

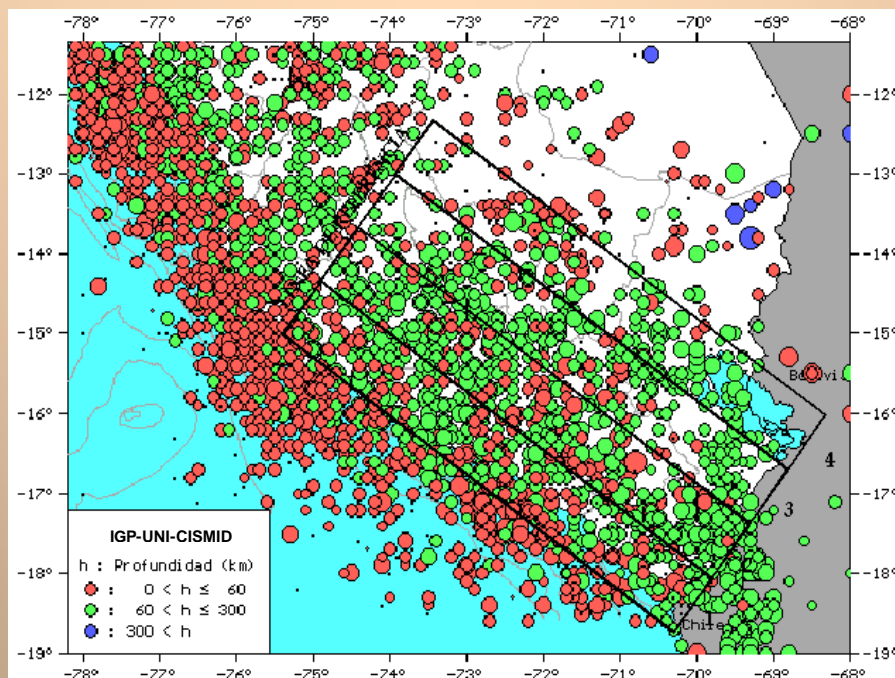


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Programa Científico PC - CISMID, 1999-2000
**SISMICIDAD Y PELIGROSIDAD SÍSMICA
EN LA REGIÓN SUR-OCCIDENTAL DEL PERÚ**

Dr. Ing. Jorge Olarte Navarro
Bach. Ing. Darwin López Culquicondor



Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres



Mayo 2001
Lima - Perú

RECONOCIMIENTOS

El presente proyecto de investigación fue posible desarrollarlo gracias a la ayuda del Programa Científico PC - CISMID 1999-2000 del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, por lo cual los autores desean agradecer este apoyo desinteresado.

Asimismo, los autores agradecen al Dr. Hernando Tavera del Instituto Geofísico del Perú, quién brindó su valioso apoyo al proporcionarnos la base de datos sísmicos y el programa de cómputo PCAT.

RESUMEN

La región sur-occidental del Perú (Arequipa-Tacna) está situada en la zona de subducción de la placa Nazca y la placa Sudamericana. Ésta es una zona de alta actividad sísmica en donde, de acuerdo a la sismicidad histórica, han ocurrido sismos severos con magnitudes de hasta 8.5 grados en la escala de Richter, entre los que tenemos: El sismo de 1604, que tuvo una longitud de ruptura de 450 km; el sismo de 1687, cuya longitud de ruptura es de 150 km; el sismo de 1784, que tuvo una longitud de ruptura de 300 km; el sismo de 1868, cuya longitud de ruptura esta entre 450 y 500 km. El periodo de recurrencia de estos sismos severos es del orden de un siglo, por lo que esta región es considerada de alto peligro sísmico ante la posibilidad de ocurrencia de un gran evento en el futuro cercano.

La distribución espacial de los sismos muestra que en la zona de subducción, la actividad sísmica es continua desde la superficie (la fosa oceánica) hasta 300 km de profundidad, observándose un nido sísmico a una profundidad de 100 km, donde el ángulo de buzamiento del plano de subducción se vuelve prácticamente horizontal. Estudios de la sismicidad del sur del Perú han identificado dos zonas de actividad sísmica superficial entre los 16 y 17 de latitud sur, la primera a lo largo de la costa y la segunda al oeste de la cadena volcánica, a 70 km de la línea de costa. El peligro sísmico se ha visto incrementado por la ocurrencia de un terremoto en el norte de Chile de magnitud 8.0 que ha modificado el campo de esfuerzos en la zona. Este sismo, ocurrido el 30 de Julio de 1995 indica, según algunos especialistas, un aumento de las posibilidades de que se produzca un gran terremoto en esta zona.

En la actualidad, la información sísmica de la región en estudio está desactualizada y en forma aislada. Debido a que la amenaza de un sismo severo es latente, se requiere de un estudio específico e integral para la evacuación del peligro sísmico regional.

PROYECTO DE INVESTIGACION

SISMICIDAD Y PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN SUR-OCCIDENTAL DEL PERÚ

Jorge Olarte Navarro
Darwin López Culquicondor

INDICE

1. INTRODUCCIÓN
 2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO
 3. CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS DE LA REGIÓN ANDINA
 - Aspectos generales
 - Fosa oceánica Perú-Chile
 4. INTERACCIÓN DE LA PLACA DE NAZCA CON LA PLACA SUDAMERICANA
 5. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD
 - Distribución espacial de la actividad sísmica
 - Perfiles de sismicidad
 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SISMICIDAD
 - Relación frecuencia-magnitud
 7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS
 8. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

SISMICIDAD Y PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN SUR-OCCIDENTAL DEL PERÚ

J. Olarte y D. López

1. INTRODUCCIÓN

La región sur-occidental del Perú (Arequipa-Tacna) está situada en la zona de subducción de la placa Nazca y la placa Sudamericana. Ésta es una zona de alta actividad sísmica en donde, de acuerdo a la sismicidad histórica, han ocurrido sismos severos con magnitudes de hasta 8.5 grados en la escala de Richter, entre los que tenemos: El sismo de 1604, que tuvo una longitud de ruptura de 450 km y generó un tsunami de 10 a 15 m de altura; el sismo de 1687, cuya longitud de ruptura aproximada es de 150 km; el sismo de 1784, que tuvo una longitud de ruptura de 300 km y generó un tsunami local de 2 a 4 m de altura; el sismo de 1868, cuya longitud de ruptura es estimada entre 450 y 500 km, generando un tsunami local de 14 m de altura. El periodo de recurrencia de estos sismos severos es del orden de un siglo, por lo que esta región es considerada de alto peligro sísmico ante la posibilidad de ocurrencia de un gran evento en el futuro cercano.

Estudios sobre tectónica de placas muestran que una interacción de las placas puede producir deformaciones, actividades volcánicas y metamorfismo, a distancias relativamente considerables de la zona de convergencia de las placas (Burchfiel, 1996). Entretanto, ese tectonismo no es uniforme a lo largo de la línea de convergencia entre las placas como es el caso de la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana, donde existen diferencias morfológicas en la zona de Wadati–Benioff (W-B).

La constante actividad tectónica en esa margen, provocada por la interacción de placas, origina inmensas concentraciones de energía, parte de la cual es liberada

en forma de actividades sísmicas. Tales liberaciones son manifestadas a través de una frecuente actividad sísmica, con magnitudes generalmente poco significativas. Pero esa misma interacción puede originar desplazamientos instantáneos significativos de la placa subducida causada por bloques que pueden permanecer relativamente inertes por un largo periodo de tiempo, antes de manifestarse de forma súbita a través de grandes sismos o terremotos. Cuando estos grandes sismos tienen focos poco profundos, estos pueden provocar desplazamientos considerables los cuales son observados en la superficie.

Los rasgos tectónicos más importantes de la región sur-occidental del Perú son: La fosa oceánica Perú-Chile, la Dorsal de Nazca, que divide a la fosa Oceánica en la fosa de Lima y la fosa de Arica que tiene una influencia decisiva en la constitución tectónica de la parte occidental del Perú. En la zona continental, los rasgos tectónicos más evidentes son la cadena de los Andes y un sistema de fallas normales e inversas y de sobre-escurrimientos. El régimen de esfuerzo regional tectónico parece ser predominante compresional, normal a las líneas de la costa y a la dirección de las cordilleras.

La distribución espacial de los sismos muestra que en la zona de subducción, la actividad sísmica es continua desde la superficie (la fosa oceánica) hasta 300 km de profundidad, observándose un nido sísmico a una profundidad aproximada de 100 km, donde el ángulo de buzamiento del plano de subducción se vuelve prácticamente horizontal. Estudios de la sismicidad del sur del Perú han contribuido significativamente al conocimiento de la distribución espacial de los sismos en esta región, lográndose identificar, además de la forma de distribución hipocentral, dos zonas de actividad sísmica superficial entre los 16 y 17 de latitud sur, la primera a lo largo de la costa, de probable origen inter e intraplaca y la segunda al oeste de la cadena volcánica, a aproximadamente 70 km de la línea de costa.

El nivel de actividad sísmica existente en la región de estudio la caracteriza como una región de alto peligro sísmico, donde ocurrieron en el pasado varios terremotos que provocaron grandes destrucciones, con una secuela de innumerables muertes e inmensas pérdidas materiales. Existen registros históricos que narran los efectos de grandes sismos ocurridos en el pasado, más por la falta de datos instrumentales que no permiten determinar en forma precisa los parámetros hipocentrales y focales de esos eventos.

Los sismos más destructores ocurridos en la región de estudio, de los cuales se tiene información, llegaron a ocurrir el 24.11.1604 (8,6 M_w), el 13.08.1868 (8,8 M_w), con epicentros frente a la costa sur del Perú, y el 09.05.1877 (8,6 M_w) enfrente de la costa norte de Chile. Estos sismos afectaron de manera muy violenta las ciudades peruanas de Arequipa, Moquegua y Tacna, al igual que las ciudades chilenas de Arica, Iquique y Antofagasta. Estos terremotos fueron seguidos por tsunamis con ondas de hasta unos 20 m de altura que destruyeron totalmente los puertos próximos a los dos epicentros, y alcanzaron otros puertos del Océano Pacífico como California, Hawai, Filipinas, Nueva Zelanda, entre otros.

El peligro sísmico se ha visto incrementado por la ocurrencia en el norte de Chile de un terremoto de magnitud 8.0 que ha modificado el campo de esfuerzos en la zona. Este sismo, ocurrido el 30 de Julio de 1995 indica, según algunos especialistas, un aumento de las posibilidades de que se produzca un gran terremoto en la zona objeto del proyecto.

En la actualidad, la información sísmica de la región en estudio está desactualizada y en forma aislada. Debido a que la amenaza de un sismo severo es latente, se requiere de un estudio específico e integral para la evacuación del peligro sísmico regional.

