

ZONAS SISMOGÉNICAS EN PERÚ: VOLÚMENES DE DEFORMACIÓN, GRÁFICOS POLARES Y ZONIFICACIÓN PRELIMINAR

Isabel Bernal, Hernando Tavera & Yanet Antayhua

*Centro Nacional de Datos Geofísicos - Instituto Geofísico del Perú
Email: Ibernal@axil.igp.gob.pe ; Email: Jtavera@geo.igp.gob.pe*

RESUMEN

En este estudio se hace uso de una base de datos de 33 años, debidamente calificada y reciente, a fin de definir las zonas sísmogénicas en Perú. El análisis de la distribución de la sísmicidad en superficie y en profundidad ha permitido identificar siete (7) subfuentes sísmogénicas ubicadas a diferentes niveles de profundidad y dos modos de subducción, una subhorizontal en la región Norte-Centro y otra denominada normal en la región Sur de Perú. El cálculo del volumen de deformación y su radio proyectado en superficie, ha permitido tener una idea más clara del tamaño de los sismos. Las curvas de acumulación de energía elaborado para cada zona sísmogénica no muestran un patrón definido, siendo difícil estimar posibles periodos de retorno para sismos de magnitud elevada. Los gráficos polares sugieren que las ciudades distribuidas a lo largo de la línea de costa son generalmente afectadas por sismos asociados al proceso de subducción. Otras, como Ancash y Arequipa, por ejemplo, pueden ser afectadas también por sismos con origen en fallas activas distribuidas en el interior del continente. Ciudades como Moyobamba, son únicamente afectadas por sismos asociados a fallas activas. El mapa de Zonificación Preliminar de Perú, elaborado a partir de la relación frecuencia-intensidad, ha permitido clasificar a los 24 departamentos de Perú en niveles de sísmicidad alta, media, baja y nula.

ABSTRACT

In this study is made use of a qualified and recent database of 33 years (1964-1996), in order to defining the seismic-sources in Peru. The analysis of the distribution of the seismicity in surface and in-depth has permitted to identify seven (7) sources seismic located from different depth levels and two subduction types, a sub-horizontal in the North region - Center and other normal in the southern region of Peru. The volume of deformation and your radio projected in surface, it has been permitted to accomplish a good estimate of the size of the earthquakes. The curves of energy accumulation elaborated for each seismic-source they do not show a defined standard, being difficult to estimate possible periods of return for earthquakes of high magnitude. Polar graphics suggest that earthquakes associated with subduction process generally affect the cities distributed throughout the coastline. Other, as Ancash and Arequipa, for example, they can be affected also by earthquakes with origin in distributed active defects in the interior of the continent. Cities as Moyobamba, they are solely affected for earthquakes associated with active faults. The Preliminary Zoning Map of Peru, elaborated as of the relationship frequency-intensity, it has permitted to classify to the 24 Peru departments in levels of seismicity high, mean and minimum.

INTRODUCCIÓN

La tectónica de la región andina es controlada principalmente por el desplazamiento de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, generando sobre el plano de fricción de ambas placas, un número ilimitado de sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. Estos sismos constituyen la principal fuente sísmogénica presente en Perú debido a la ocurrencia de sismos de magnitud elevada de manera muy frecuente, los mismos que han producido un alto grado de destrucción y mortalidad en el borde Oeste de Perú. La ocurrencia menos frecuente de sismos destructores se produce en el interior del continente siendo esta la segunda fuente sísmogénica caracterizada por generar sismos de magnitud menor, pero al ser más superficiales, son tan dañinos como los debidos al proceso de fricción de placas.

Las características de la sísmicidad en Perú, han sido ampliamente analizadas y descritas por diversos autores, ya sea para configurar el proceso de subducción o definir zonas sísmogénicas (Stauder, 1975; Suarez et al, 1982; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001); sin embargo, estos estudios han sido realizados en su mayoría utilizando datos telesísmicos para áreas o regiones específicas. Mientras que Bernal et al. (2001) y Bernal (2002) realizan el análisis y evaluación de la sísmicidad para todo el Perú utilizando una base de datos homogénea, estos autores no consideran otros procedimientos sísmológicos que permitan complementar los estudios de sísmicidad realizados a la fecha.

La finalidad de este estudio, es definir los patrones de la sísmicidad a partir de la distribución espacial de los sismos, cuantificar el volumen de

deformación asociado al tamaño de los sismos, evaluar la recurrencia sísmica en términos de energía sísmica liberada, conocer el acimut y distancia a la cual se localizan las fuentes sismogénicas respecto a las diferentes capitales de departamentos haciendo uso de gráficos polares y finalmente, proponer una zonificación sísmica preliminar para el Perú a partir de los valores de Intensidad en la escala Mercalli Modificada.

DATOS

La base de datos utilizada en este estudio ha sido extraída del catálogo de Engdahl (Engdahl et al, 1997) y del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2000). Los parámetros hipocentrales de los sismos contenidos en el primer catálogo fueron recalculados por los autores utilizando fases sísmicas P, S, PKiKP, PKPdf, pP, pwP y sP. Las tres últimas fases permitieron ajustar el parámetro más inestable como es la profundidad del foco sísmico. De este catálogo se considero la información para el periodo 1964-1995. Del catálogo del IGP se seleccionó los sismos ocurridos en 1996 siguiendo el procedimiento establecido por Cahill y Isacks (1992); es decir, a partir de la elaboración de curvas de frecuencia sísmica para identificar el umbral mínimo de completanza del catálogo y distribución de los sismos en función de su magnitud y residual obtenida en el cálculo de sus parámetros hipocentrales. Ambos catálogos presentan un umbral mínimo de magnitud de 4.5mb; sin embargo, a fin de homogeneizar la información extraída de ambos catálogos serán seleccionados únicamente los sismos con magnitudes $mb \geq 5.0$. Se debe tener en cuenta que cuanto mayor sea la magnitud de los sismos estos serán registrados por un mayor número de estaciones y por lo tanto los errores en el cálculo de sus parámetros hipocentrales serán menores. Finalmente, la base de datos esta constituida por 707 sismos con focos ubicados a profundidades superficiales ($h \geq 60$ km), intermedias ($60 < h \leq 300$ km) y profundas ($h > 300$ km).

ZONAS SISMOGÉNICAS EN PERÚ

Para la identificación de las principales zonas sismogénicas en Perú, se analiza las características generales de la sismicidad asociada al proceso de subducción y a la deformación continental.

Características generales de la sismicidad

La distribución espacial de los sismos en el Perú es por demás compleja (Figura 1a); sin embargo, ha sido posible identificar zonas en las cuales se produce una mayor concentración de los mismos. Los sismos con foco superficial se presentan en dos zonas la primera se ubica entre la

fosa y la línea de costa (círculos en negro, Figura 1a), y la segunda, en el interior del continente paralela a la Cordillera Andina (Figura 1c). Los sismos con foco intermedio se agrupan en tres zonas (círculos en gris, Figura 1a), una se ubicada paralela a la línea de costa por debajo de los 9° Sur, otra en la zona Subandina de la región Norte y la tercera sobre toda la región Sur, siendo esta última la que considera un mayor número de sismos. Finalmente, los sismos con foco profundo se agrupan en dos zonas (triángulos, Figura 1a), la primera ubicada en el límite de Perú y Brasil y la segunda entre Perú y Bolivia. En general, los sismos profundos son menores en número y prácticamente no son sentidos en superficie.

La distribución de los sismos en profundidad, según las secciones AA', BB' CC' de la Figura 1b, sugieren que la placa de Nazca subduce por debajo de la Sudamericana de dos modos diferentes, uno subhorizontal y otro normal. La subducción subhorizontal esta presente en las regiones Norte y Centro (RN y RC.), la misma que se inicia con un ángulo del orden de 25°-30° hasta una profundidad de 120km a partir de la cual, la placa de Nazca se desplaza de manera horizontal hasta una distancia respecto a la línea de fosa, de 750km en la región Norte y 500km en la región Centro.

