

INFERENCIAS DE LA SUPERFICIE DE ACOPLAMIENTO SÍSMICO INTERPLACA EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERÚ

INFERENCES SURFACE SEISMIC COUPLING INTERPLATE WESTERN BORDER OF PERU

Patricia Guardia¹ y Hernando Tavera²

RESUMEN

El borde occidental de Sudamérica es considerado, a nivel mundial, como una de las zonas sismogénicas con mayor potencial sísmico y el Perú forma parte de esta región, como consecuencia de la convergencia de la placa oceánica de Nazca, que subduce por debajo de la placa continental Sudamericana. En este contexto, es importante evaluar con el mayor nivel de detalle posible las dimensiones de la Superficie de Acoplamiento Sísmico (SAS) a fin de conocer los niveles de mayor acumulación de energía y deformación interplaca. En este estudio se hace uso de dos métodos, la frecuencia de sismos vs profundidad, y la distribución de los ejes de esfuerzos principales P y T en profundidad. La información utilizada se recopiló a partir de los catálogos del Instituto Geofísico del Perú (sismicidad) y de la Universidad de Harvard (Centroid Moment Tensor, CMT). Los resultados obtenidos indican que en la región sur y norte del Perú, la SAS se encuentra aproximadamente entre los 10 y los 70 km de profundidad, mientras que en la región central, entre los 10 y los 65 km. Estos resultados sugieren que la profundidad de la SAS esta asociada al tipo de subducción de contacto interplaca presente en el Perú, subducción normal en las regiones sur y norte, y subducción subhorizontal en la región central.

Palabras claves: *Acoplamiento, Interplaca Sismicidad, Mecanismo focal, Esfuerzos*

ABSTRACT

The western edge of South America is considered worldwide as one of the seismically highest potential region, and Peru as part of it. Seismic activity is associated with the convergence of the Nazca oceanic plate moving eastward beneath the South American continental plate in the process known as subduction. In this context, it is important to know in depth, the dimensions of the Seismic Coupling Surface (SAS) to meet higher levels of energy storage and interplate deformation. Two methods were used in the present study, the frequency of earthquakes vs. depth, and the spatial distribution of P and T principal stress axes. The Geophysical Institute of Peru catalog (seismicity) and the Harvard University (Centroid Moment Tensor) database were used. The results indicate that in the southern and northern Peru, the SAS is located within about 10 to 70 km depth, and 10 to 65 km depth in the Central Peru. The results suggest that the SAS depth is associated with the subduction geometry characteristic along the country, which is normal in the south and north regions, and subhorizontal subduction in the central region.

Keywords: *Coupling, Interplate, Seismicity, Focal mechanism Stress*

¹ Dirección de Sismología/Instituto Geofísico del Perú. E.mail: patricia.guardia@igp.gob.pe

² Dirección de Sismología/Instituto Geofísico del Perú. E.mail: hernando.tavera@igp.gob.pe

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica a lo largo de las zonas de subducción se constituye, como una de las principales fuentes de peligro sísmico en el planeta debido a que dan origen a terremotos de gran magnitud que traen consigo destrucción y muerte. Los terremotos, que ocurren en estas zonas liberan la mayor cantidad de energía a nivel global, tal es el caso de los terremotos de Chile, Valdivia de 1960 (9.5 Mw); Valparaíso 2010 (8.8 Mw), así como el de Japón del 2011 (9.0 Mw). Otros terremotos más recientes, son los de Chile (27/03/2010, Mw 8.8), Sumatra (26/12/2004, Mw 9.2) y en el Perú, los terremotos de Arequipa (23/06/2001, Mw 8.0) y Pisco (15/08/2007, Mw 8.0).

La zona occidental de Perú forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico y su sismicidad está asociada con el proceso de subducción de la Placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana, presentando una velocidad promedio relativa del orden de 7 a 8 cm/año (De Mets et al, 1980; Norabuena et al, 1999). Esta velocidad de convergencia está asociada a un contacto sismogénico fuertemente acoplado que genera eventos con un amplio intervalo de magnitudes, pero particularmente sismos significativos, a diferentes niveles de profundidad.

En el margen occidental de Perú, el proceso de subducción descrito genera una constante acumulación de energía que se libera cuando los esfuerzos generados por la deformación interplaca superan la resistencia del material constituyente, y dan origen a un gran número de terremotos que presentan una frecuencia mayor si se los compara con los que se producen en el interior del continente (Cahill y Isack, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Bernal, 2002). Esto ha motivado a muchos investigadores a realizar diversos estudios para conocer la geometría de la subducción, así como zonificar las áreas de mayor deformación superficial en el interior del continente. En general, los mapas de sismicidad del Perú han mostrado que los sismos ocurren a diferentes niveles de profundidad (Tavera, 2011), siendo los de foco superficial los que producen mayor daño, sean los eventos sísmicos asociados con el proceso de convergencia y fricción de placas, o los debido a la deformación cortical en el interior del continente.

El presente estudio permite profundizar el conocimiento sobre la Superficie de Acoplamiento

Sísmico (SAS), entendida como la principal fuente sismogénica generadora de terremotos en el Perú. Para ello, se hace uso del catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la base de datos de mecanismos focales de la Universidad de Harvard, Centroid Moment Tensor (CMT).

EL PROCESO DE SUBDUCCIÓN

El origen y la distribución de los eventos sísmicos en el Perú, ha sido tema de investigación y de diversos estudios. Para ello se han utilizado datos telesísmicos y regionales a fin de estudiar la geometría de la subducción de la Placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Hasegawa y Isack, 1981; Bevis y Isacks, 1984; Boyd et al, 1984; Grange 1984; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Suarez y Molnar, 1983; Suarez et al, 1990; Tavera y Buforn, 1998; Bernal y Tavera, 2002). Dichos datos también fueron empleados para delinear las zonas de mayor deformación superficial en el interior del continente (Dorbath et al 1986; Dorbath et al, 1991; Lindo et al, 1992; Suarez y Molnar, 1983; Suarez et al, 1990; Tavera y Buforn 1998; Tavera et al, 2006).

