

## GEOMETRÍA DE LA PLACA DE NAZCA EN EL BORDE OCCIDENTAL DE SUDAMÉRICA A PARTIR DE LAS TENDENCIAS MEDIAS DE SISMICIDAD

Rodrigo QUISPE, Hernando TAVERA & Isabel BERNAL

Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología Instituto Geofísico del Perú  
Calle Calatrava 216, Urb. Camino Real, La Molina Lima, Perú  
E-mail: rod\_qc@axil.igp.gob.pe ; jtavera@geo.igp.gob.pe

### ABSTRACT

In this study one describes the main characteristics of the space distribution of the seismicity in the Western of South America border from a data base of 9849 earthquakes extracted of the NEIC catalogue for 1980-2001 ( $m_b > 4.0$ ). The shallow seismicity is distributed on the continent in two seismogenic sources, first considers earthquakes with origin in the friction of plates process and the second, in the superficial deformation of the continental plate. The intermediate earthquakes must to the internal deformation of the Nazca plate below the continent. The origin of the deep earthquakes is investigation subject. The earthquakes with origin in the process of friction of plates and internal deformation of oceanic plate, has allowed to determine the geometry of the Nazca Plate (PN) within the subduction process.

The results indicate that the geometry of the PN is heterogeneous and is characterized to present one normal and subhorizontal subduction types. The normal subduction is present in Colombia, North of Ecuador, South of Peru, North and the South of Chile, and the subhorizontal in the South of Ecuador, North and Center of Peru and Center of Chile. The distribution of tendencies of seismicity suggests between each type of subduction, the PN supports a contortion. Also, it has been observed that in the zones where the subhorizontal subduction appears, the PN presents greater distances because it stays fries and it is not absorbed by the mantle. Contrary, in the regions of normal subduction the PN is absorbed completely to depths of 280 km; therefore, present is related to the volcanic activity in these regions.

### RESUMEN

En este estudio se describe las principales características de la distribución espacial de la sismicidad en el borde Occidental de Sudamérica a partir de una base de datos de 9849 sismos extraídos del catálogo del NEIC para el periodo 1980-2001 ( $m_b > 4.0$ ). La sismicidad con foco superficial se distribuye sobre el continente en dos fuentes sismogénicas, la primera considera sismos con origen en el proceso de fricción de placas y el segundo, en la deformación superficial de la placa continental. Los sismos con foco intermedio son debidos a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente. El origen de los sismos con foco profundo, aún es tema de investigación. Los sismos con origen en el proceso de fricción de placas y deformación interna de la placa de Nazca, ha permitido determinar la geometría de la Placa de Nazca (PN) dentro del proceso de subducción.

Los resultados indican que la geometría de la PN es heterogénea y se caracteriza por presentar dos tipos de subducción: una *normal* y otra *subhorizontal*. La subducción *normal* está presente en Colombia, Norte de Ecuador, Sur de Perú, Norte y Sur de Chile, y la *subhorizontal* en el Sur de Ecuador, Norte y Centro de Perú, y Centro de Chile. La distribución de las tendencias medias de sismicidad sugieren que entre cada tipo de subducción, la PN soporta una contorsión. Asimismo, se ha observado que en las zonas donde se presenta la subducción *subhorizontal*, la PN alcanza distancias mayores, desde la fosa debido a que se mantiene fría y no es absorbida por el manto. Contrariamente, en las regiones de subducción *normal*, al presentar mayor ángulo de inclinación y ser continua, la PN es absorbida completamente a profundidades mayores a 280 km, pudiendo esta estar relacionada con la presencia de actividad volcánica en estas regiones.

## INTRODUCCIÓN

El borde Occidental de Sudamérica, desde el punto de vista sísmológico, es considerado como el de mayor potencial sísmico de la Tierra. En esta región, la actividad sísmica está asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca (litosfera oceánica) debajo de la Sudamericana (litosfera continental) originando sismos a diferentes niveles de profundidad y con magnitudes tan elevadas que pueden llegar a producir grandes catástrofes con cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Los primeros estudios realizados para conocer la geometría de las placas subducentes fueron realizados por Wadati y Benioff en el año 1935. Estos autores propusieron que la geometría de la placa dentro del proceso de subducción, tendría su origen, en la presencia de una gigantesca falla de penetración entre dos cuerpos rígidos; hipótesis muy cercana a la que actualmente define a una zona de subducción. En la actualidad, la superficie que define la geometría de una placa que subduce por debajo de otra, conocida como zona de Wadati-Benioff.

La geometría de la placa de Nazca bajo la Sudamericana ha sido ampliamente analizada y evaluada por diversos autores a partir de la distribución de la sismicidad mundial (Barazangi y Isacks, 1976; Kanamori y McNally, 1982; Cahill y Isacks, 1992; Taboada et al; 1998; Madariaga, 1998). Asimismo, existen otros estudios regionales realizados para Colombia (Taboada et al, 1998; Coblenz y Richardson, 1996; Pennington, 1981; Meijer y Wortel, 1992), Ecuador (Hey et al, 1977; Cooper et al, 1987; Bourdon, 1999; Bourdon et al, 2002), Perú (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Cahill y Isacks, 1992; Lindo, 1993; Tavera y Buforn, 1998; Tavera, 1998; Tavera y Buforn, 2001; Bernal, 2002) y Chile (Madariaga, 1998; Astiz y Kanamori, 1988; Smalley y Isacks, 1987; Fuenzalida et al, 1992; Araujo y Suarez, 1994; Comte y Suarez, 1995) utilizando datos extraídos del NEIC o de redes regionales. En general, todos estos estudios sugieren la presencia de una placa de Nazca con una geometría muy heterogénea y caracterizada principalmente por presentar diferentes modos de subducción por debajo del continente: subducción normal y subhorizontal. Desde Colombia hasta el Sur de Chile, se postula la presencia de regiones donde la placa de Nazca subduce con ángulos que varían entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$ . Asimismo, se asume que los cambios entre los dos tipos de subducción se realiza con una contorsión de la Placa de Nazca involucrando áreas de diferentes dimensiones. Sin embargo, estos resultados deben ser cuantificados con datos homogéneos y recientes, ya que solo así existirá la seguridad de que los parámetros hipocentrales han sido correctamente determinados y esto, es importante al momento de analizar la geometría de la placa de Nazca a partir de la distribución espacial de los sismos.

En el presente estudio se hace uso de una base de datos reciente y que considera los parámetros hipocentrales de sismos ocurridos entre 1980 y 2001, todos con magnitudes mayor e igual 4.0 mb. Esta base de datos

ha sido extraída del catalogo del NEIC (National Earthquake Information Center) y es utilizada para analizar y evaluar la distribución espacial de los sismos en el borde Oeste de Sudamérica y configurar la geometría de la placa de Nazca a partir de las tendencias medias de la sismicidad en función de la profundidad de sus focos.

## CARACTERÍSTICAS GEODINÁMICAS

El entorno geodinámico del borde Occidental de Sudamérica es muy complejo, este tiene su origen en la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, la misma que es causante de la continua deformación de la corteza continental hasta la formación de la Cordillera de los Andes, los sistemas de fallas, las cadenas de volcanes, etc. En la actualidad, la interacción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana es acompañado de diversos y grandes rasgos tectónicos (Dewey y Bird, 1970; Dickinson, 1971; Audebaud, et al, 1973), tales como (Figura 1):

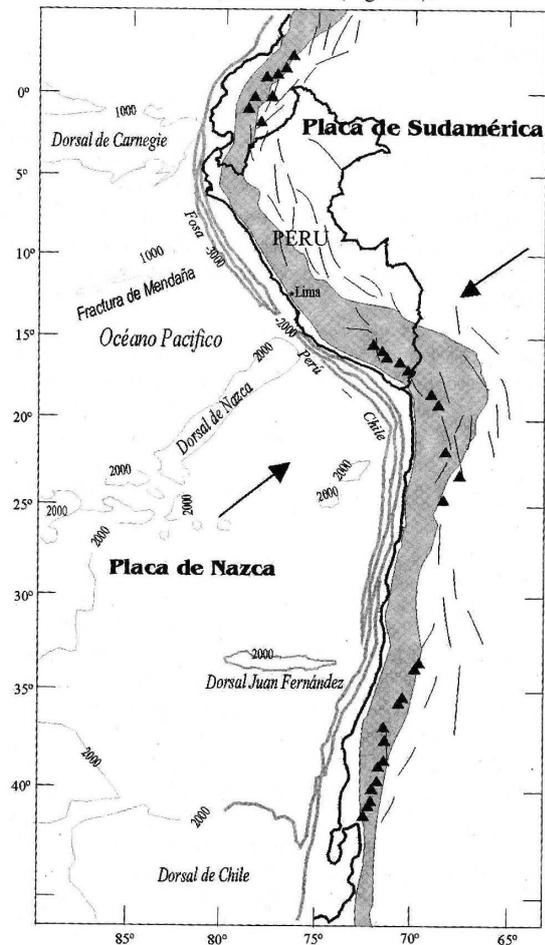


Fig. 1: Esquema que muestra los principales rasgos tectónicos presentes en la placa de Nazca y en el borde Occidental de Sudamérica. Los triángulos indican la localización de los volcanes y las líneas representan a los principales sistemas de fallas. El área sombreada corresponde a la Cordillera de los Andes y las flechas la dirección de convergencia de placas (DeMets et al, 1990).