En la sección BB' y a una distancia de 550 desde la fosa, se observa que la distribución de los sismos cambia su tendencia llegando a alcanzar profundidades de 160km. Según Bernal (2002), la placa de Nazca estaría soportando un hundimiento que puede ser asociado a una posible y futura ruptura de la placa oceánica. La sección DD' (Bernal, 2002) muestra la sismicidad asociada únicamente al proceso de subducción y deformación de la placa de Nazca por debajo del continente y en ella se observa que el hundimiento de la placa se produce a la altura de la latitud de 10°S.

El segundo modo de subducción esta presente en la región Sur (RS, Figura 1b) y aquí, la placa de Nazca subduciría con un ángulo de 30° de manera continua hasta una profundidad de 250 km y hasta una distancia de 450 km desde la línea de fosa. Entre ambos modos de subducción, se produciría la contorsión de la placa de Nazca sobre una longitud de 200 km, comprendida entre las latitudes 15°S y 17.5°S, tal como se observa en la sección DD'.

FUENTES SISMOGÉNICAS SEGÚN SU ORIGEN

Fuentes sismogénicas asociados al proceso de subducción

Según la Figura 1a, los sismos con foco ubicados a profundidades menores a 60 km forman parte de una subfuente sismogénica ubicada entre la

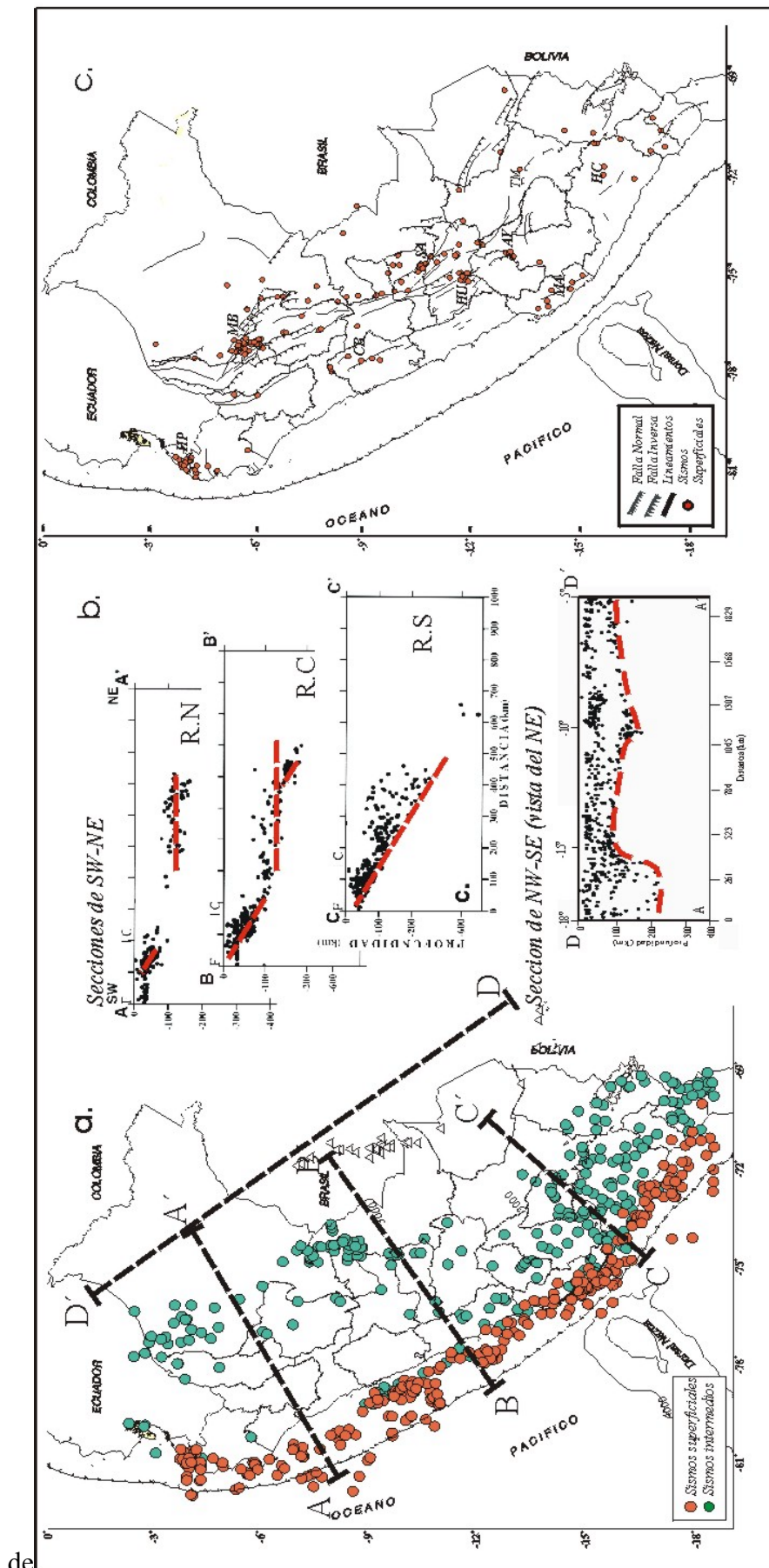


Figura 1: a) Mapa de sismicidad asociada al proceso de subducción y deformación de la placa de Nazca por debajo del continente; sismos con foco superficial (círculos rojos), intermedios (círculos verdes) y profundos (triángulos). b) secciones verticales perpendiculares y paralelas a la línea de costa, según la orientación AA', BB', CC' y DD'. Las regiones Norte, Centro y Sur son indicadas con RN, RC y RS respectivamente. c) Mapa con la distribución de la sismicidad asociada a la deformación continental y los principales sistemas de falla: HP = Huaypira, MB = Moyobamba, CB = Cordillera Blanca, HU = Huaytapallana, AY = Ayacucho, TM = Tambomachay, MA = Marcona y HC = Huarvo y cabanacande

fosa y la línea costa, siendo el origen de los mismos la fricción de placas dentro del proceso de subducción. En esta subfuente los sismos de magnitud elevada ocurren con mayor frecuencia. Los sismos con foco ubicados a profundidades entre 60 y 300 km pueden ser reagrupados en tres subfuentes sismogénicas, las mismas que tienen relación directa con el proceso de deformación de la placa oceánica de Nazca por debajo del continente, generando muchas veces sismos de magnitud elevada pero que debido a la profundidad a la cual se producen casi nunca son sentidos en superficie. De estas tres subfuentes una se ubica frente a la costa de Ancash y Lima, otra en la zona Subandina de la región Norte y la tercera sobre toda la región Sur.

Fuentes sismogénicas asociadas a la deformación continental

Según la Figura 1c, la distribución espacial de la sismicidad con foco superficial en el interior del continente permite configurar las fuentes sismogénicas asociadas a las áreas de mayor deformación. En general, estas áreas se encuentran ubicadas próximas a la costa, en la Zona Andina y Subandina, siempre siguiendo la orientación de la Cordillera Andina. Los agrupamientos de sismos están presentes sobre las trazas de fallas visibles en superficie: falla de Quiches en la Cordillera Blanca (Ancash), Huaytapallana (Huancayo) y Tambomachay (Cuzco); sobre fallas inferidas a partir de fotos satélites, falla de Ichupampa (Moquegua y Tacna) y por la ocurrencia de grandes sismos, fallas de Moyobamba (San Martín), Satipo (Junín) y Huaypira (Tumbes).

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA ENERGÍA SÍSMICA ACUMULATIVA

El método seguido para analizar y evaluar la variación temporal de la energía sísmica acumulada y liberada a nivel mundial, fue desarrollado y aplicado por primera vez por Benioff (1951). Posteriormente el método fue perfeccionado por Tsuboi (1964) y aplicado a nivel de Sudamérica por Carmona y Castano (1970) y Otero (1972). Básicamente el método de Tsuboi considera que los sismos, tanto de magnitud pequeña como grande, liberan la energía que se ha acumulado de manera más o menos uniformemente sobre un área determinada; sin embargo, resultados posteriores permitieron establecer que la suma acumulativa de la energía liberada aumenta linealmente respecto al tiempo dependiendo de las características del medio. Por tanto, este método consiste en construir curvas de acumulación de energía sísmica liberada en función, las mismas que permitirían predecir la ocurrencia de sismos de magnitud elevada.