2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Esta zona de estudio, comprende la región sur-occidental del Perú, para lo cual se delimitó el área de estudio desde -19° S hasta -15° S en el eje N-S, y desde -75° O hasta -69° O en el eje E-O (ver Figura 1). Esta zona viene a ser relativamente joven desde el punto de vista tectónico, y esta sometido a una intensa actividad tectónica provocada por la subducción de las placas. La placa de Nazca es la que esta sufriendo un proceso de subducción bajo la placa Sudamericana, constituyendo esto un ejemplo típico sobre el límite de convergencia entre una placa oceánica y una placa continental. Esta interacción origina a lo largo del tiempo, rasgos estructurales particulares en porciones continentales y oceánicas, como la cordillera de los Andes que se extiende por más de 8000 km y la fosa Perú-Chile con aproximadamente 5000 km de extensión.

3. CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS DE LA REGIÓN ANDINA

Aspectos Generales

La zona del presente estudio, comprende la región sur-occidental del Perú y esta sujeta a una dinámica activa, donde la placa oceánica de Nazca esta subducida bajo la placa continental Sudamericana. La subducción de la litosfera oceánica es considerada un proceso estable, ya que la litosfera es más densa que la astenosfera, de este modo, la subducción se puede extender por un largo intervalo de tiempo hasta acabar por variaciones en el movimiento de placas o por procesos de colisión. Es evidente, a través de los estudios de tectónica de placas, que la subducción de la litosfera oceánica puede provocar diferentes manifestaciones estructurales en la placa continental (Burchfiel, 1996).

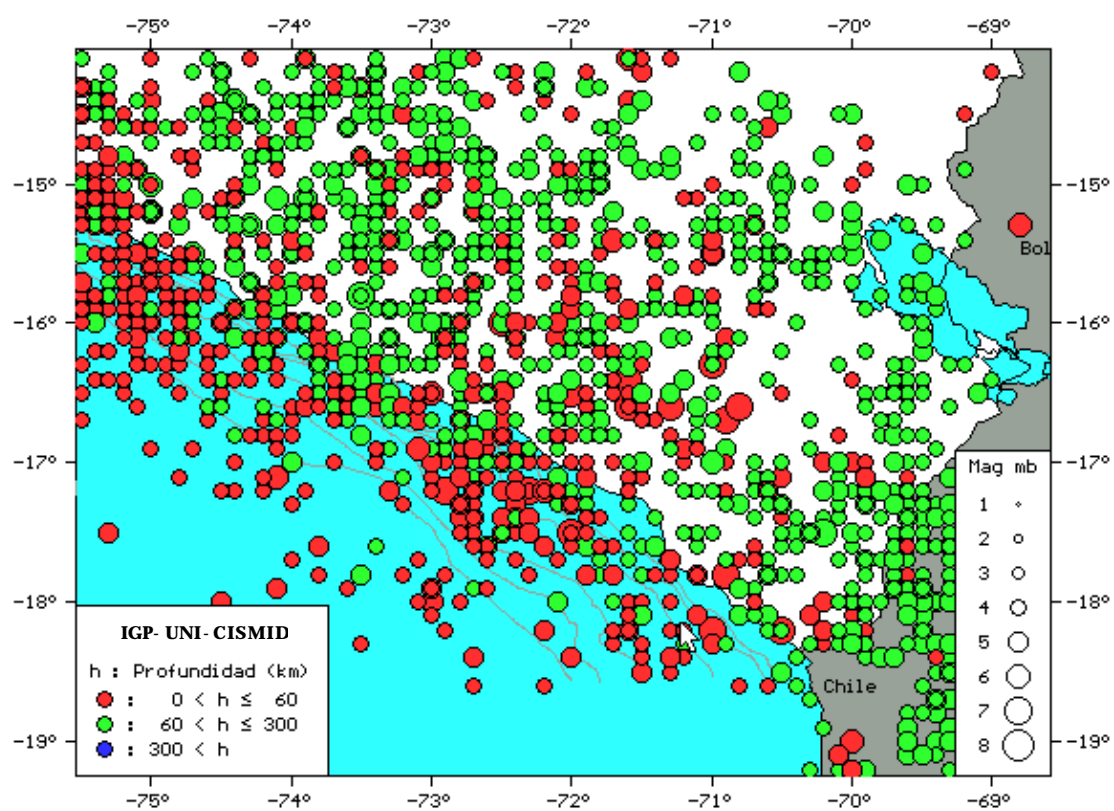


Figura 1. Región de estudio donde se muestran los sismos ocurridos desde 1471 hasta 1999, con $m_b \geq 4.0$.

Por ello, como una consecuencia de esta acción en la región occidental del continente Sudamericano, se forma la cadena orogénica montañosa de los Andes, que se extiende en casi toda la margen occidental del continente (Gonzales-Ferrán, 1985) con aproximadamente 8000 km de longitud. Eventos sísmicos destructores, actividad volcánica y el surgimiento de la corteza terrestre, son comunes en esa región (USGS, 1996).

Algunas características morfológicas de la región Andina que comprende la frontera Perú-Chile, son esquematizadas en la Figura 2, donde se indica la planicie costera, la cordillera occidental, el altiplano, la cordillera oriental y la zona subandina (Suarez et al., 1983).

Las fases tectónicas compresivas y los pulsos asociados de magmatismo intrusivo están relacionados con episodios de altos índices de expansión o convergencia de esas placas, en cuanto que los eventos grandes están relacionados con eventos de bajo índice de convergencia de las placas (Frutos, 1981).

Además de las características ya mencionadas, las diferencias en la geometría de la zona Wadati-Benioff (W-B), causadas por la particularidad en la convergencia de las placas oceánica y continental, también provocan el desenvolvimiento discontinuo de volcanes a lo largo de la cadena andina. Los rasgos tectónicos del carácter regional más importantes, a lo largo de la margen occidental Sudamericana, son la fosa oceánica Perú-Chile y la cadena orogénica de los Andes.

Fosa oceánica Perú-Chile

En general, las fosas oceánicas asociadas a la interacción de la placa oceánica con la placa continental, son las partes más profundas de los océanos y marcan el inicio de la zona de subducción (Condie, 1982). Son paralelas a los sistemas

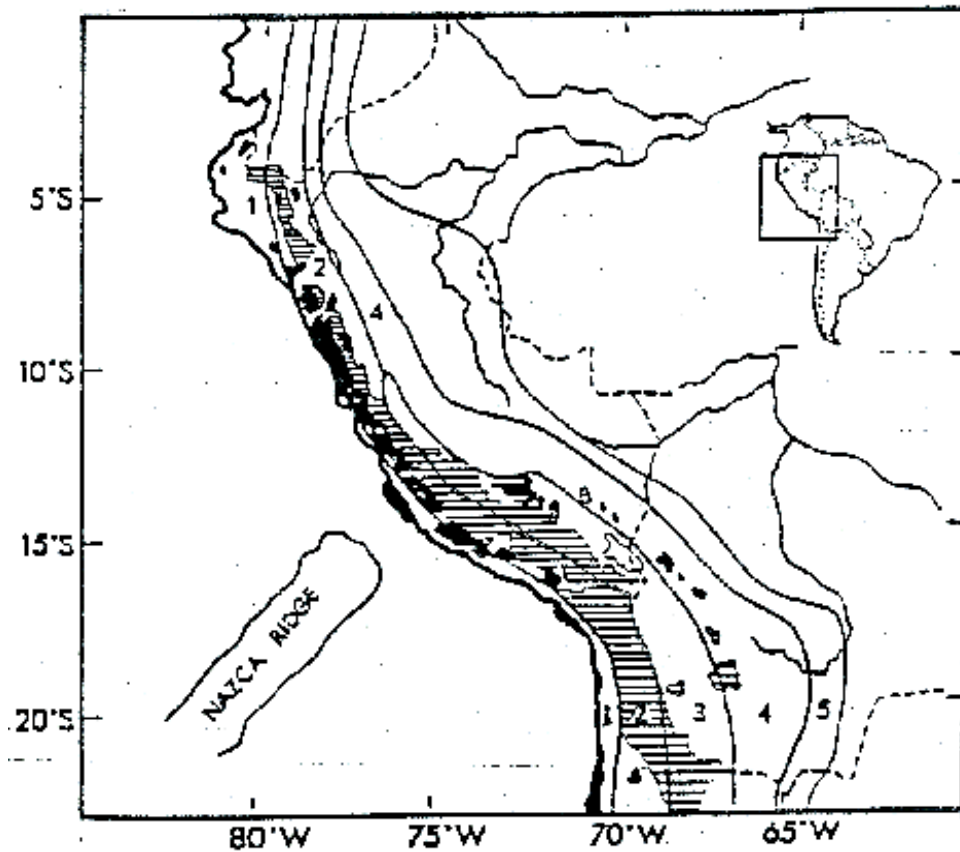


Figura 2. Unidades morfológicas de los andes del Perú, Bolivia y el norte de Chile. (1) Planicie Costera, (2) Cordillera Occidental, (3) Altiplano, (4) Cordillera Oriental y (5) Zona Subandina (Suarez et al., 1983).

de arcos y varían en profundidades de 5000 hasta 10000 metros, como en el caso de la fosa Perú–Chile, que alcanza los 8000 metros de profundidad y que es la expresión superficial de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta fosa no es de las más profundas, pero en longitud es una de las mayores existentes en la Tierra, siendo sobrepasada solamente por el sistema de fosas de la India Oriental y Kuril–Japón (Fisher, 1974).

Es posible distinguir algunas partes con características diferentes en esa fosa, desde una parte relativamente más superficial con plataforma ancha y un flanco estratificado, sedimentado a lo largo del Perú Central, hasta una parte mas profunda casi sin sedimentos, con una plataforma menor o ausente, a lo largo del norte de Chile. La fosa tiene una dirección aproximadamente NW–SE enfrente del Perú, pero después de los 18°S para el sur, varia para una dirección casi N–S.

La distribución de esfuerzos a lo largo de la fosa, en la zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, fue determinada por Wortel y Cloething (1985) basándose en datos de geofísica marina relacionados con las características de deformación de la corteza oceánica y de los sedimentos próximos de la fosa Perú–Chile. Ellos encontraron un campo de compresión normal al de la fosa desde 1° hasta 16°S y de longitud entre 16° y 27°S.

4. INTERACCIÓN DE LA PLACA DE NAZCA CON LA PLACA SUDAMERICANA

Desde el punto de vista tectónico, la región Andina es una de la regiones más activas de la Tierra, que esta sujeta a frecuentes fenómenos catastróficos causados por ese tectonismo como terremotos y erupciones volcánicas. La margen occidental de América del Sur está localizada en una faja sísmica, que corresponde al límite de placas convergentes y forma parte del cinturón Circum–Pacífico.

