

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA



“DETERMINACIÓN 3D DE LA GEOMETRÍA DE LA PLACA DE
NAZCA EN EL PERÚ Y ANÁLISIS DEL ESTADO DE ESFUERZOS”

*Tesis Presentada por la Bachiller
en Ciencias Geofísicas:*

Katia Verónica Vila Mamani

*Para optar el Título Profesional de
INGENIERO GEOFÍSICO*

AREQUIPA-PERÚ

2014

Dedicatoria:

*“En realidad cuando un ser humano
ama profundamente a otro, ama fundamentalmente a Dios”*

–Rumi–

*Quisiera dedicar este trabajito, mencionado con diminutivo afectuoso porque
en este tiempo le he visto crecer y he aprendido a quererlo, al Gran Espíritu
que es la fuente de todo lo que existe, por ayudarme y enseñarme tantas cosas
desde que tengo memoria e incluso antes, por guiarme, quererme y cuidarme
tanto.*

*A mis abuelas y abuelos, que están siempre presentes en todas las cosas que
hago y todos los pasos que doy....gracias por su sabiduría, su amor y
paciencia...*

*Siempre, siempre, siempre he de agradecer a mi mamá y mi papá quienes son
todo para mí, mi luna y mi sol, a quienes amo con todo mí ser y admiro
infinitamente.*

*A mis primeras maestras, mis hermanas del alma que crecieron contándome
sus historias y jugando a ser menores conmigo Giovira, Brigith, Milagros y
Lourdes...*

*A mis sobrinas Valeska y Daniela que me recordaron la esencia, la
naturalidad y la libertad de ser niña, a Joaquín y a Matias los bebes lobos, y
a ti bebe waitiene que estas surcando el cielo...*

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi familia hermosa...

Al Instituto Geofísico del Perú por el programa de becas que ofrece para que estudiantes como yo podamos realizar una tesis con todo el apoyo logístico necesario.

A mi asesor Dr. Tavera, director del área de sismología del Instituto Geofísico del Perú, por el apoyo incondicional, paciencia y por ser un ejemplo vivo de curiosidad y amor por la geociencia.

A mis compañeras y compañeros del Instituto Geofísico del Perú, Eliana, María, Fabiola, Christian, Rider, Washinton, Cristóbal, Lucy, Bhila, Angel, Joseph, Anthony, Julio, Yonathan, Isabel, Liliana, Sheila, Juan Carlos, Rubén, Luz, Estela, Patricia, Carolina, Darío y Hernán.

A las personas que amablemente colaboraron con mi crecimiento profesional, como mis profesores en la universidad y a aquellas científicas que me inspiraron y me mostraron el lado femenino de la ciencia, especialmente a la Dra. Inge Lehmann.

A mi familia en Lima, mi tía Gladis y mis primos Cynan y Bercy, por los momentos tan divertidos que pasamos y por la cálida acogida.

A Ulla, Chary, Diego, Mirella, Dayana, Silvia, Milagros, Bruno y Elena, seres hermosos que no pensé conocer en esta Lima tan difusa y acelerada...sin ustedes este trabajo no hubiera llegado a término.

A Andrea Echeverry, aunque no se si algún día lo sepas pero tu me recordaste que todo se puede hacer, y que hay que tener fe, gracias Mujercita.

Y a ti, que estás leyendo esto con emoción compartida, que siempre estuviste conmigo viviendo todas mis etapas, queriéndome con paciencia y con quien soy tan feliz...

RESUMEN

En el presente estudio se propone un modelo 3D para la geometría de la placa de Nazca que subduce por debajo del borde occidental del Perú. Para tal fin, se hace uso y se analiza la distribución espacial de la sismicidad ocurrida entre los años 1960 al 2011. La distribución espacial de los eventos sísmicos en profundidad es analizada en 24 perfiles perpendiculares a la fosa oceánica y su tendencia ajustada con la aplicación de un polinomio de 4^{to} grado. Esta información es utilizada para construir un modelo 3D para la geometría de la placa de Nazca y pone en evidencia la presencia dos modos de Subducción. En la Región centro y parte del norte (frontera con Ecuador) prevalece la subducción tipo subhorizontal, y en la región sur del Perú y sur de Ecuador se observa el modo de subducción de tipo normal. Entre ambos modos la placa oceánica cambia su geometría por contorsión.

La distribución espacial de los esfuerzos principales de compresión y tensión muestran que la deformación, dentro del proceso de subducción, es heterogénea, pero en esencia la orientación de los esfuerzos es coherente con los patrones de deformación regional.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ÍNDICE	i
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivos generales.....	3
1.1.2 Objetivos específicos:.....	3
1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
CAPÍTULO II	5
MARCO GEOTECTÓNICO.....	5
2.1 Tectónica global	5
2.1.1 Márgenes de Placas	7
2.2 Tectónica Regional	10
2.2.1 Fosa Oceánica	11
2.2.2 Dorsales Oceánicas.....	11
2.2.3 Fractura de Mendaña.....	13
2.2.4 Depresión de Trujillo	13
2.2.5 Fractura de Viru	13
2.2.6 Fractura de Nazca	13
2.2.7 Cordillera Andina	14
2.2.8 Cadena Volcánica	14
2.2.9 El Escudo Brasileño	15
2.2.10 Sistemas de fallas	15
CAPÍTULO III.....	18
GEODINÁMICA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN.....	18
3.1 Elementos estructurales principales.....	19
3.1.1 Placa de Nazca.....	19
3.1.2 Placa Sudamericana	19
3.2 Elementos secundarios.....	20

3.2.1	Gradiente Térmico del Manto.....	20
3.2.2	Corrientes de convección.....	21
3.3	Placas en movimiento.....	21
3.4	Las fuerzas motrices.....	22
3.4.1	Fuerzas Primarias.....	24
3.4.2	Las fuerzas secundarias.....	24
CAPÍTULO IV.....		27
ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD.....		27
4.1	Catálogos Sísmicos.....	28
4.1.1	Engdahl et al. (2002).....	29
4.1.2	Catálogo sísmico local (IGP).....	29
4.1.3	Otros catálogos.....	29
4.2	Distribución espacial de la sismicidad.....	31
4.2.1	Sismos con foco superficial.....	31
4.2.2	Sismos con foco intermedio.....	33
4.2.3	Sismos con foco profundo.....	33
4.3	Selección de datos.....	34
CAPÍTULO V.....		36
GEOMETRÍA DE LA PLACA DE NAZCA.....		36
5.1	Antecedentes.....	36
5.1.1	Barazangui e Isacks (1976 -1979).....	37
5.1.2	Hasegawa e Isacks (1981).....	38
5.1.3	Grange (1984).....	40
5.1.4	Schneider y Sacks (1987).....	40
5.1.5	Rodríguez y Tavera (1991).....	41
5.1.6	Cahill e Isacks (1992).....	42
5.1.7	Tavera y Burfon (1998).....	43
5.1.8	Gutscher (2000).....	44
5.1.9	Bernal y Tavera (2002).....	44
5.1.10	Quispe et al. (2003).....	46
5.1.11	Hayes et al. (2012).....	46
5.1.12	Aporte.....	47
5.2	METODOLOGÍA.....	48
5.3	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	48

5.3.1	Secciones verticales de sismicidad	48
5.3.2	Interpolación Polinomial	50
5.3.3	Curvatura Mínima	53
5.4	RESULTADOS	54
5.4.1	Secciones verticales de sismicidad	54
5.4.2	Ajustes polinomiales	58
5.4.3	Curvas de isoprofundidad	61
5.4.4	Esquema 3D	62
5.5	DISCUSIÓN	64
CAPÍTULO VI		74
DISTRIBUCION DE ESFUERZOS		74
6.1	NOCIONES DE ESFUERZO	75
6.2	MECANISMO DE LOS TERREMOTOS	78
6.2.1	Plano de falla	79
6.2.2	Mecanismos focales	80
6.3	BASE DE DATOS	82
6.4	ANÁLISIS	83
6.4.1	Mecanismos focales	84
6.4.2	Distribución y Estado de los Esfuerzos	88
6.4.3	Proyección estereográfica de los ejes P y T	94
CAPÍTULO VII		108
INTERPRETACION Y DISCUSION		108
CONCLUSIONES		
BIBLIOGRAFIA		
ANEXO 1, Perfiles sísmicos		

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Tierra es un Planeta vivo que se encuentra en constante transformación, esta formada por cuatro capas; litósfera, astenósfera, mesosfera y núcleo. Las placas tectónicas, son fragmentos de litósfera que se desplazan sobre la astenósfera, y están unidas entre si, a través de sus márgenes de contacto. El movimiento constante de las placas tectónicas se debe principalmente a las corrientes circulares de convección formadas por el ascenso del magma caliente procedente de la base del manto, llegan a la litósfera, y luego retornan al fondo del manto originando, de esta manera, un movimiento cíclico de ascenso y descenso del magma. Estas corrientes de convección pueden llegar a romper una placa y separar los fragmentos, lo que daría origen a la formación de dorsales oceánicas, o en otro caso producir la colisión de una placa contra otra iniciando el proceso de subducción donde la placa litosférica más densa se introduce por debajo de la menos densa hasta llegar al manto.

En el Perú esta interacción se realiza entre las placas de Nazca (con una edad de alrededor de 50 millones de años) y la Sudamericana a una velocidad de 6.5 cm/año (Khazaradze y Klotz, 2003) en dirección 70° NE (Norabuena, 1999). El deslizamiento entre ambas placas se da frente a la costa peruana, existiendo áreas que ofrecen mayor resistencia al desplazamiento, lo que causa la acumulación de energía que se libera permanentemente en forma de sismos. Los sismos pueden alcanzar grandes magnitudes y producir daños y efectos en superficie que afectan a la población en general. La potencialidad de daño es

denominada peligrosidad sísmica, lo cual ha motivado a muchos científicos a realizar diversos estudios sobre la naturaleza y los elementos que participan en el proceso de ocurrencia de sismos, entre ellos el estudio de la deformación de la placa de Nazca.

En el Perú, la geometría de la placa de Nazca ha sido estudiada por diversos autores utilizando diferentes tipos de información sísmica tales como datos telesísmicos (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Kanamori y McNally, 1982; Jordan et al., 1983; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Tavera, 1998 y Tavera y Buforn, 2001), datos regionales y locales (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991; Lindo, 1993 y Bernal, 2002) e información de mecanismos focales (Isacks y Molnar 1971; Stauder, 1975; Hasegawa y Isacks, 1981); que permitieron conocer la distribución de esfuerzos dominantes producto de la deformación de la placa. Estudios realizados con datos geofísicos, geológicos y los mencionados anteriormente, sugieren la existencia de una placa oceánica heterogénea que alterna entre una subducción normal y otra subhorizontal, y cuya geometría varía de un modelo a otro debido a los diferentes datos y métodos utilizados en cada estudio.

En el presente estudio se propone una geometría 3D para la placa de Nazca a partir del análisis de la distribución espacial de los sismos mediante perfiles sísmicos y la aplicación de técnicas de ajustes polinomiales. Además, se analiza el estado de los esfuerzos a los que esta sometida la placa de Nazca dentro del proceso de subducción, utilizando el catálogo de mecanismos focales propuesto por la Universidad de Harvard. La presente investigación se organiza en 8 capítulos y sus contenidos son descritos a continuación:

Capítulo I: se presenta el alcance general acerca del proceso de convergencia de placas y los estudios sobre el tema realizados en el Perú.

Capítulo II: se describe las características tectónicas relacionadas al proceso de subducción.

Capítulo III: se realiza la descripción de la geodinámica y los elementos que intervienen en el proceso de subducción.

Capítulo IV: se describen las bases de datos sísmicos utilizadas, así como el análisis de la distribución espacial de la sismicidad instrumental que ocurre en Perú.

Capítulo V: se realiza una reseña cronológica de los estudios realizados en Perú que propusieron modelos para la geometría de la Placa de Nazca.

Capítulo VI: en este capítulo se describe la metodología utilizada para obtener el modelo 3D de la placa de Nazca, así como el análisis de los tipos de subducción que se presenta en Perú.

Capítulo VII: se detalla la metodología aplicada para generar los mapas de distribución de esfuerzos presentes en el proceso de convergencia de placas y su respectivo análisis.

Capítulo VIII: se realiza el análisis sismotectónico de la Placa de Nazca dentro del proceso de subducción para el Perú.

Finalmente, la última sección corresponde a las conclusiones del estudio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos generales

- Analizar la distribución espacial en superficie y profundidad de los eventos sísmicos ocurridos en el Perú en el periodo de 1960 -2011.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Generar un modelo 3D para la geometría de la placa de Nazca para el Perú.
- Analizar y cuantificar la distribución espacial de los esfuerzos principales (P y T).
- Correlacionar la distribución de los ejes de deformación con la geometría de la placa de Nazca 3D.

1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al Perú, el cual se encuentra ubicado en el borde occidental de América del Sur, limitada de Oeste a Este, desde la fosa oceánica hasta la frontera con Colombia, Bolivia, Chile y Brasil (Figura 1.1).



Figura 1.1; Mapa topográfico y ubicación del área de estudio. Las flechas indican la dirección del movimiento de las placas.

CAPÍTULO II

MARCO GEOTECTÓNICO

Existen diversos procesos dinámicos en la Tierra, como por ejemplo el de absorción de la corteza en las zonas de subducción y la creación de corteza en las dorsales, pero el más relevante corresponde al proceso de subducción y a partir de este la generación de varios niveles de deformación en la corteza continental y en sus rasgos estructurales. En el marco de la geotectónica se describen las formas estructurales creadas por los movimientos tectónicos a nivel global y regional.

2.1 Tectónica global

La deriva continental propuesta por Wegener (1912) es una hipótesis que describe el movimiento de las placas a lo largo de la historia geológica de la Tierra. Años más tarde, en base a esta propuesta, se desarrolló la Teoría de Tectónica de Placas, la cual unificó la dinámica global del planeta e integró en un modelo congruente a la distribución de los diferentes elementos y procesos geológicos que afectan y han afectado históricamente a la Tierra, considerando las nociones y conocimientos sobre la evolución de los continentes y los fondos oceánicos (Uyeda, 1980).

Según el modelo de la tectónica de placas, la litósfera se quiebra y se divide en numerosos fragmentos denominados placas tectónicas, las cuales se encuentran en constante movimiento debido a las corrientes de convección y cuya forma y tamaño cambian continuamente en el tiempo (Figura 2.1).

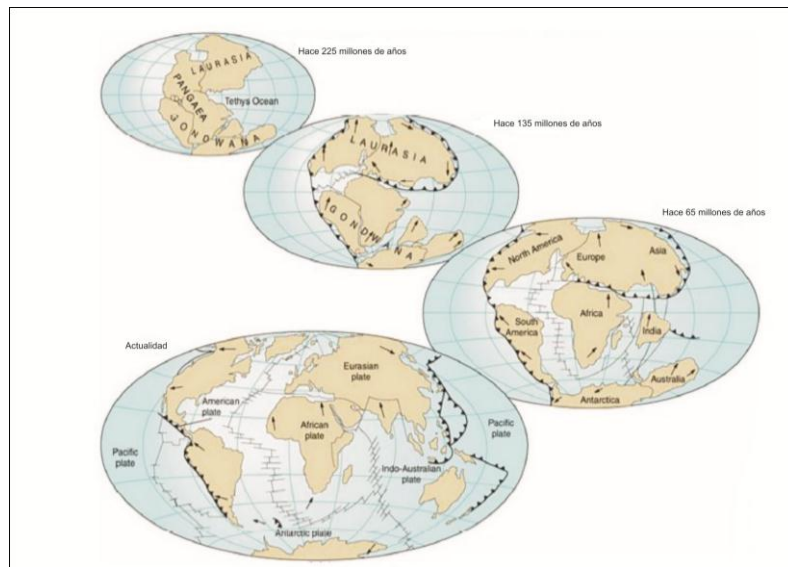


Figura 2.1; Evolución dinámica de la tectónica de placas desde la Pangea al presente.

Actualmente, las placas tectónicas pueden ser clasificadas según su tamaño en placas principales, intermedias y una docena de placas pequeñas, las cuales demuestran la naturaleza dinámica de la corteza terrestre. La placa de Nazca se encuentra en la clasificación de placa intermedia y la placa Sudamericana en la de placa principal.

Cada placa tectónica se mueve independientemente en distintas direcciones y velocidades, pero no superan pocos centímetros al año respondiendo a los flujos de convección del manto superior (Figura 2.2).

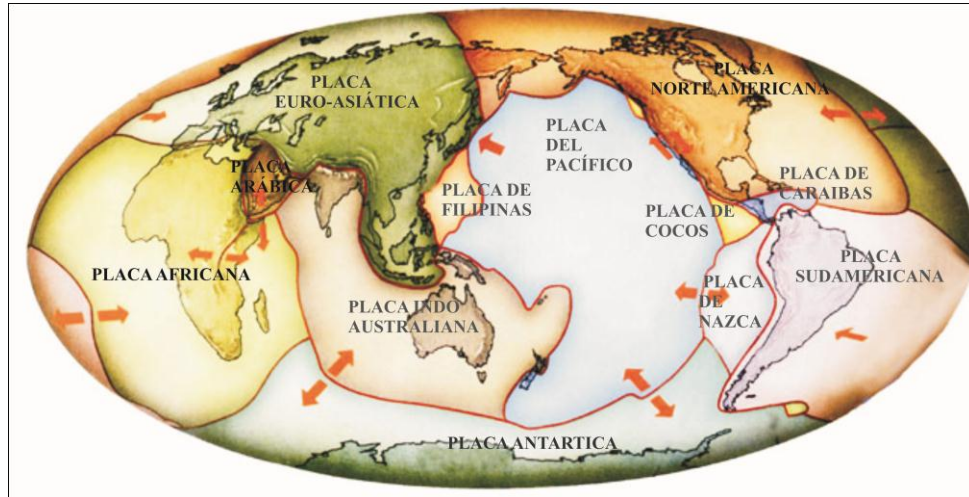


Figura 2.2; Placas tectónicas principales e intermedias. Las flechas rojas indican la dirección del movimiento.

2.1.1 Márgenes de Placas

En el movimiento sincronizado que realizan las placas con respecto a otras, la mayor parte de la deformación se produce a lo largo de sus límites o bordes. Los límites de las placas pueden ser de 3 clases y se diferencian por el tipo de movimiento que exhiben (Figura 2.3).

BORDES DE PLACAS	ESQUEMA	ELEMENTO ASOCIADO	FENOMENOS ASOCIADOS	EJEMPLOS
MARGENES DE EXTENSIÓN O DIVERGENCIA Las placas se separan y se crea litosfera (fondo oceánico)		DORSALES OCEANICAS Gran grieta volcánica submarina	- vulcanismo submarino - terremotos submarinos - expansión de los océanos - deriva continental	DORSAL MEDIOATLANTICA
MARGENES DE SUBDUCCIÓN O CONVERGENCIA Las placas se acercan y se destruye litosfera, que se recicla al pasar de nuevo al manto		ZONAS DE SUBDUCCION La placa oceánica se mete por debajo de la continental	- terremotos - volcanes - OROGENESIS: cordilleras periocénicas	LOS ANDES (la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana)
		ZONAS DE SUBDUCCION Una de las placas oceánicas se mete por debajo de la otra	- arcos insulares volcánicos - fosas marinas	ARCHIPELAGO DEL JAPON
MARGENES DE DESLIZAMIENTO HORIZONTAL Placas rozándose lateralmente. Ni se crea ni se destruye litosfera		LEVANTAMIENTO DE AMBAS PLACAS Chocan dos placas continentales	- terremotos - OROGENESIS: cordilleras intercontinentales	CORDILLERA DEL HIMALAYA (La India choca con el continente asiático)
		FALLAS DE TRANSFORMACION	- terremotos	FALLA DE SAN ANDRES (la península de California roza con Norteamérica)

Figura 2.3; Esquema que muestra los diferentes márgenes de contacto entre placas.

a) Márgenes de extensión o divergencia

Se producen fundamentalmente en las dorsales oceánicas donde conforme las placas se separan las fracturas creadas son rellenadas con roca fundida que sube desde la astenósfera, este material caliente disminuye su temperatura gradualmente hasta convertirse en roca dura que se convierte en nuevas franjas de fondo oceánico. Este mecanismo ha creado el suelo de los océanos durante los últimos 160 millones de años dentro del proceso denominado “expansión del fondo oceánico” (Hess, 1962). La velocidad típica de expansión del fondo oceánico es de 5 cm/año, aunque varía considerablemente de un centro de expansión a otro. Esta velocidad de producción de litósfera es considerada lo suficientemente rápida como para generar todas las cuencas oceánicas presentes en la Tierra. De hecho, ninguna parte del suelo oceánico datada supera la edad de 180 millones de años. Conforme se va formando nueva litósfera a lo largo de una dorsal oceánica, la litósfera más vieja se aleja lenta y permanentemente del eje de la dorsal, comenzando un proceso de enfriamiento y contracción, incrementando con ello su densidad. Este enfriamiento hace que aumente la resistencia mecánica de las rocas del manto situadas debajo de la corteza oceánica con lo que aumenta el grosor de la placa litosférica. Dicho de otra manera, el grosor de la litósfera oceánica depende de la edad, cuanto más antigua y fría, mayor es su grosor. Las dorsales que se forman en este tipo de margen de placa se extienden por todo el mundo a lo largo de 70.000 kilómetros cruzando todas las principales cuencas oceánicas.

b) Márgenes de subducción o convergencia

Aunque se esta añadiendo constantemente nueva litósfera en los márgenes de extensión, el tamaño y el área del planeta se mantiene constante. Esto se debe a que, mientras la litósfera, recién creada es acomodada formando dorsales, las placas oceánicas más antiguas vuelven al manto a lo largo de los límites convergentes. Los procesos geodinámicos que ocurren en estos márgenes dependen de los tipos de litósfera que convergen, ya que la de origen oceánico es más densa y delgada que la continental y esto condiciona que durante el choque, una placa se puede introducir o

no debajo de la otra. Los límites de placas convergentes se pueden producir entre litósferas oceánicas, continentales ó entre litósfera oceánica con otra continental. Si colisionan dos placas de litósfera oceánica, cualquiera de las dos puede hundirse debajo de la otra, generalmente la más densa y antigua, lo cual da origen a un proceso de subducción. Si colisiona una placa oceánica con otra continental, siempre la litósfera oceánica, que es más densa y delgada, es la que se introduce debajo de la litósfera continental. El plano sobre el cual se produce la subducción es conocido como el “Plano de Benioff” el cual es definido por la ocurrencia de un gran número de sismos a diferentes niveles de profundidad. Las cordilleras asociadas a este tipo de convergencia siempre se sitúan en la parte exterior del continente, por lo que reciben el nombre de cordilleras intracontinentales como las cordilleras del Himalaya, Pirineos y la cordillera de los Andes, además se exhibe un intenso vulcanismo dando origen a la formación de Arcos de islas situada sobre la placa no subducida producto de la fusión de la corteza oceánica y posterior ascenso de magma a través de la corteza continental. Si se trata de dos placas de litósfera continental, la de mayor densidad, en relación a la astenósfera, se introduce por debajo de la otra, sin que se desarrolle un auténtico proceso de subducción. En este caso, ambas masas continentales se deforman y comprimen hasta que, finalmente, se unen en un único bloque en un proceso denominado obducción.

c) **Márgenes de deslizamiento horizontal**

Estos márgenes son paralelos a la dirección del movimiento de las placas y se encuentran entre las placas que se deslizan con respecto a otra sin generar litósfera nueva ni consumir litósfera antigua. Fueron descubiertos por su asociación con las dorsales oceánicas, y a pesar de que la mayoría de estos márgenes están localizados a lo largo de las dorsales centro-oceánicas, existen algunos que atraviesan los continentes. Por ejemplo, la falla de San Andrés en California, tan propensa a terremotos, y donde la placa del Pacífico se mueve hacia el noroeste, más allá de la placa Norteamericana. Conforme las placas se deslizan una al lado de la otra, la tensión se acumula en las rocas situadas en lados opuestos de la falla, en algunos

casos las rocas se rompen, liberando energía en forma de un gran terremoto, como el que devastó San Francisco en 1906 (Wilson, 1965).

2.2 Tectónica Regional

En el Perú la presencia de los diversos rasgos tectónicos localizados a ambos extremos de la cordillera de los Andes está relacionado con el proceso de subducción (Figura 2.4), siendo sus principales características las siguientes:

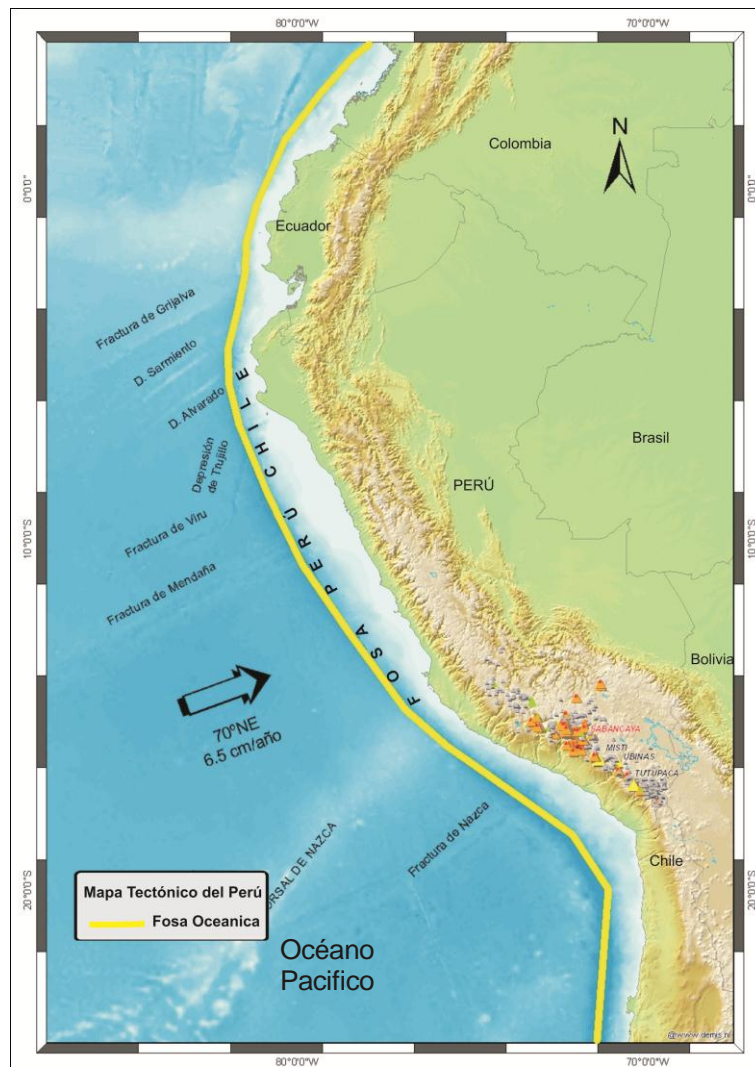


Figura 2.4; Rasgos tectónicos en el borde occidental del Perú. La línea amarilla corresponde a la línea de fosa y los triángulos a los volcanes presentes en la zona Sur del Perú.

2.2.1 Fosa Oceánica

La fosa Perú - Chile se encuentra ubicada cerca y paralela al borde continental, siendo una depresión que se formó por la interacción entre la placa de Nazca y la Sudamericana e indica el inicio de la convergencia entre placas. Alcanza profundidades de 6000 m en la zona Norte y en el Sur del Perú (Heras, 2002), disminuyendo en la zona centro hasta 4900 m, frente Dorsal de Nazca (15°S). Su distancia, con relación a la línea de costa, en la región norte es de 80 Km., en la región central varía entre 60 Km. y 150 Km., y en la región sur es de 120 km. Además, presenta diversas orientaciones; hacia el Norte y Centro de Perú con una orientación de NNO-SSE y NO-SE en la región Sur del Perú (Heras y Tavera, 2002). El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca. A pesar de que no se le considera como una de las fosas más profundas, con respecto a su longitud, es una de las mayores existentes en la Tierra, siendo sobrepasada únicamente por el sistema de fosas de la India Oriental y Kuril en Japón.

2.2.2 Dorsales Oceánicas

Son cordilleras submarinas que se elevan desde el fondo oceánico como resultado de antiguas zonas de generación de corteza oceánica. Frente al borde occidental del Perú se puede observar la presencia de 3 dorsales oceánicas: Sarmiento, Alvarado y Nazca. Las dorsales de Sarmiento y Alvarado son paralelas entre sí, poseen una orientación NE, alturas de 1 a 2 Km y una longitud de 400 Km. Para estas dorsales existen evidencias que sugieren que son el resultado de una erupción fisural producida durante el proceso de ruptura de la Placa Farallón hace 24 Ma (Castillo y Lonsdale, 2004).

La Dorsal de Nazca es una cordillera montañosa ubicada en el extremo NO de la región Sur del Perú, frente al departamento de Ica (14°S – 16°S). Se extiende sobre una longitud de 1100 Km con una orientación NE-SO perpendicular a la línea de fosa, y con elevaciones que llegan hasta los 2000 m, y además un ancho de 200 km que disminuye progresivamente en dirección NE (Figura 2.6).

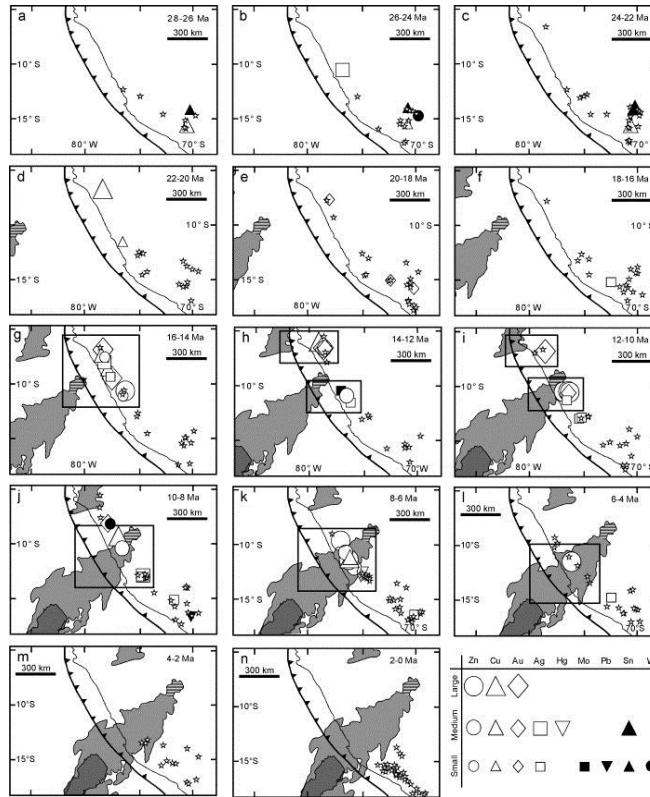


Figura 2.6; Reconstrucción de la subducción histórica de la Dorsal de Nazca, (Rosenbaum et al 2005). La subducción de la dorsal de Nazca comienza hace 16 Ma y su extremo NE subducido estaría localizado bajo la cuenca del Ucayali.

Litológicamente, las dorsales están compuestas de rocas volcánicas y cubiertas por capas sedimentarias, de 300 a 400 m de espesor que disminuyen a decenas de metros en la zona donde subduce bajo el continente (Hampel, et al., 2004). Se estima que la Dorsal de Nazca tiene una edad promedio de 5 a 10 Ma (Marocco, 1980) y su origen probablemente se deba a una antigua zona de creación de corteza (Sévrier et al., 1988) durante el Cenozoico temprano (Hampel, 2002). Existen algunas evidencias que indican la migración de la dorsal subducida a lo largo de la fosa oceánica dentro del proceso de subducción (Von Huene et al. 1996). Probablemente, la Dorsal de Nazca llegó al borde occidental del Perú a los 8° S de latitud y luego migró hacia el sur para estar en la presente posición, a los 15° S (Figura 2.6). También se presume que después de la subducción de la dorsal, el margen subsidie y la mayoría del material se acumula para formar una nueva cuña de acreción.

2.2.3 Fractura de Mendaña

La Fractura de Mendaña se ubica frente a la línea de costa peruana, entre las coordenadas 17°15'S-99°O a 11°S-82°O, con una altura media de 1000 m sobre la corteza oceánica, una longitud de aproximadamente 1100 Km con un ancho de 150 km y una orientación 62° N (Kulm et al. 1983). La litología indica que estaría compuesta principalmente por basaltos. Esta fractura es considerada como una zona de transición que separa dos zonas con una diferencia de edad de 10 millones de años (Yamako y Uyeda, 1990). Se cree que corresponde a una discontinuidad de la corteza oceánica correspondiente a una antigua zona de divergencia de placas.

2.2.4 Depresión de Trujillo

Es una estructura tipo graben con un ancho de 5 km y una altura 500 m del punto más alto al más bajo, además de poseer una superficie accidentada y áspera. Posee una extensión aproximada de 270 km de longitud y subduce por debajo de la placa continental a la altura de los 7.5 ° S en conjunto con la fractura de Viru (Huchon y Burgois, 1999). Estudios de refracción sísmica muestran como esta estructura se extiende hasta la corteza ígnea del piso oceánico (Heinbockel et al., 2003).

2.2.5 Fractura de Viru

Es uno de los rasgos geomorfológicos más importantes de la Placa de Nazca, se ubica de forma paralela 110 Km al norte de la fractura de Mendaña. Se trata de una falla de tipo inversa con una orientación N15°E (Kranbenoft et al. 2004). La depresión de Trujillo une la fractura Virú con la fosa Perú-Chile (Huchon y Burgois, 1999).

2.2.6 Fractura de Nazca

Esta ubicada frente al departamento de Arequipa y junto con la Fractura de Mendaña, forman la característica batimétrica más notable después de la Dorsal de Nazca. Ambas fracturas poseen lineamientos paralelos con una dirección NE, perpendicular a la fosa. Se encuentra a 250 Km de la Dorsal de Nazca en su punto más Oeste y a

25Km en su punto más cercano. Alcanza los 700 m sobre el nivel de la corteza oceánica con profundidades de 300 m (Robinson et al., 2006).

2.2.7 Cordillera Andina

Se extiende hacia el oeste del margen continental de Sudamérica desde Venezuela hasta el sur de Chile a lo largo de 8000 Km con alturas del orden 7000m (Ramos, 1999). En el Perú presenta un ancho que oscila entre los 250 km en la región Central y 500 km en la región Sur y espesores que van entre los 50 a 70 km (James, 1971). Muchos autores analizaron los Andes y se ha propuesto diferentes clasificaciones geológicas dependiendo de la identificación de segmentos y sus propiedades geológicas. Gansser (1973) propuso una de las principales, reconociendo tres unidades principales: Andes del Norte, Centrales, y del Sur. En el Perú se encuentra ubicado parte de los Andes Centrales que se extiende desde el Golfo de Guayaquil 4° S y el Golfo de Penas 46°S. Los Andes centrales son un típico orógeno de tipo Andino, cuyo origen tectónico fue conducido por la subducción durante las épocas mesozoicas tempranas (Mégard, 1978), a partir de este proceso se generaron esfuerzos compresivos y la migración del magmatismo hacia el Este del Perú, además de una constante deformación y levantamiento de la cadena Andina en los últimos 20 Ma (Soler y Sébrier, 1990). A lo largo de los Andes Peruanos se registran procesos neotectónicos muy activos como las fallas inversas y las fallas activas normales en la parte norte del Altiplano (Sébrier et al., 1985). Más al sur del Altiplano existen fallas activas predominantemente del tipo normal (Allmendinger et al., 1997).

