



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**FRONTERA LITOSFERA- ASTENOSFERA EN LA REGIÓN DEL GOLFO  
DE CALIFORNIA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A**

**FERNÁNDEZ MARTÍNEZ ALEJANDRA**

**DIRECTORA DE TESIS**

**Dra. XYOLI PÉREZ CAMPOS**



**México, D. F., 2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por el proyecto PAPIIT clave IN105910, DGAPA, UNAM, con título: "Estructura del manto superior y su relación con la subducción en México", por su financiamiento para mi asistencia a la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana y al Instituto de Geofísica por la beca otorgada durante el período abril 2010- enero 2011.

También agradezco las amables sugerencias y correcciones de mis sinodales: Dr. Víctor Manuel Cruz Atienza, Dr. Raúl Valenzuela Wong, M. C. David Escobedo Zenil y Dr. Martín Cárdenas Soto.

Por último mi respeto y total agradecimiento a mi directora de tesis Dra. Xyoli Pérez Campos.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>CAPÍTULO 2 EL GOLFO DE CALIFORNIA</b> .....	5
2.1 Subducción de la placa de Farallón .....	6
2.2 Apertura del golfo de California .....	10
2.3 El golfo de California, ejemplo de una cuenca oceánica joven .....	12
2.4 Red sismológica NARS-Baja.....	13
2.4.1 Estudios previos realizados en la red de estaciones NARS-Baja.....	15
<b>CAPÍTULO 3 FUNCIONES DE RECEPTOR S (<i>FRS</i>)</b> .....	17
3.1 Metodología de las funciones de receptor P ( <i>FRP</i> ).....	17
3.1.1 Deconvolución en el dominio de la frecuencia .....	18
3.2 Metodología de las funciones de receptor S.....	20
3.2.1 Rotación de ejes .....	22
3.2.2 Deconvolución en el dominio del tiempo .....	23
3.3 Procesamiento de los datos.....	26
3.3.1 Pre-procesamiento .....	26
3.3.2 Rotación de ejes del sistema ZRT al sistema LQT.....	27
3.3.3 Descripción del método de deconvolución iterativa en el dominio del tiempo utilizado .....	30
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS</b> .....	17
4.1 <i>FRS</i> observadas en tiempo .....	34
4.1.1 Estación NE70 .....	34
4.1.2 Estación NE71 .....	35
4.1.3 Estaciones NE72 y NE80 .....	35
4.1.4 Estaciones NE73 y NE81 .....	37
4.1.5 Estación NE74 .....	37
4.1.6 Estación NE75 .....	38
4.1.7 Estaciones NE76 y NE82.....	38
4.1.8 Estación NE77 .....	40
4.1.9 Estación NE79 .....	40

4.1.10 Estaciones NE83 y NE84 .....	40
4.1.11 NE85.....	42
4.1.12 Resumen de resultados de <i>FRS</i> en tiempo.....	42
4.2 Valores de profundidad de LAB por debajo de cada una de las estaciones .....	44
<b>CAPÍTULO 5</b> Discusión y conclusiones .....	48
5.1 Frontera litosfera-astenosfera mapeada en las <i>FRS</i> en tiempo .....	48
5.2 Profundidad de la litosfera bajo la red estaciones NARS-Baja.....	49
5.2.1 Península de Baja California .....	49
5.2.2 En la placa de Norteamérica (estados de Sonora y Sinaloa, México).....	53
5.2.3 Estudios preexistentes de espesor de la litosfera alrededor del golfo de California	54
5.3 Conclusiones .....	56
REFERENCIAS .....	58
APÉNDICE A .....	65
APÉNDICE B .....	66

# RESUMEN

En este trabajo utilizamos registros telesísmicos de banda ancha de la red sismológica NARS-Baja para obtener funciones de receptor S (*FRS*), mediante una deconvolución en tiempo, con el objetivo de mapear la frontera litosfera-astenosfera (LAB, por sus siglas en inglés) alrededor del golfo de California. Mostramos los resultados obtenidos del análisis de *FRS* para estaciones individuales, en donde hemos observado la respuesta de LAB. De manera adicional se presentan los valores de espesor calculados para la litosfera bajo cada una de las estaciones empleadas, mediante un método de apilamiento de funciones de receptor basado en la técnica que presentaron Zhu & Kanamori en el 2000 para funciones de receptor P (*FRP*). Hemos observado en general que el espesor de la litosfera que se encuentra alrededor del golfo de California disminuye de norte a sur y de oeste a este en la península de Baja California, consistente con los diferentes procesos de extensión y separación que dieron lugar a la apertura del golfo de California; mientras que en Sonora y Sinaloa el espesor de la litosfera constituye un bloque con una variación mínima de norte a sur, consistente con una litosfera continental.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta, hasta ahora el único lugar en el universo donde podemos vivir, es un gran y complejo laboratorio natural que nos ofrece la oportunidad de poner a prueba nuestra capacidad de investigación.

El registro de los sismos nos proporciona información valiosa acerca del interior de la Tierra que se encuentra justo debajo de nuestros pies. En términos de profundidades, ninguna ciencia puede igualar la información que brinda la Sismología. Por ejemplo, los pozos de exploración petrolera, gravimetría y magnetometría sólo nos pueden dar información de unos cuantos kilómetros.

Los modernos y mejores sensores permiten crear nuevos modelos de la corteza y del manto superior que complementan a los modelos ya existentes. Esto nos lleva a contar con modelos más apegados a la realidad que, en la mayoría de las ocasiones, suele ser una muy compleja.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo mapear la frontera litosfera-astenosfera<sup>1</sup> de la región del golfo de California. Para llevar a cabo tal objetivo calcularemos funciones de receptor *S* (*FRS*) a partir de registros obtenidos en las estaciones que componen la red sísmológica NARS-Baja<sup>2</sup> (16 estaciones). De manera adicional obtuvimos espesores (por debajo de las estaciones) aproximados de la litosfera alrededor del golfo de California mediante el apilamiento de *FRS*.

La litosfera es la capa externa de la Tierra, comprende la corteza y parte del manto superior, la base de la litosfera está definida por una isoterma. La litosfera está compuesta por materiales con composiciones químicas notablemente diferentes. En esta capa la transferencia de calor se da mediante conducción. Por debajo de ella se encuentra la astenosfera, cuya naturaleza exacta aún es motivo de debate; sin embargo, se sabe que debido a las condiciones de presión y temperatura de esta capa, las rocas dentro de ella se deforman con facilidad y que en la parte superior de la astenosfera existe una pequeña cantidad de fusión parcial (Fischer et al., 2010). Ha sido difícil determinar si la respuesta sísmica de la frontera litosfera-astenosfera se debe a la fusión parcial de las rocas o al efecto producido por el aumento de la temperatura y presión con la profundidad (Romanowicz, 2009).

Se ha detectado mediante estudios de ondas superficiales que bajo las cuencas oceánicas la litosfera tiene un espesor de entre 80 km y 200 km y que debajo de ella existe una zona de bajas velocidades sísmicas que, probablemente, corresponde con la astenosfera. También se ha advertido que la litosfera es más gruesa en las partes estables de los continentes y cratones

---

<sup>1</sup> La frontera litosfera-astenosfera divide la litosfera (esfera de roca), que tiende a actuar como una unidad que muestra un comportamiento rígido, de la astenosfera (esfera débil) que se comporta como una capa blanda relativamente frágil.

<sup>2</sup> Red de sismógrafos de registro autónomo (NARS-Baja, por sus siglas en inglés).

con espesores entre 200 km y 250 km. Además, la astenosfera en estas zonas se encuentra pobremente desarrollada (Romanowicz, 2009).

En el golfo de California podemos observar en general un sistema de fallas transformantes. El golfo varía geológicamente y estructuralmente de norte a sur. El proceso de apertura que permitió su origen ocasionó que la corteza sufrieran un proceso de adelgazamiento (Persaud et al., 2007), el cual ha sido observado sobre todo en los márgenes del golfo de la península de Baja California, en este trabajo se desea observar el comportamiento de la litosfera ante el proceso de adelgazamiento de la corteza.

Actualmente en la zona de estudio se tiene la interacción entre la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico. También se sabe que antes de tener esta interacción, alguna vez existió la gran placa de Farallón<sup>3</sup> que después de fragmentarse generó las micro-placas de Guadalupe y Magdalena. Dichas micro-placas subdujeron hace aproximadamente 12.5 millones de años. Considerando estas interacciones entre placas, en este estudio dilucidaremos la ubicación que guardan las micro-placas Guadalupe y Magdalena actualmente y su relación con la placa de Norteamérica.

En el Capítulo 2 describimos la evolución tectónica que dio origen al golfo de California. Tal evolución se encuentra relacionada con procesos de extensión y separación de la península de Baja California con respecto de la placa de Norteamérica; el vulcanismo extinto que se puede observar en la zona constituye una prueba que respalda las hipótesis de subducción de antiguas placas tectónicas.

En el Capítulo 3 exponemos la técnica de funciones de receptor. Iniciaremos el capítulo con una revisión de la técnica de funciones de receptor P (*FRP*) propuesta por Langston en 1979. Hacemos esto debido a que el método antecesor de las funciones de receptor S (*FRS*) es precisamente el método de las *FRP*. El método de las *FRS* ha sido utilizado para mapear la frontera litosfera-astenosfera en varias partes del mundo con gran éxito (por ejemplo, Farra & Vinnik, 2000; Li et al., 2004; Kumar et al., 2005a, 2005b; Sodoudi, 2005; Angus et al., 2006; Heit et al., 2007). Es conveniente mencionar que la metodología de obtención de *FRS* seguida en este trabajo no es la única. La elección de la metodología se lleva a cabo principalmente considerando el nivel de ruido presente en los datos. Las diferencias entre metodologías radican en la forma de rotar los ejes y en la técnica de deconvolución empleada. La buena elección de la metodología se verá reflejada directamente en los resultados obtenidos.

En el Capítulo 4 mostramos las trazas de *FRS* para cada una de las estaciones estudiadas en este trabajo, de tal manera que se tiene la posibilidad de observar la cantidad y calidad de *FRS* calculadas. Además describimos la metodología de apilamiento de *FRS* (basada en la técnica de apilamiento de Zhu & Kanamori, 2000) que nos permitió estimar profundidades de la litosfera (por debajo de las estaciones en estudio).

---

<sup>3</sup> Antigua placa oceánica.

<sup>4</sup> La técnica de *FRP* ha sido un método ampliamente utilizado para observar los contrastes que existen en la corteza y el manto superior.



En el Capítulo 5 se presenta una discusión de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, correlacionados con la información expuesta en el Capítulo 2, referente a la evolución tectónica del golfo de California. En algunas estaciones, sobre todo en las que se encuentran al norte del golfo, se cuenta con estimaciones previas de la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera. Para tales estaciones llevamos a cabo una comparación con nuestros resultados. Es al final de este capítulo que se exponen las conclusiones de esta tesis.

Esta investigación es un primer vistazo del estado actual de la litosfera alrededor del golfo de California y aunque falta camino por recorrer, lo importante ahora es que hemos empezado a recorrer tal camino y que no pararemos en nuestras investigaciones y trabajo hasta no haber utilizado la última herramienta ofrecida por la Sismología aplicable al golfo de California.

# CAPÍTULO 2

## EL GOLFO DE CALIFORNIA

El golfo de California es un lugar en donde de manera excepcional podemos observar un cambio de zonas de separación y extensión continental a zonas de expansión del fondo oceánico (de norte a sur, hacia la boca del golfo). Con el propósito de reunir antecedentes de la región de estudio, en este capítulo mostramos la historia tectónica que dio paso a la apertura del golfo de California. Durante el Cenozoico, la región del golfo de California experimentó una deformación compleja asociada a la evolución del límite entre placas Pacífico-Norteamérica. Tal evolución se puede dividir en tres etapas: a) al inicio fragmentos de la placa de Farallón<sup>5</sup> (Figura 2.1) subdujeron por debajo de la placa de Norteamérica; b) en la segunda etapa, los procesos de extensión y separación en la zona dieron paso a la apertura de lo que se llamó el “proto-golfo”; c) al final, en la zona se desarrollaron fallas transformantes<sup>6</sup> y centros de expansión (Nagy & Stock, 2000). Concluimos el capítulo con la descripción de la red sismológica NARS-Baja.