La influencia del proceso de subducción se observa en la cordillera andina. Sigue la misma dirección y es paralela a la fosa Perú-Chile, mencionando la presencia de dorsales oceánicas como la dorsal de Nazca y la de Juan Fernández, que seccionan a la fosa y que provocan en la cordillera de los Andes, zonas con ausencia de actividad volcánica actual, intercaladas con zonas de vulcanismo activo. Los rasgos tectónicos superficiales en la región Andina parecen ser influenciados por el proceso de subducción. A partir de los 14°S, donde ocurre la intersección de la dorsal de Nazca con la zona de subducción, se observa en la parte norte, varios sistemas de fallas longitudinales, en la gran mayoría de empujones, con un nivel elevado de actividad sísmica en la corteza continental; en la parte sur de los 14°S, y sistemas de fallas que se encuentran en la región subandina, apartado del litoral, y el nivel de actividad sísmica en la corteza continental no es tan significativo.

La ocurrencia de la actividad volcánica tiene una estrecha relación con el proceso de subducción. Investigaciones realizadas por Suárez et al. (1983) demuestran que en el Perú la Cordillera Occidental esta formada principalmente por rocas volcánicas y plutónicas de edades mesozoicas y cenozoicas.

En la actualidad, la actividad volcánica actual en la frontera Perú-Chile, está presente entre 14° y 27°S. Barazangi y Isacks (1979) sugieren una relación entre la geometría horizontal de la placa de Nazca descendente, existente al norte y al sur de esa zona volcánica, y la ausencia de vulcanismo en la placa Sudamericana. Por ello, se menciona que el contacto de la placa descendente horizontal con la placa Sudamericana, no permite el ascenso del material astenosferico; esto sugiere que el vulcanismo tipo arco necesita de la existencia de material astenosferico entre las placas superior y la descendente.

5. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD

Mediante los estudios de sismicidad se busca, de alguna manera, delinear el contacto de las placas en función de la profundidad de los focos de los sismos, la misma que parece ser diferente a las regiones Norte y Centro (Stauder, 1975; James, 1971; Barazangi y Isacks, 1979; Hasegawa y Isacks, 1981; Grange, 1984; Tavera y Buforn, 1998; Tavera, 1998).

El cambio en la forma de esta geometría podría ser explicado con la posible existencia de una “zona de transición” situada entre 13° y 15°S (Deza, 1969).

En este estudio se analiza las principales características de la sismicidad en la región sur del Perú, usando como fuente de información el último catálogo sísmico del Perú, recientemente publicado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2001-a), el cual incluye una base de datos, que comprende del año 1471–1982 (en donde se ha recopilado toda la información existente en esos años, de anteriores catálogos sin repetición de eventos, y con parámetros hipocentrales corregidos), complementado con la información de los últimos años (IGP, 2001-b) que comprende desde agosto de 1982 hasta diciembre de 1999 (que viene a ser muy confiable, a pesar de que falta su revisión y actualización).

Distribución espacial de la actividad sísmica

Para poder realizar un análisis detallado de la distribución espacial de los sismos del Perú, se procedió a clasificarlos en función de la profundidad de sus focos, para lo cual tenemos lo siguiente:

Sismos con foco superficial (h ≤ 60 km)

Estos sismos con foco superficial se distribuyen principalmente entre la fosa y la línea de costa, asociados probablemente al proceso de subducción a profundidades menores a 60 km. La sismicidad superficial se localiza en el

interior del continente y ellos pueden ser relacionados con la deformación tectónica superficial (ver Figura 3).

Sismos con foco intermedio ($60 < h < 300$ km)

Estos sismos se distribuyen en la parte continental, de la siguiente manera:

Existe una mayor concentración de sismos, en el departamento de Tacna, en la parte SE del departamento de Puno, en la parte sur del departamento de Ayacucho, en la parte NW de Puno y en su totalidad en los departamentos de Arequipa y Apurímac.

Una menor concentración de la actividad sísmica, en el departamento de Moquegua, en la parte central de Puno, en los departamentos de Ica, Huancavelica y en parte del norte de Ayacucho (ver Figura 4).

Sismos con foco profundo ($h \geq 300$ km)

Para sismos con foco profundo, se pudo observar que la sismicidad se distribuye mayormente en la parte oriental del Perú, concentrada en la frontera Perú-Brasil siguiendo un alineamiento N-S y en la frontera Perú-Bolivia (entre 13° y 15°S) de manera dispersa (ver Figura 5).

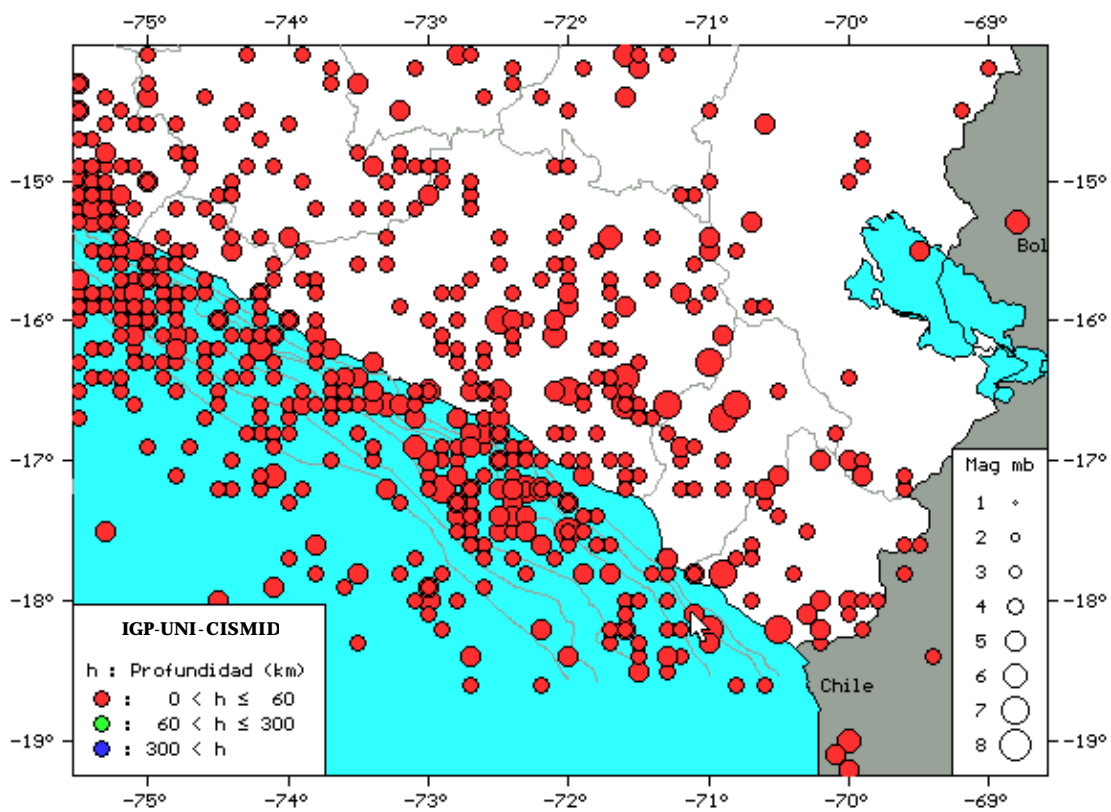


Figura 3. Región de estudio en donde se muestra los sismos con foco superficial ocurridos desde 1471 hasta 1999, con $m_b \geq 4.0$ y una profundidad de $h \leq 60$ km.

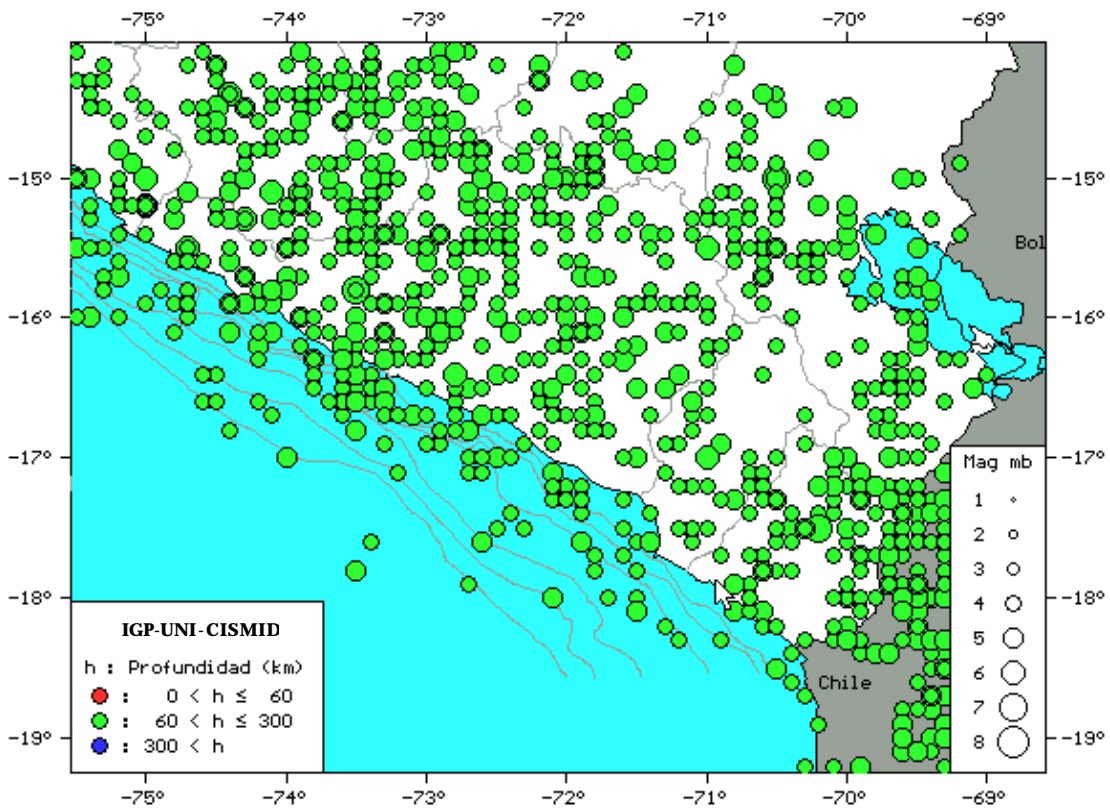


Figura 4. Región de estudio en donde se muestra los sismos con foco intermedio ocurridos desde 1471 hasta 1999, con $m_b \geq 4.0$ y una profundidad de $60 < h \leq 300$ km.