2.2.8 Cadena Volcánica

Se encuentra distribuida sobre la cordillera occidental de los Andes al sur de los 14°S siguiendo una dirección NO-SE. Entre los principales volcanes presentes en la región Sur del Perú se pueden mencionar a Coropuna (6425 m), Sabancaya (5795 m), Misti (5825 m), Ubinas (5672 m), Chachani (3745m) Huaynaputina (4800 m.), Tutupaca (5806 m.), Yucamane (5508 m.). Hacia la parte norte y centro del Perú la actividad

volcánica desapareció hace 8Ma aproximadamente junto con el cambio en la subducción de la placa de Nazca (Moroco, 1980).

2.2.9 El Escudo Brasileño

El escudo brasileño es una plataforma continental estable situada al este de la Cordillera de los Andes que se extiende por 4.000 kilómetros entre sus extremos noreste y sureste. Según su litología, esta unidad está compuesta por rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica, suprayacidas por rocas sedimentarias del paleozoico. Este basamento se presenta a nivel de la cuenca hidrográfica del río Amazonas. Asimismo, se observa la presencia de pliegues suaves y muy amplios con una orientación NNO cuyo origen podría atribuirse a una curvatura de corteza asociada con los esfuerzos compresivos que afectaron al extremo occidental de la placa Sudamericana durante el Neógeno.

2.2.10 Sistemas de fallas

El origen de los sistemas de fallas presentes en el Perú está asociado principalmente a la constante deformación presente en la corteza continental producida por el proceso de subducción. Estas fallas se presentan en gran número a lo largo de la zona subandina y en el flanco Este de la cordillera de los Andes. A continuación se detallan los sistemas de fallas más importantes (Figura 2.7):

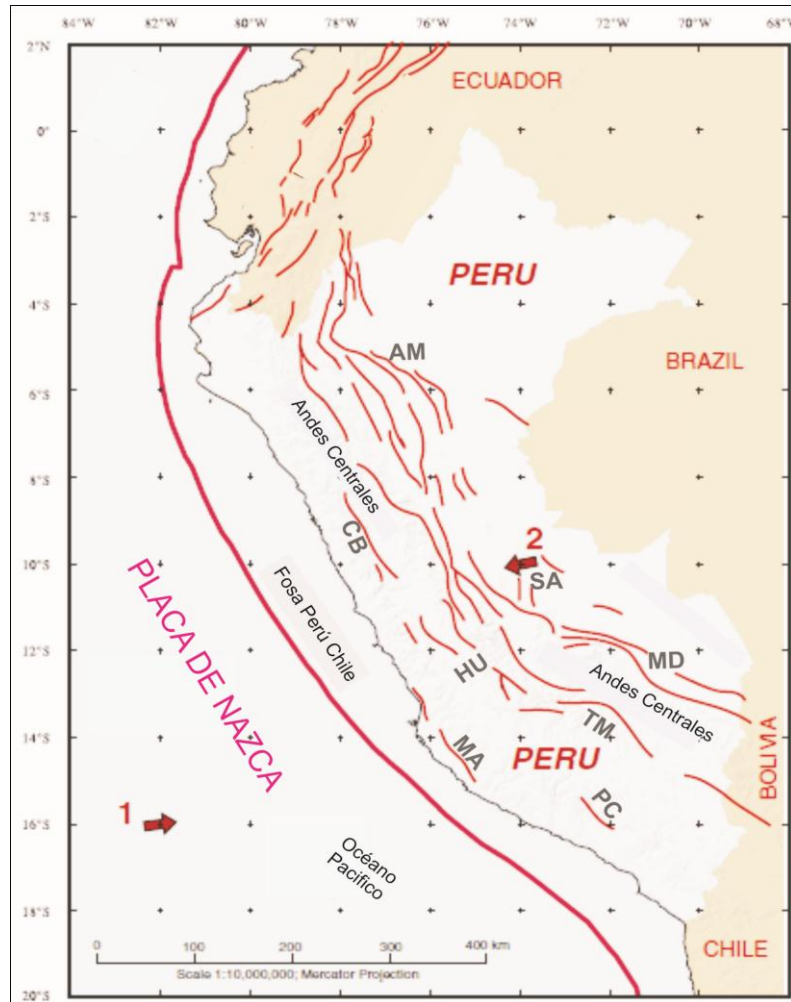


Figura 2.7; Principales Sistemas de fallas en el Perú (Machare et al 2003). HP=Huaypira, AM= Madre de Dios, CB=Cordillera Blanca, SA=Satipo, HU=Huaytapallana, MD=Madre de Dios, TM=Tambomachay, MA= Marcona, PC= Pampacolca.

Zona Costanera: En esta zona, hacia los 5°S se ubica la falla de Huaypira (HP) con orientación NE-SO y E-O y entre 14°S y 16°S, se observa la presencia de la falla de Marcona (MA). Estas fallas presentan longitudes del orden de 90 km en promedio y según evidencias de campo corresponderían a fallas de tipo normal.

Cordillera Oriental y Occidental: El importante proceso de levantamiento que ha soportado la Cordillera Andina, ha permitido la formación del sistema de fallas que se localizan al pie de la Cordillera Blanca y que lleva el mismo nombre (CB). Ésta falla es de tipo normal y de las de mayor extensión en el mundo, con 200 Km de longitud.

A la altura de la coordenada de 16°S aparece la falla de Pampacolca (PC) con una longitud de 30 km, siendo esta de tipo normal con buzamiento de su plano principal en dirección SO. En la zona de alta Cordillera sobresale el sistema de falla del Huaytapallana (HU), ubicada a una latitud de 12.5°S. Esta falla es de tipo inverso y en promedio alcanza una longitud de 25 km en dirección NO- SE y buzamiento hacia el SO. En la región Sur del Perú, se ubica el sistema de fallas de Tambomachay (TM) entre 13°S - 14.5°S, el mismo que prácticamente cruza, de Norte a Sur, a todo el extremo meridional del departamento del Cuzco. Este mismo sistema considera además, a un importante número de fallas de tipo normal que se distribuyen siguiendo diversas direcciones. La mayoría de las fallas se orientan en dirección Este – Oeste como las fallas de Viscachani, Alto Vilcanota, Pomacanchi y Langui-Layo.

Zona Subandina: En esta zona destacan los sistemas de fallas del Alto Mayo (AM), ubicadas entre las coordenadas de 4°S a 8°S. Uno de los ramales principales de este sistema, recibe el nombre de falla Moyabamba. En la parte central se encuentra el sistema de falla de Satipo – Amauta (SA) entre 9°S y 12°S y el sistema de fallas de Madre de Dios (MD) entre 12°S y 14°S. Todos estos sistemas, presentan trazas de diferentes longitudes (del orden de 300 a 500 km) y en general, se orientan paralelas a la Cordillera Andina.

CAPÍTULO III

GEODINÁMICA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN

En la geodinámica del proceso de subducción intervienen como factores principales: las placas de Nazca y Sudamericana, las mismas que interactúan entre si para dar a cada área de contacto su propia dinámica, junto con los cambios en la gradiente de temperatura, las corrientes de convección y los sistemas de fuerzas (Figura 3.1). Esta dinámica se expresa a través del movimiento de las placas, la migración de la fosa, la deformación de la placa superior y la sismicidad de arco que varía de una zona a otra dependiendo del equilibrio de fuerzas.

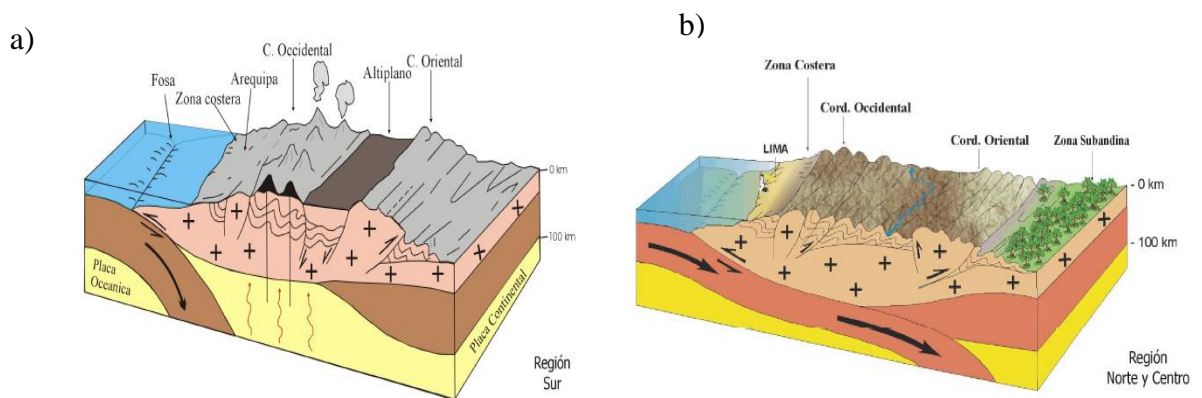


Figura 3.1; Esquema que representa el proceso de subducción en el Perú, a) subducción normal en el sur b) subducción subhorizontal en el norte y centro (Mattauer, 1989).

3.1 Elementos estructurales principales

3.1.1 Placa de Nazca

La placa de Nazca es un fragmento de la litósfera oceánica cuyo margen oriental corresponde al de un borde convergente. Antes de involucrarse con la placa Sudamericana, la placa de Nazca muestra una resistencia preliminar al inicio de la subducción, para luego sumergirse por debajo de la otra, en un proceso denominado subducción. Durante su viaje hacia el manto, la Placa de Nazca se enfría, esta disminución de temperatura, que se realiza por difusión térmica, esta muy influenciada por la circulación del agua de mar, especialmente en los primeros kilómetros de profundidad.

3.1.2 Placa Sudamericana

La placa Sudamericana, es una gran placa que abarca la mitad del continente y un área considerable de corteza oceánica, además es la placa superior que forma parte del proceso de subducción. Los primeros cientos de kilómetros de contacto entre placas incluyen a la fosa, antearco, arco magmático y trasarco y se ven particularmente afectados por una serie de procesos magmáticos y tectónicos directamente relacionado con la subducción.

La zona ante-arco se encuentra entre la fosa y el arco magmático, además se pueden distinguir pre-arcos ampliados por acreción de material a lo largo de la fosa correspondientes a los prisma de acreción.

Los prismas de acreción se presentan en forma de sedimentos cerca de la mayoría de los continentes producto de la acreción frontal y la intrusión de la placa de Nazca que se convierten en una cubierta de sedimentos al inicio del proceso de subducción.

El arco magmático se materializa en la alineación en superficie de los volcanes paralelos a la fosa oceánica. Se encuentra justo debajo de las zonas de fusión sobre la

placa Sudamericana, además se caracteriza por la presencia de grandes flujos de calor que contrastan fuertemente con el menor flujo que prevalece en la región antearco.

La región de tras-arco se caracteriza, en la mayoría de las zonas de subducción, por una deformación activa y muy variable como es la formación de cadenas montañosas a través de una superposición retro-translitosférica.

3.2 Elementos secundarios

3.2.1 Gradiente Térmico del Manto

El gradiente térmico en el manto varía entre los 400°C , en la zona de contacto con la litosfera, hasta los 1300°C en la frontera núcleo-manto. La variación de la temperatura en el manto refleja que las capas profundas tienen una mayor dificultad a perder calor por conducción a la superficie y la mayor capacidad endógena de producir calor en profundidad, este comportamiento probablemente este asociado al decaimiento radiactivo y a la fricción con los materiales fluidos en el movimiento del núcleo externo (Figura 3.2).

La diferencia de la temperatura determinaría la posibilidad y la capacidad de las placas rígidas para acumular los esfuerzos que repentinamente se liberan por medio de un sismo.

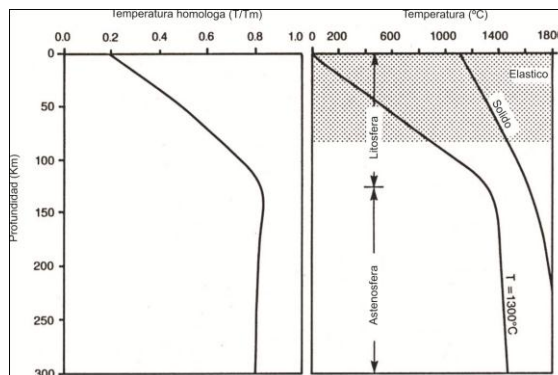


Figura 3.2; Esquema del gradiente térmico en el manto.

3.2.2 Corrientes de convección

Las corrientes de convección en el manto tienen como fuerza motriz al gradiente térmico. Este proceso se observa cuando grandes fragmentos de rocas a gran temperatura y profundidad, menos densas y más livianas que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie; mientras que, rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, se recalientan y ascienden a la superficie una y otra vez (Holmes, 1931).

Como el estado de convección térmica es extremadamente lento, llegando apenas a unos centímetros por año, se forman grandes celdas con vectores de flujo promedio aproximado de la magnitud del radio del planeta y con duración comparable a periodos geológicos. (Figura 3.3).

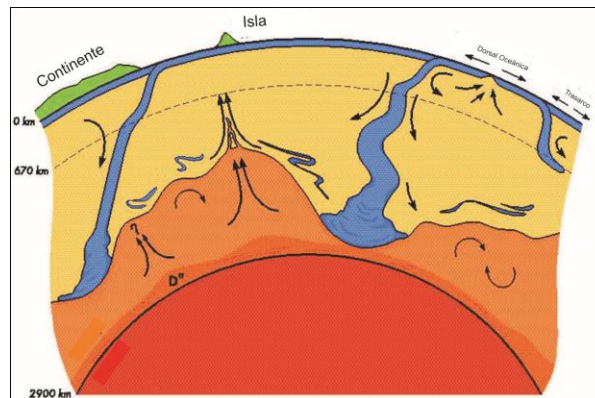


Figura 3.3; Representación esquemática parcial del manto terrestre (Kellogg et al. 1999). Las flechas representan la dirección de las corrientes de convección.

3.3 Placas en movimiento

Existen algunos estudios que indican que el manto podría ser impulsado por un flujo global dirigido hacia el Este (Ricard et al., 1991; Doglioni, 1993), o un flujo regional bajo la influencia de una pluma de manto completamente independiente de la influencia de las zonas de subducción (Lagabrielle et al, 1997). Estos flujos generan fuerzas de presión a lo largo de la placa en subducción, que podrían influenciar en su movimiento.

3.4 Las fuerzas motrices

El significado físico de fuerza indica que es la capacidad de cambiar el momento de un cuerpo representado por el producto de su masa por su velocidad. En general, se acepta la existencia de 2 tipos de fuerzas, de volumen y de superficie, ambas actuando en conjunto en todo proceso sísmico.

Las fuerzas de volumen son las que actúan en el interior del sólido y sobre los elementos de volumen del cuerpo, el ejemplo más conocido es la fuerza de gravedad, $F=Mg$ (Figura 3.4).

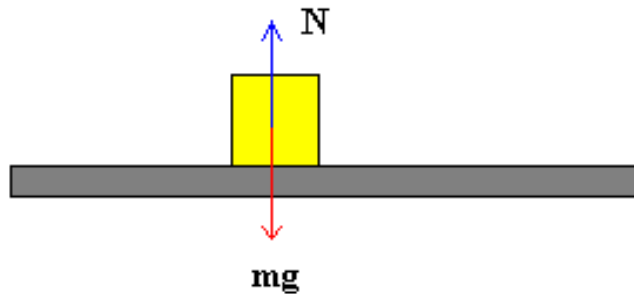


Figura 3.4; Esquema que representa la fuerza actuante sobre un volumen determinado

En cambio, las fuerzas de superficie actúan sobre la frontera que separa el elemento de volumen de su entorno; es decir, actúan sobre la superficie de un sólido y puede ser producida por el contacto con otro sólido independiente de la masa; por ejemplo, la fuerza de presión (Figura 3.5).

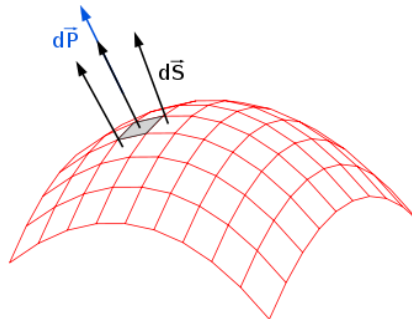


Figura 3.5; Esquema que representa cada elemento con una fuerza dP y un dS .

Considerando el caso de la subducción de una placa oceánica bajo una continental es probable que el plano entre las dos superficies, este sometido a fuerzas horizontales F_{xx} que resultan de la convergencia de ambas placas. Las fuerzas provienen del movimiento de ambas y del efecto de resistencia al mismo. Además, dentro del proceso actúan las fuerzas verticales F_{zz} inducidas por la deformación de volumen. Estas fuerzas se descomponen en fuerzas tangenciales y normales al plano de contacto entre ambas superficies (Figura 3.6).

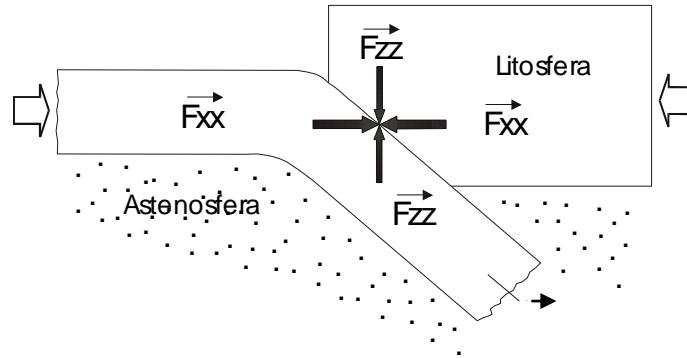


Figura 3.6; Esquema que muestra las principales fuerzas de contacto actuantes dentro del proceso de subducción

Además, pueden ser consideradas como fuerzas motrices aquellas que inducen la dinámica de las placas y se distribuyen de forma que se mantiene el equilibrio entre los procesos de creación y absorción de la corteza. Las fuerzas presentes en el proceso de subducción pueden ser clasificadas en base a la correlación del movimiento de las placas y los campos de esfuerzos o en función de su origen. Si se clasifican según su origen, como se considera en este capítulo, pueden ser fuerzas primarias si se generan desde el límite de colisión por sus movimientos relativos, y fuerzas secundarias si se generan por las características propias de la litósfera afectada por las fuerzas primarias o por condiciones externas (Zoback, 1989). A continuación se detallan los sistemas de fuerzas según su origen.

3.4.1 Fuerzas Primarias

-La tracción de la placa o "slab pull"

El movimiento de las placas está fuertemente influenciada por el peso de la placa que se hunde en el manto siguiendo una dirección perpendicular a la fosa, por lo que se crea una anomalía positiva de masa o flotabilidad negativa que acentúa el descenso de dicha placa. La fuerza de tracción es resultante del peso de la placa y la resistencia de la astenósfera, esta fuerza es vertical y expresa el efecto de masa de la placa sobre la astenósfera en función de la densidad media ($\Delta\rho_m$).

- El empuje de la dorsal o "ridge push"

La generación de magma en la dorsal y la posterior intrusión del mismo generan la expansión del fondo oceánico, debido principalmente a la energía potencial creada a partir de la diferencia de cotas en la dorsal. De acuerdo con Turcotte y Schubert (1982), la elevación de la batimetría induce una presión que va de la zona más joven hacia la más antigua, conocida como esfuerzos de extensión o empuje de las dorsales.

3.4.2 Las fuerzas secundarias

Constituyen un segundo tipo de fuerzas que están influenciadas por condiciones externas y ofrecen resistencia a la evolución de la subducción. Actúan de manera local y en sentido opuesto a las fuerzas primarias y cuando estas son superadas se produce el desplazamiento de las placas. Estas fuerzas de resistencia actúan generalmente al interior de la placa, como la resistencia continental que actúa empujándola hacia atrás (R_c), el arrastre viscoso entre la litósfera y el manto (A_v) que se oponen a la penetración de la capa buzante en el manto en el punto máximo de profundidad (M_a), la resistencia viscosa de movimientos de la placa, la fuerza de anclaje, viscosidad y cizallamiento (Figura 3.7).

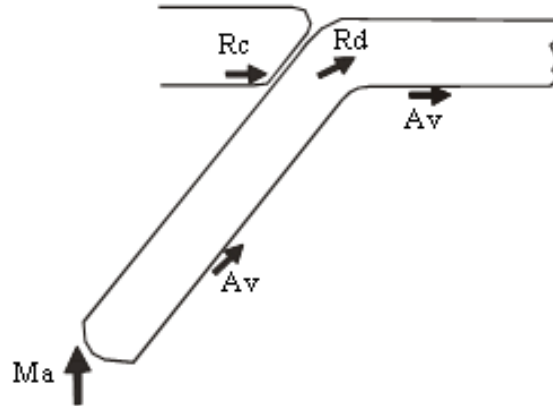


Figura 3.7; Esquema de fuerzas secundarias

- La resistencia a la flexión de la placa(Rd)

La placa que se resiste al desplazamiento hacia la fosa (Rd) entra en contacto con la parte inferior del manto cuando el proceso de subducción alcanza la profundidad máxima.

- Fricción en la interfaz de las placas

La ubicación característica de la sismicidad, en la mayoría de procesos de interacción de las placas, es la que se produce en la zona de interfaz de las placas donde la resistencia a la fricción se aplica a lo largo de la zona sismogénica, aquí es donde se da el contacto entre dos placas convergentes.

- La resistencia viscosa del manto

En un manto pasivo los únicos flujos que existen son los producidos por los movimientos de la litósfera, aunque existen también fuerzas asociadas al flujo global o regional. El manto debido a su viscosidad, se opone a cualquier movimiento de la litosfera ofreciendo una fuerza de resistencia al movimiento de las placas en cada elemento de la zona de interfaz con el manto; es decir, en la base y techo de la placa.

Aunque exista resistencia, esta es mínima pues la capa sigue su movimiento siguiendo la dirección de las placas.

En resumen los sistemas de fuerzas que se han propuesto para explicar el desplazamiento de las placas se pueden reducir a cuatro; las dos primeros están formadas por fuerzas que actúan en los márgenes de las placas (Figura 3.8); es decir, en las zonas donde las placas o bien son empujadas desde los centros de extensión (F1) o arrastradas desde las zonas de subducción por el peso de la capa buzante que ha adquirido una mayor densidad que la del medio que la rodea (F2). Las otras dos fuerzas derivan de la existencia de corrientes de convección térmica, presentes en todo el manto (F4) o sólo en su parte superior (F3) (Orowan y Elsasser, 1967).

La suma de las fuerzas motrices y de resistencia da por resultado una fuerza neta que regula el estado de esfuerzos a los cuales se encuentran sometidas las placas en la zona de subducción.

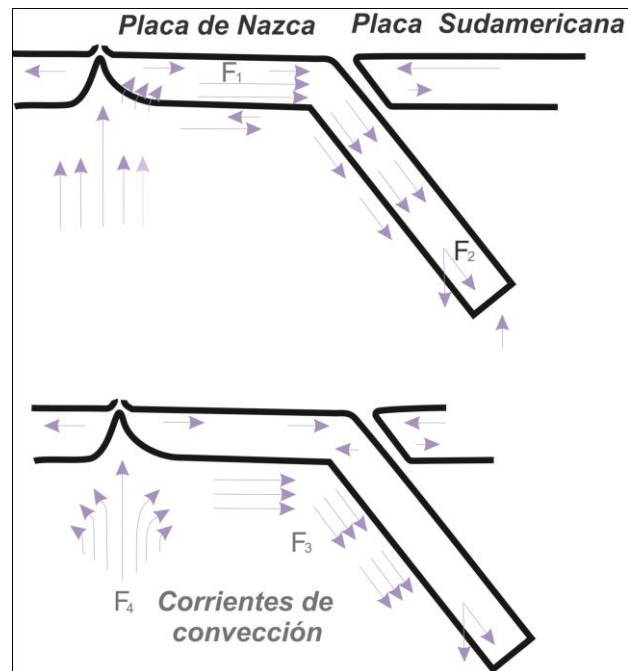


Figura 3.8; Modelos del mecanismo del movimiento de las placas y fuerzas actuando sobre ellas (Udias, 1997)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD

En el Perú y sobre todo en su borde occidental, es frecuente la ocurrencia de sismos, que contribuye en gran porcentaje con la liberación de la energía sísmica en el mundo, especialmente con los terremotos de gran magnitud, todos relacionados con el proceso de subducción entre las placas de Nazca y la Sudamericana (Tavera y Buforn, 1998; Bernal y Tavera, 2002), por esto es considerada como la fuente sismogénica más importante en el Perú. La superficie de fricción, entre ambas placas, se extiende a lo largo de toda la costa hasta llegar a una profundidad aproximada de 60 Km (Guardia y Tavera, 2010).

En menor proporción, la ocurrencia de sismos esta ligada a las deformaciones corticales presentes en la Cordillera Andina, especialmente en su flanco Este y en la zona subandina. En el presente capítulo se analiza la distribución espacial de la sismicidad ocurrida a lo largo del territorio peruano dentro del periodo 1964-2011. El análisis se realiza sobre mapas de epicentros de sismicidad, así como en secciones verticales, con la finalidad de caracterizar la distribución de la actividad sísmica presente en las regiones norte, centro y sur del Perú.

4.1 Catálogos Sísmicos

Un catálogo sísmico contiene los parámetros característicos de un sismo (latitud, longitud, profundidad, magnitud) calculados en las mismas condiciones a fin de constituir una base de datos homogénea con la que se pueda realizar una investigación en el campo de la sismología. La calidad de la base de datos depende de las condiciones en que fueron obtenidos y de los procedimientos de evaluación, pues solo en estas condiciones pueden ser considerados como homogéneos. La información debe ser lo más actual posible ya que así se tiene la seguridad de que los parámetros focales de los sismos han sido correctamente determinados con el uso de un mayor número de datos. Los catálogos se deben considerar siempre preliminares, pues pueden aparecer nuevos documentos que modifiquen los parámetros de un sismo de forma parcial o completa. Esta clasificación incluso es aplicable al periodo instrumental, ya que determinaciones más precisas de la estructura de la corteza, e incluso de los métodos de cálculo, pueden modificar también las soluciones obtenidas. Es recomendable que el catálogo sísmico sea lo más extenso posible ya que así serán más fiables los resultados, es por esto que para el presente estudio se utilizaron diferentes catálogos de sismicidad que fueron compilados para obtener un catálogo base lo más completo posible.

Es importante recalcar que los datos telesísmicos poseen un mayor rango de error con respecto a la ubicación hipocentral de redes locales debido a que la información que se utiliza proviene de estaciones sísmicas que distan ampliamente de la fuente. En este caso, los errores dependen directamente del número de estaciones, su cobertura azimutal y del modelo de velocidad utilizados en el cálculo de los parámetros del sismo. Con respecto a las estaciones locales y regionales, estas pueden tener un error menor comparando con las Estaciones Telesísmicas, pero la información obtenida sólo permite realizar estudios sísmicos para áreas pequeñas y en este caso, se debe tomar en cuenta que los patrones de deformación producida por sismos pequeños pueden no obedecer al patrón regional. (Tavera y Bernal, 2002). La base de datos utilizada en el presente estudio esta constituida por los catálogos de Engdahl (2002), el catalogo del Instituto Geofísico del Perú (IGP), y la base de datos correspondiente a campañas sísmicas temporales realizadas en los años 1980,

1981, 1985 y 1996 al 2001. Finalmente, el periodo de datos se encuentra en el intervalo de 1964 a 2011 y las características de cada base integrada de datos son:

4.1.1 Engdahl et al. (2002)

El catálogo de Engdahl es una base de datos mundial con una optimización en los parámetros de localización y profundidad reportados para los sismos ocurridos entre 1964 y 1999, en el intervalo de magnitudes de 3.4 a 6.9 y profundidades variables de hasta los 700 Km. De esta base de datos, se considera 3095 eventos que corresponden al Perú.

4.1.2 Catálogo sísmico local (IGP)

El catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) está constituido por información que proviene de la red sísmica nacional en el intervalo de 2000 al 2011. La magnitud de completitud, del catálogo es de 4.0 ML. Debido al número de estaciones y a su cobertura azimutal los parámetros hipocentrales de los eventos presentan errores menores a 5 Km.

4.1.3 Otros catálogos

Con la finalidad de construir una base de datos más representativa y detallada para el Perú, se ha visto por conveniente hacer uso de bases de datos complementario, los cuales aportan mayor información sobre aquellas zonas donde no se dispone de datos sísmicos o donde es necesario incrementar la información para analizar el comportamiento de la sismicidad en detalle. A continuación, se indican las características de estas bases de datos.

- **Grange (1983)**

El autor elaboró una base de datos sísmicos en base a dos campañas de microsismicidad realizadas en la región Sur del Perú entre los años 1980 y 1981 que permitió el registro de un alto índice de sismicidad cuyos epicentros se distribuyen en la región Sur del Perú. Con la información obtenida se construyó

una base de datos de 843 eventos sísmicos con magnitudes que llegan hasta los 6.5 ML y una profundidad máxima de 244 Km.

- **Tavera et al. (2006)**

Los autores proponen para la región Norte del Perú una base de datos compuesta por 547 sismos registrados durante el periodo de 1996 al 2001. La calidad de los datos de ubicación fue evaluada variando los valores de V_p/V_s y modelos de velocidad llegando a calcular resultados que indicaban que la diferencia en la ubicación era menor a 5 Km.

- **Suárez (1981)**

Realizó una campaña microsísmica durante el año 1980 en la zona central de los Andes, exactamente al Este de la ciudad de Lima a fin de estudiar la sismicidad y el estilo de la deformación tectónica de los Andes. El catálogo final esta constituido por 344 eventos sísmicos con profundidades máximas de 120 Km.

- **Deverchere (1985)**

El autor realizó una campaña microsísmica en el año de 1985 alrededor de la Cordillera Blanca, llegando a construir una base de datos de 339 eventos sísmicos con una profundidad máxima de 167 Km y magnitudes que llegan a 7.7 ML.

Finalmente, la incorporación de datos obtenidos de estudios locales el catalogo regional, ha permitido considerar una base de datos de 9084 sismos para un periodo de 47 años, desde 1964 al 2011. Los datos serán analizados a partir de mapas y perfiles sísmicos, lo cual permitirá conocer la distribución espacial de la sismicidad dentro de la zona de estudio y configurar un modelo que represente la geometría de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción.

4.2 Distribución espacial de la sismicidad

La distribución espacial de la sismicidad en el Perú es por demás compleja; sin embargo, es posible identificar sus características mediante un exhaustivo análisis que constituiría un primer paso para cualquier tipo de estudio sísmico. El análisis de la sismicidad se realiza sobre mapas de distribución espacial de los sismos a fin de identificar la presencia de zonas de mayor o menor índice de sismicidad y para facilitar su análisis, se consideran diferentes rangos de profundidad hipocentral, según el criterio establecido por Tavera y Buforn (1998) (Figura 4.1):

- Sismos con foco superficial $h \leq 60$ Km.
- Sismos con foco intermedia $61 \leq h \leq 300$ Km.
- Sismos con foco profundo $h \geq 301$ Km.

4.2.1 Sismos con foco superficial

Los eventos seleccionados se encuentran en el rango de profundidad menor a 60 Km y sus epicentros en general, se encuentran ubicados entre la línea de fosa y la zona de costa. Los sismos de foco superficial que se encuentran antes de la fosa, son producto de la resistencia a la subducción cuando se produce el primer choque placa-océano-continente, lo que produciría rupturas cuyas extensiones y profundidades estarían sujetas al tipo de material de la zona. Luego, el alto índice de sismicidad que se presentan en el borde occidental, entre la fosa y el litoral, estaría asociado a la resistencia de las placas al desplazamiento y al acoplamiento de placas. En la zona continental se observa que el número de eventos disminuye en forma drástica, mostrando gran dispersión a lo largo de la cordillera oriental, sobre el margen Occidental de la zona Subandina y el Altiplano. Estos sismos pueden ser asociados a las deformaciones continentales que tienen origen en el levantamiento de la Cordillera de los Andes y en la subsidencia del Escudo Brasileño (Tavera y Buforn, 1998). Finalmente, se observa que el Altiplano, aparentemente, es una zona estable siendo muy raros los sismos con foco superficial.

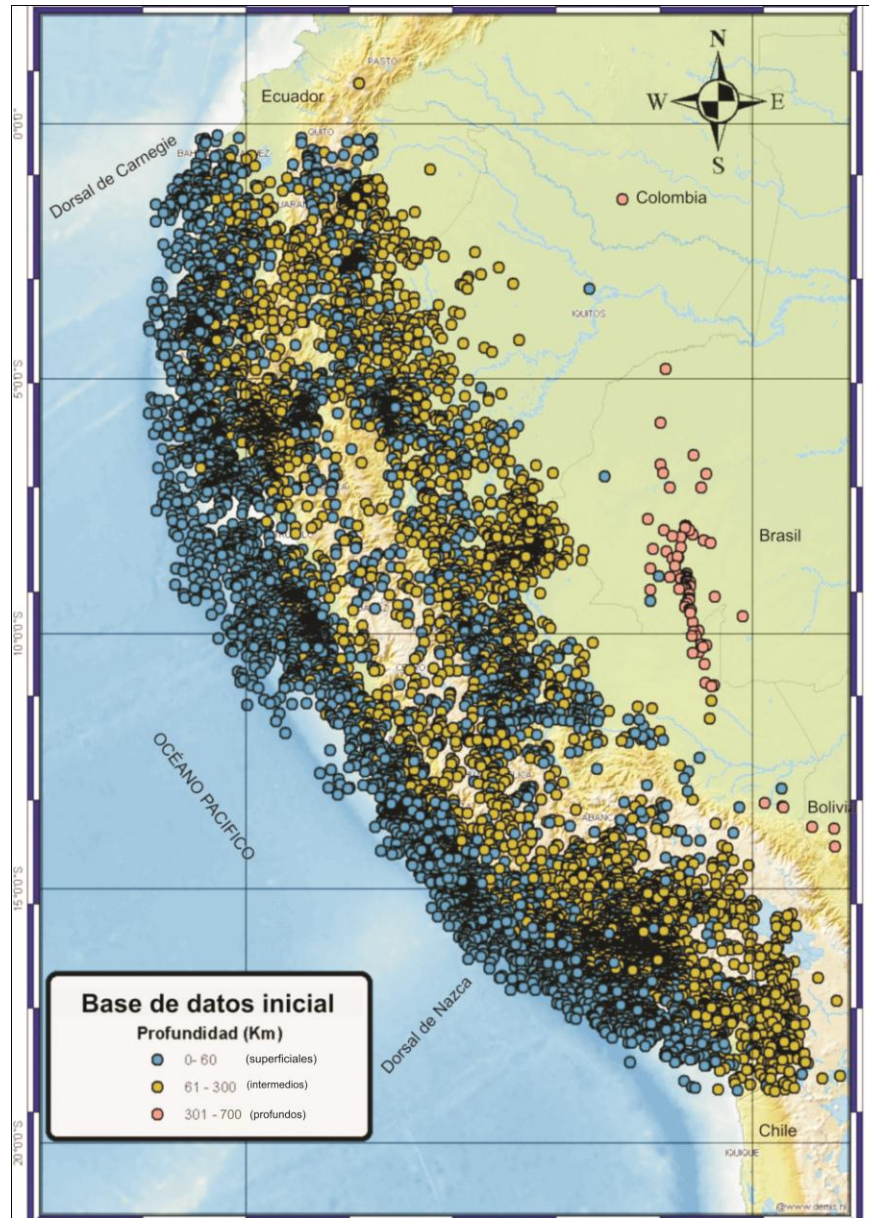


Figura 4.1; Mapa sísmico del Perú considerando la base de datos inicial recopilada para el periodo de 1964-2011.