Considerando que el Perú es un país altamente sísmico, es posible que el método de Tsuboi permita conectar de alguna manera las tres incógnitas necesarias para una posible predicción sísmica; es decir, el lugar donde puede ocurrir el sismo, el tiempo de ocurrencia y la cantidad de energía que deberá liberar dicho sismo, siendo este último parámetro expresado generalmente en función de la magnitud del sismo.

La aplicación de este método, ha permitido obtener curvas de acumulación de energía para las diferentes áreas indicadas en la Figura 2, las mismas que fueron definidas en función de su índice de sismicidad y de los niveles de profundidad a los cuales ocurrieron los sismos: superficiales (*S1..S6*), intermedios (*I1..I3*) y profundos (*P1* y *P2*). En este método, las curvas de acumulación de energía relativamente homogéneas son delimitadas por dos rectas paralelas que unen puntos mínimos y máximos de la curva. La pendiente de ambas rectas permite tener una idea del tiempo necesario para que se produzca la acumulación de la mayor cantidad de energía que será liberada por el sismo. Asimismo, la distancia vertical entre las dos rectas representa el valor de saturación mínima y máxima en términos de energía para cada área. Los resultados obtenidos para cada área son:

Área S1.- Para esta área se observa que la curva de acumulación de energía sísmica se presenta de forma escalonada más o menos homogénea, alcanzando un máximo de $1.6E+21$ ergios. Esta curva es afectada por tres saltos importantes, producidos en 1979 ($5E+20$ ergios) y otros dos en 1988 ($3-7E+20$ ergios). Para esta área, se observa que en un periodo medio de 10 años se produce la acumulación de $8E+20$ ergios de energía equivalente a un sismo de magnitud $m_b=6.0$. En estas condiciones, el próximo sismo debería de haberse producido en 1998, pero si se considera un margen de error de 3 años, el sismo ocurrido el 23 de junio del 2001 completaría la tendencia.

Área S2.- La distribución de la energía acumulada en esta área no es muy representativa, siendo la máxima de $2.8E+21$ ergios. El salto más sobresaliente *se ha producido por el sismo ocurrido en 1996 ($6.5m_b$), el cual liberó aproximadamente el 95% del total de la energía liberada durante todo el periodo de observación. Para esta área no es posible establecer periodos de acumulación de energía.

Área S3.- Para esta área la curva de acumulación de energía sísmica presenta dos tendencias importantes y ambas de forma escalonada, siendo la máxima energía de $4.8E+21$ ergios. En la primera tendencia se observa dos saltos grandes seguidos cada uno de ellos por saltos menores, el primero debido al sismo

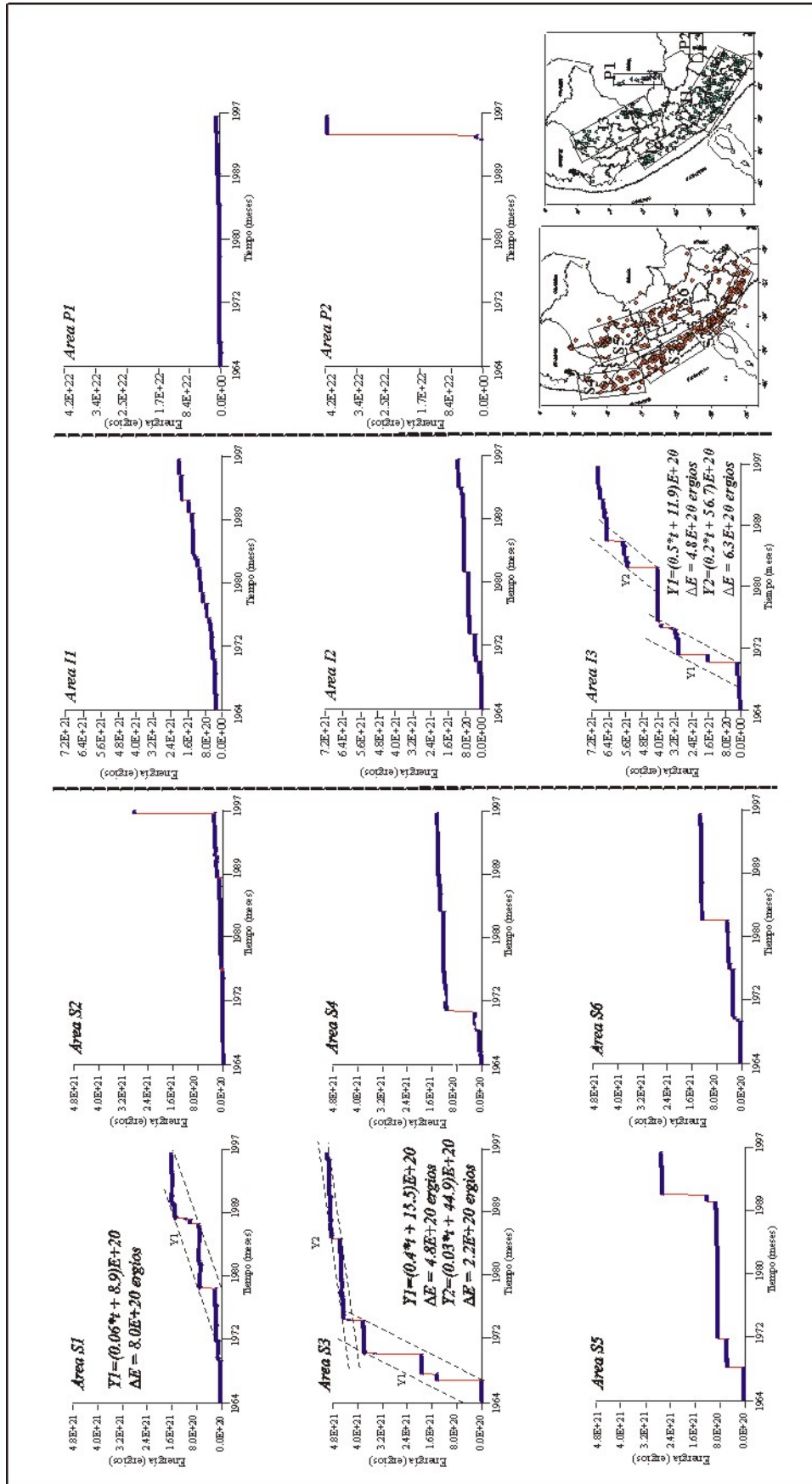


Figura 2- Curvas de acumulación de energía sísmica liberada por sismos ocurridos entre 1964/1996 (mb ≥ 5). Las curvas corresponden a las diferentes áreas indicadas en los mapas sismicos de la parte inferior derecha. (S) energía liberada por sismos con foco superficial, (I) con foco intermedio y (P) con foco profundo. Y1, indica la ecuación lineal de la recta y ΔE, la distancia entre la recta superior e inferior.

ocurrido en 1966 ($1.4E+21$ ergios) y el segundo al sismo de 1970 ($1.4E+21$ ergios), sugiriendo periodos de acumulación de energía de 4 años. La segunda tendencia se inicia en 1975 y muestra dos periodos de acumulación de energía de 11 años cada uno interrumpidos por saltos equivalentes a $4E+20$ ergios. Estas tendencias de acumulación de energía se encuentran separadas por una diferencia de $2.2E+20$ ergios y $4.8E+20$ ergios, valores que sugieren la ocurrencia de sismos con magnitudes de 6.2 y 6.4mb respectivamente.

Áreas S4, S5 y S6.- Para estas áreas las curvas acumulativas de energía alcanzan máximos de $1.4E+21$ ergios, $2.4E+21$ ergios y $1.5E+21$ ergios respectivamente, siendo estas escalonadas pero heterogéneas. Los saltos más representativos se deben a la ocurrencia de sismos en 1970 (6.3mb), 1991 ($1.5E+21$ ergios) y 1982 ($8E+20$ ergios). En todas las áreas, los periodos de acumulación de energía son relativamente largos; sin embargo, para estas áreas no es posible definir periodos de retorno para sismos de magnitud elevada.