Una de las primeras investigaciones fue realizada por Barazangi e Isack (1976-1979) utilizando datos telesísmicos. Ambos autores postularon que el proceso de subducción en Perú se realiza de manera heterogénea. En la región Norte-Centro la subducción de la placa de Nazca se inicia con un ángulo de 10° hasta una profundidad de 100 km aproximadamente, a partir del cual, la placa se hace sub-horizontal. Por otro lado, en la región Sur, el ángulo de subducción estimada resulta de 30°, y permanece continuo hasta alcanzar una profundidad de 300 km. Asimismo, los autores postulan la existencia de una ruptura en la litósfera subducente a fin de separar los dos modos de subducción (Figura 1a), hipótesis que no prosperó debido a la disponibilidad de mayor información que permitió demostrar que la placa soporta un proceso de contorsión Schneider y Sacks, (1987), Rodríguez y Tavera, (1991) y Cahill et al., (1999).

Estudios recientes realizados por Tavera y Buforn (2001), Bernal y Tavera (2002) y Guardia (2011), sostienen que la subducción de tipo sub-horizontal está presente entre los 3° y 15° sur (región Norte y Centro), y la subducción del tipo normal al sur de los 15° sur. Ambos modos de subducción se inician con un ángulo de 30°, se extienden hasta una profundidad de 100 a 120 km a partir del cual, en la región norte-

centro, la subducción es sub-horizontal y en la región sur, del tipo normal y continúa hasta una profundidad de 250 km (Figura 1b).

En general, los estudios mencionados se enfocaron en la investigación de la geometría de placa subducente, sin hacer referencia sobre las dimensiones de la SAS entre las placas de Nazca y Sudamericana. Sin embargo, estudios estadísticos efectuados para conocer la distribución del valor de "b" en el borde occidental del Perú (Condori,

2011) y otros con datos de GPS (Chlieh et al, 2011), muestran que las mayores asperezas y superficies de máximo acoplamiento se encuentran ubicadas entre la fosa peruano-chilena y la línea de costa, lo cual sugiere que la SAS no se extendería por debajo del continente. Por debajo de la línea de costa, la placa oceánica subducente de Nazca alcanzaría profundidades del orden de 80 km (Tavera y Buforn, 1998) y en ella, no existiría acoplamiento entre las placas.

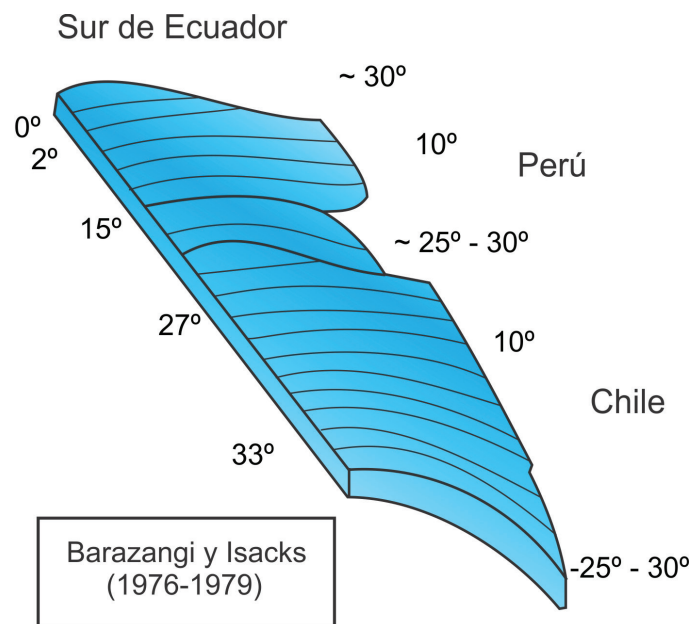


Figura 1.a. Esquema propuesto por Barazangi e Isacks (1976-1979) para la geometría de subducción en el borde Occidental de Ecuador, Perú y Chile.

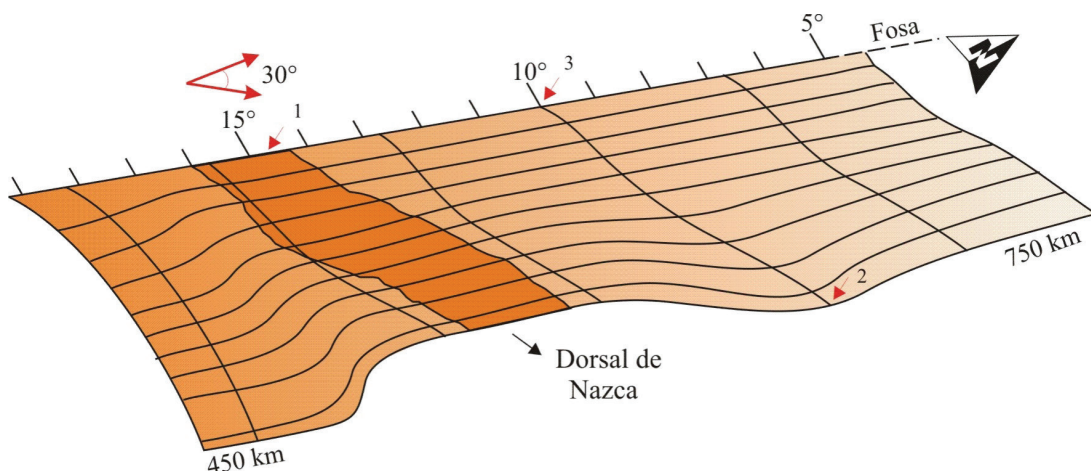


Figura 1.b. Esquema 3D para la geometría de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Los números del 1 al 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la mayor ocurrencia de sismos (Bernal & Tavera, 2002).

DATOS

Los datos utilizados en el presente estudio considera el catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para un periodo de 46 años (1964-2010) y un total de 6,765 eventos con una magnitud $M_w \geq 4.0$. Asimismo, se utiliza el catálogo sísmico del National Earthquake Information Center (NEIC) para un periodo de 37 años (1973 - 2010) y una base de datos de 6,238 eventos para el mismo nivel de magnitudes. Básicamente se ha considerado los sismos con epicentros ubicados entre la línea de fosa

y la costa, hasta una distancia de 300 km en dirección Este sobre el continente, todos con focos ubicados hasta una profundidad de 100 km por debajo del continente.