4.2.2 Sismos con foco intermedio

Estos eventos sísmicos están ubicados en el rango de profundidad de 61 hasta 300 Km y espacialmente se distribuyen desde la zona de costa hacia el continente. Hacia el norte el índice de sismicidad aumenta en la parte sur de Piura y casi todo el departamento de Lambayeque, para luego mantenerse uniforme en la Zona Subandina. La actividad sísmica de foco intermedio se distribuye en toda la región central de manera dispersa, siguiendo una dirección NNO-SSE hasta la latitud de 14° desde donde se incrementa la actividad sísmica en toda la región sur, coincidiendo con la presencia de la cadena volcánica. Asimismo, se observa una importante acumulación de sismos al norte del departamento de Ucayali en un radio de 200 km aproximadamente.

La sismicidad con foco intermedio esta asociada a los procesos de fricción y deformación interna de la placa subducente, por esta razón podría ser considerado como el indicador directo de la geometría de la placa de Nazca cuando se encuentra en el proceso de subducción. Además, se observa que los sismos con foco intermedio se distribuyen de manera irregular en el área de estudio, lo que evidencia que la placa de Nazca esta sujeta a diferentes regimenes de deformación dentro del proceso de subducción.

4.2.3 Sismos con foco profundo

Se consideran sismos de foco profundo a aquellos cuyo hipocentro se encuentran a profundidades mayores a 300 Km. En el caso del Perú, los eventos considerados dentro de este intervalo de profundidad se encuentran ubicados cerca de la frontera con Brasil y Bolivia. Los que se encuentran en la frontera con Brasil se distribuyen con una dirección N-S entre los -4° y -11° de latitud. El siguiente agrupamiento se ubica en la frontera Perú-Bolivia entre los -13° y -14° de latitud y tienen una orientación NO-SE. Una de las hipótesis sobre la naturaleza de estos eventos sísmicos indica que un fragmento de la placa de Nazca se encuentra flotando a estas profundidades y su interacción con el entorno daría origen a esfuerzos que

deformarían a la placa y produce estos sismos (Chandra,1970; Isacks y Molnar, 1971; Kikuchi y Kanamori, 1994; Okal y Bina, 2001). Pero en general, el origen de estos sismos sigue en investigación.

4.3 Selección de datos

Del catálogo sísmico, es de interés del presente estudio seleccionar los eventos sísmicos con hipocentros ubicados dentro de la zona interplaca e interplaca; es decir, sismos asociados al acoplamiento sísmico y a la deformación interna de la placa oceánica por debajo del continente.

Los eventos corticales superficiales fueron eliminados del catálogo base, por no tener relación directa con el proceso de subducción, pues como se indicó, su origen se debe principalmente a los sistemas de fallas en continente. Por otro lado, los sismos de foco profundo también fueron eliminados del catálogo por que obedecen a una fuente de origen que actualmente siguen en investigación.

Finalmente, tras este filtrado se obtuvo una base de datos final compuesta por 6849 eventos, todos relacionados directamente con la geometría de la placa de Nazca en el Perú (Figura 4.2).

Según la distribución espacial de la sismicidad (Figura 4.2), la actividad sísmica relacionada con la geometría de la placa de Nazca se presenta a partir de la línea de fosa, pasando por la costa del Perú y el flanco este de la Cordillera Andina. Además, se puede observar ausencia de actividad sísmica hacia la zona este de la Amazonia, lo que indicaría que esta zona no está afectada por el proceso de subducción.

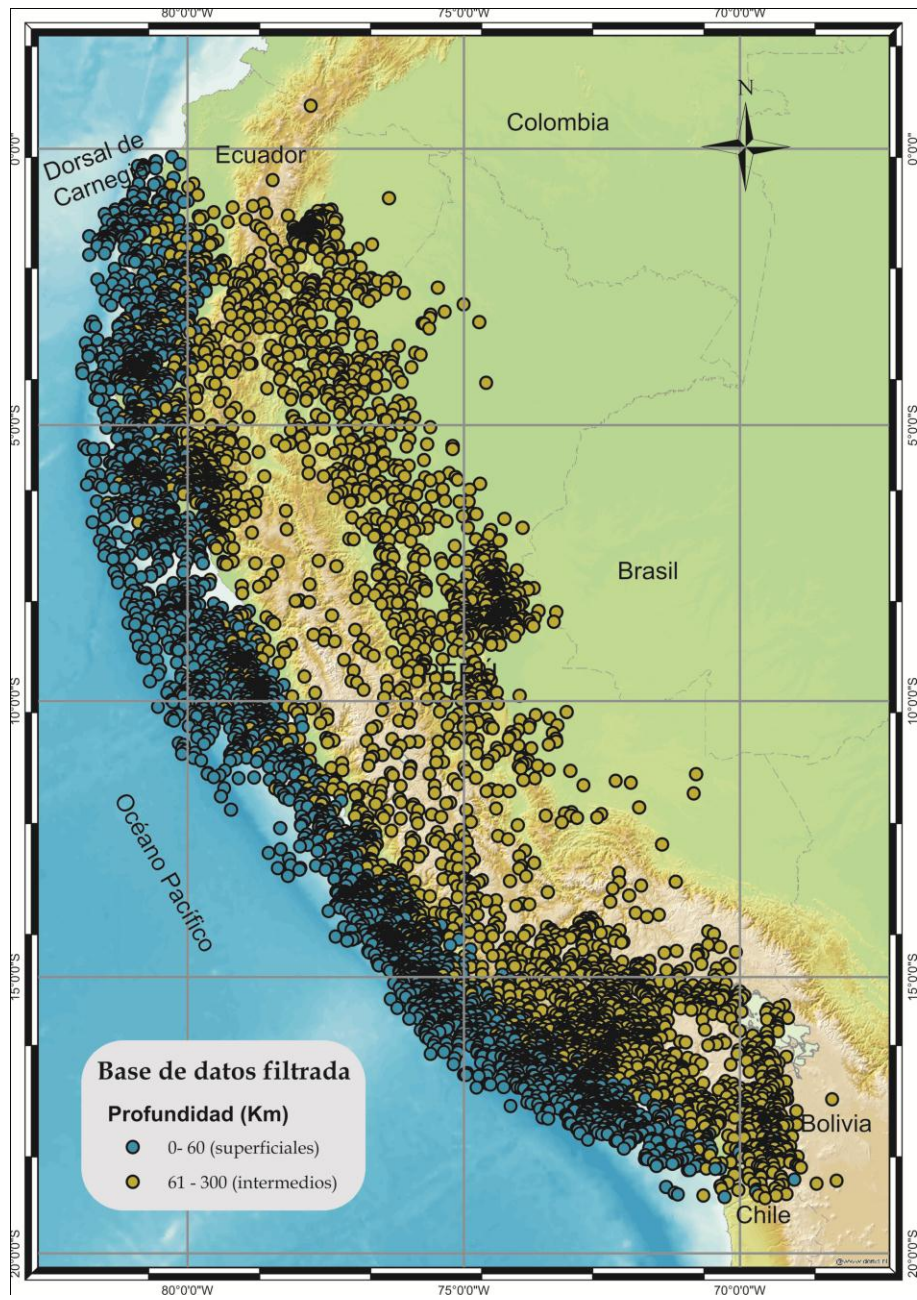


Figura 4.2; Mapa sísmico del Perú considerando la actividad sísmica asociada directamente al proceso de subducción de la placa oceánica por debajo de la continental

CAPÍTULO V

GEOMETRÍA DE LA PLACA DE NAZCA

La geometría de las placas tectónicas es un tema de estudio que permite avanzar en el conocimiento de los elementos y mecanismos que influyen en la intensa actividad sísmica propias de zonas sísmicamente activas, como es el caso del Perú. Se presume que cuando la placa de Nazca subduce por debajo de la Sudamericana, lo hace sobre un plano inclinado deformado por la fricción de ambas placas y sobre el cual se producen, de manera frecuente, gran variedad de sismos. Estos planos inclinados representan los estilos de subducción típicos de cada zona. Como se asume que la superficie de fricción no es exactamente lineal, se determina sus contorsiones mediante el cálculo de funciones polinomiales sobre la distribución de sismos en profundidad, los cuales sugieren la geometría de la Placa de Nazca. Finalmente, los ajustes polinomiales serán correlacionados mediante el método de interpolación a fin de obtener un modelo 3D de la geometría de la Placa de Nazca en el proceso de subducción.

5.1 Antecedentes

La interacción entre las placas tectónicas produce la transformación de la corteza terrestre tal, como lo evidencia la aparición de la Cordillera Andina, los sistemas de fallas y la presencia de volcanes. Estas manifestaciones en

superficie son las que motivaron a realizar estudios acerca de la dinámica del proceso de subducción así como la forma y geometría de las placas tectónicas que participan en el proceso a diferentes profundidades. Sobre el modo de subducción y la geometría de la Placa de Nazca, se han realizado varios estudios utilizando diversas metodologías como el análisis de la distribución espacial de la sismicidad obtenida a distancias regionales, locales y telesísmicas. A continuación, se describen algunos de los estudios más relevantes que analizaron la geometría de la Placa de Nazca dentro del proceso de subducción en el Perú.

5.1.1 Barazangui e Isacks (1976 -1979)

Los autores realizaron el estudio detallado de la placa de Nazca utilizando como base de datos la sismicidad presente en todo el borde occidental de Sudamérica compuesta por 1700 eventos sísmicos proveniente de los catálogos propuestos por el ISS (Internacional Seismological Summary), para el periodo de 1953 a 1963, el catálogo del ISC (Internacional Seismological Center) para los años 1964 a 1973, y el archivo del USGS Earthquake Data Report a partir del 1973 a 1975. Estos autores sugieren 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 donde sigue una tendencia casi horizontal. En la región Sur, el ángulo de subducción sería del orden de 25° - 30° hasta alcanzar una profundidad de 300 km (Figuras 5.1).

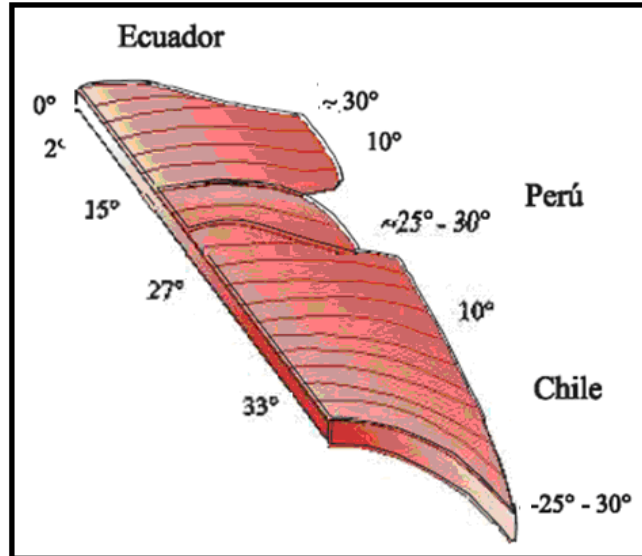


Figura 5.1; Modelo de subducción según Barazangui e Isacks (1976 -1979) para el Perú.

Este cambio en el modo de subducción les permite postular la existencia de una ruptura en la litósfera subducente que separaría a la región Norte-Centro de la región Sur. Finalmente, sugirieron que el ancho del segmento de subducción subhorizontal a lo largo de la interacción de placas, probablemente este controlada por la existencia de estructuras submarinas asísmicas cerca al límite sur (dorsal de Nazca) y el límite norte (dorsal de Carnegie). Estas estructuras probablemente crean zonas de fragilidad que se convierten en fracturas a lo largo de la placa de Nazca.

5.1.2 Hasegawa e Isacks (1981)

Los autores utilizaron una base de datos sísmicos obtenida de una red sísmica local que operó en la región Sur del Perú durante el año de 1965. El análisis espacial de la sismicidad a partir de secciones verticales les permitió sugerir que el ángulo de subducción se incrementa progresivamente de norte a sur (Figura 5.2).

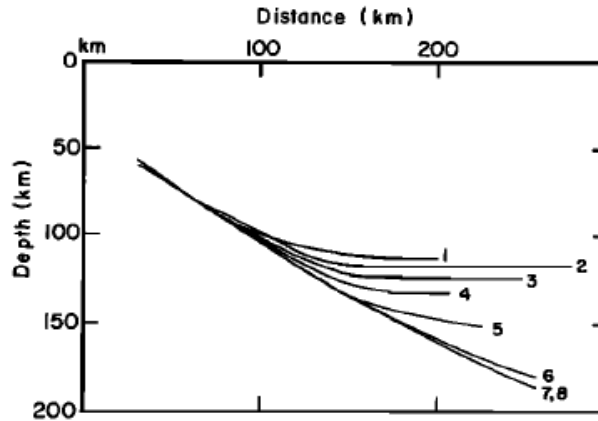


Figura 5.2 ; Tendencias de la sismicidad propuesta por Hasegawa e Isacks (1981) para las regiones centro y sur del Perú. Obsérvese el incremento progresivo de la subducción.

También observaron que en la zona central del Perú la placa de Nazca desciende con un ángulo de 30° hasta los 100 Km de profundidad y desde donde el ángulo disminuye para continuar con un comportamiento aparentemente horizontal hasta los 300 Km de distancia desde la fosa, lo cual fue asociado a un modo de subducción subhorizontal. Hacia el sur, conforme la placa de Nazca avanza, observaron un cambio en el modo de subducción, llegando a ser continua hasta una profundidad de 200 km (subducción normal) (Figura 5.3). Los autores concluyen que la transición entre los dos modos de subducción se da por contorsión.

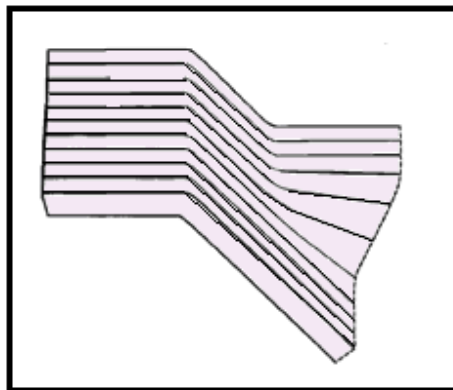


Figura 5.3 ; Modelo esquemático de la Placa de Nazca propuesto por Hasegawa e Isacks (1981)

5.1.3 Grange (1984)

El autor utilizó datos de una red sísmica local, instaladas en la región Sur del Perú, durante los años 1981 y 1982. Los resultados indican que el proceso de subducción se da de dos modos, el primero en la región Sur donde la subducción se inicia con un ángulo de 30° constante hasta una profundidad de 250 km, y el segundo en la región Centro donde inicia con una ángulo de 30° hasta los 100 km de profundidad para seguir un comportamiento aparentemente horizontal. Además, propone que entre ambos modos de subducción la placa cambia de forma por contorsión (Figura 5.4).

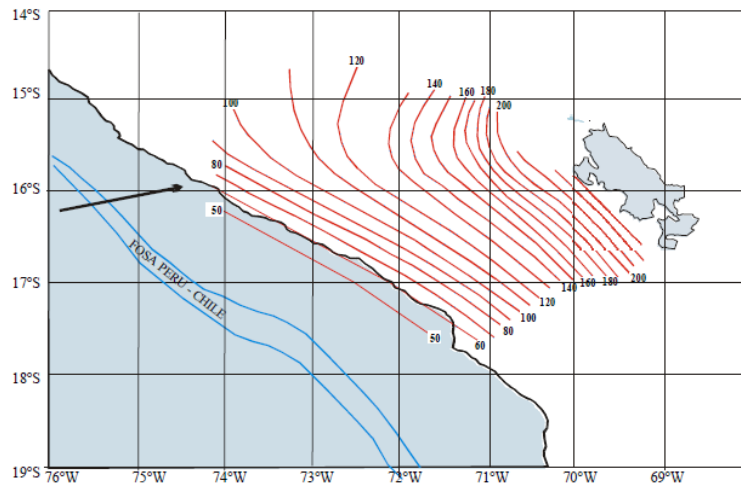


Figura 5.4 ; Mapa de curvas de isoprofundidad de las campañas 1980-1981 propuesto por Grange (1984).

5.1.4 Schneider y Sacks (1987)

Los autores hacen uso de una base de datos sísmicos provenientes de una red local instalada en las regiones Centro y Sur del Perú. El análisis de la información permitió a los autores obtener mapas de isoprofundidad, perfiles sísmicos y datos de esfuerzos, resultados que permitieron proponer la existencia de dos tipos de subducción, subhorizontal hacia la zona central y normal hacia la zona Sur con un ángulo de subducción entre los 25° y 30° (Figura 5.5).

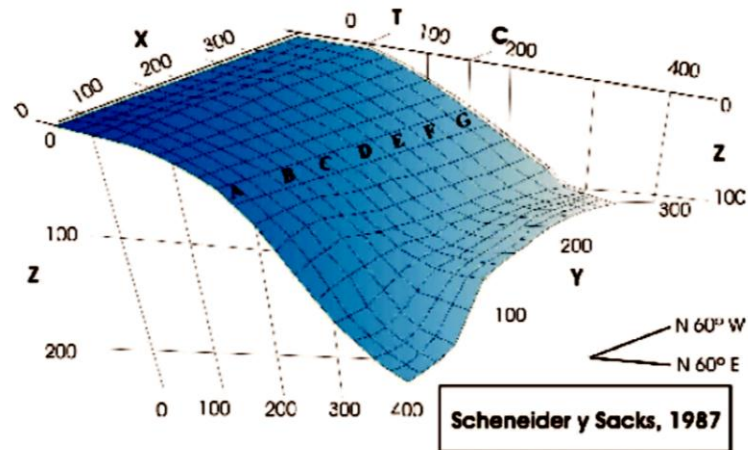


Figura 5.5 ; Modelo de subducción para el sur de Perú propuesto por Schneider y Sacks (1987).

5.1.5 Rodríguez y Tavera (1991)

Ambos autores determinaron la geometría del proceso de subducción para la región Central del Perú utilizando datos obtenidos de cuatro redes sísmicas locales. A partir de los resultados obtenidos, los autores postularon que en la región Central el proceso de subducción se realiza con un ángulo promedio de 30° hasta una profundidad de 107 km para luego desplazarse de manera casi horizontal por debajo del continente hasta 650 km de distancia desde la línea de fosa. Hacia la región Sur, el ángulo de subducción se mantendría en 30° hasta una profundidad de 260 km. Además, la placa de Nazca se contorsionaría para pasar de un modo de subducción subhorizontal a otro normal (Figura 5.6).

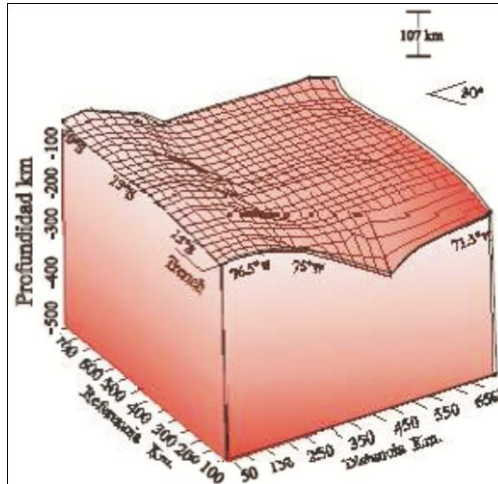


Figura 5.6 ; Geometría del proceso de subducción propuesto por Rodríguez y Tavera (1991).

5.1.6 Cahill e Isacks (1992)

Los autores propusieron un modelo para la geometría de la placa de Nazca utilizando como base de datos los catálogos del International Seismological Centre (ISC), National Earthquake Information Center (NEIC) y soluciones de mecanismos focales de los sismos ocurridos entre las latitudes 8°S y 35°S, abarcando las zonas centro y sur del Perú. Los resultados obtenidos indican que hacia el centro del Perú existe un tipo de subducción subhorizontal que inicia con un ángulo de 25° llegando hasta los 100 km de profundidad a partir de donde inicia su comportamiento horizontal. A partir de los 14°S hacia el sur, el ángulo de inclinación aumenta hasta 30° y se le asocia a un tipo de subducción normal, llegando hasta profundidades de 300 Km (Figuras 5.7).

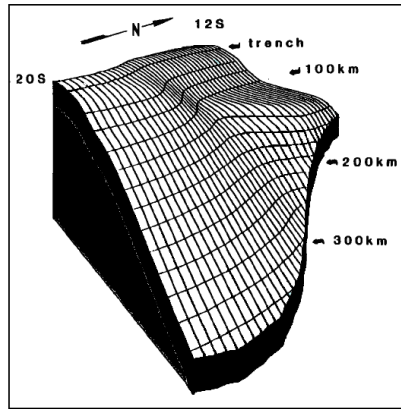


Figura 5.7 ; Vista tridimensional de la zona sur del Perú y parte del norte de Chile entre los 12° y 20° propuesto por Cahill e Isacks (1992).

5.1.7 Tavera y Burfon (1998)

Los autores analizaron la geometría de la Placa de Nazca utilizando datos del catálogo Nacional Earthquake Information Center (NEIC) entre los años de 1960-1995. La distribución de la sismicidad permitió analizar la geometría de la placa de Nazca donde se reconocieron dos modos de subducción, el primero corresponde al de tipo subhorizontal presente en las regiones Norte y Centro con profundidades que alcanzan los 100-150 km y el segundo de tipo normal con un buzamiento constante de 30° hasta profundidades que alcanzan los 300 km en la región Sur (Figura 5.8).

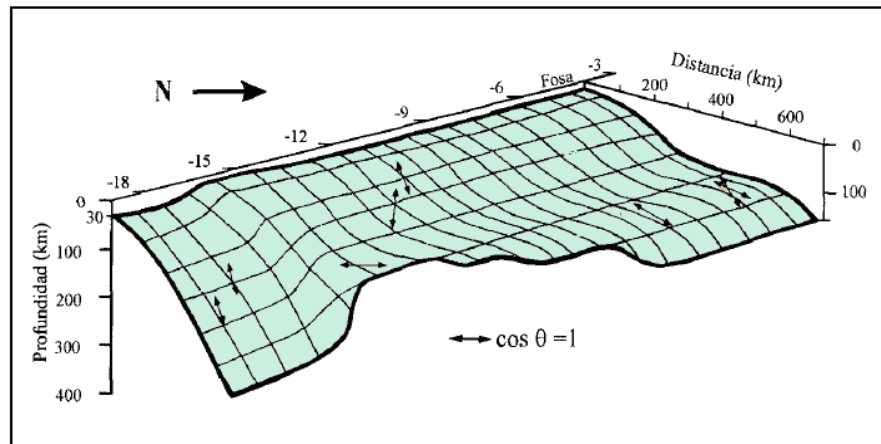


Figura 5.8 ; Esquema sismo tectónico para la geometría de la subducción en Perú deducido a partir de la distribución de la sismicidad en profundidad. Las flechas indican la orientación de los ejes de tensión, propuesto por Tavera y Bufofn (1998).

5.1.8 Gutscher (2000)

El autor propuso un modelo para la geometría de la placa de Nazca en el borde occidental del Ecuador, Perú y Chile utilizando la base de eventos sísmicos relocalizados por Engdhal (1998). Para el Perú construyó 10 perfiles de sismicidad con orientación ENE, a partir de los cuales pudo inferir que la dorsal de Nazca es continua bajo la placa sudamericana siguiendo la misma dirección que se observa en superficie.

Según el autor, a lo largo del Perú se presentan 2 tipos de subducción en forma alternada, normal hacia el Sur del Perú y la frontera con Ecuador y subhorizontal en la zona centro y parte del norte del Perú. La subducción normal que se encuentra cerca de la frontera con Ecuador, estaría asociada a la desaparecida Meseta Inca que en la actualidad se encuentra totalmente subducida (Figura 5.9).

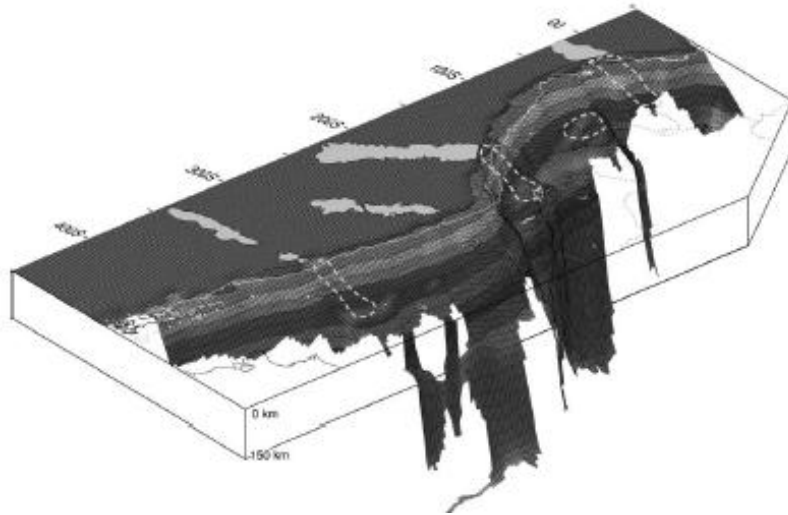


Figura 5.9 ; Vista 3D de la geometría de la Placa de Nazca, propuesta por Gutscher et al (2000)

5.1.9 Bernal y Tavera (2002)

Los autores proponen un modelo para la subducción de la placa de Nazca en el borde occidental del Perú utilizando la base de datos relocalizados por Engdahl et al (1960-1995) y el catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (1996-2002).

La base final estuvo constituida por 2700 sismos con los que se realizaron secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la línea de fosa, que fueron ajustados mediante una línea media que mostró la tendencia de los sismos.

Según los autores, la placa de Nazca subduce de manera subhorizontal entre los 3°-15° Sur (región Norte y Centro) y de tipo normal a partir de los 15° de latitud (región Sur). En ambos casos, la subducción inicia con un ángulo de 30° hasta los 250 km de profundidad en la región Sur, y en la región Norte-Centro hasta una profundidad de 120 km a partir de la cual la subducción es horizontal; además, la placa de Nazca se extendería por debajo del continente hasta una distancia desde la fosa de 750 km en la región Norte, de 500-700 km en la región Centro y de 450 km en la región Sur.

También infirieron que 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 propuesto por los autores, las áreas indicadas con los números 1, 2 y 3 representan los de mayor deformación debido al gran número de sismos que se ha producido en estas áreas (Figura 5.10):

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

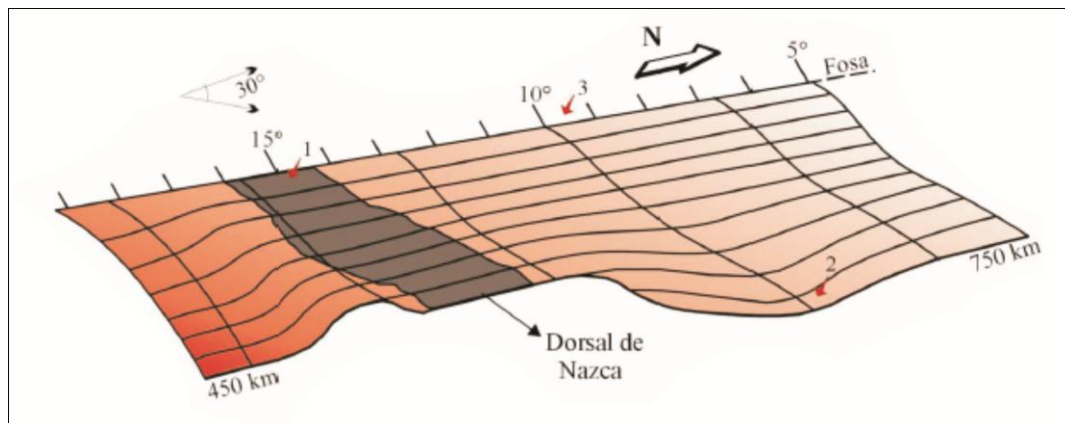


Figura 5.10 ; Modelo de subducción de la placa de Nazca propuesta por Bernal y Tavera (2002) para el Perú.

5.1.10 Quispe et al. (2003)

En esta investigación los autores analizaron los sismos reportados en el catálogo del NEIC, para el periodo 1980-2001, cuyos resultados indican que la placa de Nazca posee una geometría heterogénea con dos tipos de subducción, normal y subhorizontal. Los autores sugieren que para el tipo de subducción normal, la placa de Nazca es subducida completamente a profundidades mayores a 280 km y se caracteriza por presentar mayor ángulo de inclinación que en la subducción subhorizontal donde la placa alcanza distancias mayores desde la fosa debido a que se mantiene fría y no es absorbida por el manto (Figura 5.11). Además el ángulo de inclinación varía entre 15° y 30° de norte a sur.

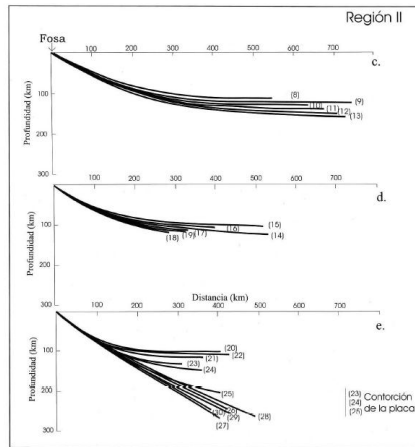


Figura 5.11: Tendencias medias de sismicidad para el borde occidental del Perú propuesto por Quispe et al (2003)

5.1.11 Hayes et al. (2012)

Los autores analizan el 85% de las zonas de subducción en el mundo dentro de las cuales se considera a la placa de Nazca en subducción. La metodología de análisis consistió en aplicar ajustes polinomiales de 3 a 5 grado en perfiles sísmicos elaborados a lo largo de la zona de estudio. Entre sus resultados indican que en el Perú, la placa de Nazca subduce de dos modos, normal y subhorizontal con un ángulos que varían, de sur a norte, entre los 20° y 10° respectivamente (Figura 5.12).

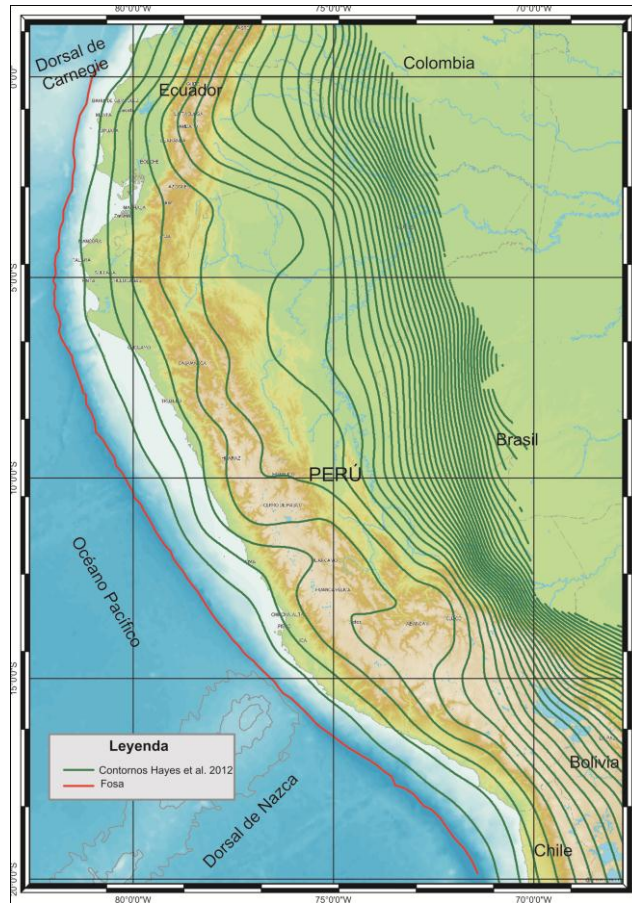


Figura 5.12: Mapa de curvas de isopropfundidad propuesto por Hayes et al (2012).

5.1.12 Aporte

Los estudios realizados para configurar la geometría de la placa de Nazca en el proceso de subducción utilizando datos telesísmicos, regionales y locales son diversos, y en conjunto han permitido tener una idea global acerca del proceso de subducción en el Perú. En conclusión, existen dos modos de subducción, normal y subhorizontal, y una posible resubducción de la placa a la altura de las coordenadas 8°S y 74°O.

En el presente estudio, con la finalidad de obtener resultados más detallados, se utiliza una base de datos sísmicos actualizada (1981-2011), con la cual se analiza la distribución espacial de la sismicidad para luego calcular su tendencia en profundidad

utilizando técnicas de ajustes polinomiales, a fin de generar un modelo en 3D de la geometría de la Placa de Nazca dentro del proceso de subducción presente en el Perú.

5.2 METODOLOGÍA

Se han propuesto diferentes técnicas para estimar la tendencia espacial de un conjunto de sismos. Por ejemplo, las técnicas de tendencias medias, ajustes polinomiales y ajustes polinomiales múltiples. Para este estudio se ha considerado la técnica propuesta por Chowdhury y Whiteman (1987); que consiste en hacer uso de ajustes polinomiales en base a la distribución de los sismos en profundidad para llegar a configurar un modelo 3D para la placa de Nazca dentro del proceso de subducción. Entonces, sobre la distribución de los sismos en profundidad, se realiza el ajuste polinomial de un grado específico utilizando la técnica de “mínimos cuadrados”, a partir del cual se evalúa la tendencia de la sismicidad en profundidad. Luego se genera un conjunto de puntos base (X_i, Y_i, Z_i) , donde los valores de “ X_i ” y “ Y_i ” corresponden a los parámetros de ubicación espacial (latitud y longitud) y “ Z_i ” a la profundidad de cada punto dentro de la tendencia calculada para cada perfil sísmico. A esta base de datos se le aplica el método de interpolación tridimensional utilizando la técnica de curvatura mínima. Este modelo asume que la profundidad estimada para la geometría de la placa corresponde a la superficie de contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana, y a la tendencia de la deformación de la placa de Nazca por debajo del continente.