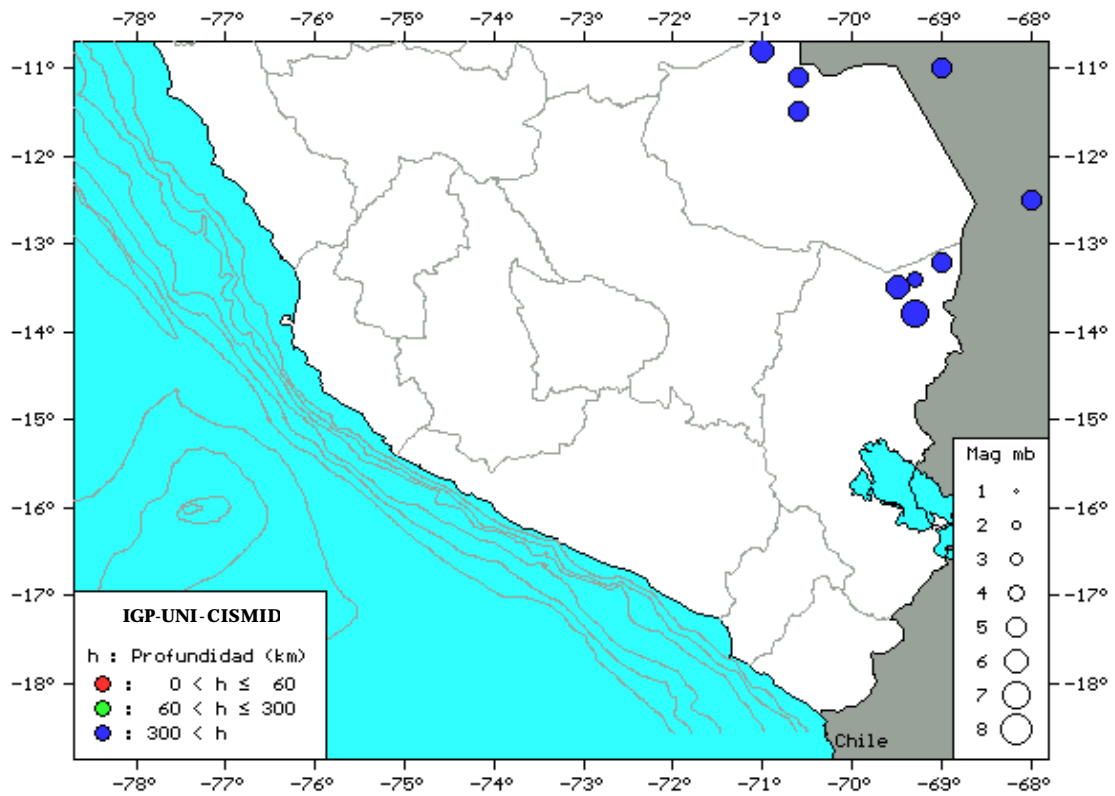


Figura 5. Región de estudio en donde se muestra los sismos con foco profundo ocurridos desde 1471 hasta 1999, con $m_b \geq 4.0$ y una profundidad de $h > 300$ km.

- **Perfiles de sismicidad**

Esta distribución puede ser analizada mediante la elaboración de perfiles sísmicos paralelos y perpendiculares a la línea de la fosa Perú–Chile.

Mediante este análisis, se permitió definir la zona de contacto entre las placas y configurar la geometría de subducción para la región sur del Perú.

Según este estudio, se muestra que un grupo importante de sismos se localizan en el interior del continente, los mismos que probablemente estarían asociados a los sistemas de fallas del cuaternario, distribuidas en la zona subandina y en los altos de la cordillera andina.

Perfiles sísmicos paralelos a la fosa Perú–Chile

Se han elaborado, de Oeste a Este, cuatro (4) perfiles de sismicidad paralelos a la línea de la fosa con una área de 110 x 700 km² (Figura 6).

En las Figuras 7 y 8, se pueden apreciar los perfiles sísmicos paralelos a la fosa, donde fueron tomados con una orientación N–S (de izquierda a derecha).

Perfiles sísmicos perpendiculares a la fosa Perú–Chile

Asimismo, se elaboraron ocho (8) perfiles perpendiculares a la línea de la fosa de Sur a Norte con un área de 110 x 500 km² (Figura 9). En las Figuras 10, 11, 12 y 13, se pueden apreciar los perfiles sísmicos perpendiculares a la fosa, donde se aprecia como se va dando el proceso de subducción de la placa de Nazca. Los perfiles se muestran con una orientación de O–E (de izquierda a derecha).

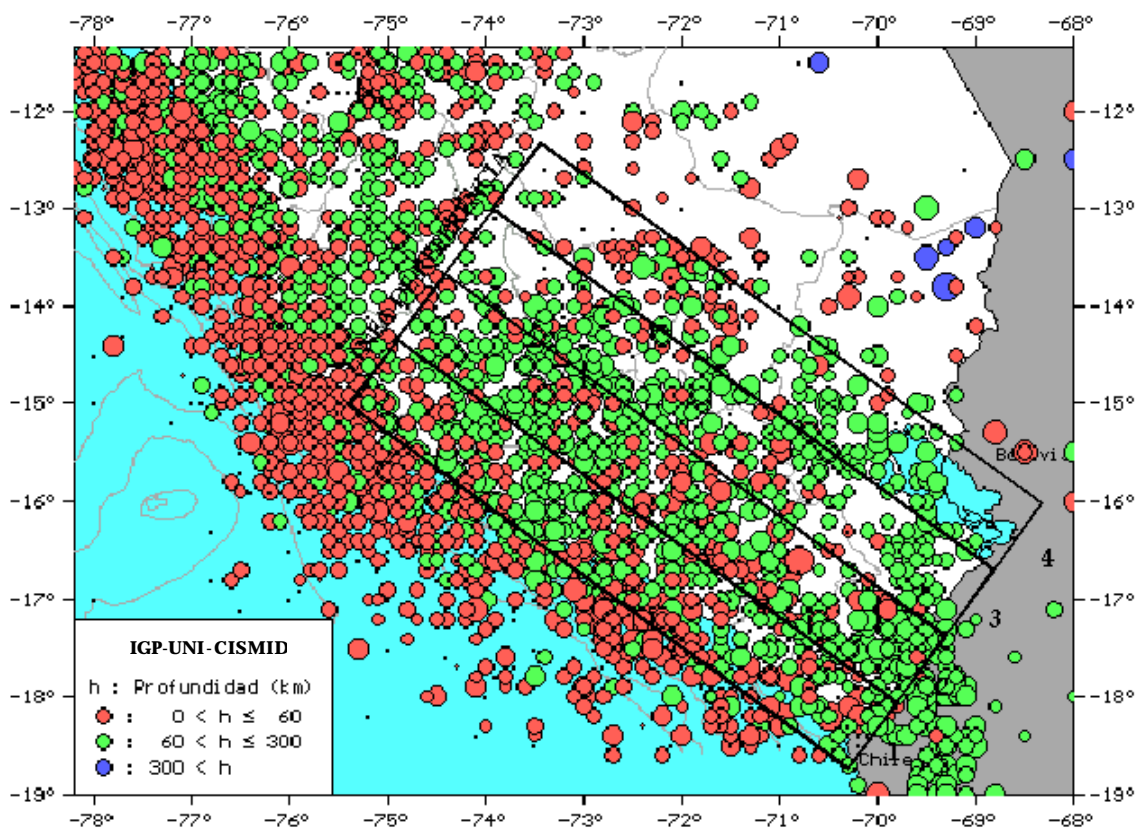
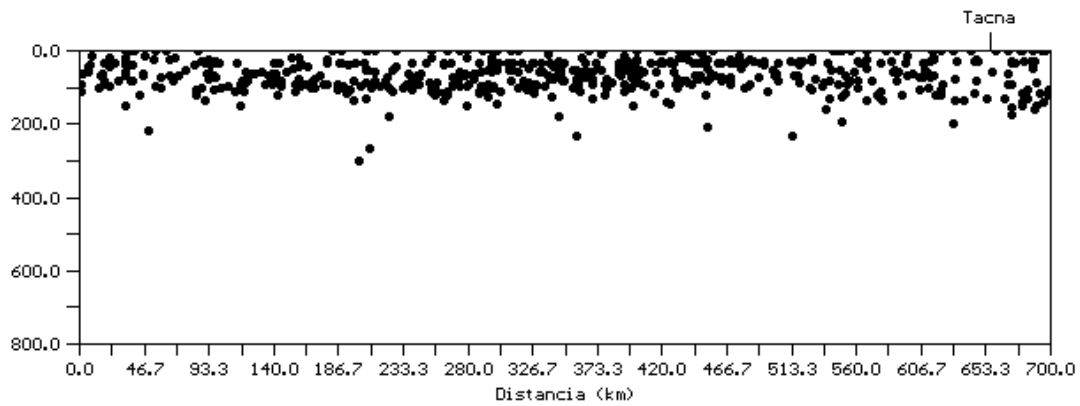


Figura 6. Región en estudio en donde se muestran los cuatro (4) perfiles de sismicidad paralelos a la fosa oceánica Perú-Chile.

a. *PERFIL N° 01*

L.R.



b. *PERFIL N° 02*

L.R.

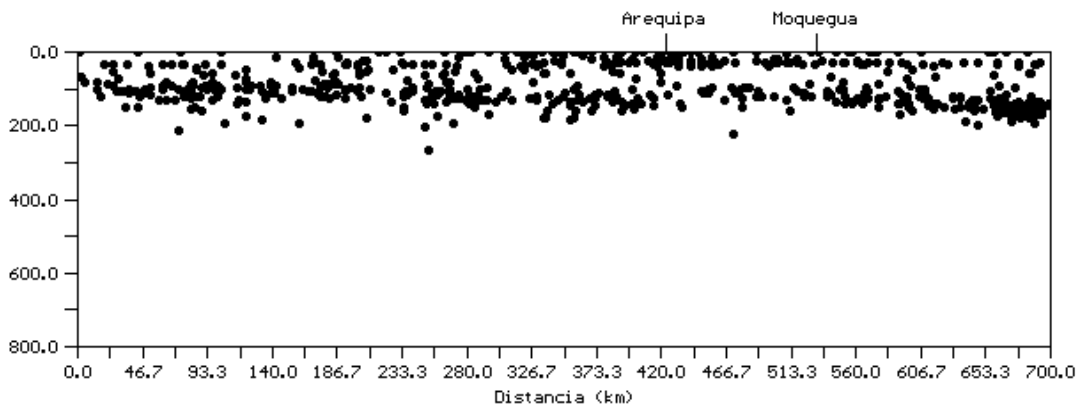
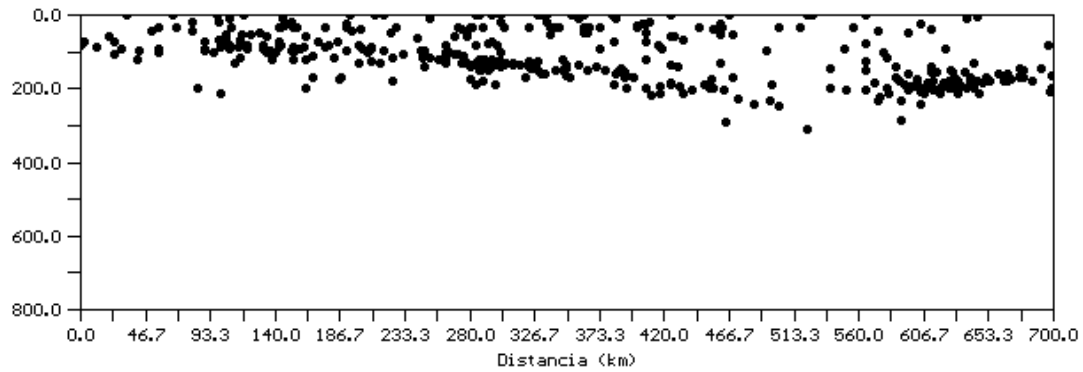


Figura 7. Cortes verticales en dirección paralela a la línea de la fosa oceánica Perú–Chile. Para localizar cada sección, ver Figura 6.

c. *PERFIL N° 03*

L.R.



d. *PERFIL N° 04*

L.R.