Para ambos catálogos (IGP, NEIC) se procede a homogeneizar los datos en base a su magnitud (M_w), construyendo curvas de frecuencia sísmica para las regiones norte, centro y sur del Perú, quedando el umbral mínimo de magnitud establecido en 4.25 M_w y la base de datos final compuesta por 4,972 sismos del catálogo del IGP (Figura 2) y de 3,176

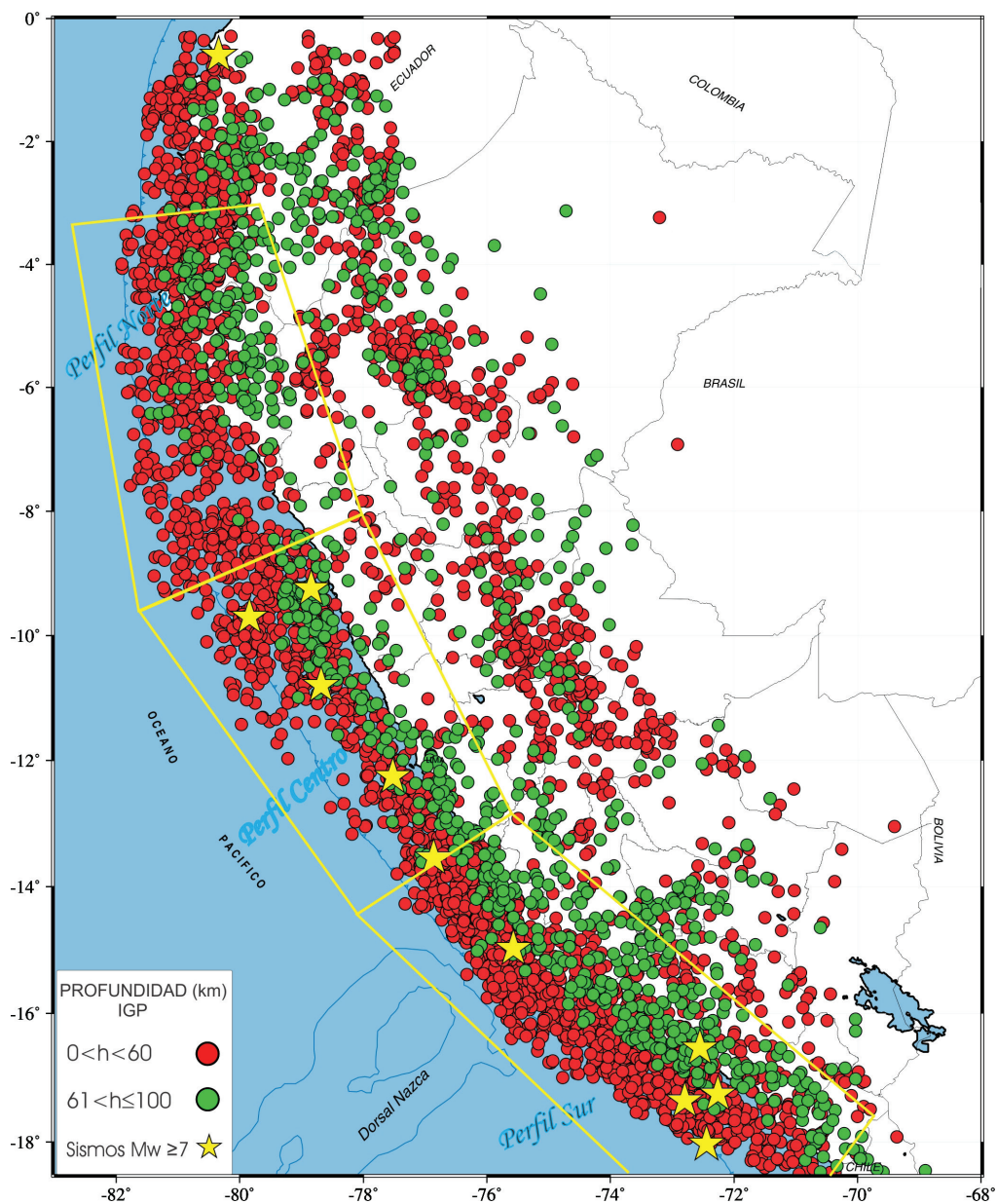


Figura 2. Mapa de sismicidad depurada del Perú para el periodo de 1964 – 2010 ($M_w \geq 4.25$). Los tres recuadros indican las áreas cuyos datos fueron utilizados en la frecuencia de sismos vs profundidad. Las estrellas indican los sismos de magnitud $M_w \geq 7.0$.

del catálogo del NEIC. En ambos casos, no se han eliminado las réplicas que forman parte de los eventos sísmicos de 1996, 2001 y 2007, en razón que permiten tener mayor resolución sobre la SAS.

Para analizar la distribución de los esfuerzos asociados a eventos sísmicos ocurridos en Perú, se hace uso de la base de datos de la Universidad de Harvard, Centroid Moment Tensor (CMT) para el periodo 1976–2011, quienes utilizando el método de inversión de los elementos que integran el Tensor Momento Sísmico, obtienen los mecanismos focales para sismos con $M_w \geq 5.0$. Una característica de esta base de datos, es que los parámetros focales de los sismos fueron obtenidos utilizando la misma metodología; por lo tanto, la base de datos es homogénea. El CMT permite conocer la orientación de la fuente, el momento sísmico (M_0), la magnitud momento (M_w) y la orientación de los principales ejes de esfuerzos (Presión, P y Tensión, T). En este estudio se han considerado los sismos y sus mecanismos focales asociados al proceso de subducción y a la deformación interna de la placa de Nazca bajo la Sudamericana para todo el territorio peruano.

SUPERFICIE DE ACOPLAMIENTO SÍSMICO (SAS)

Para conocer la geometría de la SAS en el borde occidental de Perú, se hace uso de dos métodos, la Frecuencia Sísmica (número de sismos versus la profundidad focal) y la distribución de los ejes de

Esfuerzos Principales deducidos de los mecanismos focales en función de la profundidad de los focos sísmicos.

Frecuencia Sísmica

En la Figura 3a, se muestra un esquema del proceso de subducción en el borde occidental del Perú, permitiendo identificar la presencia de las siguientes zonas:

- Zona 1: identifica al inicio del contacto de placas con la presencia de los prismas de acreción. Aquí, el número de sismos resulta menor debido a la fragilidad de la corteza continental.
- Zona 2 (línea roja): corresponde a la superficie de mayor fricción de placas (SAS), donde se espera que se produzca el mayor número de sismos, particularmente los de mayor magnitud, como los ocurridos en el 2001 (Arequipa) y 2007 (Pisco).
- Zona 3: zona en donde el número de sismos disminuye en razón que las placas no estarían acopladas y los pocos sismos que en ella ocurren tendrían su origen en la deformación interna de ambas placas (sismos intraplacas).