5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

La metodología escogida es aplicada al catálogo sísmico obtenido en el capítulo IV y su procedimiento se muestra a continuación.

5.3.1 Secciones verticales de sismicidad

Una sección vertical de sismicidad permite analizar y evaluar la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos. El punto de referencia considerado en este caso, corresponde a la línea de la fosa Perú-Chile por ser el único contacto estructural visible en superficie entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Para

este estudio se elaboraron 24 secciones verticales de sismicidad perpendiculares a la fosa, las cuales consideran la totalidad de los eventos; siendo todas enumeradas, de Sur a Norte, de manera correlativa. (Figura 5.13). De manera general, el largo y ancho.

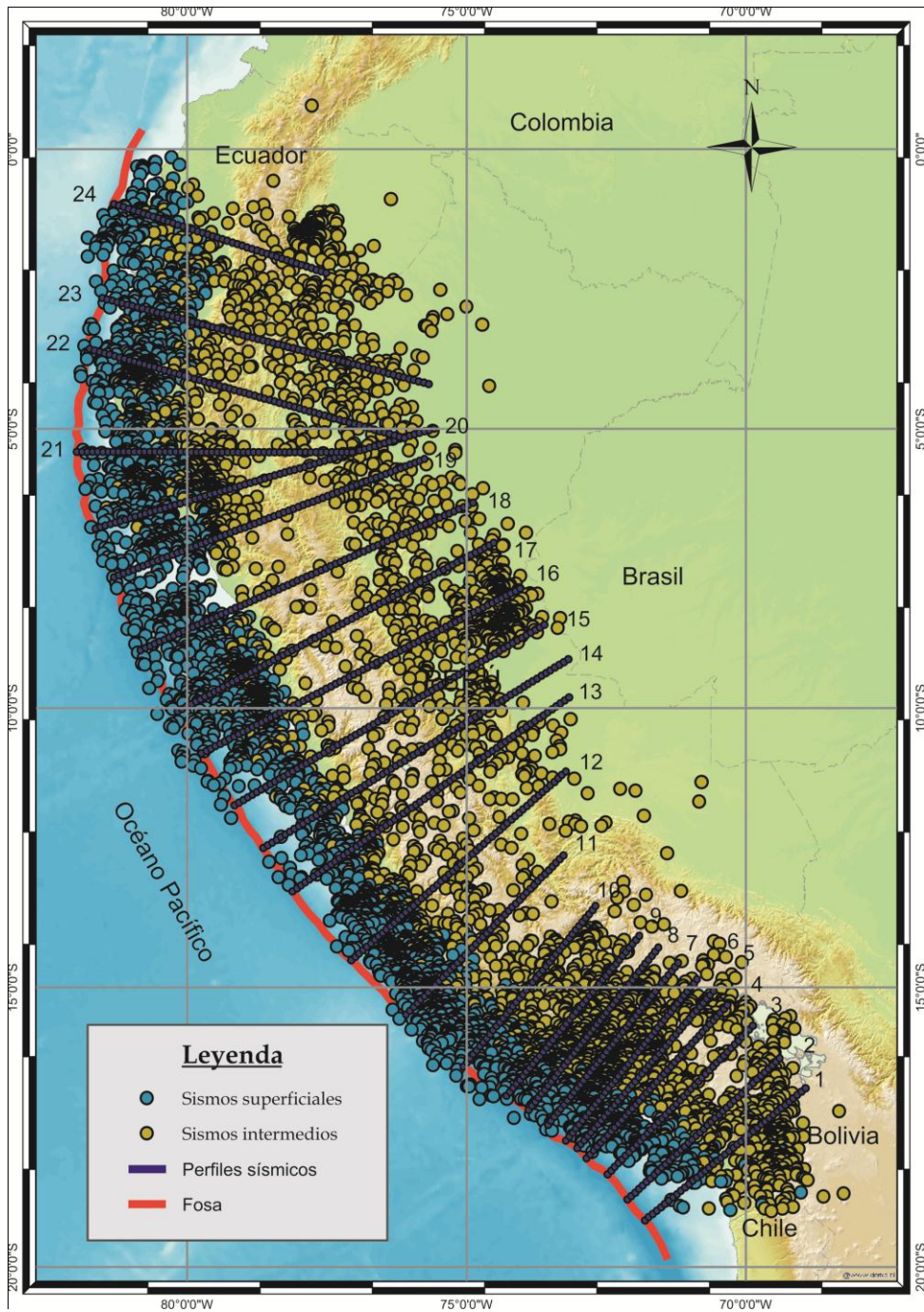


Figura 5.13 ; Ubicación de las 24 secciones verticales de sismicidad elaboradas en este estudio.

de cada perfil fue determinado según la densidad de datos. En el caso del eje EO se consideró perfiles con extensiones de 300 Km a 700 Km, con anchos entre 50 Km a 250 Km.

5.3.2 Interpolación Polinomial

Es un análisis de regresión simple donde existe una variable dependiente “y” y otra independiente “x”, que en este caso, representarían a la profundidad de la placa y a la ubicación horizontal de la misma con respecto a la fosa, ambas variables expresadas en kilómetros. El propósito es obtener una función de la variable independiente “x”, que sea capaz de describir, lo más ajustadamente posible, la variación de la variable dependiente “y” (Figura 5.14).

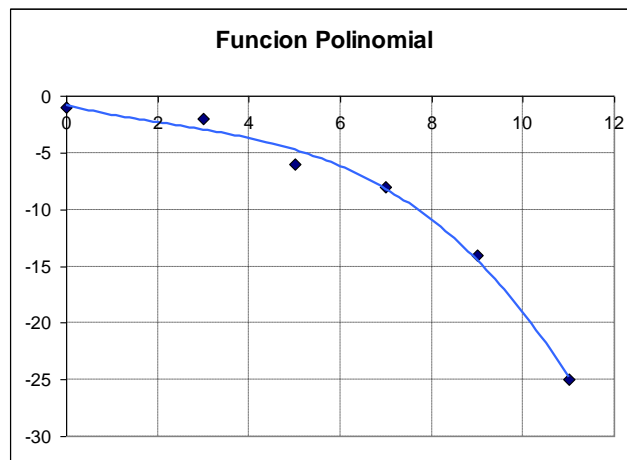


Figura 5.14 ; Función polinomial (línea azul)

En este estudio la interpolación polinomial se realizó utilizando la técnica de análisis numérico “mínimos cuadrados” la cual intenta encontrar la función donde, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y calculados sea menor. Con este tipo de estrategia es necesario que los residuos o errores estén distribuidos normalmente y que varíen de modo similar a lo largo de todo el rango de valores de la variable dependiente. Estas suposiciones pueden comprobarse examinando la distribución de los residuos y su relación con la variable dependiente. Cuando la variable dependiente es cuantitativa y la relación entre ambas variables sigue una

línea recta, la función es del tipo $y = c + bx$, en donde c es el intercepto o valor del punto de corte de la línea de regresión con el eje de la variable dependiente “ y ” y “ b ”, la pendiente o coeficiente de regresión (la tasa de incremento del número de especies con cada unidad de la variable ambiental considerada). La función polinomial más sencilla es la cuadrática que describe una parábola, pero puede usarse una función cúbica u otra de un orden aún mayor capaz de conseguir un ajuste casi perfecto sobre los datos.

En el marco geométrico, el método de mínimos cuadrados considera como una proyección ortogonal del vector sobre el plano de la variable independiente. La proyección es ortogonal porque los valores calculados y los valores reales no se pueden correlacionar (Figura 5.15).

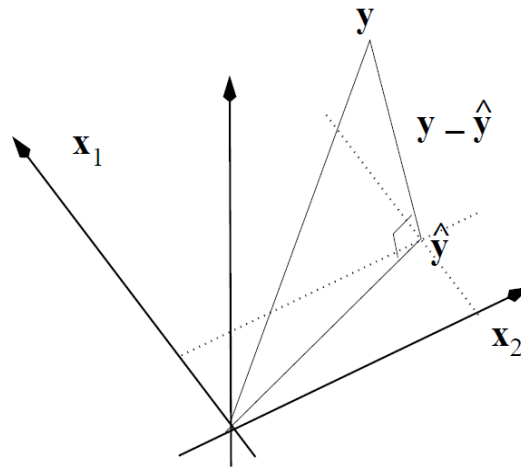


Figura 5.15 ; Mínimos cuadrados estimado de los datos, correspondiente a la proyección del valor vectorial sobre el plano de la variable independiente.

En el presente estudio, el conjunto de datos a interpolar son aquellos que describen la ubicación espacial de cada punto que define la tendencia de la geometría de la placa de Nazca (latitud, longitud y profundidad). Para hallar el polinomio más adecuado, se realizan ensayos con polinomios de segundo, tercero, cuarto, quinto y sexto orden observándose la variación del coeficiente de correlación (cercano a 1) y realizando la evaluación visual de la tendencia de la sismicidad (Figura 5.16).

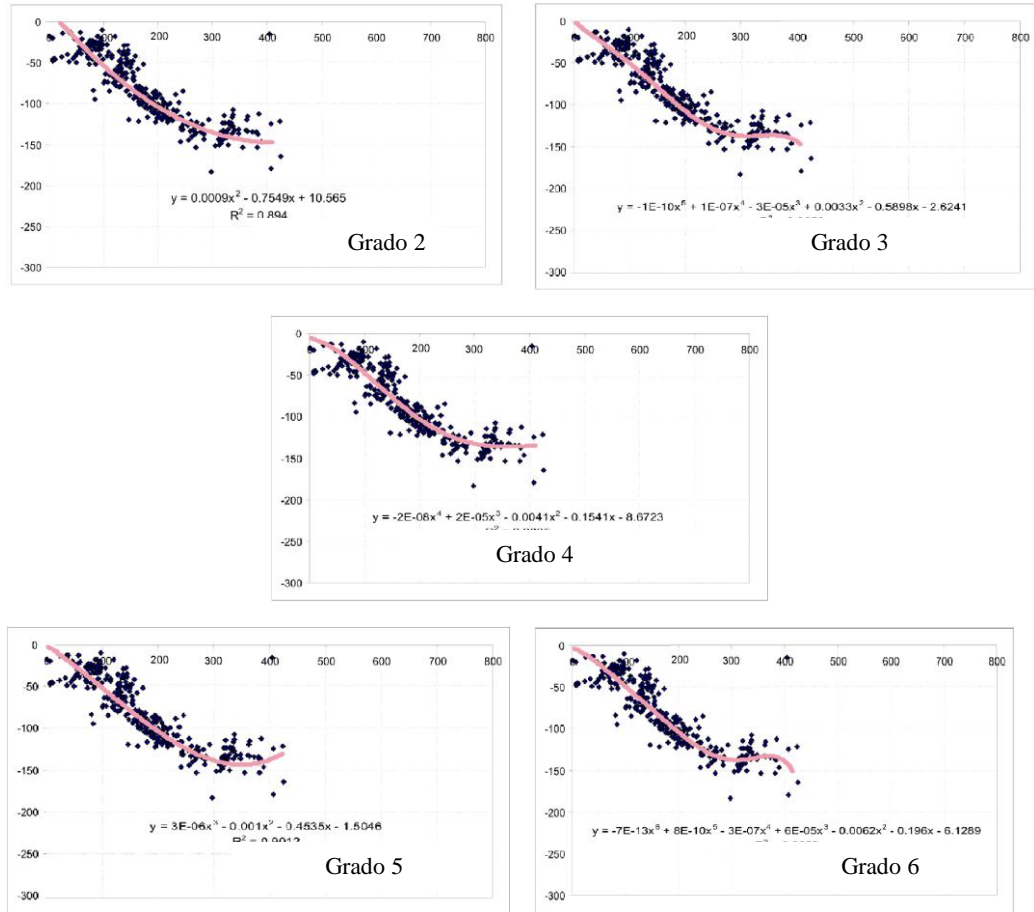


Figura 5.16 ; Perfiles de sismicidad que muestran los diferentes ajustes polinomiales calculados de grados 2, 3, 4, 5 y 6

A medida que el valor de “n” aumenta, el ajuste va incrementando su flexibilidad siendo más irregular o contorneada. En este escenario, al aumentar el grado del polinomio el ajuste no mejora, lo cual significa que se está produciendo el fenómeno de oscilación que influye en la inestabilidad del ajuste. Por esta razón es conveniente considerar el polinomio con el grado más bajo posible para obtener un ajuste óptimo de los datos.

A pesar que se puede obtener valores estadísticos óptimos como el mejor criterio para elegir la superficie de deformación; es decir, coeficientes de correlación cercanos a “1”, no hay una base objetiva para ello pues permanece la incertidumbre en la posibilidad de que factores externos perturben o afecten la ubicación de los datos, en este caso de los sismos. Asimismo, no existe información confiable acerca de la

profundidad o geometría de la placa de Nazca; por lo tanto, debe aceptarse como la propuesta más confiable la obtenida a partir de los catálogos sísmicos. Considerando estas recomendaciones, para este estudio se eligió al polinomio de 4° grado como el más apto para evaluar los 24 perfiles sísmicos obtenidos en el capítulo anterior, en razón que los coeficientes de correlación varían en el rango alto (>0.8) y las tendencias obtenidas representan acertadamente la distribución espacial de la sismicidad.

Por ejemplo, para el perfil 7, mostrado en la Figura 6.4, el polinomio escogido con su respectivo coeficiente de correlación es:

$$y = -3E^{-9} \chi^4 + 5E^{-6} \chi^3 - 0.0022 \chi^2 - 0.0106 \chi - 7.1623$$

$$R^2 = 0.905$$

Este ajuste polinomial indica que el cuadrinomio inicia su tendencia a unos 7.1623 km de profundidad (inicio de la fosa) y sigue la tendencia media de los eventos sísmicos con un ángulo inicial, que a cierta profundidad, aumenta de forma considerable y constante para finalmente llegar, a un comportamiento horizontal.

5.3.3 Curvatura Mínima

Luego de calcular las ecuaciones para cada perfil, se procedió a evaluarlos cada 10 Km de distancia hasta llegar a su alcance horizontal máximo. Es decir, se considera como variable independiente al valor de distancia horizontal igual a 10 km, 20 km, 30 km, etc. para hallar la variable dependiente que corresponde a la profundidad de la placa en cada punto proyectando en superficie, obteniendo así una base de datos conformada por 3 parámetros: longitud, latitud y profundidad (Tabla 1).

Longitud	Latitud	Profundidad
-73.89	-17.19	-8.7
-73.83	-17.12	-11.2
-73.77	-17.05	-14.4
-73.71	-16.97	-18.3
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Tabla 1: Parámetros base para el modelo 3D

A estos 3 parámetros se les aplicó el método de interpolación “curvatura mínima”, el mismo que fue desarrollado por Smith y Wessel (1990) y se basa en el algoritmo que considera las ecuaciones diferenciales biarmónicas modificadas y con esto trata de reproducir la ubicación de los puntos de muestreo de la superficie que corresponden a la longitud, latitud y profundidad; para luego comportarse como un interpolador exacto, donde la superficie creada mantendrá los valores de profundidad de los datos originales. Es decir, proporciona como resultado una superficie suave y continúa análoga a una placa delgada, linear y elástica derivable al primer y al segundo grado (pendiente y curvatura).

Luego de realizar la interpolación de los 3 parámetros se obtienen representaciones de la geometría de la placa de Nazca en 2D y 3D que corresponderían a un mapa de curvas de isoprofundidad con intervalos de 20 kilómetros y una superficie tridimensional.

5.4 RESULTADOS

5.4.1 Secciones verticales de sismicidad

Para un mejor análisis de la sismicidad se ha visto por conveniente dividir el área de estudio en 3 zonas: sur, centro y norte.

- Para la zona Sur se ha considerado 10 perfiles sísmicos perpendiculares a la fosa Perú – Chile, todos con orientación NE-SO (Ver Anexo). Los perfiles 1, 2, 3 abarcan

un ancho de 100 km, los perfiles 4, 5, 6, 7, 8 y 9 un ancho de 50 Km y finalmente, el perfil 10 con un ancho de 150 km. En los perfiles 1 y 2 se observa actividad sísmica a partir de los 60 km de distancia desde la línea de fosa, con un alcancé horizontal de 400 km desde la fosa. El perfil 3 posee un evento sísmico casi al borde de la fosa y a partir de los 30 km de distancia los sismos se incrementan hasta los 450 km de distancia horizontal desde la fosa. Los perfiles 4, 5 y 6 muestran sismos a partir de los 15 km de la fosa y llegan a una distancia horizontal de 490 km.

En todas las secciones se puede observar que existe un alto índice de sismicidad, salvo en las zonas de fronteras entre los departamentos de Moquegua, Puno y Arequipa. La distribución hipocentral desde el perfil 1 hasta el perfil 6, se mantiene con una pendiente inclinada constante (Figura 5.17.a). A partir del perfil 7 hasta el perfil 10 abarcan una zona con un alto índice de sismicidad y una tendencia que se inicia con una pendiente que llega hasta cierta profundidad donde se contorsiona e inicia un comportamiento horizontal que se mantiene hasta que la actividad sísmica desaparece (Figura 5.17.b) En el caso de los perfiles 7 y 8 la distribución de los sismos mantiene una ligera pendiente hasta los 220 km, a partir de donde los sismos siguen una tendencia horizontal hasta los 420 km desde la fosa continuando bajo el continente. En el caso del perfil 9, el alcance horizontal llega hasta los 340 km desde la fosa y finalmente, el perfil 10 se extiende hasta los 380 km desde la fosa.

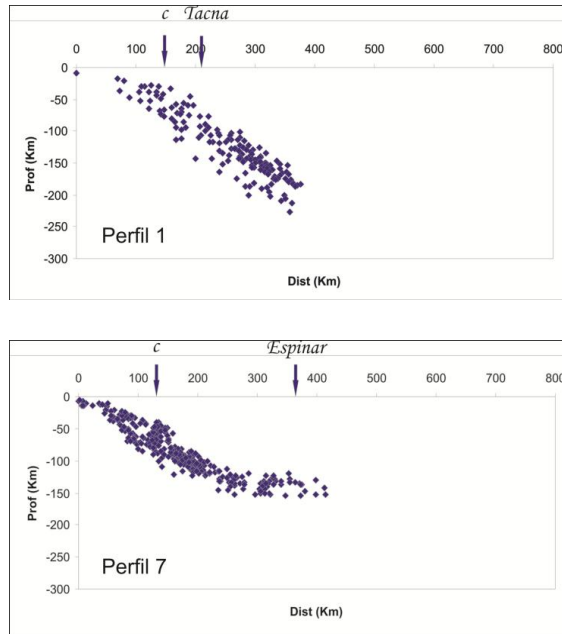


Figura 5.17 ; Perfiles 1 y 7 correspondientes a la zona Sur, donde “c” indica la Línea de Costa.

- La zona Centro comprende los perfiles 11, 12 con una orientación NE-SO y 13, 14, 15, 16 y 17 con una orientación ENE-OSO (Ver anexo). Los perfiles 11 y 12 abarcan un ancho de 150 km cada uno y los perfiles 13 y 14 de 200 km, además el alcance horizontal, desde la fosa, de los perfiles aumenta progresivamente de 360 a 730 km. Con respecto a su tendencia, la ubicación hipocentral de los sismos se mantiene con una pendiente inclinada hasta los 400 km de profundidad desde donde se inicia su tendencia horizontal. En los perfiles 11, 12, 13 y 14 se observa que el índice de sismicidad tiende a ser homogéneo, pero con ausencia de sismos en las fronteras de los departamentos de Lima, Ancash y Huanuco, La Libertad y San Martín.

En los perfiles 15, 16 y 17, el índice de sismicidad se presenta de manera heterogénea con la presencia de dos agrupamientos, el primero desde la línea de fosa hasta los 230 km de alcance horizontal desde la fosa, y a partir de esta distancia se observa una disminución drástica de sismos hasta los 420 km de alcance horizontal y desde el cual se observa un segundo incremento en el número de sismos hasta distancias de 780 km de alcance horizontal desde la fosa. En el perfil 16 se percibe una singularidad en la continuidad de los eventos sísmicos, pues luego de seguir el mismo comportamiento

como en los perfiles anteriores, se observa un incremento mayor en la ocurrencia de sismos y un cambio en la pendiente a partir de los 600 km de alcance horizontal (Figura 5.18), escenario propuesto para una resubducción de la placa.

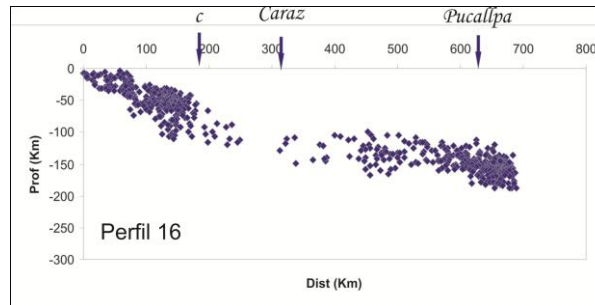


Figura 5.18 ; Perfil 16 correspondiente a la zona centro, donde “c” indica la Línea de Costa.

- La zona Norte esta constituida por los perfiles 18, 19, 20, con una orientación ENE-OSO, el perfil 21 con una orientación E-O y finalmente, los perfiles 22, 23 y 24 con tendencia ONO-ESE (Ver Anexo). En los perfiles 18, 19, 20, 21, 22 y 23 la actividad sísmica mantiene una pendiente inclinada hasta los 470 km de distancia horizontal, desde la fosa, para luego iniciar su tendencia horizontal (Figura 5.19.a). Estas secciones siguen un patrón similar a las de la zona Centro, donde se distinguen dos agrupamientos en la distribución de los sismos. El primero presente entre la línea de fosa hasta un alcance horizontal de 260 km, a partir de la cual se observa un disminución drástica en el número de sismos, hasta los 450 km de distancia horizontal, aquí se observa el segundo agrupamiento y el aumento en la ocurrencia de sismos para llegar hasta los 740 km de alcance horizontal.

Esta tendencia de la sismicidad desaparece progresivamente conforme se avanza en dirección norte, de tal manera que en los perfiles 22 y 23 la cantidad de sismos se ve homogénea en toda su distribución.

En el perfil 24 se observa que la sismicidad avanza con una distribución hipocentral dispersa y con tendencia inclinada hasta los 200 km de profundidad y un alcance horizontal de 400 km (Figura 5.19.b). Los perfiles 22, 23 y 24 consideran eventos

ocurrido en Ecuador y en conjunto permiten definir las tendencias de sismicidad en la región norte del Perú.

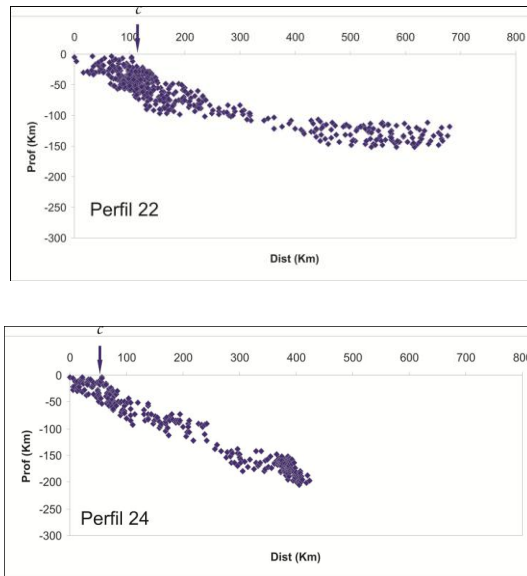


Figura 5.19 ; Perfiles sísmicos 22 y 24 correspondientes a la zona Norte, donde “c” indica la Línea de Costa.

Entonces, el análisis de la distribución de los hipocentros ha permitido de manera favorable, reconocer la geometría de la superficie de fricción de las placas y la forma de la placa por debajo del continente. Se ha visto que en algunos perfiles existe ausencia de sismos, lo que indicaría que en estas zonas aún no acumula el adecuado nivel de tensión que se necesitaría para producir una ruptura y crear un evento sísmico. Se ha observado también la presencia de importantes agrupaciones de sismos a diferentes niveles de profundidad, lo que sugiere la presencia de áreas de mayor deformación al interior de la placa de Nazca.

5.4.2 Ajustes polinomiales

Para realizar el análisis de la tendencia que siguen los ajustes polinomiales de 4° orden se procedió a agruparlos según las zonas Sur, Centro y Norte tal como se muestra a continuación:

- Para la zona Sur, los ajustes polinomiales obtenidos para las secciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 fueron agrupados en la Figura 5.20 y en ella se observa que los ajustes polinomiales inician con un ángulo promedio de 27° y llegan hasta un alcance horizontal de 400 Km desde la fosa. En el caso de los ajustes 1, 2, 3 y 4 alcanzan una profundidad 210 Km mostrando la geometría de una subducción de tipo normal. Asimismo, en los ajustes polinomiales 5 y 6 se observa los primeros indicios de un cambio en el modo de subducción. Luego, en los ajustes polinomiales 7, 8, 9 y 10 se observa la tendencia horizontal de la placa en torno a las profundidades de 100 Km a 140 Km, siendo constante hasta una distancia horizontal de 400 Km desde la fosa, que correspondería a una subducción de tipo subhorizontal.

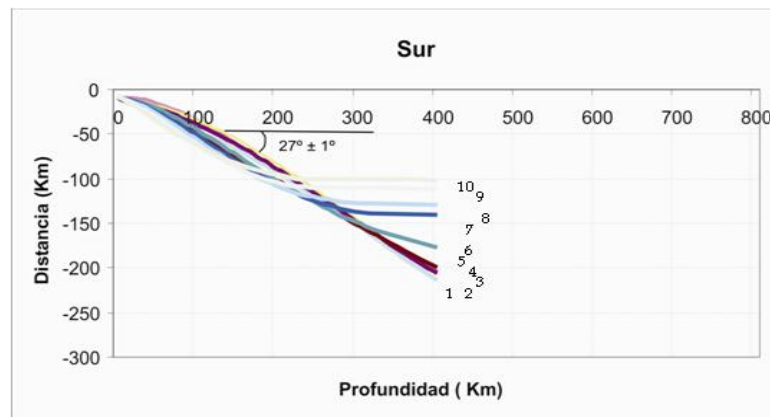


Figura 5.20 ; Secciones sísmicas verticales para la zona Sur del Perú.

- Para la zona Centro se han considerado los ajustes polinomiales 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 proyectados en la Figura 5.21, según la tendencia de los ajustes polinomiales, la placa de Nazca inicia la subducción con un ángulo promedio de 23° hasta los 130 Km de profundidad para luego seguir una tendencia horizontal hasta los 700 km de distancia horizontal desde la fosa, lo que correspondería a un tipo de subducción subhorizontal.

Por otro lado, en el perfil 16 se observa que a una distancia horizontal de 580 km desde la fosa y a una profundidad de 135 km, se inicia un nuevo descenso de la placa con un ángulo de 16° hasta llegar a los 170 km de profundidad, lo cual propone una resubducción de la placa de Nazca en esta zona.

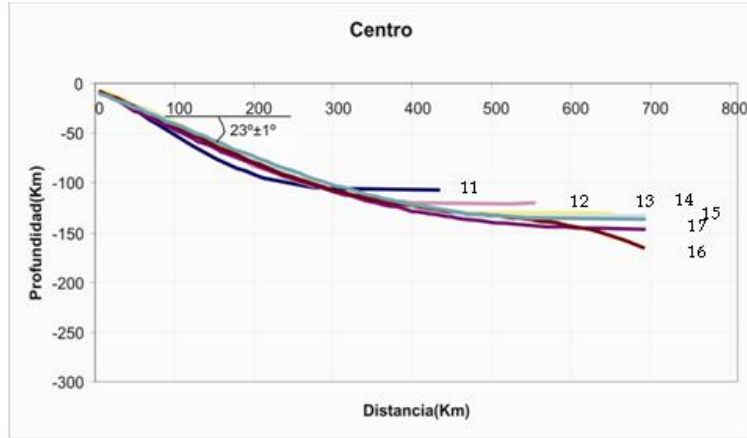


Figura 5.21 ; Perfiles sísmicos en la zona Centro

- Para la zona norte se consideran los ajustes polinomiales 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24, proyectados en la Figura 5.22, los que sugieren que en esta zona la geometría de la subducción se inicia con un ángulo promedio de 24° hasta la profundidad de 120 km, para hacerse horizontal hasta una distancia de 700 Km desde la fosa, que correspondería a un modo de subducción subhorizontal. Finalmente, el ajuste polinomial 24 muestra una tendencia similar a la que se presenta en los ajustes 1, 2, 3 y 4 de la zona Sur.

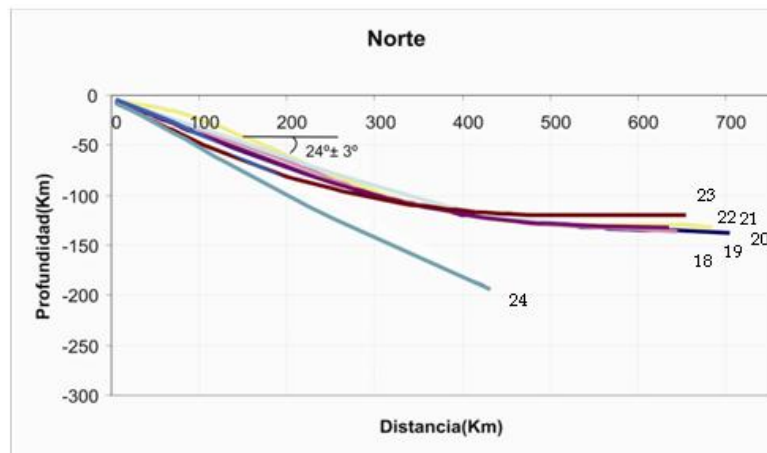


Figura 5.22 ; Perfiles sísmicos para la zona Norte

Estos resultados muestran claramente 2 modos de subducción que se presentan de forma alternada. La subducción de tipo normal esta presente desde el perfil 1 al perfil

6, luego el tipo de subducción subhorizontal desde el perfil 7 hasta el 23 y finalmente, en el perfil 24 nuevamente se presenta el tipo de subducción normal.

5.4.3 Curvas de isopropfundidad

El modelo 2D de la geometría de la placa de Nazca para el Perú esta representada por un mapa de curvas de isopropfundidad que se muestra en la Figura 5.23.

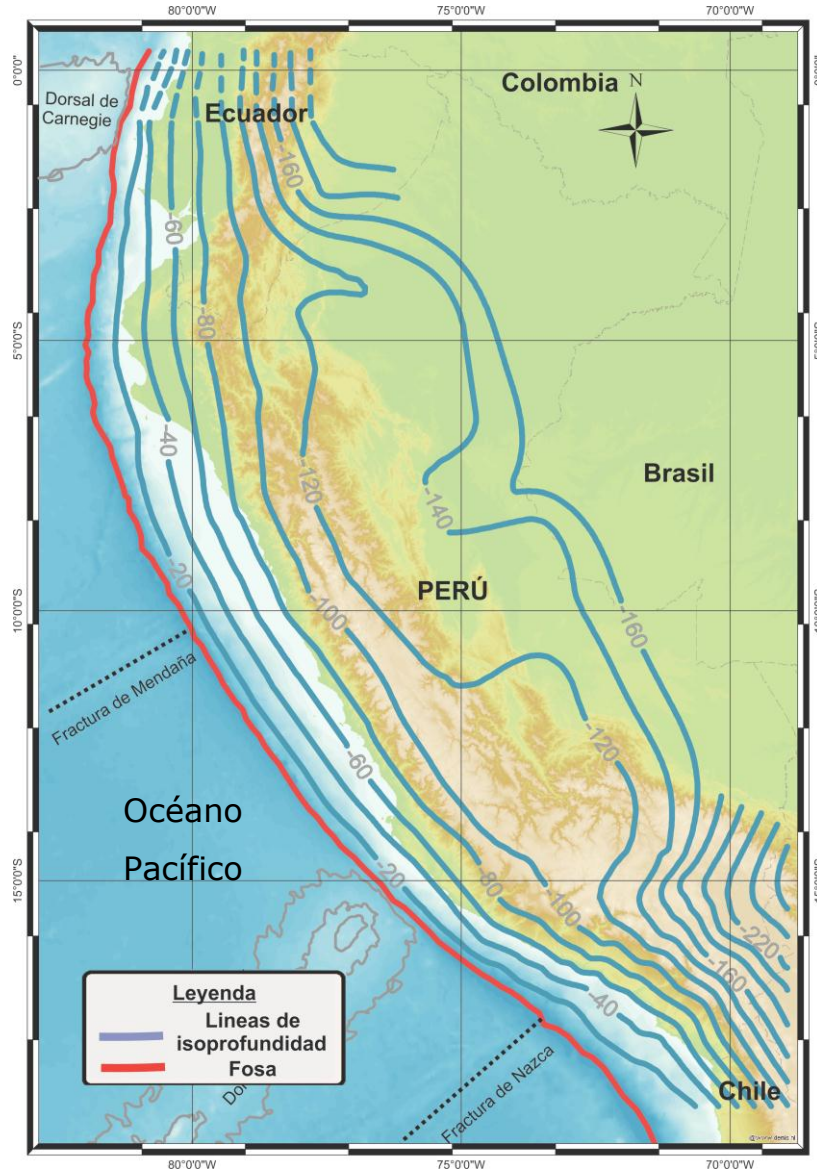


Figura 5.23 ; Curvas de isopropfundidad de la placa de Nazca, con intervalos de cada 20 km.

En el mapa, las curvas de isoprofundidad definen 3 contorsiones, de Sur a Norte, la primera se da en el cambio de una subducción normal hacia una subducción subhorizontal a una latitud de 15° coincidiendo con la Fractura de Nazca y con la llegada de la dorsal de Nazca. La siguiente se ubica a una latitud de 8° a la altura de la Fractura de Mendaña que también fue observada por Schneider y Sacks (1989), la cual muestra una resubducción de la placa que llega hasta los 170 Km de profundidad. Finalmente, a la latitud de 4° , muy cerca de la llegada de la dorsal de Carnegie, se presenta una contorsión en la placa de Nazca al cambiar de un modo de subducción subhorizontal a subducción normal. Además, se puede ver que estas contorsiones se dan a partir de los 120 km de profundidad.

5.4.4 Esquema 3D

Con la información obtenida se procedió a elaborar un modelo 3D de la placa de Nazca (Figura 5.24) en la cual se observan las siguientes particularidades:

El modelo muestra la variación del ángulo de inclinación de la superficie de fricción de placas que varía entre 23° a 27° y su configuración sugiere que existe dos modos de subducción alternada, una de tipo normal caracterizada por un alineamiento continuo de los sismos hasta una profundidad del orden de 250 km y distancias en superficie desde la fosa que varían entre 500 y 800 km; y además una de tipo subhorizontal que se inicia con una pendiente que llega hasta los 120 km de profundidad donde la placa se contorsiona hacia una tendencia horizontal que llega hasta los 700 km de distancia desde la fosa.

