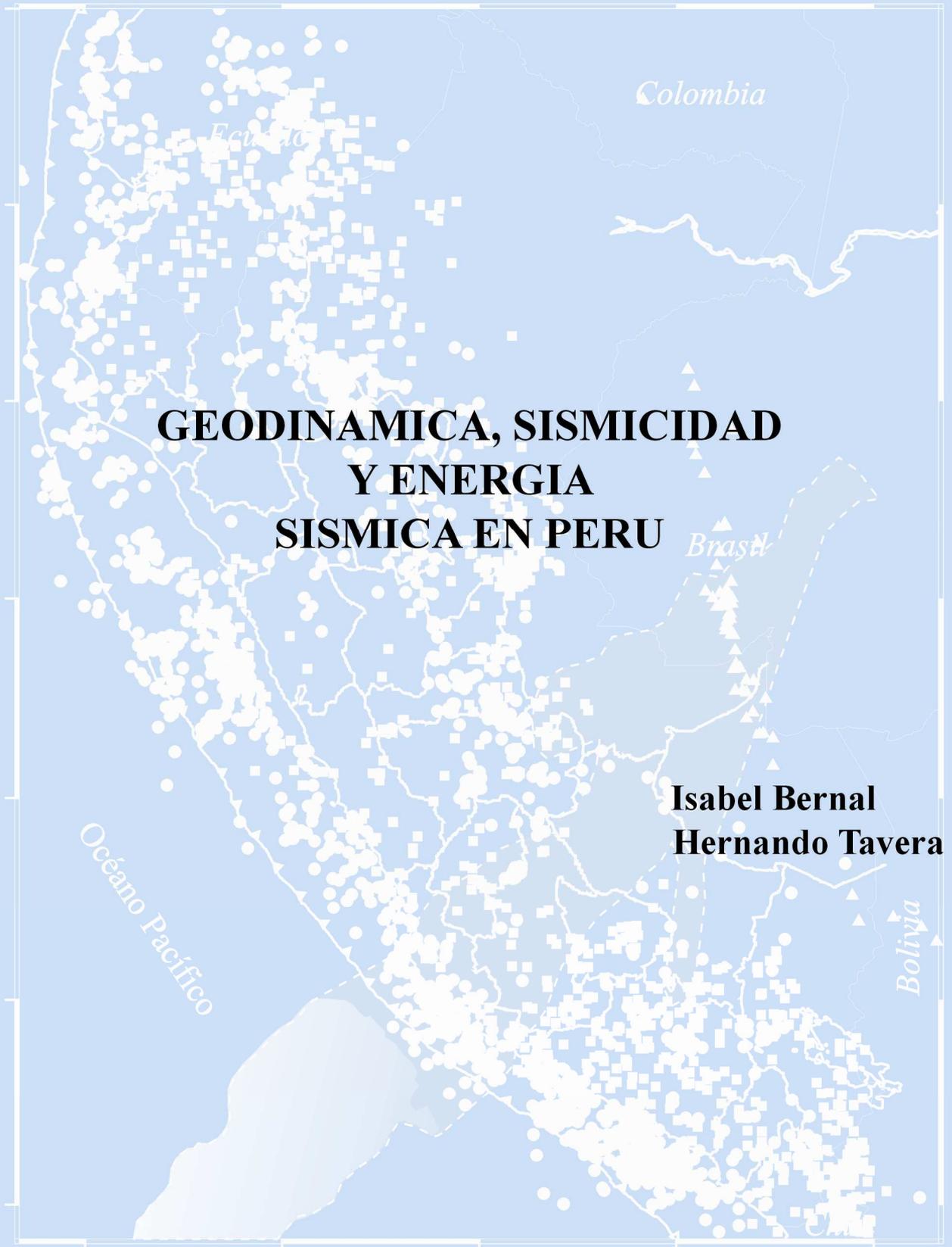




INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU
Centro Nacional de Datos Geofísicos

MONOGRAFIA



Lima-Perú
Diciembre, 2002

PRESENTACION

Los sismos representan la expresión más clara de que la superficie en la cual habitamos se encuentra en continua evolución. Por lo tanto, la ocurrencia continua de estos eventos, sin importar su tamaño, nos permitirá conocer cada vez más que regiones de la Tierra son más dinámicas con respecto a otras. Así, dentro de las zonas de convergencia de placas, la de mayor velocidad y por ende fuente frecuente de sismos la constituye la colisión entre la placa de Nazca y Sudamérica. Este proceso geodinámico ha dado origen a la deformación del borde Oeste de Sudamérica y cuya evidencia principal es la Cordillera Andina. Ambos procesos se han desarrollado con la ocurrencia continua de sismos a diferentes niveles de profundidad, de ahí que el Perú sea considerado como uno de los países de mayor potencial sísmico en el mundo.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, es evidente que existe una gran diversidad de temas que pueden llevarse a discusión a fin de comprender la geodinámica de Perú. Esta realidad conlleva a revisar un gran número de libros y artículos ya que no se cuenta con un solo texto que describa en conjunto cada uno de estos campos de investigación.

Para llenar este vacío, en la presente monografía se realiza una descripción de los diferentes procesos geodinámicos presentes en el borde Oeste de Perú, el análisis y discusión de la distribución espacial de la sismicidad considerando una base de datos sísmicos actualizada a fin de identificar a las zonas de mayor potencial sísmico y deformación superficial, además de proponer un esquema para la geometría de la placa de Nazca. Asimismo, se presenta mapas de la energía sísmica liberada por los sismos a diferentes niveles de profundidad y su relación con la frecuencia con la cual ocurren los sismos en el Perú.

Creemos que esta monografía es el complemento ideal para los estudiantes, profesores e investigadores que pretenden disponer de información rápida y precisa sobre las características geodinámicas, los patrones de sismicidad y la cuantificación en energía sísmica liberada por los sismos en Perú. Debemos señalar que para la comprensión del contenido de esta monografía no se requiere ser un especialista en ciencias de la Tierra ya que todos los temas son presentados en lo posible en un lenguaje simple. Con ello pretendemos despertar el interés de los lectores por el campo de la geología, tectónica y sismología, más aún si consideramos al Perú como uno de los más grandes laboratorios naturales en los cuales podemos desarrollar el conocimiento y explotar nuestra imaginación.

Los Autores

El Contenido de la Presente
Edición Puede ser Utilizado
con Fines Académicos Indicando
la Autoría Respectiva
CNDG-Sismología-IGP

INDICE

1.- INTRODUCCION

2.- GEODINAMICA

2.1.-Principales Rasgos Tectónicos

2.2.-Zonificación de la Cordillera Andina

2.3.-Principales Sistemas de Fallas

3.-ANALISIS Y EVALUACION DE LA ACTIVIDAD SISMICA

3.1.- Antecedentes

3.1.1.-Sismicidad Histórica

3.1.2.-Sismicidad Instrumental

3.1.3.-Deformación Continental

3.1.4.-Modelos para el Proceso de Subducción

3.2.- Distribución Espacial de los Sismos

3.2.1.-Sismos con Foco Superficial

3.2.2.-Sismos con Foco Intermedio

3.2.3.-Sismos con Foco Profundo

3.3.-Distribución en Profundidad de los Sismos

4.-GEOMETRIA DE LA PLACA DE NAZCA

4.1.- Esquema en 3D de la Geometría de la Placa de Nazca

5.-ANALISIS Y EVALUACION DE LA ENERGIA SISMICA

5.1.-Energía Sísmica

5.2.-Energía Sísmica Liberada en el Periodo Histórico

5.3.- Energía Sísmica Liberada en el Periodo Instrumental

5.3.1.-Curvas de Iso-energía Para Sismos con Foco Superficial

5.3.2.-Curvas de Iso-energía Para Sismos con Foco Intermedio

5.3.3.- Curvas de Iso-energía Para Sismos con Foco Profundo

6.-FRECUENCIA Y CUANTIFICACION DE LA ENERGIA SISMICA

7.-BIBLIOGRAFIA

1.-INTRODUCCION

Desde su origen, la Tierra se encuentra en constante evolución debido a que es afectada en su interior y exterior por diferentes procesos físicos y químicos. Estos procesos han sido puestos en evidencia mediante diversos estudios geofísicos y han permitido internamente dividir a la Tierra en tres capas concéntricas conocidas como Litosfera, Astenósfera y Mesosfera, y desde el punto de vista sismológico en Corteza, Manto y Núcleo. La capa externa y por ende la más dinámica es la Corteza, la misma que está conformada por una docena de placas rígidas de forma esférica cuyo espesor varía entre 10 km para la corteza oceánica hasta 70 km para la corteza continental. 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. La colisión entre placas oceánicas, continentales y continental–oceánica, permite la formación, en sus bordes, de cordilleras, volcanes y fallas geológicas.

La colisión de la placa de Nazca (corteza oceánica) con el borde Oeste de Sudamérica (corteza continental), ha dado origen a la evolución de la Cordillera de los Andes, a la ocurrencia de importante actividad volcánica y a la formación de un gran número de fallas geológicas. En general, la placa de Nazca se desplaza a una velocidad de 8-10 cm/año en dirección NE (DeMets et al 1990), siendo una de las placas de mayor velocidad en el mundo, la misma que permite que las placas de Nazca y Sudamericana soporten una importante deformación produciendo un gran número de sismos de diferentes magnitudes a diferentes niveles de profundidad. En general, los sismos ocurren principalmente en las zonas de interacción de placas, siendo en mayor número en las zonas de subducción. *El proceso de subducción es de importancia científica por la remarcable evidencia que ofrece sobre la naturaleza de los diferentes procesos que tienen lugar en el interior de la Tierra.*

La evolución geodinámica del borde Oeste de Sudamérica y por ende del Perú, se ha realizado con la continua liberación de energía en forma de sismos, de ahí que la sismicidad

puede ser dividida en histórica e instrumental. La primera considera básicamente a los sismos ocurridos entre los años 1500 y 1959 aproximadamente y la calidad de su información dependerá principalmente de las fuentes históricas consultadas y de la resolución de los primeros sismógrafos instalados en el mundo alrededor del año 1910. La sismicidad instrumental considera a los sismos ocurridos a partir del año 1960, fecha en que se inicia la instalación de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismological Standart Network), hasta el presente. Durante este periodo, se ha logrado detectar un mayor número de sismos debido al auge de la sismometría y de la informática

Considerando la estrecha relación existente entre la geodinámica al borde Oeste de Sudamérica y la ocurrencia de sismos en el Perú, en el presente trabajo se realiza una descripción de ambos procesos, además del análisis y evaluación detallada de las características de la distribución espacial y en profundidad de los sismos ocurridos en Perú entre 1960 y 2002. Asimismo, se realiza el análisis de la energía sísmica liberada por los sismos a partir de curvas de iso-energía, siendo esta información útil para identificar y delimitar las regiones con mayor potencial sísmico en el Perú.

2.- GEODINAMICA

La interacción de la placa de Nazca y la Sudamericana, es el principal proceso tectónico que define la geodinámica de Perú (Figura 1). Este proceso es conocido como subducción, el mismo que produjo el arrugamiento y levantamiento del margen continental durante un periodo orogénico muy complejo hasta formar una superficie topográfica muy accidentada y cuyo resultado final fue la formación de una cadena montañosa que se extiende, de Norte a Sur, a lo largo de todo el borde Oeste de Sudamérica, desde Venezuela hasta la Tierra del Fuego en Chile, siendo conocida como “*La Cordillera de los Andes*”. Esta cordillera fuertemente deformada, comprende un conjunto de diversas estructuras, tales como montañas, volcanes, anticlinales, sinclinales, mesetas y otras que se encuentran emplazados entre la línea de fosa peruano-chilena y el llano Amazónico.

El periodo orogénico durante el cual se produjo la formación de la Cordillera Andina pudo tener una duración de aproximadamente 10 millones de años en promedio; es decir, menor tiempo que el considerado para dar origen a las placas tectónicas y mayor que el necesario para la formación de los grandes sistemas de fallas, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.-*Duración estimada para la ocurrencia de los grandes fenómenos tectónicos que preceden a un sismo.*

DURACION	FENOMENOS
100 Ma	Tectónica de placas
1 – 10 Ma	Formación de la Cadena de Montañas en Frontera de Placas
1000 a – 1 Ma	Formación de Grandes Fallas
100 – 1000 a	Periodo de Recurrencia de Grandes Sismos
1 – 100 a	Deformación Geodésica Alrededor de Fallas
1 a – 1 día	Posibilidad de Fenómenos Precursores
1 – 100 seg.	Duración de la Ruptura Sísmica

Ma= Millones de años / a= Un año / seg= Segundo



Figura 1.-Esquema del proceso de convergencia de la placa de Nazca (oceánica) y la Sudamericana (continental). F1 y F2 indica la dirección de desplazamiento de las placas según DeMets et al (1990). Las líneas discontinuas indican la ubicación y orientación de la Fractura de Mendaña y Dorsal de Nazca.

La formación de la Cordillera Andina fue acompañada por una sucesión de periodos de subsidencias y levantamientos relacionados con regímenes tectónicos de extensión y compresión que produjeron consecuentemente el acortamiento y engrosamiento de la corteza. Según Megard (1978), Dalmayrac et al (1981) y Sebrier et al (1985), todo el proceso geodinámico que ha soportado el Perú se ha desarrollado en dos periodos claramente identificados por los diferentes acontecimientos geológicos que en ellos ocurrieron (Figura 2).

El primer periodo se desarrolla, durante el Paleozoico y se caracteriza por producirse en un régimen de deformación netamente extensional que fue perturbado por la ocurrencia de los siguientes sucesos (Figura 2a):

- Variaciones en la velocidad del movimiento de las placas. Se asume que durante este periodo, la velocidad de la placa de Nazca era menor que la continental. En la actualidad, la placa de Nazca se desplaza a una velocidad de 8-10cm/año.
- Variaciones en la dirección de expansión de la corteza oceánica. En la actualidad, la placa de Nazca se desplaza en dirección NE.
- Presencia de obstáculos en el proceso de subducción. En la actualidad, el obstáculo más importante es la Dorsal de Nazca.
- Cambios en la densidad de la placa oceánica según su edad. Variaciones puestas en evidencia por estudios de Paleomagnetismo.
- Aumento en la capacidad de la fricción entre las superficies de la placa de Nazca y Sudamericana.

El segundo periodo, de evolución de la Cordillera Andina se produjo durante el Triásico–Plioceno (Figura 2b, c, d) y se caracteriza por ser totalmente de régimen compresional con la consecuente formación y evolución de la Cordillera Andina hasta presentar los rasgos topográficos que restan hoy en día.

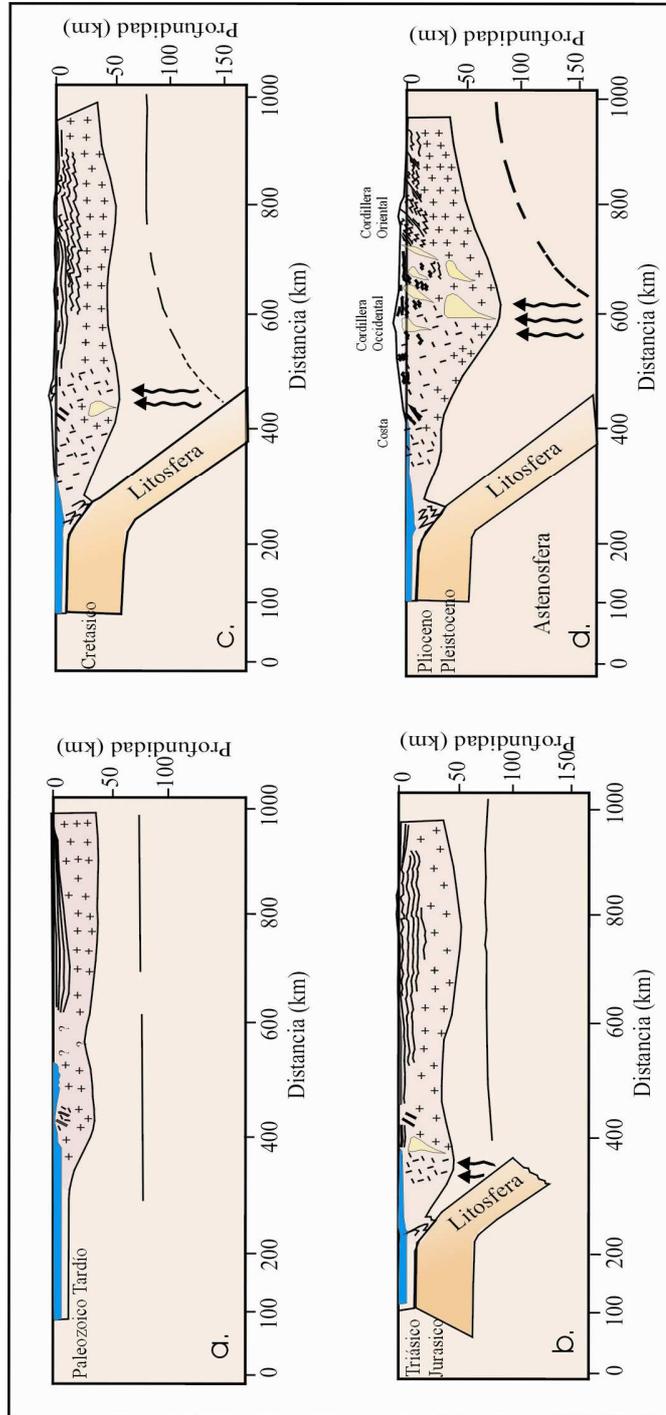


Figura 2.- Esquema del proceso de evolución de la Cordillera de los Andes según Megard (1978), Dalmayrac et al (1981) y Sebrier et al (1985). (a) Régimen extensional y (b, c y d) régimen compresional.

2.1.- Principales Rasgos Tectónicos

La subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana es acompañada con la presencia de diversos y grandes rasgos tectónicos localizados a ambos extremos del margen continental, los mismos, que deben su origen a los continuos movimientos de compresión y extensión que ambas placas soportan. En general, la evolución geodinámica de Perú esta controlada por los siguientes rasgos tectónicos: la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa Peruano-Chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes Sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente. La ubicación geográfica de estos rasgos tectónicos se muestra en la Figura 3.

La Dorsal de Nazca, es una cordillera oceánica que se localiza en el extremo NW de la región Sur de Perú frente al departamento de Ica. Esta cordillera sigue una orientación NE-SW perpendicular a la línea de la fosa peruano-chilena (entre 15° y 24° Sur), de tal modo que su extremo NE se ubica frente al departamento de Ica en donde presenta un ancho de aproximadamente 220 km sobre la cota de 2000 metros. Sin embargo; su ancho y altitud disminuye gradualmente hacia su extremo SW. Según la Figura 3, la cota de 2000 metros de esta dorsal, se localiza a 50 km de distancia aproximadamente de la línea de fosa; mientras que, las cotas menores ya subducieron bajo la placa continental (Sebrier et al, 1985). La Dorsal de Nazca presenta una forma asimétrica, siendo probablemente esta característica determinante para los diferentes procesos geodinámicos que se producen en esta región. Estudios recientes, sobre anomalías magnéticas, permiten considerar la hipótesis de que la Dorsal de Nazca debe su origen a una antigua zona de creación de corteza que ceso su actividad hace 5 a 10 millones de años aproximadamente (Udias y Mezcuca, 1997; Marocco, 1980; Sebrier et al, 1985).