De acuerdo con esta hipótesis, la SAS estaría definida por la denominada zona sísmica de interfaz o contacto entre placas, cercana a la fosa peruano-chilena, en la cual ocurre el mayor número de sismos debido a la fricción y acoplamiento sísmico entre placas.

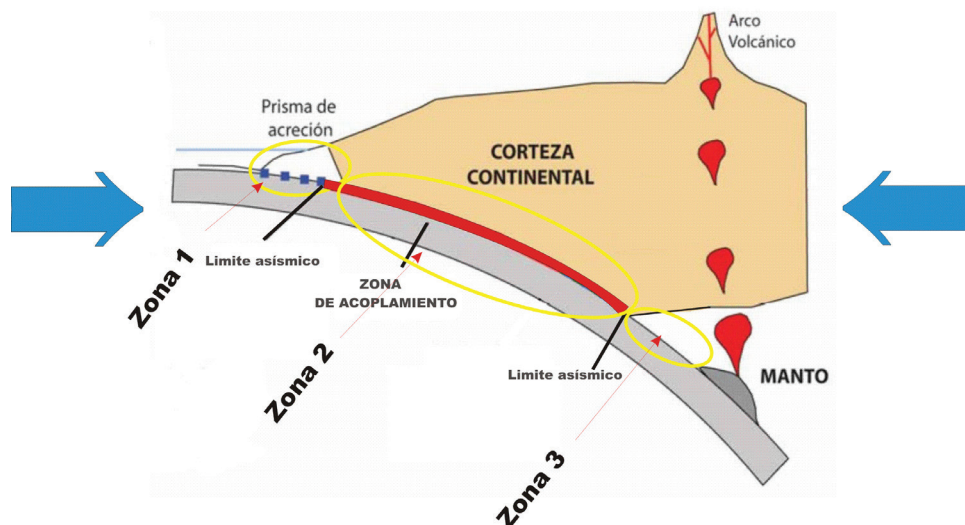


Figura 3.a. Esquema para el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana y ubicación de las zonas de menor y mayor frecuencia de sismos.

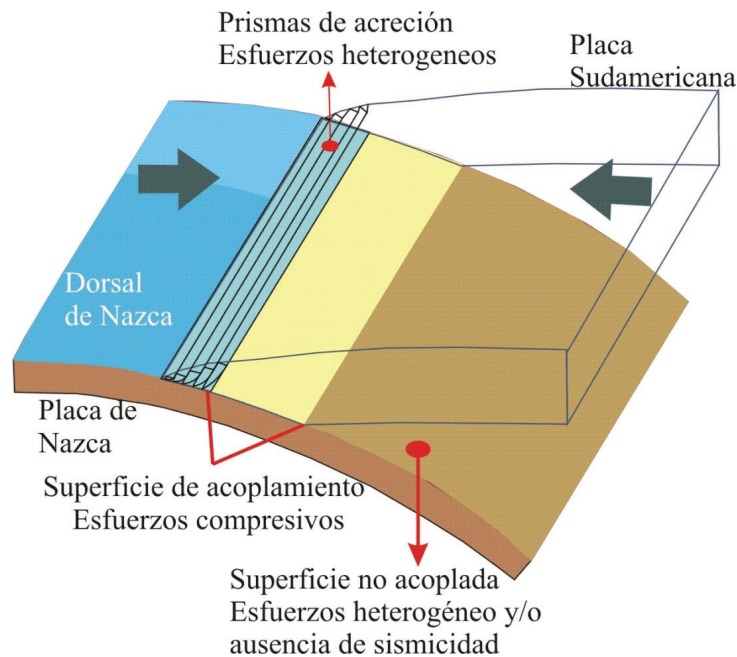


Figura 3.b. Esquema típico de la génesis de terremotos en zonas de subducción y tipos de esfuerzos asociados a las zonas de acoplamiento sísmico.

Utilizando los datos del catálogo del IGP, en la Figura 4 se muestra la frecuencia de sismos para las regiones norte, centro y sur del Perú versus la profundidad de sus hipocentros definida en intervalos de 5 km. El análisis de dichos perfiles permite obtener los siguientes resultados:

- Región Norte: el mayor número de sismos se han producido entre los 10 y los 65 km de profundidad
- Región Centro: el mayor número de sismos ocurrieron entre los 10 y los 65 km de profundidad.
- Región Sur: el mayor número de sismos se han producido entre los 5 y los 70 km de profundidad.

De acuerdo con estos resultados, la SAS alcanzaría profundidades entre 10-65 km para las regiones norte y centro; mientras que, en al región sur del Perú se encontraría entre los 10-70 km de profundidad. En todas las regiones, los niveles de profundidad en el cual el acoplamiento sería máximo esta entre los 30-55 km.

Haciendo uso de la data sísmica del NEIC, no resulta posible evaluar la SAS debido a que la frecuencia de sismos en función de la profundidad de sus focos, presenta mayor incertidumbre en el parámetro profundidad.

Distribución de Esfuerzos P y T (DPT)

El marco sismotectónico de Perú se caracteriza por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental Sudamericana, con diferentes modos de deformación; por compresión (eje principal, P) o por extensión (eje principal, T) (Tavera y Buforn, 2001). En este estudio, se emplea la orientación de estos ejes de esfuerzos para tipificar la deformación presente en el borde occidental del Perú.

En la Figura 5a se presenta la base de datos utilizada y el tipo de mecanismo focal correspondiente a cada evento sísmico (esferas rojas = compresión; azules = extensión) (Figura 5b). Asimismo, se muestra la distribución de los esfuerzos derivados de los mecanismos focales. Conforme a esta distribución, los correspondientes a la fricción de placas son aquellos considerados como del tipo compresional (líneas rojas) que presentan una orientación promedio de NE-SO en las regiones sur y centro, y de E-O en la región norte. La deformación por extensión, asociada a la deformación interna de la placa de Nazca (intraplaca) por debajo del continente (líneas blancas), muestra una orientación más heterogénea, pero en promedio se puede aceptar una dirección NE-SO.