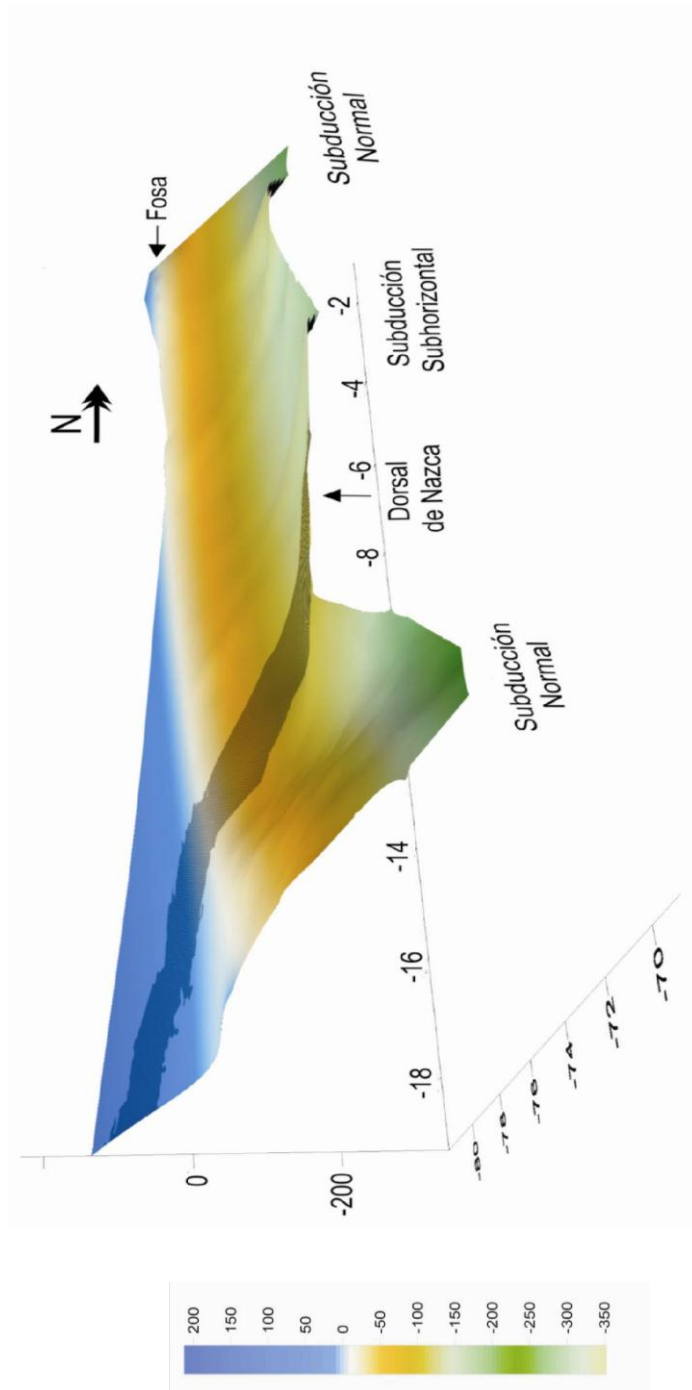


Figura 5.24 ; Esquema 3D de la geometría de la placa de Nazca en el Perú. El área sombreada indica la ubicación de la Dorsal de Nazca.

Además se observa que el tipo de subducción normal se presenta en la zona Sur hasta la latitud de 15°S donde se produce una contorsión de la placa que muestra el cambio en su comportamiento hacia el tipo de subducción subhorizontal presente hasta los 4°S donde la placa presenta otra contorsión al cambiar hacia un tipo de subducción normal sobre el territorio ecuatoriano. Se debe tomar en cuenta que las zonas de subducción normal coinciden con la presencia de conos volcánicos en superficie, tal como se aprecia en la zona Sur del Perú y en el Ecuador. Además, el cambio de subducción coincide con la presencia de la dorsal de Nazca en el Perú y la dorsal de Carnegie en el Ecuador.

5.5 DISCUSIÓN

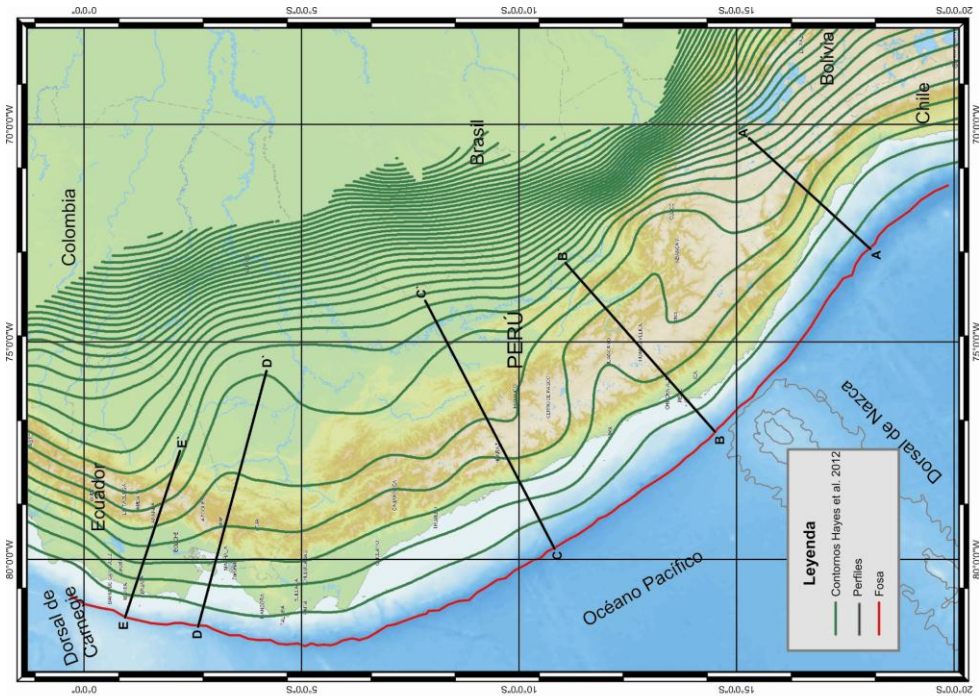
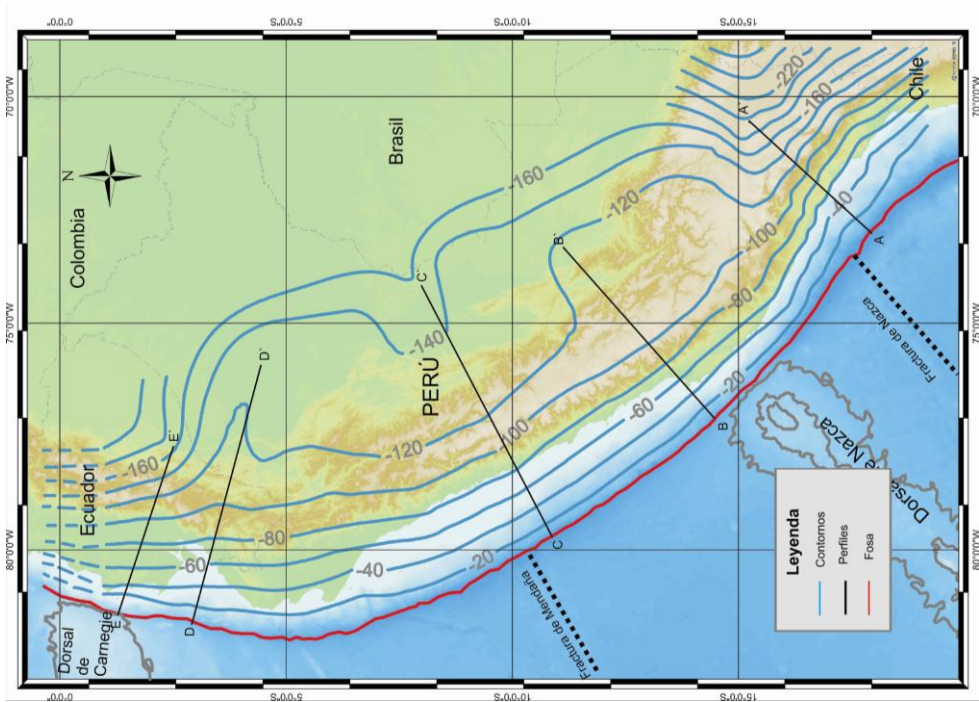
Para el borde occidental del Perú, se han planteado diversas hipótesis para explicar el cambio en la geometría de la placa de Nazca (PN) dentro del proceso de subducción. Muchos autores sugieren que los principales factores que afectan a la geometría de la PN son: el rango de convergencia relativa de placas, la edad y el movimiento de la placa subducida, y la subducción de estructuras batimétricas asísmicas como dorsales o montañas submarinas (Jarrard, 1986; Gorvatov y Kostoglodov, 1997). Según Wortel (1984), la distancia alcanzada por la placa por debajo de continente depende de su edad; entonces, la interacción entre una litósfera antigua y una más joven y relativamente más caliente, permite el incremento del sistema de fuerzas, donde la placa se vuelve discontinua, anómala y horizontal alcanzando mayores distancias en dirección al continente. Según Gutsher (1999, 2001), en la subducción normal se observa una progresiva inclinación de la placa subducida para permitir el flujo normal de la astenósfera, dando como resultado el desplazamiento del manto lejos de la fosa, y el surgimiento de arcos volcánicos en superficie. En el caso de la subducción subhorizontal, una porción de litósfera oceánica, anormalmente poco densa, modificaría la intensidad de la fuerza de tracción de la placa que se hunde, proveyendo suficiente firmeza a la placa para que se mantenga casi horizontal por debajo del continente. Es decir, que la subducción de una dorsal asísmica o una meseta oceánica como las de Nazca, Carnegie, Cocos, Juan

Fernández y la meseta Inca, produciría el cambio hacia una subducción subhorizontal de la placa en subducción.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, es posible que exista relación entre el modo de subducción subhorizontal y la presencia de las dorsales de Nazca y Carnegie, esto debido a que los cambios en los modos de subducción geográficamente coinciden con la ubicación de estas dorsales.

Por otro lado, en este estudio, a diferencia de los realizados por Barazangui e Isacks (1979), Hasegawa e Isacks (1981), Grange (1984), Schneider y Sacks (1987), Rodríguez y Tavera (1991), Cahill e Isacks (1992), Tavera y Burfon (1998), Gutscher (2000), Bernal y Tavera (2002) y Quispe et al. (2003) se determina la geometría de la placa de Nazca haciendo uso de un catálogo compuesto por 6849 eventos sísmicos provenientes de bases de datos sísmicos de carácter local y regional, lo cual permitió obtener un modelo más detallado para la geometría de la Placa de Nazca.

Recientemente, Hayes et al (2012) utilizando la base de datos telesísmicos de la United States Geological Survey (USGS) y la International Seismological Cente (ISC), realizaron ajustes polinomiales de 3^{er} a 5^{to} orden sobre perfiles de sismicidad considerando datos con hipocentros que llegaron hasta los 700 km de profundidad. Con esta información, propuso el mapa de contornos de isoprofundidad para la geometría de la placa de Nazca con intervalos de 20 km, el cual es comparado con el modelo propuesto en el presente estudio (Figura 5.25).



b)

Figura 5.25 ; Contornos de isopropfundidad de la geometría de la placa de Nazca en el Perú. a) Modelo de Hayes et al (2012) y b) Modelo obtenido en el presente estudio

En general, el mapa de contornos de Hayes et al. (2012) y el obtenido en este estudio muestran resultados similares, aunque existen algunas zonas donde se observan diferencias en cuanto a la tendencia que siguen las curvas de isoprofundidad; por lo tanto, es necesario realizar un análisis más detallado de estos resultados. Para ello se procedió a construir en ambos mapas 5 perfiles representativos de las regiones Norte, Centro y Sur (Figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30), donde la línea discontinua de color verde muestra los resultados propuestos por Hayes et al. (2012) y en color rojo, los resultados obtenidos en este estudio.

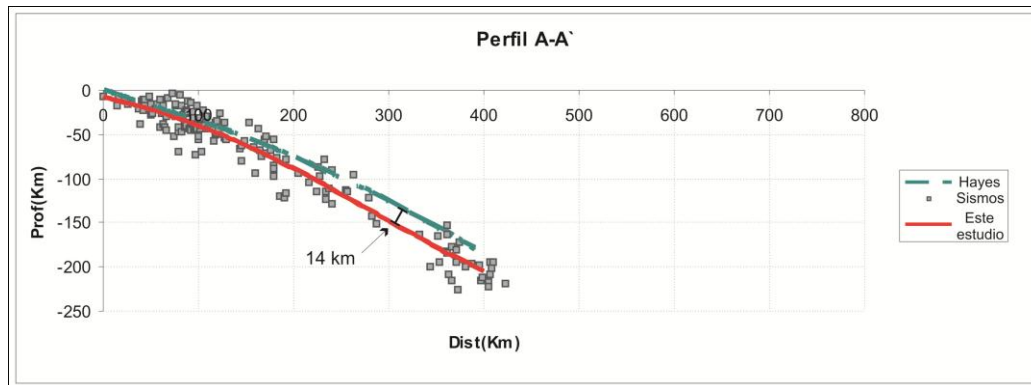


Figura 5.26 ; Comparación de perfiles para la zona Sur del Perú. La línea discontinua corresponde al trabajo realizado por Hayes et al. (2012) y la línea compacta, a los resultados obtenidos en este estudio sobre la tendencia de la sismicidad.

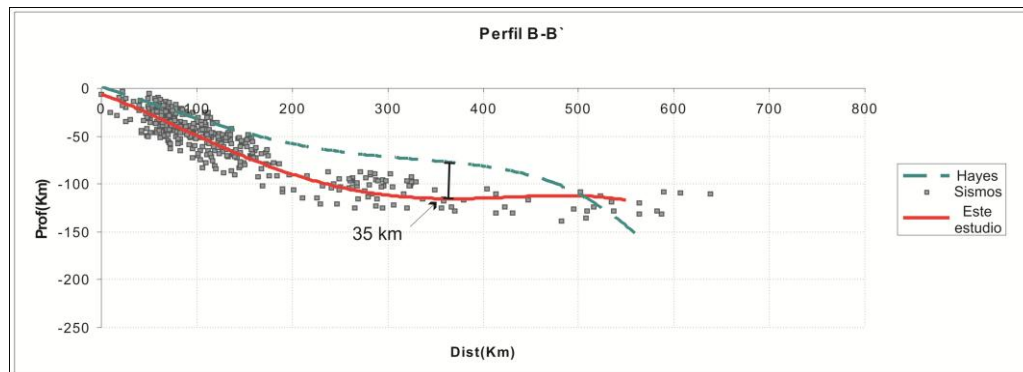


Figura 5.27 ; Comparación de perfiles para la zona Sur del Perú, a la altura de los 15° donde subduce la dorsal de Nazca. La línea discontinua corresponde al trabajo realizado por Hayes et al. (2012) y la línea compacta a los resultados por este estudio sobre la tendencia de la sismicidad.

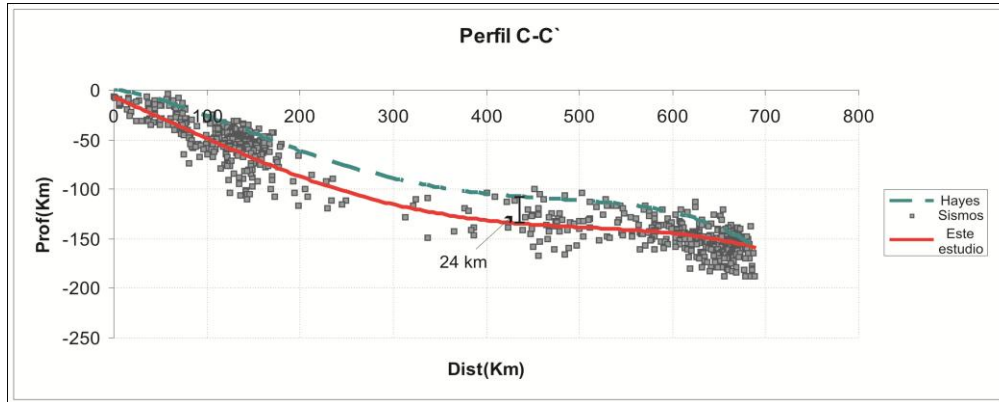


Figura 5.28 ; Comparación de perfiles para la zona Centro del Perú, a la altura de los 10º donde se produce la resubducción de la placa de Nazca. La línea discontinua corresponde al trabajo realizado por Hayes (2012) y la línea compacta a los resultados por este estudio sobre la tendencia de la sismicidad.

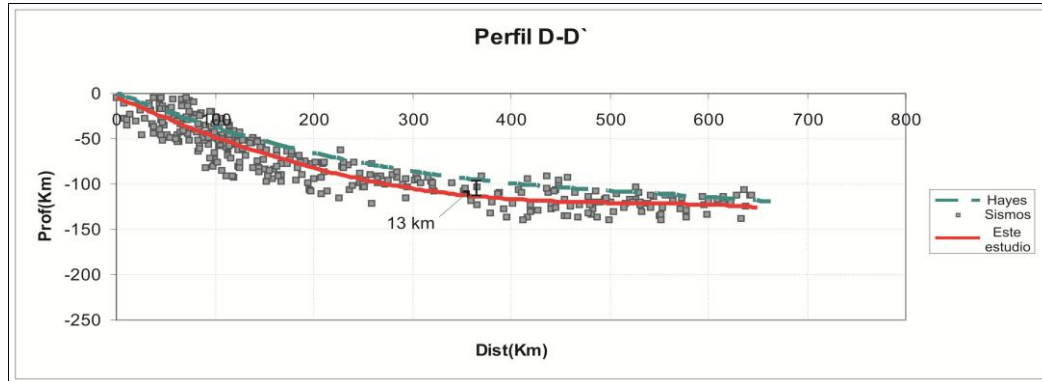


Figura 5.29 ; Comparación de perfiles para la zona Norte del Perú. La línea discontinua corresponde al trabajo realizado por Hayes (2012) y la línea compacta a los resultados por este estudio sobre la tendencia de la sismicidad.

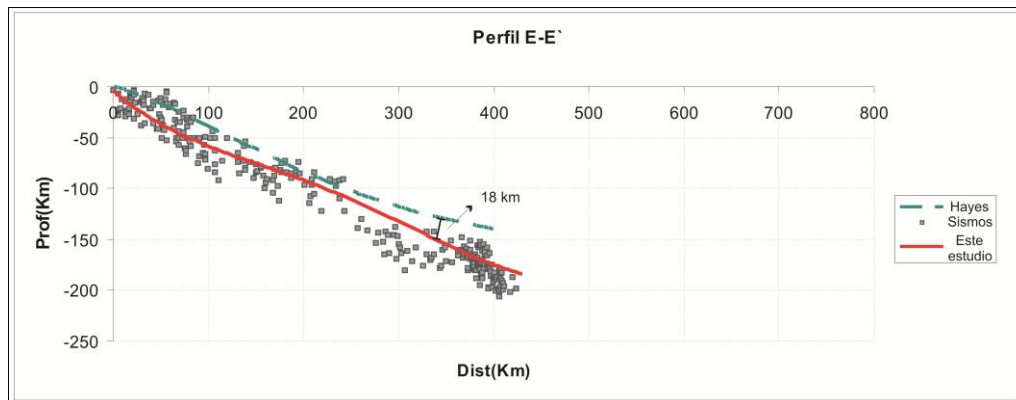


Figura 5.30 ; Comparación de perfiles para Ecuador. La línea discontinua corresponde al trabajo realizado por Hayes (2012) y la línea compacta a los resultados por este estudio sobre la tendencia de la sismicidad.

Según los perfiles elaborados, la tendencia para la geometría de la placa de Nazca es similar; sin embargo en algunos casos existen diferencias en los niveles de profundidad a la que llega la placa de Nazca. Estas diferencias varían en el rango de 13 a 35 km, siendo la tendencia propuesta en este estudio la que coincide con la distribución media de la sismicidad en profundidad; mientras que, en el caso de Hayes et al. (2012), la tendencia propuesta se encuentra por encima de la distribución de sismicidad. En la Figura 6.15 se observa la diferencia más notable, pues en el modelo propuesto por Hayes et al. (2012) se propone la resubducción de la placa, cuando la sismicidad no muestra dicha tendencia, tal como se propone en este estudio.

Por otra parte, Phillips et al. (2013) utilizando datos provenientes de arreglos sísmicos (Figura 5.31) y aplicando la técnica de “Receiver Function” obtiene imágenes de tomografía para la litósfera en la región Sur y Centro del Perú.

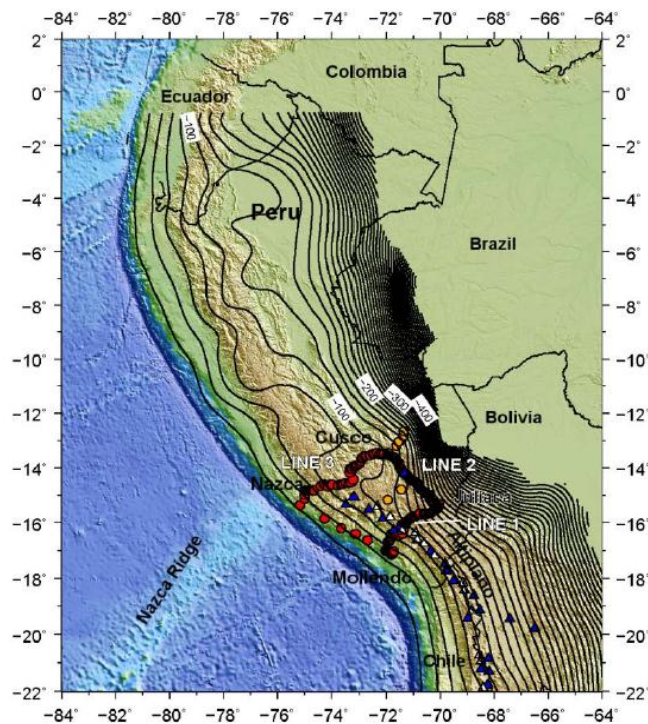


Figura 5.31 ; Mapa topográfico y batimétrico del Perú. Las líneas negras corresponden al modelo de Hayes et al (2012). Los arreglos sísmicos utilizados por Phillips et al. (2013) son mostrados en círculos rojos. Los triángulos corresponden a los volcanes.

Estos resultados son utilizados como base fiable de comparación y se procede a contrastarlos con los resultados obtenidos por Hayes et al. (2012) y el presente estudio, tal como se observa en las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33.

La correlación de resultados para la geometría de la placa de Nazca en la región sur, caracterizada por el modo de subducción normal, sugiere que la tendencia de la geometría de la placa es similar en todos estos estudios; es decir, su tendencia y profundidad son completamente coherentes (Figura 5.31).

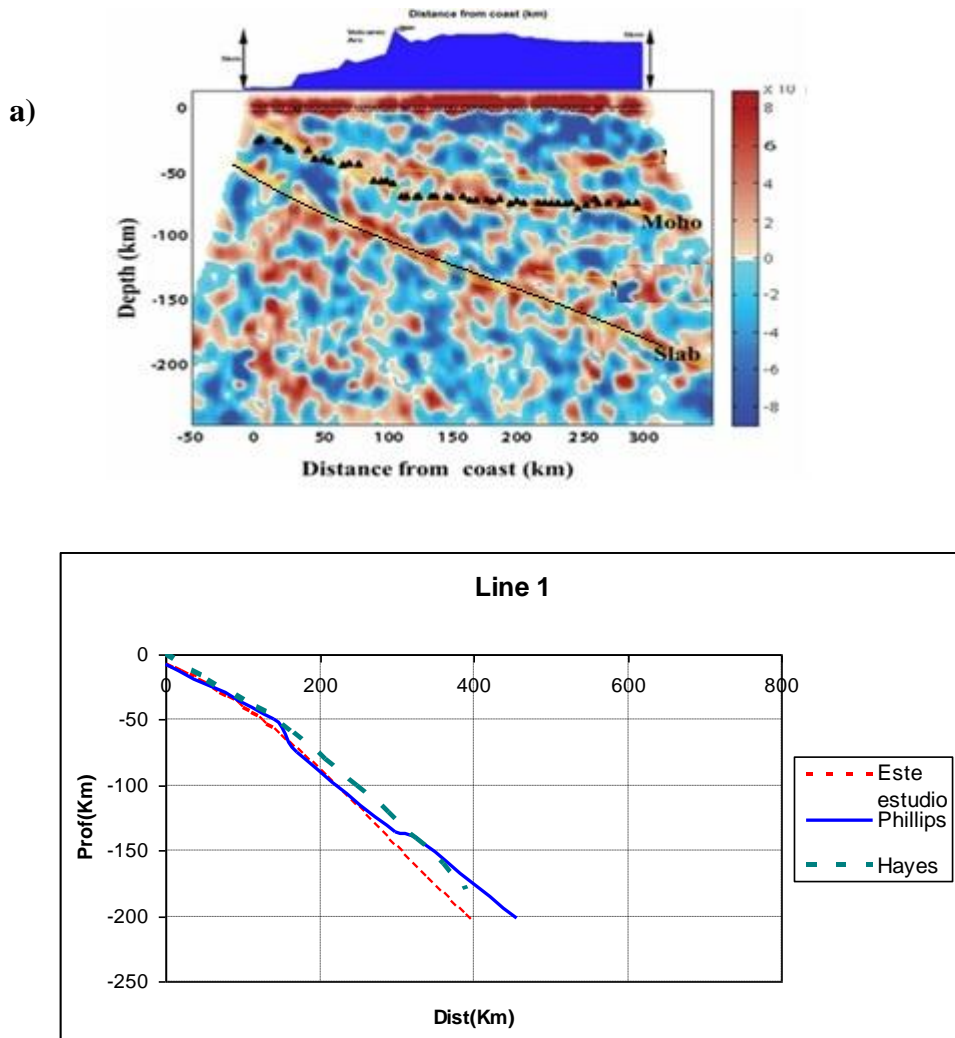


Figura 5.31 ; Comparación de perfiles para el Sur del Perú. a) Resultados propuestos por Phillips et al (2013) b) Comparación entre los trabajos de Hayes et al (2012), Phillips et al (2013) y los resultados propuestos en este estudio. Donde el Slab muestra la geometría de la placa de Nazca y el Moho la geometría de la corteza continental.

Asimismo, Phillips et al (2013) obtiene otra imagen de tomografía en el extremo oriental de la región sur-centro del Perú, para analizar los niveles a los cuales se realiza la contorsión de la placa de Nazca. Estos resultados al ser comparados con los obtenidos en este estudio y con el modelo propuesto por Hayes et al. (2012) muestran que existe coherencia en cuanto a la tendencia entre los 3 modelos, aunque es visible que existe mayor diferencia en cuanto a la profundidad con el modelo propuesto por Hayes et al (2012), lo cual indicaría que los resultados de Phillips et al. (2013) y los obtenidos en este estudio presentan mayor coherencia (Figura 5.32).

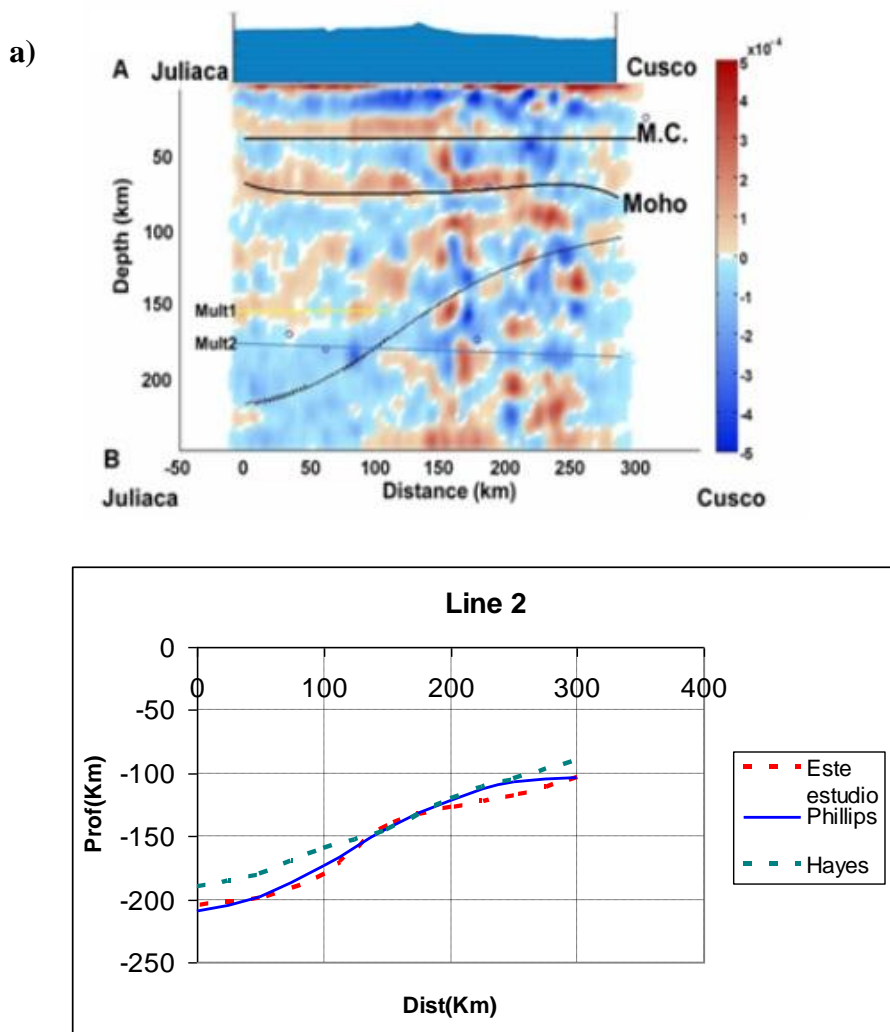


Figura 5.32 ;Comparación de perfiles para el Sur del Perú. a) Resultados propuestos por Phillips et al (2013) b) comparación entre los trabajos de Hayes et al (2012), Phillips et al (2013) y los resultados propuestos por este estudio. Donde el Slab muestra la geometría de la placa de Nazca y el Moho la geometría de la corteza continental.

Asimismo, Phillips et al. (2013) obtiene una imagen de tomografía para la zona central donde prevalece el tipo de subducción subhorizontal, la misma que es comparada con el modelo propuesto por Hayes et al. (2012) y el obtenido en el presente estudio. En la Figura 5.33 se observa que la tendencia para la geometría de la placa de Nazca obtenida en el presente estudio es similar a la propuesta por Phillips et al. (2013) en cuanto a la tendencia y profundidad, lo cual no ocurre con el modelo propuesto por Hayes et al. (2012) donde la tendencia de la geometría de la placa de Nazca se encuentra a menor profundidad, aproximadamente a 31 km con respecto al modelo propuesto en este estudio.

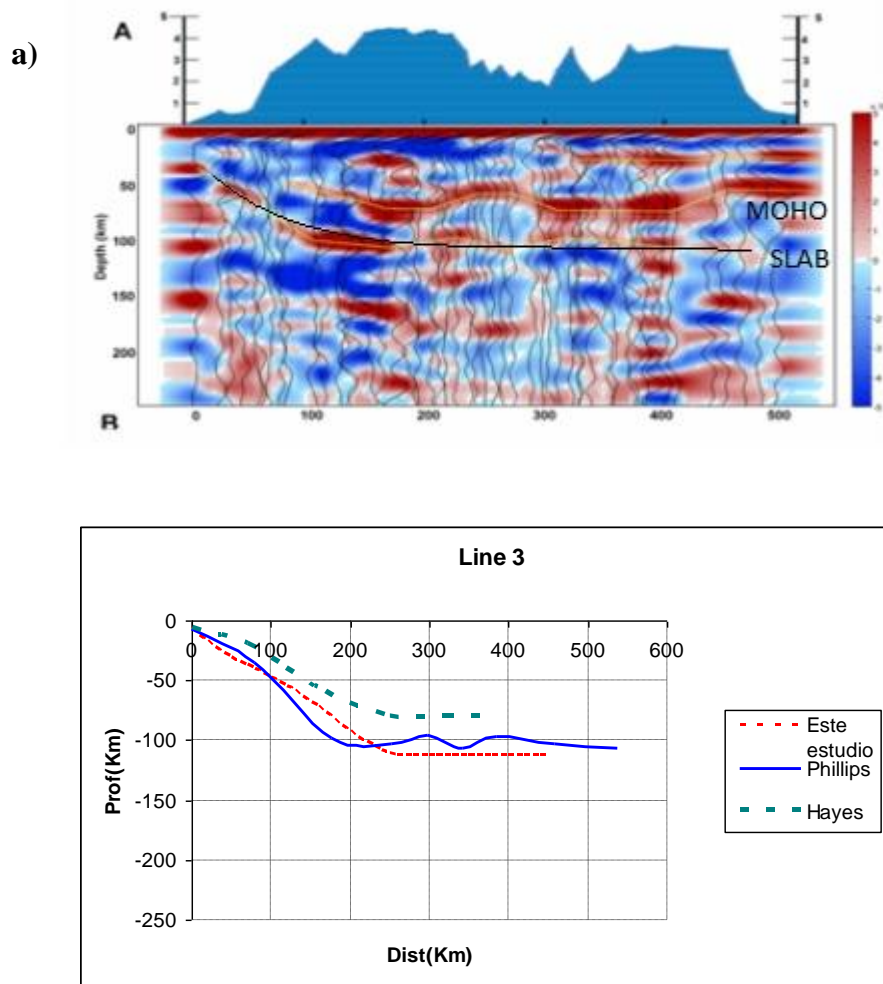


Figura 5.33 ; Comparación de perfiles para el Centro del Perú. a) Resultados propuestos por Phillips et al (2013) b) comparación entre los trabajos de Hayes et al (2012), Phillips et al (2013) y los resultados de este estudio.

Estos resultados muestran que el modelo para la geometría de la Placa de Nazca obtenida en este estudio es coherente con el modelo propuesto por Phillips et al. (2013), utilizando el método de “Receiver Function”; es decir, se obtienen resultados similares haciendo uso de metodologías y bases de datos diferentes.

Finalmente, tal como se ha demostrado, el modelo propuesto en este estudio propone la geometría de la Placa de Nazca a detalle, lo que constituye un importante aporte para el conocimiento de la sismotectónica regional.

CAPÍTULO VI

DISTRIBUCION DE ESFUERZOS

La deformación de un cuerpo corresponde a la transformación que se produce en términos de tamaño o forma debido a la acción de esfuerzos generados por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. La teoría de la tectónica de placas indica que la capa superficial de la Tierra, llamada litósfera, esta dividida en fragmentos que tienen un desplazamiento constante. La interacción entre ellos producen deformaciones dúctiles y frágiles como es el caso de los terremotos, donde se produce la ruptura de la litósfera, en respuesta a la influencia de los distintos tipos de esfuerzos de compresión y tensión presentes en el proceso de interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Estas placas presentan desplazamiento es direcciones opuestas originando de esta manera que se comporten como guías de los esfuerzos que se comprimen mutuamente provocando el incremento de esfuerzos hasta provocar que la placa de Nazca, mas densa, se hunda por debajo de la placa continental hasta fundirse en el manto. Considerando que existe gran influencia de los esfuerzos compresionales (P) y los esfuerzos tensionales (T), es necesario analizar su distribución espacial a fin de comprender los procesos de deformación que controlan la geodinámica en el Perú.

