía liberada llega a 800ue sobre la latitud  $17^\circ S$ ; mientras que, a la latitud de  $9^\circ S$  la energía máxima es de 400ue. En el interior del continente, las curvas de iso-energía se distribuyen en las regiones Norte y Centro siguiendo una orientación NW-SE con valores máximos del orden de 1300ue equivalente a la liberada por el sismo producido en noviembre de 1982 ( $m_b=6.3$ ). Para sismos con foco intermedio (Figura 5b) se observa que las curvas de iso-energía presentan características similares a lo descrito para el período anterior, siendo la única diferencia la presencia de una concentración de estas curvas cerca a los límites de Perú con Chile y Bolivia. El mayor nivel de energía liberada se encuentra sobre la latitud de  $4.5^\circ S$  (2290 ue) próximo al límite fronterizo con Ecuador (sismo de abril de 1983,  $6.4 mb$ ). Para sismos con

foco profundo (Figura 5a), las curvas de iso-energía se concentran totalmente sobre la latitud  $9.5^\circ S$  con un máximo de 140 ue.

#### Energía sísmica liberada período 1986-1996

En la Figura 6a, se presenta el mapa de liberación de energía para el período de 1986-1996. Para sismos con foco superficial, las curvas de iso-energía presentan el mismo patrón observado anteriormente; sin embargo, los máximos valores de energía liberada se encuentran en la latitud  $15^\circ S$  con 4060ue que probablemente corresponda al sismo ocurrido en noviembre de 1996 y que corresponde al 99% del total de la energía liberada en esta área. En el interior del continente, los niveles mayores de energía han sido liberados en la latitud de  $6^\circ S$  con un máximo de 2290ue y que corresponde a los sismos de mayo y abril de 1990 ( $m_b=6.1$ ) y 1991 ( $6.4mb$ ); mientras que, en las regiones Centro y Sur la energía liberada es mínima. Para sismos con foco intermedio (Figura 6b), a diferencia de lo observado en períodos anteriores, se ha producido una importante disminución en los niveles de energía sísmica, siendo el máximo observado la altura de la latitud de  $4^\circ S$  con 1300ue y que equivale a la liberada por el sismo ocurrido en noviembre de 1986 ( $m_b=6.3$ ). En la región sur, los niveles máximos de energía son del orden de 170-260 ue. Para sismos con foco profundo (Figura 6a), las curvas de iso-energía se concentran en dos grupos, el primero