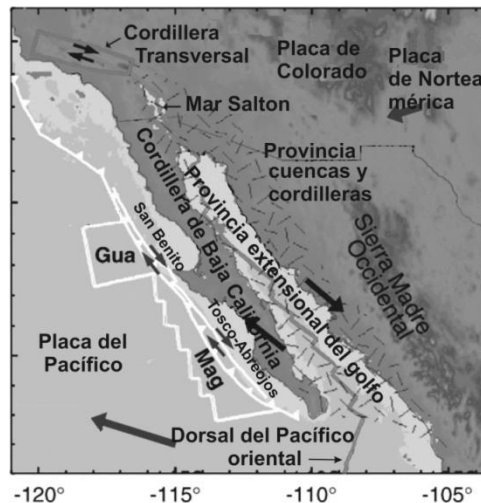


Figura 2.1. Provincias tectónicas principales de la región del golfo de California: cordillera de Baja California, provincia extensional del golfo, Sierra Madre Occidental. Las fronteras entre placas inactivas se muestran en líneas blancas. La frontera entre las placas Pacífico-Norteamérica está marcada con línea gris. Las flechas gruesas indican el movimiento absoluto y relativo entre placas, los movimientos pronosticados son del modelo global HS3-NUVE1A (Gripp & Gordon, 2002). Gua = Micro-placa de Guadalupe; Mag = micro-placa de Magdalena. Modificada de Zhang et al. (2009).

<sup>5</sup> La placa de Farallón era una gran placa oceánica que ocupaba una gran parte de la cuenca del Pacífico oriental. Esta placa se subdividió en varias micro-placas entre ellas Guadalupe, Magdalena, Nazca y Cocos (Stock & Lee, 1994).

<sup>6</sup> Grandes fallas de desplazamiento horizontal que atraviesan la litosfera y acomodan el movimiento entre dos placas.

## 2.1 Subducción de la placa de Farallón

Hace aproximadamente 180 millones de años, el continente americano empezó a ser impulsado en dirección oeste por la expansión del fondo oceánico del Atlántico. Por tanto, los límites convergentes<sup>7</sup> de placa, que se formaron a lo largo de las costas occidentales del norte y del sur de América, migraron de manera gradual hacia el oeste en relación con el centro de expansión situado en el Pacífico (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Durante el Cretácico tardío había varias placas dentro de la cuenca del Pacífico: la placa del Pacífico (que era una placa pequeña y se encontraba en el sur), la placa de Farallón y la placa de Kula<sup>8</sup> (que se alejaba de la cuenca del Pacífico). La placa del Pacífico se transportó hacia el norte y creció hasta que ocupó la mayor parte del norte de la cuenca del Pacífico (Figura 2.2) (Stock & Lee, 1994).

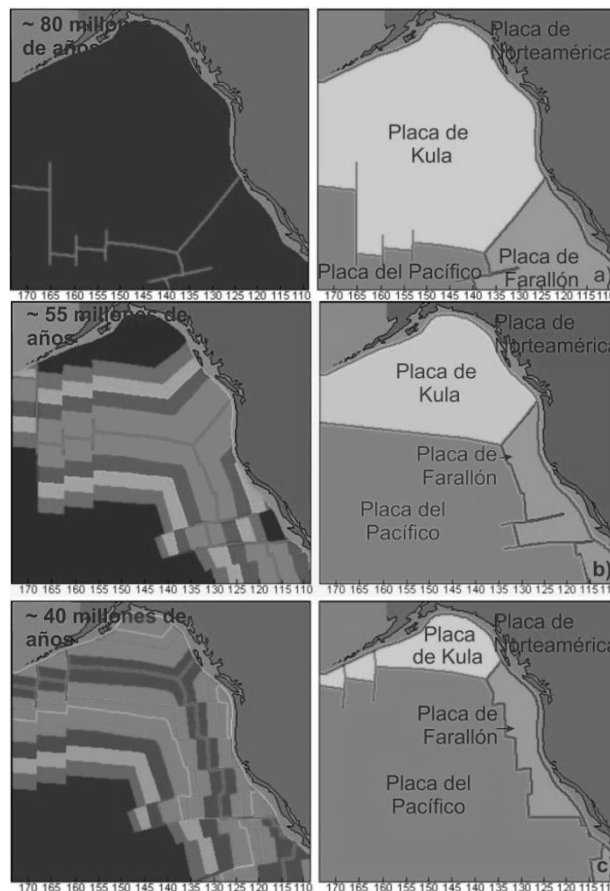


Figura 2.2. Reconstrucción del movimiento de las placas Pacífico, Kula, Farallón y Norteamérica mediante anomalías magnéticas (izquierda), en diferentes épocas. a) Ubicación de las placas hace 80 millones de años, b) hace 55 millones de años y c) hace 40 millones de años. Tomada y modificada de <http://www.uwg.edu>.

<sup>7</sup> Límite en el cual dos placas se juntan, haciendo que una de las dos sea empujada por debajo de una placa suprayacente y acabe siendo reabsorbida en el manto. También puede implicar la colisión de dos placas continentales para crear un sistema montañoso.

<sup>8</sup> Antigua placa oceánica contigua a la placa de Farallón.

Durante el Cenozoico inferior (~ 65 millones de años) el borde entre la placa de Norteamérica y la placa de Farallón era de tipo convergente, por tanto se desarrolló una zona de subducción y un arco volcánico<sup>9</sup> (Atwater, 1970; Gastil, 1981); 35 millones de años después, una sección de la dorsal del Pacífico oriental colisionó con dicha zona de subducción que se había extendido hasta lo que se conoce en la actualidad como la costa de California (Mammerickx & Klitgorg, 1982; Lonsdale, 1991). Cuando este centro de expansión subdujo hacia el interior de la fosa de California se destruyeron mutuamente, posteriormente fueron sustituidos por un sistema de fallas transformantes.

Se tiene conocimiento que el primer contacto entre la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica sucedió a partir del Oligoceno tardío (~ 33-30 millones de años) (Atwater, 1970), existe la posibilidad de que al momento de dicho contacto una “ventana en la placa” (*slab window*)<sup>10</sup> se haya empezado a formar (Atwater, 1970; Dickinson & Snyder, 1979; Severinghaus & Atwater, 1990; Atwater & Stock, 1998; Glazner, 2009).

Desde el inicio hasta el fin del Terciario, la placa de Farallón disminuyó su superficie de manera independiente al movimiento de las micro-placas y placas cercanas; la naturaleza e historia de la placa de Farallón han sido deducidas principalmente de patrones estructurales en el oeste, en la parte correspondiente a la placa de Pacífico y en la dorsal del Pacífico oriental (Lonsdale, 2005).

La gran capa de sedimentos continentales y rocas volcánicas formaron una cadena de montañas sobre la placa de Norteamérica, mientras que la placa de Farallón continuaba subduciendo. La creación de montañas disminuyó. Gigantescos cuerpos de magma se enfriaron dando lugar a estructuras llamadas batolitos. La erosión causó que los batolitos llegaran a la superficie, algunos de ellos aún se encuentran en el borde occidental de la placa de Norteamérica (Figura 2.3). Los antiguos volcanes existentes en la zona fueron afectados por la erosión y fueron sustituidos por nuevos volcanes.

La placa de Farallón subducía por debajo de la placa de Norteamérica más rápidamente de como se generaba. Conforme disminuía su superficie, se rompía en fragmentos más pequeños (Figura 2.4), entre ellos las micro-placas de Guadalupe (Menard, 1978) y Magdalena (Lonsdale, 1989), algunos de estos fragmentos subdujeron por completo. El centro de expansión que había generado la placa de Farallón se consumía en una zona de subducción situada frente a lo que hoy es la costa de California, como consecuencia, la corteza elevada de la provincia de cuencas y cordilleras, soportada en un manto caliente flotante, empezó a deslizarse gravitacionalmente.

---

<sup>9</sup> Cadena volcánica situada en general a unos pocos centenares de kilómetros de una fosa en la que hay subducción activa de una placa oceánica por debajo de otra placa.

<sup>10</sup> El concepto de *slab window* o de “ventana en la placa”, se refiere a “agujeros” que se forman en la placa subducida cuando una cordillera oceánica comienza a subducirse en una zona de subducción. Se utiliza comúnmente para explicar aspectos del magmatismo en las zonas de subducción. Tal concepto se utilizó por primera vez para explicar la actividad volcánica presente al suroeste de Estados Unidos.

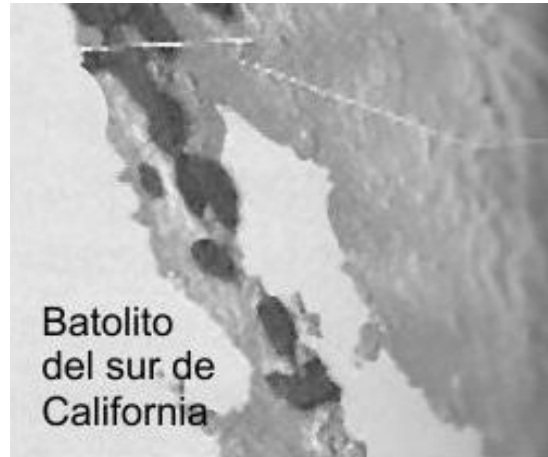


Figura 2.3. Batolitos graníticos (en oscuro) localizados a lo largo del margen occidental de Norteamérica. Estos cuerpos alargados y gigantescos consisten en numerosos plutones que fueron emplazados durante los últimos 150 millones de años de la historia de la Tierra. Modificada de Tarbuck & Lutgens (2005).

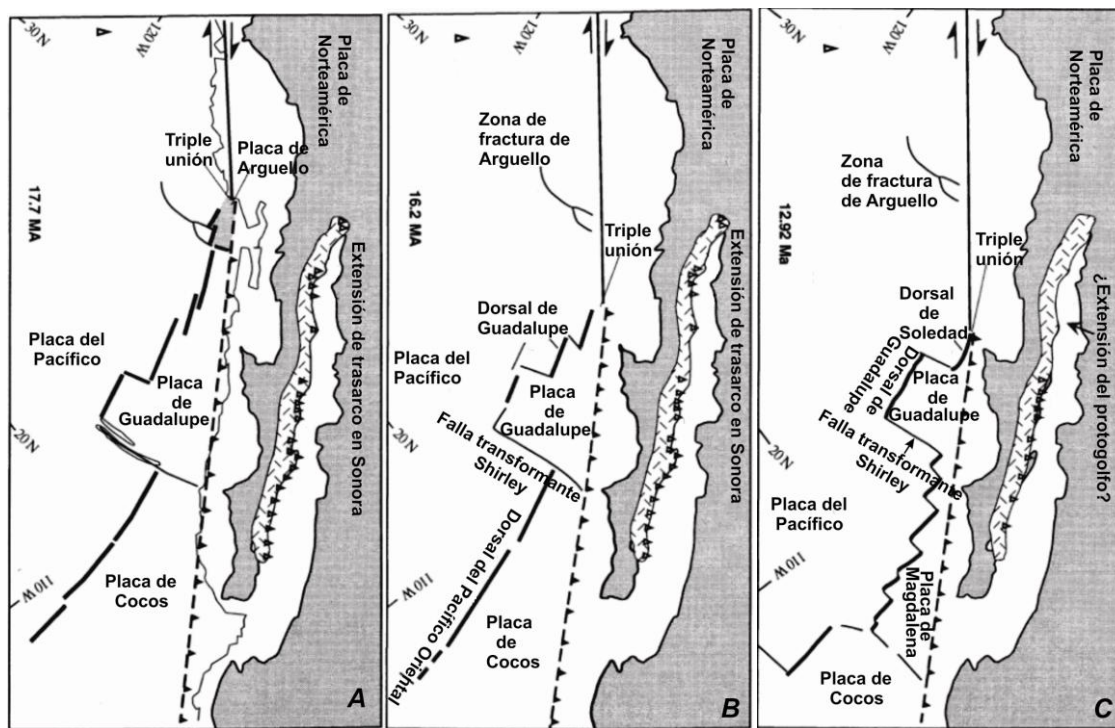


Figura 2.4. Evolución de las micro-placas Guadalupe y Magdalena de izquierda a derecha, obtenida a partir de anomalías magnéticas. En la figura A se tiene la anomalía de hace 17.7 millones de años; en la figura B, la de 16.2 millones de años y en la C, la de 19.92 millones de años. Modificada de Stock & Lee (1994).