Para tal fin se utiliza la base de datos procesados y recopilados por CMT Harvard (Global Centroit Moment Tensor) para sismos ocurridos en el Perú entre los años 1976 y 2011. Esta base de datos es la más completa y homogénea disponible para su uso en investigación.

En este capítulo se realiza la descripción de algunos conceptos básicos de esfuerzo a fin de optimizar la comprensión de los mecanismos que dan origen a los principales esfuerzos presentes en la geodinámica del Perú.

6.1 NOCIONES DE ESFUERZO

El esfuerzo se define como la magnitud de una fuerza aplicada sobre una superficie dividida entre el área de dicha superficie, que es distribuido de tal forma que genere un cambio en la forma de un cuerpo. Por ejemplo, cuando una barra cilíndrica es deformada por un peso que actúa hasta que sea balanceado por las fuerzas internas del cuerpo. Esto implica, que en el cuerpo deformado, actúen fuerzas iguales y opuestas logrando establecer un balance sobre la superficie de deformación. Esta acción y reacción entre las partes adyacentes se denominan esfuerzos y dimensionalmente se expresan como las fuerzas por unidad de área (Figura 6.1).

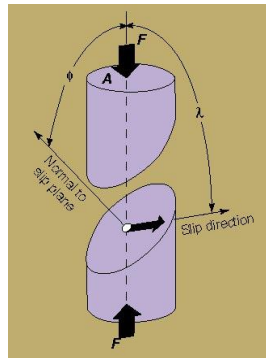


Figura 6.1; Esquema que representa el estado de esfuerzos sobre un cuerpo circular

Existen 5 tipos de esfuerzos que tienden a cambiar la forma del cuerpo haciendo que se estire (tracción), se fracture (cizalladura), se comprima (compresión), se retuerza (torsión) o se doble (flexión), tal como se observa en la Figura 6.2.

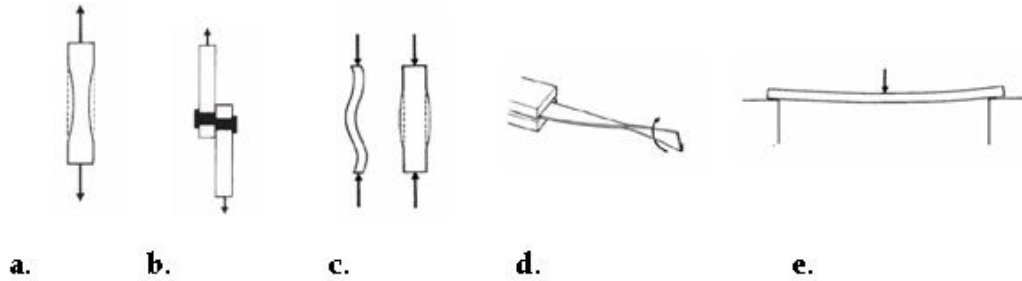


Figura 6.2; *Diversos tipos de esfuerzos a. Tracción, b. Cizalladura, c. Compresión, d. Torsión, e. Flexión*

Por otro lado, el esfuerzo puede ser analizado de dos formas. La primera forma tiene lugar cuando el esfuerzo se ejerce sobre un plano y la segunda cuando el esfuerzo se ejerce sobre un punto. En el primer caso se trata de una cantidad vectorial; mientras que, en el segundo puede ser expresado por una matriz.

- **Esfuerzo sobre un plano**

La influencia del esfuerzo sobre un plano A se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Donde ΔF es una cantidad vectorial, y el vector esfuerzo puede expresarse por:

$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{F}}{dA}$$

Entonces, el esfuerzo puede descomponerse en componentes paralelos a cualquier dirección y con respecto a su plano; es decir, en una componente normal $\vec{\sigma}N$ y otra tangencial $\vec{\sigma}T$ (Figura 6.3).

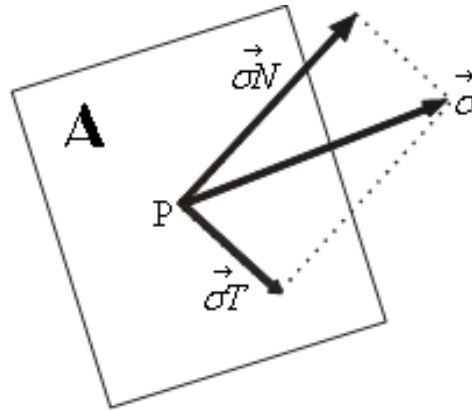


Figura 6.3; Esquema que representa el esfuerzo actuante sobre un plano A

- **Esfuerzo sobre un punto**

La diferenciación puntual del esfuerzo puede ser muy compleja, pues se puede imaginar que a través de un punto atraviesan infinitos planos; sin embargo, se ha demostrado que es suficiente conocer solo las componentes de tres superficies mutuamente perpendiculares (Figura 6.4).

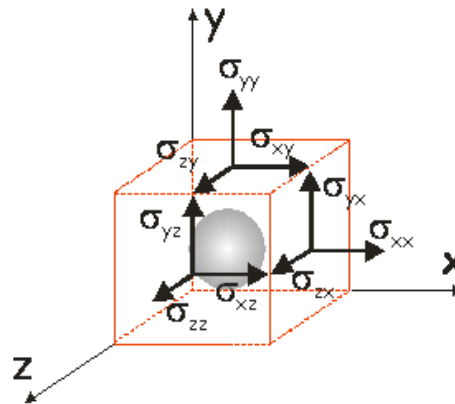


Figura 6.4; Representación gráfica de los principales esfuerzos actuantes sobre un punto y sus respectivas componentes.

Entonces, el esfuerzo en un punto puede definirse por las componentes correspondientes a tres planos perpendiculares; donde el vector de esfuerzos en cada plano tiene un vector normal σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} y dos tangenciales σ_{xy} , σ_{yx} , σ_{xz} , σ_{zx} , σ_{yz} , σ_{zy} que hacen un total de nueve parámetros que son ordenados en una

matriz cuadrada 3x3 conocida como “tensor”. Estos vectores describen el estado de esfuerzos en un punto sobre los tres planos, donde el primer subíndice indica la dirección de la componente y el segundo, el plano en el cual actúa el esfuerzo.

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Los 9 parámetros del “tensor” o “tensor momento” pueden ser graficados en pares de fuerzas, tal como se observa en la Figura 6.5.

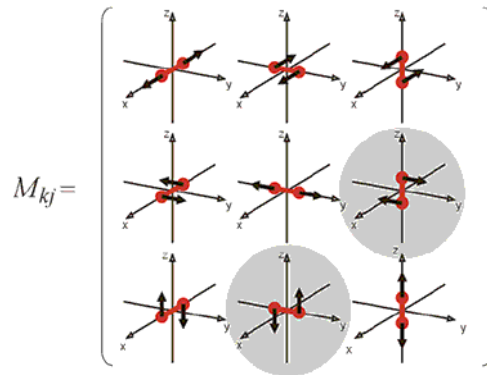


Figura 6.5; Esquema que muestra los 9 pares de fuerzas que componen el tensor momento (Aki y Richards, 1980)

6.2 MECANISMO DE LOS TERREMOTOS

Las rocas poseen un comportamiento elástico; es decir, que cuando se les aplica esfuerzos estas se deforman y al quitarlos, vuelven progresivamente a su estado inicial. Sin embargo, existe otro escenario donde los esfuerzos aplicados sobre la roca se mantienen durante un largo periodo de tiempo, desde decenas a miles de años, permitiendo que la roca se deforme permanentemente y llegue a asumir un comportamiento plástico.

En el caso de que el esfuerzo aplicado sea demasiado grande y exceda la resistencia de la roca, esta se rompe y forma así una fractura o falla que esta presente a lo largo de su plano llamado “plano de falla” (Figura 6.6).

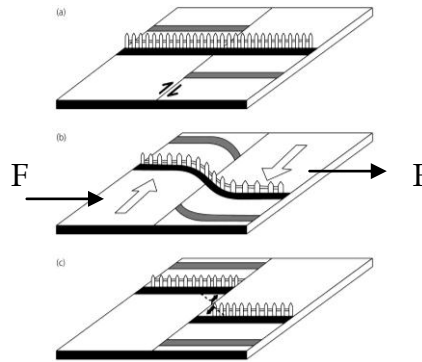


Figura 6.6; Esquema que muestra el modelo del rebote elástico propuesto por Reid (1911). Dónde: F =fuerza y f = traza de falla.

Aparentemente, en un plano que está relativamente libre de esfuerzos, el material ubicado a ambos lados del mismo, puede desplazarse libremente y la roca vuelve a tomar su forma original de manera súbita, produciendo desplazamientos de varios kilómetros cúbicos lo cual producen ondas elásticas u ondas sísmicas que viajan por la superficie de la Tierra (Lay y Wallace, 1995).

El primer modelo mecánico que explica el origen de los terremotos fue propuesto por Reid (1911) y fue conocida como la teoría del "rebote elástico". Esta teoría considera que existen zonas en la corteza terrestre donde se van acumulando paulatinamente esfuerzos que ocasionan, en los materiales, deformaciones elásticas cada vez mayores hasta que superan su resistencia y se rompen produciendo la liberación casi instantánea de la energía que se propaga en forma de ondas sísmicas y a la vez también el retorno a un estado de equilibrio elástico de la zona previamente sometida a esfuerzos (Udías, 1997).

6.2.1 Plano de falla

Cuando se considera a la falla como un punto, cada uno de los tipos de fallamiento puede ser representado por un conjunto de fuerzas llamado "doble par de fuerzas" y la magnitud de cada par de fuerzas es conocido como momento sísmico (M_0).

El momento sísmico es un parámetro importante para caracterizar el "tamaño" de un sismo ya que depende de la rigidez del medio (μ), del área de ruptura(A) y del

desplazamiento promedio producido en la falla(u), $M_0 = \mu \times A \times u$, asumiendo el caso ideal donde la ruptura producida por un terremoto ocurre a lo largo de la superficie de la falla. La orientación de este plano en el espacio puede ser definido por los ángulos: azimut(ϕ), buzamiento(δ) y ángulo de desplazamiento (λ) (Figura 6.7)

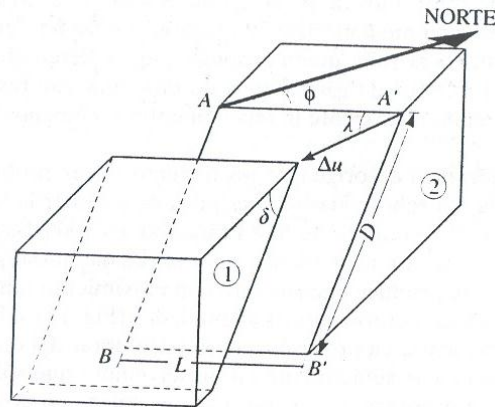


Figura 6.7; Esquema que muestra los principales parámetros que definen el movimiento de una falla: L es la longitud de falla, D corresponde a la anchura de falla, ϕ el azimut (strike), δ el buzamiento del plano (dip), λ el ángulo de desplazamiento (slip) y Δu representa el deslizamiento o dislocación (slip) (Stein y Wissesion, 2003).

6.2.2 Mecanismos focales

Los mecanismos focales son representaciones esquemáticas de los planos de ruptura que explican el mecanismo de falla en la fuente o foco donde se libera la energía.

Existen diversas técnicas de obtención de mecanismos focales de los eventos sísmicos principales, uno de los métodos más extendidos y de fácil aplicación consiste en identificar el primer impulso o potencial de la onda P leído en los registros sísmicos de un sismo en particular.

Estas polaridades, positivas o negativas, pueden distribuirse sobre una esfera focal de radio unidad (Figura 6.8).

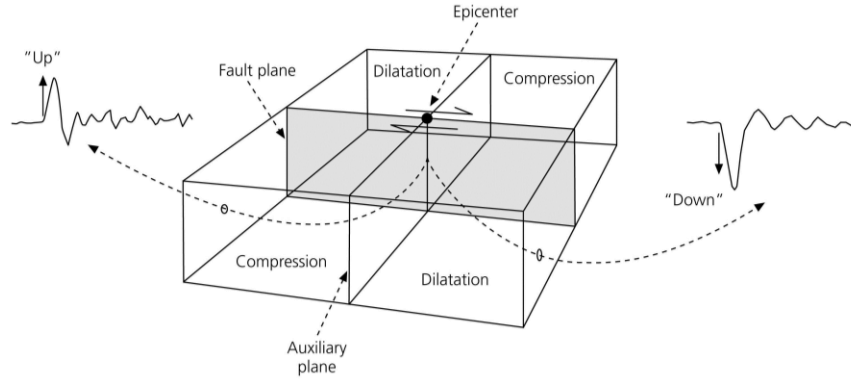


Figura 6.8; Representación de el mecanismo de la fuente puntual y la ubicación de las zonas de compresión y dilatación.

Estas polaridades son representadas por medio de 2 planos perpendiculares entre si y forman 4 cuadrantes que delimitan las áreas de compresión y dilatación (Figura 6.9).

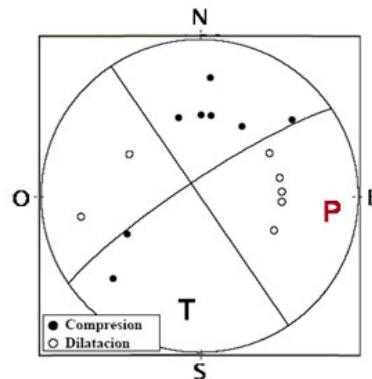


Figura 6.9; Proyección estereográfica de polaridades y representación de las mismas en cuadrantes. T y P, representan al eje de tensión y presión.

La orientación de la fuente puede darse en términos de los ejes de esfuerzos principales P, T y Z o a partir de los ángulos que diferencian la orientación de los planos de falla.

La información obtenida permite conocer las características del tipo de falla que originó el terremoto. La correspondencia entre las soluciones de mecanismo focal y los cuatro tipos principales de fallas se muestra en la Figura 6.10.

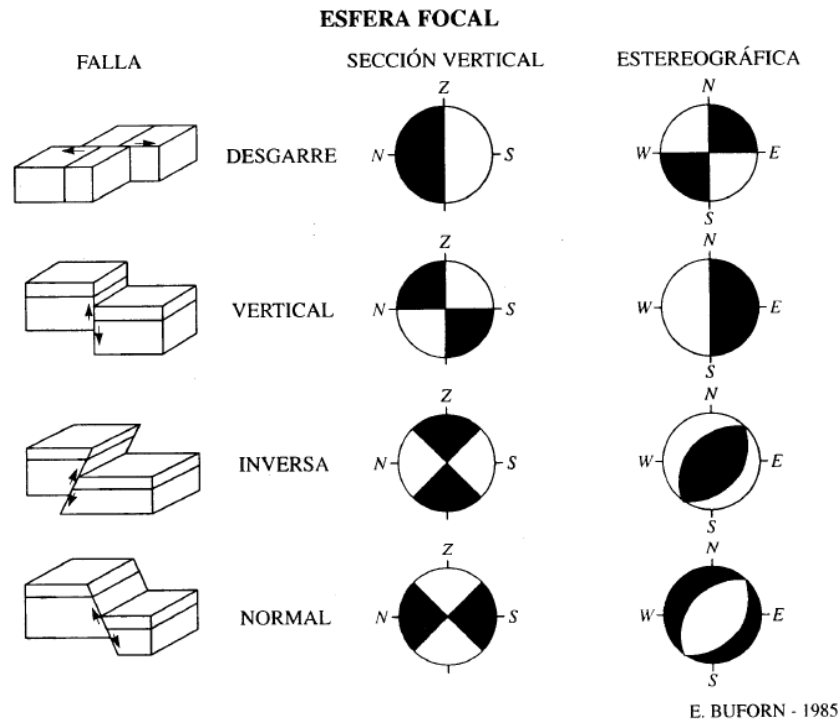


Figura 6.10; Correspondencia entre los cuatro tipos de fallas y su representación a partir del mecanismo focal (Buforn, 1985)

6.3 BASE DE DATOS

La base de datos utilizada en este capítulo forma parte del catálogo desarrollado por el grupo de investigación sismológica de Harvard, encabezado por Adam Dziewonski, quienes en 1981 comenzaron a determinar los parámetros focales de todos los terremotos con $M_s \geq 5.5$ utilizando el método de inversión “Centroid Moment Tensor “ (CMT). Las soluciones proporcionadas por el CMT para cada evento sísmico permiten conocer la localización del mismo en el tiempo y espacio (latitud, longitud), profundidad del centroide, orientación de la ruptura (mecanismo focal) y el momento sísmico (M_0) (Figura 6.11).

010576A PERU

```

Date: 1976/ 1/ 5   Centroid Time: 2:31:44.7 GMT
Lat= -13.42 Lon= -75.14
Depth= 85.4   Half duration= 1.6
Centroid time minus hypocenter time: 8.4
Moment Tensor: Expo=24   -1.780 -0.590 2.370 -1.280 1.970 -2.900
Mw = 5.7   mb = 6.0   Ms = 0.0   Scalar Moment = 3.79e+24
Fault plane:   strike=350   dip=28   slip=-60
Fault plane:   strike=137   dip=66   slip=-105

```

Mechanism information

```

Fault plane:   strike=350   dip=28   slip=-60
Fault plane:   strike=137   dip=66   slip=-105
Eigenvector:   eigenvalue:  4.97   dip: 19   azimuth: 238   Eje P
Eigenvector:   eigenvalue: -2.62   dip: 66   azimuth:  20   Eje T

```

Figura 6.11; Ejemplo de los parámetros de la falla representado por el CMT

La orientación de la ruptura propuesta por el mecanismo focal permite conocer la orientación de los principales ejes de esfuerzo que actúan sobre la fuente sísmica: ejes de Presión (P) y Tensión (T). Estos esfuerzos tienen implicancia directa sobre las deformaciones que se producen en la región afectada por el sismo y definen la dirección y la incidencia con la cual actúan los ejes de compresión (P) y extensión (T) en la ruptura, de ahí la importancia de analizar su distribución espacial.

El catálogo base utilizado en este estudio compila parámetros focales de sismos ocurridos en el Perú durante el periodo 1976 a 2011 y esta constituido por 691 eventos de foco superficial e intermedios. Debido a que al presente capítulo esta centrado en analizar la influencia de los esfuerzos en la deformación de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción, se hace uso únicamente de la información que define la ruptura asociada al sismo. Entonces, la base de datos fue filtrada de manera que se priorizaron los eventos comprometidos con el proceso de subducción. Se filtró los sismos de fuentes corticales obteniendo un catálogo final de 485 eventos para su respectivo análisis.

6.4 ANÁLISIS

Los procesos de ruptura que se desarrollan en el proceso de subducción pueden ser analizados de diversas formas. En este caso se opta por el análisis de la distribución espacial de los ejes de presión (P) y tensión (T) asociado al proceso de ruptura de cada sismo considerado en este estudio. Para ello, se sigue dos procedimientos. El primero construyendo mapas en los cuales se proyecta la componente horizontal de ambos ejes

debidamente normalizados y el segundo, construyendo proyecciones estereográficas para determinadas áreas.

6.4.1 Mecanismos focales

Para realizar el análisis de los mecanismos focales, los sismos fueron clasificados según la profundidad de su foco, siguiendo el mismo criterio adoptado en el capítulo IV para los eventos sísmicos.

a) Mecanismos focales para eventos superficiales

Los mecanismos focales para eventos superficiales se encuentran ubicados a profundidades menores a 60 km, entre la línea de fosa y la costa del Perú (Figura 6.12).

En el mapa de la Figura 7.12 se presentan mecanismos focales que definen procesos de ruptura de tipo inverso y normal para las zonas sur, centro y norte. La zona sur se encuentra a partir de los 14° hacia los 19° donde en su mayoría se presentan mecanismos focales de tipo inverso, también se observa la presencia de mecanismos focales de tipo normal en la costa del departamento de Arequipa y en el departamento de Ica. Debe considerarse que la deformación sobre la superficie de fricción es heterogénea de ahí la presencia de mecanismos focales inversos y normales; pero dentro del proceso de subducción prevalecen los de tipo inverso. En la mayoría de los mecanismos focales la orientación del plano de falla es de NNO-SSE.

Hacia la zona centro, entre los 14° y los 10° de latitud, la densidad de datos se reduce y la presencia de mecanismos focales tanto inversos como normales se presentan de manera dispersa. Además la mayoría muestra una orientación NNO-SSE en su plano de falla.

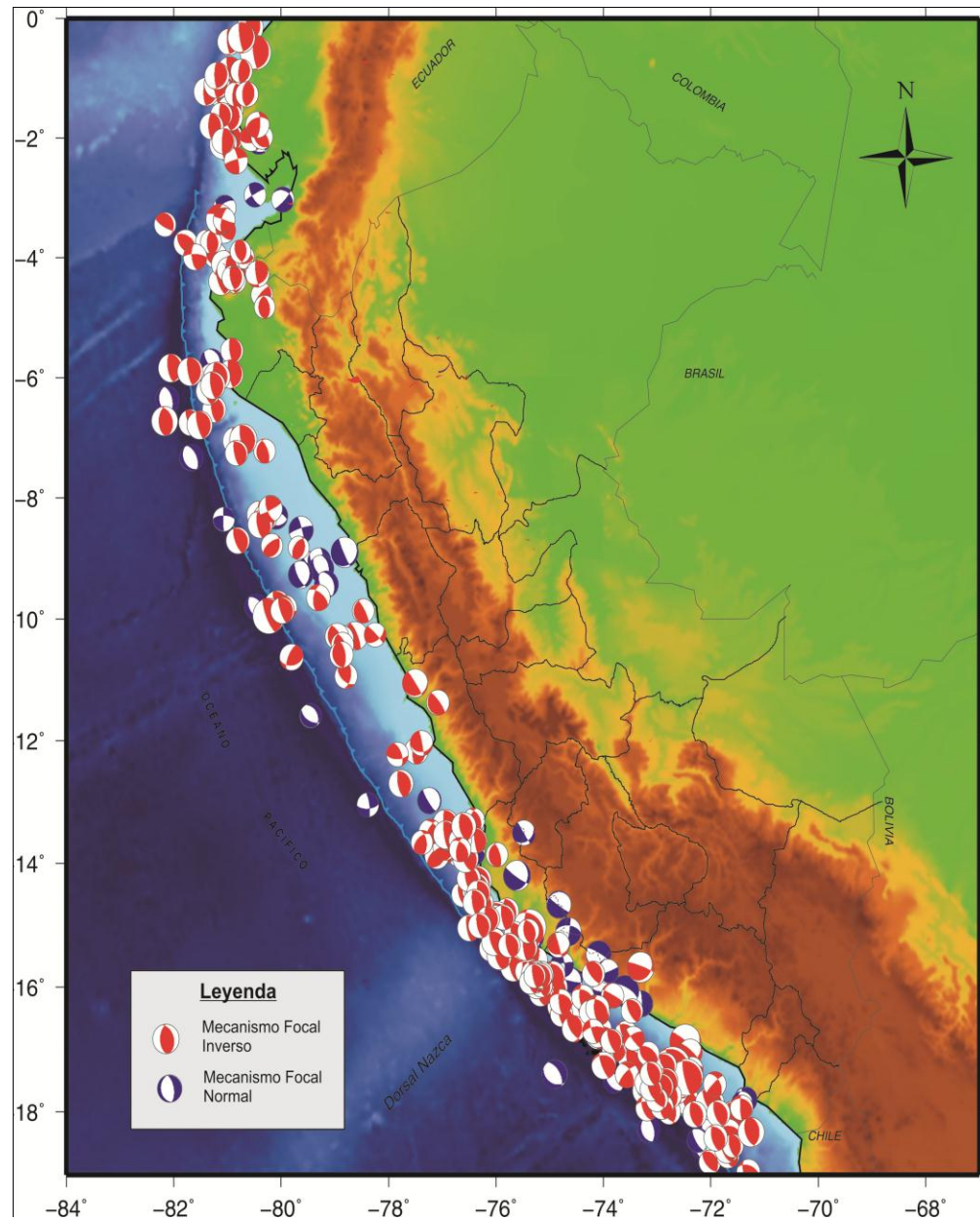


Figura 6.12; Distribución de mecanismos focales correspondientes a sismos de foco superficial presentes en el borde occidental del Perú. Las esferas de color rojo corresponden a mecanismos focales inversos y los de color azul, a mecanismos focales normales.

En la zona norte, a partir de los 10°, se observan 4 agrupaciones, la primera frente a los departamentos de Ancash y La Libertad, donde la cantidad de mecanismos inversos y normales se presenta de forma similar. Luego, frente a los departamentos de Lambayeque y el sur de Piura se observa la presencia de mecanismos inversos y solo un mecanismo de tipo normal. En esta agrupación la mayoría de los mecanismos focales muestran una orientación NNO-SSE en su plano de falla.

La siguiente agrupación se observa frente a los departamentos de Piura y Tumbes donde se presentan mecanismos focales de tipo inverso y hacia el límite con Ecuador se presenta una pequeña cantidad de mecanismos de tipo normal.

Finalmente, frente a Ecuador se observa una agrupación de mecanismos de tipo inverso donde la mayoría muestra una orientación en su plano de falla N-S.

Tal como se indicó los mecanismos tipo inverso prevalecen y corresponden a una característica coherente con la deformación regional presente en el borde occidental del Perú, pues este tipo de mecanismo esta asociado al desarrollo de procesos compresivos típicos de zonas de subducción. Además, se puede observar que la dirección de los planos de falla coincide con la dirección de la fosa oceánica.

b) Mecanismos focales para eventos de foco intermedio

Los mecanismos focales para eventos de foco intermedio se encuentran ubicados entre los 61 km a 300 km de profundidad y hacia el este de la fosa oceánica por debajo del continente (Figura 6.13).

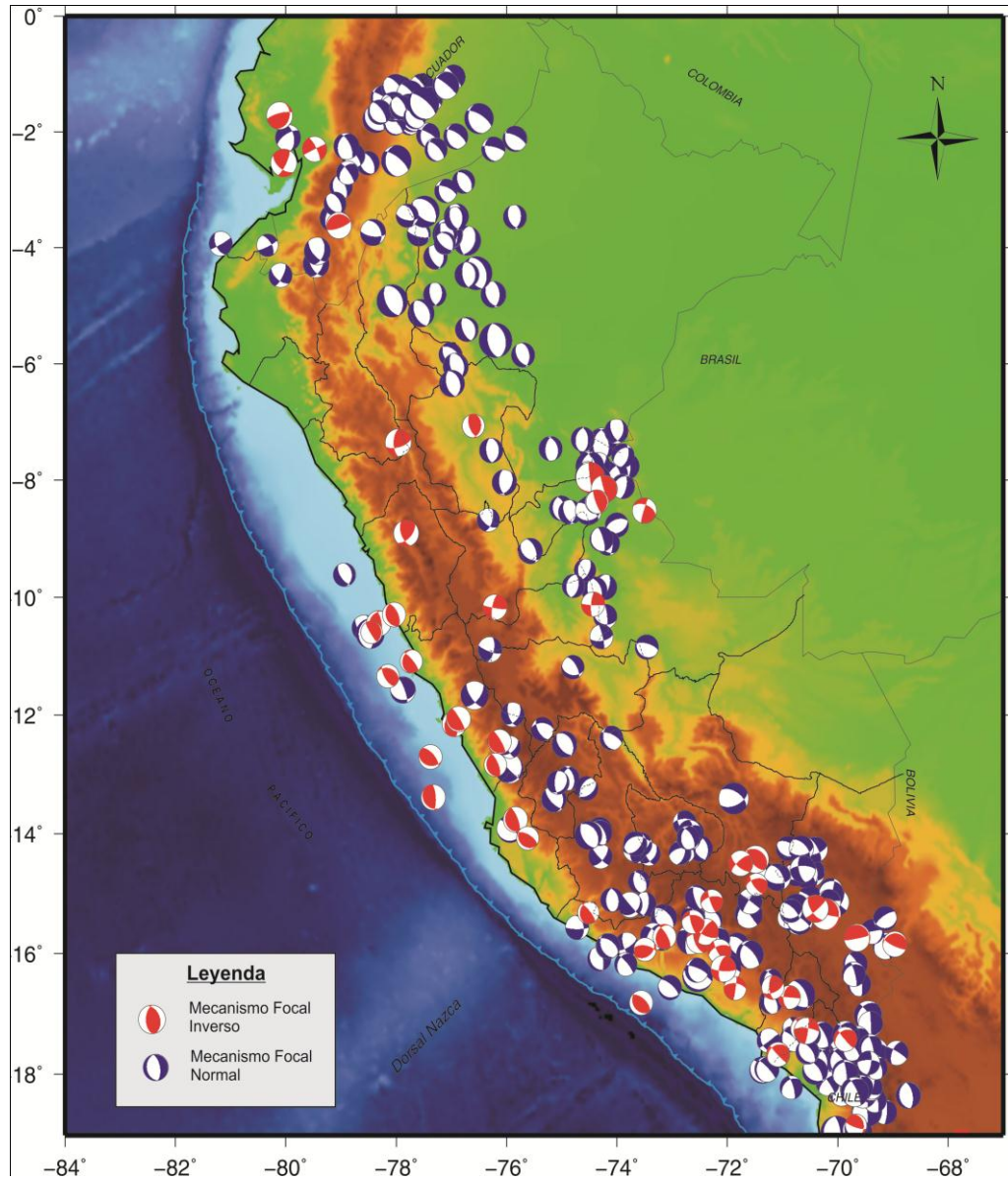


Figura 6.13; Distribución de mecanismos focales correspondientes a sismos de foco intermedio presentes en el borde occidental del Perú. Las esferas de color rojo corresponden a mecanismos focales inversos y los de color azul, a mecanismos focales normales.

Según el mapa de la Figura 7.13 se presentan mecanismos de tipo normal e inverso distribuidos desde la línea de fosa hasta el interior del continente. Se observa que hacia el Sur de los 14° de latitud se presenta una acumulación de mecanismos focales cuyos planos de falla tienen un orientación NNO-SSE. Luego, entre los 14° y 7° de latitud los mecanismos focales se presentan de forma dispersa, salvo en la frontera entre los departamentos de Ucayali y Loreto donde se presenta una acumulación de sismos. En esta zona, la orientación que toman los planos de falla es de N-S. Finalmente, a partir de los 7° hacia el norte del Perú, la distribución de los mecanismos focales se presenta de manera homogénea y los planos de falla toman una orientación N- S.

En general, la mayor cantidad de mecanismos focales son de tipo normal e indicarían que se desarrollan procesos de deformación por extensión.

6.4.2 Distribución y Estado de los Esfuerzos

Un mapa de distribución de los esfuerzos permite conocer el tipo de deformación que se produce a la ocurrencia de un sismo; es decir, reconocer la dirección en la cual actúan los esfuerzos que originan la ruptura. Para tener una idea base sobre la distribución de los principales esfuerzos presentes en la zona de subducción se ha visto por conveniente identificar las zonas donde se encuentran las principales fuentes de deformación asociados al proceso de subducción. Según la Figura 6.14, dentro del proceso de subducción se identifican las siguientes fuentes de deformación: a) sismos compresionales en la zona outer rise, b) eventos sísmicos compresionales de gran magnitud en la zona interplaca, c) eventos sísmicos tensionales en la zona intraplaca.

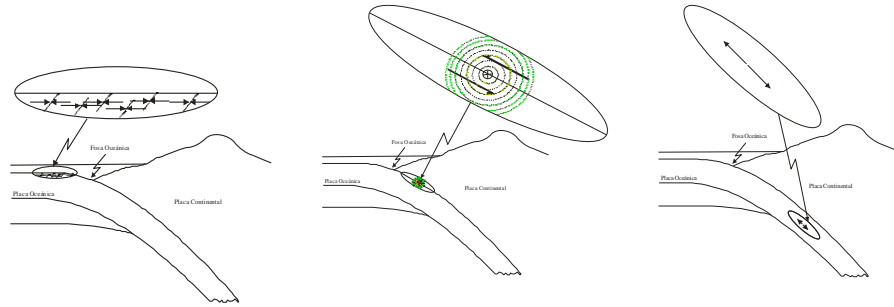


Figura 6.14; Modelo de Acumulación y transferencia de esfuerzos propuesto por Lay et al (1989)

En este estudio, para analizar la distribución de los esfuerzos se procedió a proyectar los ejes de Presión y Tensión utilizando los datos de latitud, longitud, azimut y buzamiento de cada mecanismo focal. Los valores de latitud y longitud permitieron ubicar el eje en el espacio bidimensional, luego, el valor del ángulo del azimut muestra la orientación que toma el eje con respecto al norte, y finalmente, el buzamiento o dip muestra el ángulo con respecto a un plano horizontal. Este último parámetro fue analizado en su componente horizontal (SH-max), para esto, los ejes fueron normalizados, de tal forma, que para valores de buzamiento pequeños o cercanos a 0° la longitud de la componente horizontal es mayor (Figura 6.15.a) y para valores de buzamiento mayores o cercanos a 90° , la longitud de la componente horizontal es más pequeña (Figura 6.15.b).

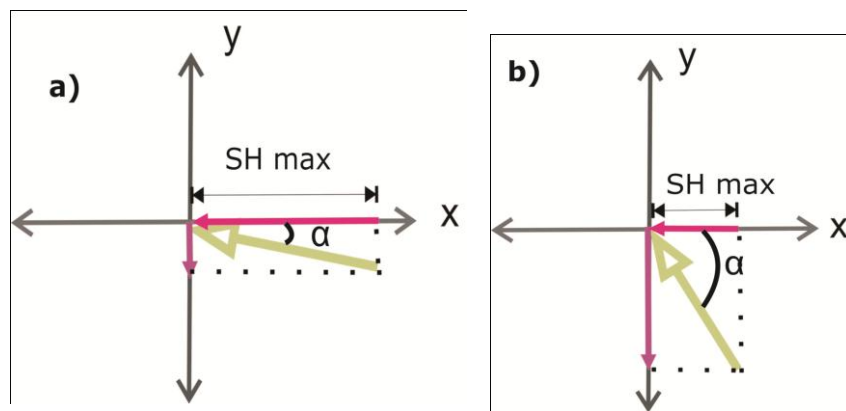
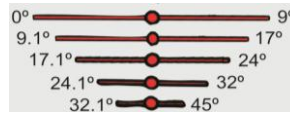


Figura 6.15: Descomposición de un Eje de Presión o Tensión (flecha verde) la flecha fucsia corresponde a su componente horizontal máxima (SHmax), donde, α es el ángulo a) próximo a 0° y b) próximo a 90°

Para la normalización de los ejes de SHmax se han utilizado la siguiente correlación:



Luego, con los parámetros ya definidos se procedió a generar mapas de presión y tensión que son analizados a continuación.

a) Esfuerzos compresivos

La proyección horizontal de los ejes de presión SH max para sismos ocurridos en la superficie de fricción de placas se presenta en la Figura 6.16 y sus características son las siguientes.