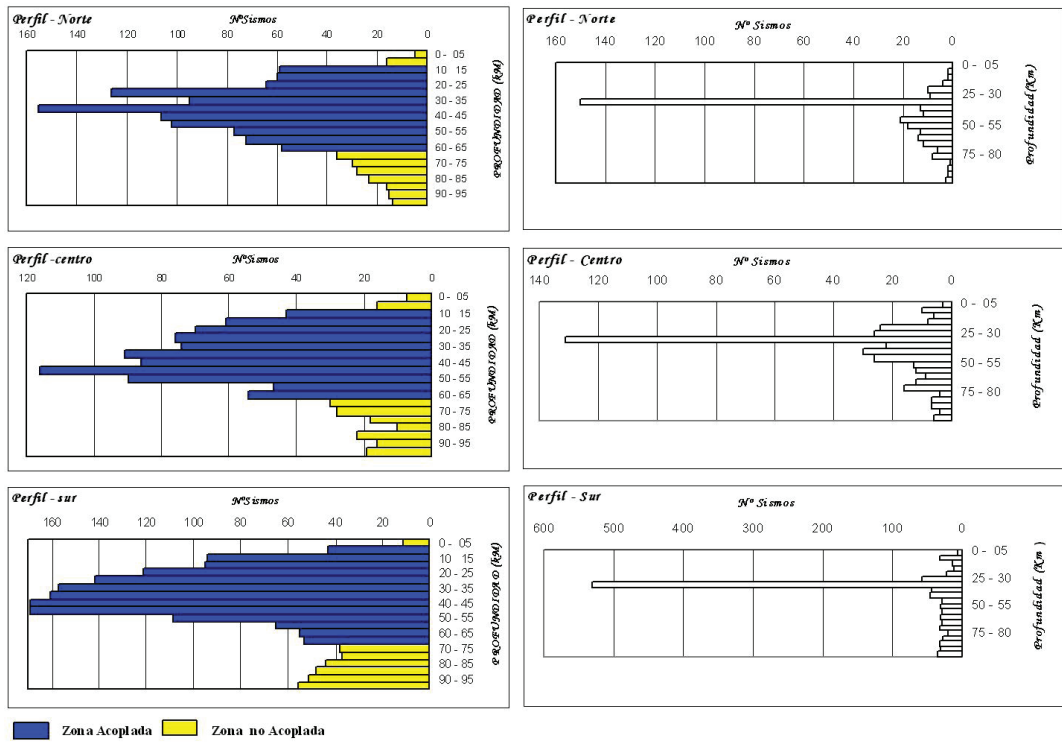


Figura 4. Perfiles de frecuencia sísmica vs profundidad de los focos sísmicos construidos para las regiones norte, centro y sur de Perú utilizando datos de los catálogos del IGP y NEIC.

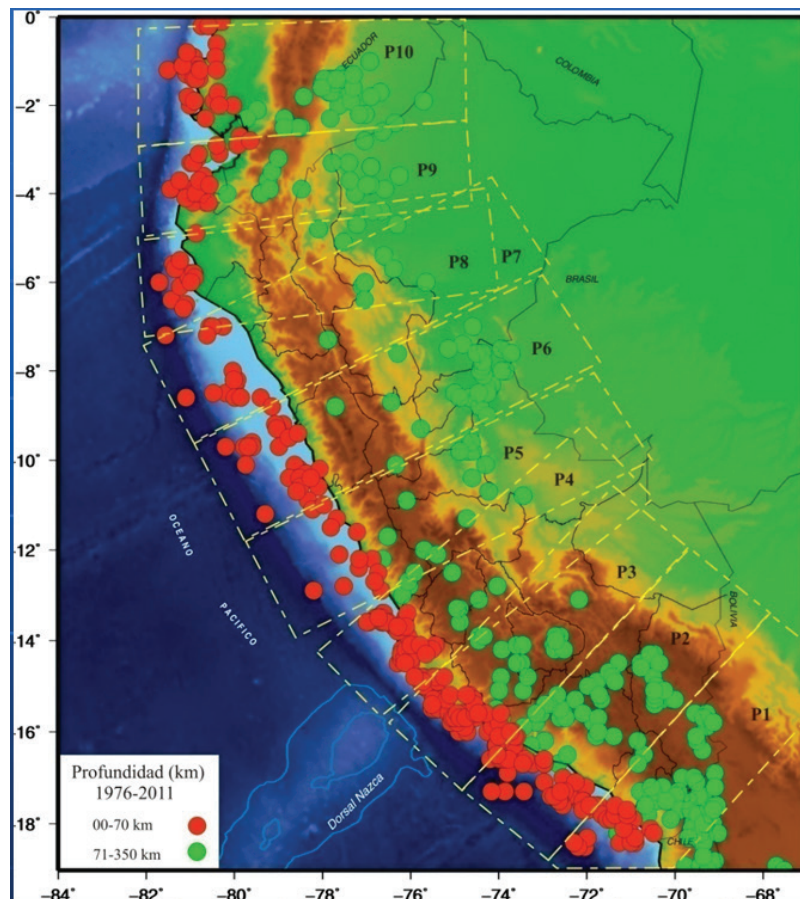


Figura 5.a. Base de datos del CMT (1976-2011),

Del mismo modo, en la Figura 5b se muestra la orientación de las 10 secciones transversales perpendiculares a la fosa (enumeradas, de sur a norte, del 1 al 10) ilustradas para conocer la distribución de esfuerzos para diferentes profundidades (Figura 5c). Cada sección transversal tiene una longitud de 1200 km y representa gráficamente el plano normal a la fosa peruano-chilena donde se proyectan todos los eventos, contenidos en una faja de 130 km de ancho.

La Figura 3b muestra un esquema típico adicional sobre la génesis de terremotos en zonas de subducción. En ella se observa que cerca de la fosa se desarrollan estructuras escalonadas producto de la deformación superficial asociada a una corteza rígida y frágil de poco espesor llamadas prismas de acreción, las cuales generan sismos de magnitud moderada y diversidad de esfuerzos. En este esquema, la zona de color amarillo define la superficie de mayor fricción entre las dos placas (SAS) y aquí prevalece un único

patrón de deformación asociado a esfuerzos de compresión, siendo más notorio cuando se hace uso de datos correspondientes a sismos de magnitudes mayores (por ejemplo $M_w \geq 7.0$). Por debajo de esta zona, se asume que las placas están desacopladas y la sismicidad queda limitada a la deformación interna de ambas placas (sismos de intraplaca), lo cual provoca una notable disminución de la sismicidad en cuanto a la frecuencia y al tamaño de eventos (magnitudes), presentando diversidad de esfuerzos.