La Fractura de Mendaña corresponde a una discontinuidad de la corteza oceánica que se localiza en el extremo NW de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash (10° - 12° de latitud Sur). En la actualidad, esta fractura tiene una orientación NE-SW; es decir, perpendicular a la línea de la fosa peruano-chilena y un ancho de 80 km aproximadamente sobre la cota de 1000 metros. Según la Figura 3, esta estructura se

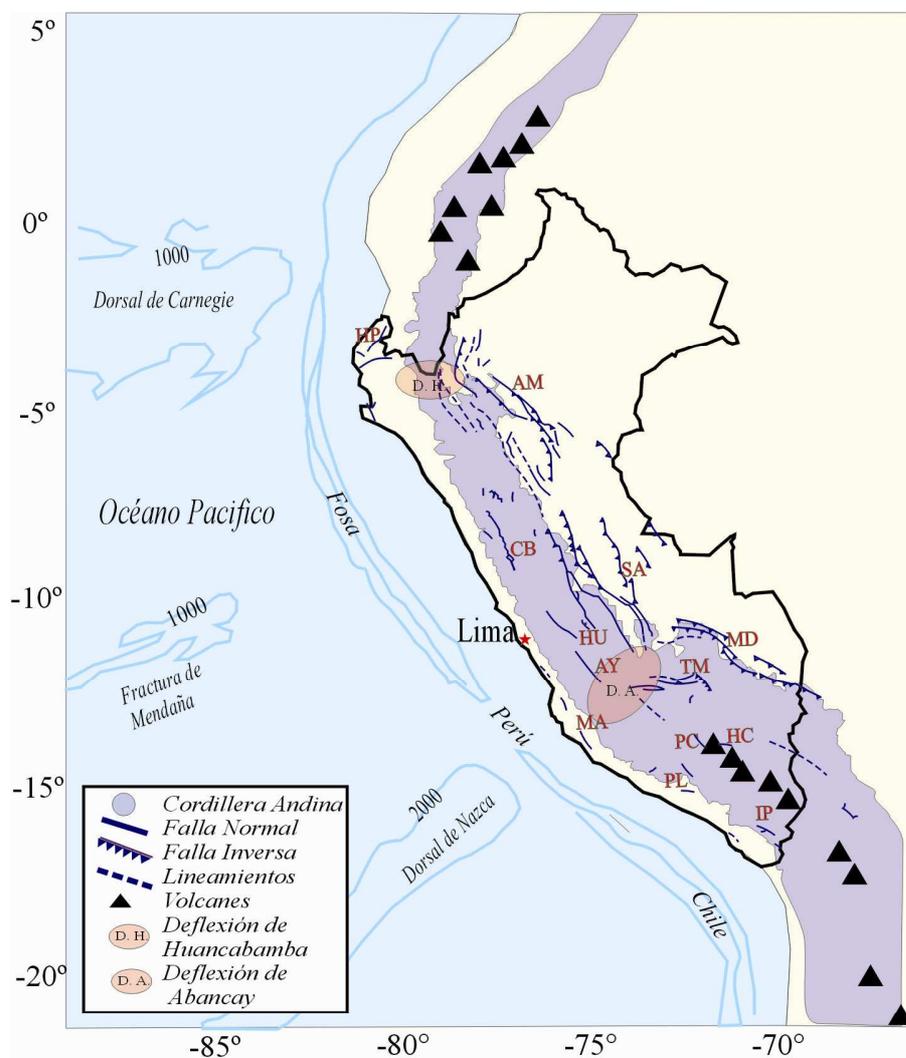


Figura 3.-Principales rasgos tectónicos superficiales en Perú y en el borde Oeste de Sudamérica. Los triángulos indican localización de los volcanes y las líneas de color celeste los principales sistemas de fallas activas en Perú (Sebrier et al, 1985). HP =Huaypira, AM=Alto Mayo, CB = Cordillera Blanca, SA = Satipo - Amauta, HU = Huaytapallana, AY=Ayacucho, MA=Marcona, MD=Madre de Dios, TM=Tambomachay, PL = Planchada, PC = Pampacolca, HC = Huambo y Cabanaconde y IP = Ichupampa.

localiza aproximadamente a una distancia de 180 km de la línea de fosa. En la actualidad, no se dispone de mayor información sobre las características físicas de esta fractura.

La Fosa Perú-Chile delimita el inicio de la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana. Litológicamente, la fosa está formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas pre-existentes. Según Heras (2002), frente a la costa de Perú la fosa peruano-chilena presenta profundidades máximas de hasta 6000 metros en la región Norte y Sur; mientras que, en la región Centro es del orden de 5000 metros. La fosa peruano-chilena presenta una contorsión NNW-SSE en la región Norte y Centro, y NW-SE en la región Sur de Perú. El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca.

La Cordillera Andina se distribuye paralela al borde Oeste de Sudamérica sobre una extensión de 7000 km, y con alturas máximas de 6000 metros sobre el nivel del mar. En Perú, de Norte a Sur, la Cordillera de los Andes se presenta bien definida; sin embargo, es notoria la presencia de dos inflexiones, a la altura de 5° Sur, denominada deflexión de Huancabamba y a los 14° Sur, denominada deflexión de Abancay (Figura 3, áreas de color rojo). Estas deflexiones cambian parcialmente la orientación de la cordillera en dirección NE-SW y Este-Oeste respectivamente. Transversalmente, la Cordillera Andina presenta diversas unidades morfoestructurales y anchos que oscilan entre 250 km en la región Norte y Centro de Perú hasta 500 km en la frontera entre Perú, Chile y Bolivia (Marocco, 1980; Tavera y Buforn, 1998).

La Cadena Volcánica se ubica en la región Sur de Perú por debajo de la deflexión de Abancay hasta los 25°S en Chile. Esta cadena se distribuye sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento con orientación NW-SE en Perú y N-S en el extremo Norte de Chile. Las características geométricas de cada uno de los volcanes que integran esta cadena, muestran que la actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimenta la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al, 1985). Los principales volcanes presentes en la región Sur de Perú son: Coropuna (6425msnm), Sabancaya (5795msnm), Misti (5825msnm), Ubinas (5672msnm),

Chachani (3745msnm), Huaynaputina (4800msnm), Tutupaca (5806msnm), Yucamane (5508msnm). Es importante remarcar que en las regiones Norte y Centro de Perú, la actividad volcánica disminuyó ó desapareció hace 8 millones de años (Marocco, 1980).

Los Sistema de Fallas presentes en el Perú, son el resultado del continuo proceso de deformación de la corteza continental. Estos sistemas están presentes en mayor número, de Norte a Sur, sobre la zona Subandina al pie del borde Oriental de la Cordillera Andina, afectando a los principales plegamientos del escudo Brasileño (sistemas de fallas de Moyobamba, Satipo, Madre de Dios, etc.). El número de estos sistemas de fallas es menor sobre la Alta Cordillera y en el Altiplano (sistema de fallas de la Cordillera Blanca, Huaytapallana y Tambomachay). En general, el mayor número de fallas son de tipo inverso que evidencian el acortamiento de la corteza.

2.2.- Zonificación de la Cordillera Andina

La Cordillera Andina, se extiende a lo largo del continente Sudamericano desde Venezuela hasta el Sur de Chile con orientaciones que varían desde NE-SW en Colombia y Ecuador, NW-SE en Perú y N-S en Chile (Figura 1 y 3). Tal como se analizó anteriormente, la topografía actual de la Cordillera Andina, es el resultado de varios procesos orogénicos ocurridos durante épocas geológicas pasadas, dando origen a la formación de pliegues, fallas, depresiones, elongaciones de los grandes intrusivos y alineamiento de conos volcánicos. Estudios de sismicidad muestran que la Cordillera Andina tiene espesores del orden de 51 km en la región Central y de 75 km en la región Sur (James, 1978; Marocco, 1980; Dalmayrac et al, 1981; Tavera, 1993 y Tavera y Buforn, 1998).

La cordillera Andina, desde el punto de vista geomorfológico, puede ser zonificada en una serie de siete unidades morfoestructurales que se distribuyen de Oeste a Este (Figura 4), paralelas a la línea de costa. En la Figura 4, se puede identificar la Cordillera de la Costa, la Zona Costanera (Z.C.), la Cordillera Occidental (C.OC.), el Altiplano, la Cordillera Oriental (C.OR.), la Zona Subandina y la Llanura Amazónica (Dalmayrac et al,

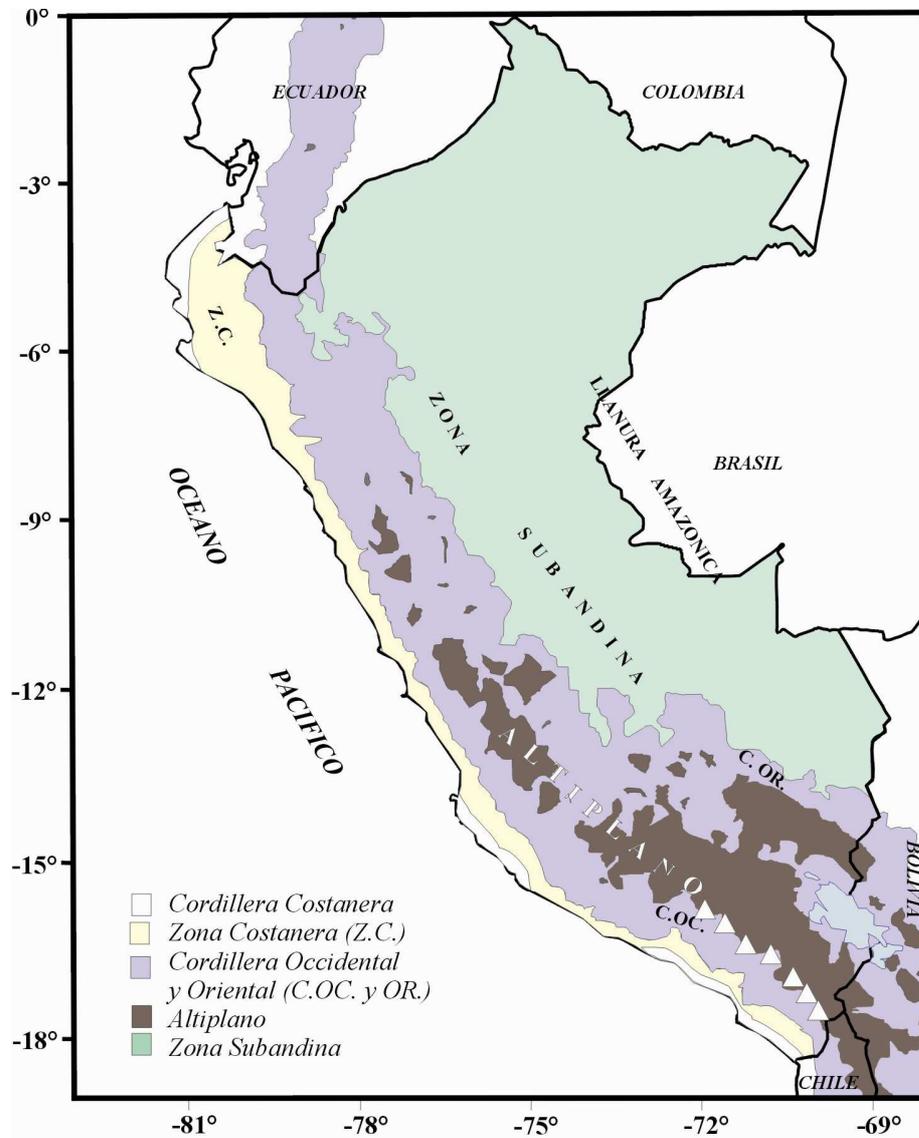


Figura 4.- Principales unidades geomorfológicas en Perú (Dalmayrac et al, 1981; Tavera y Buforn, 1998). La Zona Costanera y Zona Subandina presentan elevaciones menores a 1500 metros, la Cordillera Occidental y Oriental entre 1500-4000 metros y el Altiplano mayores a 4000 metros. Los triángulos en blanco indican la presencia de la cadena volcánica.

1981; Tavera y Buforn, 1998). A continuación se presenta una descripción de cada una de estas unidades.

La Cordillera Costanera tiene su origen durante las fases tectónicas del Pre-Cámbrico (aproximadamente hace 4500 años) habiendo sido plegada hasta alcanzar elevaciones máximas de 1200msnm y posteriormente erosionada parcialmente. Actualmente, esta unidad se presenta segmentada a lo largo y próximo al litoral siguiendo una dirección NW-SE. El segmento Sur de esta cordillera, esta formada por el macizo de Arequipa ubicado entre los 14° y 18° Sur como parte de la deflexión ubicada en el extremo SE del territorio peruano y el segmento Norte entre 2° y 7° Sur, el mismo que forma parte de la deflexión ubicada al Nor-Oeste del territorio peruano y que se proyecta sobre el territorio ecuatoriano. Entre las latitudes de 6° a 14° Sur, esta unidad desaparece debido posiblemente a la subsidencia de una parte del margen continental por efectos tectónicos (INGEMET, 1995).

La Zona Costanera presenta elevaciones entre 50 y 1500 metros sobre el nivel del mar. Esta unidad presenta un ancho máximo de 100 km en la región Norte y de 40 km en la región Sur de Perú. La Zona Costanera está constituida por materiales volcánicos y rocas sedimentarias con la presencia de plegamientos suaves en la región Norte-Centro y basamentos fuertemente plegados en la región Sur.

La Cordillera Occidental con una elevación máxima de 5000msnm, se caracteriza por constituir el batolito plutónico andino de mayor volumen. En general, esta cordillera se orienta en dirección NW a SE; sin embargo, algunas estructuras regionales tienden a cambiar su orientación hacia el Oeste en las proximidades de la deflexión de Abancay (entre 13° y 14° Sur) y en el extremo NE cerca de la deflexión de Huancabamba (~5.0° Sur). Esta unidad esta compuesta principalmente por rocas volcánicas y plutónicas medianamente deformadas, además de la presencia de fuertes plegamientos, fallas normales, inversas y grandes sobrecorrimientos. En la región Sur, esta unidad se caracteriza por presentar una alineación de conos volcánicos sobre una longitud de aproximadamente 300 km en dirección NW-SE.

El Altiplano presenta elevaciones medias del orden de 3000msnm y anchos que varían entre 10 a 50 km en la región Central y de 140 a 200 km en la región Sur. Esta unidad se extiende desde la latitud de 9° Sur (Ancash) hasta cubrir todo el Altiplano peruano-boliviano siguiendo una orientación NW a SE. El Altiplano, esta formado por una serie de depresiones (cuencas intra-montañosas) y elevaciones (altas mesetas) que se prolongan hacia el altiplano boliviano. En la región Sur, se puede identificar la cuenca del lago Titicaca y las depresiones intra-montañosas a lo largo de los valles longitudinales interandinos.

La Cordillera Oriental en promedio presenta elevaciones medias de 3700 a 4000msnm y anchos que varían entre 70 a 100 km aproximadamente. En general, esta cordillera se extiende de Norte a Sur siguiendo una orientación NW-SE; sin embargo, soporta un fuerte arqueamiento en dirección Este-Oeste a la altura de la latitud de 14° Sur conocida como deflexión de Abancay. En la región Norte, la Cordillera Oriental aparentemente desaparece debido a la deflexión de Huancabamba (~5° Sur). Esta cordillera corresponde principalmente a un extenso anticlinal formado esencialmente por depósitos intrusivos y cuyo levantamiento fue controlado por fallas regionales longitudinales distribuidas a lo largo de su límite con la zona Subandina.

La Zona Subandina presenta una anchura variable debido a que en ella se amortiguan las estructuras andinas formando una gruesa serie continental de terrenos sedimentarios fuertemente plegados como producto de la subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Andina. Este proceso permite observar una topografía accidentada con la presencia de numerosos sistemas de fallas inversas, sobrecorrimientos y plegamientos de estratos con trazas de falla y ejes de plegamiento orientados en dirección NW-SE.

La Llanura Amazónica se extiende desde la zona Subandina sobre todo el escudo brasileño y desde el punto de vista geomorfológico, esta unidad representa una amplia zona llana formada por una importante secuencia de sedimentos.

Geodinámicamente, las unidades descritas anteriormente son el resultado de una tectónica compresional que se concentra en ambos lados de la Cordillera Andina y una extensional en la parte elevada de la misma. Esta tectónica activa permite considerar al territorio peruano como una de las regiones más activas en el mundo con la consecuente ocurrencia frecuente de sismos, erupciones volcánicas y la formación de fallas geológicas (Megard y Philip, 1976; Megard, 1978; Marocco, 1980; Dalmayrac et al, 1980; Dalmayrac y Molnar, 1981; Sebrier et al, 1988; Lindo, 1993; Tavera y Buforn, 1998 y Bernal, 2002).

2.3.- Principales Sistemas de Fallas

El proceso de deformación de la corteza continental, como consecuencia del levantamiento de la Cordillera Andina, ha dado origen a la formación de diferentes sistemas de fallas distribuidas sobre todo el territorio peruano. En general, estos sistemas son de tipo inverso sobre la zona Subandina, al pie de los principales plegamientos formados por la subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Oriental (fallas de Moyobamba, Satipo, Madre de Dios). Mientras que, en la Alta Cordillera y en el Altiplano, el número de estos sistemas es menor y se encuentran ubicados principalmente al pie de algunos nevados importantes, y deben su origen a procesos extensivos (fallas de la Cordillera Blanca y Tambomachay) y compresivos (sistema de fallas del Huaytapallana). A continuación, se describirá las características más importantes de los principales sistemas de fallas, según su ubicación en cada una de las unidades morfoestructurales descritas anteriormente (Figura 3).

En la Zona Costanera, al Norte de 5° Sur, se ubica la falla de Huaypira (HP) con una orientación NE-SW y E-W; entre 14° y 16° Sur, se observa la presencia de la falla de Marcona (MA) con orientación NW-SE y a la altura de 16.5° Sur, destaca la falla de La Planchada (PL) con orientación NW-SE. Estas fallas presentan longitudes del orden de 90 km en promedio y son de tipo normal.

En la Cordillera Occidental es importante la presencia de la falla de la Cordillera Blanca (CB), siendo esta de tipo normal con buzamiento al SW y de las de mayor extensión en el mundo (200 km). El ramal Norte de esta falla, recibe el nombre de falla de Quiches. A la altura de la latitud de 16° Sur aparece la falla de Pampacolca (PC) con una longitud de 30 km, siendo esta de tipo normal con el buzamiento de su plano principal en dirección SW. La falla de Ichupampa (IP) se ubica entre 17° y 18.5° Sur sobre una longitud de 220 km aproximadamente. Esta falla es de tipo normal con buzamiento hacia el SW y conforme se extiende hacia Chile buza hacia el Oeste. En la Alta Cordillera, sobre la latitud de 12.5°S, sobresale el sistema de fallas del tipo inverso del Huaytapallana (HU) con una longitud de 25 km en dirección NW-SE y con buzamiento hacia el NE. A la latitud de 13.5°S, sobresale el sistema de fallas de Ayacucho (AY).