En el Eoceno medio, las grandes cadenas montañosas del Cretácico tardío se habían reducido, los ríos fluían en las antiguas montañas desde lo que hoy es el estado de Sonora hasta la costa de lo que es ahora el de Baja California.

El proceso de subducción y extinción de la placa de Farallón originó dos cinturones de rocas volcánicas de edades diferentes, originados por arcos volcánicos paralelos al margen continental (Gastil et al., 1979). El cinturón más antiguo al oriente está representado por rocas riolíticas e ignimbríticas del Oligoceno al Mioceno temprano (35-23 millones de años) (Sawlan & Smith, 1984; Nieto-Samaniego et al., 1999) y dio origen a la Sierra Madre Oriental, que fue el principal emisor de basalto y flujo de ceniza. Este suceso coincide con la primera dilatación de la provincia de cuencas y cordilleras. Aproximadamente en el mismo período, la actividad volcánica estaba centrada en áreas que ahora corresponden al este del golfo de California; los arroyos drenaban esta área fluyendo hacia el oeste, principalmente en la península de Baja California, de ahí que en los registros geológicos sea posible encontrar camas de arena intercaladas con capas de ceniza y flujos dispersos de basalto en la parte sureste de la península. Las tobas intercaladas en estratos marinos de la Formación San Gregorio en la región de la Bahía de La Paz en Baja California Sur han sido correlacionadas con este arco (Hausback, 1984). La costa del Pacífico se encontraba cerca de lo que ahora es la costa oeste del golfo. Durante el Mioceno temprano, el vulcanismo migró hacia el oriente terminando en una cadena de centros de andesita que se extendieron a lo largo de lo que fue la península de Baja California (Gastil et al., 1979).

El cinturón más joven, al occidente, se encuentra a lo largo de la península de Baja California y está caracterizado por rocas de composición calco-alcalina, cuya edad abarca de los 24 a los 12 millones de años (Demant, 1975; Gastil et al., 1979; Sawlan & Smith, 1984; Hausback, 1984).

El inicio de la extensión de la provincia de cuencas y cordilleras sucedió hace aproximadamente 28 millones de años, en este lugar la corteza parece que se “estiró” hasta dos veces su anchura original (Nagy & Stock, 2000). El alto flujo térmico en la región, tres veces superior a la media, y los distintos episodios de vulcanismo proporcionan pruebas firmes de que el ascenso del manto provocó el “abombamiento” de la corteza, que a su vez contribuyó a la extensión de la región (Fletcher & Munguía, 2000).

Al norte del actual golfo de California, hace aproximadamente 15 millones de años, producto de la gran actividad volcánica, fueron depositadas rocas volcánicas entre las que se encuentran riolitas y basaltos, esta actividad duró cerca de 8 millones de años (Gastil et al., 1979).

De acuerdo con las reconstrucciones de Stock & Lee (1994), sabemos que hace 13 millones de años la falla transformante Shirley se aproximó a la trinchera, provocando la separación de las micro-placas Guadalupe y Magdalena (Figura 2.4). El centro de expansión de la micro-placa de Guadalupe terminó su actividad hace 12.5 millones de años.

Cuando las micro-placas Guadalupe y Magdalena terminaron de subducirse, ocurrió un cambio en el magmatismo. Las formas calco-alcalinas en el centro y sur de Baja California dieron paso a otros tipos de magmatismo en varios campos volcánicos; los magmas produjeron adakitas derivadas del derretimiento parcial de la corteza oceánica subducida, andesitas de magnesio y basaltos toleíticos, en ellos no existe una evidencia contundente de

subducción (por ejemplo, Aguillón-Robles et al., 2001; Benoit et al., 2002; Calmus et al., 2003; Conly et al., 2005; Pallares et al., 2007)

El primer traslado continental de la placa de Norteamérica a la placa del Pacífico sucedió durante el Mioceno, cuando fragmentos de la costa de California fueron transferidos paulatinamente (Atwater & Stock, 1998).

## 2.2 Apertura del golfo de California

La formación del golfo de California está asociada con el fin de la subducción de la placa de Farallón por debajo de la placa de Norteamérica que ocurrió hace aproximadamente 12 millones de años en la latitud de Baja California central (Mammerick & Klitgord, 1982; Lonsdale, 1991; Michaud et al., 2006). También la apertura y evolución del golfo de California se ha relacionado con la transferencia de la península de Baja California de la placa de Norteamérica a la del Pacífico (Stock & Hodges, 1989); la apertura del golfo de California ocurrió en dos fases principales (por ejemplo, Hausback, 1984; Stock & Hodges, 1989) (Figura 2.5B y 2.5C):

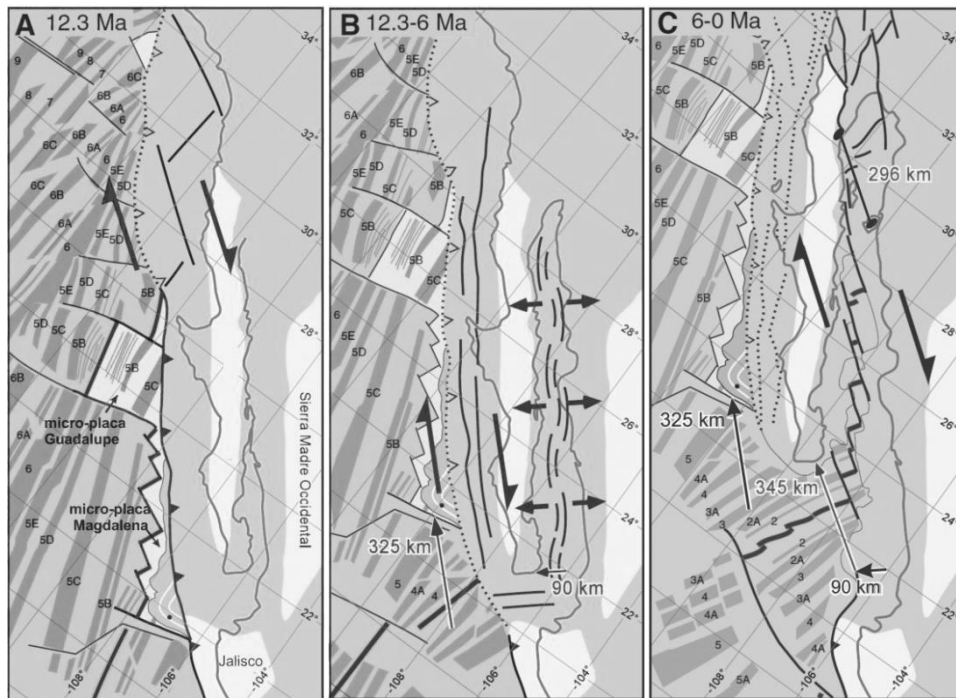


Figura 2.5. Proceso de apertura del golfo de California (Modificada de Fletcher et al., 2007). A) 12.3 millones de años: la península de Baja California continuaba siendo parte de la placa de Norteamérica. En el sur de la península termina la subducción de los remanentes de la placa de Farallón (Guadalupe y Magdalena). Mientras tanto en el norte iniciaba el contacto entre las placas de Pacífico y Norteamérica (desplazamiento horizontal). B) 12-6 millones de años (fase del proto-golfo): se produjo un proceso de extensión y separación entre la placa del Pacífico y la península de Baja California con dirección preferencial oeste-este. C) 6 millones años al presente: el límite entre la península de Baja California y la placa de Norteamérica se encuentra caracterizado por una serie de fallas transformantes, en tanto que en el sur expansión del piso oceánico. Las flechas indican los diferentes desplazamientos entre las placas Pacífico y Norteamérica.

- a) Fase temprana, inició hace aproximadamente 12 millones de años. Esta primera fase comúnmente se denomina fase de extensión (Figura 2.5B) o fase de proto-golfo. Durante este período de extensión (Figura 2.6) y separación continental (*rifting*) se produjeron las primeras cuencas oceánicas, además de las primeras incursiones marinas (Stock & Hodges, 1989; Henry & Aranda-Gómez, 2000; Umhoefer et al., 2002). El ambiente marino en el golfo de California comenzó a establecerse hace 6.5 millones de años (Oskin et al., 2000; Oskin & Stock, 2003; Gastil et al., 1990). La provincia extensional del golfo (Figura 2.1) tuvo su origen en esta fase. Se ha deducido que esta zona fue el resultado de la división oblicua consecuencia del movimiento entre las placas Pacífico-Norteamérica (Henry & Aranda-Gómez, 2000). La dirección preferencial de la extensión en la región, fue ENE, determinada a partir de la orientación NNW de las fallas normales que se encuentran distribuidas en toda la zona (Fletcher & Munguía, 2000; Seiler et al., 2009). Esta fase se caracterizó por el desarrollo de una zona de transtensión<sup>11</sup> en el límite de la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico. El movimiento relativo entre estas dos placas tuvo un cambio de dirección de N60°W (~30 millones de años – 8 millones de años) a N37°W (8 millones de años al presente) al mismo tiempo en que la tasa de desplazamiento relativo cambió de 33 mm/año a 52 mm/año (Atwater & Stock, 1998). La península de Baja California se comportó como una micro-placa localizada entre la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica, limitada por dos sistemas de fallas paralelas, la falla de San Benito – Tosco – Abreojos al oeste y la provincia extensional del golfo de California al este (Atwater & Stock, 1998). La falla San Benito-Tosco-Abreojos permitió que el desplazamiento de la península de Baja California fuera de 250 a 300 km a lo largo del límite oeste de la península de Baja California (Spencer & Normak, 1989; Stock & Hodges, 1989; Lonsdale, 1991) (Figura 2.5B).
- b) Fase transicional de expansión del fondo oceánico y creación de fallas transformantes (Figura 2.5C). El cambio entre la fase de extensión y la fase de expansión del fondo oceánico oblicuo, probablemente ocurrió alrededor de los 6 ó 5 millones de años (por ejemplo, Lonsdale, 1989; Umhoefer et al., 1994) y continúa hoy en día (por ejemplo, Moore & Buffington, 1968; Karing & Jensky, 1972; Moore, 1973; Gastil et al., 1979). Al inicio de esta etapa, gran parte del movimiento transformante de las placas Pacífico-Norteamérica a lo largo de las fallas San Benito-Tosco-Abreojos terminó, se trasladó hacia el interior del continente (Lonsdale, 1991; Oskin & Stock, 2003). De manera simultánea, la península de Baja California se separaba de forma oblicua de la placa de Norteamérica dando paso al golfo de California. El vulcanismo al occidente terminó y la actividad de la Faja Volcánica Transmexicana empezó a formarse hace aproximadamente 4.3 millones de años, este suceso coincide con el inicio del moderno golfo de California (Gastil et al., 1979).