Áreas I1 y I2.- En estas áreas la curva de acumulación de energía presenta una forma dentada con periodos cortos de acumulación de energía, siendo los valores máximos de 2.3 y $2.8E+21$ ergios. Durante todo el periodo de observación, la distribución de la energía acumulada muestra saltos relativamente pequeños debidos a la ocurrencia de sismos de magnitudes menores, siendo difícil definir periodos de acumulación de energía a fin de evaluar la periodicidad de los sismos característicos.

Área I3.- Para esta área la curva de acumulación de energía sísmica alcanza un máximo de $7.2E+21$ ergios y se caracteriza por presentar una forma escalonada mas o menos homogénea con dos secuencias claramente marcadas. Para ambas secuencias, el periodo de acumulación media de energía es de 7 años y cada una de ellas presenta saltos de liberación de energía de aproximadamente $1.4E+21$ ergios equivalentes a sismos de magnitud 6.4mb. Ambas tendencias requieren de diferentes periodos de acumulación de energía, lo cual pone en evidencia la heterogeneidad del material a estos niveles de profundidad; por lo tanto, no es posible establecer periodos medios de recurrencia para los sismos característicos. Los puntos máximos y mínimos de ambas tendencias se encuentran separados por una diferencia de $6.3E+20$ y $4.8E+20$ ergios respectivamente, ambas equivalentes a sismos de magnitud elevada. Según la historia sísmica de esta área, los sismos grandes presentan este rango de magnitud.

Área P1 y P2.- En la primera área la curva de acumulación de energía para sismos con foco profundo es casi constante durante todo el periodo

de observación; muestra que, la segunda área se observa un periodo de continuo de acumulación de energía que se ve interrumpido con la ocurrencia de un sismo en junio de 1994 (7.0 mb) que libero $4.2E+22$ ergios. Esta energía es aproximadamente igual a la liberada por todos los sismos ocurridos durante un año en el mundo. Según la historia sísmica de esta área, en agosto de 1963 ocurrió un sismo similar al de 1994.

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de acumulación y liberación de energía en el Perú es por demás heterogéneo, siendo difícil establecer la existencia de un patrón definido a fin de conocer los periodos medios de retorno de sismos de magnitud elevada.

VOLÚMENES DE DEFORMACIÓN SÍSMICA

En un punto ubicado en el interior de la Tierra se va a producir un sismo, la cantidad de energía que este libere dependerá del intervalo de tiempo transcurrido desde el ultimo sismo ocurrido en el mismo punto y de la capacidad de resistencia de las rocas a fracturarse. En ambos casos, la energía acumulada afectará un cierto volumen de material proporcional al tamaño del sismo. El volumen afectado por la ruptura y los diferentes efectos en superficie (grado de destrucción en estructuras, perdidas humanas, etc.) va a depender de la cantidad y de la profundidad a la cual se produce la liberación de la energía. Teóricamente, se asume que la energía acumulada afecta un volumen esférico que como ya se indico, este seria proporcional a la cantidad de energía o tamaño del sismo. Este volumen puede ser estimado a partir de la relación establecida por Bath y Duda (1968) a partir de las ondas corpóreas, $\text{Log } V = 9.58 + 1.47 * mb \text{ (cm}^3\text{)}$. Conocido el volumen esférico de la masa afectada por el sismo, su radio puede ser fácilmente obtenido a partir de $r^3 = 3/4 * V/3.142$, siendo r el radio del volúmen esférico dado en km.

El radio de este volúmen esférico proyectado en superficie, permite definir una área circular que puede ser utilizada como un indicativo real del tamaño de los sismos a fin de ser comparados con otros de igual o diferente magnitud (Bernal et al., 2001 y Bernal, 2002). Así, para sismos con magnitudes de 5.0 y 7.0mb les correspondería volúmenes esféricos de deformación del orden de $8.5E+16$ y $7.4E+19$ cm³. Estos volúmenes esféricos presentan áreas circulares de radios igual a 2.7 y 26.1km respectivamente. Siguiendo este criterio se procedió a elaborar los mapas de sismicidad para los diferentes rangos de profundidad indicados anteriormente y estos resultados fueron utilizados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos – IGP para elaborar el Mapa de Sismicidad de Perú para el periodo 1900-2000, el mismo que se muestra en la Figura 3.

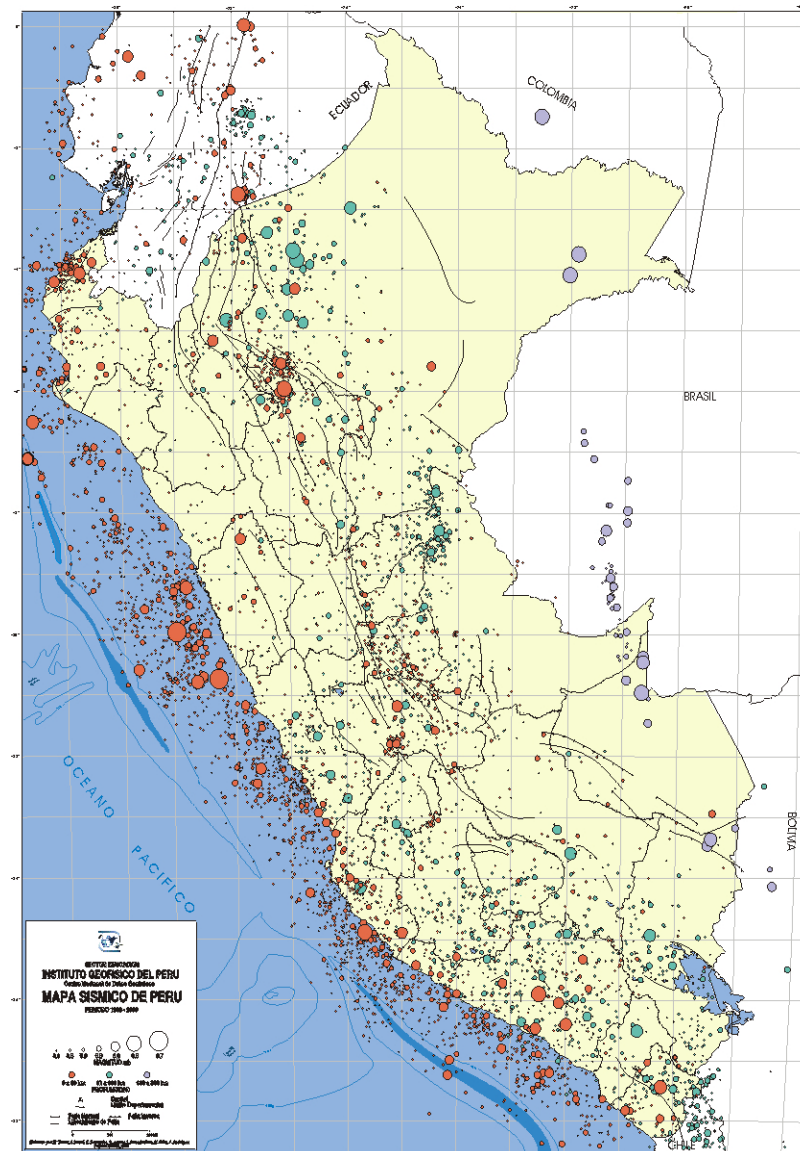


Figura 3: Mapa de sismicidad ocurrida en el Perú entre 1900 – 2000 elaborado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos (CNDG – IGP). El tamaño de los círculos es proporcional al volumen esférico de energía liberada por el sismo. Los círculos representan a sismos con foco superficial, cuadrados a sismos con foco intermedio y triángulos a sismos con foco profundo.