De acuerdo con la hipótesis planteada, a continuación se realiza el análisis detallado de cada una de las 10 secciones transversales de esfuerzos elaborados en este estudio (mecanismos focales) y descritos en la Figura 6.

Secciones 1 y 2: se observa que los sismos se distribuyen en profundidad siguiendo un ángulo promedio de 30° hasta los 300 km aproximadamente, mostrando el perfil típico característico del proceso

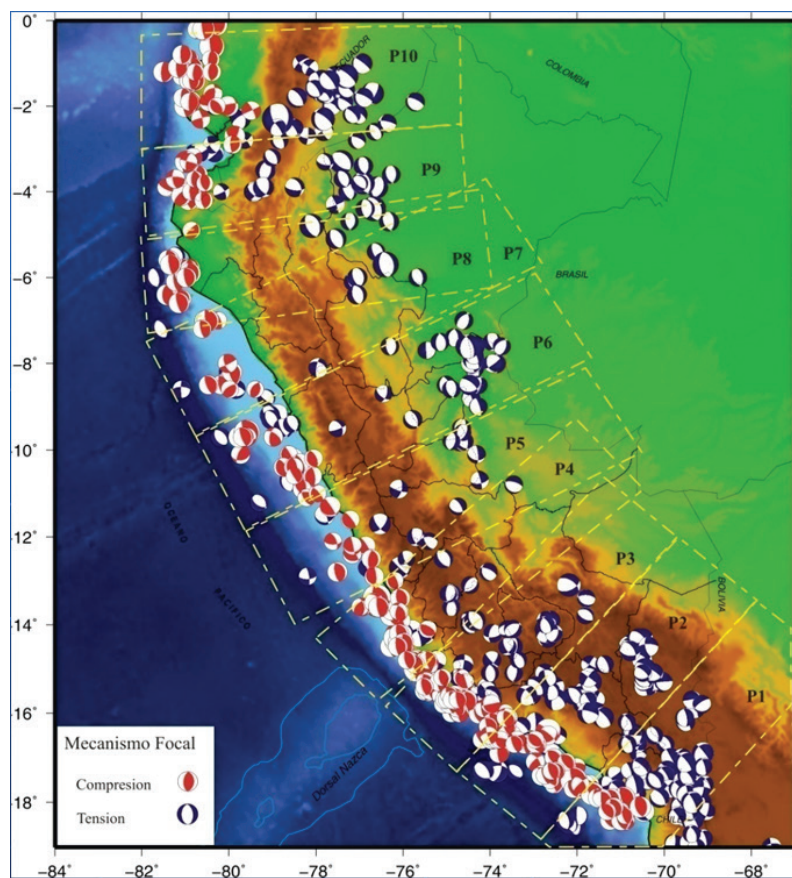


Figura 5.b. Mecanismos focales.

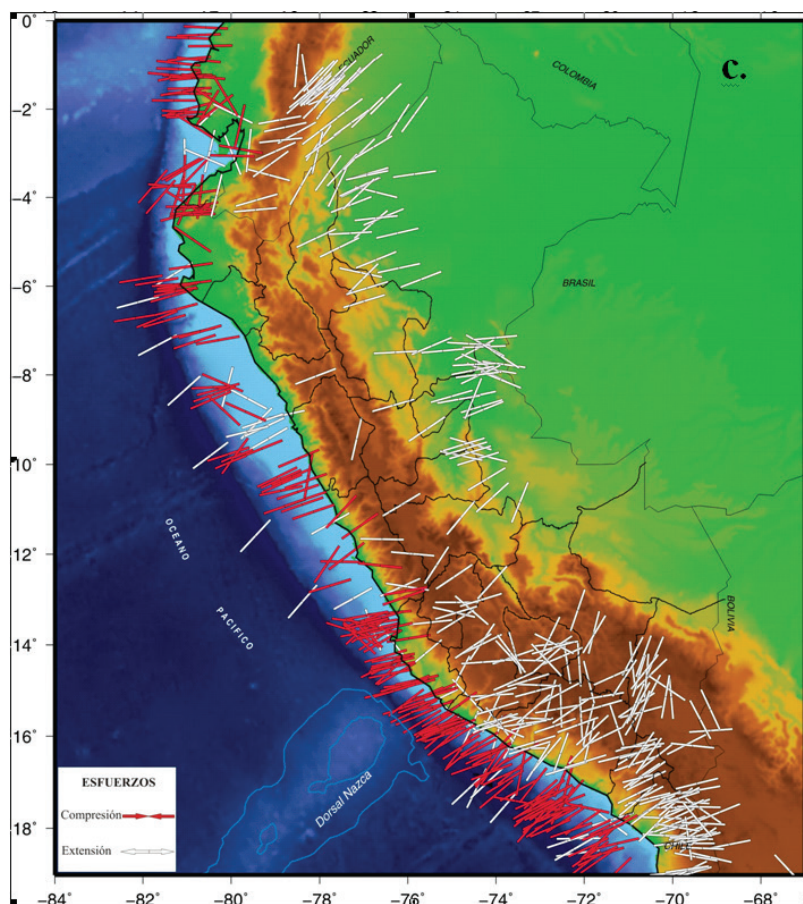


Figura 5.c. Distribución de esfuerzos principales.

de subducción normal. Los mecanismos focales de tipo inverso (compresión) y normal (tracción o extensión) prevalecen cerca de la fosa hasta una profundidad promedio de 10 km, y por debajo de esta, y hasta una profundidad de 60-70 km, se observa la presencia de mecanismos focales de tipo inverso, los mismos que definen los niveles de profundidad en la cual se encuentra la SAS. Por debajo de esta profundidad los mecanismos focales son normales o extensionales, y describen la deformación interna presente en ambas placas. Finalmente, la SAS está presente entre 10 a 60 km de profundidad en el perfil 1 y entre 10 a 70 km en el perfil 2.

Secciones 3 y 4, la sismicidad se distribuye desde la fosa, con un ángulo de 30° hasta una profundidad de 120 km a partir de la cual la deformación se desarrollaría sobre una superficie prácticamente horizontal. En ambos perfiles la deformación por compresión se concentra hasta una profundidad de

70 km, estando a mayor profundidad la deformación por extensión. La SAS se encontraría en un rango de profundidad de 10 a 70 km para el perfil 3, y de 10 a 65-70 km para el perfil 4.