---

<sup>11</sup> Una zona de transtensión es una combinación de procesos de extensión y fallamiento horizontal. Las zonas transtensionales se caracterizan por el adelgazamiento de la litosfera y en algunas ocasiones son lugares en donde las cuencas han tenido una gran tasa de sedimentación.



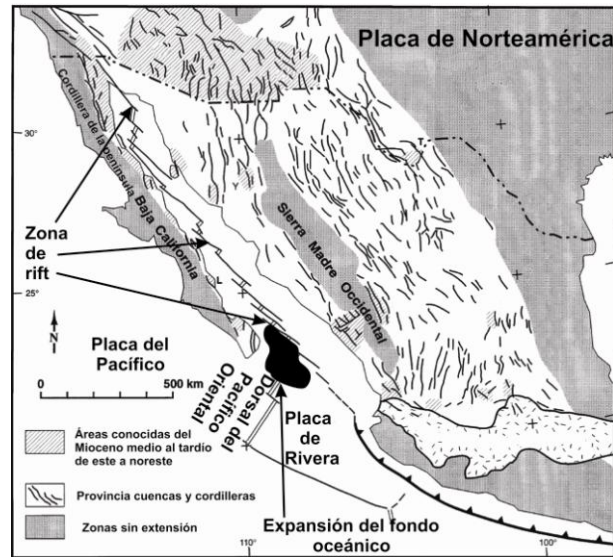


Figura 2.6. Regiones afectadas por el proceso de extensión durante la fase del “proto-golfo”. También están señaladas las zonas de “rift” y expansión del fondo oceánico. Modificado de Henry & Aranda-Gómez (2000).

### 2.3 El golfo de California, ejemplo de una cuenca oceánica joven

Hoy en día, el golfo de California se encuentra en el extremo sur de la frontera entre placas Pacífico-Norteamérica, tiene una longitud aproximada de 1400 km y está altamente sedimentado; está caracterizado por grandes fallas transformantes y centros de expansión (Lonsdale, 1989). El golfo es en general un sistema de separación y extensión oceánico oblicuo, que varía geológicamente y estructuralmente de norte a sur (Nagy & Stock, 2000).

El régimen de extensión que sufrió en el norte del golfo de Baja California originó un adelgazamiento de la corteza continental, lo cual se evidencia por la existencia de cuencas abandonadas y cuencas activas como la cuenca de Wagner, sistemas de fallas pobremente organizadas y deformación ampliamente distribuida; a pesar de ello no existe evidencia de generación de nuevo piso oceánico como sucede en la boca del golfo (Figura 2.5), donde la formación de corteza oceánica comenzó hace 3.5 millones de años aproximadamente (Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989; DeMets, 1995). Las cuencas existentes en el golfo de California son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación se dispone en fallas transformantes en el sur y fallas oblicuas en el norte (Fenby & Gastil, 1991; Nagy & Stock, 2000).

Muchos terrenos<sup>12</sup> encontrados en la cordillera de Norteamérica estuvieron alguna vez dispersos por todo el Pacífico oriental de una manera muy parecida a la distribución que encontramos en los arcos de islas y las llanuras oceánicas distribuidas hoy en día en el Pacífico oriental (Trabuck & Lutgens, 2005).

<sup>12</sup> El término terreno se utiliza para designar una serie diferenciada y reconocible de formaciones rocosas que han sido transportadas por procesos de la tectónica de placas, es decir cualquier fragmento de la corteza que tiene una historia geológica distinta de la correspondiente a las zonas colindantes.

Actualmente la península de Baja California presenta una estratigrafía muy variada y una geología estructural muy compleja. Gastil y colaboradores (1979) dividieron la región norte de la península en tres cinturones pre-terciarios. El primer cinturón está constituido por secuencias de sedimentos marinos y continentales del Cretácico superior. El segundo cinturón está representado por secuencias volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias del Cretácico inferior y el tercer cinturón por rocas intrusivas y metamórficas de edad desconocida. Mina-Uink (1957) clasificó la región Sur de la península en tres regiones: Sierra la Giganta, cuencas de Vizcaíno y Ballenas-Iray-Magdalena y región del Cabo.

Entender la evolución del golfo de California requiere el conocimiento de los procesos que ocurren en el manto. Los diferentes procesos de extensión adelgazan la corteza, mientras que un menor flujo de la corteza se extiende fuera del adelgazamiento de la corteza y reduce la diferencia en el espesor cortical entre el centro de una zona de separación y extensión y las zonas adyacentes. La velocidad del flujo de la parte inferior de la corteza depende de la viscosidad de la corteza, la estructura térmica y el espesor de la corteza (Zhang et al., 2009).

La corteza continental aumenta su espesor por dos procesos fundamentales: acreción de terrenos y magmatismo. En la región del golfo de California, hacia el oeste, la corteza continental es más gruesa que hacia el este. El espesor de la corteza es diferente en el norte del golfo al centro de Sonora, tanto en cantidad de extensión, como en sedimentación y en edad del vulcanismo (Persaud, 2003, González-Fernández et al., 2005).

#### **2.4 Red sismológica NARS-Baja**

La variación longitudinal del grado de oceanización del golfo de California lo convierte en un laboratorio natural para la investigación del acoplamiento entre la litosfera y la astenosfera. Mientras que algunos aspectos de la corteza han sido estudiados por algunos investigadores, el estado principal del manto es desconocido (Clayton et al., 2004).

Con el propósito de obtener una imagen con mayor detalle de la corteza y del manto en la región del golfo de California, se estableció en 2002 una red de 16 estaciones de banda ancha, NARS-Baja (Figura 2.7; Apéndice A). Los registros de esta red proveen de un nuevo conjunto de datos que ofrecen la oportunidad única de determinar propiedades básicas de la litosfera a escala regional. Otro propósito de la red, no menos importante fue monitorizar los sismos de la zona (Trampert et al., 2003).

La red surgió como un proyecto entre la universidad de Utrecht (Holanda), el Centro de Investigaciones Científicas y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE) y el Instituto Tecnológico de California (Caltech). La parte baja de la red NARS-Baja comenzó a funcionar en abril de 2002 y la parte de Sonora se añadió en noviembre de 2002. Este proyecto inicialmente fue patrocinado por el programa *Margins* de la Fundación Nacional de Ciencias (NSF, por sus siglas en inglés), de Estados Unidos de América, bajo las concesiones EAR-0111650 y EAR-0405437 (Clayton et al., 2004). La red fue retirada de campo a fines del 2008 (Figura 2.8).

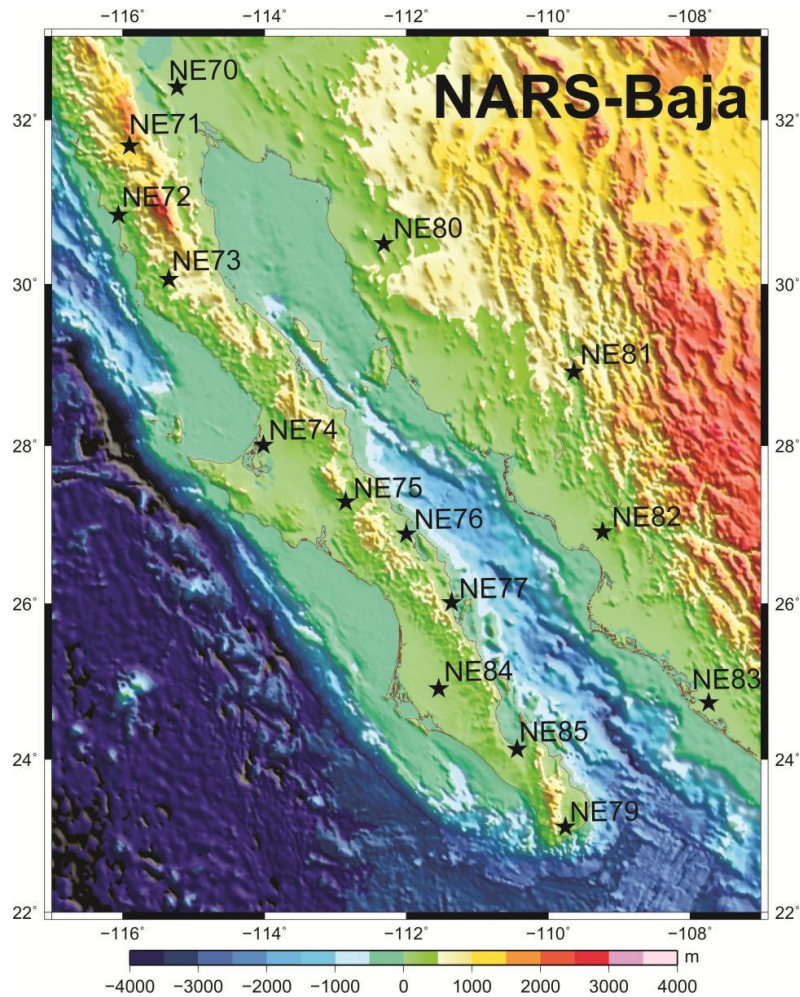


Figura 2.7. Batimetría y topografía de la región del golfo de California y ubicación de las estaciones que integran la red sísmológica NARS-Baja; las estaciones se encuentran indicadas con una estrella.

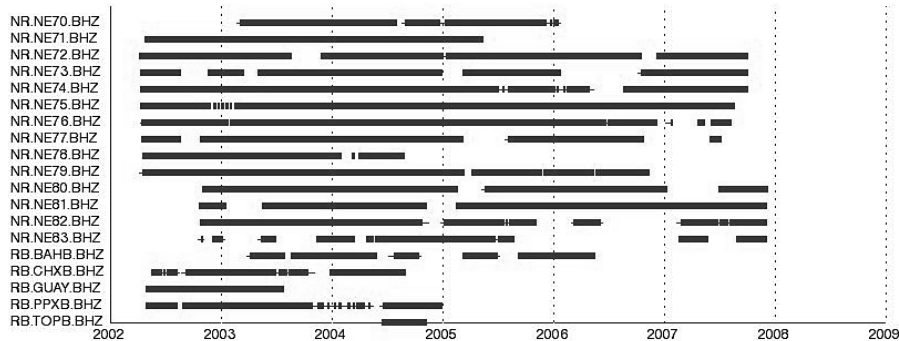


Figura 2.8. Disponibilidad de datos para las estaciones de la red NARS-Baja (NR). Se muestra también la disponibilidad de datos para las estaciones de la Red Sísmica de Banda Ancha (RESBAN, RB) del CICESE existente en la misma base de datos que para la red NARS-Baja. En el eje  $x$  se muestran los años en que estuvo en operación la red y en el eje  $y$  se tiene el nombre de las estaciones. Figura tomada de [http://www.data.scec.org/NARS-Baja/nars\\_php/all\\_net\\_station\\_avail\\_year.php](http://www.data.scec.org/NARS-Baja/nars_php/all_net_station_avail_year.php).

Los instrumentos de la red fueron sensores de banda ancha STS-2, con un nivel plano entre 120 s y 10 Hz. Se tuvo un sistema de grabación construido por Ultrach bajo el programa NARS. Se registraron tres componentes de banda ancha, con un muestreo de 20 muestras por segundo (mps) y tres componentes de período largo muestreadas a 1 mps, de modo continuo. Estas estaciones registraron localmente en sitio y los datos eran recuperados aproximadamente cada tres meses.

#### 2.4.1 Estudios previos realizados en la red de estaciones NARS-Baja

Con los registros de la red de estaciones NARS-Baja se han calculado funciones de receptor P (*FRP*) para determinar la variación de espesor de la corteza, y se concluyó que la corteza se adelgaza en un factor de dos hacia la boca del golfo (Persaud, et al., 2007). Combinando los resultados anteriores con diferentes técnicas como: inversión de ondas superficiales, estudios de refracción sísmica (experimento PESCADOR) y las funciones de receptor de Lewis et al. (2000), ha sido posible obtener un modelo regional a gran escala (Figura 2.9).