En la Figura 3 se observa que el número de *sismos con foco superficial* de magnitud menor es mayor que los de magnitud elevada (círculos en rojo); sin embargo, entre la línea de la fosa y la costa se distingue claramente, por el tamaño de los círculos, los sismos ocurridos en 1970 (departamento de Tumbes), 1966, 1970, 1974 y 1996 frente a los departamentos de Ancash, Lima e Ica, todos con magnitudes del orden de 6.0 a 6.5 mb. De manera similar, en el interior del continente sobresalen los sismos de 1960 ocurrido en el departamento de Arequipa (magnitud 6.2 mb), 1990 y 1991 ocurridos en el departamento de San Martín (6.1 y 6.5 mb), y de 1995 próximo a la frontera Perú - Ecuador (6.5mb). La distribución de los *sismos con foco intermedio* (círculos color verde) muestra

concentraciones de sismos frente a la costa de Ancash, próximos a la frontera Perú - Ecuador, al Norte de Ucayali y entre los departamentos de Huancavelica y Tacna, todos de magnitud menor a 6.0mb. Estas características sugieren que a niveles intermedios de profundidad, los sismos de magnitud elevada son poco frecuentes y de ocurrir no producen daños en superficie. En el extremo Este de la Figura 3, se presenta los *sismos con foco profundo* próximos a los límites de Perú con Brasil y Bolivia (círculos azules). Los sismos profundos a diferencia de los superficiales e intermedios son menores en número, pero en general presentan magnitudes mas elevadas, siendo el sismo más representativo el ocurrido el 9/06/1994 (7.0mb) próximo a la frontera Perú-Bolivia.

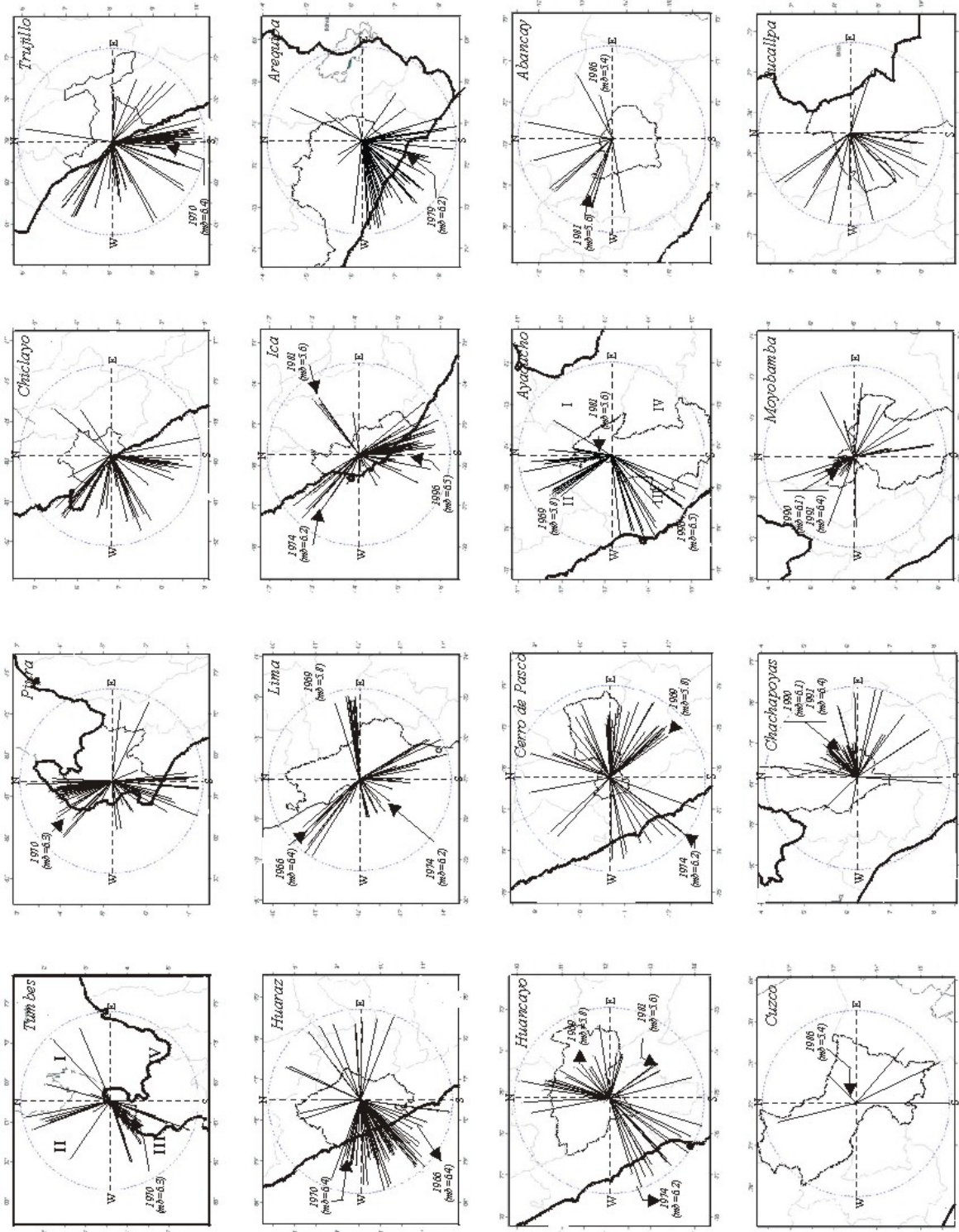


Figura 4.- Gráficos polares para las principales ciudades de Perú. Los gráficos consideran los sismos con foco superficial ($h < 60\text{km}$) ocurridos dentro de un radio de 250 km con centro en la Plaza de Armas de cada ciudad. Se indica el año y la magnitud de los sismos mayores.

GRÁFICOS POLARES

A la ocurrencia de un sismo, las ondas sísmicas se propagan en todas direcciones afectando de diferente modo al medio por donde estas se propagan, así como a las diversas localidades o ciudades emplazadas en superficie. Generalmente, la distribución de los daños observados en un determinado lugar, permite de manera indirecta evaluar el riesgo de la misma ante un peligro, que en este caso lo constituye el sismo. Asimismo, la ubicación y geometría de las diferentes fuentes sismogénicas, con relación a las características físicas de un determinado lugar, es un factor importante que se debe considerar para evaluar el riesgo sísmico.

Un procedimiento práctico para evaluar o conocer en detalle a que distancia y dirección en particular se ubica en si el peligro, es a partir de los denominados Gráficos Polares. Estos gráficos han sido construidos para la capital de algunos departamentos de Perú siguiendo el criterio establecido por Otero (1972) y Bernal (2002). En este estudio, cada gráfico polar, considera un círculo de radio igual a 250km con centro en la capital de cada departamento. La longitud de este radio fue determinada considerando la distancia media a la cual se localizan los sismos que durante el periodo de estudio, afectaron a cada localidad con una intensidad mínima de III en la escala de Mercalli Modificada, independiente del tamaño del sismo o magnitud. La distribución de los sismos sobre cada cuadrante de los gráficos polares (enumerados en sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj), permitirá evaluar la dirección en la cual una determinada localidad puede ser mas o menos afectada por los sismos producidos en cada una de las fuentes sismogénicas antes indicadas. Para la construcción de los gráficos polares se utiliza únicamente la sismicidad con foco superficial ($h \leq 60$ km), debido a que estos sismos son los que generalmente producen mayores efectos en superficie (Figura 4).

Gráficos polares para las ciudades de Tumbes y Piura: En estos gráficos se observa que los sismos que pueden afectar a la ciudad de Tumbes o Piura se ubican en el segundo y tercer cuadrante, los mismos que están asociados al proceso de subducción y a deformaciones superficiales. Según los gráficos polares, la fuente sismogénica de mayor importancia considera a la falla de Huaypira y ésta se ubica a 50 km en dirección SW respecto a Tumbes y a 130 km en dirección NW con relación a Piura. La historia sísmica indica que ciudades de Tumbes y Piura fueron afectadas en dirección del tercer y segundo cuadrante por el sismo ocurrido en 1970 (6.3 mb), llegando a soportar intensidades de VIII y VIIIMM respectivamente. En dirección del primer y cuarto cuadrante no se observa la presencia de sismos.

Gráficos polares para las ciudades de Chiclayo y Trujillo: Según estos gráficos se observa que las ciudades de Chiclayo y Trujillo serán mayormente afectados por sismos que ocurren frente a la costa; es decir, debidos al proceso de subducción. Estos sismos se ubican en el segundo y tercer cuadrante a distancias del orden de 160 km. En otras direcciones el número de sismos es menor. Sin embargo, cabe remarcar que en el gráfico polar elaborado para la ciudad de Trujillo, en dirección del tercer cuadrante se produjo el sismo de 1970 (6.4 mb), el mismo que generó intensidades del orden de VIII MM en dicha ciudad.