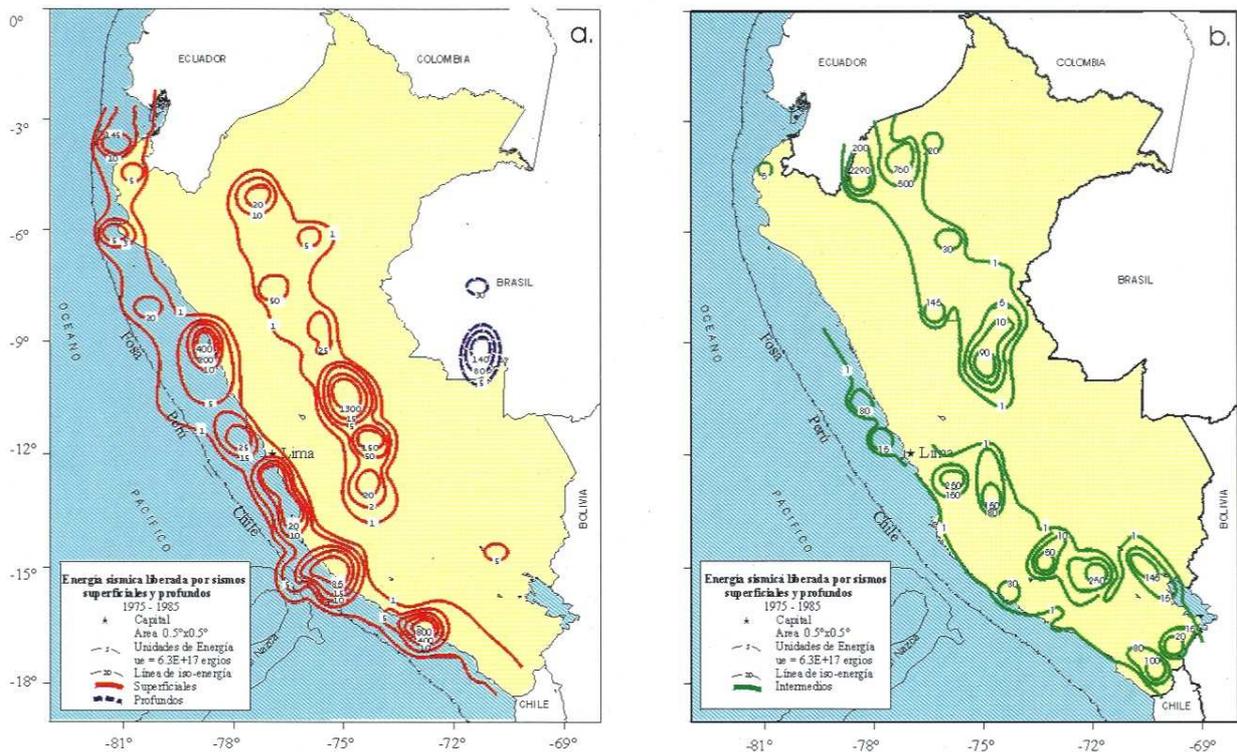


Fig. 5: Mapas de energía sísmica liberada por sismos ocurridos entre 1975-1985. (a) Sismos con foco superficial y profundo, (b) Sismos con foco intermedio.

localizado en el límite con Brasil con un máximo de 760 ue y el segundo en el límite con Bolivia con un máximo de 63100 ue. Esta última cantidad de energía fue liberada en su totalidad por el sismo ocurrido el 9 de junio de 1994 ( $m_b=7.0$ ), siendo este sismo el más grande ocurrido en todo el mundo en los últimos 100 años.

En general, las curvas de iso-energía muestran de manera clara la geometría de las tres fuentes sismogénicas presentes en el Perú y que dan origen a sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Asimismo, es importante remarcar que el sismo con foco profundo ocurrido el 9 de junio de 1994 ( $m_b=7.0$ ), liberó tanta energía como la que habrían liberado todos los sismos ocurridos durante un año en el mundo.

#### Frecuencia de sismos y cuantificación de la energía sísmica

Con la finalidad de determinar la frecuencia anual de los sismos y su relación con la energía sísmica liberada, se ha procedido a cuantificar el número de sismos ocurridos en Perú durante el período comprendido entre 1964-1996 por intervalos de magnitud de 0.5 a partir de la magnitud  $m_b$  igual a 5.0. Los resultados obtenidos son presentados en barras estadísticas en comparación con la cantidad acumulada de energía liberada, además de sus respectivos porcentajes (Figura 7).

La Figura 7a, se muestra la frecuencia del número de sismos y cantidad de energía sísmica liberada por sismos con foco superficial asociados únicamente a la interacción de placas. En esta figura, se observa que el mayor número de sismos se produjo en 1970 (37 sismos) y 1996 (26 sismos); mientras que, durante otros años el número de sismos es de 5 a 14 sismos, excepto en 1964 y 1995 que ocurrieron únicamente 2 sismos. Asimismo, se observa que el 76.8% del total de los sismos presentan magnitudes entre 5.0-5.4  $m_b$ ; mientras que, los sismos con magnitud entre 6.5-7.0 sólo representan el 0.3%. Contrariamente, estos últimos han liberado el 52.4% del total de la energía y el número mayor de sismos (5.0-5.4  $m_b$ ) sólo el 4.7% de la energía. Evidentemente, esto muestra que un sismo de magnitud  $m_b$  del orden de 7 puede liberar tanta energía con la que liberarían 60,000 sismos de magnitud  $m_b$  igual a 5.0. Durante este período y para sismos superficiales asociados a la interacción de placas, la mayor cantidad de energía se ha liberado entre los años 1966 y 1970, y durante el año 1996.

De manera similar, en la Figura 7b se muestra la frecuencia del número de sismos y cantidad de energía sísmica liberada por sismos con foco superficial asociados al proceso de deformación cortical. En la figura se observa que el mayor número de sismos se produjo en 1968, 1969 y 1991; mientras que, en el resto de años en promedio se ha producido 4 sismos y en otros no ocurrió ninguno