Los resultados del modelo regional muestran una respuesta sísmica de la astenosfera poco clara en el norte, esto puede ser debido a la gran tasa de sedimentación del río Colorado o al gran proceso de extensión que se dio en esa zona; mientras que en el sur observamos la respuesta de la astenosfera cerca de las cordilleras (DiLuccio & Clayton (2008)).

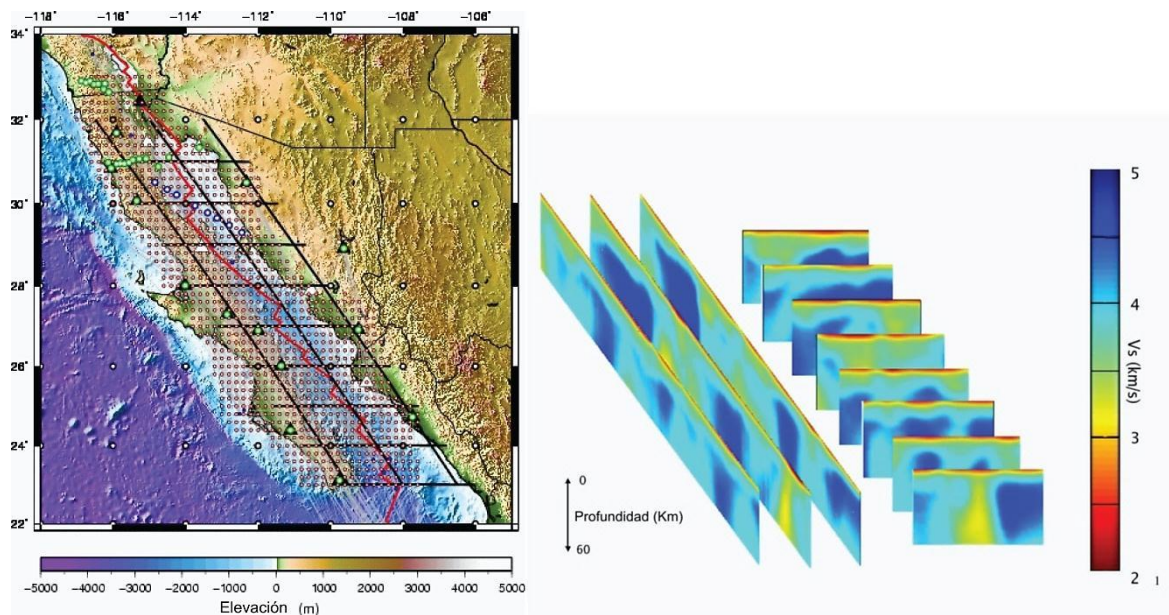


Figura 2.9. Modelo de la región del golfo de California calculado por medio de inversión de ondas superficiales y funciones de receptor P (*FRP*). A la derecha, modelo de velocidades de ondas de cortante, la ubicación de los perfiles se muestra en el mapa de la izquierda, los triángulos en el mapa indican la ubicación de la red de estaciones NARS-Baja. Modificada de DiLuccio & Clayton (2008).

También la red de estaciones NARS-Baja ha permitido realizar diversos estudios de tomografía sísmica, anisotropía y estudios de fuente sísmica (por ejemplo: Zhang et al., 2007; Obrebski, 2007; Van Benthem et al., 2008; Seavey et al., 2010), entre otros, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 5.

El estudio de tomografía sísmica de Zhang et al. (2007) le permitió concluir que:

1.- De norte a sur:

- a) El espesor de la corteza hacia el interior del golfo disminuye
- b) El espesor de la zona de baja velocidad (200 km) se incrementa.

2. A lo largo de la península y del continente:

- a) La corteza es continental en mayor parte.
- b) La zona de baja velocidad (200 km) es más delgada hacia el interior del golfo.

Utilizando la red NARS-Baja y otras tres estaciones sismológicas más, Obrebski (2007) realizó el primer estudio de anisotropía sísmica en el manto superior y en la corteza en la región del golfo de California (norte y centro). La hipótesis del trabajo de Obrebski (2007) se basaba en que la anisotropía tiene diferentes fuentes, sin embargo, la fuente principal de anisotropía en el manto superior se debe al alineamiento del olivino. Las fuentes de anisotropía permiten llevar a cabo una interpretación de la historia tectónica consistente. Tales estudios permitieron corroborar estudios como el de Persaud et al. (2007) acerca de la inexistencia de inclinación en el Moho; encontraron coincidencias geográficas entre las fronteras de las provincias tectónicas y los cambios en el patrón anisótropo del manto superior y las diferencias que existen en la región norte y centro del golfo de California, probablemente producidas por las variaciones en la morfología del límite de placas a lo largo de su eje (Obrebski, 2007).



# CAPÍTULO 3

## FUNCIONES DE RECEPTOR S (*FRS*)

En este capítulo describimos la técnica empleada en este trabajo, funciones de receptor S (*FRS*). En general las funciones de receptor son una herramienta para el estudio de la corteza y las interfases del manto. Esto es posible gracias al contraste de impedancias que existe entre cada una de las capas que las compone; las funciones de receptor se obtienen de registros telesísmicos de banda ancha, después de quitar efectos de trayectoria y de fuente. Las funciones de receptor representarán la respuesta de la estructura por debajo de la estación. El procedimiento de obtención de las funciones de receptor consiste principalmente en una rotación de ejes y una deconvolución; la manera en que se llevarán a cabo la rotación y deconvolución depende del objetivo de la investigación, así como del nivel de ruido presente en la señal.

Empezamos con una revisión de la metodología de las funciones de receptor, primero con una descripción de las funciones de receptor P (*FRP*), debido a su fácil comprensión; continuamos con la metodología de las *FRS*. Mientras que la técnica de *FRP* ya ha sido ampliamente estudiada y empleada (por ejemplo, Langston, 1979; Owens et al., 1984; Ammon, 1991), la técnica de *FRS* aún continúa en estudio debido a una serie de modificaciones técnicas. Sin embargo el método ha sido mejorado, un ejemplo de ello es la introducción del apilamiento de funciones de receptor individuales de acuerdo a su localización geográfica, con énfasis en mapear la frontera litosfera-astenosfera (Li et al. 2004; Kumar, 2005; Kumar et al., 2005a, 2005b).

### 3.1 Metodología de las funciones de receptor P (*FRP*)

Las *FRP* son series de tiempo en cuya señal se encuentran registradas las diferentes discontinuidades de la corteza y el manto superior, esto es posible debido al contraste de impedancias existente en el medio. La señal de las *FRP* está compuesta por fases convertidas P a S que reverberan en las estructuras por debajo de la estación (Figura 3.1) y puede ser interpretada como un sismograma (Langston, 1979).



Figura 3.1. Diagrama idealizado de una *FRP* (izquierda) y las trayectorias de los rayos de las fases convertidas P a S (derecha) que componen la señal de la *FRP*. Modificada de <http://eqseis.geosc.psu.edu> (izquierda) y Sodoudi (2005) (derecha).

Como parte del tratamiento previo a la obtención de las *FRP* se lleva a cabo una rotación de ejes, de los cardinales ZNE (vertical, Norte-Sur y Este-Oeste) al sistema ZRT (vertical, radial y transversal), con la finalidad de identificar con mayor claridad el arribo de la onda P.

En el sistema ZRT el movimiento o polarización de las ondas se puede distinguir mejor; observando un sismo en planta, la ubicación de sus componentes cardinales y las del sistema ZRT estarían descritas en la Figura 3.2.

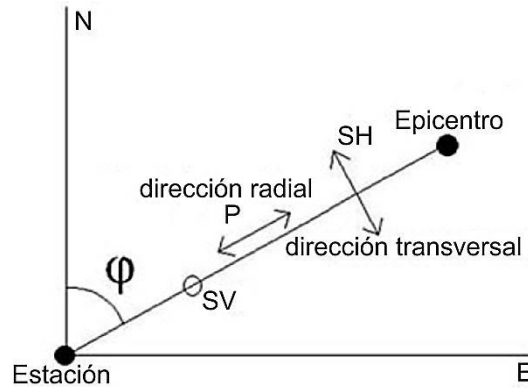


Figura 3.2. Sistema de referencia cardinal de un sismo visto en planta, en el origen del sistema se encuentra la ubicación de la estación. El ángulo  $\varphi$  es el azimut inverso, se mide desde el norte en dirección de las manecillas del reloj. Modificada de Havskov & Ottemöller (2010).

Haciendo uso de una matriz de rotación realizamos la rotación de ejes del sistema ZNE al sistema ZRT mediante:

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & \text{sen}\varphi \\ -\text{sen}\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -NS \\ -EW \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Radial} \\ \text{Transversal} \end{bmatrix}, \quad 3.1$$

donde  $\varphi$  es el ángulo entre la dirección norte y la dirección radial hacia la fuente, a este ángulo se le conoce como azimut inverso (Figura 3.2). *EW* y *NS* son las amplitudes en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente.

Calcular funciones de receptor implica llevar a cabo un método de deconvolución con el propósito de eliminar efectos de fuente y trayectoria presentes en los registros. Tales efectos son considerados ruido en el cálculo de funciones de receptor; Langston (1979) propuso un método para eliminar dichos efectos.

El cálculo de la deconvolución se puede realizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, a continuación describiremos la deconvolución en el dominio de la frecuencia, expondremos la deconvolución en el dominio del tiempo en el apartado destinado para la metodología de las *FRS*.

### 3.1.1 Deconvolución en el dominio de la frecuencia

Suponiendo que las componentes de desplazamiento inciden de forma vertical en capas planas, dichas componentes pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$D_Z(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_Z(t),$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_R(t),$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_T(t), \quad 3.2$$

Donde  $I(t)$  es la respuesta al impulso unitario del instrumento,  $S(t)$  es la función de la fuente,  $P(t)$  es la contribución del trayecto entre la fuente y la base de la estructura local, y  $E_Z(t)$ ,  $E_R(t)$  y  $E_T(t)$  son las funciones de transferencia de la estructura local de propagación en las direcciones vertical, radial y transversal, respectivamente.

Continuando con el método de Langston (1979), se propone que la respuesta vertical de la corteza es aproximadamente igual a

$$E_V(t) \approx \delta(t), \quad 3.3$$

donde  $\delta(t)$  representa a la función delta de Dirac, de esta manera tenemos que el desplazamiento vertical puede reescribirse como:

$$D_Z(t) = I(t) * P(t) * S(t). \quad 3.4$$

La aproximación descrita en la Ecuación 3.4 será más precisa en la proporción en que no se tengan contrastes de velocidad en interfaces intermedias mayores a 2 km/s (Langston, 1979); también mediante esta aproximación nos es posible obtener la respuesta de la estructura por debajo de la estación en las direcciones radial y tangencial ( $E_R$  y  $E_T$ ) al calcular la deconvolución entre  $I(t)$ ,  $P(t)$  y  $S(t)$  de sus respectivas expresiones, en el dominio de la frecuencia quedarían expresadas como

$$E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \approx \frac{D_R(\omega)}{D_Z(\omega)},$$

$$E_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \approx \frac{D_T(\omega)}{D_Z(\omega)}. \quad 3.5$$

Con el propósito de filtrar el ruido de alta frecuencia se convoluciona el cociente espectral con una campana de Gauss, de tal manera que para las ecuaciones 3.5 se tendría:

$$E_R(\omega) \approx E'_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{D_Z(\omega)} G(\omega),$$

$$E_T(\omega) \approx E'_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{D_Z(\omega)} G(\omega), \quad 3.6$$

$E_R(\omega)$  representa a la función de receptor radial,  $E_T(\omega)$  es la función de receptor transversal y  $G(\omega)$  es el espectro de la campana Gaussiana utilizada como filtro.