Gráfico polar para la ciudad de Huaráz: En este gráfico se observa que la ciudad de Huaráz sería esencialmente afectada por sismos que puedan ocurrir frente a la costa del departamento de Ancash cubriendo totalmente el segundo y tercer cuadrante. Esta fuente de sismicidad se ubicaría básicamente a distancias del orden de 180 km desde la ciudad de Huaraz y tendría su origen en el proceso de subducción. La información histórica indica que en dirección del tercer cuadrante, ocurrieron los sismos del 30/05/1970 (6.4 mb) y 17/10/1966 (6.4 mb), ambos produjeron intensidades del orden de VIII MM en la ciudad de Huaráz. En el primer y segundo cuadrante, los sismos se presentan en menor número y de manera dispersa a distancias medias de 220 km; por tanto, es posible que no afecten a la ciudad de Huaráz.

Gráfico polar para la ciudad de Lima: Según este gráfico polar, la ciudad de Lima sería afectada por sismos que ocurren en el segundo, tercer y cuarto cuadrante; es decir, por sismos con origen en el proceso de subducción y cuya fuente más próxima se localiza a una distancia media de 50 km. El último sismo ocurrido en estos cuadrantes fue el 1974 (6.2 mb), el mismo que produjo una intensidad de VIIIMM en la ciudad de Lima. En el segundo y cuarto cuadrante la sismicidad se localiza a distancias medias de 180 km; por lo tanto, el efecto que produciría en la ciudad de Lima es menor; sin embargo, cabe mencionar que el ultimo sismo ocurrido en el segundo cuadrante fue en 1966 (6.4 mb). En el primer cuadrante se aprecia un agrupamiento importante de sismos que dan origen a la fuente sísmica asociada a la falla de Huaytapallana, la misma que al ubicarse a una distancia media de 200km no causaría mayor efecto en la ciudad de Lima. Aquí, se debe considerar que los sismos debido a deformación continental son de magnitudes bajas y de foco superficial; por lo tanto, los efectos suelen ser muy locales, tal como ocurrió con los sismos de 1969 que fueron sentidos en la ciudad de Lima con una intensidad de IIMM.

Gráfico polar para la ciudad de Ica: La ciudad de Ica sería mayormente afectada por sismos que pudieran ocurrir en el tercer y cuarto cuadrante, con

sismos cuyo origen esta directamente asociado con el proceso de subducción, que sumado a la presencia de la dorsal de Nazca, aumentan el potencial sísmico de esta fuente. A una distancia de 60 km en dirección SW ocurrió el sismo de 1996 (6.5mb) generando intensidades del orden VI-VIIMM en las ciudades de Ica y Nazca. En el segundo y tercer cuadrante, los sismos se distribuyen mayormente a distancias medias de 180 y 90 km. En el primer cuadrante, a una distancia de 180 km, se observa la presencia de una pequeña fuente de sismos asociados al sistema de fallas de Ayacucho, la misma que debido a la distancia a la cual se ubican, no afecta en gran medida a la ciudad de Ica.

Gráfico polar para la ciudad de Arequipa: La ciudad de Arequipa, al igual que otras ciudades ubicadas en la costa de Perú, es afectada directamente por sismos con origen en el proceso de subducción y en este caso, todos se ubican prácticamente en el tercer cuadrante. La fuente que produce esta sismicidad se localiza a una distancia media de 180 km y esta dio origen al sismo de 1979 (6.2 mb) que produjo intensidades de VII MM en la ciudad de Arequipa. En el gráfico polar se observa que en el primer, segundo y cuarto cuadrante, el número de sismos es mínimo.

Gráfico polar para la ciudad de Huancayo: En el gráfico polar se observa que el mayor número de sismos que afectaría a la ciudad de Huancayo se ubica en dirección del primer y tercer cuadrante. Los sismos del primer cuadrante se deben a dos fuentes, una localizada a una distancia de 30 km (falla de Huaytapallana) y otra a 120 km (falla de Satipo), siendo la primera la que afecta directamente a la ciudad de Huancayo y que dio origen a los sismos de 1969 (5.7, 5.9 mb) que produjeron intensidades de VI-VII MM en dicha ciudad. En el tercer cuadrante, los sismos se presentan a una distancia media de 220 km; por tanto, no causarían mayor efecto a esta ciudad.

Gráfico polar para la ciudad de Cerro de Pasco: La ciudad de Cerro de Pasco puede ser afectada por sismos que ocurren en dirección del primer, tercer y cuarto cuadrante con focos ubicados a distancias medias de 190 km. Los sismos ubicados en dirección del tercer cuadrante pueden estar relacionados con el proceso de subducción, los mismos que debido a su distancia no causan mayor efecto a esta ciudad. Sin embargo, algunos sismos de gran magnitud ocurridos en este cuadrante han producido intensidades del orden de V MM en la ciudad de Cerro de Pasco. En el primer y cuarto cuadrante, se observa el mayor número de sismos que pueden deberse a reactivaciones de los sistemas de fallas de Satipo y Huaytapallana, pero que debido a su distancia a la ciudad de Cerro de Pasco, estos no producirían mayores efectos a esta ciudad.

Gráfico polar para la ciudad de Ayacucho: El gráfico polar indica que la ciudad de Ayacucho puede ser afectada por sismos que ocurren en dirección del segundo y tercer cuadrante a distancias medias del orden de 160 y 220km. Estos sismos tienen su origen en la falla de Huaytapallana y en el proceso de subducción. Sin embargo, la fuente más importante se localiza en dirección Norte a una distancia de 10km de la ciudad de Ayacucho, la misma que esta asociada al sistema de fallas de Ayacucho y en la cual tuvo su origen el sismo de 1981 (5.5mb) que produjo intensidades del orden de VIMM en la ciudad de Ayacucho. En dirección del cuarto cuadrante no se observa actividad sísmica.

Gráfico polar para la ciudad de Abancay: En este gráfico se observa que la ciudad de Abancay puede ser afectada por un número mínimo de sismos ubicados a distancias medias del orden de 180 km en dirección del primer y segundo cuadrante, siendo los más importantes debidos al sistema de falla de Ayacucho. En otras direcciones, el índice de sismicidad es casi nula.

Gráfico polar para la ciudad de Cuzco: El número de sismos que afectarían a la ciudad del Cuzco es mínimo y los pocos considerados en este estudio se ubican a una distancia de 230 km desde esta ciudad. Sin embargo, en la dirección NE se observa la presencia de un sismo ubicado a 10 km de distancia y que corresponde al ocurrido en 1986 (5.3 mb), el mismo que afecto directamente a la ciudad de Cuzco con intensidades del orden de VMM.

Gráfico polar para la ciudad de Chachapoyas: El mayor número de sismos que puede afectar a la ciudad de Chachapoyas se produce en dirección del primer cuadrante y son debidos a una fuente sísmica que se localiza a una distancia de 50 km aproximadamente. Esta fuente esta asociada al sistema de fallas de Moyobamba (San Martín) causante de los sismos ocurridos en 1990 (6.1mb) y 1991 (6.4mb), los mismos que produjeron intensidades de V y IVMM respectivamente en esta ciudad. En dirección de los otros cuadrantes la sismicidad es baja.

Gráfico polar para la ciudad de Moyobamba: En este gráfico polar, claramente se observa que la mayor cantidad de sismos que afectan a la ciudad de Moyobamba se localizan en dirección del segundo cuadrante y deben su origen a una fuente que se encuentra a una distancia promedio de 50 km. Esta fuente está asociada al sistema de fallas de Moyobamba y tal como se dijo anteriormente, produjo los sismos del 1990 (6.1mb) y 1991 (6.4 mb) que generaron intensidades de VI y VII MM respectivamente en la ciudad de Moyobamba y alrededores. En dirección del primer, tercer y cuarto cuadrante, los sismos se presentan dispersos y en menor número.

Gráfico polar para la ciudad de Pucallpa: La dirección predominante en la cual ocurren los sismos que pueden afectar a la ciudad de Pucallpa se ubican en dirección del segundo y tercer cuadrante con distancias medias del orden de 160 km. En el primer y cuarto cuadrante, la sismicidad es prácticamente nula.