*Las Dorsales Oceánicas*, son cordilleras submarinas que se elevan sobre el fondo oceánico y tienen su origen en antiguas zonas de generación de corteza: Dorsal de Carnegie (entre 32°S y 34°S), Dorsal de Nazca (entre 15°S y 24°S) y la Dorsal de Juan Fernández (entre 32°S y 34°S). La presencia de estas dorsales es importante dentro de los diferentes procesos sismotectónicos que se desarrollan en el borde Occidental de Sudamérica.

*La Fractura de Mendaña*, se localiza en el extremo NW de la región central de Perú entre 10°S y 12°S de Latitud, y presenta un ancho de 150 km aproximadamente con una orientación N62° (Kulm et al, 1983). Esta fractura sería una antigua zona de divergencia de placas.

*La Fosa Perú-Chile* marca el inicio del proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana sobre una longitud de más de 5,000 km desde Colombia hasta la Tierra del Fuego en Chile. La fosa Perú-Chile se presenta paralela al borde Occidental de Sudamérica y alcanza profundidades máximas de 6000m (Heras, 2002). La fosa se orienta en dirección NE-SW en Ecuador y Colombia, NNW-SSE en el Norte y Centro de Perú, NW-SE en la región Sur de Perú y finalmente, N-S en Chile.

*La Cordillera de los Andes* es una cadena montañosa que se extiende a lo largo del borde Occidental de Sudamérica, desde Venezuela hasta la Tierra del fuego en Chile, sobre una longitud de 8000 km y espesores que fluctúan entre 50 a 70 km (James, 1971). La Cordillera de los Andes, es una de las formaciones orográficas más altas del mundo, segunda después del Himalaya, con alturas de hasta 6,959 m.s.n.m. (nevado Aconcagua, Chile). Esta cordillera, determina y condiciona territorios en 7 países: Chile Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela.

*La Cadena Volcánica* se distribuye formando tres agrupamientos (Figura 1): el primero sobre Colombia y Ecuador entre las latitudes 5°N y 2°S con una orientación NE-SW, el segundo en la zona Sur de Perú y Norte de Chile entre 16°S y 27°S con una orientación NE-SE y el tercero, al Sur de Chile por debajo de los 33°S hasta la Tierra del Fuego con una orientación NE-SW.

*Los Sistemas de Fallas* presente en el borde Occidental de Sudamérica deben su origen a la continua deformación de la Cordillera de los Andes y en general, se distribuyen paralelos a la misma con diferentes longitudes y características. Entre los principales sistemas de fallas se puede mencionar los siguientes: en *Colombia* el Romeral, Cauca, Farallones, Buenaventura, Golfo de Tortugas, Anchicayá, río Magdalena, Santander de Quilichao y Huilan (OSSO, 1998); en *Ecuador*: las fallas de Guayaquil, Babahoyo, Santo Domingo, Toisán, Maldonado, Jama, Quinindé, Girón – Cuenca (Suarez et al, 1983); en *Perú*: fallas de Moyobamba, Satipo, Madre de Dios, Cordillera Blanca, Tambomachay, Huaytapallana (Bernal, 2002) y en *Chile*: Andina, Atacama, Domeyko, Pucuro, Chacabuco, Liquiñe y Ofqui (Muñoz y Charrier, 1996).

Todos los elementos geodinámicos descritos anteriormente son causantes del importante índice de sismicidad presente en el borde Oeste de Sudamérica, de

ahí que los sismos se distribuyan de manera heterogénea y a diferentes niveles de profundidad.

## DATOS

Un catálogo sísmico define una base de datos sísmicos válida para realizar cualquier estudio dentro del campo de la sismología y los resultados dependerá de la calidad de la información debiendo ser lo más homogénea posible, evaluada y calificada de manera cuantitativa dependiendo del procedimiento mediante el cual fue obtenida. Asimismo, esta información debe ser lo más actual posible ya que solo así se tiene la seguridad de que los parámetros focales de los sismos han sido correctamente determinados con la ayuda de un mayor número de estaciones sísmicas.

Los sismos utilizados en este estudio fueron extraídos del catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC) para el periodo comprendido entre 1980 – 2001. El total de los datos fueron evaluados a fin de cuantificar sus parámetros hipocentrales a partir de la construcción de mapas y secciones verticales de sismicidad para diferentes áreas y con diversas orientaciones. Asimismo, se elaboró curvas de frecuencia sísmica para definir el umbral mínimo de magnitud a partir, del cual se puede asumir que la base de datos es homogénea. Los sismos para los cuales el NEIC reportó la profundidad de 33 km (profundidad normal) fueron eliminados ya que este valor es atribuido cuando los algoritmos no permiten calcular correctamente este parámetro. Por otro lado, se procedió a eliminar las réplicas asociadas a terremotos de magnitud elevada a partir de gráficos de frecuencia temporal de los sismos. Finalmente, estos procedimientos permitieron construir una base homogénea de datos compuesta de 9849 sismos con magnitudes mayores e iguales a 4.0mb.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SISMICIDAD

Para realizar un análisis detallado de la distribución espacial de los sismos en el borde Occidental de Sudamérica, se procede a elaborar mapas de sismicidad en función de tres rangos de profundidad ya establecidos por diversos autores para el Perú (Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001 y Bernal, 2002): sismos con foco superficial ( $h < 60$ km), intermedio ( $60 < h < 300$ km) y profundo ( $h > 300$ km).

### *Sismos con foco superficial*

En la Figura 2a, se observa que los sismos con foco superficial se distribuyen en mayoría entre la fosa y la línea de costa, siendo esta zona donde se producen los sismos de magnitud elevada con relativa frecuencia, tal como el ocurrido en la región Sur Perú el 23 de Junio del 2001. Algunas concentraciones de sismos son notables sobre las latitudes 2°N, 3°S, 15°S y 33°S coincidiendo, las tres últimas, con la incidencia de las dorsales oceánicas al

continente. Asimismo, se nota la presencia de algunas áreas con un menor índice de sismos (Ls1, Ls2 y Ls3) y estas pueden ser asociadas a la presencia de algunas zonas de laguna sísmica. Otro grupo de sismos superficiales se distribuyen en el interior del continente sobre los principales sistemas de fallas activas, formando agrupamientos de sismos como el que se presenta a 5°S y 35°S. En general, la sismicidad con foco superficial esta asociada directamente al proceso de subducción en sus niveles iniciales (fricción de placas) y a la deformación cortical presente en el interior del continente.

#### **Sismos con foco intermedio**

En la Figura 2b se observa que la sismicidad con foco intermedio se distribuye de manera general en el interior del continente formando diferentes agrupamientos con mayor o menor número de sismos. El primer grupo se localiza por encima de los 2°N sobre el territorio de Colombia, el segundo entre 2°S y 11°S con tendencia a distribuirse hacia su extremo oriental dentro los territorios de Ecuador y Perú. El tercer agrupamiento se extiende sobre el territorio peruano y chileno entre 14°S y 25°S, este grupo considera un mayor número de sismos con respecto a los anteriores. Un último agrupamiento se localiza entre las latitudes 27°S y 37°S sobre casi todo el territorio chileno. La distribución espacial de los sismos con foco intermedio muestran la presencia de importantes áreas con ausencia de sismicidad pudiendo ser asociadas a áreas que no han sufrido ruptura (I1, I2, I3, I4). La sismicidad con foco intermedio está relacionada con los procesos de fricción y deformación de la placa subducente y es el indicador directo de la geometría de la placa de Nazca por debajo del continente.

#### **Sismos con foco profundo**

Los sismos con foco profundo, se distribuyen formando tres grupos bien definidos (Figura 2b); el primero se localiza en el límite Perú-Brasil entre 6°S y 11°S con una orientación N-S, y el segundo próximo al límite Perú-Bolivia entre 13°S y 14°S de latitud con una orientación predominante E-W. Un tercer grupo, se ubica entre 21°S y 29°S latitud Sur con un rumbo predominante N-S sobre territorio argentino y boliviano. La naturaleza del origen de estos sismos aun sigue siendo tema de investigación.

#### **DISTRIBUCIÓN EN PROFUNDIDAD DE LOS SISMOS**

La distribución en profundidad de los sismos es analizada partir de una serie de 62 secciones verticales de sismicidad construidas y enumeradas de Norte a Sur, tal como se muestra en el Anexo. Las secciones han sido elaboradas con una orientación perpendicular a la línea de fosa con anchos y longitudes que varían de acuerdo a la densidad de sismos en cada región, y por el cambio en la orientación de la línea de fosa. La idea es *obtener secciones sísmicas que consideren un aceptable número de sismos*

*a fin de poder determinar la tendencia media de la sismicidad representativa en cada sección.* A fin de realizar un mejor análisis de los datos, se ha visto por conveniente dividir el borde Occidental de Sudamérica en tres regiones: La Región I considera a Colombia y Ecuador, la Región II a Perú y la Región III a Chile, SW de Bolivia y NW de Argentina.

#### **Región I**

Para esta región se ha elaborado 7 secciones sísmicas divididas en dos grupos con longitudes de 1000 km desde de la línea de fosa y anchos de 100 a 150 km estimados en función del índice de sismicidad presente, tal como se observa en la Figura 3. En las figuras del Anexo, se puede observar que en las secciones 1 y 2 los sismos siguen una distribución lineal con una pendiente del orden de 30°, hasta una profundidad no mayor a 200 km y distancias de 350 km desde la línea Lb1. En las secciones 3, 4 y 5, los sismos se encuentran más dispersos pero aproximadamente siguen un lineamiento con una pendiente del orden de 25° hasta una profundidad de 150 km y distancias en superficie del orden de 300 km desde la línea base (Lb1 y Lb2). En la sección 6 el número de sismos se incrementa y sigue un alineamiento con un ángulo de 20° hasta una profundidad de 170 km, para luego presentar una aparente horizontalidad hasta una distancia en superficie del orden de 700 km desde Lb2. Por último, en la sección 7 la distribución de los sismos se presenta de manera casi homogénea con una pendiente de 15° hasta profundidades de 130 km, para luego presentarse de manera casi horizontal hasta distancias de 750 km desde Lb2. Asimismo, en todas las secciones se observa importantes agrupamientos de sismos con foco superficial en el interior del continente y a distancias entre 300-500 km aproximadamente desde la línea base, los cuales estarían asociados a sistemas de fallas activas presentes en la zona Andina de Colombia y Ecuador.