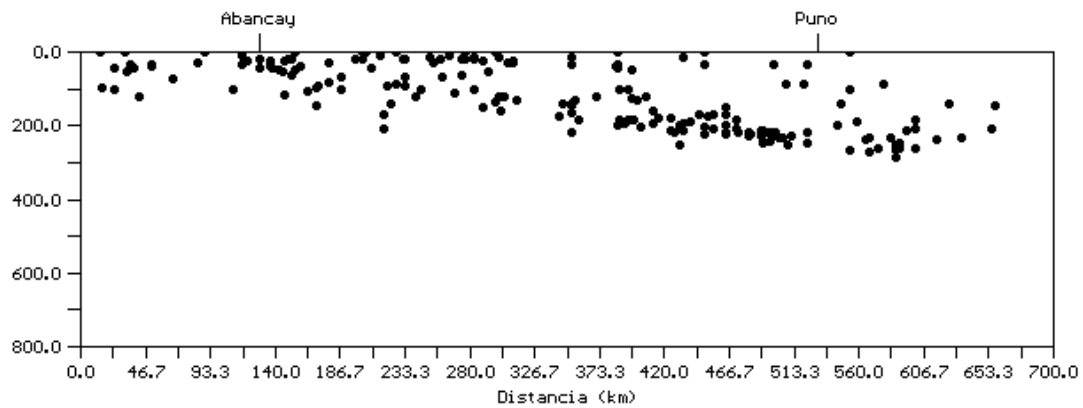


Figura 8. Cortes verticales en dirección paralela a la línea de la fosa oceánica Perú–Chile. Para localizar cada sección, ver Figura 6.

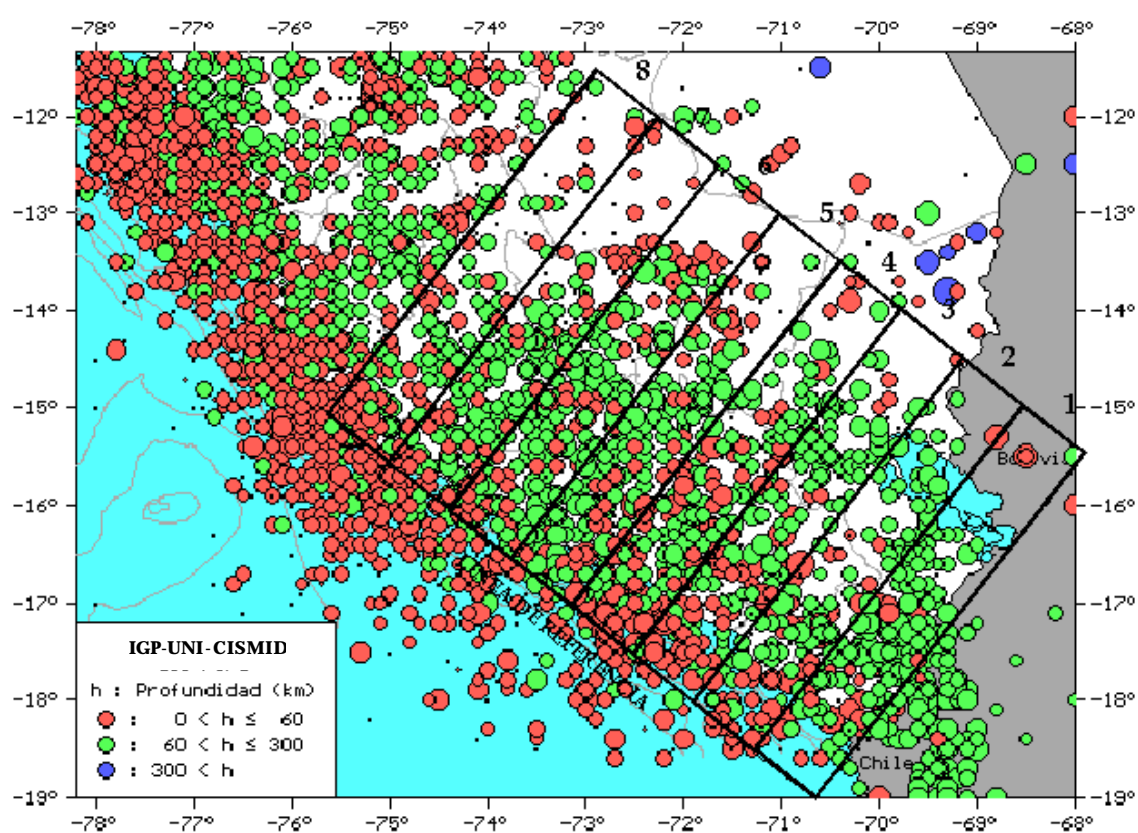
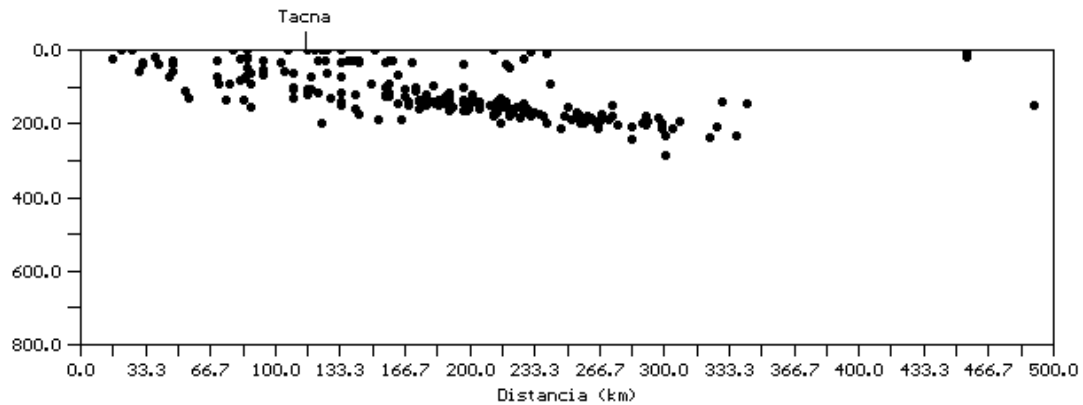


Figura 9. Región de estudio en donde se muestra los ocho (8) perfiles de sismicidad perpendiculares a la fosa oceánica Perú-Chile.

a. *PERFIL N° 01*

L.R.



b. *PERFIL N° 02*

L.R.

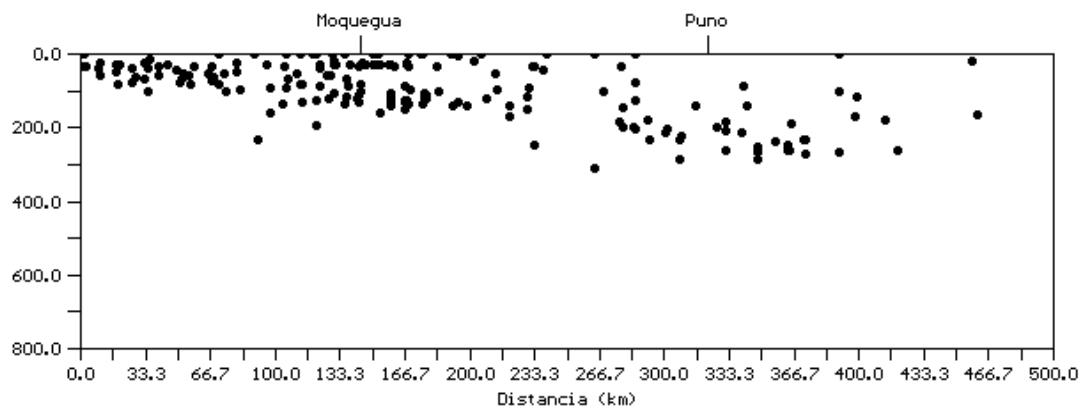
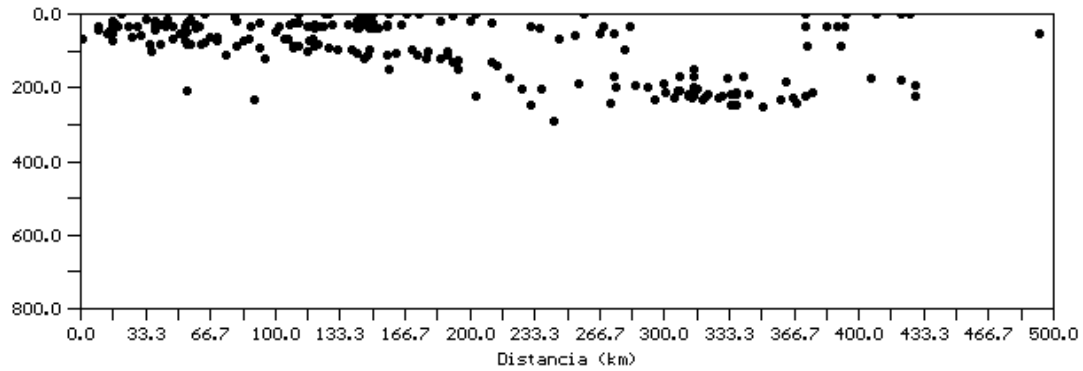


Figura 10. Cortes verticales en dirección perpendicular a la línea de la fosa oceánica Perú–Chile. Para localizar cada sección, ver Figura 9.

c. *PERFIL N° 03*

L.R.



d. *PERFIL N° 04*

L.R.