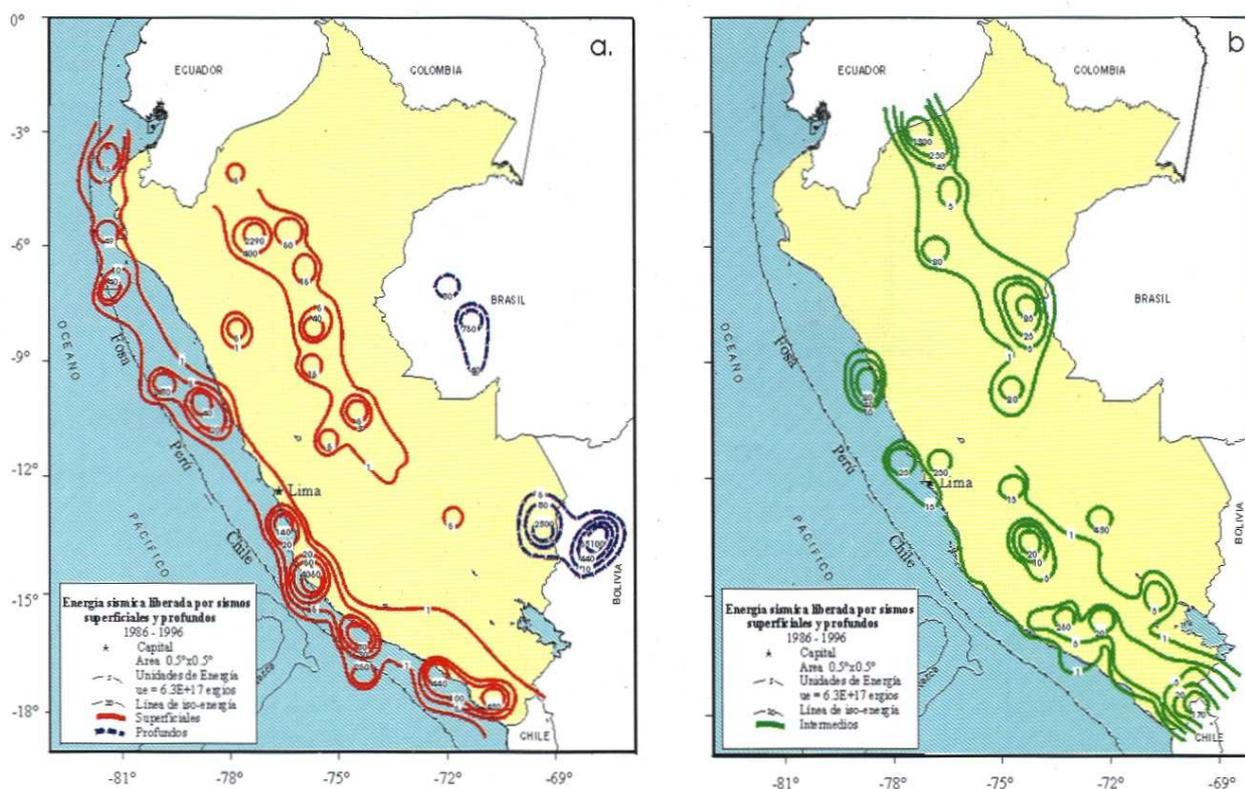


Fig. 6: Mapas de energía sísmica liberada por sismos ocurridos entre 1986-1996. (a) Sismos con foco superficial y profundo, (b) Sismos con foco intermedio.

dentro del rango mínimo de magnitud considerado en este estudio. Asimismo, en esta figura se observa que el mayor número de sismos presenta magnitudes entre 5.0-5.4 mb (80.5%); mientras que, los sismos con magnitud entre 6.0-6.4 solo representan el 4.1%. Contrariamente, este porcentaje pequeño de sismos ha liberado el 80% del total de la energía y el mayor número de sismos solo el 5% de la misma.

En la Figura 7c, se presenta la frecuencia de sismos y la cantidad de energía sísmica liberada por sismos con foco intermedio ( $60 < h \leq 300$  km) y en ella se observa que el mayor número de sismos se produjo en 1984 (16 sismos). El número de sismos con magnitudes mb entre 5.0-5.4 equivalente al 72% del total y los sismos con magnitudes entre 6.0-6.4 solo representan el 5%. Contrariamente, estos últimos sismos han liberado el 75% del total de la energía en comparación con los sismos con magnitudes mb entre 5.0-5.4 (72% del total de la sismicidad) solo han liberado el 3% de la energía. Para este rango de profundidad, la mayor cantidad de energía se liberó en 1970, 1971 y 1983.