En el Altiplano y en la Cordillera Oriental, entre 13°-14.5°S, se ubica el sistema de fallas de Tambomachay (TM), el mismo que prácticamente cruza el extremo sur del departamento de Cuzco. Este sistema considera además, a un importante número de fallas de tipo normal que se distribuyen siguiendo diversas direcciones, siendo las de mayor longitud las fallas de Viscachani, Alto Vilcanota, Pomacanchi y Langui-Layo, todas con una orientación en dirección Este-Oeste.

En la zona Subandina destacan los sistemas de fallas inversas del Alto Mayo (AM) ubicadas entre las latitudes de 4° a 8° Sur, el sistema de fallas de Satipo–Amauta (SA) entre 9° y 12° Sur y el sistema de fallas de Madre de Dios (MD) entre 12° y 14° Sur. Todos estos sistemas, presentan fallas de diferentes longitudes (entre 300 a 500 km) y en general, se orientan paralelas a la Cordillera Andina con buzamiento hacia el SW.

Todos los sistemas de fallas, descritos anteriormente, se han originado o soportado en el pasado importantes reactivaciones debido a la ocurrencia de sismos de magnitud elevada, los mismos que en algunos casos, han puesto en evidencia sobre la superficie escarpas de falla con desniveles, sobre el nivel del suelo, del orden de 2 y 4 metros (Falla de Huaytapallana y Quiches). Por ejemplo, en la Zona Subandina los sismos de 1990 y 1991 reactivaron el sistema de fallas del Alto Mayo; en la Cordillera Oriental, la falla de

Tambomachay fue reactivada con el sismo de 1986; en la Cordillera Occidental, la falla de Quichés se originó con el sismo de 1946 y la falla de Huaytapallana, con dos sismos ocurridos en 1969, en la Alta Cordillera, la falla de Ayacucho fue reactivada con los sismos ocurridos en 1981 y 1999.

3.- ANALISIS Y EVALUACION DE LA ACTIVIDAD SISMICA

3.1.- Antecedentes

A nivel mundial, el Perú es uno de los países de mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico. Dentro de este contexto, la actividad sísmica esta asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana y tiene su origen, en la fricción de ambas placas produciendo los sismos de mayor magnitud con relativa frecuencia y en la deformación interna de ambas placas, siendo los sismos más destructores los que se producen a niveles superficiales. Para analizar las características de los sismos ocurridos en Perú, es necesario considerar la existencia de una base de datos que corresponde al periodo de sismicidad histórica (1500-1959) y otro al periodo instrumental que considera los sismos ocurridos desde el año 1960 a la fecha.

3.1.1.- Sismicidad Histórica

La información sobre la sismicidad histórica de Perú data del tiempo de la conquista y colonización hasta aproximadamente el año 1959, y en su mayoría se encuentra esparcida en diferentes obras inéditas, manuscritos, crónicas, narraciones, informes administrativos por parte de los clérigos y gobernantes de aquellos años. Gran parte de esta información ha sido recolectada y publicada por Polo (1904), Barriga (1939), Silgado (1978) y Dorbath et al (1990). La recopilación realizada por Silgado (1978) es la más completa para sismos importantes ocurridos en Perú entre 1513 y 1974, y en ella, el autor describe en detalle las principales características de los sismos (valores de intensidad local y regional), siendo muchos de ellos estudiados por el mismo autor. Asimismo, el autor estima la magnitud para un gran número de sismos a partir del área de intensidad máxima a fin de poder compararlos con otros sismos. Sobre sismicidad histórica, el trabajo más reciente es el realizado por Dorbath et al (1990), los mismos que consideran una revisión detallada de toda la información existente sobre sismos históricos a fin de correlacionar las áreas de intensidad máxima con sus respectivas longitudes de ruptura para estimar la magnitud de

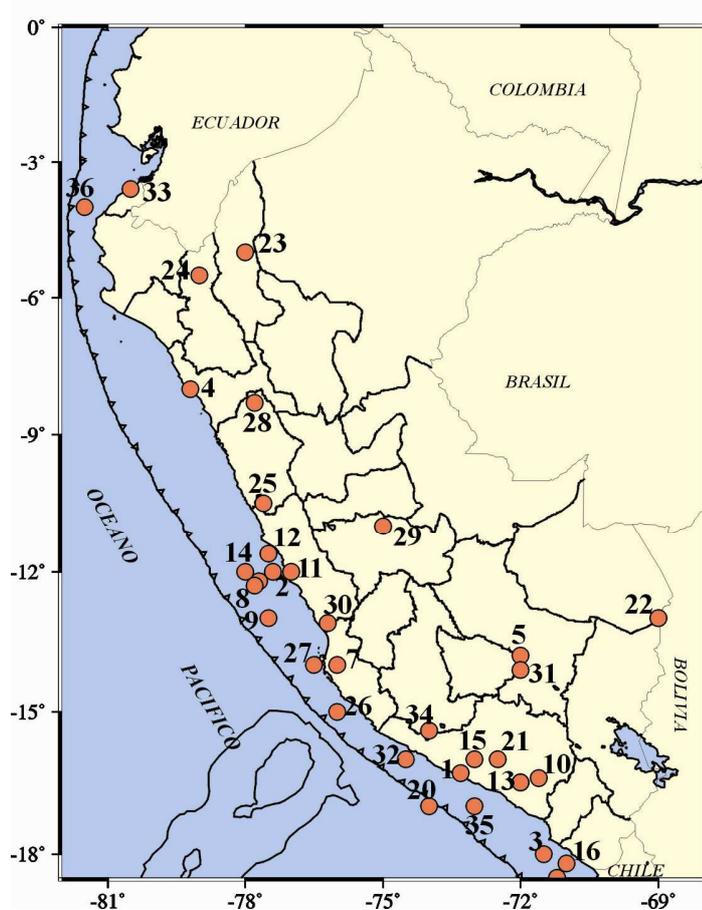
un gran número de sismos. Asimismo, los autores sugieren que los grandes sismos en Perú tienen un periodo de recurrencia del orden de una centuria (100 años). En general, Silgado (1978) y Dorbath et al (1990) indican que el sismo más antiguo para el cual se dispone de información confiable, data del año 1513.

Es importante remarcar que la calidad de la información disponible para, evaluar la sismicidad histórica, dependerá de la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas por los sismos; por lo tanto, existe la posibilidad de que hayan ocurrido sismos importantes en áreas no pobladas o próximas a localidades con las cuales era difícil establecer comunicación. De ahí, la ausencia de información sobre sismos que pudieran haber ocurrido en la Alta Cordillera y Zona Subandina. Por otro lado, la profundidad focal del total de los sismos históricos no ha sido determinada con precisión; sin embargo, debido a su ubicación geográfica (entre la fosa y la línea de costa) y daños observados en superficie, estos pueden ser considerados en su mayoría como superficiales.

En la Figura 5, se muestra la localización y los parámetros hipocentrales de los sismos históricos ocurridos en Perú entre 1500 y 1959 ($M_s \geq 6.0$), los mismos que han generado intensidades mayores a VII en la escala Mercalli Modificada (Silgado, 1978; Dorbath et al 1990). En esta figura se observa que los sismos históricos se distribuyen principalmente entre la línea de fosa y la costa, localizándose en mayor número en la región Centro y Sur de Perú debido probablemente a que estas regiones eran las más pobladas y donde se constituyeron las ciudades más importantes después del siglo XVI. La mayoría de estos sismos produjeron tsunamis con olas de diferentes alturas. Según la Figura 5, en el interior del continente, el número de sismos disminuye considerablemente.

Entre los sismos más importantes ocurridos durante el periodo histórico se puede mencionar en la región Norte a los de 1619 y 1953 (VIII MM), ambos produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Trujillo y Tumbes. En la región Central, sobresalen los sismos ocurridos en 1586 (IX MM), primer gran sismo para el cual se tiene documentación histórica; 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) que destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima. El sismo de 1746 generó un tsunami con olas de 15-20 metros de altura que

N°	Fecha (a/m/d)	Lat. (°)	Long. (°)	Mag (Ms)	Energía (ergios)	N°	Fecha (a/m/d)	Lat. (°)	Long. (°)	Mag (Ms)	Energía (ergios)
1	1582/01/22	-16.3	-73.3	7.9	4.5E+23	19	1913/07/28	-17.0	-73.0	7.0	2.0E+22
2	1586/07/09	-12.2	-77.7	8.1	8.9E+23	20	1913/08/06	-17.0	-74.0	7.7	2.2E+23
3	1604/11/24	-18.0	-71.5	8.4	2.5E+24	21	1922/10/11	-16.0	-72.5	7.4	7.9E+22
4	1619/02/14	-08.0	-79.2	7.8	3.2E+23	22	1928/04/09	-13.0	-69.0	6.4	2.5E+21
5	1650/05/31	-13.8	-72.0	7.2	4.0E+22	23	1928/05/14	-05.0	-78.0	7.3	5.6E+22
6	1655/11/13	-12.0	-77.4	7.4	7.9E+22	24	1928/07/18	-05.5	-79.0	7.0	2.0E+22
7	1664/05/12	-14.0	-76.0	7.8	3.2E+23	25	1940/05/24	-10.5	-77.6	8.2	1.3E+24
8	1678/06/16	-12.3	-77.8	7.0	2.0E+22	26	1942/08/24	-15.0	-76.0	8.4	2.5E+24
9	1687/09/20	-13.0	-77.5	8.2	1.3E+24	27	1946/09/30	-14.0	-76.5	7.0	2.0E+22
10	1687/10/21	-16.4	-71.6	7.0	2.0E+22	28	1946/11/10	-08.3	-77.8	7.2	4.0E+22
11	1725/01/22	-12.0	-77.0	7.0	2.0E+22	29	1947/11/01	-11.0	-75.0	7.5	1.1E+23
12	1746/09/28	-11.6	-77.5	8.4	2.5E+24	30	1948/05/28	-13.1	-76.2	6.7	7.1E+21
13	1784/05/13	-16.5	-72.0	8.0	6.3E+23	31	1950/05/21	-14.1	-72.0	6.0	6.3E+20
14	1806/12/07	-12.0	-78.0	7.5	1.1E+23	32	1951/03/04	-16.0	-74.5	6.7	7.1E+21
15	1821/07/10	-16.0	-73.0	7.9	4.5E+23	33	1953/12/12	-03.6	-80.5	7.7	2.2E+23
16	1833/09/18	-18.2	-71.0	7.0	2.0E+22	34	1955/07/21	-15.4	-74.0	6.7	7.1E+21
17	1868/08/13	-18.5	-71.2	8.6	5.0E+24	35	1958/01/15	-16.5	-72.0	7.3	5.6E+22
18	1877/05/09	-19.5	-71.0	7.5	1.1E+23	36	1959/02/07	-04.0	-81.5	7.2	4.0E+22



a.
b.

Figura 5.-Sismicidad histórica de Perú entre 1500 - 1959 $M_s \geq 6.0$ (Silgado, 1978).
a) Parámetros epicentrales, magnitud y energía sísmica.
b) Distribución epicentral de los sismos históricos. Los números identifican a cada sismo.

inundando totalmente al puerto del Callao. En la región Sur, ocurrieron sismos importantes en 1604 (IX MM), 1784 (X MM) y 1868 (X MM) que destruyeron principalmente a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Puno y Norte de Chile. El terremoto de 1868 habría producido una longitud de ruptura del orden de 500 Km y un tsunami con olas de 12 a 16 metros de altura. En el interior del continente, ocurrieron sismos importantes en 1650 (VII MM), 1946 (IX MM) y 1947 (VIII MM) que produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Cuzco, Huaraz y Satipo respectivamente. Para este periodo de tiempo (1500-1959), no existe información sobre sismos ocurridos en toda la Zona Subandina de Perú.

3.1.2.- Sismicidad Instrumental

El registro de la sismicidad instrumental data de 1960, fecha en que se inicia la instalación de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismological Standard Network). Esta base de datos ha permitido realizar los primeros análisis y evaluaciones de la sismicidad que ocurre en Perú a fin de identificar las principales fuentes sismogénicas. Así, los estudios realizados por diversos autores (Barazangi y Isacks, 1979; Cahill y Isacks, 1992; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Tavera y Buforn, 1998; Bernal, 2002), utilizando datos telesísmicos, regionales y locales para diferentes periodos de tiempo, han permitido configurar la geometría de la placa de Nazca e identificar las zonas de mayor deformación cortical en el interior del continente.

En general, los estudios realizados utilizando información telesísmica (catálogo del NEIC) no son precisos debido a que los parámetros hipocentrales de los sismos presentan un rango mayor de error. Se debe tener en cuenta que los errores dependen directamente del número y de la cobertura azimutal de las estaciones utilizadas en el cálculo de los parámetros del sismo, así como de la relación distancia/profundidad. Es evidente que los mínimos márgenes de error en el cálculo de los parámetros hipocentrales, serán obtenidos solo si los sismos presentan magnitudes altas, siendo este el mayor impedimento para utilizar una base de datos con mayor información. Contrariamente, los estudios realizados con datos obtenidos de redes sísmicas locales y con mayor o menor número de estaciones,

permiten realizar estudios detallados pero para áreas muy pequeñas, y en este caso debe tenerse en cuenta que los patrones de deformación producida por sismos pequeños pueden no obedecer al patrón regional. En estas condiciones es recomendable considerar redes sísmicas regionales compuestas por un número tal de estaciones que permitan, en términos generales, realizar un control y muestreo sísmico homogéneo para toda el área de interés. Asimismo, es frecuente establecer las pautas necesarias para poder distinguir claramente las ventajas y desventajas de los estudios que se realizan utilizando datos telesísmicos, regionales ó locales.

Estudios recientes realizados por Tavera y Buforn (2001), Bernal et al (2001) y Bernal (2002), utilizando datos telesísmicos para el periodo 1964-1996 con $m_b \geq 5.0$, han permitido concluir que la distribución espacial de los sismos en el Perú es por demás compleja; sin embargo, ha sido posible identificar la ubicación de las principales fuentes sismogénicas. Así, los sismos con foco superficial ($h \leq 60$ km) han sido agrupados en dos fuentes. La primera se ubica entre la fosa y la línea de costa y la segunda, en el interior del continente paralela a la Cordillera Andina, siendo ambas las causantes de los sismos de mayor magnitud que ocurren en Perú. Los sismos con foco intermedio ($60 > h \leq 300$ km) se agrupan en tres fuentes, una 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 agrupa a un mayor número de sismos. Los sismos con foco profundo ($h > 300$ km) se agrupan en dos fuentes, una se ubica en el límite de Perú con Brasil y la segunda entre Perú y Bolivia.

Asimismo, la distribución de los sismos en profundidad sugieren que la placa de Nazca subduce por debajo del borde Oeste de Sudamérica de dos modos diferentes conocidos como subducción subhorizontal y normal, tal como se muestra en el esquema de la Figura 6. La subducción “subhorizontal” está presente en las regiones Norte–Centro y se caracteriza por que se inicia con un ángulo del orden de 25° - 30° hasta alcanzar una profundidad de 120 km en promedio a partir de la cual, la placa se desplazaría de manera horizontal hasta distancias de 750 km en la región Norte y 500 km en la región Centro, ambas desde la línea de fosa. La subducción “normal” esta presente en la región Sur y aquí,

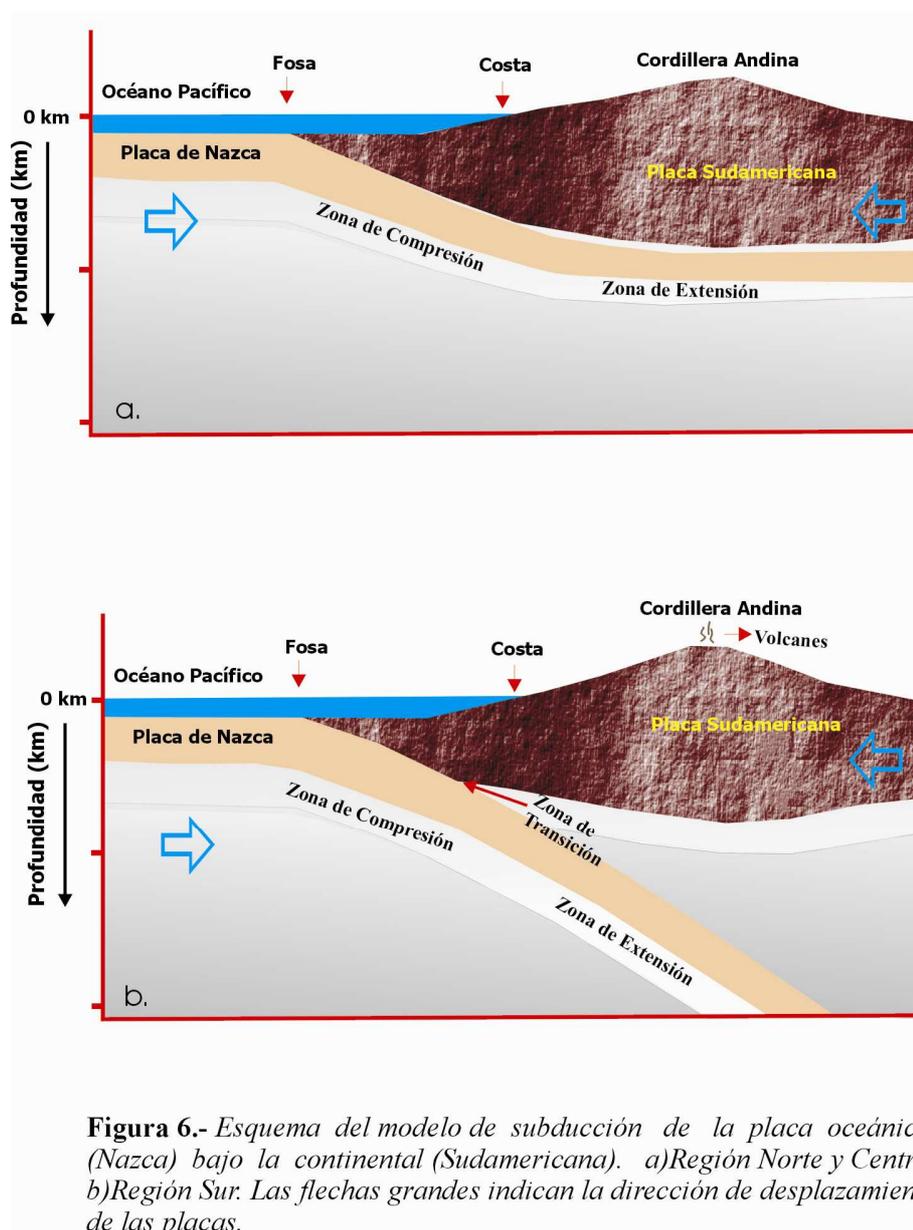


Figura 6.- Esquema del modelo de subducción de la placa oceánica (Nazca) bajo la continental (Sudamericana). a) Región Norte y Centro, b) Región Sur. Las flechas grandes indican la dirección de desplazamiento de las placas.

la placa de Nazca subduce 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.