#### **Región II**

Para la Región II se ha elaborado 23 secciones (8 a 29 en el Anexo) separadas en dos grupos (Figura 4). Todas las secciones presentan longitudes de 1000 km desde la línea base (Lb3 y Lb4) y anchos del orden de 150 km (Norte y Centro de Perú) y 100 km (Sur de Perú) debido a la mayor densidad de sismos. En las secciones 8 y 9 los sismos se distribuyen en profundidad con una pendiente del orden de 15° y 20° hasta una profundidad promedio de 110 km para luego presentarse de forma casi horizontal hasta distancias de 650 y 850 km respecto a Lb3. En las secciones 10, 11, 12 y 13 se observa que los sismos se distribuyen siguiendo una pendiente de 20° hasta una profundidad de 200 km. En las secciones 12 y 13 la ausencia de sismos es notoria a distancias entre 300 y 500 km para presentarse de manera continua en todas las secciones hasta distancias de 800 km desde Lb3. En la sección 13 y a una distancia de 670 y 800 km se observa un agrupamiento

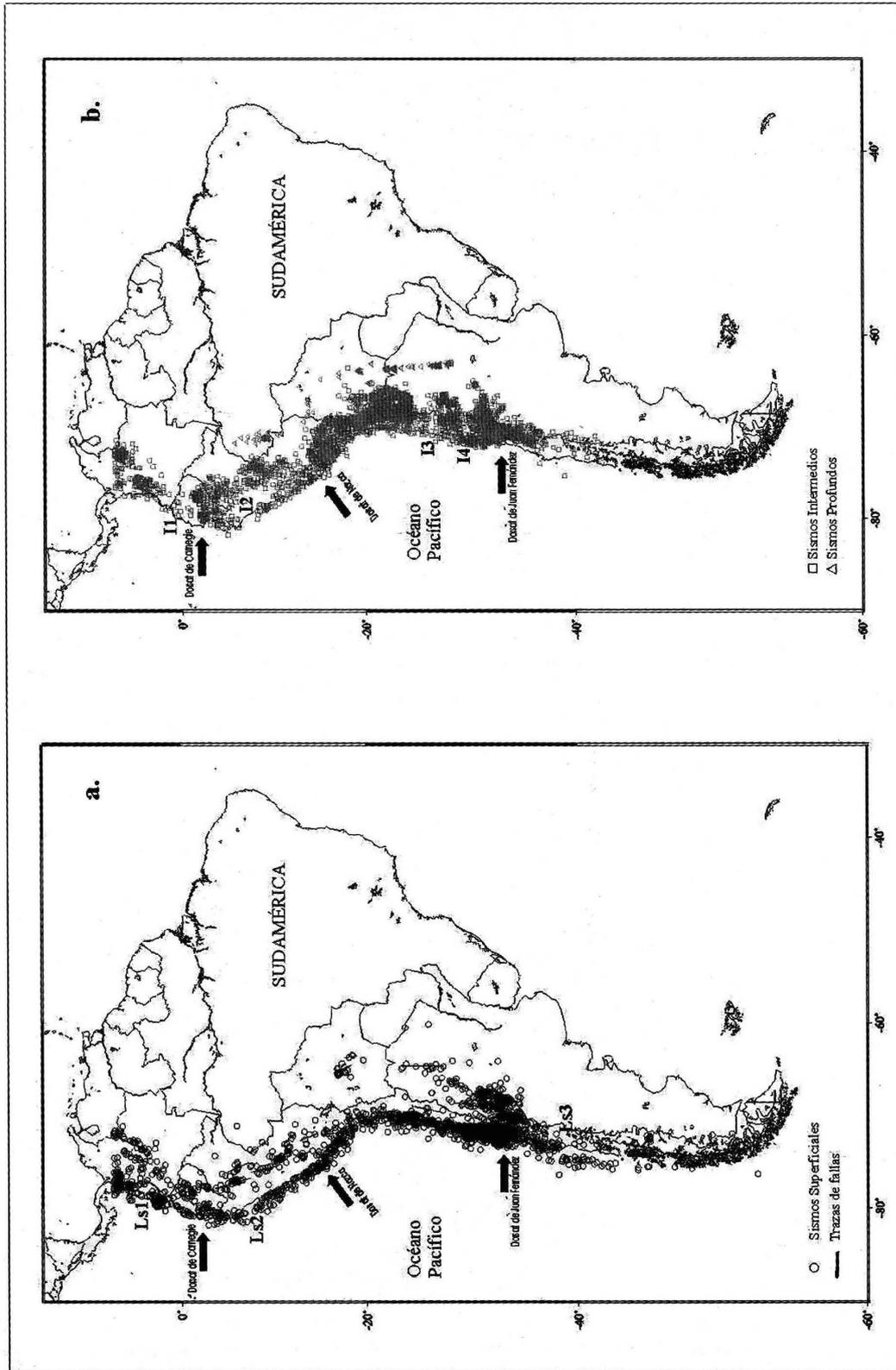


Fig. 2: Mapa de sismicidad para Sudamérica, período 1980-2001 ( $m_b > 4.0$ ). a) Sismos con foco superficial ( $h < 60 \text{ km}$ ) y b) Sismos con foco intermedio ( $60 < h < 300 \text{ km}$ ) y profundo ( $h > 300 \text{ km}$ ).

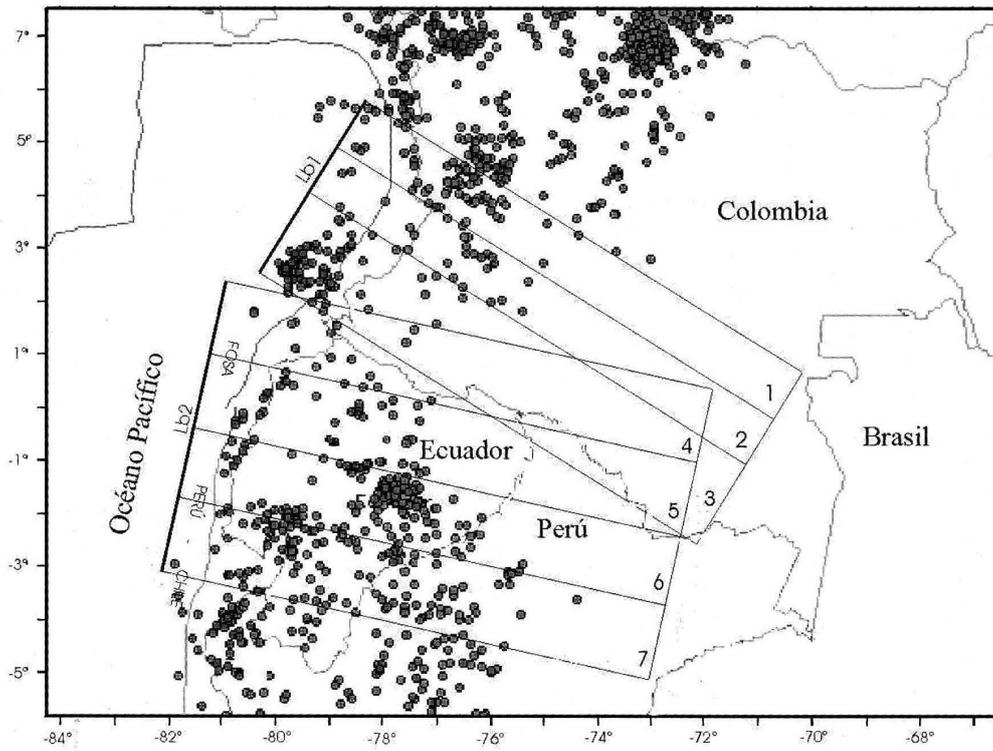


Fig.3: Mapa de sismicidad para la Región I, periodo 1980-2001 ( $m_b^{34.0}$ ). Las áreas corresponden a las secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la línea de fosa. Lb1 y Lb2 indican las líneas base.