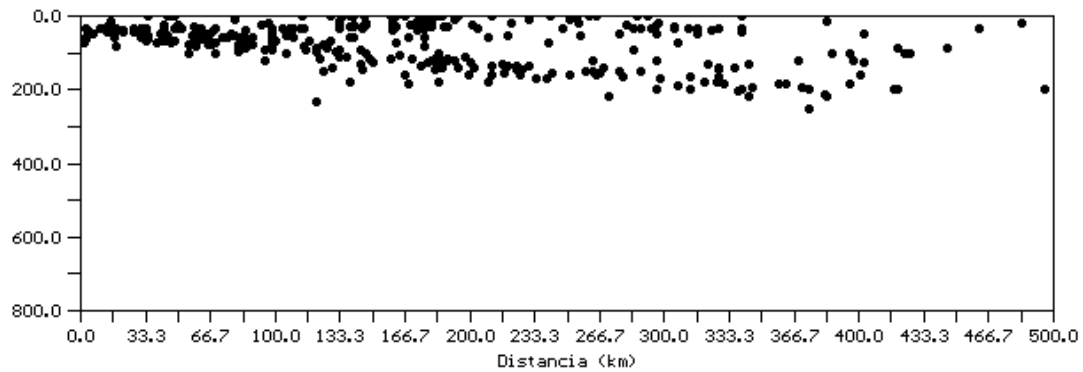
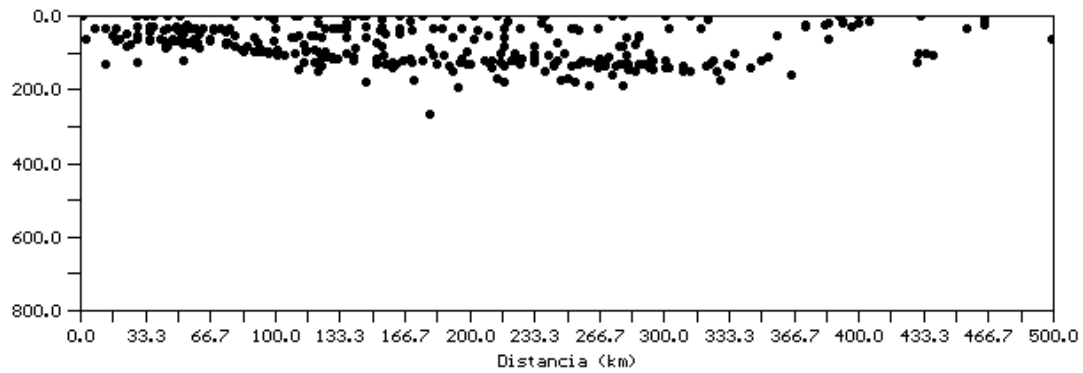


Figura 11. Cortes verticales en dirección perpendicular a la línea de la fosa oceánica Perú-Chile. Para localizar cada sección, ver Figura 9.

e. *PERFIL N° 05*

L.R.



f. *PERFIL N° 06*

L.R.

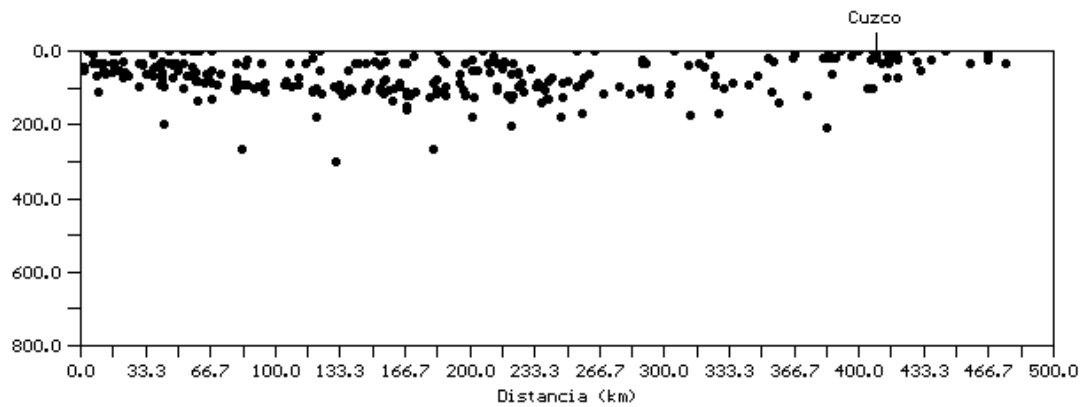
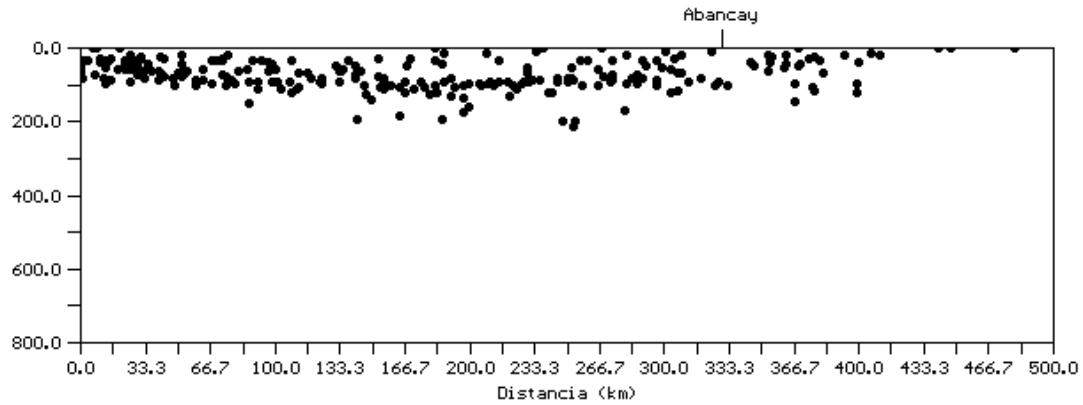


Figura 12. Cortes verticales en dirección perpendicular a la línea de la fosa oceánica Perú–Chile. Para localizar cada sección, ver Figura 9.

g. PERFIL N° 07

L.R.



h. PERFIL N° 08

L.R.

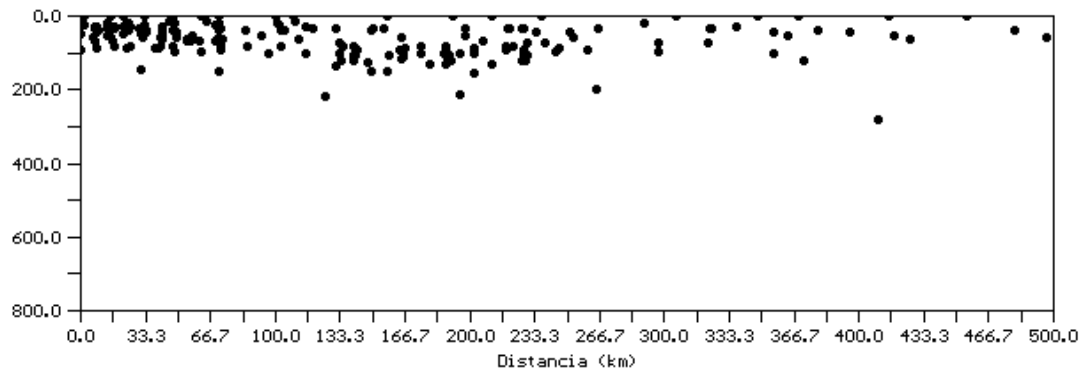


Figura 13. Cortes verticales en dirección perpendicular a la línea de la fosa oceánica Perú–Chile.

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SISMICIDAD

Relaciones frecuencia-magnitud

Gutenberg y Richter (1954) desarrollaron relaciones empíricas para representar la frecuencia de ocurrencia de los sismos de diferente magnitud y propusieron la siguiente relación:

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

Donde N es el número de temblores con magnitud igual a $M \pm dM/2$, que ocurrieron en un intervalo de tiempo en una determinada región, a y b son constantes y serán determinadas por mínimos cuadrados, dM es el incremento de la escala de magnitud que esta siendo utilizada. La distribución real del $\text{Log } N$, normalmente muestra valores pequeños para las menores magnitudes, como consecuencia de un catálogo sísmico incompleto a partir de una determinada magnitud de inicio M_I . La relación es ajustada solamente para valores de $M \geq M_I$.

N es conocido también como la frecuencia simple, singular, normal, incremental, integral, de intervalo, o no acumulativo (Bath, 1981). En este caso el parámetro a representa el logaritmo del número de temblores de magnitud cero, y el parámetro b es una medida de la actividad sísmica. Además, el parámetro a depende del intervalo de observación, de la extensión del área analizada y del nivel de actividad sísmica (Mogi, 1967).

El parámetro b representa la inclinación de la recta de la relación y corresponde a la proporción de sismos de determinada magnitud (Udías y Mezcua, 1986). A partir de la ecuación se puede determinar el periodo de retorno de los sismos de magnitud M , que ocurren en la región de estudio.

El parámetro b también ha sido motivo de una serie de estudios que sugieren una relación de este parámetro con las características tectónicas del área donde

la sismicidad este siendo estudiada. De acuerdo con Bullen y Bolt (1987), este parámetro puede ser utilizado en la predicción sísmica y para estudios sismotectónicos comparativos. Fue observado por esos autores, que en una determinada región el valor de b cambia con el tiempo y con la localización dentro de la región, y en consecuencia el valor medio y la varianza de b también deben de cambiar.

Esto quiere decir que el parámetro puede ser considerado, en general, como un proceso estocástico no estacionario. Sin embargo, para intervalos de tiempo cortos y áreas menores, el parámetro b puede ser considerado como estacionario y constante.

Diversos investigadores encontraron, que en valor de b oscilaba entre 0.3 y 1.5, dependiendo de la región estudiada, de la profundidad focal dominante y del nivel de tensiones existentes en esa región (Lomnitz y Rosenblueth, 1976; Lee y Stewart, 1981; Udías y Mezcua, 1986). Un valor medio aproximado, en el ámbito mundial, para b es 1. Valores menores normalmente indican una actividad tectónica moderada, al igual que valores mayores de 1 son típicos de zonas con actividad tectónica considerable (Olarte, 2000).

Bath (1981) menciona que valores grandes de b también han sido asociados frecuentemente a estructuras tectónicas con gran heterogeneidad. Este autor menciona también que utilizando datos obtenidos en experimentos de rotura en laboratorio, fue encontrado que valores elevados de tensión están acompañados de valores pequeños de b y que valores bajos de tensión resultan en valores grandes de b . Udías y Mezcua (1986) sugieren también que el valor de b esta relacionado con las características físicas de cada región, de modo que un valor alto de b implica un predominio de sismos de pequeña magnitud, es decir, una región tiene poca resistencia para el acumulado de esfuerzos, en cuanto que un valor bajo de b indica que predominan los sismos de magnitud mayor, es decir corresponde a un medio con mayor resistencia.