El mapa muestra que los SHmax se distribuyen, en general, entre la línea de fosa y la costa del Perú.

En la región Sur, a partir de los 14° se presenta una importante concentración de esfuerzos con una orientación regional ENE-OSO con algunas excepciones que toman una dirección ONO-ESE, lo que sugiere que en comparación con las otras zonas, esta posee el mayor nivel de deformación.

Hacia la zona centro del Perú, la presencia de los ejes de esfuerzos P disminuye notablemente y muestran diversidad en sus orientaciones, prevaleciendo ejes en direcciones ENE-OSO, NNE-SSO, NO-SE, lo que mostraría que en esta zona la deformación es menor y muy heterogénea con una dirección predominante.

En la región norte de Perú, los esfuerzos aumentan en cantidad con respecto a la zona centro, y sus orientaciones tienden a homogeneizarse tomando una dirección E-O, con algunos esfuerzos en dirección NE-SO, NO-SE y N-S, lo cual mostraría que en esta zona también existe un alto grado de deformación.

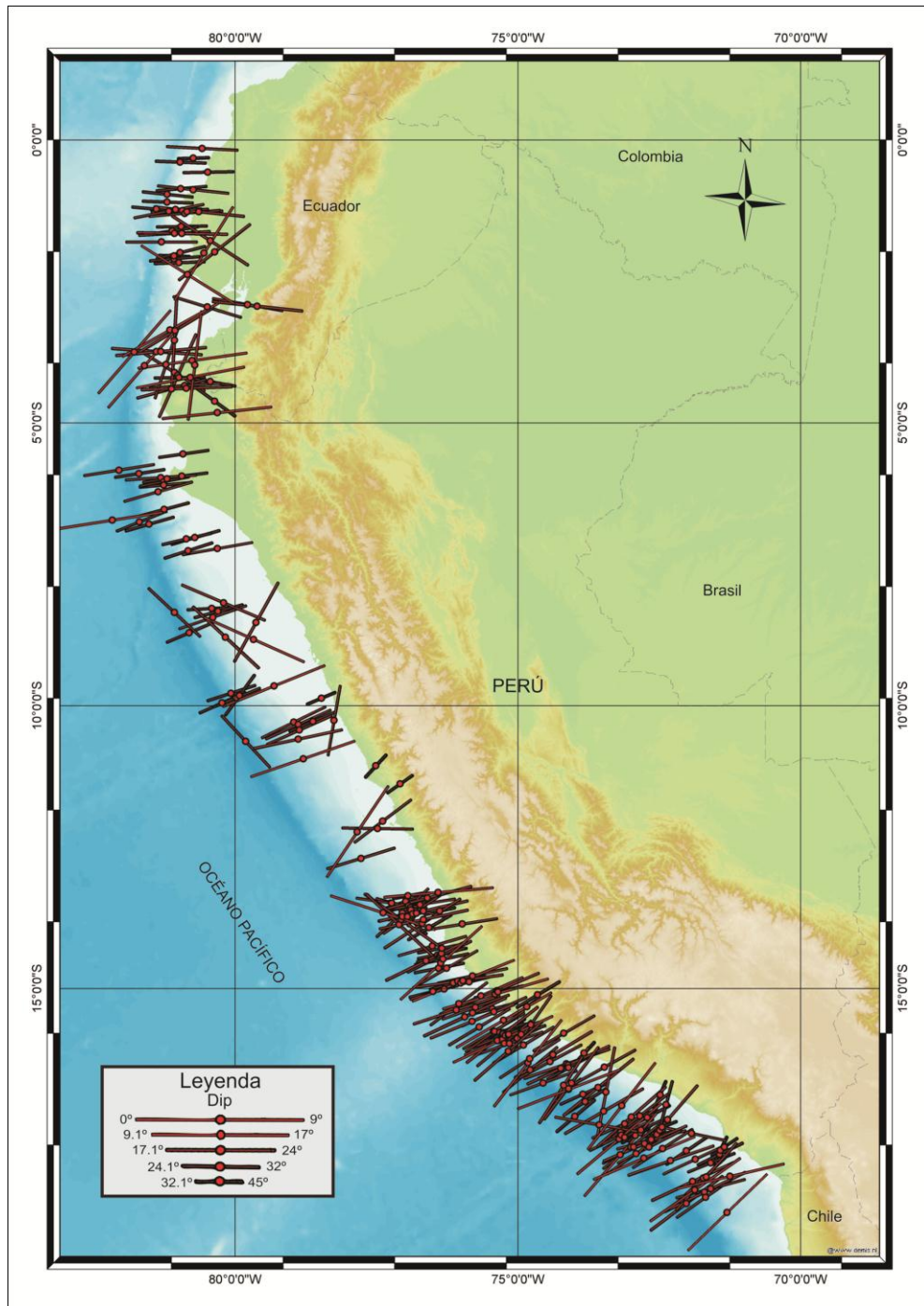


Figura 6.16; Distribución de los ejes de presión SH max en el borde Occidental del Perú.

En general, se observa que la dirección de los esfuerzos, en la mayoría de los casos, se presenta de manera perpendicular a la fosa oceánica, la costa y la Cordillera Andina. Estos esfuerzos compresivos estarían asociados al acoplamiento sísmico de la placa oceánica y la placa continental, que se produce al inicio del proceso de subducción.

b) Esfuerzos Tensionales

La proyección horizontal de los ejes de tensión SH max para sismos ocurridos en la zona intermedia de la superficie de fricción de placas se muestra en la Figura 6.17 y sus características son las siguientes.

El mapa muestra que se distribuyen desde la fosa hacia el interior del continente. En la región sur, se puede observar que existe heterogeneidad en la dirección de la orientación de los ejes T, pero prevalecen ejes orientados en dirección NE-SO a ENE-OSO. Se observa que algunos ejes, a la latitud de 14° muestran un giro en su orientación hacia NNO-SSE, que coincide con la llegada de la dorsal de Nazca y además podrían asociarse a la contorsión de la Placa al cambiar de modo de subducción.

Hacia la región central, los esfuerzos disminuyen en número y presentan una dirección representativa de ENE-OSO lo que indicaría que se produce un menor régimen de deformación a profundidades intermedias, salvo en la latitud 8°, hacia el este de la Cordillera Andina, donde se observa una acumulación de esfuerzos en dirección ENE-OSO y ONO-ESE, los cuales estarían asociados a una posible resubducción de la placa en esta zona.

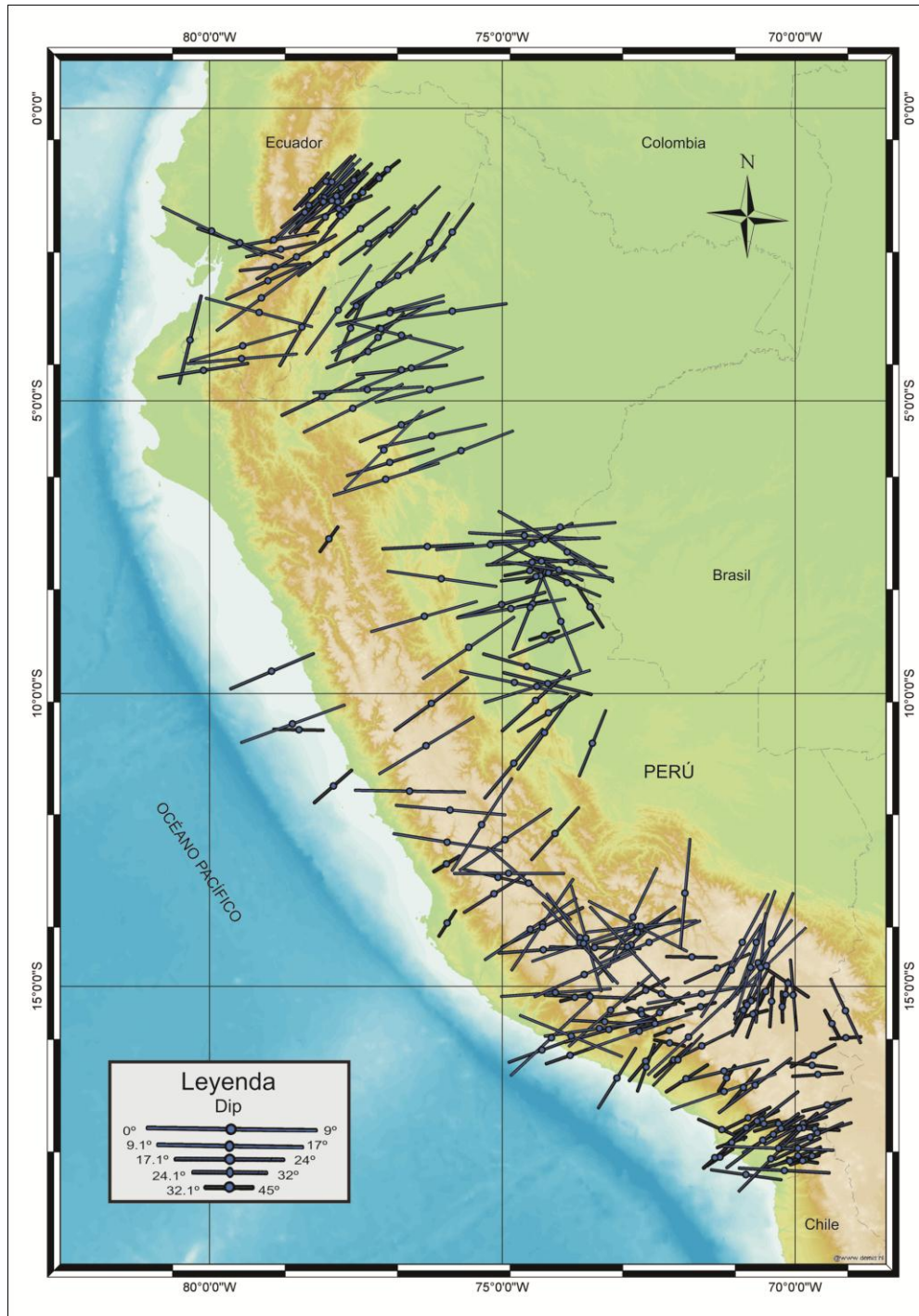


Figura 6.17; Distribución de los ejes de tensión intermedios Sh_{max} .

Se observan también esfuerzos de tensión próximos a la línea de fosa en la latitud de 11° los cuales tendrían su origen en la flexión de la placa a partir de la cual disminuye el ángulo de inclinación hasta pasar a un modo de subducción de tipo subhorizontal. Finalmente, hacia la región norte, desde los 6° de latitud, los esfuerzos de deformación tensional se orientan en dirección ENE-OSO a NE-SO los que podrían ser asociados a la contorsión de la placa de Nazca al cambiar de modo de subducción subhorizontal a normal.

6.4.3 Proyección estereográfica de los ejes P y T

La proyección estereográfica es un modo de representación gráfica formada por una red de meridianos y paralelos donde se proyecta los ejes P y T utilizando como parámetros sus respectivos valores de azimuts (strike) y buzamientos (dip).

Para realizar esta proyección, se dividió el área de estudio en zonas según la distribución, acumulación y densidad de datos observados en los mapas de esfuerzos horizontales máximos de presión y tensión. Una vez identificadas las zonas se procede a extraer los datos y proyectarlos sobre una red estereográfica, donde se identificará el área donde se presenta la mayor influencia del esfuerzo, para luego calcular el valor de la orientación promedio del esfuerzo máximo.

Este procedimiento se realiza de manera independiente, tanto para los ejes P como para los ejes T.

a) Ejes de presión (P)

En el mapa de ejes de esfuerzos horizontales P se reagrupan los datos en 9 zonas, las cuales fueron numeradas correlativamente de norte a sur. La información de cada eje fue proyectado sobre la red estereográfica, y luego se estima la orientación promedio (Figura 6.18).

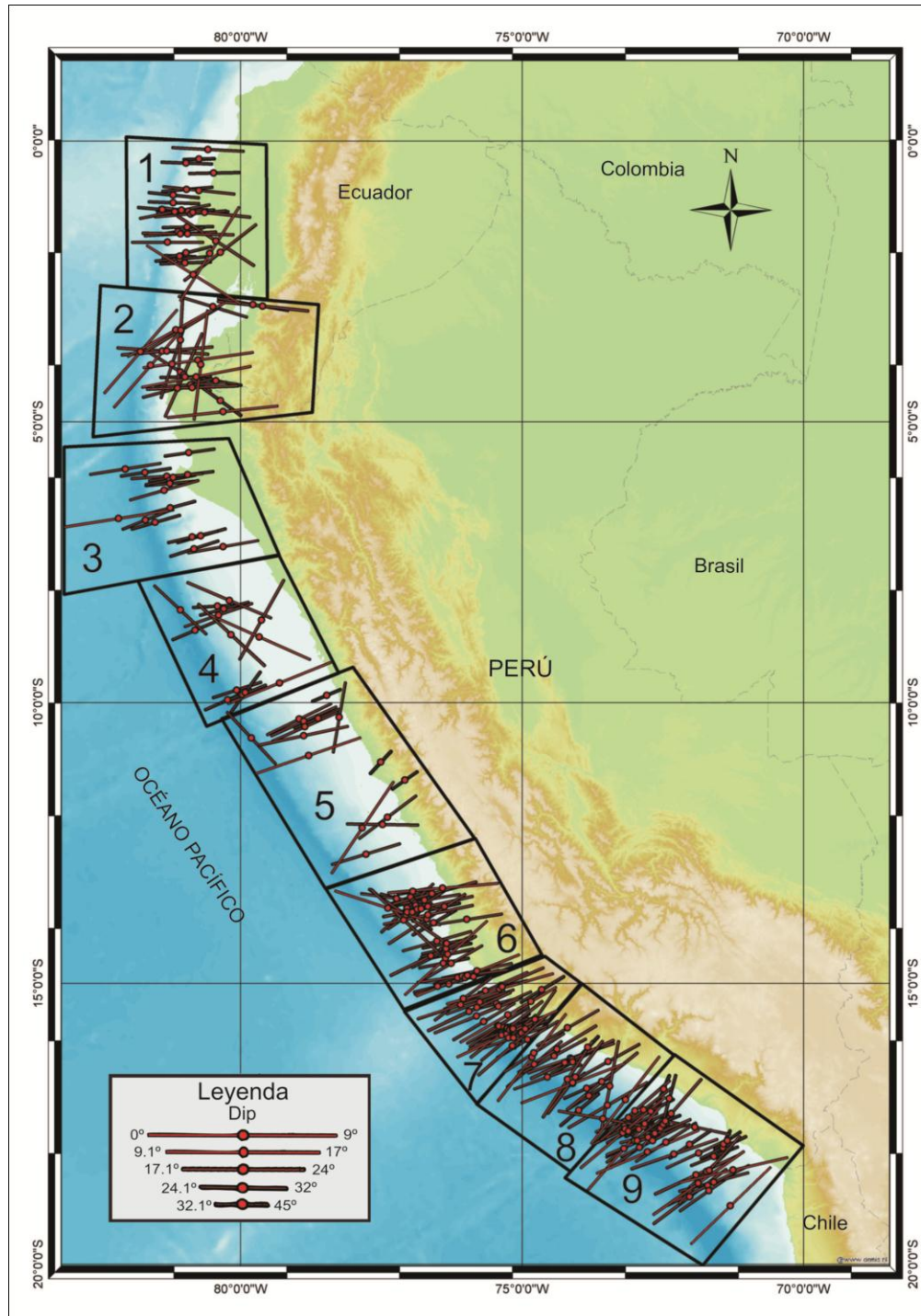
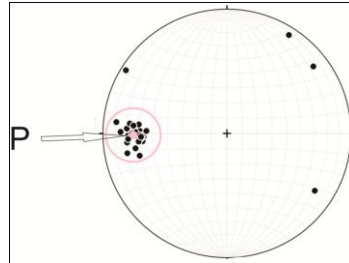
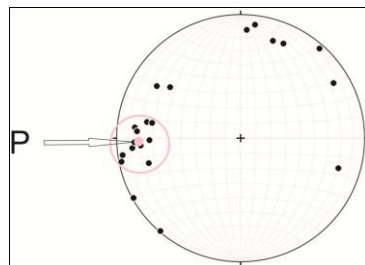


Figura 6.18; Zonificación del mapa de esfuerzos horizontales máximos de Presión para la construcción de proyecciones estereográficas.

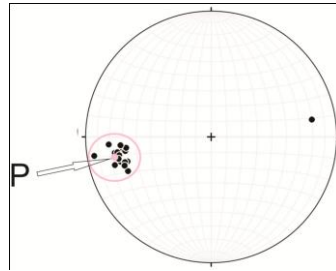
Zona 1: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y la costa de Ecuador, esta constituida por 29 vectores, siendo el valor promedio para la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” de: $P= 268.84^{\circ} \pm 5.10^{\circ}$.



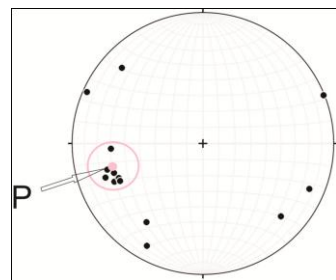
Zona 2: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y la zona sur de la costa de Ecuador, más los departamentos de Tumbes y el norte de Piura, esta conformada por 24 ejes de presión, siendo el valor de la orientación promedio del esfuerzo horizontal máximo principal “P” de: $P=268.55^{\circ} \pm 8.27^{\circ}$.



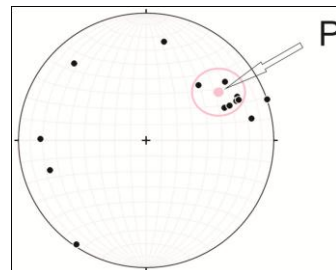
Zona 3: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y la costa del área sur del departamento de Piura y el norte del departamento de La Libertad, esta constituida por 17 vectores, donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=258.31^{\circ} \pm 5.05^{\circ}$.



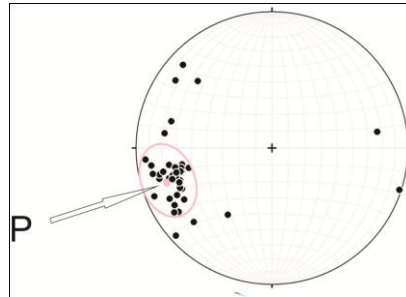
Zona 4: Esta zona se extiende desde la línea de fosa hasta la costa oeste del departamento de Ancash, esta constituida por 14 vectores, donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=252.29^\circ \pm 7.20^\circ$.



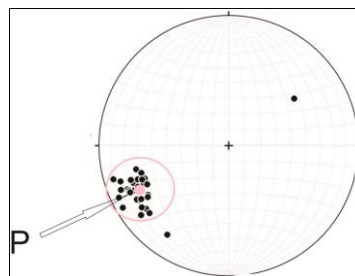
Zona 5: Esta zona se encuentra entre la fosa y la costa de los departamentos de Ancash y Lima, esta conformada por 14 ejes de presión, de los cuales el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=60.13^\circ \pm 8.85^\circ$.



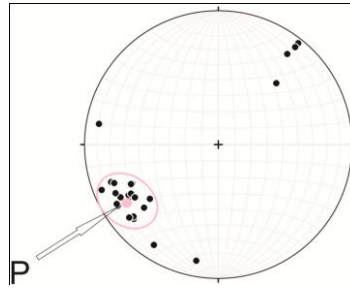
Zona 6: Esta zona se encuentra entre la fosa y las costas de los departamentos de Ica y el norte de Arequipa, esta conformada por 42 ejes de presión de los cuales el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=252.91^\circ \pm 7.58^\circ$.



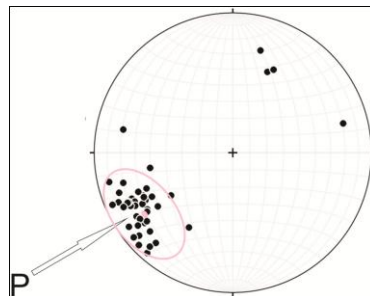
Zona 7: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y la costa de la parte central del departamento de Arequipa. Esta formada por 35 vectores de los cuales el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=245.27^\circ \pm 6.81^\circ$



Zona 8: Esta zona abarca desde la línea de fosa y la parte Sur de la costa del departamento de Arequipa, constituida por 26 ejes de presión, donde el valor promedio para la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=239.84^\circ \pm 7.01^\circ$



Zona 9: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y las costa de los departamentos de Moquegua y Tacna, esta constituida por 44 ejes de presión donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “P” es: $P=238.78^\circ \pm 9.05^\circ$



Finalmente, luego de realizar el análisis de la distribución y la densidad de los esfuerzos horizontales principales sus valores promedios calculados son mostrados, según su ubicación, en la Figura 6.19.

Según el mapa, los ejes de SH max principal presentan una orientación ENE-OSO hacia el sur y el centro y hacia el norte una orientación E-O, con ángulos de azimuth que varían entre los 60° a 268° , con el valor mas alto hacia el norte del Perú lo que indicaría que las rupturas son casi perpendiculares a la fosa oceánica y a la cordillera andina y paralelas a la dirección en la que se realiza el proceso de subducción.

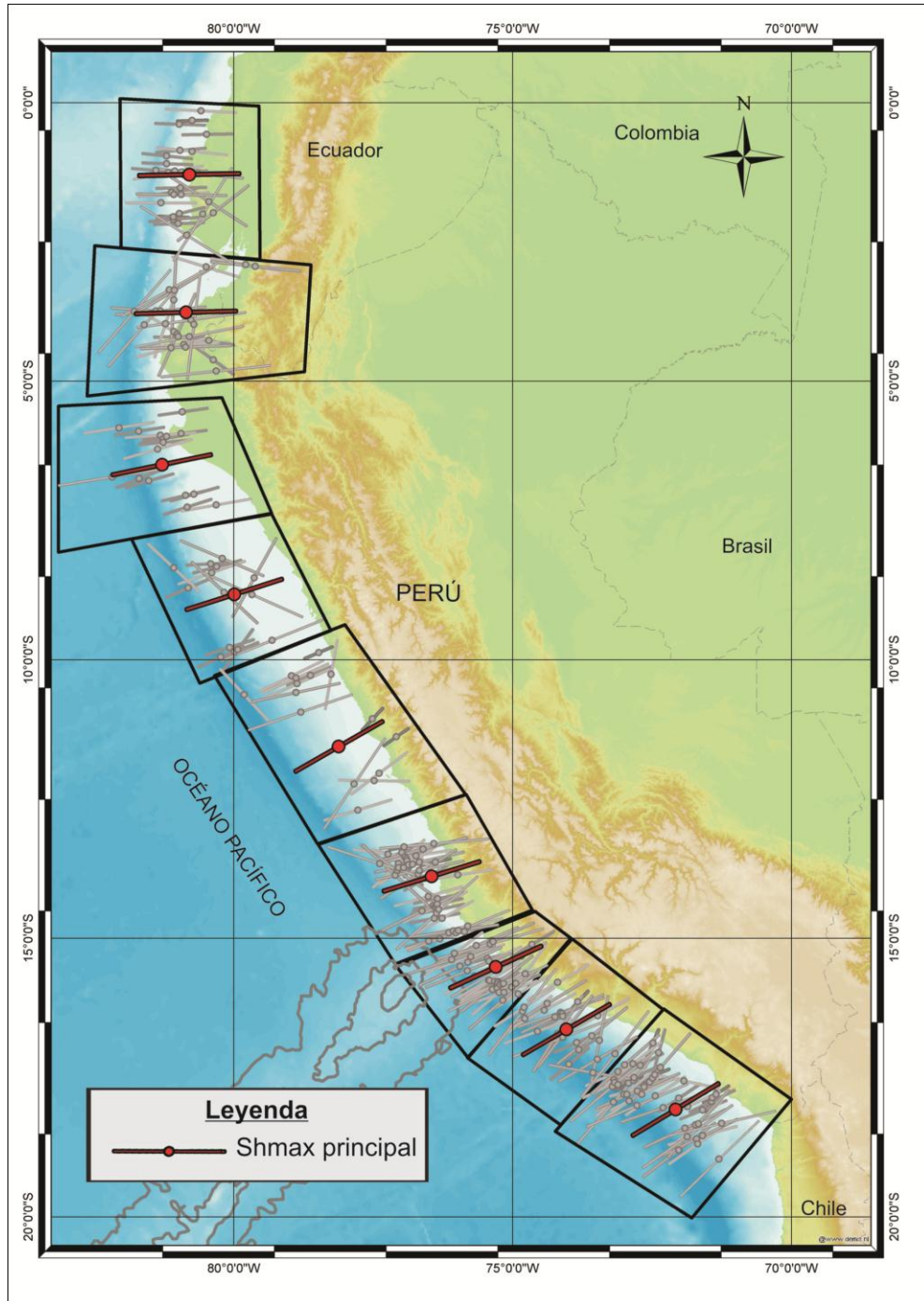


Figura 6.19; S_{Hmax} principal para las 9 zonas identificadas.

b) Ejes de tensión:

En el mapa de ejes de Tensión se identificaron 10 zonas (Figura 6.20), las cuales fueron numeradas correlativamente de norte a sur y fueron analizadas siguiendo un procedimiento similar al que se desarrollo para el mapa de ejes de Presión. A continuación, se detallan las características de cada zona:

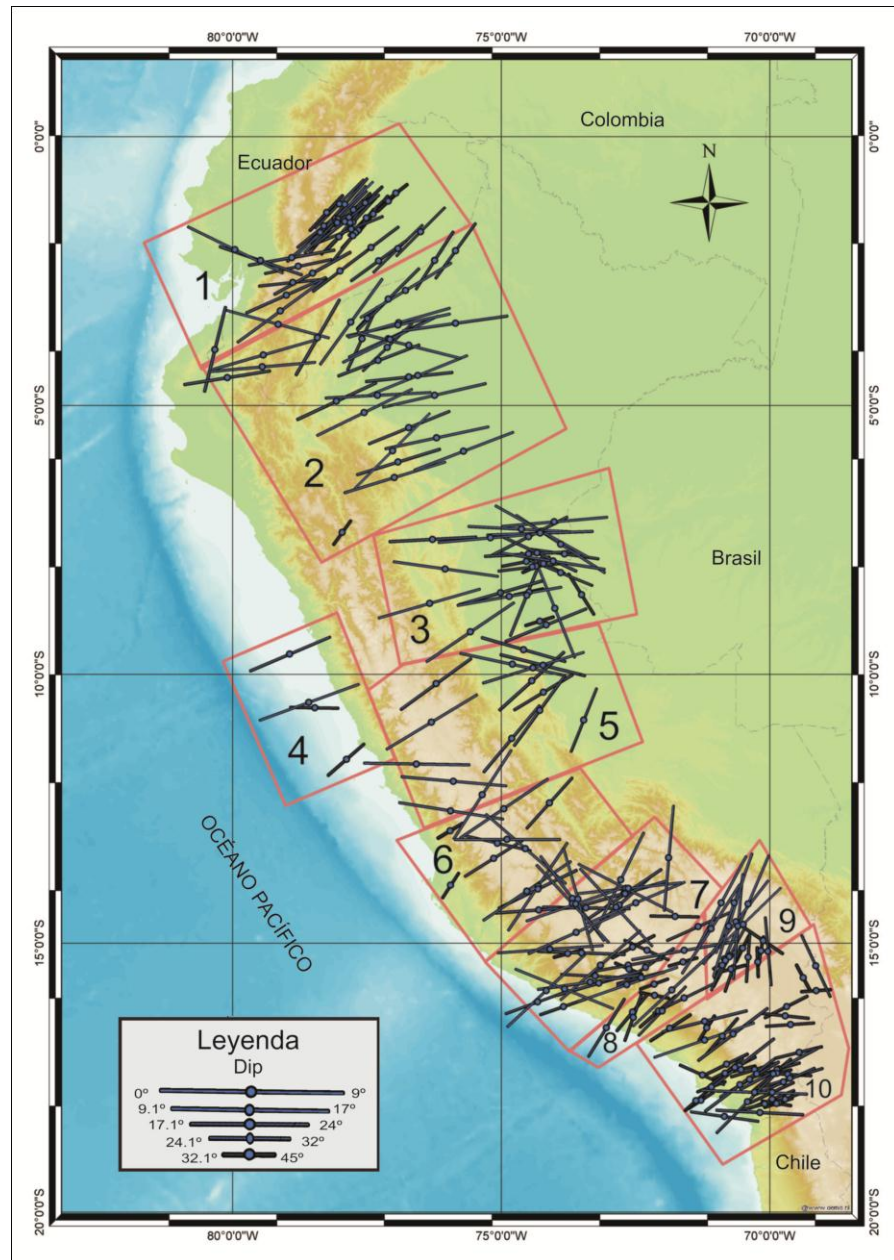
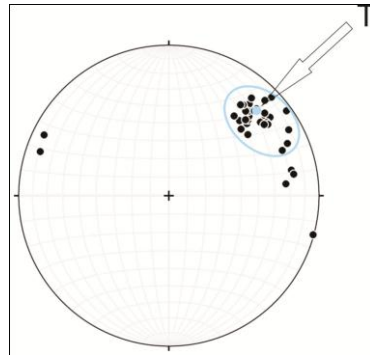
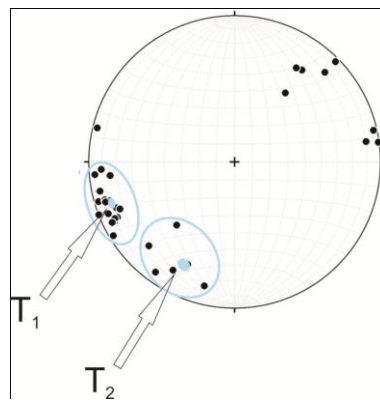


Figura 6.20; Zonificación del mapa de esfuerzos horizontales máximos de Tensión para la construcción de proyecciones estereográficas.

Zona 1: Esta zona abarca el territorio del Ecuador y esta formada por 38 ejes de tensión, donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T=48.06^\circ \pm 7.34^\circ$

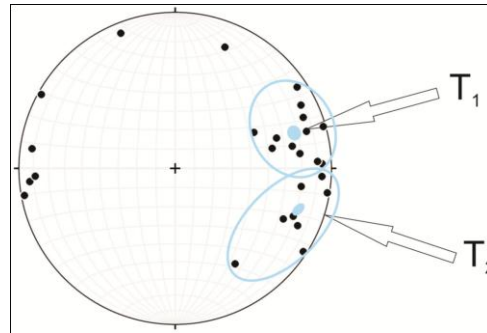


Zona 2: Esta zona se encuentra abarcando los departamentos de Loreto, Amazonas, Cajamarca, San Martín, y La Libertad, y esta formada por 33 vectores, donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T_1=212.33^\circ \pm 11.91^\circ$; $T_2=252.06^\circ \pm 7.91^\circ$.

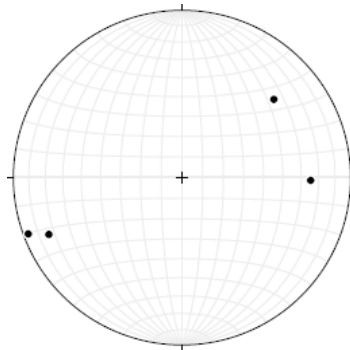


Zona 3: Esta zona se encuentra abarcando los departamentos de Huanuco, Ucayali y Pasco y esta formada por 28 ejes de tensión, donde los valores promedio de la

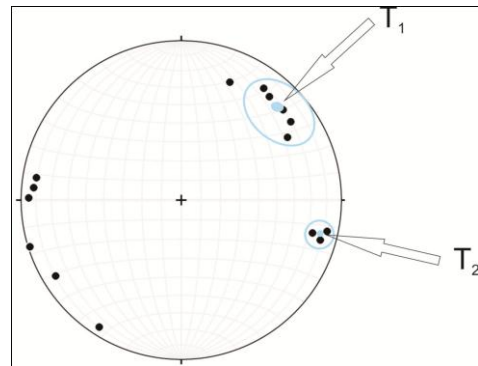
orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T_1=74.00^\circ \pm 9.77^\circ$;
 $T_2=107.86^\circ \pm 11.14^\circ$.



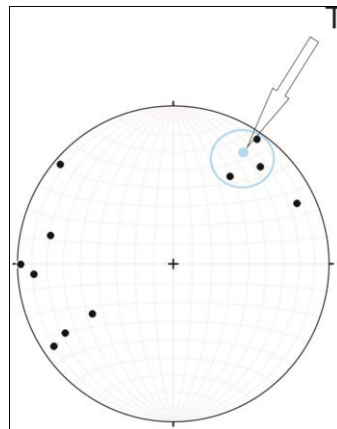
Zona 4: Esta zona se encuentra entre la línea de fosa y la costa de los departamentos de Lima y Ancash, esta formada por 4 ejes de tensión, donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” no se pudo identificar por la falta de información.



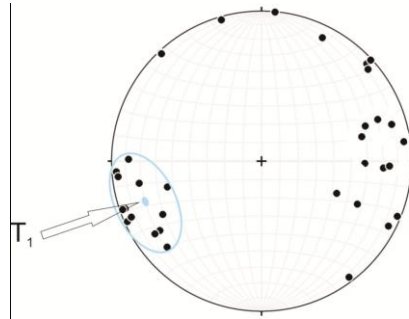
Zona 5: Esta zona abarca los departamentos de Pasco, Junin y Ucayali, esta formada por 15 ejes de tensión, y se calcularon 2 valores promedios de orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T_1=47.40^\circ \pm 9.53^\circ$; $T_2=104.00^\circ \pm 2.00^\circ$.



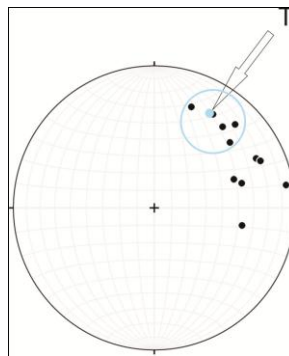
Zona 6: Esta zona se encuentra abarcando los departamentos de Ica, Huancavelica y Ayacucho, esta conformada por 12 ejes de tensión donde el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T=36.33^\circ \pm 4.93^\circ$.



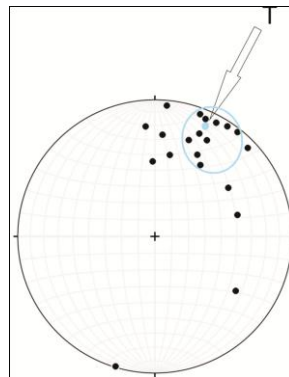
Zona 7: Esta zona abarca los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Apurimac y Cuzco, y esta conformada por 35 ejes de tensión siendo el valor de orientación promedio del esfuerzo horizontal máximo “T” de: $T=252.08^\circ \pm 11.48^\circ$.