3.1.3.- Deformación Continental

La ocurrencia frecuente de sismos de diversa magnitud en el interior del continente pone de manifiesto el importante nivel de deformación superficial que en él se produce. Actualmente, la sismicidad se concentra sobre trazas de falla reconocidas como sísmicamente activas y que en su momento, produjeron sismos de magnitud elevada, los mismos que al ocurrir próximos a la superficie, generan un alto grado de destrucción en las ciudades y localidades circundantes. Son importantes los sismos que se produjeron en 1946 debido a la reactivación de la falla de Quiches (Ancash), el de 1969 a la falla de Huaytapallana (Huancayo) y el de 1986 a la falla de Tambomachay (Cusco), todos sobre la Cordillera Andina. En la Zona Subandina, se debe mencionar al sismo ocurrido en 1947 debido a la reactivación de la falla de Satipo (Junín) y los de 1990 y 1991 que reactivaron al sistema de fallas de Moyobamba y Rioja (San Martín). La magnitud de estos últimos sismos fue del orden de 6.5 mb y ambos presentaron procesos complejos de ruptura (Tavera y Buforn, 2001).

Los periodos de recurrencia de los sismos de magnitud elevada en el interior del continente, aparentemente son muy grandes. Así, para los últimos 500 años, no se cuenta con información confiable que asegure la ocurrencia histórica de sismos en las zonas continentales reconocidas hoy en día como fuentes sismogénicas. Esto sugiere que el proceso de deformación continental es lento y poco uniforme, aunque los sismos grandes han mostrado en superficie rasgos tectónicos que indican el tipo de deformación producida. Las zonas de mayor deformación superficial han sido identificadas y descritas por diversos autores desde el punto de vista sismológico (Stauder, 1975; Suarez et al, 1983; Deverchere, 1989; Dorbath et al, 1991; Lindo, 1993; Suarez et al, 1990; Tavera et al, 2000) y tectónico (Sebrier et al, 1985; Bonnot et al, 1988). Recientemente, Tavera y Buforn (1998) analizando la distribución de los ejes de presión (P) y tensión (T) obtenidos a partir de

mecanismos focales para sismos con $m_b \geq 5.8$, muestran que el índice de deformación superficial se realiza perpendicular a la Cordillera Andina, siendo este mayor en la zona Subandina de la región Norte y menor en la región Centro y Sur, tal como se muestra en la Figura 7. Asimismo, en esta figura se observa que la deformación es menor sobre la alta cordillera, pero la ocurrencia continua de sismos sugiere que la deformación está presente sobre los sistemas de fallas de la Cordillera Blanca, Huaytapallana y Tambomachay.

Estudios de tectónica y microtectónica realizados por Sebrier et al (1988), han permitido, con la ayuda de fotos satélite, identificar la existencia de trazas de fallas que aparentemente no se han reactivado durante el Cuaternario en razón de que no produjeron sismos de magnitud importante. Estas posibles fallas, son comúnmente identificadas como lineamientos a pesar que frecuentemente generan microsismicidad.

Los resultados obtenidos a partir de la sismología y la tectónica muestran en conjunto la existencia, en el interior del continente, de un importante índice de deformación superficial asociado a un número importante de sistemas de fallas de diferentes tipos las cuales pueden ser sísmicamente activas o no. En general, la deformación continental está presente en diferentes zonas, aunque esta se realice en una escala de tiempo demasiado grande como para ser evaluada de manera continua.

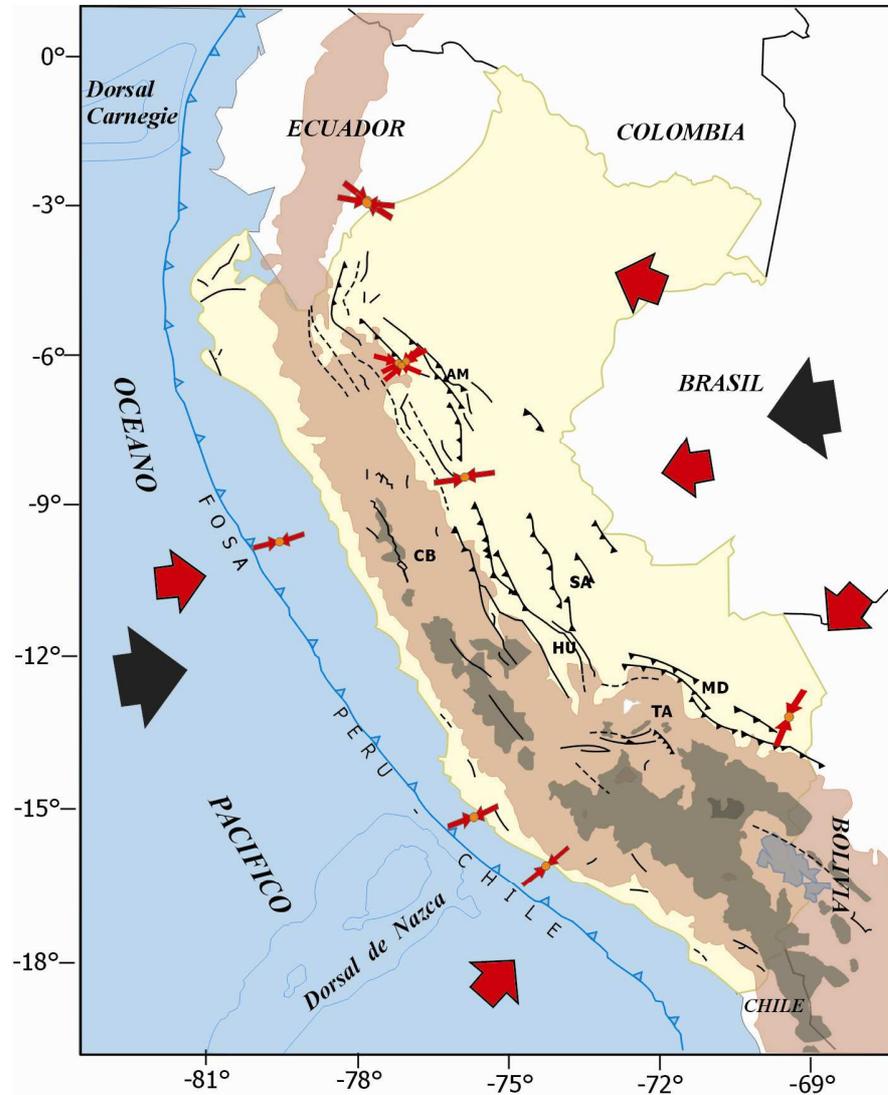
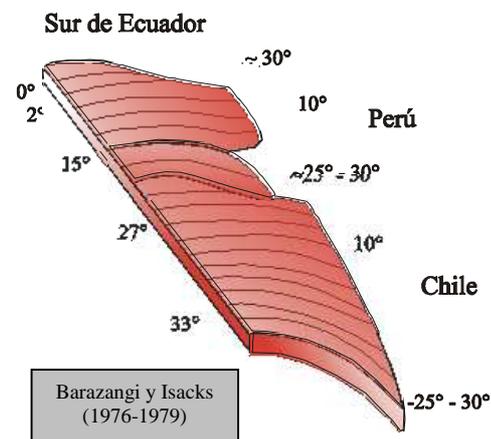


Figura 7.- Esquema sismotectónico en superficie para el Perú obtenido a partir de la distribución de los esfuerzos regionales por Tavera y Buforn (1998). Las flechas pequeñas corresponden a la proyección de los ejes de presión obtenidos a partir de mecanismos focales, las flechas grandes la dirección del esfuerzo regional y las flechas en negro, la dirección de la convergencia de placas.

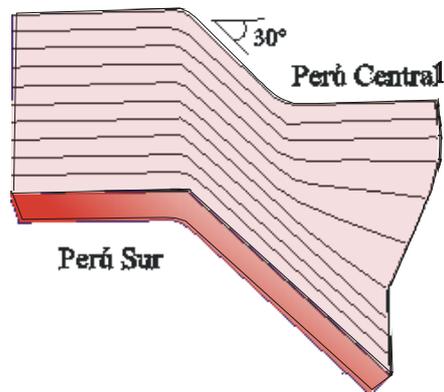
3.1.4.- Modelos para el Proceso de Subducción

En general, los estudios realizados para conocer el modelo ó la geometría del proceso de subducción utilizando datos telesísmicos, regionales y locales son diversos, pero en conjunto han permitido tener una idea general sobre la forma como se realiza este proceso en el borde Oeste de Perú. Los resultados más relevantes obtenidos por diferentes autores se detallan a continuación.

Barazangi y Isacks (1976 - 1979). Estos autores, utilizando datos telesísmicos, postularon que el proceso de subducción en el Perú se realiza de manera heterogénea. En la región Norte-Centro se inicia con un ángulo de 10° hasta una profundidad de 100 km aproximadamente, a partir de la cual, se realizaría de manera casi horizontal. En la región Sur, el ángulo de subducción sería del orden de 30° continuo hasta alcanzar una profundidad de 300 km. Asimismo, estos autores postulan, la existencia de una ruptura en la litósfera subducente que separaría a estas dos regiones, tal como se muestra en el esquema.

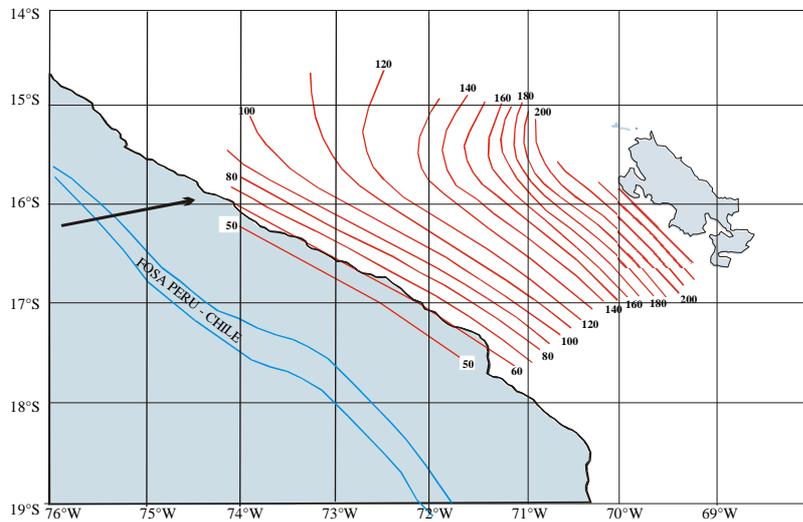


Hasegawa y Sacks (1981). Estos autores utilizaron datos registrados por una red sísmica local instalada en la región Sur de Perú. Según sus resultados, sugieren que en esta región el proceso de subducción se produce con un ángulo de inclinación de aproximadamente 30° hasta una profundidad del orden de 300 km. Hacia la región Central, la subducción conserva el mismo ángulo pero esta se hace horizontal a una profundidad de 100 km. Estos autores concluyen que la forma de la placa subducente es continua y que el cambio en el modo de subducción, entre la región Norte, Centro y Sur se produce con una contorsión de la placa.



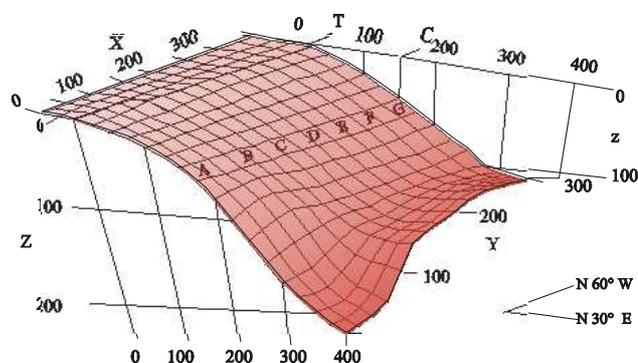
Hasegawa y Sacks,
1981

Grange (1984). Este autor, utilizando datos de una red sísmica local instalada en la región Sur de Perú, propone que el proceso de subducción en esta región se realiza con un ángulo de 30° constante hasta una profundidad de 250 km, para luego disminuir hacia la región Central hasta alcanzar una profundidad del orden de 100 km. Entre ambos modos de subducción, el autor indica que la placa se contorsiona.



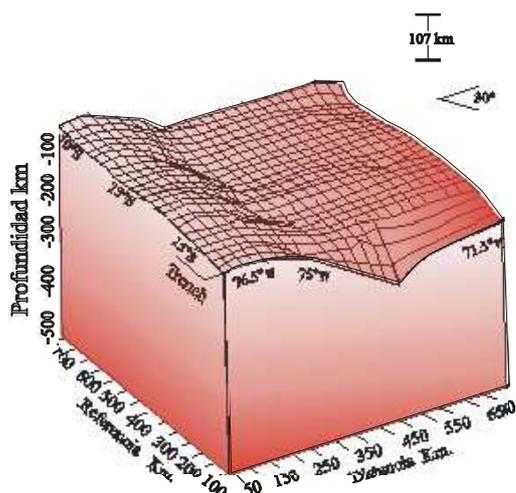
Grange, 1984

Schneider y Sacks (1987). Estos autores examinan el modo de la subducción en la región Sur de Perú a partir de sismos registrados por una red local instalada en dicha región. Los autores indican que la subducción se realiza con un ángulo de 25° hasta alcanzar los sismos profundidades de orden de 250 km; mientras que, en la región Central los sismos llegan a profundidades de 100 km a partir de la cual, estos se distribuirían de manera casi horizontal.



Schneider y Sacks, 1987

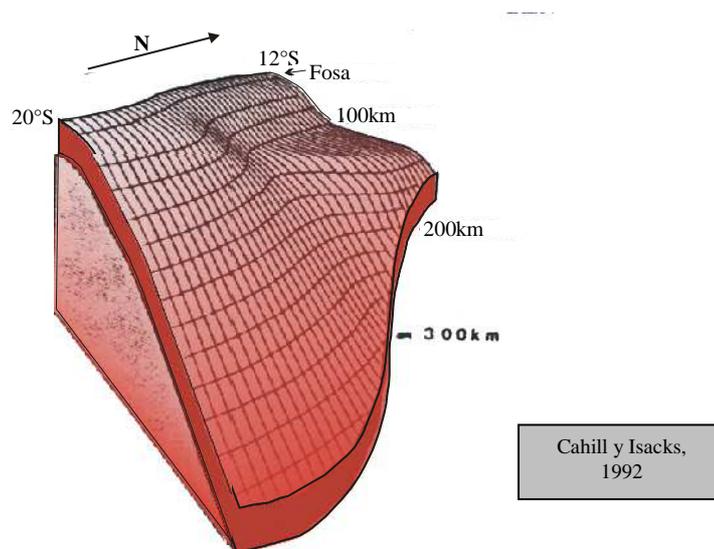
Rodríguez y Tavera (1991). Ambos autores determinaron la geometría del proceso de subducción para la región Central de Perú utilizando datos obtenidos de cuatro redes sísmicas locales que funcionaron en diversos periodos de tiempo. A partir de sus resultados, los autores postularon que en la región Central el proceso de subducción se realiza con un ángulo promedio de 30° hasta una profundidad de 107km para luego desplazarse de manera casi horizontal por debajo del continente hasta 650 km de distancia desde la línea de fosa.



Rodríguez y Tavera, 1991

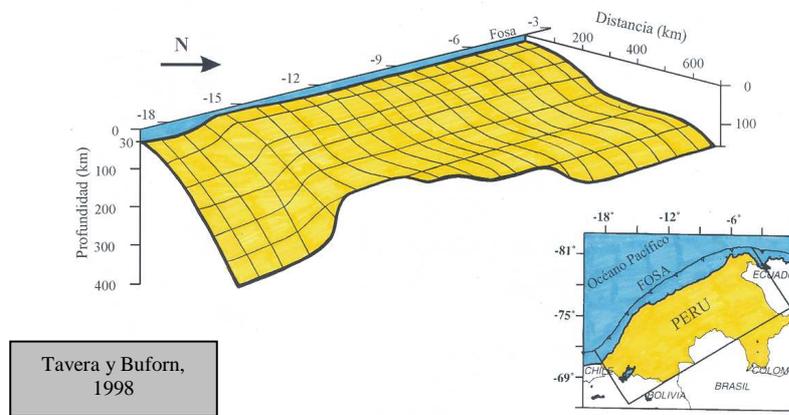
Hacia la región Sur, el ángulo de subducción se mantendría en 30° y la placa de Nazca se contorsionaría para pasar de un modo de subducción subhorizontal a otro normal.

Cahill y Isacks (1992). Ambos autores evalúan cuantitativamente una base de datos para el periodo de 1963-1989 extraída del catálogo NEIC (National Earthquake International Center) y el ISC (International Seismological Center), a fin de estudiar la geometría del proceso de subducción en Sudamérica. La selección de los datos se realiza en función de los valores de las residuales obtenidas en la localización de los sismos, frecuencia sísmica y relación magnitud vs número de estaciones que registraron el sismo. Los autores proponen un esquema 3D para la geometría del proceso de subducción entre las latitudes de 7°S a 40°S. Para el Perú, los autores proponen que la subducción se iniciaría, desde la fosa, con un ángulo de 27°-30° para luego ser continua por debajo del continente mostrando la presencia de dos tipos de subducción: una subducción subhorizontal presente en la zona Central de Perú (entre 7°S-16°S) y otra de tipo normal presente en la región Sur de Perú (al Sur de los 16°S)



Tavera y Buforn (1998). Estos autores proponen un modelo 3D para el proceso de subducción en Perú a partir de una base de datos extraída del NEIC (National Earthquake Information Center) para el periodo 1960-1995 ($m_b \geq 5.0$). Los autores indican la existencia de dos modos de subducción: una casi horizontal presentes en las regiones Norte y Centro de Perú con profundidades del orden de 100-120 km y distancias, desde la fosa, de 700 a 500 km respectivamente. En la zona Sur, el proceso de subducción se mantiene constante con un ángulo de 30° hasta 300 km de profundidad y distancias desde la fosa de 400 km.

Los autores remarcan la heterogeneidad en el modo de subducción, la contorsión de la placa y las distancias alcanzadas, desde la fosa, por debajo del continente.



3.2.- Distribución Espacial de los Sismos

Para realizar el análisis y evaluación de la actividad sísmica en el Perú, se ha hecho uso de una base de datos extraída del catalogo de Engdahl et al (1997) y del Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2000). Los parámetros hipocentrales de los sismos contenidos en el primer catalogo, 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; es decir, la profundidad del foco sísmico. Para este catalogo, se ha considerado información para el periodo 1960-1995. Del catalogo del Instituto Geofísico del Perú, se ha seleccionado los sismos ocurridos entre 1996-2002 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 completeza del catálogo y la distribución de los sismos en función de su magnitud y residual obtenida en el cálculo de sus parámetros hipocentrales. 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 2700 sismos con magnitudes m_b mayores e iguales a 4.5, clasificados en tres rangos de profundidad según el criterio establecido por Tavera y Buforn

(1998): Sismos con foco superficial ($h \leq 60$ km), intermedio ($60 < h \leq 300$ km) y profundo ($h > 300$ km).