La Figura 7d, corresponde a los sismos con foco profundo, siendo estos menos frecuentes que los de foco superficial e intermedio. Sin embargo, es frecuente que ocurran sismos de magnitud elevada que pueden liberar tanta energía como la liberada por los sismos que ocurren a menor profundidad, tal como ocurrió con el

sismo de junio de 1994 (7.0 mb), siendo este el mayor que se haya producido durante todo el período de estudio. En general, para este rango de profundidad casi todos los sismos presentan magnitudes mb menores a 5.9, siendo este equivalente al 81% del total de los sismos ocurridos; mientras que, el sismo de 1994 habría liberado el 97.1% del total de la energía acumulada durante todo el período de estudio. En las barras de energía liberada anualmente se observa total heterogeneidad, siendo el año de 1989 y 1994 donde la energía liberada es mayor.

### CONCLUSIONES

El análisis de la distribución espacial de la sismicidad en Perú ha permitido identificar la presencia de tres fuentes sismogénicas importantes. La primera considera a todos los sismos de foco superficial que se distribuyen entre la fosa y la línea de costa con origen en el proceso de fricción de las placas y los que se producen en el interior del continente asociados a los principales sistemas de fallas que se distribuyen paralelas a la Cordillera Andina. Estos sismos, al ocurrir cerca de la superficie con magnitudes elevadas, producen grandes daños en superficie. La segunda fuente considera a los sismos de foco intermedio, los mismos que se distribuyen en el interior del continente de manera muy heterogénea, aunque en mayor número estos se producen sobre toda

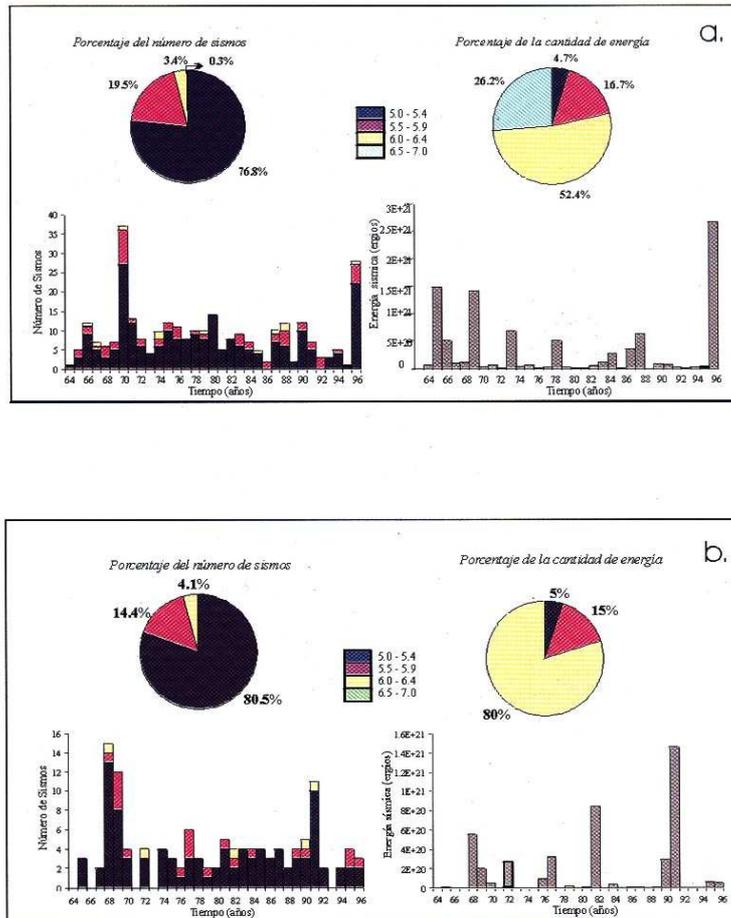


Fig. 7: Número de sismos y energía sísmica liberada durante el período 1964-1996. a) Sismos con foco superficial asociado al proceso de interacción de placas, b) Sismos con foco superficial asociado a la deformación cortical en el interior del continente, c) Sismos con foco intermedio y d) Sismos con foco profundo. A la izquierda de cada gráfico se presenta el número y porcentaje de sismos por rangos de magnitud y a la derecha, los niveles y porcentajes de energía liberada.

la región Sur de Perú. De estos sismos un grupo importante se ubica sobre la línea de costa cerca de la zona sur del departamento de Lima y que raramente son sentidos en superficie. La tercera fuente sismogénica la constituye los sismos con foco profundo, los mismos que prácticamente se concentran en los límites entre Perú con Brasil y Bolivia, siendo estos casi imperceptibles en su totalidad, aunque el sismo ocurrido en junio de 1994 produjo intensidades del orden de IV en todo el altiplano.