Estos resultados sugieren que todas las ciudades que se distribuyen a lo largo de la línea de costa serían afectadas principalmente por sismos asociados al proceso de subducción. Asimismo, se debe considerar que las principales ciudades ubicadas en la alta cordillera pueden ser afectadas por sismos de magnitud elevada que ocurrirían frente a la línea de costa (proceso de subducción) con intensidades menores a V MM, siendo suficiente para generar algún tipo de daño leve en las construcciones o efectos secundarios como el ocurrido en la localidad de Yungay a raíz del sismo del 30 de mayo de 1970. Las ciudades ubicadas en la Zona Subandina, deben su potencial sísmico a la presencia de importantes sistemas de fallas.

ZONIFICACIÓN SÍSMICA PRELIMINAR PARA EL PERÚ

La intensidad de un sismo se mide como el efecto del mismo en la superficie de una determinada región; por lo tanto, esta representa ser una medida cualitativa del tamaño del sismo. Frecuentemente, para medir la intensidad del sismo en un punto se utiliza la escala de Mercalli Modificada (MM) publicada en 1913. Esta escala se compone de 12 grados que describen los efectos y daños que podría producir el sismo, así el grado I equivale a un sismo que prácticamente no es percibido en superficie; mientras que, el de grado XII produciría la destrucción parcial de la Tierra. Los sismos mayores ocurridos en el mundo solo han llegado al grado X MM (sismo de Chile, 1960) y en el Perú, estos presentaron grados VIII-IX MM. En general, el parámetro intensidad es utilizado para estimar el peligro y realizar la zonificación sísmica de una determinada región en función del tipo de suelo o porcentaje de daño producido en las estructuras.

Para el Perú, muchos autores han propuesto diversas zonificaciones regionales (Chávez, 1975; Casaverde y Vargas, 1980 y Alva y Castillo, 1993) a partir de la extrapolación de datos de intensidad y/o magnitud de los sismos usando métodos estadísticos; sin embargo, cabe mencionar que para el uso de estos métodos es necesario contar con una base de datos completa y homogénea, requerimientos que muchas veces son difíciles de cumplir.

En este estudio, se propone una Zonificación Sísmica Preliminar para el Perú utilizando los valores de intensidad asociados a los

sismos ocurridos durante el periodo 1964-2000. Estos datos fueron extraídos del Catálogo Sísmico del Perú, recientemente actualizado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2000). Esta información ha sido reagrupada en función de rangos de intensidad y por departamentos. En general, se acepta que los sismos que han producido intensidades $I_{min} \geq IV$, son los que causan daños apreciables en superficie; por lo tanto, este rango de intensidad será importante al momento de reagrupar los datos disponibles según los siguientes niveles:

- “*SISMICIDAD NULA*”: Considera a todos los departamentos en los cuales no se ha sentido sismos con intensidades del orden de IV (MM).
- “*SISMICIDAD BAJA*”: Agrupa a los departamentos en los que la frecuencia de sismos con intensidad IV es mínima.
- “*SISMICIDAD MEDIA*”: Considera a los departamentos en los cuales la frecuencia de sismos con intensidad IV es regular.
- “*SISMICIDAD ALTA*”: Toma en cuenta a los departamentos en los cuales la frecuencia de sismos con intensidad mayores a IV (MM) es grande.

Esta clasificación es propuesta en función de asignar un número índice a cada departamento como resultado de multiplicar el número total de sismos ocurridos con intensidades iguales o mayores a IV por el valor de I_{min} igual a IV. Así, cada departamento es clasificado en función de los niveles antes indicados, según los valores de la Tabla 1.

Tabla 1: Correspondencia entre el nivel e índice de sismicidad.

Niveles de Sismicidad	Índice
Sismicidad Nula	0
Sismicidad Baja	1 - 50
Sismicidad Media	51 - 300
Sismicidad Alta	Más de 300

En la Figura 5 se muestra los diferentes gráficos de frecuencia – intensidad elaborados para cada departamento y en ella se observa que para los departamentos localizados en la costa el número de sismos con intensidades altas es mayor con relación a los distribuidos en el interior del continente. Así, el departamento de Lima presenta el mayor número de sismos con intensidades elevadas seguida de Arequipa, Ica y Ancash. Para los departamentos localizados en la Alta Cordillera, el número de sismos con intensidades altas es menor sobresaliendo el departamento de Junín con 20 $I = III$ MM y 8 con $I = IV$ MM. En los departamentos localizados en la Zona Subandina, el número de sismos con intensidad elevada es casi nulo.

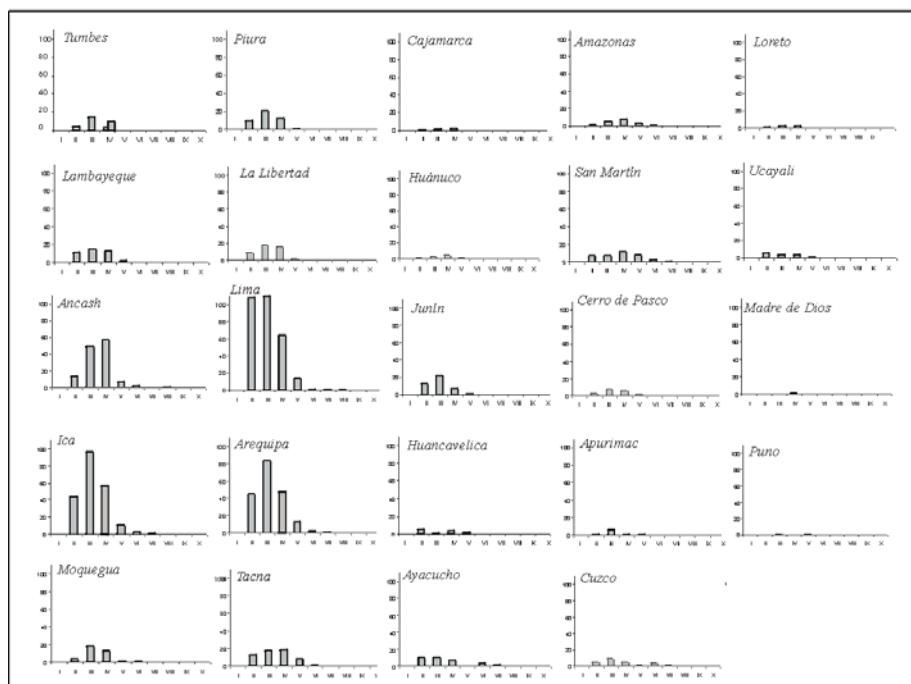


Figura 5: Gráficos de frecuencia-intensidad por departamento para sismos ocurridos entre Perú 1964 – 2000.

En la Figura 6 se presenta los resultados obtenidos en este estudio y la propuesta de Zonificación Sísmica Preliminar para el Perú. De acuerdo a esta figura, los departamentos de Ancash, Lima, Ica y Arequipa son los de mayor susceptibilidad a ser afectados por un mayor número de sismos que generan intensidades mayores o iguales a IV MM. Los departamentos de Tumbes, Piura, Moquegua y Tacna presentan un nivel de sismicidad media, aunque de manera puntual y poco frecuente, estos han sido afectados por sismos importantes y quizás sea conveniente para su evaluación considerar un periodo mayor de datos. Los departamentos con nivel de sismicidad media son Lambayeque, La Libertad y San Martín, aunque este último departamento fue afectado por sismos de considerable intensidad en 1990 y 1991 ($I_{max} = VI$ MM). En el resto de los departamentos se observa un nivel de sismicidad baja, excepto Loreto, Ucayali y Puno que son considerados como departamentos con nivel de sismicidad nula.