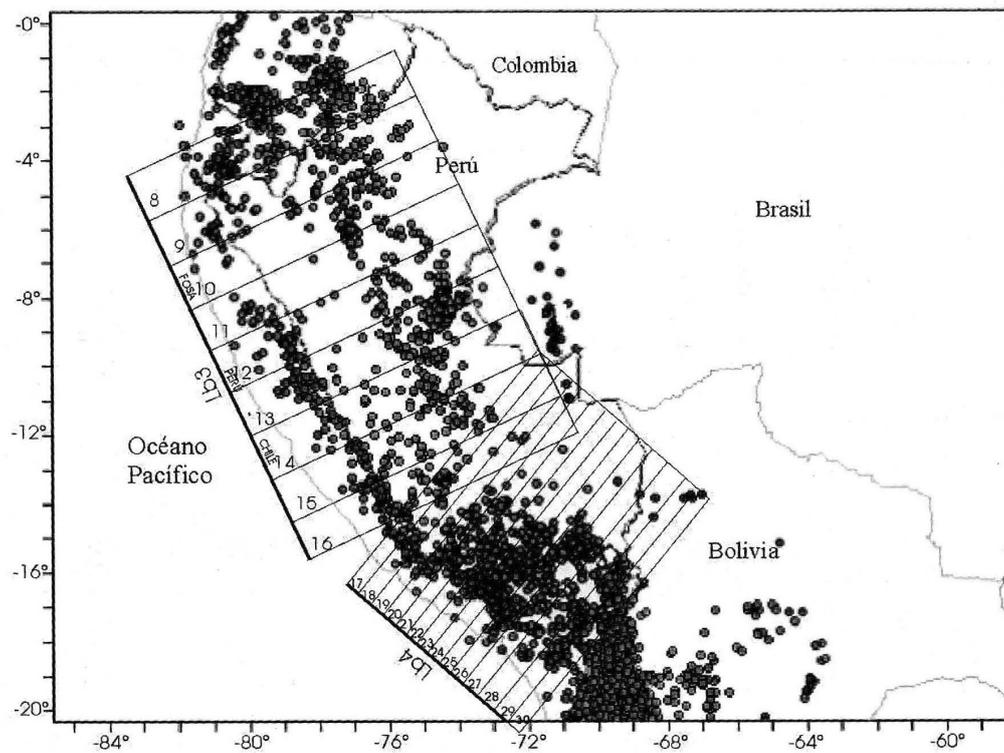


Fig. 4: Mapa de sismicidad para la Región II, periodo 1980-2001 ( $m_b^{34.0}$ ). Las áreas corresponden a las secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la línea de fosa. Lb3 y Lb4 indican las líneas base

significativo de sismos que sugieren un ligero cambio en la distribución de los sismos. En las secciones 14, 15 y 16 se observa que los sismos tienden a presentarse de manera más homogénea que las anteriores y sigue un lineamiento con una pendiente del orden de  $25^\circ$  hasta profundidades de 130 km para luego distribuirse de manera prácticamente horizontal hasta distancias del orden de 550 y 650 km respecto a Lb3. En las secciones 17, 18, 19 y 20 el número de sismos disminuye en relación a las secciones anteriores y la sismicidad se distribuye siguiendo un lineamiento con una pendiente de  $25^\circ$  desde la línea de fosa hasta profundidades de 100 km y distancias de 400 a 500 km desde Lb4. En las secciones 21, 22, 23 y 24 se observa que los sismos alcanzan una profundidad de 150 km con una pendiente de  $30^\circ$  para luego continuar de manera horizontal hasta distancias de 400 km sobre la superficie. En la sección 24 se observa un incremento en la profundidad sugiriendo la presencia de un cambio en la distribución de los sismos. Finalmente, en las secciones 25 a 30 se observa un patrón diferente al de las secciones anteriores, ya que la horizontalidad desaparece conforme se incrementa el número de la sección hasta profundidades de 250 km, aunque el ángulo de inclinación se mantiene constante. En las secciones del 8 al 16 y entre 22 y 25 se observa la presencia de sismos próximos a la superficie a distancias que varían entre 400 y 700 km desde la línea base Lb3 y Lb4. Todos estos sismos tendrían su origen en la deformación cortical de la placa de continental debido a la presencia de fallas activas.

### Región III

En la Figura 5, se presenta la distribución de las secciones verticales correspondientes a la Región III (secciones 31 a 62 en el Anexo). El total de las secciones fueron divididas en *cuatro* grupos y cada sección presenta una longitud de 1000 km a partir de las líneas base Lb5, Lb6, Lb7 y Lb8, y anchos del orden de 100 km para el Norte de Chile (Figura 5a), 50 y 150 km para el Centro y Sur de Chile respectivamente (Figura 5b). Al igual que en las regiones anteriores, los anchos fueron determinados en función del índice de sismicidad. En las secciones 31 al 39 los sismos se distribuyen de manera similar, siendo la característica más resaltante el ángulo de inclinación que se encuentra entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$  para un rango máximo de profundidad de 300 km y distancias en superficie de 730 km. En las secciones 38 y 39, y a una distancia de 500 km desde la fosa se observa un ligero cambio en la orientación de sismos sugiriendo que no toda la Placa de Nazca ha recuperado totalmente su horizontalidad.

En las secciones 40 al 46 se observa una disminución en el número de sismos, pero estos se distribuyen sobre una pendiente de  $10^\circ$ - $20^\circ$  continua hasta alcanzar una profundidad máxima de 150 km a partir de la cual se observa una aparente horizontalidad de los sismos que se hace más notoria en las secciones 44, 45 y 46 hasta una distancia de 730 km desde la línea base. En las

secciones 47 y 48, el número de sismos disminuye considerablemente para reagruparse muy cerca de la línea de fosa; además, de indicar la presencia de dos áreas ubicadas entre 280-330 km y 600-800 km desde la fosa con total ausencia de sismos. En las secciones 49 al 52 se observa un aumento considerable en el número de sismos, así como en el ángulo de inclinación ( $20^\circ$ ) hasta alcanzar una profundidad del orden de 130 a 150 km para luego distribuirse de manera casi horizontal hasta una distancia máxima del orden de 800 km desde la línea base Lb7. En las secciones 51 y 52 la distribución de los sismos muestra un incremento en la profundidad de sus focos sugiriendo la presencia de una zona de transición entre la subducción subhorizontal y la normal. Las secciones 53 a 56, muestran la presencia de una subducción normal con sismos se distribuyen con una pendiente de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  constante hasta alcanzar profundidades máximas del orden de 200 km, siendo la distancia máxima en superficie del orden 600 y 700 km desde la línea base Lb7. Finalmente, en las secciones 57 al 62 se observa que los sismos, en menor número, siguen un patrón similar en su distribución con una pendiente del orden de  $25^\circ$ - $30^\circ$ , constante hasta una profundidad máxima del orden de 200 km. Asimismo, entre las secciones 32-33 y 47-58 se observa la presencia de un importante número de sismos con foco superficial en el interior del continente, los mismos que tendrían su origen en los importantes sistemas de fallas que se distribuyen de Norte a Sur sobre el Altiplano Boliviano, territorio Chileno y borde Oeste de Argentina.

El análisis de la distribución en profundidad de los sismos ha permitido observar total heterogeneidad con la presencia de sismos con origen en la superficie de fricción de las placas y en la deformación interna de la placa oceánica. Asimismo, se ha identificado la presencia de áreas con total ausencia de sismos que sugieren la presencia de probables lagunas sísmicas. La variación del ángulo de inclinación de la superficie de fricción de placas con valores que oscilan entre  $10^\circ$  a  $30^\circ$  y de la distribución de los sismos en profundidad sugiriendo que la placa de Nazca presenta dos modos de subducción o geometría: una *subhorizontal* con profundidades máximas de 120 km aproximadamente y distancias que varían entre 500 y 800 km desde la línea base, y una subducción *normal* caracterizada por un alineamiento de los sismos continuo hasta una profundidad del orden de 300 km y distancias en superficie menores a 500 km.

En la distribución de la sismicidad, también se ha observado la presencia de importantes agrupaciones de sismos a diferentes niveles de profundidad que sugieren la presencia de áreas de mayor deformación en el interior de la placa de Nazca. La presencia de importante actividad sísmica superficial en el interior del continente en las regiones donde se ha observado que los sismos se distribuyen de manera subhorizontal por debajo del continente. Finalmente, existe una coherencia entre las regiones caracterizadas por la subducción de tipo normal y la presencia de cadenas volcánicas en superficie.