3.2.1.- Sismos con Foco Superficial ($h \leq 60$ km)

En la Figura 8 se muestra la distribución en superficie de los sismos con focos localizados a profundidades menores a 60 km. De manera general, los sismos se distribuyen formando dos grupos, el primero considera a los que se localizan entre la fosa y la línea de costa (S_1), los mismos que representan aproximadamente el 90% del total de la actividad sísmica que ocurre en Perú, aún considerando todos los niveles de profundidad. Esta sismicidad, puede ser asociada principalmente al proceso de subducción en sus primeros niveles de profundidad y agrupa a los sismos de magnitud mayor que ocasionaron diversos grados de destrucción y muerte en las ciudades distribuidas a lo largo de la línea de costa de Perú. El segundo grupo, indicado como S_2 en la Figura 8, considera a los sismos que ocurren en el interior del continente y que se distribuyen, de Norte a Sur, paralelos a la Cordillera Andina. Estos sismos podrían tener su origen en las importantes deformaciones superficiales puestas en evidencias con la presencia de un gran número de fallas de diferente tipo.

Grupo S_1 .- Según la Figura 8, en el grupo S_1 los sismos se distribuyen entre la fosa y la línea de costa de manera irregular formando pequeños agrupamientos. En general, en la región Norte, los sismos tienden a localizarse a mayor distancia de la línea de costa; mientras que, en la región Centro, el número de sismos es mayor frente a la costa del departamento de Ancash (9.5° - 11° Sur) debido probablemente a la llegada de la Fractura de Mendaña y menor frente a la costa de Lima (11° - 14° Sur). En esta región, la historia sísmica indica la ocurrencia de varios sismos de magnitud elevada, siendo los más catastróficos los ocurridos en 1970 (Ancash) y 1974 (Lima), ambos con magnitudes de 6.4 y 6.2 mb. En la región Sur, los sismos se distribuyen de manera no continua paralelos a la línea de costa, siendo mayor el número de sismos próximo a la costa del departamento de Ica (13° - 16° Sur). Esta sismicidad probablemente se deba a la llegada de la Dorsal de Nazca. Los últimos sismos ocurridos en esta región son los de noviembre de 1996 (6.7mb)

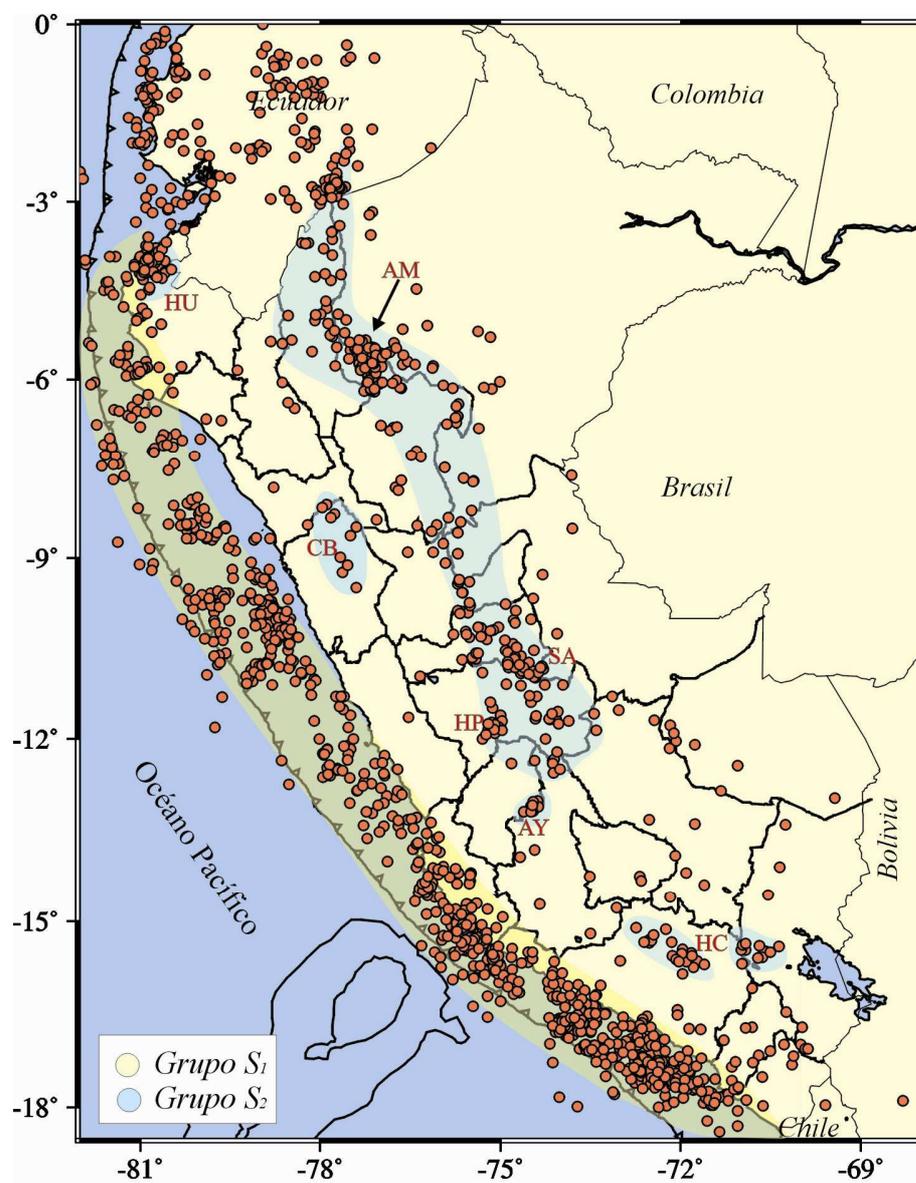


Figura 8.- Distribución de los sismos con foco superficial ($h \leq 60$ km) ocurridos entre 1960-2002, $m_b \geq 4.5$ (Engdahl et al, 1998 y IGP, 2000). Las áreas sombreadas indican las fuentes sísmicas. Otros, ver Figura 3.

y junio de 2001 (6.9mb). Hacia la región Sur, el mayor número de sismos tiende a localizarse cerca de la línea de costa.

Grupo S₂. En este grupo, los sismos se distribuyen en el interior del continente de manera irregular formando pequeños agrupamientos con cierto alineamiento. En la región Norte, cerca de la costa, se observa un agrupamiento de sismos entre los departamentos de Tumbes y Piura (3.5°-4.5° Sur y 80°-81° Oeste) siguiendo un rumbo aparente Este-Oeste y con posible origen en la falla de Huaypira. Asimismo, en la zona Subandina se observa una concentración de sismos entre 5°-6.5° Sur y 77°-78° Oeste (extremo Norte del departamento de San Martín) orientado en dirección Norte-Sur y que estaría probablemente asociados al sistema de fallas de Alto Mayo. En la región Central entre 8°-10° Sur, se observa un agrupamiento de sismos alineados en dirección NE-SW sobre una longitud de 140 km debidos al sistema de fallas de la Cordillera Blanca (Ancash). Sobre las coordenadas 12°S y 75°W se observa la presencia de un agrupamiento de sismos sobre la falla de Huaytapallana; mientras que, otro grupo de sismos se distribuyen paralelos a la cordillera sobre toda la zona Subandina alineados en dirección NE-SW y NW-SE, siendo en su mayoría debidos a los sistemas de fallas de Satipo y Amauta. Finalmente, en la región Sur, los sismos se concentran sobre las trazas de las fallas de Ayacucho (13°S), Ichupampa (al Sur de los 16.5°S), Huambo y Cabanaconde en Arequipa (entre 15°-16°S).

La distribución de los sismos con foco superficial muestra, a pesar de la dispersión observada en algunas áreas, que existen dos fuentes sismogénicas importantes. La primera considera a los sismos que ocurren entre la línea de costa y la fosa, siendo mayor el número de sismos en la región Central, seguida por la región Sur y menor en la región Norte. Estas características son coherentes con el número de sismos de magnitud elevada ($mb \geq 6.0$) ocurridos en estas regiones en los últimos 60 años, 5 sismos en la región Central (1940, 1942, 1966, 1970 y 1974), 3 en la región Sur (1979, 1996 y 2001) y uno en la región Norte (1970). En el interior del continente, los sismos se distribuyen sobre los principales sistemas de fallas originadas o reactivadas durante el Cuaternario por sismos que presentaron magnitudes del orden de 6.0mb, los mismos que al ser superficiales, generaron mayor destrucción en áreas relativamente pequeñas. Estos sismos se alinean

paralelos a la Cordillera Andina poniendo en evidencia su origen; es decir, deformación netamente continental como efecto del levantamiento de la Cordillera Andina como parte del proceso de subducción y de la subsidencia del escudo brasileño bajo la cordillera.

3.2.2.- Sismos con Foco Intermedio ($60 < h \leq 300$ km)

En la Figura 9, se presenta un mapa de la distribución espacial de sismos cuyos focos se ubican a profundidades intermedias; es decir, entre 61 y 300 km. De manera general, estos sismos se distribuyen principalmente en el interior del continente formando tres grupos localizados cerca de la línea de costa, en la zona Subandina y en toda la región Sur sobre el Altiplano peruano-boliviano. El último grupo, presenta aproximadamente el 80% del total de sismos que ocurren a estos niveles de profundidad.

Grupo I₁, En este grupo los sismos se ubican principalmente en la zona Subandina siguiendo una aparente orientación NW-SE. Hacia el extremo Norte de este grupo, entre 3° y 5° de latitud Sur, se observa una concentración de sismos próximo a la frontera con Ecuador; mientras que, hacia la parte central el número de sismos disminuye considerablemente. Una concentración importante de sismos, con una orientación N-S y sobre una longitud de aproximadamente 350 km es notoria alrededor de las coordenadas 8°S y 74°W (departamento de Ucayali).

Grupo I₂. Los sismos de este grupo se distribuyen muy próximos a la línea de costa por debajo del extremo Sur del departamento de La Libertad. En este grupo sobresale una pequeña concentración de sismos al Norte del departamento de Ancash sobre una longitud de 150 km aproximadamente. Hacia el Sur de este grupo, los sismos se distribuyen de forma más dispersa. Los grandes sismos que ocurren a estos niveles de profundidad presentan magnitudes del orden de 6.5mb generando cierto grado de destrucción en superficie.

Grupo I₃. En este grupo, el número de sismos con foco intermedio es mayor en relación con los otros grupos. Aquí, los sismos se distribuyen principalmente sobre todo el

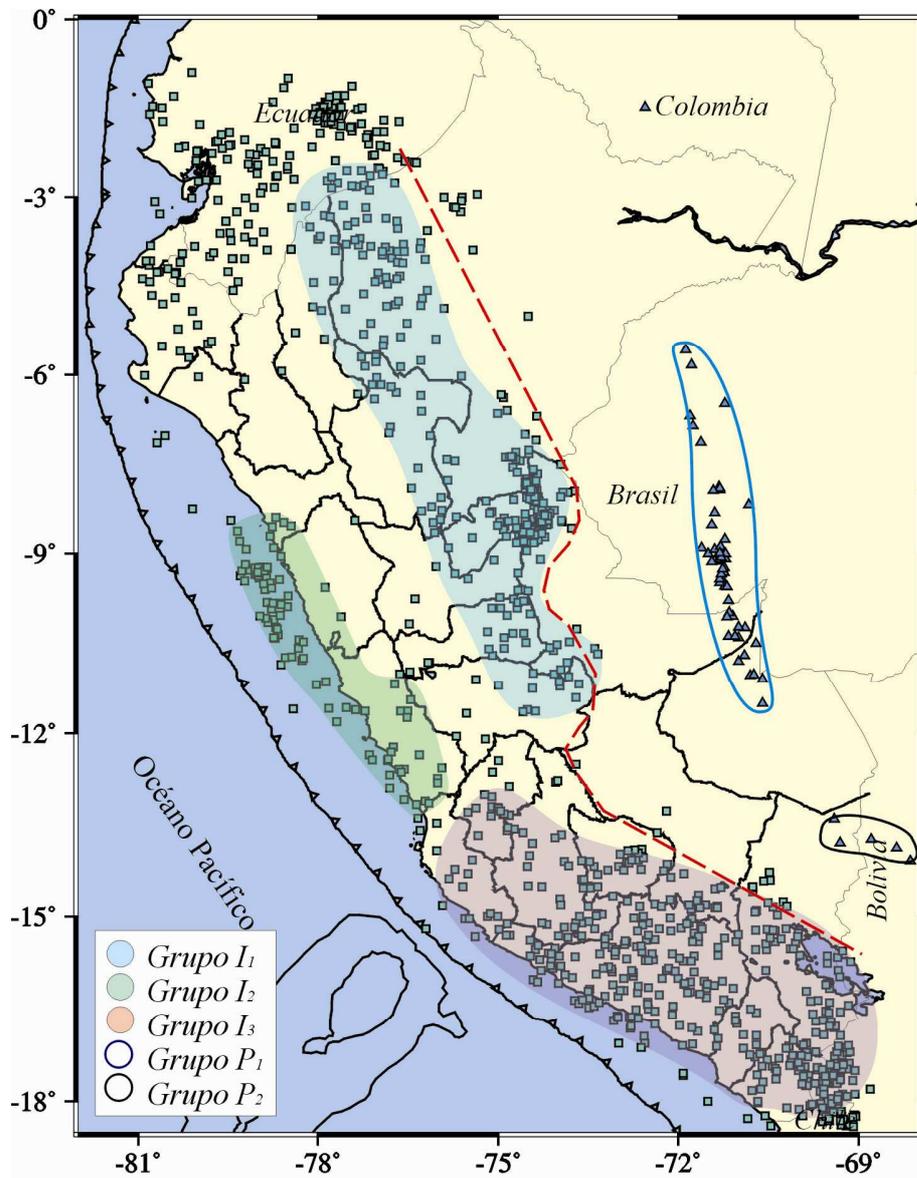


Figura 9.- Distribución de los sismos con foco intermedio ($60 > h \leq 300$ km, cuadrados en verde) y foco profundo ($h > 300$ km, triángulos en azul) ocurridos entre 1960 -2002 ($m_b \geq 4.5$). Las zonas sombreadas indican las fuentes sismogénicas y la línea discontinua, la distancia máxima a la cual ocurren los sismos con foco intermedio.

Altiplano, con agrupamientos importantes sobre los departamentos de Tacna, Puno, Arequipa, Apurímac y al Sur de Ayacucho.

La distribución de los sismos con foco intermedio no es muy homogénea; sin embargo, estos muestran de manera aproximada las zonas de mayor deformación a estos niveles de profundidad. Próximo a la línea de costa, la alineación y agrupación de los sismos sugiere que los patrones de deformación son diferentes en cada región. En el interior del continente, los sismos se alinean sobre la zona Subandina paralela a la cordillera hasta 9° Sur aproximadamente y a partir de la cual, la distribución cambia su rumbo hacia el SW para luego ser mas dispersa sobre toda la región Sur.

En la Figura 9, según la línea discontinua, se observa que los sismos con foco intermedio en las regiones Norte y Centro hasta la latitud Sur de 10°, se distribuye hasta una distancia del orden de 750 km desde la fosa, para luego entre 10° y 13° Sur llegar hasta distancias de 500 km, y finalmente, en la región Sur los sismos alcanzan una distancia de 450 km desde la fosa. Esta distribución heterogénea de la sismicidad sugiere que el contacto de placas o deformación de la placa oceánica, no es homogénea dentro todo el proceso de subducción y además, es evidente que las diversas distancias alcanzadas por los sismos por debajo del continente, tienen relación con la geometría de la placa oceánica.

3.2.3.- Sismos con Foco Profundo ($h > 300$ km)

Los sismos con foco profundo, tal como se muestra en el extremo derecho de la Figura 9, son en número menor a los de foco superficial e intermedio; sin embargo, su tamaño es muchas veces mayor que los sismos que ocurren a otros niveles de profundidad. Los sismos con foco profundo del **Grupo P₁**, se localizan en el llano Amazónico próximo al límite entre Perú y Brasil (6°-11° Sur) con una orientación prácticamente Norte-Sur sobre una longitud del orden de 500 km. Los sismos de **Grupo P₂**, se localizan alrededor del límite entre Perú y Bolivia (13° -1 4° Sur) con una orientación próxima a Este-Oeste.

La historia sísmica indica que la ocurrencia de sismos a estos niveles de profundidad es poco frecuente; sin embargo, es de esperarse la ocurrencia de grandes sismos como el producido el 9 de Junio de 1994, el mayor para el cual se dispone de gran cantidad de información. Este sismo presentó una magnitud de 7.0mb y fue sentido hasta distancias de 50° con daños muy puntuales en las ciudades de Cuzco, Puno, La Paz y Brasil. En términos de energía, este sismo habría liberado tanta energía como la que liberarían todos los sismos ocurridos en el mundo durante un año.

A continuación, sobre el mapa de sismicidad de la Figura 10, se presenta la orientación de las 4 secciones sísmicas a analizarse y la proyección de la Dorsal de Nazca por debajo del continente según Spence et al (1998). En esta figura se observa que la posible geometría de la Dorsal Nazca por debajo del continente coincide con la distribución de los sismos en superficie (área de color gris), concentrándose los sismos prácticamente alrededor de la misma y en menor número en su extremo Norte, próximo a la localidad de Ucayali. Asimismo, la parte más ancha de la Dorsal cubre prácticamente toda el área donde se observa una importante disminución de sismos y los que ocurren están muy próximos a la línea de costa cerca a la superficie de mayor contacto entre placas. Hacia la zona Sur, los sismos bordean el extremo SW de la Dorsal, lo cual es coherente si se tiene en cuenta que en esta zona la placa oceánica se contorsiona para cambiar su geometría. Según esta proyección, la Dorsal de Nazca tendría una orientación NE-SW y su longitud coincide con lo indicado por von Huene et al (1996); es decir, actualmente 1200 km de la Dorsal de Nazca habría subducido hasta la fecha por debajo del continente.

3.3.- Distribución en Profundidad de los Sismos

El interés de analizar y evaluar la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos, es debido a que resulta importante definir la superficie de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica, y la geometría de la primera a diversos niveles de profundidad por debajo del territorio peruano. Asimismo, este tipo de información permite conocer de manera aproximada la profundidad de los principales sistemas de fallas descritas anteriormente y cuya información resulta ser vital para establecer futuros patrones de riesgo para las zonas en donde se ubican estas fallas.