La deformación continental es puesta en evidencia con el importante índice de sismicidad presente sobre los principales sistemas de fallas que se distribuyen en el interior del continente con eminente distribución en dirección NW-SE.

La sismicidad asociada a la placa oceánica de Nazca, ha permitido observar que ésta subduce por debajo de la continental de dos modos diferentes, uno denominado subhorizontal y otro normal. La subducción subhorizontal esta presente en las regiones Norte-Centro y se caracteriza porque la placa oceánica subduce con un ángulo del orden de 25° hasta alcanzar una profundidad de 110 km a partir

de la cual, la placa se desplaza de manera horizontal hasta una distancia de 700 km desde la línea de fosa. Sobre la latitud 10°S y a 120-150 km de profundidad, la placa oceánica muestra un claro hundimiento que puede ser asociado a una contorsión de la misma debido a su propio peso o a una posible ruptura. El segundo modo de subducción esta presente en la región Sur y aquí la placa subduce de manera continua con un ángulo de 30° hasta una profundidad de 350 km y a una distancia, desde la línea de fosa, de 450 km. Entre ambos modos de subducción, se produciría la contorsión de la placa de Nazca sobre una longitud de 150 km.

El análisis de la distribución espacial de las curvas de iso-energía, ha permitido identificar y delimitar la geometría de las tres principales fuentes sismogénicas presentes en el Perú. Asimismo, la cuantificación de la energía sísmica liberada considera que los mayores niveles han sido debido a los sismos con foco superficial asociados al proceso de interacción de placas y menores para sismos con origen en la deformación cortical que se produce en el interior del continente. Los niveles de energía

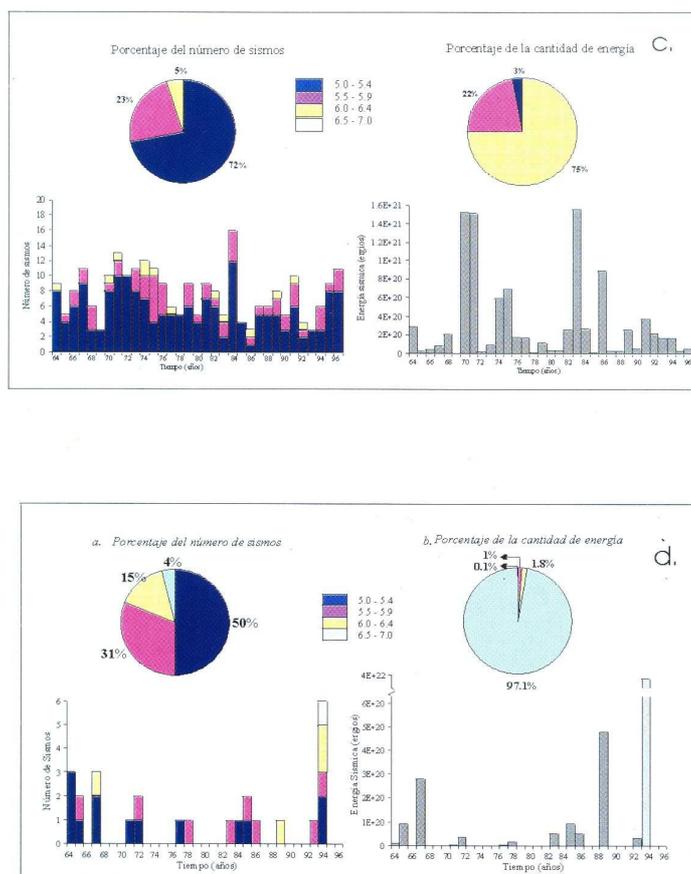


Fig. 7: Continuación...

liberada por sismos con foco intermedio y profundo han sido menores en comparación con la liberada por sismos con foco superficial. Sin embargo, sismos con foco profundo como el ocurrido el 9 de junio de 1994 pueden liberar tanta energía como la que liberarían todos los sismos ocurridos en el mundo durante un año.