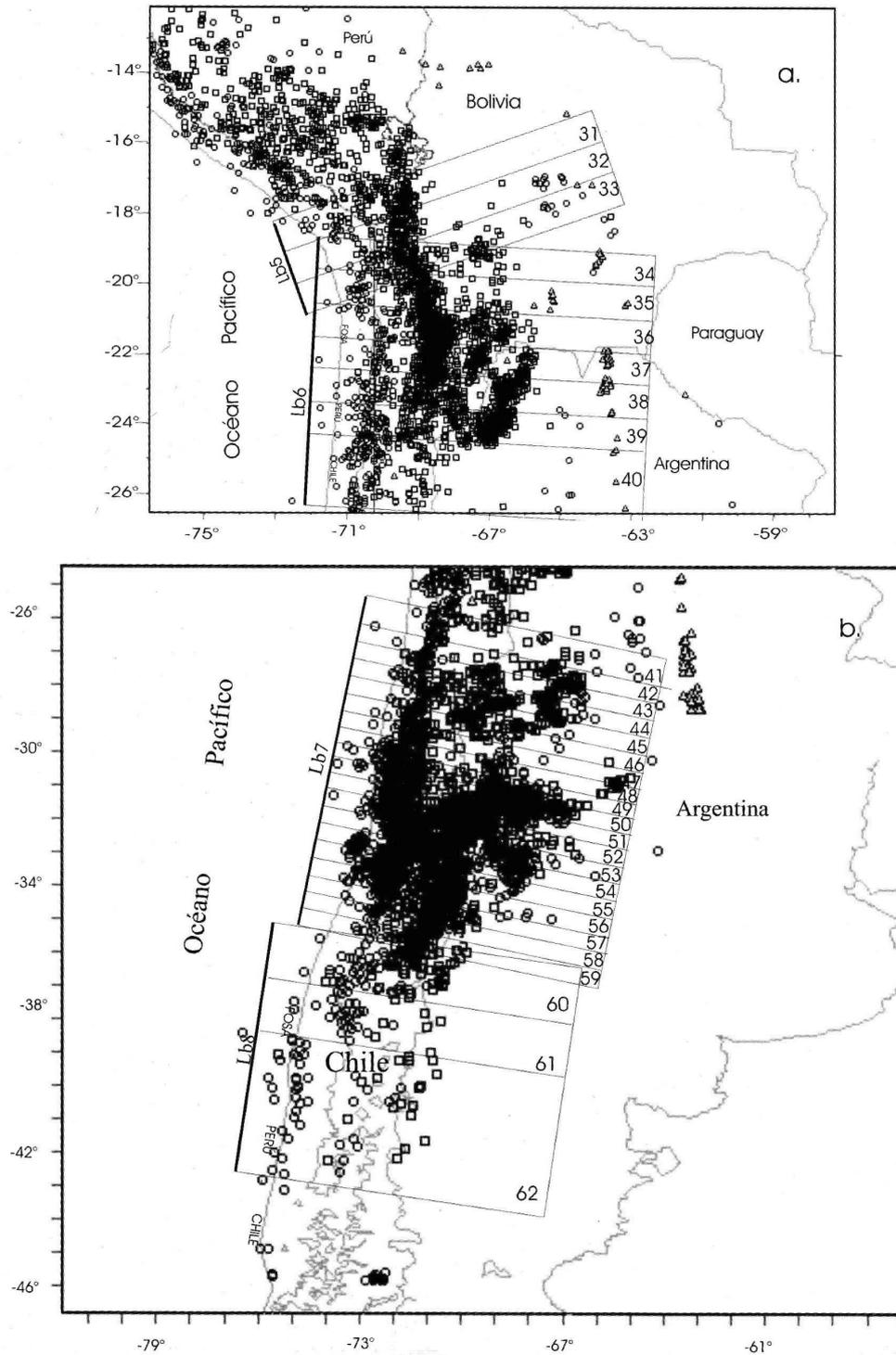


Fig. 5: Mapa de sismicidad para la Región III, periodo 1980-2001 ( $mb^3_4$ ). a) Las áreas corresponden a las secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la línea de fosa para el Norte de Chile y b) Las áreas corresponden a las secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la línea de fosa para el Centro y Sur de Chile. Lb5, Lb6, Lb7 y Lb8 indican las líneas base.

### GEOMETRÍA DE LA PLACA DE NAZCA (PN)

Para definir la geometría de la PN dentro del proceso de subducción en el borde Oeste de Sudamérica, se ha analizado cada una de las 62 secciones verticales de sismicidad mostradas en el Anexo, a fin de ajustar la distribución de los sismos a una tendencia media de sismicidad característica para cada región. Para tal objetivo, se ha visto por conveniente no considerar los sismos con foco superficial, ya que estarían asociados a la presencia de fallas activas presentes en el interior del continente. Para las áreas con ausencia de sismos, se ha seguido una tendencia media probable a fin de construir el total de la sección. A continuación, se analiza la forma de las líneas de tendencia media para cada una de las regiones definidas anteriormente.

#### *Tendencias medias de Sismicidad: Región I*

Para la Región I se ha elaborado 2 gráficos de tendencias medias. En la Figura 6a se observa que la PN subduciría bajo la placa Sudamericana siguiendo una pendiente del orden de  $30^\circ$  hasta una profundidad del orden de 200 km y distancias en superficie de 280 km desde la línea de fosa configurando una subducción de tipo normal. Según la Figura 6b, las tendencias medias sugieren una ligera disminución en el ángulo de subducción ( $10^\circ$  a  $20^\circ$ ) y un cambio en la posible forma de la placa de Nazca por debajo del continente con profundidades del orden de 110 km y distancias, desde la fosa, de 400 y 600 km dentro de una subducción de tipo subhorizontal. Las tendencias medias de las secciones 4, 5 y 6 estarían sugiriendo la contorsión de la PN entre los dos modos de subducción observados en este grupo. *Estos resultados son coherentes con los descritos por Pennington (1981), Cooper et al (1987), Meijer y Wortel (1992), Coblentz y Richardson (1996), Taboada et al (1998), y Bourdon et al (2002).*

#### *Tendencias medias de Sismicidad: Región II*

Para esta región se ha elaborado 3 gráficos de tendencias medias de sismicidad para las zonas Norte, Centro y Sur de Perú. El primer gráfico (Figura 6c) corresponde a la zona Norte de Perú. En esta figura se observa que las tendencias de las secciones del 8 al 13 muestran que la PN subduce con un ángulo del orden de  $15^\circ$  a  $25^\circ$  hasta una profundidad de 100–150 km a partir de la cual la placa se desplaza de manera horizontal por debajo del continente hasta distancias de 550 y 750 km como máximo. Un segundo grupo considera las secciones para la zona Centro de Perú (secciones 14 - 19) y tal como se observa en la Figura 6d, las tendencias muestran que la PN subduce con un ángulo de  $30^\circ$  hasta una profundidad de 100 km para luego presentarse de manera horizontal hasta distancias que varían entre 270 y 520 km desde la fosa. Para la zona Sur de Perú (Figura 6e), la subducción de la PN se inicia en promedio con un ángulo de  $30^\circ$ . En las secciones 20, 21 y 22 la PN es casi horizontal hasta

distancias de 400 km; mientras que, las tendencias de las secciones 23, 24 y 25 muestran un aumento gradual en la profundidad de la placa sugiriendo la contorsión de la misma hasta configurar una subducción de tipo normal con las tendencias 26 a 30. *Los resultados obtenidos coinciden con los descritos por Grange et al., (1984), Hasegawa y Sacks (1981) y Schneider y Sacks (1987) para la región Sur; con Rodríguez y Tavera (1991) para la región Central y con Barazangi y Isacks (1976), Cahill y Isacks (1992), Tavera y Buforn (1998) y Bernal (2002) para todo el Perú. Las pequeñas diferencias que puedan existir entre todos estos resultados, pueden ser atribuidos a las diferentes bases de datos utilizadas, pero en términos generales los resultados son similares.*

#### *Tendencias Medias de la Sismicidad: Región III*

Para la región III se ha elaborado 4 gráficos de tendencias medias de la sismicidad debido a la gran cantidad de secciones utilizadas para el análisis. El primer gráfico (Figura 7a), considera las secciones 31 al 43 de la zona Norte de Chile y en ellas se observa que la PN subduce de manera similar que en la región Sur de Perú; sin embargo, las tendencias de las secciones 38 a 43 disminuyen gradualmente su profundidad indicando que la PN se contorsiona para pasar de una subducción *normal* a otra *subhorizontal*. Todas las tendencias medias alcanzan distancias de 600 km por debajo del continente. Según la Figura 7b, para la zona Centro de Chile (secciones 44 al 49), las tendencias sugieren que la PN subduce con una pendiente del orden de  $15^\circ$  a  $25^\circ$  hasta profundidades que oscilan entre 100 y 120 km para luego hacerse horizontal hasta distancias en superficie de 500-700 km por debajo del continente. Las tendencias medias representadas en la Figura 7c (secciones 50–57) indican que la PN presenta una pendiente de  $20^\circ$  -  $25^\circ$  hasta una profundidad de 150 km a partir de la cual se hace horizontal hasta distancias de 680 km. Las secciones 52, 53 y 54 aumentan gradualmente su profundidad mostrando la contorsión de la PN para pasar a una subducción de tipo normal con distancias de 280 km desde la fosa. Finalmente, las tendencias del 58 al 62, según la Figura 7d, sugieren que la PN subduce con un ángulo de  $25^\circ$  -  $30^\circ$  continuo hasta una profundidad máxima de 200 km y distancias en superficie del orden de 300-450 km, dando forma a una subducción de tipo normal. *En general la geometría encontrada coincide con la descrita en anteriores estudios: Barazangi y Isacks (1976), Astiz y Kanamori (1988), Smalley y Isacks (1987), Fuenzalida et al (1992), Araujo y Suarez (1994), Comte y Suarez (1995) y Madariaga (1998). Las pequeñas discrepancias en la ubicación de las inflexiones de la placa de Nazca pueden ser atribuidas a las diferentes técnicas y bases de datos utilizadas en cada estudio.*

La distribución de las tendencias medias de la sismicidad en el borde Oeste de Sudamérica sugiere que la placa de Nazca subduce por debajo del continente de manera heterogénea, pudiéndose identificar dos tipos de subducción: *normal* y *subhorizontal*. La subducción