El cociente mostrado en las Ecuaciones 3.5 puede llegar a ser inestable si el denominador es cero o tiende a serlo, para evitar este problema se introduce en el cálculo un procedimiento planteado por Clayton & Wiggins (1976) llamado nivel de agua:



$$E'_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)\bar{D}_Z}{\Phi_{SS}(\omega)} G(\omega), \quad 3.6$$

donde

$$\Phi_{SS}(\omega) = \max\{D_Z(\omega)\bar{D}_Z(\omega), c \max [D_Z(\omega)\bar{D}_Z(\omega)]\}. \quad 3.7$$

La constante  $c$  es el nivel de agua y  $\bar{D}_Z(\omega)$  es el complejo conjugado de  $D_Z(\omega)$ . Este procedimiento ha demostrado dar muy buenos resultados cuando la calidad de los datos es buena (nivel de ruido bajo). El nivel de agua reemplaza los valores pequeños en el denominador con una fracción del máximo valor del denominador (para todas las frecuencias). Este método se ejemplifica en la Figura 3.3.

El nivel de agua se elige mediante prueba y error, los valores típicos son: 0.0001, 0.001, 0.01 y 0.1. Aunque normalmente el parámetro  $c$  toma el valor de 0.01 (Langston, 1979).

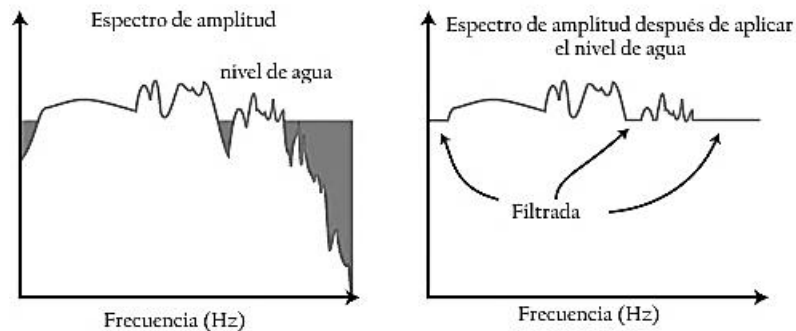


Figura 3.3. Representación de la aplicación del nivel de agua. Modificado de <http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/RftnDocs/seq01.html>.

En el cálculo de las *FRP* suele emplearse la técnica de deconvolución en el dominio de la frecuencia; sin embargo, también se han calculado *FRP* en el dominio del tiempo (por ejemplo, Gurrola et al., 1995; Sheehan et al., 1995), haciendo uso de la teoría inversa lineal; también Ligorria & Ammon (1999) emplearon un método que llamaron método de deconvolución iterativa cuyo fundamento es el de aproximar en términos de mínimos cuadrados la diferencia entre la componente horizontal del sismograma (puede ser la componente radial o transversal) y una señal generada a partir de la convolución de un tren de impulsos actualizado con la componente vertical del sismograma (Ligorria & Amomon, 1999).

### 3.2 Metodología de las funciones de receptor S

Las funciones de receptor S tienen mucho en común con las bien conocidas funciones de receptor P, que para llevar a cabo su análisis se hace uso de las fases convertidas Ps, estas fases para las discontinuidades del manto llegan en un intervalo en donde la cantidad de

reflexiones múltiples y dispersión es grande; por el contrario, para las *FRS*, dado que para su estudio se emplean las fases convertidas  $Sp^{13}$  (Figura 3.4), las fases que se originan en las discontinuidades del manto llegan antes que las reverberaciones de la corteza, es por esta razón que las *FRS* no están contaminadas por el ruido proveniente de múltiples. Para una estación en particular, la fase convertida  $Sp$  llega primero que la fase directa  $S$  (por ejemplo, Faber & Müller, 1980; Buck, 1991; Farra & Vinnik, 2000; Li et al., 2004; Kumar et al., 2005a). Esta característica tan particular de las *FRS* representa una ventaja de dichas funciones sobre las *FRP* en el estudio de interfases del manto superior; la elección acerca de cuál de los dos métodos emplear está definida por el objetivo de estudio, o bien, también es posible utilizar ambos métodos con el propósito de complementar uno al otro.

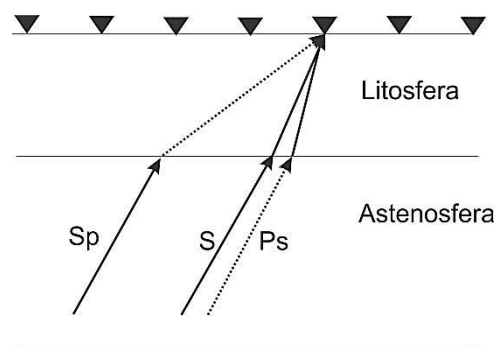


Figura 3.4. Trayectoria de la fase convertida  $Sp$ .

Sin embargo, las *FRS* tiene ciertas limitaciones, por ejemplo las ondas  $S$  no son los primeros arribos y algunas veces pueden llegar dentro de la coda de la onda  $P$ , por lo que ésta podría contribuir con ruido en la ventana de datos seleccionada; además, las ondas  $S$  están caracterizadas por sus bajas frecuencias, con respecto a las ondas  $P$ , lo que trae como resultado una menor resolución espacial, de tal manera que no permiten definir estructuras finas dentro del manto o de la corteza; por último, para evitar ángulos de incidencia posteriores al ángulo crítico, la fase  $Sp$  debe ser observada en distancias telesísmicas. También se ha observado que la fase convertida  $Sp$  de discontinuidades someras (corteza-manto y frontera litósfera-astenosfera) se observa mejor en distancias epicentrales entre  $60^\circ$ - $85^\circ$  (Faber & Müller, 1980), tal y como lo podemos observar en la Figura 3.5.

El cálculo de *FRS* implica principalmente una rotación de ejes y un método de deconvolución, en el siguiente apartado describimos el procedimiento de rotación empleado en este trabajo y continuamos con el método de deconvolución iterativa que anteriormente habíamos dejado pendiente.

<sup>13</sup> La fase  $Sp$  se genera cuando una onda  $S$  atraviesa una discontinuidad sísmica por debajo de la estación y es convertida en una onda  $P$ .

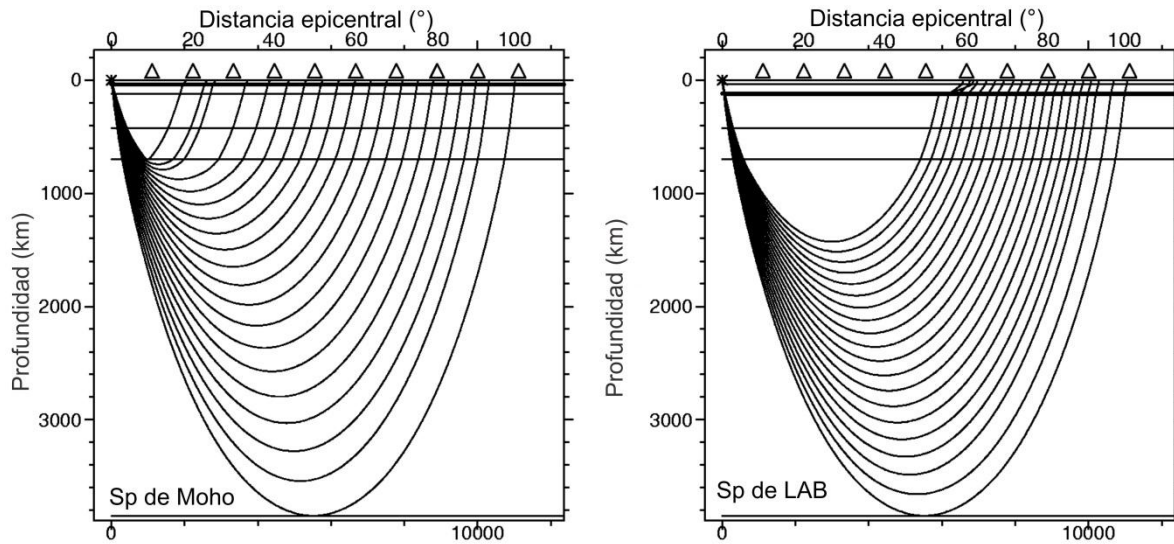


Figura 3.5. Posibles trayectorias de la fase convertida Sp a diferentes distancias epicentrales. Para estos diagramas se supone que la fuente está en la superficie, en el eje horizontal se tienen las distancias epicentrales y en el eje vertical, la profundidad. a) Distancias epicentrales en las que se observa la fase Sp para el Moho. b) Distancias epicentrales en las que se observa la fase Sp para la frontera litosfera-astenosfera (LAB). Figura tomada y modificada de Yuan et al. (2006).

### 3.2.1 Rotación de ejes

El método de rotación utilizado para rotar las *FRP* también puede ser utilizado para las *FRS*. Las tres componentes originales del sismograma ZNE (vertical, Norte-Sur, Este-Oeste) son rotadas al sistema ZRT (vertical, radial, transversal) esta rotación se lleva a cabo porque la propagación de las ondas sísmicas es diferente a las direcciones cardinales; en seguida, las componentes ZRT son rotadas a las componentes LQT (longitudinal, perpendicular y transversal), en esta rotación, la componente Q es perpendicular a la componente L, que se localiza en la dirección de la onda incidente S que está en dirección positiva de la fuente, donde el ángulo de incidencia está definido por la dirección en la que se tenga la mínima energía S en la componente L.

Existen varias formas de llevar a cabo la rotación de ejes del sistema ZRT al sistema LQT, un método consiste en realizarla mediante el ángulo de incidencia teórico, esta rotación se realiza de una manera similar a la rotación ZNE a ZRT, con la diferencia de que ahora en la matriz de rotación el ángulo que estará incluido será el ángulo de incidencia teórico. Sin embargo, el más pequeño error en el cálculo del ángulo de incidencia teórico puede repercutir de manera negativa en las funciones de receptor, pues se tendrán remanentes de energía de la onda S en la componente L. Otra alternativa para llevar a cabo dicha rotación es haciendo uso de un método que llamaremos "rotación de mínima energía", este método obtiene la matriz de rotación de la varianza y covarianza de las componentes, minimizando la energía S de la componente L con el uso de eigen-vectores. La desventaja de este método radica en que no garantiza que la polaridad obtenida de las FRS sea la correcta. En la Figura 3.6 mostramos los resultados de emplear los dos métodos de rotación de ejes anteriormente descritos y podemos ver que la diferencia entre uno y otro es realmente mínima.

En la sección 3.3.2 mostramos mediante un diagrama de flujo paso a paso el método de rotación de ejes que hemos tenido a bien llamarle método de rotación de energía mínima.

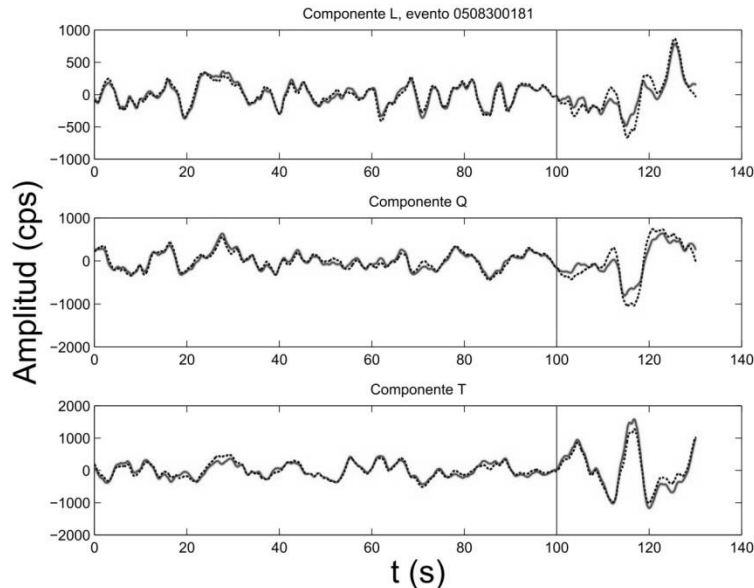


Figura 3. 6. Registro del 30 de agosto de 2005 de la estación NE73; sus componentes fueron rotadas al sistema LQT tanto con el método de rotación de energía mínima (línea continua) como con el método de ángulo de incidencia teórico (línea discontinua), observe que la diferencia entre ellos es muy pequeña; sin embargo, la energía de la onda S en L ha sido minimizada con el método de rotación de energía mínima.