El mayor número de sismos ocurridos en Perú durante el período de estudio presentó magnitudes mb entre 5.0-5.4, pero estos solamente representan el 1.6% del total de la energía liberada. Contrariamente, los sismos de magnitud mayor son menores en número pero representan el mayor porcentaje de energía sísmica liberada. Estos resultados sugieren que la relación entre la frecuencia sísmica y la cantidad de energía sísmica liberada dependen de la magnitud de los sismos, pudiendo ocurrir un sismo de magnitud elevada que libere tanta energía como la que liberarían todos los de magnitud menor.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Dr. Hernán Montes, Director Técnico del Instituto Geofísico del Perú por su constante apoyo para realizar estudios en el campo de la sismología. También agradecen a la Dra. Diana Comte por su revisión y sugerencias al manuscrito.

Publicación No. 009-CNDG-IGP.

#### BIBLIOGRAFÍA

**BARAZANGI M. & ISACKS B. (1976).**- Spatial distribution of earthquakes subduction of the Nazca plate beneath América. *Geology*, 4, 686-692.

**CAHILL T. & ISACKS B. (1992).**- Seismicity and Shape of the Subducted Nazca Plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17.503-17.529.

**CARMONA J. & CASTANO J. (1970).**- Distribución temporal de la energía sísmica liberada al Sur de los 20° en el intervalo 1920-1970. *Instituto de investigación Antisísmica*, 25pp.

**DUDA S. (1989).**- Earthquakes: Magnitude, energy and intensity. *In "Encyclopedia of Solid Earth Geophysics"* (D. James, ed.). pp. 272-288., Van Nostrand-Reinhold, New York.

**ENGDAHLE., VANDERHILST & BULANDR. (1998).**- Global Teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 722-743.

- GRANGE F., CUMMINGAM P., GAPNEPAIN J., HATZFELD D., MOLNAR P., OCOLA L., RODRÍGUEZ A., ROECKER S., STOCK J. & SUAREZ G.** (1984).- The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in southern Perú. *Geoph. Res. Lett.* 11(1). 38-41.
- GUBBINS W.** (1996).- *Seismicity and Plate Tectonics*. Cambridge University Press. New York, 335 p.
- GUTEMBERG B. & RICHTER C.** (1964).- Earthquake, magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 32, 163-191.
- HASEGAWA A. & ISACKS B.** (1981).- Subduction of Nazca plate beneath Perú as determined by seismic observations, *J. Geophys. Res.* 86, 4971-4980
- IGP** (2000).- Catálogo Sísmico Preliminar, 1983-2000. Centro Nacional de Datos Geofísicos, *Informe Interno*. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.
- KANAMORI H. & ANDERSON D.** (1975).- Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- OCOLA L.** (1966).- *Earthquake Activity of Perú*. Geophysical and Polar Research Center, Department of Geology, University of Wisconsin, Madison. 509-528pp.
- OTERO R.** (1972).- *Sismicidad de ciudades de Sud y Centroamérica*. Observatorio San Calixto, publicación N°18, 110pp.
- RICHTER C.** (1958).- *Elementary Seismology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- RODRÍGUEZ L. & TAVERA H.** (1991).- Determinación con alta resolución de la geometría de la zona de Wadati-Benioff en el Perú Central. *Revista Brasileira de Geofísica*. Vol. 9 (2), 141-159.
- SILGADO E.** (1978).- Historia de los sismos más notables en el Perú (1513-1974). *Boletín N°3, serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica INGEOMIN*. 129pp.
- SCHNEIDER J. & SACKS S.** (1987).- Stress in the Contorted Nazca Plate beneath Southern Peru from Local earthquakes, *Jour. Geophys. Res.*, 92, pp 13887 - 13902
- SPENCE W., MENDOZA C., ENGDAHL E. & CHOY L.** (1998).- Seismic Subduction of the Nazca Ridge as shown by the 1996-1997 Peru earthquakes, Submitted to *Pure and Applied Geophysics*.
- SUAREZ G., MOLNAR P. & BURCHFIELD B.** (1983).- Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the central Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia., *J. Geophys. Res.* 88, 10403-10428.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- En: A. Udias y E. Buforn (ed.). *Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica*. Física de la Tierra, UCM., N°10, 187-219.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (2001).- Source Mechanism of Earthquake in Peru, *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- TSUBOI** (1962).- Time Rate of Energy Release by Earthquakes in and near Japan. *Journal Ph. of the Earth* Vol. XII, N° 2.
- UTSU T. & SEKI A.** (1954).- A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock., *J. Seismol. Soc. Japon*, 233-240.