Además, las variaciones temporales de b son utilizadas en la predicción de terremotos. Varios estudios fueron efectuados con esta finalidad, por ejemplo Lee y Stewart (1981) mencionan un trabajo realizado por Suyehiro en 1967 utilizando premonitores y réplicas de un sismo mayor; en ese caso el valor de b para los sismos premonitores será 0.35 y para las réplicas de 0.76, en una región donde el valor normal de b es 0.8.

También podemos mencionar que el cálculo de b en la relación frecuencia de ocurrencia de los sismos y la magnitud de onda interna nos indica que un valor de b menor que 1, va a indicar una elevada tensión del terreno, lo que significaría que se trata de una zona tectónicamente antigua, estable, de baja atenuación y por lo tanto de menor peligro sísmico. Un valor de b mayor a 1, indica un valor bajo de tensión del terreno, una zona tectónicamente joven, inestable, de alta atenuación y por lo tanto alto peligro sísmico.

Para evaluar la peligrosidad sísmica se ha utilizado la ecuación de Gutenberg y Richter (1954) en toda la región en estudio. Se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste:

$$\text{Log } N = 5.391 - 0.612 m_b \quad (2)$$

donde se determinó que el valor de b es de 0.612 (ver Figura 14). La recta de ajuste se realizó tomando valores de m_b iguales y mayores a 4.5.

Si nosotros consideramos una relación frecuencia-magnitud para toda la región de estudio tomando valores de m_b comprendidos entre 4.5 y 7.0 (valores que tienen mayor consistencia y linealidad en la curva logarítmica) obtenemos la siguiente ecuación de ajuste:

$$\text{Log } N = 7.313 - 0.958 m_b \quad (3)$$

donde se determinó que el valor de b es de 0.958 (ver Figura 15).

Asimismo, se determinaron las ecuaciones de la recta de ajuste para los tres departamentos comprendidos en la región en estudio: Arequipa, Moquegua y Tacna.

La ecuación de ajuste para el departamento de Arequipa es:

$$\text{Log } N = 5.906 - 0.765 m_b \quad (4)$$

donde el valor de b es de 0.765.

La ecuación de ajuste para el departamento de Moquegua es:

$$\text{Log } N = 5.339 - 0.854 m_b \quad (5)$$

donde el valor de b es de 0.854.

Finalmente, la ecuación de la recta de ajuste para el departamento de Tacna viene a ser:

$$\text{Log } N = 5.911 - 0.894 m_b \quad (6)$$

donde el valor de b es de 0.894.

Téngase en cuenta que los valores de ajuste para las ecuaciones (4), (5) y (6) están comprendidos entre 4.5 y 7.0, en vista que estos valores tienen mayor consistencia y linealidad en la curva logarítmica.

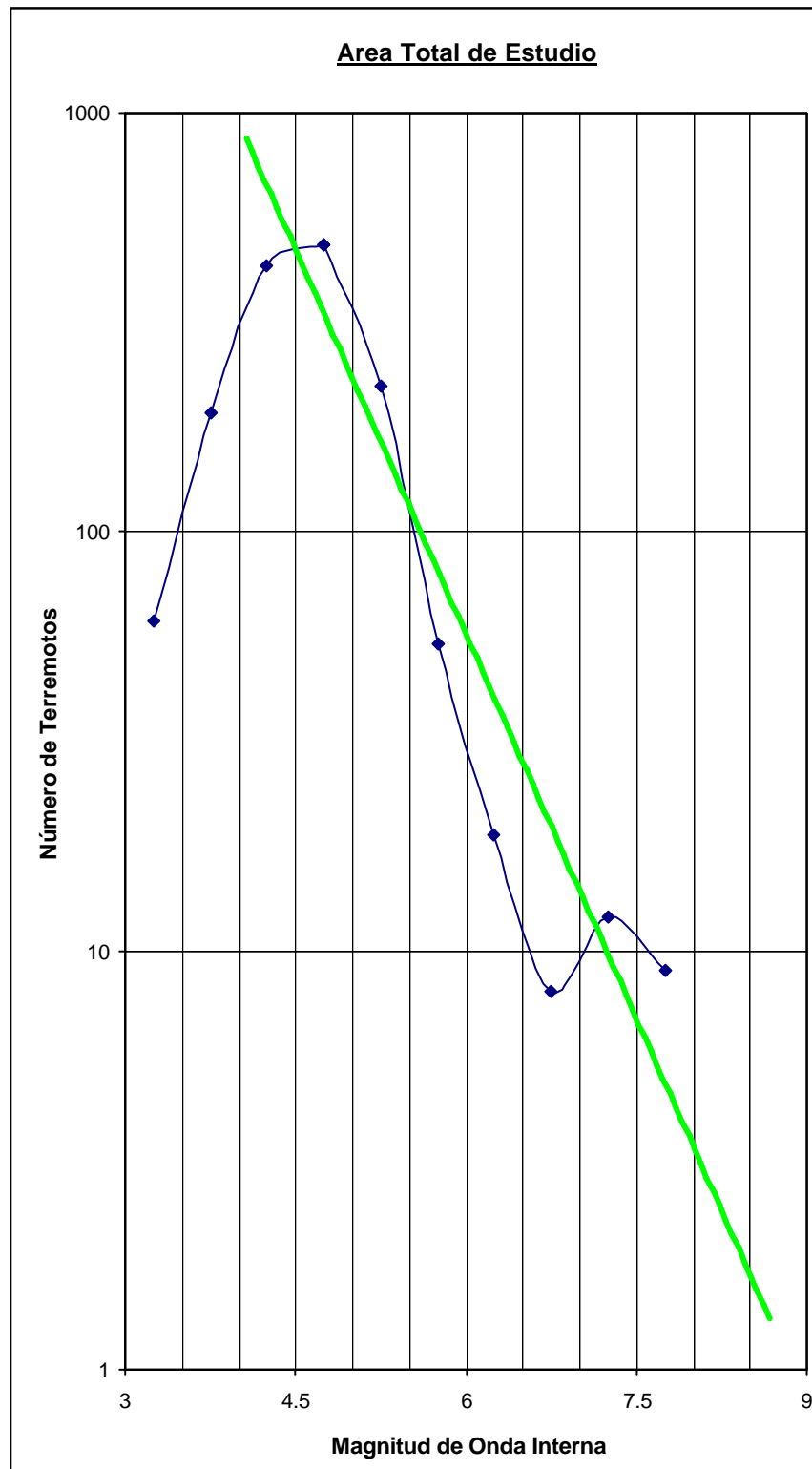


Figura 14. Relación frecuencia–magnitud para toda la región de estudio.
Curva de ajuste con $m_b \geq 4.5$.

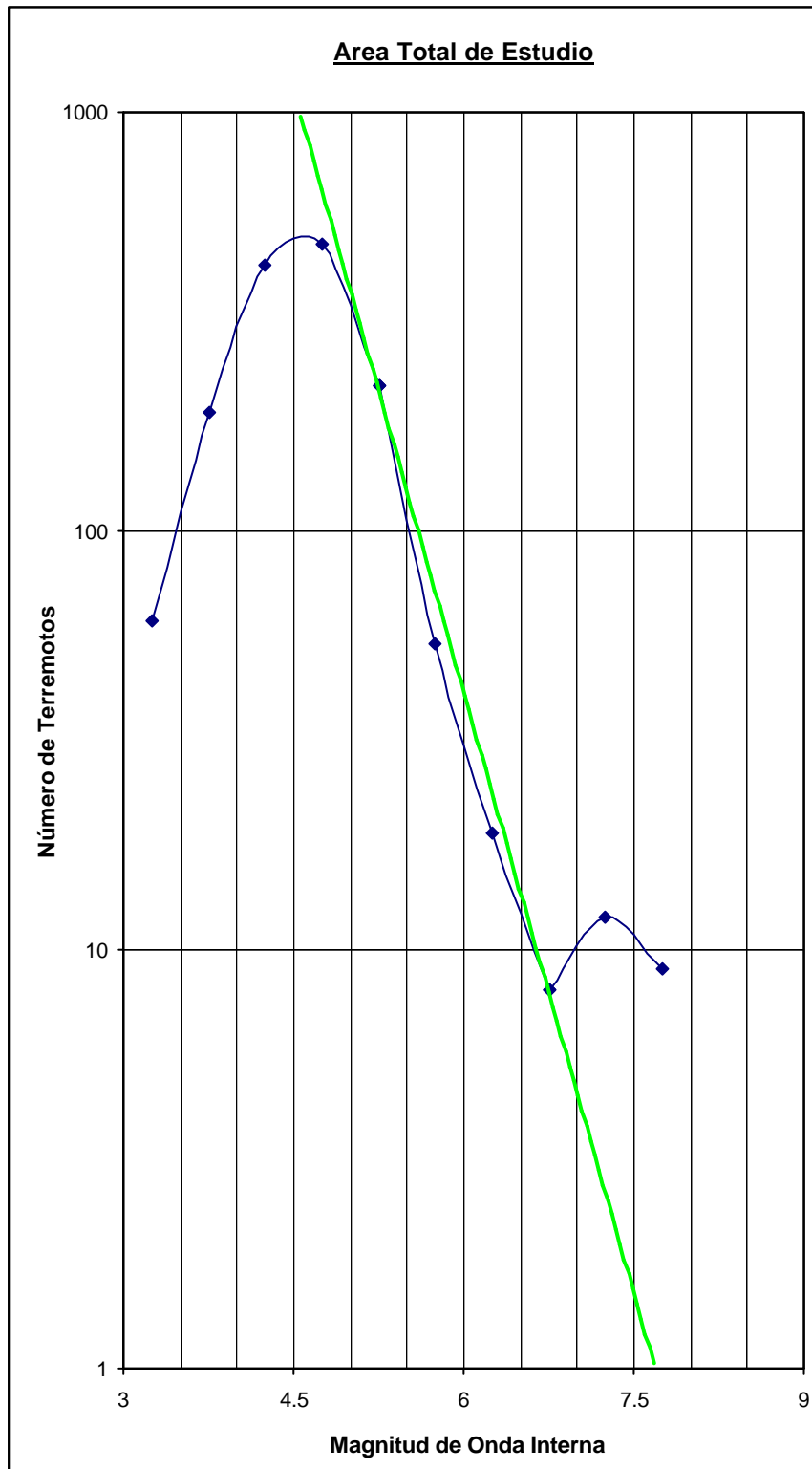


Figura 15. Relación frecuencia–magnitud para toda la región de estudio.

Curva de ajuste con $4.5 \leq m_b \leq 7.0$.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la discusión de resultados se han realizado comparaciones de nuestros resultados con otros estudios y así poder contrastar la fiabilidad de los mismos.

La distribución de los focos sísmicos en los perfiles paralelos a la línea de la fosa, muestran que la sismicidad aumenta su profundidad hacia el interior de continente.