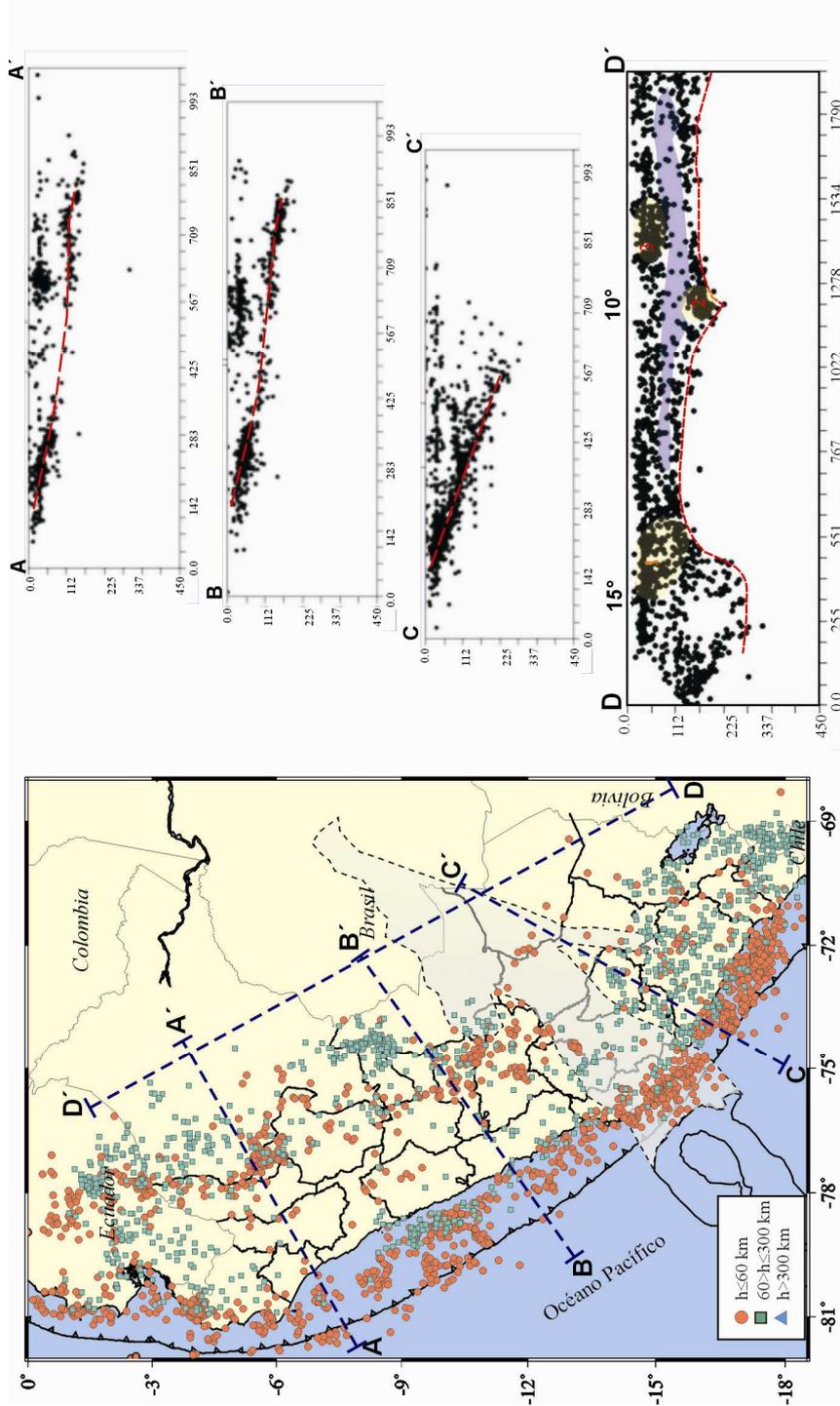


Figura 10.- Actividad sísmica, asociada al proceso de fricción de placas y a la deformación de la placa de Nazca por debajo del continente. El área en gris indica la proyección de la Dorsal de Nazca por debajo del continente y las líneas discontinuas de color azul, la orientación de las secciones sísmicas. En el extremo derecho se presenta las secciones AA', BB' y CC' en las cuales la línea de color rojo indica la tendencia media de la sismicidad. En DD', la línea en rojo indica el nivel de profundidad máxima de los sismos. Las áreas sombreadas de color amarillo, indica concentración de sismos y la morada, ausencia de sismicidad.

Haciendo uso de la base de datos ya mencionada se construye tres secciones verticales de sismicidad. Según las rectas AA' (región Norte), BB' (región Centro) y CC' (región Sur). Adicionalmente, se ha elaborado una sección paralela a la línea de fosa según la dirección DD' (Figura 10), la misma que corresponde a una proyección de la sismicidad de Norte a Sur, con línea de vista desde la dirección NE.

- **Sección A-A' (Región Norte):** En esta sección se observa que la profundidad de los sismos aumenta de Oeste a Este con focos ubicados a menos de 50 km en la zona oceánica, hasta 150 km de profundidad por debajo del continente. Entre 350 y 560 km de distancia horizontal desde el punto A, se observa menor ocurrencia de sismos, siendo estos más superficiales, lo que puede indicar la existencia de una posible laguna sísmica. A partir de la distancia de 560 a 850 km desde el punto A, aumenta el número y la profundidad de los sismos. Estos niveles de profundidad indicarían el límite del contacto y la forma de la Placa de Nazca bajo el continente. Los sismos con foco superficial se concentran mayormente a una distancia de 600 km desde el punto A, con una profundidad que no sobrepasa los 60 km, marcando así el límite inferior de la deformación superficial en el interior del continente.

- **Sección B-B' (Región Centro):** En esta sección, la distribución de los focos sísmicos sigue el mismo patrón descrito anteriormente pero sin observar la existencia de la posible laguna sísmica. En ambas secciones verticales y hasta unos 100-150 km de profundidad, los focos se distribuyen según una línea con pendiente de 25° a 30° y a partir de esta, los sismos se distribuyen de forma prácticamente horizontal hasta distancias de 850 km desde el punto B. Los sismos con foco superficial asociados a la deformación superficial se distribuyen entre las distancias de 490 y 700 km desde el punto B, con una profundidad menor a 60 km

- **Sección C-C' (Región Sur):** En esta sección los sismos se distribuyen en profundidad con características diferentes a las otras regiones. La profundidad de los focos sísmicos aumenta linealmente de Oeste a Este de manera continua con una pendiente de 30° hasta 250 km de profundidad aproximadamente. Esta sismicidad alcanza una distancia

en superficie de 550 km desde el punto C; mientras que, a distancias mayores solo se observa la presencia de sismos con foco superficial ($h \geq 60$ km).

- **Sección D-D:** La información utilizada en esta sección corresponde a la sismicidad asociada únicamente a la fricción de placas y a la deformación interna de la placa de Nazca; es decir, se ha excluido todos los sismos debidos a la deformación superficial que se produce en el interior del continente (fallas). Esta sección corresponde a una vista general de la sismicidad entre 3° y 16° S tomando como punto de observación la dirección NE. De manera general, se observa que todos los sismos se distribuyen formando diversos alineamientos de Norte a Sur, tanto en profundidad como en distancia desde la fosa. Todos los sismos que se ubican a profundidades menores a 70 km, permiten configurar la superficie de contacto de las placas y los sismos que se ubican entre 90 y 180 km de profundidad, la geometría de la placa de Nazca por debajo del continente. La ausencia de sismicidad entre estos dos alineamientos (área de color morado), correspondería a la posible existencia de una laguna sísmica para sismos con magnitudes $m_b \geq 4.5$. Dentro de los sismos debidos a la fricción de placas, es notoria la presencia de dos agrupamientos importantes a la altura de las latitudes de 9° y 15° Sur (áreas 3 y 1), esta última posiblemente debido a la llegada de la Dorsal de Nazca a la fosa peruano-chilena. Asimismo, dentro de los sismos debidos a la deformación interna de la placa, es importante remarcar la presencia de un agrupamiento de sismos a la altura de la latitud de 10° S, los mismos que alcanzan profundidades del orden de 180 km. Por debajo de la latitud de 16° S, la sismicidad alcanza mayores niveles de profundidad y muestra claramente la superficie de la placa de Nazca involucrada en la contorsión al pasar de un modo de subducción horizontal a otro de tipo normal.

De acuerdo a las características del origen de los sismos, estos pueden ser clasificados en tres grupos. El primero considera a los sismos con origen en la fricción de las placas de Nazca y Sudamericana, los mismos que permiten configurar su geometría y que en general, obedecen a procesos netamente compresivos, tal como se muestra en la Figura 6. El segundo grupo tiene su origen en la deformación interna de la placa de Nazca y permite conocer su forma a mayores niveles de profundidad por debajo del continente.

Estos sismos se deben a la presencia de esfuerzos tensionales (Figura 6). Entre estos dos grupos de sismos; es decir, al final de la superficie de contacto de las placas se ubicaría una zona de transición entre ambos tipos de esfuerzos (ver Figura 6). Finalmente, el tercer grupo, considera a los sismos asociados a deformaciones corticales o reactivaciones esporádicas de importantes sistemas de fallas presentes en el interior del continente.

4.- GEOMETRIA DE LA PLACA DE NAZCA

Anteriormente, se ha descrito y analizado los diferentes modelos propuestos por diversos autores para la geometría del proceso de subducción en Perú (Barazangi y Isacks, 1979; Cahill y Isacks, 1992; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Tavera y Buforn, 1998; Bernal, 2002), todos utilizando diferentes bases de datos y procedimientos, y aunque los resultados son similares, es necesario, proponer un nuevo modelo considerando una base de datos homogénea que considere sismos ocurridos en periodos mas recientes.

En general, uno de los procedimientos mas utilizados para analizar la geometría del proceso de subducción, se basa en la observación de la distribución de los sismos recurrentes a elaborar diversas secciones verticales en función de la profundidad de los focos sísmicos, ya sean perpendiculares o paralelas a la línea de fosa. Procedimiento similar se ha seguido para conocer de manera aproximada la forma de la superficie del contacto de las placas y la geometría de la placa oceánica a mayor profundidad y distancias por debajo del continente. Para tal objetivo, del total de la sismicidad se ha separado los sismos debidos a la deformación continental, a fin de considerar únicamente los sismos asociados directamente al proceso de subducción de la placa de Nazca. Seguidamente se ha construido 10 secciones paralelas y 18 secciones verticales perpendiculares a la línea de fosa, tal como se muestra en la Figura 11. Las secciones perpendiculares a la línea de fosa para las regiones Norte y Centro presentan anchos de 100 km y para la región Sur de 50 km; mientras que, todas las secciones paralelas a la línea de fosa tienen anchos de 100 km. Posteriormente, sobre cada sección sísmica se ha trazado una línea media que representa la tendencia de los sismos. Para las áreas con ausencia de sismos, la tendencia de los mismos ha sido extrapolada con líneas discontinuas a fin de conseguir reconstruir su posible tendencia. En la Figura 12, se presenta las tendencias medias de la sismicidad para la región Norte (tendencias 1-3), Centro (tendencias 4-8) y Sur (tendencias 9-18) de Perú, las mismas que se describen a continuación.

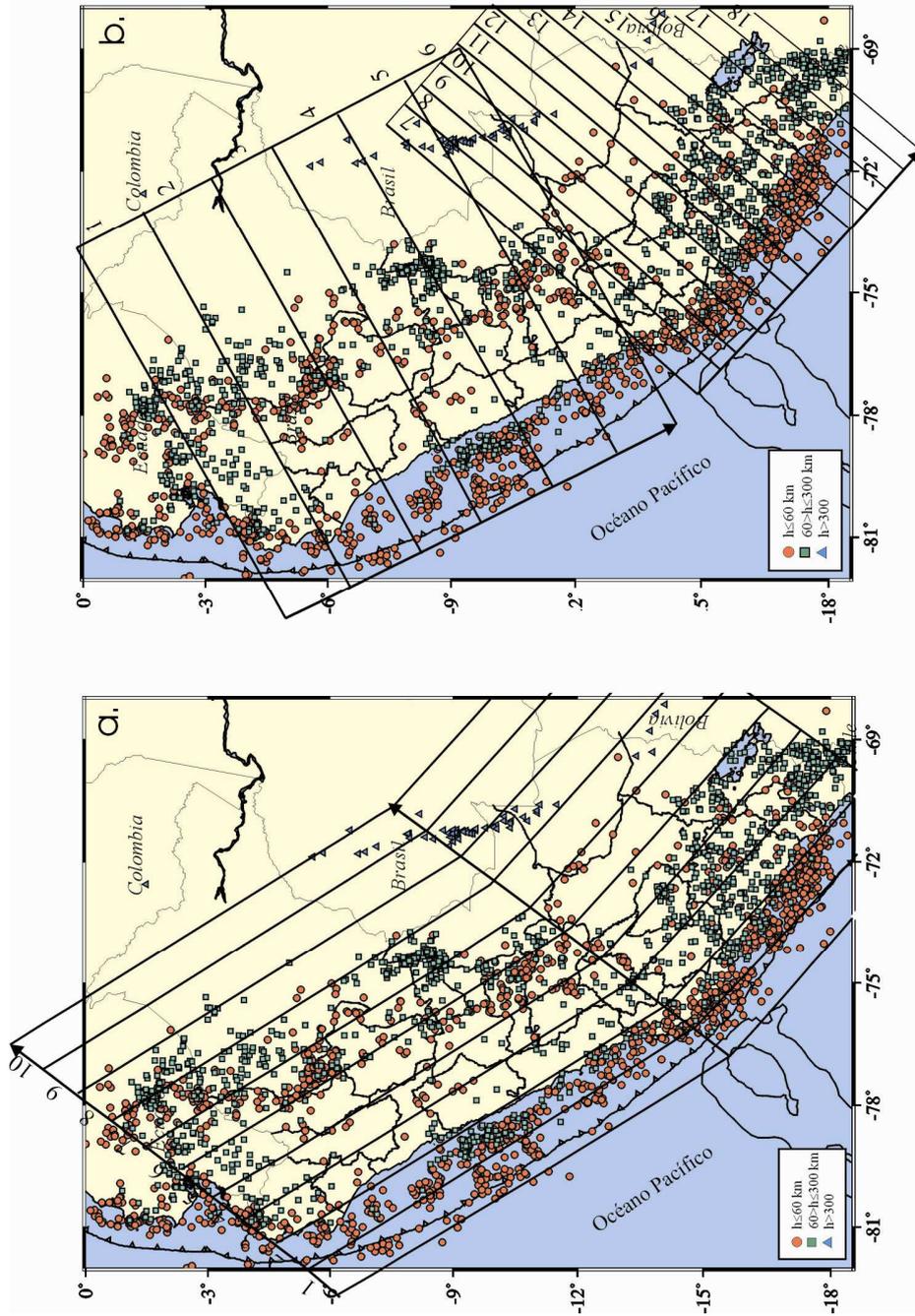


Figura 11.- Mapa de sismicidad para el periodo de 1960-2002 ($m_b \geq 4.5$). Las diferentes áreas corresponden a las 28 secciones verticales elaboradas para el análisis detallado de la sismicidad. a) Secciones Perpendiculares a la línea de fosa y b) perpendiculares a la línea de fosa.

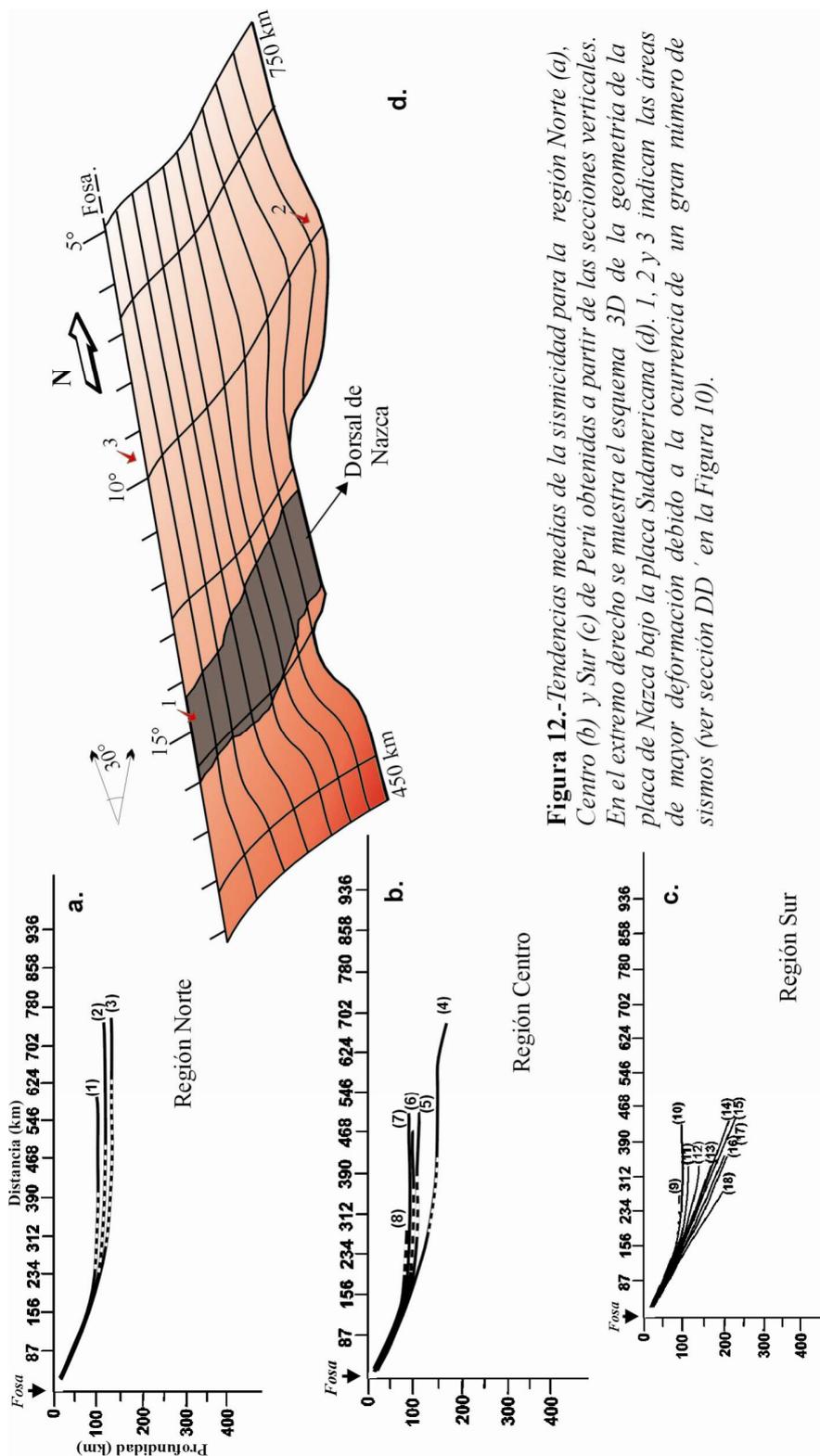


Figura 12. Tendencias medias de la sismicidad para la región Norte (a), Centro (b) y Sur (c) de Perú obtenidas a partir de las secciones verticales. En el extremo derecho se muestra el esquema 3D de la geometría de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (d). 1, 2 y 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la ocurrencia de un gran número de sismos (ver sección DD' en la Figura 10).

Región Norte: Para esta región (Figura 12a), las tendencias medias de la sismicidad sugieren que la placa de Nazca subduce siguiendo una pendiente de 25° - 30° hasta una profundidad que oscila entre 100 y 150 km (aumenta de Norte a Sur), para luego continuar de manera casi horizontal hasta una distancia de 750 km desde la fosa. La tendencia de la placa de Nazca entre 200 y 550 km de distancia desde la fosa, corresponde a una aproximación de la misma (líneas discontinuas).

Región Centro: Las tendencias medias de la sismicidad para esta región (Figura 12b) indican que la placa de Nazca subduce de manera muy similar a la región Norte, pero siguiendo un ángulo medio de 30° hasta una profundidad de 100 km, a partir de la cual la placa se hace horizontal hasta una distancia de 750 km en la sección 4 y en el resto de las secciones, en promedio, hasta 500km desde la fosa. Se debe mencionar, que conforme se tienda hacia el extremo Sur, la placa disminuye su longitud. Entre las distancias de 150 y 400 km, la tendencia de los sismos ha sido aproximada.