Secciones 5 y 6: en ambas secciones la sismicidad sigue la tendencia observada anteriormente, siendo más notoria la presencia de sismos a profundidades intermedias y hasta una distancia horizontal de 750 km desde la fosa. Por otro lado, en ambas secciones y a la distancia de 650 km se observa un cambio en la orientación de la deformación de placa oceánica, sugiriendo el desarrollo de una re-subducción, pero siempre con esfuerzos tensionales. Estas características de la sismicidad ya fue observada por Schneider et al, (1988) y discutida por Tavera y Buforn (2001).

Secciones 7 y 8: muestran que los eventos asociados a la deformación por compresión alcanzan profundidades de hasta 65 km, y por debajo de este

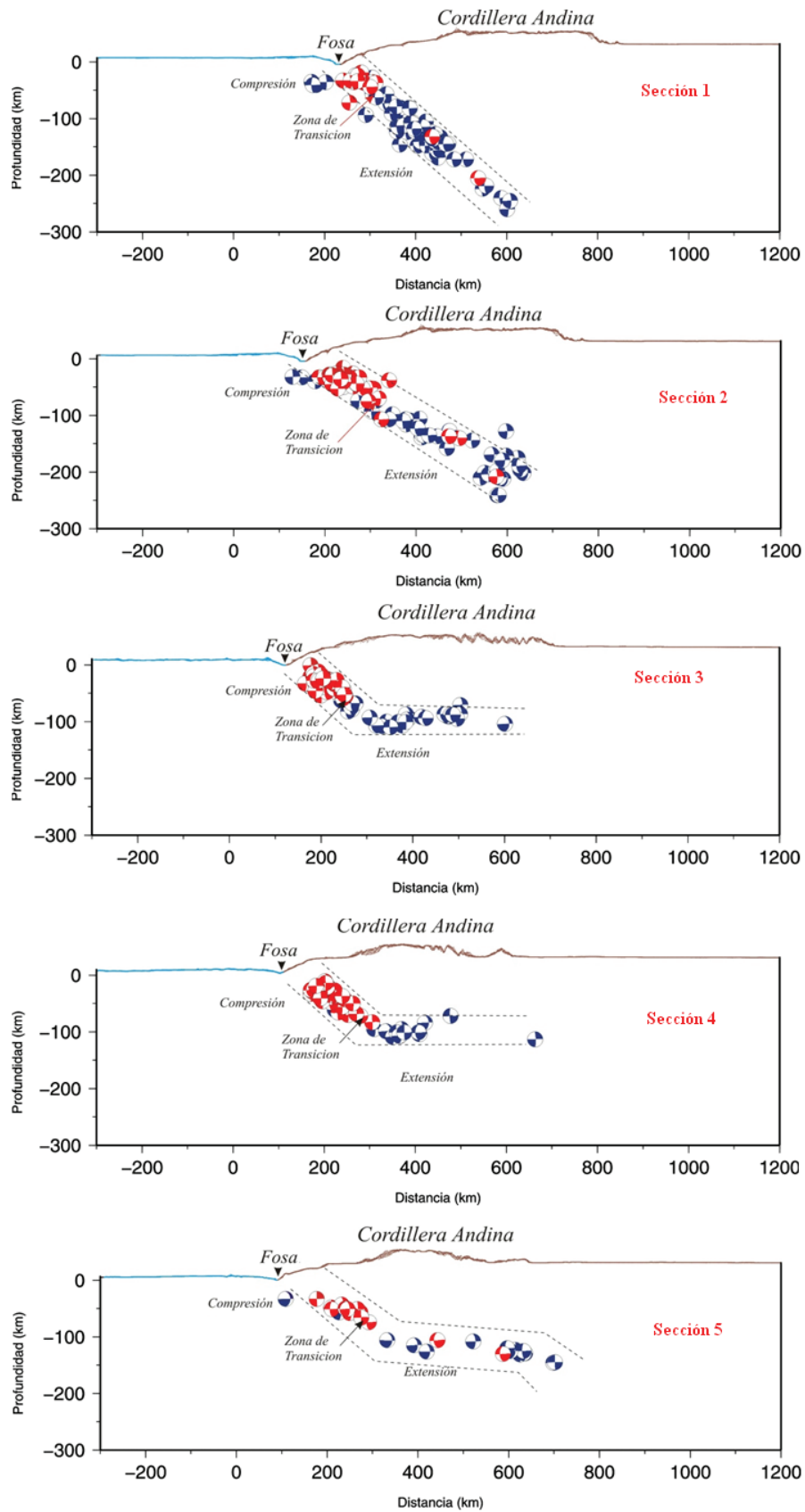


Figura 6. Secciones verticales de mecanismos focales en función de la profundidad de los focos sísmicos. El número de perfil corresponde a la Figura 5b.

nivel, se observa ausencia de actividad sísmica hasta una distancia horizontal de 480 km aproximadamente con respecto a la fosa. Aunque la sismicidad no es frecuente, se logra definir que la SAS se encontraría entre 10 y 65 km de profundidad.

Sección 9: la distribución espacial de los eventos sísmicos muestra el modo de subducción sub-horizontal y los eventos asociados a esfuerzos de tipo compresional alcanzan profundidades de hasta 70 km. Por debajo de esta profundidad, los eventos muestran deformación de tipo extensional. En este caso, la SAS se encuentra entre 10 y 70 km de profundidad.

Sección 10: la distribución en profundidad de la sismicidad es similar a las secciones 1 y 2, mostrando el modo de subducción normal. La mayor concentración de eventos con esfuerzos compresionales se encuentra entre 10 a 70 km de profundidad, lo cual define a la SAS. Por debajo de este nivel de profundidad, la presencia relativa de deformación por extensión/compresión indica el inicio de la zona de desacoplamiento entre placas.

De acuerdo al análisis realizado, se observa que la distribución de esfuerzos, en distancia y profundidad dentro del proceso de subducción, es muy heterogénea, pero en conjunto ha permitido identificar los niveles en los cuales se encuentra la SAS frente al borde occidental del Perú. En general, la SAS alcanza intervalos de profundidad entre 10 a 65-70 km, dependiendo del tipo de subducción que prevalece en cada región. Por encima y debajo de estas profundidades, la presencia relativa de deformación heterogénea define a las zonas de desacoplamiento entre placas. Los resultados obtenidos en este estudio, son similares a los discutidos por Comte et al (1994) para la zona norte de Chile utilizando datos de una red local.