En el extremo NW del área de estudio, la profundidad de los focos sísmicos no supera los 150 km; mientras que en el extremo SE llega a profundidades de 300 km. Así mismo, a una distancia de 350 km a partir de la línea de referencia (L. R. de los perfiles paralelos a la fosa), se puede observar que la tendencia de la sismicidad con la profundidad, sigue un alineamiento de 30° de inclinación, la misma que esta asociada a la contorsión de la placa oceánica.

La distribución de los focos sísmicos en los perfiles perpendiculares a la línea de la fosa, muestran que el proceso de subducción se puede dividir en dos zonas: La primera localizada en el extremo NW y cuyos sismos se distribuyen en profundidad hasta 100–150 km con un ángulo de 20°-25°, para luego volverse horizontal hasta una distancia de 400 km desde línea de referencia (perpendicular a la fosa). La segunda ubicada en el extremo SE, donde los sismos siguen una pendiente de 30° hasta profundidades de 300 km aproximadamente (ver Figura 16).

El cambio en la forma de la geometría de la subducción se localiza entre las latitudes 14°-16° S y la contorción de la placa se realiza sobre un área 200 km de ancho aproximadamente. Esta zona denominada *zona de transición*, se sitúa en superficie entre las ciudades de Cuzco al Este y Andahuaylas.

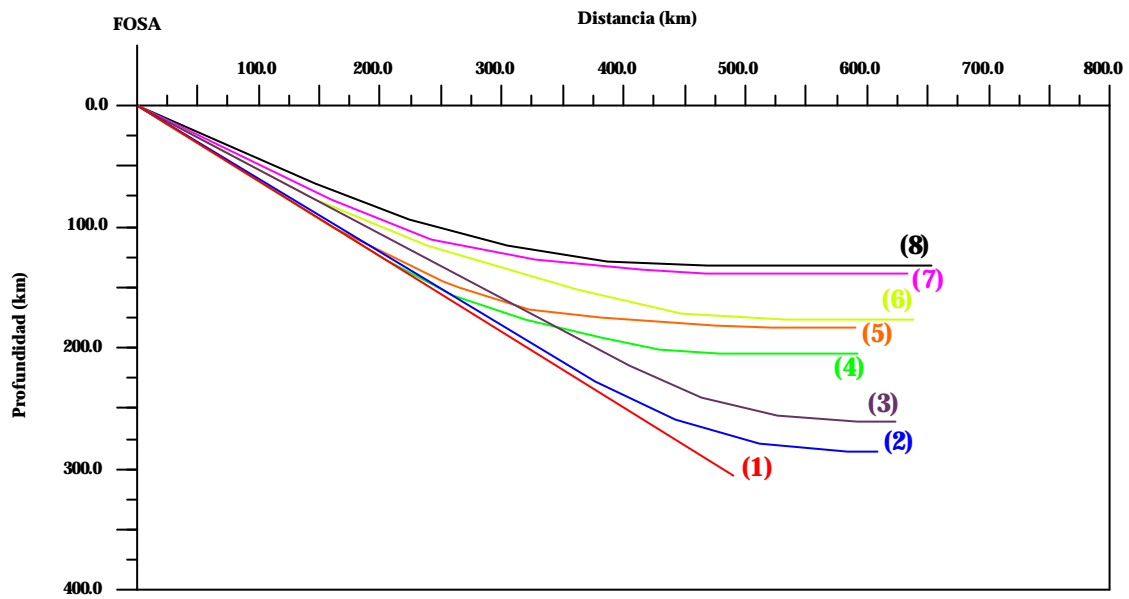


Figura 16. Formas de subducción en la región sur-occidental del Perú, en función de la sismicidad en profundidad (ver Figuras 10, 11, 12 y 13).

La contorsión de la placa podría ser debido a la llegada de la Dorsal de Nazca a la zona de subducción, cuya colisión con la placa Sudamericana habría producido un proceso orogénico muy complejo que dio origen a la Cordillera de los Andes, acompañada de importante actividad sísmica y volcánica en la región sur del Perú.

Respecto a la ecuación (2) obtenida por Gutenberg y Richter (1954), y tomando en cuenta valores de magnitud m_b iguales y mayores a 4.5, obtenemos un valor de b igual a 0.612 que indica una sismicidad moderada en esta región. Además, se estima con esta curva de ajuste, la ocurrencia probable de un sismo con magnitud máxima de 8.8 (ver Figura 14).

Si consideramos valores de magnitud m_b comprendidos entre 4.5 y 7.0 (ecuación 3) se obtiene un valor de b igual a 0.958 (cercano a 1) que indica una zona tectónicamente joven, de alta atenuación y por consiguiente de alto peligro sísmico. Se estima, un sismo probable con una magnitud máxima 7.6 (ver Figura 15).

Las ecuaciones (4), (5) y (6) muestran las rectas de ajuste para los tres departamentos comprendidos en la región en estudio: Arequipa, Moquegua y Tacna. Se aprecia un aumento gradual de los valores del parámetro tectónico b desde Arequipa (0.765), pasando por Moquegua (0.854) hasta Tacna (0.894). Estos resultados indican un aumento del peligro sísmico de norte a sur en la región en estudio.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes que se desprenden de este estudio son las siguientes:

- Los resultados de este estudio de sismicidad y peligrosidad sísmica son compatibles con similares estudios realizados en zonas cercanas a la zona de estudio, entre ellos podemos mencionar a Zamudio (1998), así como también el de Bernal (1999).
- Se aprecia un aumento gradual de los valores del parámetro tectónico b desde Arequipa (0.765), pasando por Moquegua (0.854) hasta Tacna (0.894) lo cual indica un aumento del peligro sísmico de norte a sur en esta región de estudio. Además, se estima un valor de b para esta región comprendido entre 0.612 y 0.958.
- Se estima la probabilidad de ocurrencia de un sismo de máxima magnitud con valores comprendidos entre 7.6 y 8.8. Sin embargo, para investigaciones futuras, las figuras de relaciones frecuencia-magnitud deberán ser suavizadas para obtener valores de magnitud probable más precisos.
- La sismicidad aumenta en profundidad conforme se avanza del litoral hacia el interior del continente, que evidencia el proceso de subducción del contacto de las placas Nazca y Sudamericana.
- Se confirma la *zona de transición* entre los 14°-16° S, con una contorción de la placa en un área 200 km de ancho aproximadamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barazangi, M. & Isacks, B. L. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidences from spatial distribution of earthquakes, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 57, pp. 537–555.
2. Bath, M. (1981). Earthquake Magnitude–Recent Research and Current Trends, *Earth – Science Reviews*, 17, pp. 315–398.
3. Bernal, I. (1999). Características de la Sismicidad en la Región Sur del Perú. *Revista de Trabajos de Investigación*.
4. Bullen, K. E. y Bolt, B. A. (1987). *An Introduction to the Theory of Seismology*, Cambridge, 4^o ed., pp. 371–395.
5. Burchfiel, B. C. (1996). Intraplate Tectonics, via Internet, April 96.
6. Condie, K. C. (1982). *Plate Tectonics and Crustal Evolution*, Pergamon Press, 2^o Ed, pp. 310.
7. Deza, E. (1969). Estudio preliminar sobre las zonas de transición que separan posibles regiones sismotectónicas del margen occidental de Sudamérica: Zona de transición en el Perú: Com I Cong. Nac. Sism. Ing. Antisísmica, Lima.
8. Fisher, R. (1974). Pacific – Type Continental Margins, *The geology of Continental Margins*, C. A. Burk & C.L. Drake editors, New York, pp. 25–41.
9. Frutos, J. (1981). Andean tectonic as a consequence of sea–floor spreading, *Tectonophysics*, 93, pp. 2095–2155.

10. González – Ferrán, O. (1985). Mapa Neotectónico preliminar de América del Sur, Centro Regional de Sismología para América del Sur, v. 11. pp. 1–12.
11. Grange, F. (1984). Etude sismotectonique détaillée de la subduction lithosphérique au Sud Pérou. These Docteur 3er cycle, Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble.
12. Gutenberg, B. y Richter, C. (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Princeton University Press, New Jersey, 2º Ed, pp. 310.
13. Instituto Geofísico del Perú (2001-a). Catálogo Sísmico del Perú, 1471-1982 versión revisada y actualizada en CD. Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología. Lima, Perú.
14. Instituto Geofísico del Perú (2001-b). Catálogo Sísmico del Perú 1982-1999 comunicación personal del Dr. Hernando Tavera. Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología. Lima, Perú.
15. James, D. E. (1971). Plate tectonic model for the evolution of the central Andes, Geological Society of American Bulletin, 82, pp. 3325 –3346.
16. Lee, W. H. K. y Stewart, S. W. (1981). Principles and Applications of Microearthquake Network, Advances in Geophysics-Supplement 2, pp. 293.
17. Lomnitz, C. y Rosenblueth, E. (1976). Seismic Risk and Engineering Decisions, Development in Geotechnical Engineering 15, Elsevier, Amsterdam, pp. 415.
18. Mogi, K. (1967). Regional Variations in Magnitude – Frequency Relation of Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Ame., Vol. 45, pp. 313–325.

19. Olarte, J. (2000). Sismología para Ingenieros. 1er Curso de Segunda Especialización en Ingeniería Sismorresistente. Apuntes de Clase. CISMID-FIC-UNI.
20. Stauder, W. (1975). Subduction of the Nazca plate under Peru as evidenced by focal mechanism and by seismicity, *Jour Geophy. Res.*, 80, pp. 1053–1064.
21. Suarez, G., Molnar, P. , Burchfiel, B. C. (1983). Seismicity, depths of faulting and active tectonic of the Andes of Peru – Ecuador and Southern Colombia, *Jour. Geophy. Res.*, 88, pp. 10403–10428.
22. Suyehiro, S. (1967). A research for small, deep earthquakes using quadripartite stations in the Andes, *Bull. Seism. Soc. Ame.*, 57, pp. 447–461.
23. Tavera, H. y Buforn, E. (1998). En: A. Udías y E. Buforn (ed.). Sismicidad y Tectónica de Centro y Sudamérica. Física de la Tierra, UCM., N°10, pp. 187–219.
24. Tavera, H. (1998). Mecanismo Focal de Terremotos en Perú y sismotectónica. Tesis Doctoral, UCM. España, pp. 400.
25. Udías, A. y Mezcua, J. (1986). Fundamentos de Geofísica. Primera Edición, UCM. Madrid, pp. 419.
26. USGS, (1996). Understanding plate motions, *This Dynamic Earth*, via Internet, pp. 12.
27. Wortel, M. J. R. y Cloething, S. A. P. L. (1985). Accretion and lateral variations in tectonic structure along the Peer-Chile trench, *Tectonophysics*, 112, pp. 443–463.
28. Zamudio, Y. (1998). Características Sismotectónicas e de Sismicidade na Região da Fronteira Peer – Chile.