Región Sur: Las tendencias medias de la sismicidad en esta región (Figura 12c) muestran como la superficie de contacto entre placas y la forma de la placa de Nazca, cambia de Norte a Sur. La tendencia de los sismos, según las secciones 9 y 10 es similar a la observada en las regiones Norte y Centro con la diferencia que, la longitud de la placa en la sección 9 disminuye considerablemente para luego aumentar hasta 450 km en la sección 10. En gradual aumento en la profundidad de las tendencias de la sismicidad observada entre las secciones 10 y 14 sugieren que existe un cambio en la geometría de la placa dando lugar a la contorsión de la misma. En las secciones 14 a 17, la tendencia de los sismos es continua con un ángulo de 30° que se mantiene constante hasta una profundidad del orden de 250 km y distancias en superficie de 450 km desde la fosa. Sobre la sección 18, la sismicidad alcanza una profundidad de 200 km y en superficie su longitud disminuye hasta 300 km aproximadamente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede considerar que la superficie del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, y la forma de la placa de Nazca es casi homogénea en las regiones Norte y Centro de Perú. En estas dos regiones, dicha

superficie se inclina con un ángulo de 30° aproximadamente hasta una profundidad de 150 km, a partir de la cual, la placa de Nazca se hace casi horizontal hasta distancias de 750 km en la región Norte y de 300-700 km en la región Central. En la región Sur, inicialmente la placa de Nazca tiene la misma forma que la ya descrita; sin embargo, a partir de la sección 10 se observa que la placa comienza a contornerse hacia el Sur hasta alcanzar una profundidad del orden de 250 km sobre una distancia de 450 km sobre la superficie. Según lo observado, el área considerada entre las secciones 10 y 14 se encuentra directamente involucrada en la contorsión de la placa.

4.1.- Esquema en 3D de la Geometría de la Placa de Nazca

Utilizando la información obtenida de las tendencias medias de la sismicidad, se ha construido un esquema 3D para representar la geometría de la placa de Nazca involucrada en el proceso de subducción presente en el borde Oeste de Perú. Según el esquema 3D de la Figura 12d, la placa de Nazca presenta las siguientes características:

- La placa de Nazca subduce de manera subhorizontal y normal. La subducción de tipo subhorizontal esta presente entre los 3°-15° Sur (región Norte y Centro) y la de tipo normal, al Sur de los 15° (región Sur).
- En ambos modos la subducción se inicia con un ángulo de 30°. En la región Norte-Centro hasta una profundidad de 120 km a partir de la cual la subducción es horizontal. En la región Sur continua hasta una profundidad de 250 km.
- La placa de Nazca alcanza longitudes, por debajo del continente, del orden de 750 km en la región Norte, de 500-700 km en el Centro y de 450 km en la región Sur.
- El área involucrada en la contorsión de la placa tiene una longitud de 320 km desde la fosa y un ancho máximo de 150 km en su extremo Este.
- En el esquema 3D, las áreas indicadas con los números 1, 2 y 3 representan los de mayor deformación debido al gran número de sismos que en ellas se ha producido.

El área 1, la sismicidad esta asociada a la llegada de la Dorsal de Nazca. En el área 2, a un posible hundimiento de la placa de Oceánica y en el área 3, a la llegada de la llegada de la fractura de Mendaña

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los descritos por Grange et al (1984), Hasegawa y Sacks (1981) y Schneider y Sacks (1987) para la región Sur, con Rodriguez y Tavera (1991) para la región Central y con Cahill y Isacks (1992) y Tavera y Buforn (1998, 2001) para todo el Perú. Las pequeñas diferencias que existan entre todos estos resultados, pueden ser atribuidos a las diferentes bases de datos utilizados, pero en general los resultados son similares.

5.- ANALISIS Y EVALUACION DE LA ENERGIA SISMICA EN PERU

5.1.- Energía Sísmica

La cantidad de energía total liberada por un sismo es difícil de calcular con precisión, debido a que ella es la suma de la energía disipada en forma térmica por la deformación en la zona de ruptura y la emitida en forma de ondas sísmicas. Esta última, es la única que puede ser estimada a partir del registro de los sismos en los sismogramas; por lo tanto, se asume que el tamaño de los sismos puede ser conocida a partir de la cantidad de energía por ellos liberada.

En sismología, el tamaño de los sismos es estimado a partir de las amplitudes máximas del registro de las ondas de volumen ó superficiales expresados en valores para la magnitud m_b ó M_s . De acuerdo a esto, Gutenberg y Richter (1956) propusieron algunas relaciones para estimar la cantidad de energía emitida por un sismo a partir de la magnitud del mismo.

$$\text{Log } E = 5.8 + 2.4 m_b$$

$$\text{Log } E = 11.8 + 1.5 M_s$$

Según estas ecuaciones, un sismo de magnitud m_b igual 7.0 tendría que liberar $3.98E+22$ ergios de energía, equivalente a la explosión de 199000 toneladas de TNT. La energía liberada por la bomba atómica es equivalente a un sismo ocurrido en superficie con magnitud $6.0m_b$. En la Figura 13, se presenta equivalencias entre diferentes valores de magnitud y su respectiva cantidad de energía expresada en toneladas de TNT. Asimismo, se presenta algunos ejemplos de sismos que liberaron tal cantidad de energía.

Para realizar un análisis de la distribución espacial de la energía sísmica liberada por sismos ocurridos en el Perú, se ha procedido a construir dos bases de datos. El primero considera los grandes sismos históricos para los cuales se conoce su magnitud (m_b o M_s) y el segundo (periodo instrumental), a los sismos utilizados en este estudio; es decir, sismos

<i>M</i>	<i>Energía (ergios)</i>	<i>TNT</i>	<i>Ejemplos</i>
-1.5	1.58E+02	1 gr	Romper roca en Lab
1.0	1.58E+08	6 onzas	Explosión construcción
1.5	2.51E+09	2 lb	
2.0	3.98E+10	13 lb	
3.0	1.00E+13	397 lb	
3.5	1.58E+14	1,000 lb	Explosión en mina
4.5	3.98E+16	32 ton	Tornado promedio
5.0	6.31E+17	199 ton	
5.5	1.00E+19	500 ton	Terremoto Cusco, 1986
6.0	1.58E+20	1,270 ton	Terremoto Lima, 1993
6.5	2.51E+21	31,550 ton	Terremoto Moyobamba, 1991
7.0	3.98E+22	199,000 ton	Terremoto Chimbote, 1996
7.5	6.31E+23	1'000,000 ton	Terremoto Nazca, 1996
8.0	1.00E+25	6'270,000 ton	Terremoto Lima, 1940
8.5	1.58E+26	31'550,000 ton	Terremoto Lima, 1746
9.0	2.51E+27	199'999,000 ton	Terremoto Arequipa, 1868
10.0	6.31E+29	6.3 billón ton	Terremoto Chile, 1960: San Andrés
12.0	3.98E+34	1 trillón ton	Fractura la Tierra en la mitad x centro Energía solar recibida 1 día x Tierra.



Terremoto, 03 de Octubre de 1974 (6.2mb) (ciudad de Lima)



Terremoto, 12 de Noviembre de 1996 (6.7mb) (ciudad de Nazca)



Terremoto, 23 de Junio de 2001 (6.9mb) (ciudad de Moquegua)



Terremoto, 23 de Junio de 2001 (6.9mb) (ciudad de Arequipa)

Figura 13.- En la parte superior se muestra algunas equivalencias entre la magnitud, de los sismos, la energía sísmica (ergios) liberada y la cantidad de TNT utilizada en una explosión. Asimismo, se muestran fotos de la destrucción que dejaron algunos sismos en diferentes ciudades.

ocurridos durante el periodo 1960 y 2002 ($m_b \geq 4.5$). Los resultados obtenidos para los sismos históricos son presentados en la Figura 5 y ellos comprenden a la cantidad de energía estimada directamente de su valor de magnitud; mientras que, para el periodo instrumental los valores de energía son expresados en una unidad de medida llamada “*unidad de energía*”.

5.2.- Energía Sísmica Liberada en el Periodo Histórico

Para la evaluación de la energía sísmica liberada por sismos históricos, se ha seleccionado del catalogo del IGP a todos los sismos con magnitudes $M_s \geq 6.0$ ocurridos entre 1500 y 1959. En total se ha seleccionado 36 sismos y la energía sísmica liberada es estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Log}E = 11.8 + 1.5M_s$$

Según la Figura 5, se observa que la mayor cantidad de energía ha sido liberada por sismos ocurridos entre la línea de fosa y la línea de costa de las regiones Centro y Sur, todos asociados principalmente al proceso de subducción. Los sismos que habrían liberado mayor cantidad de energía son los ocurridos en 1604 en la costa de Moquegua y Tacna, 1746 costa de Lima y 1942 costa de Ica ($2.5E+24$ ergios de energía). Asimismo, en la región Norte, el sismo ocurrido en 1619 en la costa del departamento de La Libertad liberó $3.2E+23$ ergios y el de 1953 en el departamento de Tumbes, liberó $2.2E+23$ ergios de energía. Para los sismos que se han producido en el interior del continente, el ocurrido el 1 de Noviembre de 1947 en el departamento de Junín habría liberado $1.1E+23$ ergios de energía.

5.3.- Energía Sísmica Liberada en el Periodo Instrumental

A fin de realizar un análisis cualitativo y cuantitativo más certero de la distribución de energía sísmica liberada en Perú por sismos del periodo instrumental, se ha elaborado mapas de distribución de energía para los tres niveles de profundidad definidos

anteriormente. A diferencia de los sismos del periodo histórico, para calcular la energía liberada por sismos ocurridos en el periodo instrumental se utiliza la magnitud mb.

$$\text{Log } E = 5.8 + 2.4 \text{ mb}$$

Asimismo, para facilitar la presentación de los resultados se asume a la energía sísmica liberada por un sismo de magnitud 4.5mb, equivalente a una "unidad de energía sísmica (ue)"; es decir, a 3.98E+16ergios. Para otros rangos de magnitud, en la Tabla 2 se muestra su equivalencia con la energía sísmica liberada y los valores de "ue".

Tabla 2.- Equivalencia entre magnitud, energía sísmica y "ue" utilizados en este estudio

Magnitud (mb)	Energía (ergios)	Unidades de Energía (ue)
4.5	3.98E+16	1ue
5.0	6.31E+17	16ue
5.5	1.00E+19	251ue
6.0	1.58E+20	3,981ue
6.5	2.51E+21	63,096ue
7.0	3.98E+22	1'000,000ue

Una vez establecido el criterio de medida de la energía sísmica liberada, sobre el mapa de sismicidad de Perú se procede a construir una malla con áreas unitarias de 0.5° x 0.5° que cubra toda la superficie del territorio peruano. La energía liberada por el total de los sismos que se encuentran dentro de cada área unitaria (0.5° x 0.5°) se suman a fin de considerar este valor como la energía total liberada en el punto medio de dicha área. En el caso de tener sismos que se localizan sobre la línea media entre dos áreas, el valor de energía es considerado dentro del área que presente un mayor número de sismos. Los valores finales de energía son proyectados en un mapa e interpolados a fin de unir con líneas los puntos de igual valor de energía. Estas líneas son consideradas como curvas de iso-energía. A fin de facilitar el análisis de las curvas de iso-energía, se ha visto por

conveniente considerar únicamente los valores pares o múltiplos de cinco. Los mapas de liberación de energía construidos, corresponden a sismos con foco superficial, intermedio y profundo.

5.3.1.-Curvas de Iso-energía para Sismos con Foco Superficial

En la Figura 14, se observa que las mayores concentraciones de las curvas de iso-energía se encuentran a lo largo del borde Oeste de Perú, sugiriendo que en esta zona se ha liberado la mayor cantidad de energía sísmica. Además, en la figura se observa que las curvas de iso-energía, al Norte de los 7° y al Sur de 15° de latitud Sur, tienden a distribuirse hacia el interior del continente alejándose cada vez más de la línea de costa. Estas características sugieren que la superficie de fricción de placas, principal fuente sismogénica, es muy heterogénea. En el interior del continente, las curvas de iso-energía se distribuyen principalmente en la zona Subandina de la región Norte y Centro, mostrando una mayor concentración en esta última. Estos resultados son coherentes con lo observado en la distribución de la sismicidad con foco superficial.

Desde el punto de vista cuantitativo, la mayor cantidad de energía fue liberada en el extremo Norte del departamento de Arequipa (575090ue) y gran parte de la misma, fue liberada por el sismo ocurrido en junio de 2001 (6.9mb). La energía liberada entre el departamento de Ancash y Lima (111180 y 196900ue respectivamente), corresponden a los sismos ocurridos en octubre y mayo de 1966 y 1970 respectivamente, ambos con magnitud mb de 6.4. Asimismo, en el extremo Sur de los departamentos de Tumbes y centro de Lima, se ha liberado 12000 y 13000ue respectivamente y gran parte se debe a los sismos ocurridos en diciembre y octubre de 1970 (6.3mb) y 1974 (6.2mb). Como se ha observado, en las zonas donde se ha liberado gran cantidad de energía han ocurrido sismos de magnitud elevada, lo que indicaría que el potencial sísmico de una zona no depende del número de sismos que en ella ocurren sino de la cantidad de energía que ellos liberan. Por otro lado, conforme tienden las líneas de iso-energía hacia la fosa ó hacia la costa, la cantidad de energía liberada tiende a disminuir. En el interior del continente, la mayor cantidad de energía ha sido liberada en la zona de Subandina de la región Norte (51100ue)

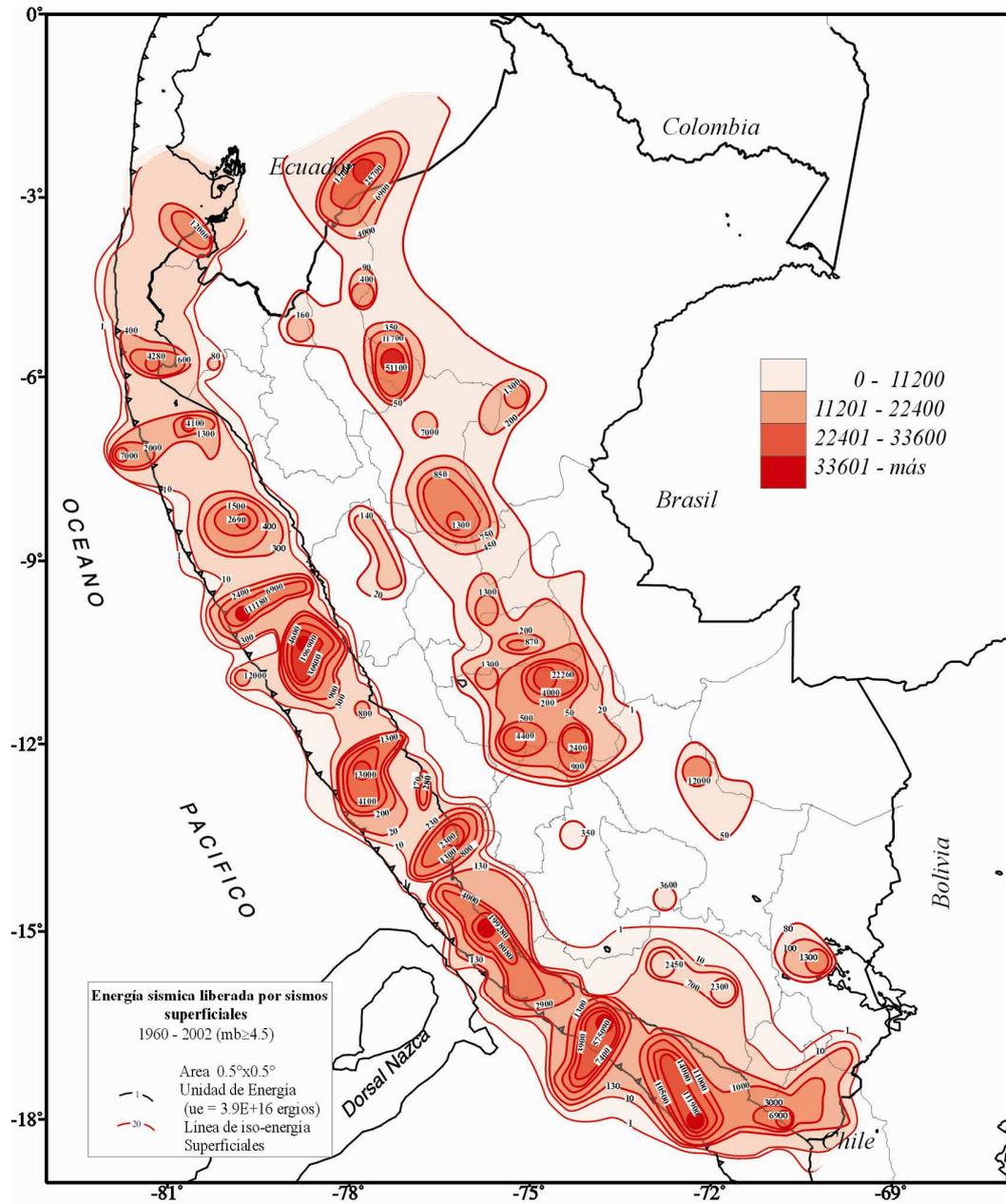


Figura 14.- Mapa de energía sísmica liberada en Perú por sismos con foco superficial ocurridos entre 1960-2002. Los valores de energía están expresados en unidades de energía (ue), ver texto.

y específicamente, en el extremo Norte del departamento de San Martín. Esta energía fue liberada por el sismo ocurrido en noviembre de 1982 (6.3mb). Menor cantidad de energía se ha liberado en la región Central de Perú, con un máximo de 22260ue.

5.3.2.-Curvas de Iso-energía para Sismos con Foco Intermedio

Según la Figura 15 (curvas de color verde), la mayoría de las curvas de iso-energía para sismos de foco intermedio se distribuyen principalmente en el interior del continente, aunque en la costa frente al departamento de Ancash, se observa una concentración menor de estas curvas. Al Sur de los 12°S, las curvas de energía tienden a distribuirse entre la línea de costa y el Altiplano conforme se tiende hacia la región Sur, en donde su densidad aumenta considerablemente. Al Norte de los 9° Sur, la mayoría de las curvas de iso-energía tienden a distribuirse en la zona Subandina, siendo mayor el número al Norte del departamento de Ucayali y NW de Loreto.

Desde el punto de vista cuantitativo, en la Figura 15 se observa que la mayor concentración de curvas de iso-energía se produce sobre el departamento de Arequipa con un máximo 44800ue. Al Sur de la ciudad de Lima, se ha liberado 6900ue de energía y gran parte corresponde al sismo ocurrido en enero de 1974 (6.2mb). Una segunda concentración de curvas de iso-energía es observada al Norte de Ucayali con un máximo de 18800ue y cerca a la frontera Perú - Ecuador con 76000ue, que corresponde a la liberada por un sismo ocurrido en julio de 1971 (6.4mb). Finalmente, es frente al departamento de Ancash que se libero un total de 38500ue. En sentido general, durante este periodo de tiempo y para este nivel de profundidad, la mayor cantidad de energía fue liberada en la región Central; mientras que, al Oeste de la región Norte y Este de la región Sur, no se ha liberado energía sísmica considerable.