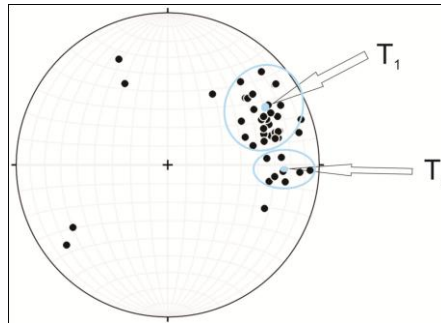
Zona 8: Esta zona se encuentran abarcando el departamento de Arequipa y esta formada por 11 vectores, siendo el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T=37.00^\circ \pm 11.35^\circ$.



Zona 9: Esta zona se encuentra sobre el norte del departamento de Puno, esta constituida por 20 ejes de tensión siendo el valor promedio de la orientación del esfuerzo horizontal máximo principal “T” es: $T=27.10^\circ \pm 6.04^\circ$.



Zona 10: Esta zona se encuentra al Sur del departamento de Puno y sobre los departamentos de Moquegua y Tacna. Esta conformada por 44 ejes de tensión distribuidos de tal forma que se observan 2 agrupaciones principales, siendo los valores de orientación promedio de los esfuerzos horizontales máximos principales “T1” y “T2” es: $T_1=63.43^\circ \pm 10.43^\circ$; $T_2=92.88^\circ \pm 5.30^\circ$.



Finalmente, luego de realizar el análisis de la distribución y la densidad de los esfuerzos horizontales principales sus valores promedios calculados son mostrados según su ubicación en la Figura 6.21 y sus características muestran que los ejes de SH max principales presentan orientaciones ENE-OSO y NNE-SSO, con ángulos de azimuth que varían entre los 252° a 27° lo que sugiere que a profundidades intermedias, la placa de Nazca esta sometida a fuerzas de diferentes naturalezas, que hacen que los esfuerzos roten en varias direcciones, y en la cual juegan un rol importante las unidades geomorfológicas presentes en superficies.

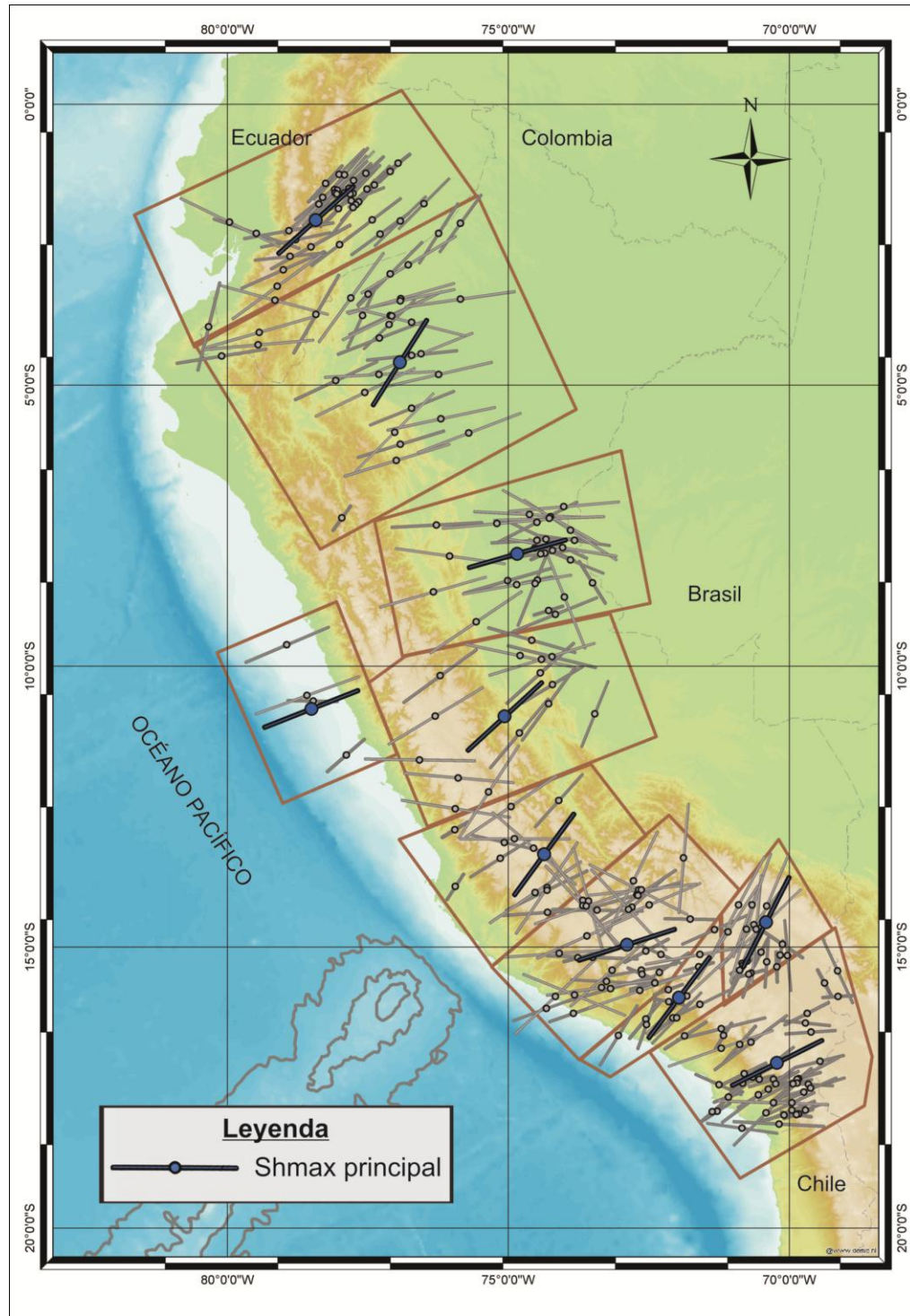


Figura 6.21; SH max principal para las 10 zonas identificadas

CAPÍTULO VII

INTERPRETACION Y DISCUSION

La interacción generada por la convergencia de la placa de Nazca y Sudamericana está determinada principalmente por el empuje que ejercen ambas placas en dirección N70° (DeMets). Estas fuerzas son el resultado del movimiento absoluto de cada placa influenciadas por el movimiento del manto terrestre, incluyendo a las fuerzas de tracción que resultan del peso de la placa y a las fuerzas de empuje de las dorsales, aun cuando la última fuerza es de magnitud menor que las fuerzas de tracción (Lithgow-Bertelloni y Richards, 1995).

Un esquema del proceso de subducción en el Perú, permite de una manera más precisa mostrar resultados acerca de la variación del ángulo de subducción, la longitud del alcance horizontal al que llega la placa de Nazca y además de definir la naturaleza geométrica de la transición en los tipos de subducción. El cambio de pendiente de la placa de Nazca se presenta a la llegada de la dorsal de Nazca hacia los 15° S. Hacia el Sur de los 15° la placa de Nazca tiene un ángulo de subducción promedio de 27° valor que es muy cercano al obtenido por Phillips (2012), Cahill e Isacks (1992), Hayes et al., (2012) quienes obtuvieron un ángulo de 30° para la zona sur. Mientras que, hacia el centro el ángulo de subducción es de 23° valor muy cercano al obtenido por Hayes et al (2012) que obtuvo un valor de 20° para esta zona y hacia el norte el ángulo de subducción cambia hasta llegar a los 24°. Según los resultados de este estudio, el cambio de modo de subducción se inicia con la llegada de las dorsales de Nazca y Carnegie exactamente a los 15° y a los 4° de

latitud, lo que ocasiona que la placa de Nazca se contorsione. El análisis del comportamiento sismotectónico se realizó proyectando la orientación de los ejes de esfuerzos promedio sobre un mapa de líneas de isoprofundidad elaborado con la información obtenida para la geometría de la placa de Nazca (Figura 7.1), lo que permite identificar las fuentes dominantes de tensión y presión y además conocer la forma en que ocurre la transferencia de esfuerzos en el proceso de subducción.

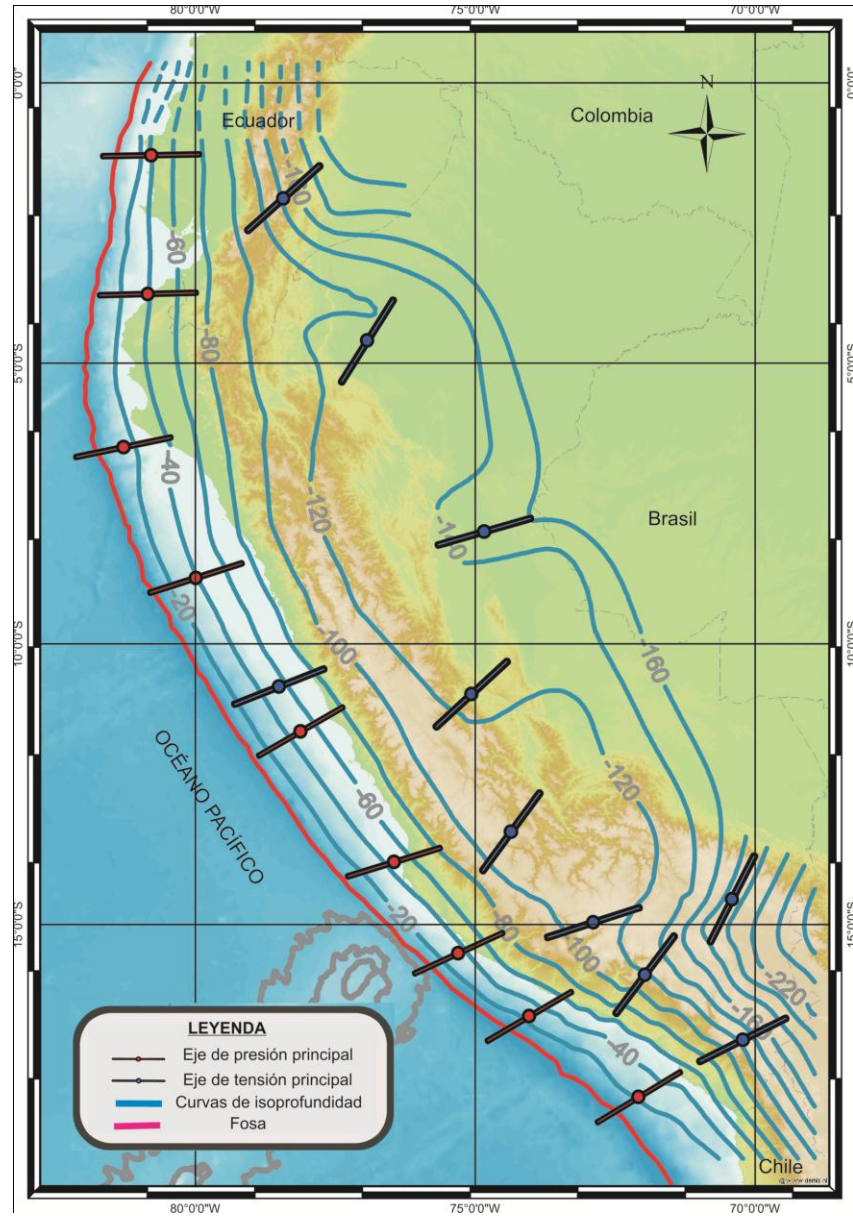


Figura 7.1: Mapa curvas de nivel de la placa de Nazca y los ejes de Presión y Tensión.

En la placa de Nazca, la distribución de ejes de tensión (T) y de presión (P) revela un patrón de deformación coherente. La orientación de los ejes P es prácticamente perpendicular a la orientación de la fosa y a la Cordillera Andina, lo que podría sugerir que ambas unidades controlan la distribución de los esfuerzos en Perú.

La proyección de los ejes T y P y las curvas de isoprofundidad que se observan en la Figura 8.1, permite observar la presencia de un proceso inicial de plegamiento asociado al primer choque de placas y su movimiento relativo a niveles de profundidad menores a 60 km con la presencia de ejes P con una orientación ENE-OSO hacia el sur y el centro, y hacia el norte una orientación E-O perpendicular a la cordillera, coincidiendo con los resultados de Tavera y Buforn (2001).

A lo largo de toda esta zona, de Norte a Sur, se encuentra la mayor ocurrencia de eventos sísmicos lo que coincide con la existencia de una fuerte resistencia al movimiento de las placas, generando un alto índice de sismicidad.

Los ejes T presentes hacia el este de la placa de Nazca presentan orientaciones ENE-OSO y NNE-SSO lo que sugiere que en su parte más profunda está sometida a esfuerzos tensionales que tienden a hundirla.

Además, las fuerzas de tensión ubicadas a una profundidad intermedia están asociadas al movimiento en dirección O-E de la placa oceánica dentro del proceso de la subducción, tal como lo sugieren Isacks y Molnar (1971); Stauder (1975); Suarez et al (1990), Rodriguez y Tavera (1991) y Tavera (1998).

En la región Sur, las orientaciones de los ejes T podrían estar asociadas a las fuerzas que producen la contorsión de la placa oceánica al pasar de una subducción horizontal (región Norte-Centro) a una subducción normal (región Sur).

En la región Central, en general se observan ejes de tensión que muestran que el régimen extensivo es heterogéneo dentro del proceso de subducción. A la altura de 8°, hacia el este de la Cordillera Andina, se observa la presencia de un número importante de ejes T orientados en dirección ENE-OSO a ONO-ESE, los mismos que pueden ser asociados a una resubducción de la placa a la profundidad de 135 km hasta los 170 km.

En la región Norte se observa una menor presencia de ejes T con direcciones NE-SO y NNE-SSO, lo que estaría asociado al cambio de subducción que se realiza en un medio muy heterogéneo.

La presencia de esfuerzos de tensión en la línea de costa, a la latitud de 11° podría estar asociada a la deformación interna de la placa de Nazca a profundidad intermedia al producirse la contorsión de la base de la placa de Nazca cuando se encuentra en un modo de subducción subhorizontal.

Los esfuerzos T se presentan hacia zonas profundas lo que mostraría que en esta zona existe una mayor capacidad para transmitir esfuerzos (Schneider y Sacks, 1987; Stauder, 1973, 1975; Apperson y Frohlich, 1987, Cahill e Isacks 1992)

Finalmente, en la Figura 7.2 se presenta el modelo final propuesto en este estudio para la geometría de la Placa de Nazca 3D y la proyección de los ejes T y P.

Según la Figura 7.2 la contorsión de la placa genera un proceso complejo de deformación capaz de producir diferentes regímenes de esfuerzos, lo que explicaría el cambio en la orientación de la deformación por extensión horizontal en las latitudes de 15° y 4° donde se muestra un patrón de tensión dominante, tal como lo indica Schneider y Sacks (1987).

Además, la dirección que toman los esfuerzos horizontales máximos son prácticamente paralelos a la dirección del movimiento de la placa de Nazca, lo cual sugiere que existe relación entre la dirección del movimiento y la dirección de la deformación.

Estos resultados ponen en manifiesto que las características de los procesos de ruptura para cada evento sísmico son muy complejos en el Perú.

La geometría de la placa de Nazca propuesta en este estudio es coherente con los resultados propuestos por Phillips et al. (2013) a partir de estudios de “Receiver Function”, lo cual valida los resultados presentados.

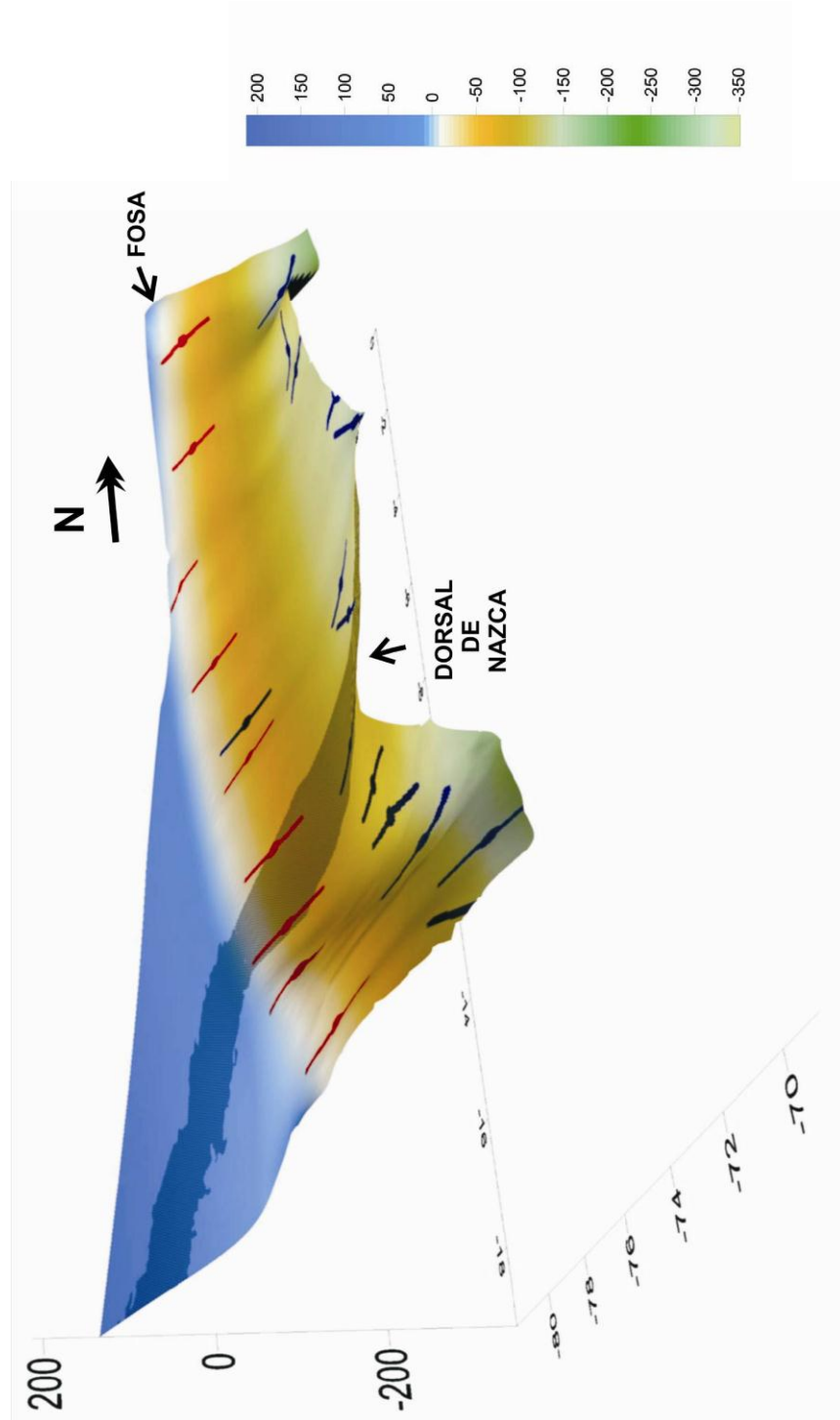


Figura 7.2: Representación 3D de la placa de Nazca y los esfuerzos máximos asociados al proceso de subducción

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se ha estructurado una base de datos sísmicos procedentes de redes telesísmicas, regionales y locales conformada por 6849 eventos.
2. La distribución espacial de la sismicidad muestra las principales fuentes sismogénicas generadoras de sismos en el Perú que corresponde al proceso de subducción y a los sistemas de fallas en superficie.
3. La elaboración de perfiles y ajustes definen la tendencia de los sismos en profundidad y la posible geometría de la placa de Nazca que presenta dos tipos de subducción normal y subhorizontal.
4. El esquema 3D permite ver que en la zona sur se presenta un modo de subducción de tipo normal, en la zona centro de tipo subhorizontal y hacia el norte de tipo subhorizontal y normal, con un área de deformación puntual bajo la ciudad de Pucallpa donde la placa de Nazca resubduce.
5. Las dorsales de Nazca y Carnegie se presentan como límites naturales en la distribución de volcanes en superficie, los que a la vez coinciden con el modo de subducción normal en la Placa de Nazca.
6. La distribución de esfuerzos "P" y "T" muestran las zonas de deformación que se presentan a lo largo de la placa de Nazca.

7. Los ejes “P” muestran que la placa de Nazca, en la zona superficial, subduce progresivamente en un régimen compresivo con dirección NE-SO bajo la placa continental y de manera perpendicular a la fosa peruano-chilena y a la cordillera andina, lo que produciría el efecto de curvatura de la litosfera al inicio la subducción.

8. Los ejes “T” muestran que la placa de Nazca en la zona intermedia subduce en diferentes orientaciones pero en general siguen con la tendencia del proceso de convergencia de placas en dirección NE-SO y estaría asociada a la interacción de la placa de Nazca con el manto cuando esta bajo un régimen extensivo por efecto del aumento de temperatura y gravedad que tiende a deformar a la placa con dirección a las zonas más profundas.

9. La interpretación sismotectónica de la placa de Nazca indica que la misma pasa de un ambiente predominantemente compresivo en la zona de subducción en un escenario de acoplamiento sísmico donde la deformación es homogénea y se producen sismos frecuentemente, hacia el este en un ambiente combinado (extensivo y compresivo) donde la deformación es heterogénea y la ocurrencia de sismos se da en menor frecuencia y magnitud.

10. Se ha propuesto una geometría en 3D para la placa de Nazca, la misma que permitió comprender mejor todos los procesos de deformación superficial e intermedia que dan origen a los terremotos en el Perú.

BIBLIOGRAFÍA

- **Barazangi, M. y B. Isacks (1976).** *Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America*, *Geology*, 686-692 pp.
- **Barazangi, M. y B. Isacks, (1979).** *Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidences from spatial distribution of earthquakes*, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 537-555 pp.
- **Bender, B. y D. Perkins (1993).** *Treatment of parameter uncertainty and variability for a single seismic hazard map*, *Earthquake Spectra* 9, 165-195 pp.
- **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, 169 pp.
- **Bernal, I. y H. Tavera (2002).** *Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en Perú Monografía*, IGP, Lima-Perú 63 pp.
- **Bevis, M. y B. Isacks (1984).** *Hypocentral trend surface analysis: probing the geometry of Benioff zones*, *journal of geophysical research* vol 89. NO B7, pages 6153-6170 pp.
- **Bird, P. (1978).** *Finite element modelling of lithosphere deformation: the Zagros collision orogeny*, *Tectonophys.*, 307-336 pp.
- **Bonnardot, M., R. Hassani y E. Tric, (2008).** *Numerical modeling of lithosphere - asthenosphere interaction in a subduction zone*, *Earth Pl. Sci.Let.* 698-708 pp.
- **Cahill, T. y B. Isacks (1992).** *Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate* *J. Geophys Res.*, 97, 17503 - 17529 pp.
- **Castillo, P. y P. Lonsdale (2004).** *Geochemistry of Alvarado and Sarmiento ridges suggests widespread Galapagos plume-upper Mantle interaction in the Mioceno Eastern pacific* *American Geophysical Union, Fall Meeting 2004*, V33G-3.
- **Chandra, U. (1970).** *The Peru-Bolivia border earthquake of August 15, 1963*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 639-646 pp.

- **Chowdhury, D. y S. Whiteman (1987).** *Structure of the Benioff zone under Southern Peru to Central Chile.* *Tectonophysics*, 134: 215-226pp.
- **Conrad, C. y C. Lithgow-Bertelloni (2004).** *The temporal evolution of plate driving forces: Importance of “slab suction” versus “slab pull” during the Cenozoic: Journal of Geophysical Research*, v. 109, p. B10407, doi: 10.1029/2004JB002991.
- **Cornell, C. (1968).** *Engineering seismic risk analysis*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583–1606pp.
- **Deverchere, J., C. Dorbath y L. Dorbath (1989).** *Extension related to a high topography: results from a microearthquake survey in the Andes of Peru and tectonic implications* *Geophys. J. Int.*, 98, 281-292pp.
- **Dewey, J. y W. Spence (1979).** *Seismic gaps and source zones of recent large earthquakes in coastal Peru*, *PAGEOPH*, 117, 1148-1171pp.
- **Engdahl, E.R., y A. Villaseñor (2002).** *Global Seismicity: 1900–1999*, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A, Chapter 41*, pp. 665–690.
- **Frankel, A. (1995).** *“Mapping Seismic Hazard in the Central Eastern United States”*, *Seismological Research Letters*, Vol. 66, No. 4, 8-21 pp.
- **Grange, F. (1984).** *Etude sismotectonique detaille de la subduction lithospherique au Sud Perou*, Ph.D. Thesis, IRIGM, Grenoble, France.
- **Green, H. y P. Burnley (1989).** *A new self-organizing mechanisms for deep-focus earthquakes.* *Nature* 341:733-737pp.
- **Gorbatov, A., V. Kostoglodov, G. Suarez y E. Gordeev (1997).** *Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone.* *J. Geophys. Res.*, in press. v 102, 883-898pp.
- **Guardia, P. y H. Tavera (2010).** *Determinación de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú*, Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 147pp.
- **Gutscher, M.-A., J. Malavieille, S. Lallemand y J.-Y Collot (1999).** *Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision*, *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 255-270pp.

- **Gutscher, M.-A (2000).** *Can slab melting be caused by flat subduction?* *Geology*, 28, 535-538pp.
- **Gutscher, M.-A., D. Klaeschen, E. Flueh y J. Malavieille (2001).** *Non-Coulomb wedges, wrong-way thrusting, and natural hazards in Cascadia.* *Geology*, v. 29, 379-382pp.
-
- **Hampel, A., N. Kukowski, J. Bialas, C. Huebscher y R. Heinbockel (2004).** *Ridge subduction at an erosive margin: The collision zone of the Nazca Ridge in southern Peru,* *J. Geophys. Res.*, 109, B02101, doi: 10.1029/2003JB002593.
- **Hampel, A. (2002).** *The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a re-evaluation.* *Earth and Planetary Science Letters* 203(2): 665-679pp.
- **Hasegawa, A. y I.S. Sacks (1981).** *Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations,* *J. Geophys. Res.*, 86, 4971-4980pp.
- **Hayes, G., D. Waid y R. Johnson (2012).** *Slab 1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries,* *J. Geophys. Res.*, 117, B01302, doi:10.1029/2011JB008524.
- **Heinbockel, R., Dehghani, G.A. y Ch. Huebscher (2003).** *Gravity and magnetic investigations along the Peruvian continental margin,* *Geophysical Research Abstracts*, 5-05857.
- **Heuret, A. y S. Lallemand (2005).** *Plate motions, slab dynamics and back-arc deformation,* *Phys. Earth Planet. Inter.*, 149, 31-51pp.
- **Heras, H. (2002).** *Análisis de la distribución del valor de "b" en la zona de subducción de Perú.* Tesis de grado U.N.S.A. 41-106 pp.
- **Heras, H y H. Tavera (2002).** *Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de períodos de retorno local basado en la distribución de valores de "b" Centro Nacional de Datos Geofísicos, boletín de la S.G.P.* 7-16 pp.
-
- **Hess, H. (1962).** *"History of the Ocean Basins" In Petrologic Studies: A Volumen in Honor of A.F. Buddington.* A.E. J. Engle, H.L. James, and B.F. Leonard, eds. *Geological Society of America.* 599-620pp.

- **Isacks, B. y P. Molnar (1971).** *Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes.* *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 9, 103-174pp.
- **James, D. (1971).** *Andean crustal and upper mantle structure,* *Jour-Geoph. Res.*, V 76, N° 14, 3246-3271pp.
- **James, D. (1978).** *Subduction of the Nazca plate beneath central Perú* *Geology* 6, 174-178pp.
- **Jarrard, R. (1986).** *Relations among subduction parameters.* *Rev. Geophys*, 24(2):217-284pp.
- **Jordan, T., V. Ramos, R. Allmendinger y B. Isacks (1983).** *Andean tectonics related to geometry of the subducted Nazca plate,* *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 341-361pp.
- **Kanamori, H. y K. McNally (1982).** *Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast,* *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, 1241-1253pp.
- **Khazaradze, G. y J. Klotz (2003).** *Short- and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes.* *J. Geophys. Res.* 108, 2289, doi:10.1029/2002JB001879.
- **Kikuchi, M. y H. Kanamori (1994).** *The mechanism of the deep Bolivia earthquake of June 9, 1994.* *Geophys. Res. Lett.* 21, 2341-2344pp.
- **Kirby, S., W. Durham y L. Stern (1991).** *Mantle phase changes and deep earthquake faulting in subducting lithosphere.* *Science* 252, 216-225pp.
- **Kulm, D. y K. Sheidegger (1983).** *Nazca plate and andean convergence studies.* *Tectonophysics*, 83-93pp.
- **Kranbenoft, A., J. Bialas, H. Kopp, N. Kukowski y C. Hubsher (2004).** *Crustal structure of the peruvian continental margin from wider-angle seismic studies.* *Geophysical Journal International*, doi:10-1111/1365-2406 pp.
- **Lagabrielle, Y., J. Goslin, H. Martin, J.-L. Thirot y J.-M. Auzende (1997).** *Multiple active spreading centers in the hot North Fiji Basin (Southwest Pacific): a possible model for Archean seafloor dynamics?* *Earth Planet. Sci. Lett.*, 149, 1-13 pp.

- **Lay, T. y T. Wallace (1995).** *Modern Global Seismology*, Academic Press, Inc., London 521 pp.
- **Lindo, R. (1993).** *Seismotectonique des andes du Perou central: Apport des donnees sismologiques de haute precision. Ph. D. Thesis, Universite Louis – Pasteur, Strasbourg, France.*
- **Lithgow-Bertelloni, C. y M. Richards (1995).** *Cenozoic plate driving forces*, *Geophys Res. Lett.*, 22, 1317-1320pp.
- **Lomnitz, C. (1974).** *Global Tectonics and Earthquake Risk*. Elsevier Publish. Co.
- **Machare, J., C. Fenton, M. Machette, A. Lavenue, C. Costa y R. Dart (2003).** *Database and map of quaternary faults and folds in Peru and its offshore region*, U.S. Geol. Surv. Open-File Report 03-451 pp.
- **Mattauer, M. (1989).** *Hermann Editores de Ciencias y Arte, Paris, Francia.*
- **Norabuena, E., H. Timothy, S. Stein y C. Harrison (1999).** *Decelerating Nazca_south America and Nazca-Pacific plate motions*. *Geophys. Res. Lett.* 26, 3405-3408 pp.
- **Okal, E. y C. Bina (2001).** *The deep earthquake of 1997 in Western Brazil* *Bull. Seis.Soc. Am.*,91,161-164 pp.
- **Phillips, K., R. Clayton, P. Davis, H. Tavera, R. Guy, S. Skinner, I. Stubailo, L. Audin y V. Aguilar (2012).** *Structure of the subduction system in southern Peru from seismic array data*, *Journal of Geophysical Research*, Vol 117, B11306.
- **Phillips, K. (2013).** *Structure of the subduction system in southern Peru from seismic array data. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology.*
- **Quispe, R., H. Tavera, I. Bernal (2003).** *Geometría de la placa de Nazca en el borde occidental de Sudamérica a partir de tendencias medias de sismicidad*, *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, V. 95, 93-110 pp.
- **Reid, H. (1911).** *The elastic-rebound theory of earthquakes*. *Univ. Calif. Publ. Bull. Dept. Geol. Sci.* 6, 413-444 pp.

- **Ricard, Y., C. Doglioni y R. Sabadini (1991).** *Differential rotation between lithosphere and mantle: A consequence of lateral mantle viscosity variations*, *J. Geophys. Res.*, 96, 8407– 8415 pp.
- **Robinson, D. (2006).** *Practical probabilistic seismic risk analysis: a demonstration of capability*. *Seismological Research Letters* 77(4), 452-458 pp.
- **Rodríguez, L., y H. Tavera (1991).** *Determinación con alta resolución de la geometría de Wadati- Benioff en el Perú central*. *Revista Brasileira de Geofísica*: 1991, Vol. 9 (2). 141-159 pp.
- **Ruff, L. y H. Kanamori (1980)** *Seismicity and the subduction process*. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1980, vol.23, p.242–252 pp.
- **Schneider, J. y S. Sacks (1987).** *Stress in the contorted Nazca plate beneath Southern Peru from local earthquakes*. *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902 pp.
- **Sébrier, M., A. Lavenue, M. Fornari y J.-P. Soulas (1988).** *Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present*. *Géodynamique*, 3(1-2): 85-106 pp.
- **Stauder, W. (1975).** *Subduction of the Nazca plate under Peru as evidenced by focal mechanism and by seismicity*. *Journal of Geophysical Research*, 80: 1053-1064 pp.
- **Suarez, R., J. Lighton, B. Joss, S. Roberts y J. Harrison (1996).** *Energy metabolism, enzymatic flux capacities and metabolic flux rates in flying honeybees*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93, 12616-12620 pp.
- **Tavera, H. y E. Buforn (1998).** *Sismicidad y sismotectónica de Perú. Sismicidad y sismotectónica de centro y Sudamérica*, v 10, 187-219 pp.
- **Tavera, H. (1998).** *Mecanismo focal de terremotos en el Perú y sismotectónica*. Ph.D. Tesis, Universidad Complutense de Madrid, España.
- **Tavera, H. y E. Buforn (2001).** *Source mechanism of earthquakes in Peru*. *Journal of Seismology* 5:519-539 pp.
- **Tavera, H., R. Vilca y G. Marin (2006).** *Inferences on the geometry of the Nazca plate in northwestern Peru based on data collected by a local seismograph network*. *Earth Sci. Res. J.* Vol 10 N°.1, 15-24pp.

- **Turcotte, D. y G. Schubert (1982).** *Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems.* John Wiley & Sons Inc, New York. 450 pp.
- **Udías, A. y J. Mezcua (1997).** *Fundamentos de Geofísica.* Format: Paperback, 476pp.
- **Uyeda, S. (1980).** *La nueva concepción de la Tierra.* Ed. Blume, Barcelona.
- **Uyeda, S. y H. Kanamori (1979).** *Back-Arc Opening and the Mode of Subduction,* *J. Geophys. Res.,* 84, 1049-1061pp.
- **Von Huene, R., I.A. Pecher y M.-A. Gutscher (1996).** *Development of the accretionary prism along Peru and material flux after subduction of Nazca Ridge.* *Tectonics,* v 15, 19-33pp.
- **Villegas, J. (2009).** *Modelos de velocidad unidimensionales para las regiones Norte, Centro y Sur de Perú, a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S de sismos locales,* Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 97pp.
-
- **Wegener, A. (1912).** *Dies Entstehung der Kontinente."* *Petermann's geogr. Mitt.* 58 pp. 185-195, 253-256, 305-309pp.
-
- **Wilson, T. (1965).** *A new class of faults and their bearing on continental drift,* *Nature,* 207- 343pp.
- **Wortel, M.J.R. (1984).** *Spatial and temporal variations in the Andean subduction zone-* *Jour. Geol. Soc. London* v. 141, 783-791 pp.
- **Woo, G. (1996).** *Kernel estimation methods for seismic hazard area source modelling,* *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, no. 2, 353-362 pp.
- **Yamako, M. y S. Uyeda (1990).** *Heat-Flow Studies in the Peru Trench Subduction Zone,* *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results,* Vol. 112: 653-661 pp.

ANEXO 1

PERFÍLES SÍSMICOS