### 3.2.2 Deconvolución en el dominio del tiempo

Cuando el ruido en las señales es bajo, los resultados obtenidos utilizando diferentes métodos de deconvolución, ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia, son mínimos (Ligorria & Ammon, 1999). Sin embargo, en la práctica éste sería un caso ideal, y la elección de un método de deconvolución adecuado puede hacer la diferencia en los resultados, es por ello que la búsqueda de alternativas de métodos de deconvolución se vuelve indispensable.

La deconvolución iterativa en el dominio del tiempo fue empleada en 1999 por Ligorría & Ammon para la obtención de *FRP*, obteniendo buenos resultados. El método es el siguiente: de las tres componentes del sismograma, se utilizarán dos de ellas (la radial y la vertical para el caso de las *FRP*; la longitudinal y la perpendicular para el caso de las *FRS*) y, con la finalidad de calcular la similitud entre ellas y un primer retraso, se realiza una correlación cruzada de ellas. Se tiene entonces una primera estimación de la función de receptor, la cual se convoluciona con la componente correspondiente (en el caso de las *FRP*, con la vertical; en el caso de las *FRS* con la perpendicular). El resultado representaría una primera estimación de la otra componente (en el caso de las *FRP*, la radial; en el caso de las *FRS*, la longitudinal), es con esta nueva componente que se realiza nuevamente el ciclo de correlación-convolución. Éste terminará cuando la diferencia entre la señal estimada y la señal original sea la deseada, de acuerdo con un criterio de semejanza. Con cada iteración, la señal estimada es más parecida a la señal original y al mismo tiempo cada iteración contribuye con nuevos pulsos a la generación de la función de receptor.

Adaptando el algoritmo a las funciones de receptor  $S$ , quedaría de la siguiente manera: se realiza una correlación cruzada entre las componentes  $L$  y  $Q$ , esta correlación cruzada encuentra las similitudes entre dichas señales y un primer retraso, que constituirá nuestra primer estimación  $FRS_1$ ; después se realiza la convolución entre  $FRS_1$  y  $Q$ . A continuación se realiza la diferencia en términos de mínimos cuadrados entre el resultado de la convolución y  $L$ . Debido a que es la primera iteración, la señal estimada  $L_1$  será diferente a la componente original observada; sin embargo, iteraciones sucesivas lograran una diferencia mínima entre las señales (Figura 3.7). Cada iteración proveerá de nuevos pulsos a la nueva función de receptor (Figura 3.8). Al final del ciclo se tendrá la función de receptor calculada (Figura 3.9).

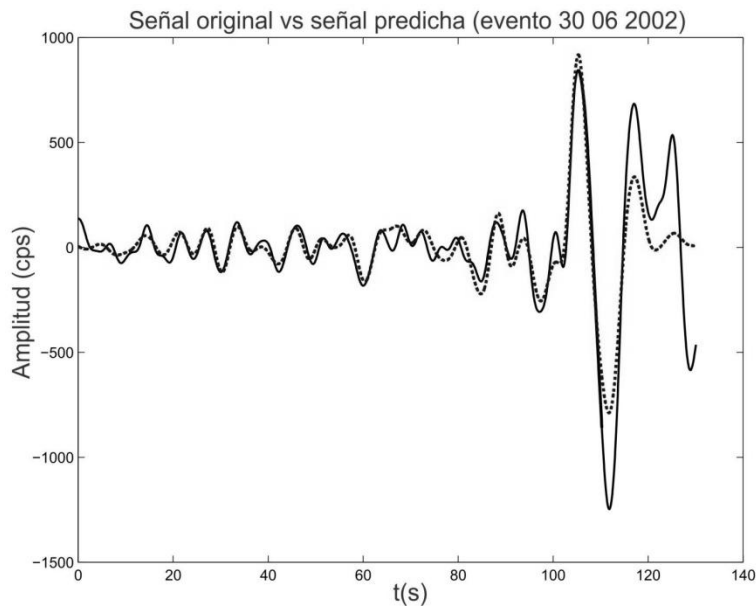


Figura 3.7. Comparación de la componente  $L$  observada (continua) y la estimación de la componente  $L$  (discontinua) que se realiza durante el cálculo de la deconvolución iterativa. Observe que la aproximación de la señal generada es muy buena.

En el Apartado 3.3.3 de este capítulo presentamos un diagrama de flujo donde los pasos de la deconvolución iterativa son mostrados con mayor detalle.

La deconvolución iterativa en el dominio del tiempo presenta algunas ventajas sobre la deconvolución en el dominio de la frecuencia descrita en el Apartado 3.1.1 (Ligorria & Ammon, 1999), estas son:

- 1.- No incluye una parte no causal a la función de receptor obtenida.
- 2.- El espectro de amplitud no incluye valores falsos (altos), para determinadas frecuencias.

Sin embargo, la deconvolución iterativa en el dominio del tiempo requiere más tiempo de cómputo para llevar a cabo el procesamiento de las funciones de receptor.

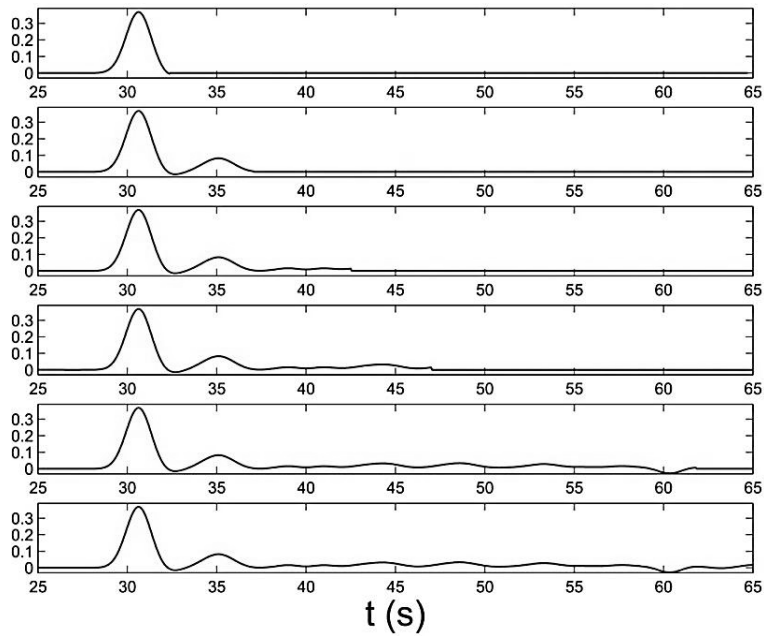


Figura 3.8. Contribución de cada iteración del método de deconvolución iterativa a la *FRS*. En los paneles, de arriba hacia abajo, observamos la manera en que cada iteración contribuye con un nuevo pulso.

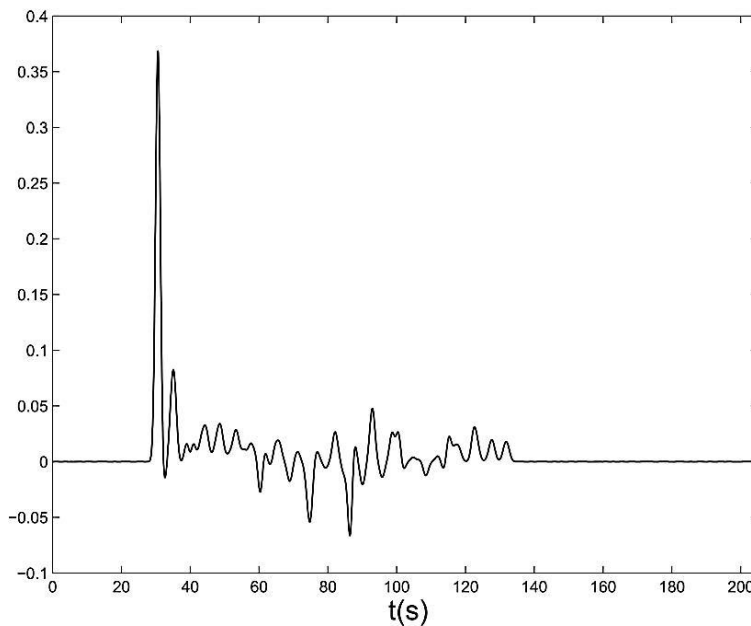


Figura 3.9. Apariencia final de una *FRS* después del ciclo de iteraciones que implica el método de deconvolución.

Hemos realizado pruebas con nuestros registros con la finalidad de observar las diferencias que existen entre los métodos de deconvolución anteriormente descritos (deconvolución en el dominio de la frecuencia mediante el uso de un nivel de agua y la deconvolución iterativa en el dominio del tiempo), dichas pruebas nos han permitido observar que los pulsos de las *FRS* que fueron obtenidas mediante la técnica de deconvolución iterativa son diferenciables entre ellos, hablando en términos de interpretación, mientras que en las *FRS* calculadas en el

dominio de la frecuencia el pulso de interés no es fácilmente distinguible, esto lo podemos observar en la Figura 3.10.

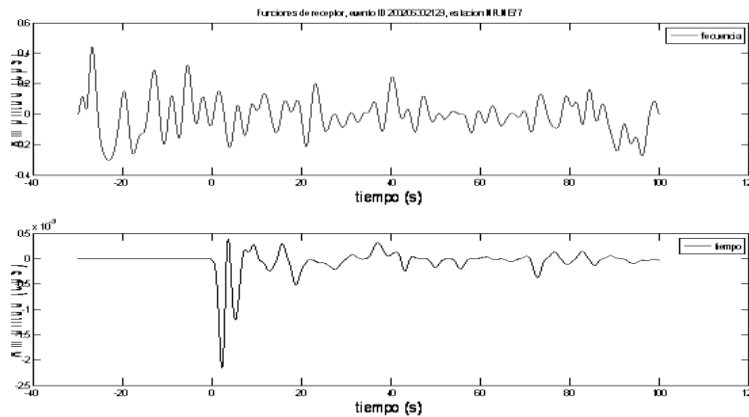


Figura 3.10. Panel superior: función de receptor obtenida en el dominio de la frecuencia, el valor del nivel de agua empleado fue de 0.1. Panel inferior: función de receptor calculada mediante deconvolución iterativa en el dominio del tiempo. Observe la parte no causal que introduce la deconvolución en el dominio de la frecuencia, por otra parte es difícil establecer la diferencia entre cada uno de los pulsos (con fines de interpretación), debido a la similitud de sus amplitudes; a diferencia de la función de receptor obtenida en el dominio del tiempo.

### 3.3 Procesamiento de los datos

De las 16 estaciones de la red sismológica NARS-Baja, descrita en el Capítulo 2, se seleccionó un conjunto de 398 eventos (Figura 3.11), el catálogo comprende del 18 de marzo de 2002 al 22 de octubre de 2008 (Apéndice B).