Esta Zonificación Sísmica Preliminar puede ser considerada como un primer intento susceptible de ser corregido y mejorado al obtenerse mayor información; sin embargo, estos resultados pueden ser aprovechados por los ingenieros civiles y las compañías de seguros que se interesan en conocer los niveles de sismicidad de las ciudades más importantes del Perú y así fijar las normas de construcción y condiciones de aseguramiento.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este artículo permite considerar que la distribución espacial de

los sismos en el Perú es por demás compleja; sin embargo, ha sido posible identificar las principales fuentes sísmogénicas. Los sismos con foco superficial son debidos a la presencia de dos fuentes la primera asociada a la fricción de placas dentro del proceso de subducción y la segunda a los principales sistemas de fallas presentes en el interior del continente. Los sismos con foco intermedio son debidos a tres fuentes asociadas directamente con el proceso de deformación de la placa oceánica de Nazca por debajo del continente y los sismos con foco profundo deben su origen a dos fuentes, una ubicada en el límite Perú con Brasil y otra entre Perú y Bolivia.

La distribución de los sismos en profundidad sugiere que la placa de Nazca subduce de dos modos diferentes, uno subhorizontal en la región Norte-Centro y otro normal en la región Sur, ambos con un ángulo de inclinación del orden de 30° hasta una profundidad de 120 y 250km respectivamente. Entre ambos modos de subducción, se produce la contorsión de la placa de Nazca sobre una longitud de 200 km. La placa de Nazca por debajo del continente alcanza distancias de 750 (región Norte), 500 (región centro) y 450km (región sur) respecto de la línea de fosa. Sobre la latitud 10° S y a una distancia de 550 km desde la fosa, la placa de Nazca muestra un claro hundimiento que puede ser asociado a una posible y futura ruptura de la placa oceánica, tal como lo sugiere Bernal et al (2001).

En el interior del continente, la distribución de los sismos indica que las deformaciones superficiales se producirían en promedio hasta

profundidades de 40 km, siendo esta más notoria en la Zona Subandina.

El cálculo del volumen esférico de deformación y su radio proyectado en superficie, ha permitido tener un concepto más claro del tamaño de los sismos y de la energía sísmica acumulada y liberada.

A partir de los gráficos polares, se concluye que las ciudades distribuidas a lo largo de la zona de costa son generalmente afectadas por sismos asociados al proceso de subducción; es decir, por sismos ubicados en dirección NW y SW, a distancias que pueden ser de pocos kilómetros hasta un máximo de 250 km. Otras ciudades como Ancash y Arequipa, por ejemplo, pueden ser afectadas también por sismos con origen en fallas activas distribuidas en el interior del continente. Ciudades como Moyobamba, Ayacucho y Huancayo son únicamente afectadas por sismos asociados a fallas activas desde el punto de vista sísmico.

Las curvas de acumulación de energía sísmica sugieren que para el Perú es difícil proponer tiempos de recurrencia de grandes sismos debido principalmente a la complejidad con que se produciría este fenómeno en cada una de las fuentes sismogénicas. Sin embargo, los resultados indican que para sismos con foco superficial la mayor cantidad de energía acumulada se ha liberado en el área S3, costa de Ancash y Lima ($4.8E+21$ ergios). Igualmente, la mayor cantidad de energía liberada

por sismos con foco intermedio se produjo en el área I3 (zona Subandina de la región Norte y Centro) y para sismos con foco profundo en el área P2 (límite Perú - Bolivia).

La información disponible sobre intensidades en la escala Mercalli Modificada, para cada uno de los sismos contenidos en la base de datos, ha permitido proponer un Mapa de Zonificación Sísmica Preliminar para el Perú. Así, los departamentos de Ancash, Lima, Ica y Arequipa fueron identificados en Zonas de Sismicidad Alta, los departamentos de Tumbes, Lambayaque, La Libertad, San Martín, Moquegua y Tacna como Zonas de Sismicidad Media y el resto de departamentos como Zonas de Sismicidad Baja o Nula.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Director Técnico del Instituto Geofísico del Perú (IGP), Dr. Hernán Montes por su apoyo en los diversos trabajos que se realizan en el CNDG. Asimismo, nuestro agradecimiento al personal de Redes Geofísicas, encargados del mantenimiento y operatividad de la Red Sísmica Nacional del IGP y cuya información ha utilizada en este estudio. Publicación N°012-2002/CNDG-IGP.

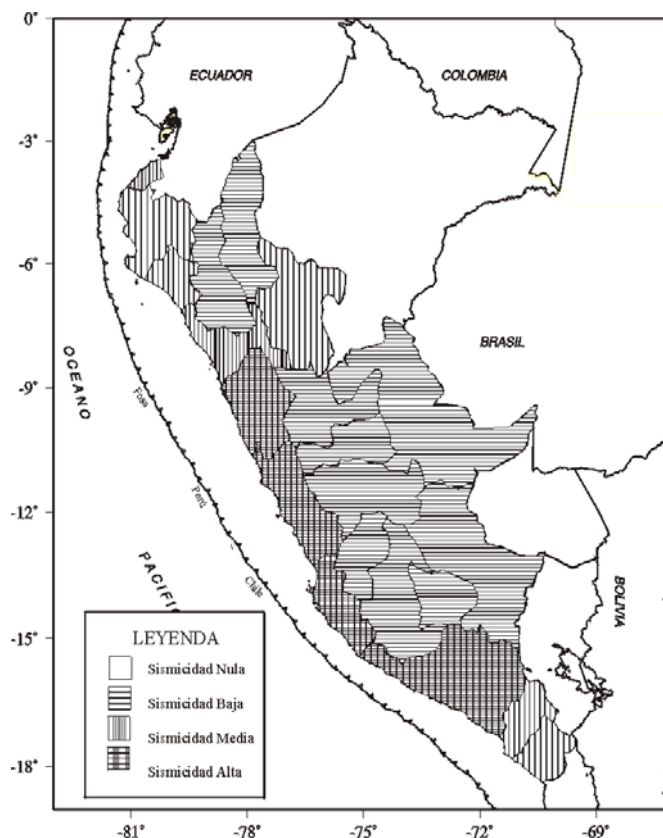


Figura 6.- Mapa de Zonificación Preliminar para el Perú a partir de la frecuencia-intensidad de los sismos ocurridos entre 1964 - 2000

BIBLIOGRAFÍA

- ALVA, J. & CASTILLO, J.** (1993). Peligro sísmico del Perú. Universidad Nacional de Ingeniería, 35p.
- BATH, C. & DUDA, S.** (1968). Secular Seismic Energy Release in the Circum Pacific Belt.
- BERNAL, I.** (2002). Aproximación a un Modelo Detallado de la Sismicidad en el Perú: Características y Evaluación de la Energía Sísmica Liberada. Tesis de Grado UNSA. 170p.
- BERNAL, I.; TAVERA, H. & ANTAYHUA, Y.** (2001). Evaluación de la Sismicidad y Distribución de la Energía Sísmica en Perú. IGP Boletín de la Soc. Geológica del Perú. V.92 p 67-78.
- 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 de Argentina, 25pp.
- CASAVARDE, L. & VARGAS, J.** (1980). Zonificación Sísmica del Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, Dep. Ing. 1-31p.
- CHÁVEZ, J.,** (1975). Regionalización Sísmica del Perú Mediante Intensidades, Tesis de Grado U.N.I.
- ENGDAHL, E., VANDERHILST & BULAND, R.** (1997). Global Teleseismic Earthquake Relocation with Improved Travel Times and Procedures for Depth Determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 722-743.
- OTERO, R.** (1972). Sismicidad de Ciudades de Sud y Centro América. Observatorio San Calixto, Publicación N°18, 110pp.
- SCHNEIDER, J. & SACKS, B.**(1987). Stress in the Contorted Nazca Plate Beneath Southern Peru from Local Earthquakes, *Jour. Geophys. Res.*, 92, pp 13887-13902
- SUAREZ, G., MOLNAR, P. & BURCHFIELD, B.** (1982). Seismicity, Fault Plane Solutions, Depth of Faulting and Active Tectonics of the Central Andes: Submitted to *Jour. Geophys. Res.*
- TAVERA, H. & BUFORN, E.** (2001). Source Mechanism of Earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5:519-539.
- TAVERA, H. & AGÜERO, C.** (2000). Catalogo Sísmico de Perú, 1471-1982. Versión revisada y actualizada. Centro Nacional de Datos Geofísicos-IGP, 420p.
- TSUBOI** (1964). Time Rate of Energy Release by Earthquakes and Near Japan. *Jour. Ph. Of the Earth* Vol. XII, N° 2.