CONCLUSIONES

La distribución espacial de la sismicidad en Perú es compleja y heterogénea debido a la existencia de diferentes fuentes sismogénicas. La sismicidad superficial ($h < 70$ Km.) tiene su origen en dos fuentes: la primera, considera a los sismos producidos por la convergencia de placas y en cuya superficie de fricción se originan con mayor frecuencia los terremotos de gran magnitud. La segunda fuente agrupa a los sismos asociados con la deformación cortical que da origen a fallas geológicas presentes a lo largo y en los bordes de la Cordillera Andina.

El análisis de la Frecuencia Sísmica y la distribución de los Esfuerzos Principales en función de la profundidad de los focos sísmicos, permiten obtener resultados similares para conocer la SAS. Se concluye que la máxima profundidad de la SAS se encuentra en función del tipo de subducción presente en el borde occidental del Perú; es decir, hasta los 70 km en las regiones sur de Perú y Ecuador, donde prevalece la subducción tipo normal y hasta 65 en la región central donde se produce la subducción de tipo sub-horizontal. Desde el inicio de la fosa hasta una profundidad de 10 km aproximadamente, las deformaciones son heterogéneas (compresión y/o tensión) debido a la presencia de los prismas de acreción rígidos y frágiles. Por debajo de los 65-70 km de profundidad, la deformación sigue siendo heterogénea y en algunos casos ausente, lo cual sugiere que no existe acoplamiento sísmico.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar la presente investigación (Autor Principal). Al NEIC y a la Universidad de Harvard por la disponibilidad de datos sísmicos. Las figuras del presente estudio fueron elaboradas con el programa Generic Mapping Tools (GMT, Wessel y Smith, 1995).

REFERENCIAS

- Baranzagi, M., y E Isacks, (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America, *Geology*, 4, 686-692.
- Bernal, I. (2002). Aproximación a un modelo detallado de la Sismicidad en el Perú y características de la energía sísmica liberada, Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 169pp.
- Bernal, I. y Tavera, H. (2002), Zonas sísmogénicas en Perú: volúmenes de deformación, Gráficos polares y Zonificación preliminar. *Boletín Sociedad Geológica del Perú* v. 93 (2003) p. 31-44.
- Bevis, M y Isacks, B. (1984). Hypocentral trend surface analysis: Probing the geometry of Benioff zone. *J. Geophys Res.* 89,6.153-6.170.
- Boyd, T., Snoke, I., Sacks, S. and Rodriguez, A., 1984, High resolution determination of the Benioff zone geometry beneath southern Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.* 74, 559-568.
- Cahill, T. y Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate *J. Geophys Res.*, 97, 17503 - 17529.
- Catálogo Sísmico de la Universidad de Harvard: www.globalcmt.org/CMTsearch.html
- Catálogo Sísmico de la National Earthquake Information Center http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_rect.php (NEIC) 1
- Chlieh, M., H. Perfettini, H. Tavera, J-P. Avouac, D. Remy, J-M. Nocquet, F. Rolandone, F. Bondoux (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *JGR*, vol. 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166, 2011
- Comte, D., M. Pardo, L. Dorbath, H. Haessler, L. Rivera, A. Cisternas y L. Ponce (1994) Determination of seismogenic interplate contact zone and crustal seismicity around Antofagasta, northern Chile using local data. *Geophys. J. Int.*, 116, 553-561.
- Condori, C. (2011). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú a partir de la variación del parámetro b. *Fac. de Geología, Geofísica y Minas de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.*
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Dorbath, C., Dorbath, L., Cisternas, A., Deverchère, J., Diament, M., 1986, On crustal seismicity of the amazonian foothill of the central peruvian andes, *Geophys. Res. Lett.* 13, 1023-1026.
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E. and Rivera, L., 1991, Seismicity and tectonic deformation in the eastern cordillera and the sub-Andean zone of central Peru, *J. South Amer. Earth Sci.* 4,
- Grange, F. (1984). Etude sismotectonique détaillée de la subduction lithosphérique au Sud Pérou. These Docteur 3er Cycle, Univ Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Guardia, P. (2011). Determinación de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú. *Fac. de Geología, Geofísica y Minas de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.*
- Hasegawa, A. y Sacks, S. (1981). Subduction of Nazca plate beneath Peru as determined by seismic observations, *J. Geophys. Res.* 86, 4971-4980.
- Lindo, R., Dorbath, C., Cisternas, A., Dorbath, L., Ocola, L. and Morales, M., 1992, Subduction geometry in central Peru from a microseismicity survey: first results, *Tectonophysics* 205, 23-29.
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein S. y Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca south America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 26, 3405-3408.
- Schneider J. y Sacks S. (1987). Stress in the contorned Nazca plate beneath souther Peru form local Earthquake. *J Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- Schneider, J. F.; Sacks, I. S.; Huaco, D.; Norabuena E.; A. Flores (1988) Spatial distribution and b value of intermediate-depth earthquakes beneath central Peru *Geophys Res Lett*, Vol 15, 1421-1424, 19.
- Stauder, W. (1975). Subduction of the Nazca plate under Perú as evidenced by focal mechanisms and by seismicity, *J. Geophys. Res.* 80, 1053-1064.
- Suarez, G., Molnar, P. y Burchfiel, B. (1983), Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia, *J. Geophys. Res.* 88, 10403-10428.
- Suarez, G., Gagnepain, J., Cisternas, A., Hatzfeld, D., Molnar, P., Roecker, S. and Viodé, J. (1990). Tectonics deformation of the Andes and the configuration of the subducted slab in central Peru: results from amicroseism experiment, *Geophys. J. Int.* 103, 1-12.
- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5:519-539.
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998). Sismicidad y Sismotectónica de Perú. *Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica.*
- Tavera, H., Vilca, R., Marin, G. (2006). Inferences on the geometry of the Nazca plate in Northwestern Perú based in data collected by local seismograph network. *Earth Sciences Research Journal*, V. 10, Num. 1, pág. 15-24.
- Tavera, H. (2011). Mapa Sísmico del Perú (1964-2011). Dirección de Sismología, Instituto geofísico del Perú (material impreso).
- Wessel, P., and W. Smith, 1995, New Version of the Generic Mapping Tools Released, http://www.agu.org/eos_elec/95154e.html, Copyright 1995 by the American Geophysical Union.