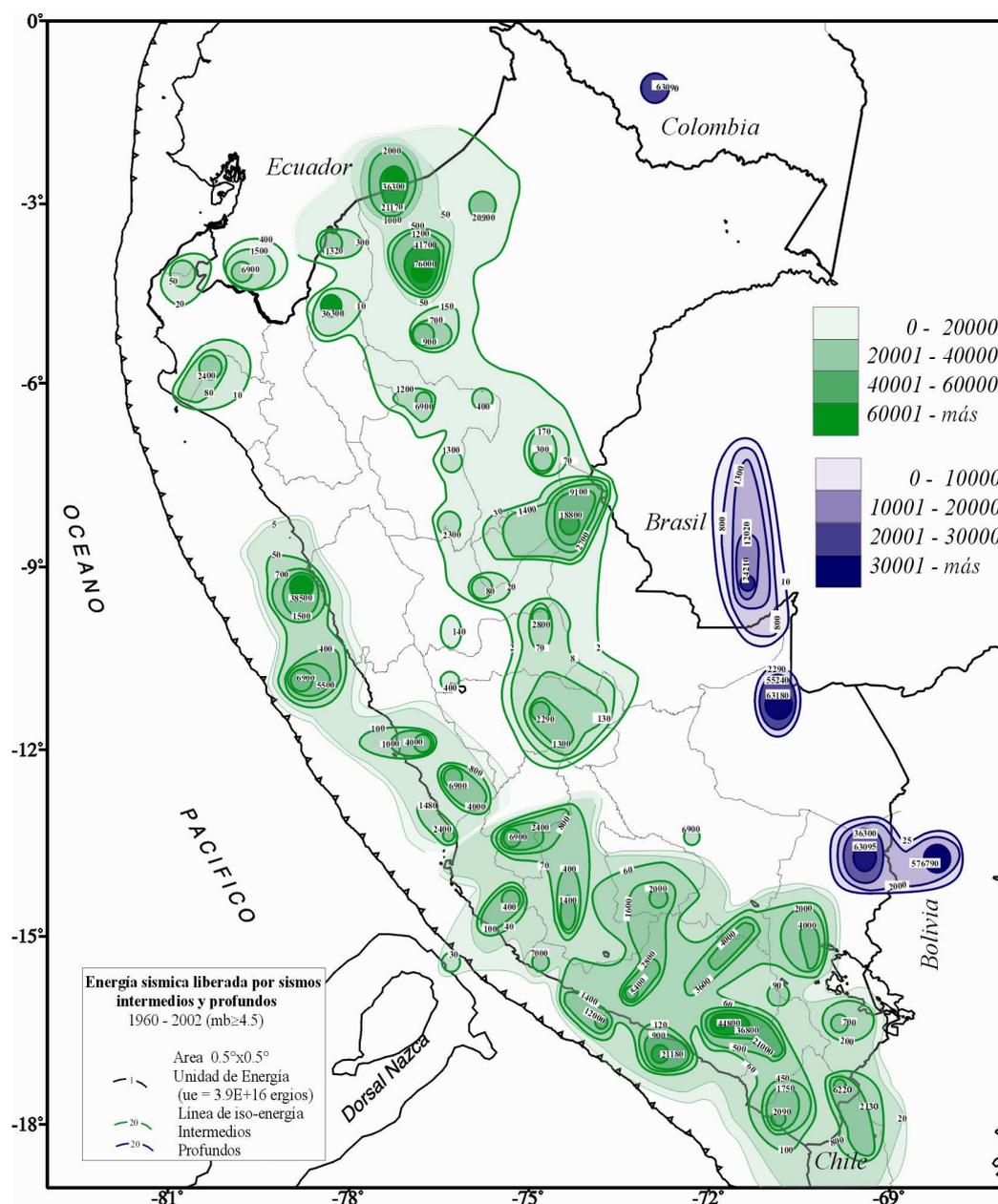


Figura 15.- Mapa de energía sísmica liberada en Perú por sismos con foco intermedio (curvas de color verde) y profundos (curvas de color azul) ocurridos entre 1960-2002. Los valores de energía están expresados en unidades de energía (ue), ver texto.

5.3.3.-Curvas de Iso-energía para Sismos con Foco Profundo ($h > 300$ km)

Las curvas de iso-energía para sismos con foco profundo (Figura 15, curvas de color azul), se concentran en dos grupos, uno localizado próximo a la frontera Perú - Brasil con un máximo de 24210ue y otro, cerca de Perú - Bolivia con un máximo de 576790ue. Gran parte de la energía liberada por el segundo grupo es debido al sismo ocurrido en junio de 1994 (7.0mb), siendo este el más grande producido en el mundo en los últimos 100 años a estos niveles de profundidad. Asimismo, al NE de la ciudad de Puno se ha liberado un total de 63095ue. Estos resultados sugieren que en los límites de frontera y a estos niveles de profundidad, se ha liberado mayor cantidad de energía en comparación con lo observado en otras regiones y niveles de profundidad, al menos durante todo el periodo de estudio.

En general, la distribución y la forma de las curvas de iso-energía han permitido configurar de manera clara la geometría de las fuentes sismogénicas presentes en Perú a diferentes niveles de profundidad. Los resultados sugieren que el potencial de una región sísmicamente activa no depende del mayor o menor número de sismos que en ella se puedan producir, sino del sismo de mayor magnitud que pueda ocurrir en un determinado periodo de tiempo.

6.- FRECUENCIA Y CUANTIFICACION DE LA ENERGIA SISMICA

Con la finalidad de determinar o conocer la frecuencia anual de los sismos y su correspondiente cantidad de energía liberada, se ha visto por conveniente agrupar a los sismos en rangos de magnitud de 0.5 a partir de la magnitud de 5.0mb. Los resultados obtenidos son presentados en barras estadísticas en comparación con la cantidad de energía sísmica liberada, ambas expresadas en términos de porcentajes. La base de datos corresponde a la misma que se ha venido utilizando en este estudio.

En la Figura 16, se observa que el mayor número de sismos se produjo en los años 1970 (130 sismos), 1996 (135 sismos) y 2001 (290 sismos). Asimismo, en esta figura se observa que el mayor número de sismos presenta magnitudes entre 4.5-5.0 mb (3400), siendo en total equivalente al 65.33% del total de los sismos; mientras que, los sismos con magnitud entre 6.6-7.0 solo representan el 0.22% del total de la sismicidad. Contrariamente, este ultimo grupo de sismos han liberado el 55.8% del total de la energía liberada durante todo el periodo de estudio y el número mayor de sismos (65.33%), solo habrían liberado el 0.26% de toda la energía. Evidentemente, esto muestra que un sismo de magnitud del orden 7mb puede liberar tanta energía con la que liberarían 60000 sismos de magnitud 5.0.

En general, durante el periodo considerado en este estudio, la mayor cantidad de energía sísmica se ha liberado durante los años 1962, 1994, 1996 y 2001, siendo mayor la energía liberada durante el año 1994 ($4.2E+22$ ergios).

En general, estos resultados sugieren que la frecuencia sísmica y la cantidad de energía liberada no tienen ninguna relación, pudiendo ocurrir un sismo de magnitud elevada que libere tanta energía como la que podría liberar gran número de sismos de menor magnitud ocurridos durante un determinado periodo de tiempo.

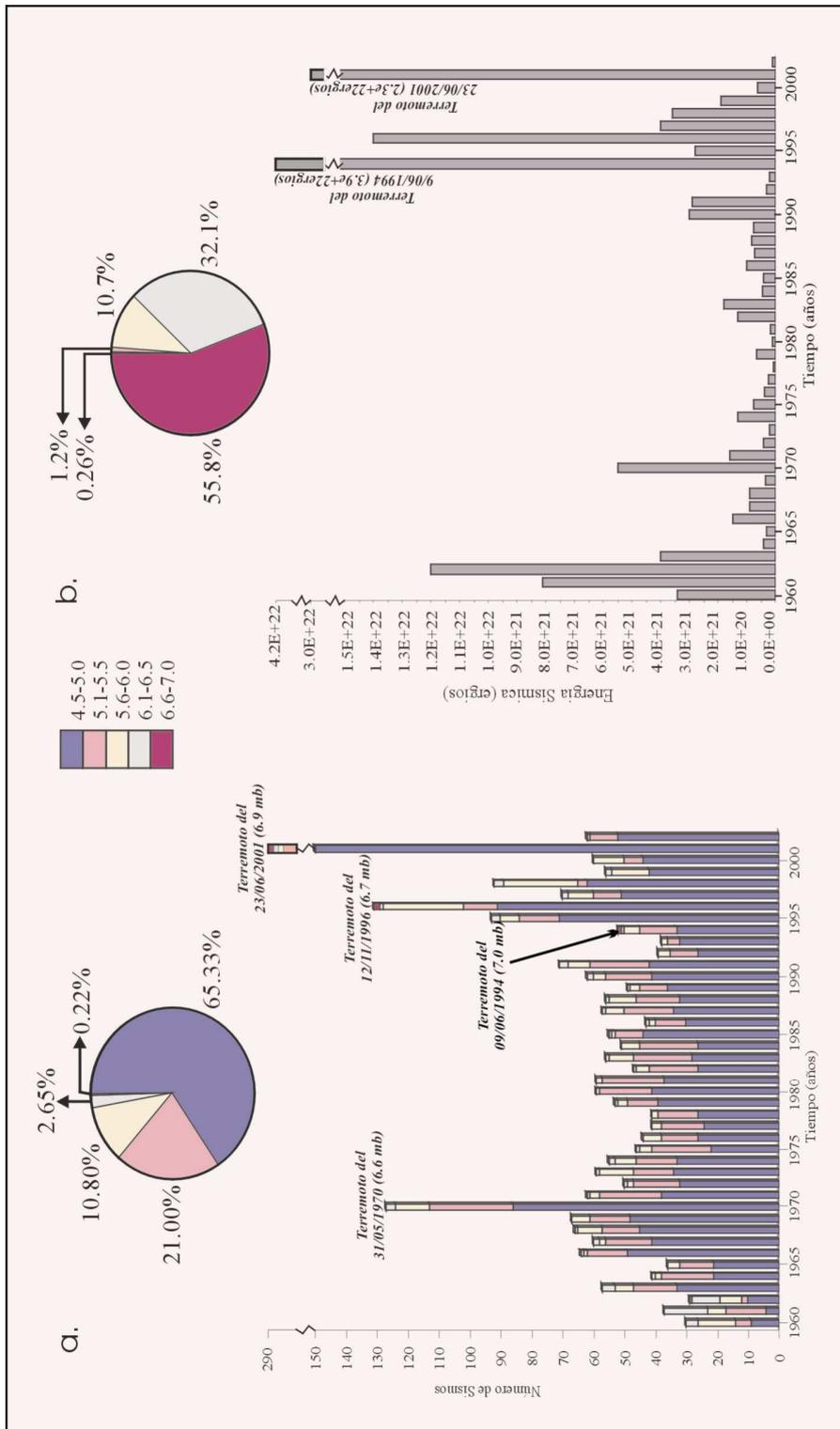


Figura 16.- a) Frecuencia sísmica para la sismicidad ocurrida en Perú entre 1960 y 2002. b) Energía sísmica liberada por los sismos ocurridos en el mismo periodo. Todos los valores están expresados en términos de porcentaje.

BIBLIOGRAFIA

- Barazangi, M. y Isacks, B. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidence from the spatial distribution of earthquakes: *Geoph. Jour. Roy. Astr. Soc.*, v. 57, 537-555.
- Barriga, V. (1939). Libro de los cabildos de la ciudad de Arequipa. Sesión del 10 de Agosto de 1555, reproducida en documentos para la Historia de Arequipa.
- 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. y 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.
- Bonnot, D, Sebrier, M. y Mercier, J. (1988). Evolution geodynamique plio quaternaire du bassin intra-cordillerain du callejon de Huaylas, región de la Cordillera Blanca, Perou. *Geodynamique*. 3, 57-83.
- Cahill, T. y Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *J. Geophys. Res*, 97, 17.503-17.529.
- Dalmayrac, B. y Molnar, P. (1981). Parallel thrust and normal faulting in Perú and constraints on the state on stress; *Earth and Plan. Sc. Let*, 55, 473-481.
- Dalmayrac, B., Laubacher, G. y Marocco, R. (1980). Geologie des Andes peruviennes, caracteres genetaux d'évolution géologique des Andes Peruviennes. *Trav. Doc. Orstom*. 96, 217 pp.
- Deverchere, J., Dorbath, C. y Dorbath, L. (1989). Extension related to a high topography: results from a microearthquake survey of the Andes of Perú and tectonics implications. *Geophys. J. Int.* 98, 281-292.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. y Stem, S. (1990). Current plate motions *Geophys J. Res*, 101, 425-478.
- Dorbath L., Cisternas A. y Dorbath, C. (1990) Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, N°3, pp 551-576.
- Dorbath L., Dorbath C., Jimenez E. y Rivera L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sud-andean zone of central Peru. *Jour. of South American Earth Sciences.*, 4, 13-24.

- Engdahl, E., Vanderhilst, y Buland, R. (1997). Global Teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 722-743.
- Hasegawa, A. y Sacks, S. (1981). Subduction of Nazca plate beneath Perú as determined by seismic observations. *J. Geophys. Res.* 86, 4971-4980.
- Grange, F., Cumming, P., Gapnepain, J., Hatzfeld, D., Molnar, P., Ocola, L., Rodríguez, A., Roecker, S., Stock, J. y Suarez, G. (1984). The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in southern Perú. *Geoph. Res. Lett.* 11(1). 38-41.
- Gutenberg, R. y Richter, C.F. (1956). Earthquake magnitude, intensity and acceleration. *Bull. Seism. Soc. Adm.* 46, 105.
- Heras, H. (2002). Análisis de la distribución del valor de "b" en la zona de subducción de Perú. Tesis de Grado UNSA. 115p
- INGEMET (1995). Geología del Perú. Sector Energía y Minas. Boletín N°55, 161p
- James, D. (1978). Subduction of the Nazca plate beneath central Perú *Geology* 6, 174-178.
- Lindo, R. (1993). Seismotectonique des andes du Perou Central: Apport des données sismologiques de haute precision. Tesis Doctoral. Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Francia.
- Marocco, R. (1980). Géologie des Andes péruviennes: Un segment E-W de la chaîne des Andes péruviennes: la déflexion d'Abancay. Etude géologique de la Cordillère Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud du Pérou. Doc. Orstom 94.
- Megard, F. and Philip, H. (1976). Plio-quadernary tectono-magmatic zonation and plate tectonics in the Central Andes: *Earth plan. Sci. Let.* 33, 231-238.
- Megard, F. (1978). Etude geologique des Andes du Perú Central. Mem. Orstom 86, 310pp.
- Polo, T. (1904). Sinopsis de los Terremotos y Volcanes de Perú. *Bol. Soc. Geog. de Lima.* Tomos III y XVI, p. 323.
- Rodríguez, L. y 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.
- Sebrier, M., Huaman, D., Blanc, J., Machare, J., Bonnot, D. y Cabrera, J. (1985). Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. IGP-LGDI Proy. Sisra, Grupo Peruano de Neotectónica, 96 pp.

- Sebrier, M., Mercier, J., Machare, J., Bonnot, D. y Cabrera, J. y Blanc, J. (1988). The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab: The Andes of central Peru. *Tectonics*. 7, 895-928.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos mas notables en el Perú (1513-1974). Boletín N°3, serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica INGEOMIN. 129pp.
- Schneider, J. y Sacks, B.(1987). Stress in the contorted Nazca plate beneath Southern Peru from Local earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, 92, pp 13887-13902
- Stauder, W. (1975). Subduction of the Nazca plate under Perú as evidenced by focal mechanism and by seismicity. *J. Geophys. Res.* 80, 053-1064.
- Spence, W., Mendoza, C., Engdahl, E. y Choy, L. (1998). Seismic subduction of the Nazca ridge as shown by the 1996 y 1997 Peru earthquakes. *PAGEOPH*.
- Suarez, G., Gagnepain, J., Cisternas, A., Hatzfeld, D., Molnar, P., Roecker, S., y Viodé, J. (1990). Tectonics deformation of the Andes and the configuration of the subducted slab in central Peru: result from a microseism experiment. *Geophys. J. Int.* 103, 1-12
- Suarez, G., Molnar, P. y Burchfield, B. (1983). Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the central Andes of Peru, Ecuador y southern Colombia. *J. Geophys. Res.* 88, 10403-10428.
- Tavera, H. (1993). La Tierra, Tectónica y Sismicidad. Monografía-DST, IGP.30 pp
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectonica de Perú. 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. y Agüero, C. (2000). Catalogo Sísmico de Perú, 1471-1982. Versión revisada y actualizada. Centro Nacional de Datos Geofísicos-IGP, 420p.
- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5:519-539.
- Tavera, H., Fernandez, E., Salas, H., Antayhua, Y. y Bernal, I. (2000). Mecanismo focal de los terremotos de Arequipa del 08 de octubre de 1998 (Mw=6.0) y 03 de abril de 1999 (Mw=6.5). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, V.89, 21-31.
- von Huene, R., Pecher, I. y Gutscher, M. (1996). Development of the accretionary prism along Peru and material flux after subduction of Nazca Ridge. *Tectonics*, 15, 19-33.
- Udias, A. y Mezcua, J. (1997). Fundamentos de Geofísica. Segunda edición, UCM. Madrid, 419 pp.

OTROS ESTUDIOS DE ENERGIA SÍSMICA EN PERU

Para el Perú, los únicos estudios sobre energía sísmica que se conoce son los realizados por Ocola (1966) y Silgado (1978). Ambos autores analizan las características de la distribución espacial de las curvas de iso-energía correspondiente a sismos ocurridos en el Perú en diferentes periodos de tiempo. Ocola (1966) utiliza 490 sismos con $m_b > 5.0$ extraídos del Catálogo Mundial y propone un mapa de liberación de energía haciendo uso de la relación establecida por Gutenberg y Richter (1956). Según el autor, conocida la magnitud del sismo y la relación magnitud-energía, es factible delinear las zonas de mayor actividad sísmica a partir de la distribución espacial de las curvas de iso-energía y así definir la forma de las principales fuentes sísmogénicas en el Perú.

Por otro lado, Silgado (1978) realiza un estudio similar utilizando información sísmica del periodo 1960-1974 ($m_b > 6.0$), también extraída del Catalogo Mundial y la relación de Gutenberg y Richter (1956). El autor elabora un mapa de curvas de iso-energía a partir del cual identifica a la zona costera como la de mayor potencial sísmico, en relación a otras zonas del interior del país. Sin embargo, en ambos casos las curvas de iso-energía coinciden con la distribución en superficie de los sismos.

Los resultados obtenidos por estos autores han permitido, inicialmente identificar y cuantificar las presencia de diversas fuentes sísmogénicas en el Perú.

Bibliografía

- Gutenberg, B. y Richter, C. (1956). Earthquake magnitude, intensity and acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 46, 105-107.
- Ocola, L. (1966). Earthquake activity of Peru. *Geophysical and Polar Research Center, Department of Geology, University of Wisconsin, Madison*, 509-528p.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos mas notables ocurridos en el Peru (1513-1974). *Boletín N° 3, serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica INGEOMIN*, 129 p.