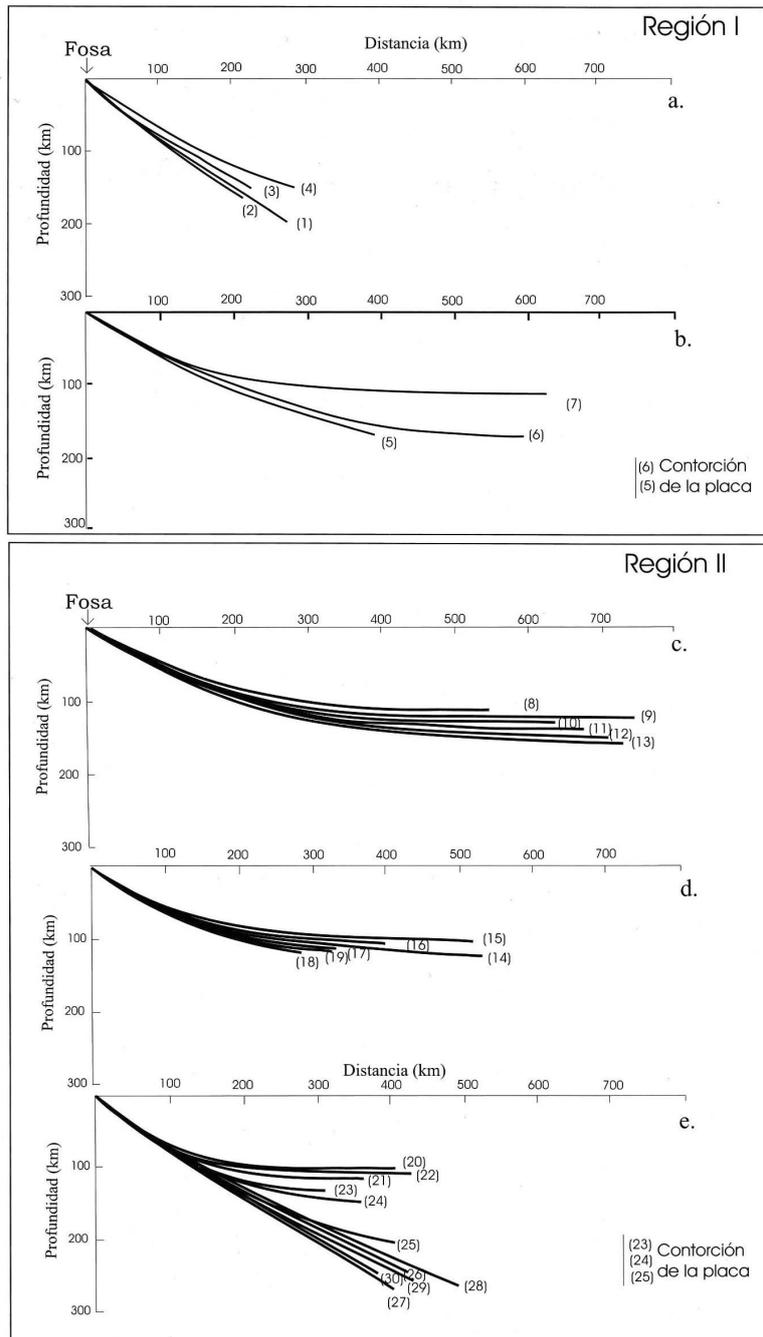


Fig. 6: Tendencias medias de la sismicidad para el borde Occidental de Sudamérica: Región I y Región II.

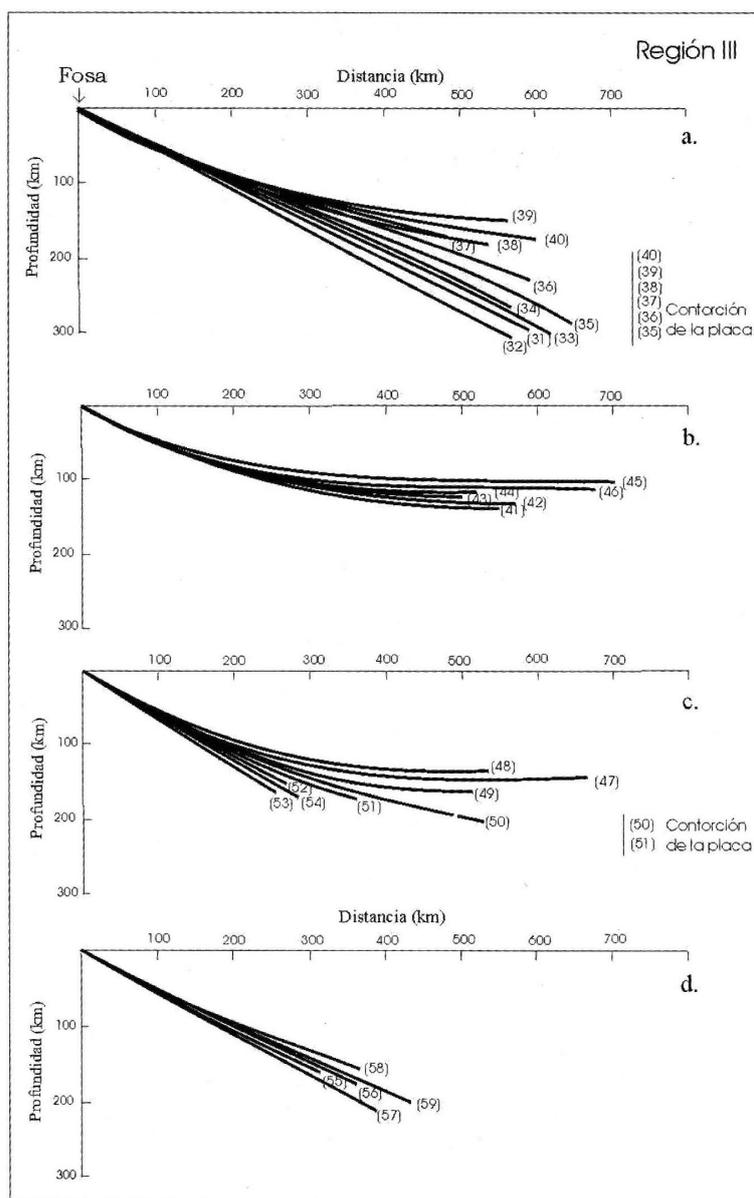


Fig. 7: Tendencias medias de la sismicidad para el borde Occidental de Sudamérica: Región III.

*normal* se presenta en Colombia, Norte de Ecuador, Sur de Perú, Norte y Sur de Chile, y se caracteriza porque la PN subduce inicialmente con un ángulo promedio de 30° continuo hasta profundidades del orden de 200 km. En este tipo de subducción, la placa de Nazca alcanza distancias, desde la fosa, del orden de 400 km. La subducción de tipo *subhorizontal* esta presente en Sur de Ecuador, Norte y Centro de Perú, y Centro de Chile y en este caso, la PN subduce con un ángulo que varía entre 15° a 25° continuo hasta profundidades de 120 km a partir de la cual se hace casi horizontal hasta distancias de 700 km como máximo en las regiones Norte de Perú y Centro de Chile.

Entre cada tipo de subducción, las tendencias medias de la sismicidad sugieren claramente la contorsión de la placa en las latitudes 1°S, 15°S, 25°S y 32°S. Asimismo, se ha observado que en las zonas donde se presenta la subducción de tipo *subhorizontal* la placa de Nazca alcanza mayores distancias desde la fosa, debido a que se conserva aun fría y no es absorbida por el manto. Contrariamente, en las regiones de subducción *normal*, al presentar mayor ángulo de inclinación y ser continua, la placa oceánica es absorbida completamente a profundidades mayores a 300 km. Esta característica es coherente con la presencia de actividad volcánica en estas regiones.

## CONCLUSIONES

El proceso de subducción de la placa de Nazca bajo el borde Occidental de Sudamérica, da origen a la ocurrencia continua de sismos a diferentes niveles de profundidad. Esta sismicidad, tiene su origen en el proceso de fricción de placas, deformación interna de la PN y deformación de la placa Sudamericana. Los sismos con origen en el proceso de fricción de placas y deformación interna de la placa, ha permitido realizar una aproximación para la geometría de la PN por debajo del borde Occidental de Sudamérica.

La distribución espacial de los sismos, en el borde Occidental de Sudamérica, se presenta de manera heterogénea. Los sismos con foco superficial ( $h \leq 60$ km) se distribuyen en dos grupos: el primero entre la línea de fosa y la costa, siendo mayor el número de sismos sobre el territorio chileno y menor en Ecuador y Colombia. Estos sismos están asociados al proceso de subducción en sus primeros niveles de profundidad (fricción entre placas). Un segundo grupo se localiza en el continente y tiene su origen en los principales sistemas de fallas activas que se distribuyen sobre o paralelas a la Cordillera de los Andes. Los sismos con foco intermedio ( $60 < h \leq 300$ km) están relacionados con el proceso de deformación interna de la PN por debajo del continente y su distribución irregular sugiere que la placa está sujeta a diferentes regímenes de esfuerzo, siendo mayor por debajo del borde Ecuador - Perú y en la zona central de Chile. La actividad sísmica con foco profundo ( $300 < h \leq 700$ ) se presenta en menor número sobre la parte oriental de Perú, el Altiplano Boliviano y en la región Norte de Argentina. El origen de estos sismos

aún es tema de investigación.

La distribución en profundidad de los sismos y sus tendencias medias analizados en un total de 62 secciones verticales ha permitido aproximar una posible geometría para la PN por debajo del borde Oeste de Sudamérica. Los resultados sugieren la presencia de una placa con geometría muy heterogénea pudiéndose identificar la presencia alternada de dos modos de subducción, una *normal* y otra *subhorizontal*. En la subducción *normal* (Colombia, Norte de Ecuador, Sur de Perú, Norte y Sur de Chile), la PN se introduce debajo del continente con un ángulo medio de 30° constante hasta profundidades de 280 km como máximo; mientras que, en la subducción *subhorizontal* (Sur de Ecuador, Norte y Centro de Perú, y Centro de Chile), el ángulo de subducción de la placa disminuye a 15° - 25° hasta profundidades de 120km para luego ser casi horizontal hasta distancias de 750km como máximo.

Los cambio en el modo de subducción y las tendencias medias de la sismicidad sugieren que la placa de Nazca soporta una contorsión que involucra áreas de diferentes dimensiones. En las áreas de subducción *subhorizontal*, la placa de Nazca alcanza longitudes de hasta 800 km por debajo del continente sugiriendo que la placa aun se mantiene fría y no puede ser absorbida por el manto; mientras que, en las zonas de subducción *normal*, la placa es absorbida rápidamente a profundidades del orden de 280km. Esta característica es coherente con la presencia de volcanes en la zona de subducción *normal*. Las variación en la geometría de la placa de Nazca coincide con la llegada de las dorsales oceánicas (Carnegie, Nazca y Juan Fernández) al borde Oeste de Sudamérica y con la topografía de la Cordillera de los Andes.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Director Técnico del Instituto Geofísico del Perú, Dr. Hernán Montes, por su constante apoyo a los diversos trabajos de investigación que se realizan en el CNDG-Sismología. Contribución N° 016-2003/CNDG-IGP.

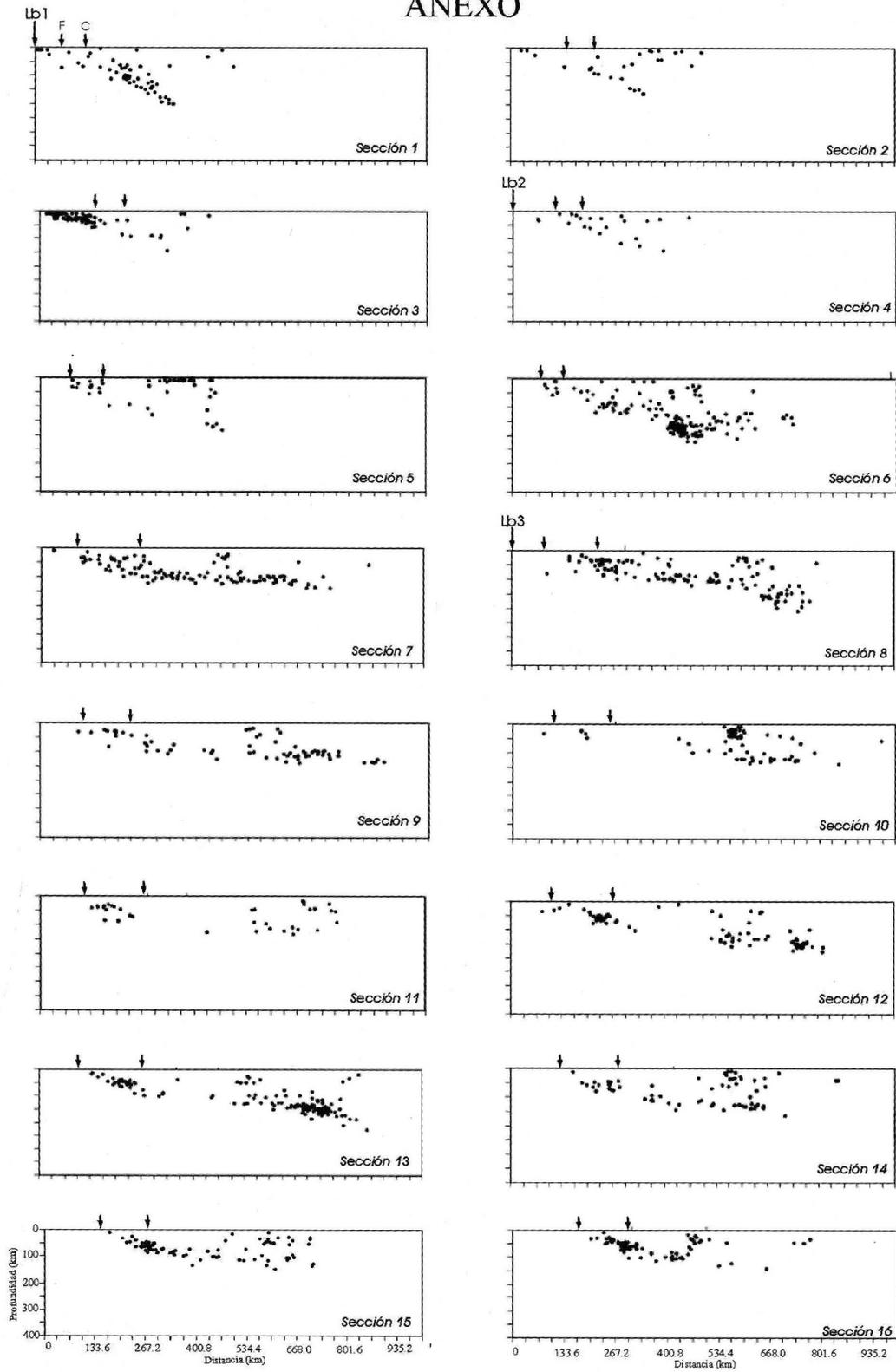
## BIBLIOGRAFÍA

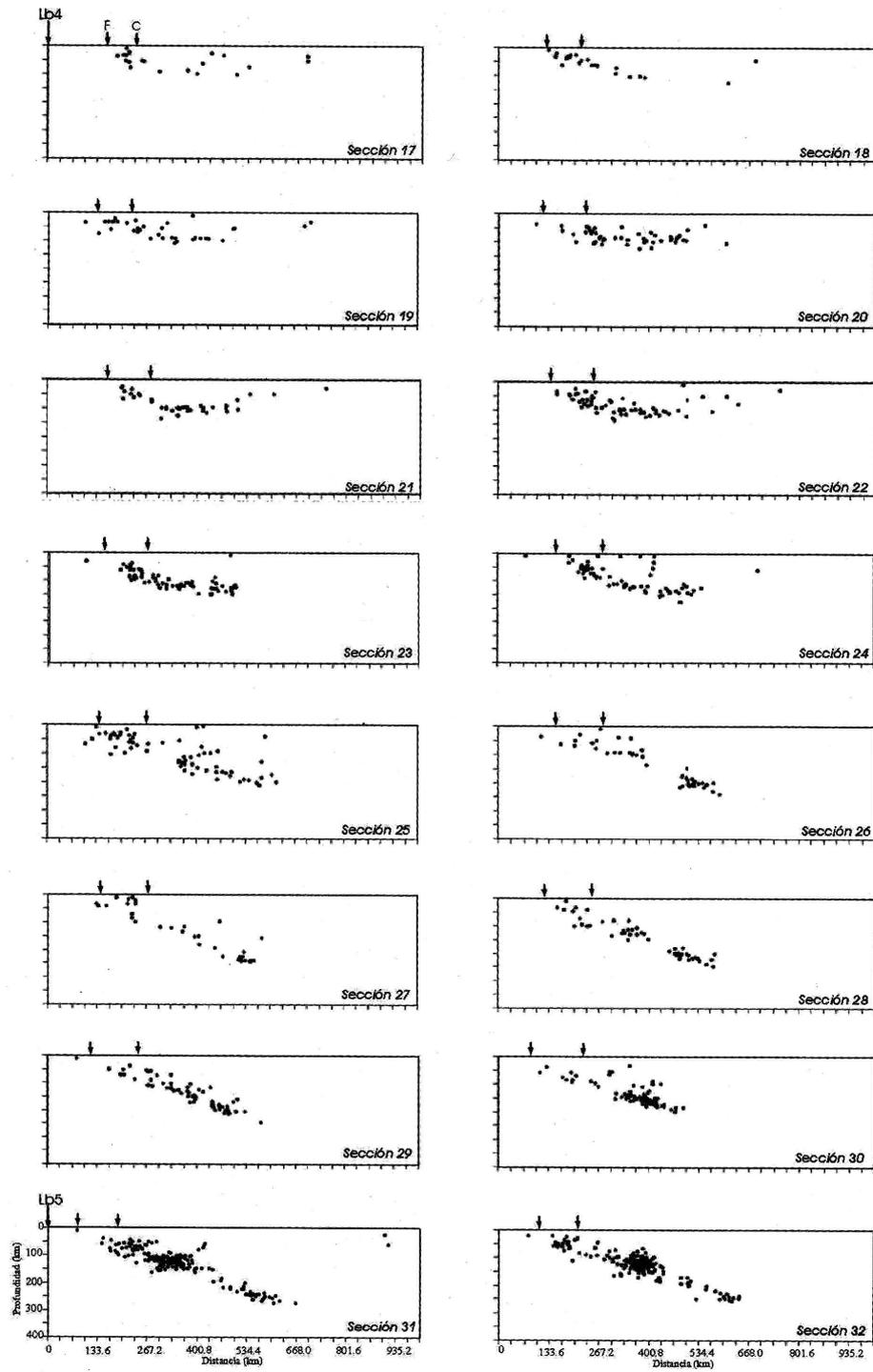
- AUDEBAUD E., CAPDEVILLA R., DALMAYRAC B., DEBELMAS J., LAUBACHER G., LEFEVRE C., MAROCCO R. & MARTINEZ C. (1973).- Les traits géologiques essentiels des andes Centrales. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn., 15, 73-114.
- ARAUJO M. & SUAREZ G. (1994).- Geometry and state of stress of subduction Nazca plate beneath central Chile and Argentina: evidence from teleseismic data. Geophys. J. Int., 116, 283-303.
- ASTIZ L. & KANAMORI H. (1988).- Large intermediate depth earthquake and the subduction process, Phys. Earth Planet. Inter., 80-166.

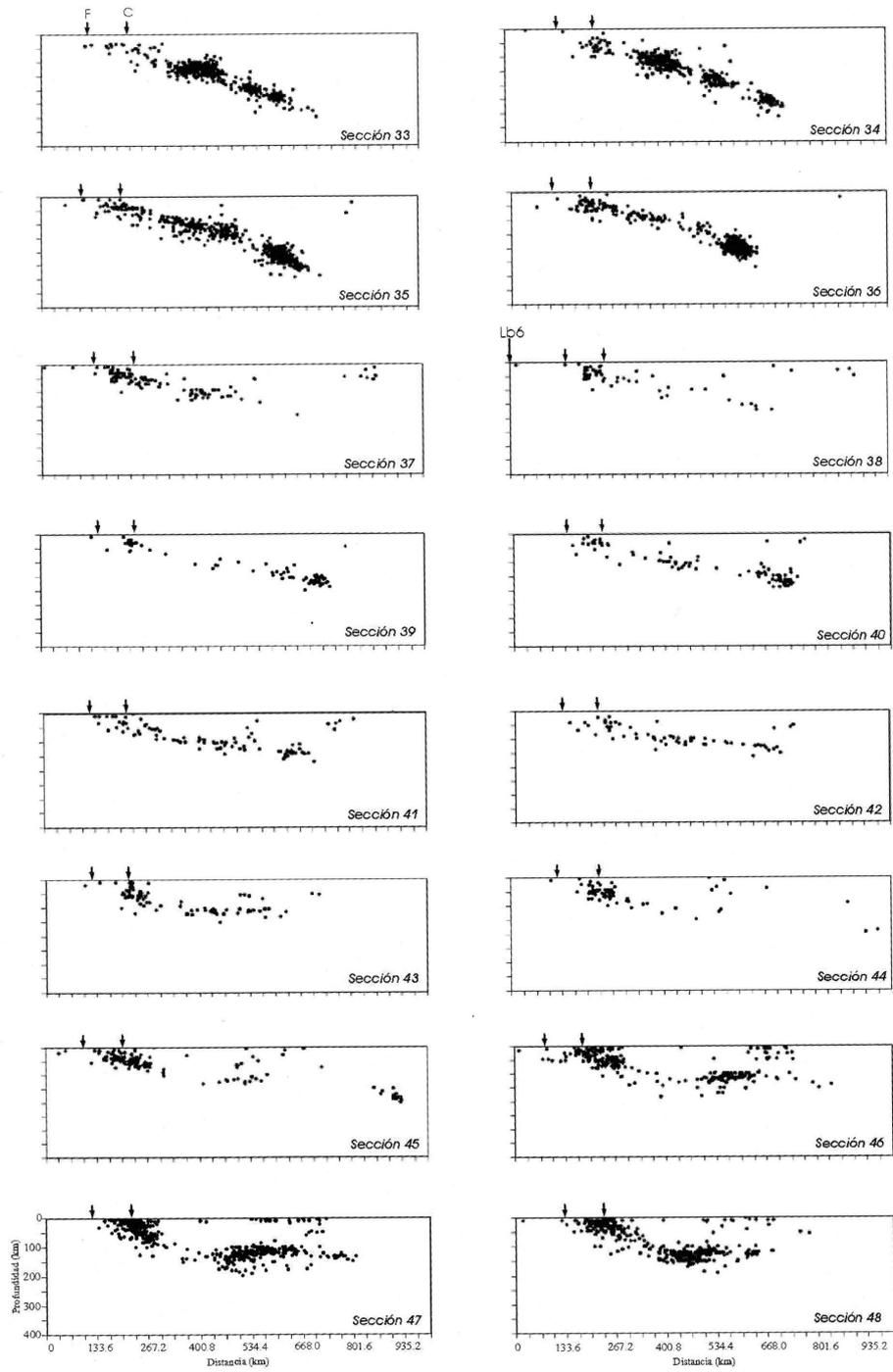
- BARAZANGI M. & ISACKS B.** (1976).- Spatial distribution of earthquakes subduction of the Nazca plate beneath América. *Geology*, 4, 686-692.
- BERNAL I.** (2002).- Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Agustín, 169pp.
- BEVIS M. & ISACKS B.** (1984).- Hypocentral trend surface analysis: Probing the geometry of Benioff zone. *J. Geophys. Res.* 89, 6.153-6.170.
- BOURDON E.** (1999).- Conséquences pétrogénétiques de la subduction d'une ride asismique: l'exemple du volcanisme de la marge équatorienne. Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale soutenue le Vendredi, 250 pp.
- BOURDON E., EISSEN J., GUTSCHER M., MONZIER M., HALL M. & COTTON J.** (2002).- Respuesta magmática a la subducción de una cordillera asísmica: el caso de la margen ecuatorial. *Boletín del Instituto Geofísico*, Quito, Equateur.
- CAHILL T. & ISACKS B.** (1992).- Seismicity and shape of the subduct Nazca plate. *J. Geophys. Res.* 97, 17.503-17.529.
- COBLENTZ D. & RICHARDSON R.** (1996).- Analysis of the South American intraplate stress field. *J. Geophys. Res.* V.101, 8.643-8.657.
- COMTE D. & SUAREZ G.** (1995).- Stress distribution and geometry of the subduction Nazca plate in northern Chile using teleseismically recorded earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 122, 419-440.
- COOPER P., MILHOLLAND P. & DUNNEBIER F.** (1987).- Seismicity of the Galapagos 95.5°W propagating rift. *J. Geophys. Res.* 87, 14.091-14.112.
- DEMETSC., GORDON R., ARGUS D. & STEMS.** (1990).- Current plate motions *Geophys. J. Res.* 101, 425-478.
- DEWEY J. & BIRD J.** (1970).- Mountain belts and the new Global Tectonics. *Jour. Geophys. R.*, 75, 14, 2625-2647 p.
- DICKINSON W.** (1971).- Plate tectonics models of geosynclines. *Earth. Planet Sci. Letters*, 10, 165-174 p.
- FUENZALIDA A., PARDO M., CISTERNAS A., DORBATH L., COMPTE D. & KAUSEL E.** (1992).- On the geometry of the Nazca Plate subducted under Central Chile (32-34.45°S) as inferred from microseismic data, *Tectonophysics*, 1-11.
- GRANGE E., CUMMINGAM P., GAPNEPAIN J., HATZFELD D., MOLNAR P., OCOLAL., RODRIGUEZ A., ROECKER S., STOCK J. & SUAREZ G.** (1984).- The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in southern Peru. *Geoph. Res. Lett.* 11(1). 38-41.
- HASEGAWA A. & SACKS S.** (1981).- Subduction of Nazca plate beneath Peru as determined by seismic observations, *J. Geophys. Res.* 86, 4971-4980.
- HERAS H.** (2002).- Análisis de la distribución del valor de "b" en la zona de subducción de Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Agustín, 115 pp.
- HEY R., JOHNSON G. & LOWRIE A.** (1977).- Recent plate motions in the Galapagos area, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1385-1403.
- JAMES D.** (1971).- Andean crustal and upper mantle structure, *J. Geophys. Res.* V76, 3246-3271.
- KANAMORI H. & MCNALLY K.** (1982).- Variable rupture model of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bol. Soc. Seism. Am.*, v72, 1249-1254.
- KULM L. DYMOND J. & SHEIDEGGER K.** (1983).- Nazca plate and andean forearc studies. *Tectonophysics*, 83-93
- LINDO R.** (1993).- Seismotectonique des Andes du Peru Central: Apport des données sismologiques de haute precision. Tesis Doctoral, Universidad Louis Pasteur de Strasbourg, Francia.
- MADARIAGA R.** (1998).- Sismicidad y sismotectónica de Chile. En: A. Udias y E. Buforn (ed). *Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica*. Física de la Tierra, UCM. N°10, 221-258.
- MEIJER P. & WORTEL M.** (1992).- The dynamic of motion of the South American Plate. *J. Geophys. Res.*, V97, 11.915-11.931.
- MUÑOZ N. & CHARRIER R.** (1996).- A west vergent fault system at the western border of the Altiplano in Northern Chile: implications for the uplift of the Altiplano-Puna plateau. *Jour. of South American Earth Sciences*. Vol. 9, p. 171-181.
- OSSO** (1998).- Observatorio Sismológico del Sur Occidente: Plan de mitigación de riesgos en Cali. *Ossu.Univalle.edu.co*
- PENNINGTON W.** (1981).- Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America *J. Geophys. Res.* V.86, 10.753-10.770.
- RODRÍGUEZ L. & TAVERA H.** (1991).- Determinación con alta resolución de la geometría de la zona de Wadati-Benioff en el Perú central. *Revista Brasileira de Geofísica*. Vol9(2), 141-159.

- SUÁREZ G., MOLNAR F. & BURCHFIELD B.** (1983).- Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, p. 10.403-10.429.
- SCHNEIDER J. & SACKS S.** (1987).- Stress in the contorned Nazca plate beneath souther Peru from local Earthquake. *J Geophys. Res.*, 92, 13.887-13.902.
- SMALLEY R. & ISACKS B.** (1987).- A high-Resolution local network study of the Nazca plate Wadati-Benioof zone under western Argentina. *J. Geophys. Res.* 87, 13903-13912.
- STAUDER W.** (1975).- Subduction of the Nazca plate under Perú as evidenced by focal mechanims and by seismicity, *J. Geophys. Res.* 80, 1053-1064.
- TABOADA A., DIMATÉ C. & FUENZALIDA A.** (1998).- en: A. Udías y E. Buforn (ed). *Sisimicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica. Física de la Tierra*, UCM. N°10, 111-146
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- en: A. Udías y E. Buforn (ed). *Sisimicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica. Física de la Tierra*, UCM. N°10, 187-219.
- TAVERA H.** (1998).- Mecanismo focal de terremotos en Perú y sismotectónica. Tesis PhD, UCM. España, 400 pp.
- TAVERA H. & BUFORNE E.** (2001).- Source mechanism of earthquake in Peru. *Journal of Seismology* 5:519-539.
- WADATI K.** (1935).- On the activity of deep-focus earthquakes in the Japan islands and neighborhoods, *Geophysical Magazine*, v. 8, p. 305-325.

### ANEXO







A4