Los eventos utilizados en el proceso de obtención de las *FRS* cumplieron los siguientes tres prerequisites:

- Magnitud  $M_w$  mayor o igual que 5.8, porque de esta manera es posible tener una mejor relación señal/ruido en el sismograma.
- Distancias epicentrales entre  $60^\circ$  y  $85^\circ$ , para evitar fases difractadas y fases del núcleo y reverberaciones de la corteza.
- Arribo de la fase S claramente identificable en las componentes horizontales N-S y E-W, dado que en dichas componentes queda principalmente registrado el movimiento de la onda S.

#### 3.3.1 Pre-procesamiento

Antes de empezar a describir el procesamiento propio de las *FRS* calculadas en este trabajo (rotación al sistema LQT y deconvolución en el dominio del tiempo) expondremos el tratamiento previo aplicado a nuestros registros. Primero obtuvimos registros de una hora de los eventos previamente seleccionados, mostramos en la Figura 3.12 un ejemplo de dichos registros correspondiente al evento del 30 de junio de 2002.

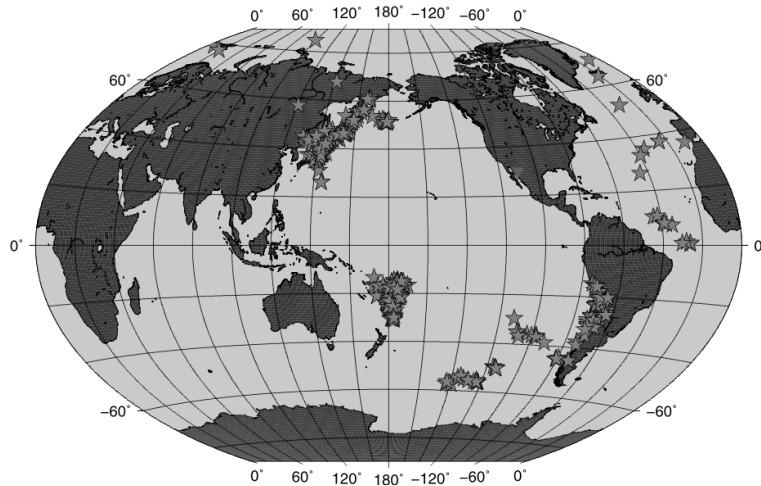


Figura 3.11. Distribución global de los eventos utilizados (estrellas). El triángulo invertido indica la ubicación de la red NARS-Baja.

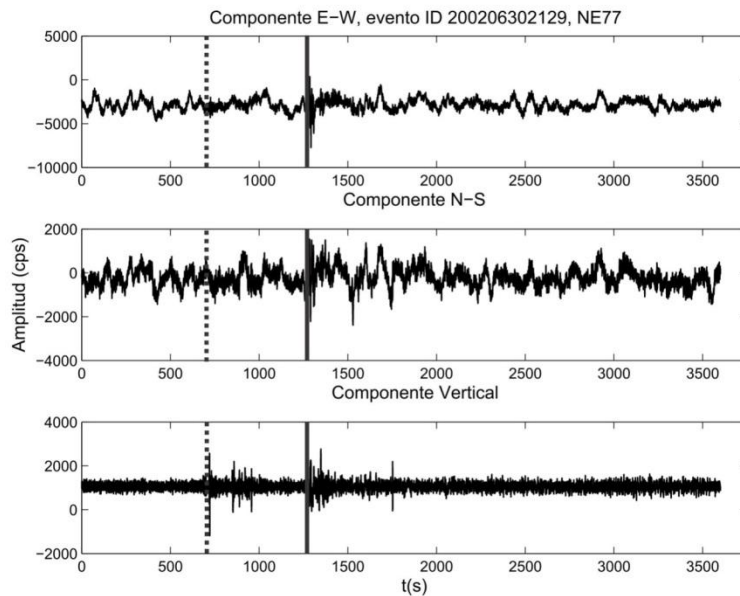


Figura 3.12. Registro de una hora de la estación NE77, del 30 de junio de 2002. En línea punteada está marcado el arribo de la onda P; y en línea continua, la onda S directa.

Una vez obtenidos todos los registros, de manera manual identificamos el arribo de la fase S, posteriormente mediante una macro (shell en SAC<sup>14</sup>) se llevó a cabo de manera automática el corte de las ventanas de tiempo. La ventana seleccionada tendrá una longitud de 120 s, incluyendo 90 s antes del arribo de la onda S directa y 30 s después. Se continuó con la remoción de tendencia y media, además de la rotación de ejes del sistema ZNE al sistema ZRT. En la Figura 3.13 mostramos un diagrama de flujo que muestra el pre-procesamiento realizado a cada uno de los registros.

<sup>14</sup> De sus siglas en inglés *Seismic Analysis Code*, fue desarrollado en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore con el objetivo de analizar registros sísmicos.



A continuación en la Figura 3.14 presentamos el registro de la Figura 3.12 después del pre-procesamiento, descrito en la Figura 3.13.

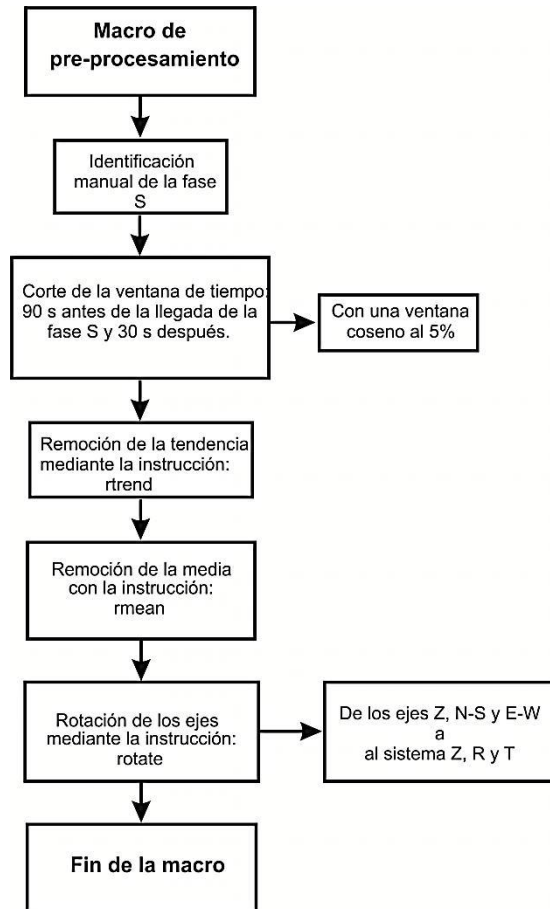


Figura 3.13. Diagrama de flujo de la macro escrita en SAC que realiza el pre-procesamiento.

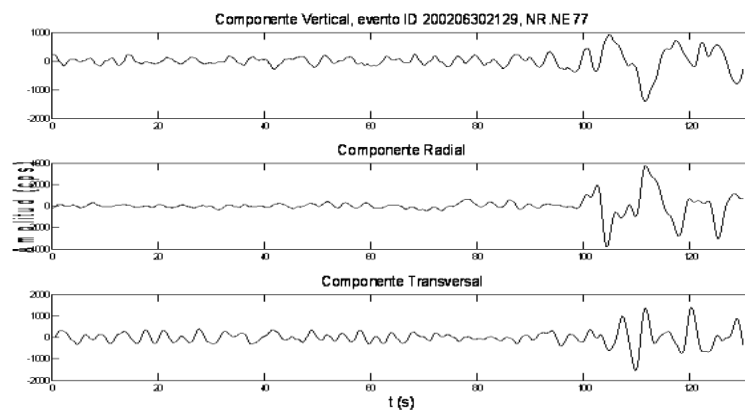


Figura 3.14. Apariencia de la ventana de S del evento registrado en la estación NE77 del 30 de junio de 2002 (Figura 3.12) después de aplicar pre-procesamiento comentado en la Figura 3.13.

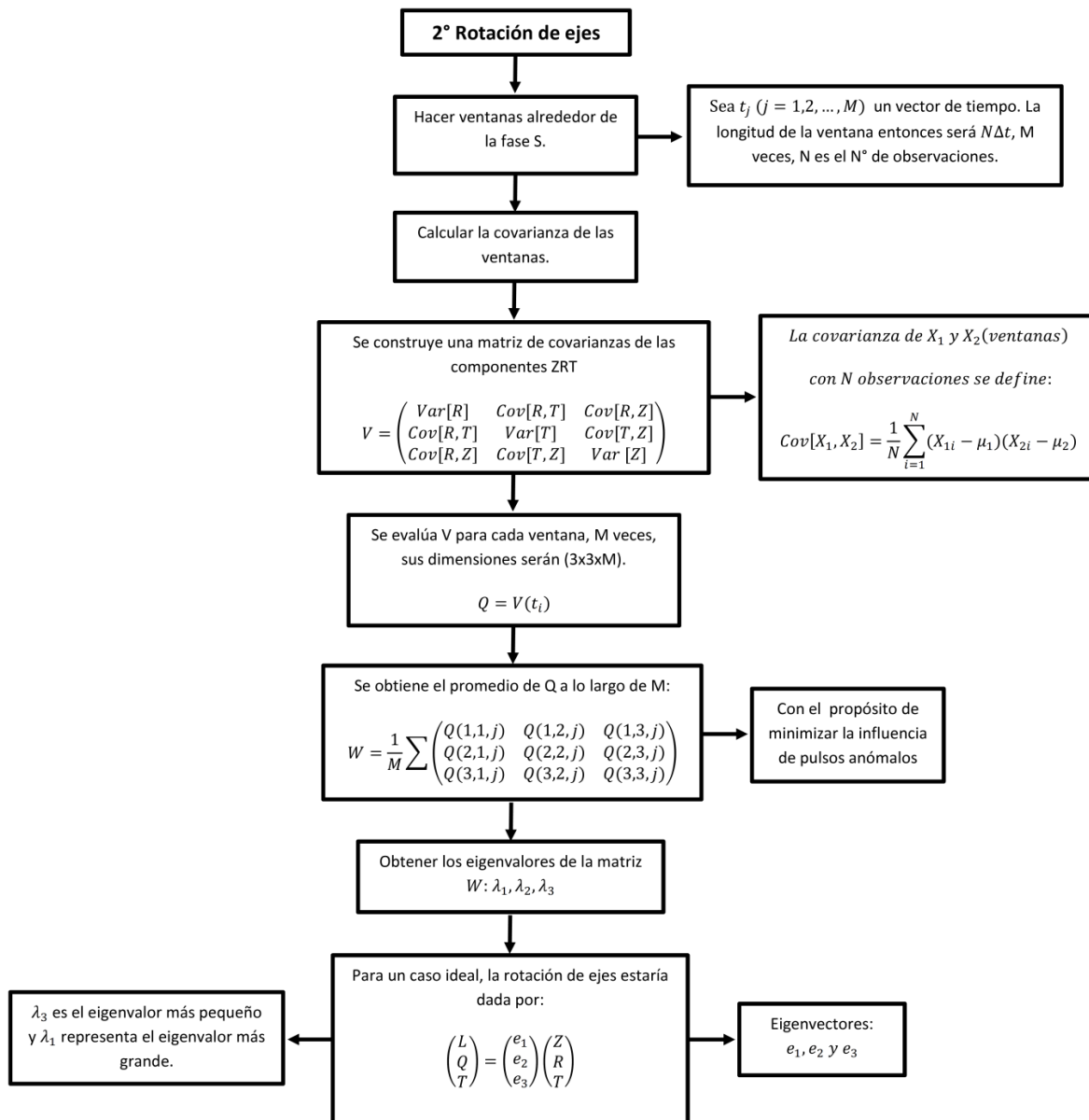


Figura 3.15. Diagrama de flujo en el que se muestran los pasos seguidos para realizar la rotación del sistema ZRT al sistema LQT.

### 3.3.2 Rotación de ejes del sistema ZRT al sistema LQT

En el apartado anterior, como parte del pre-procesamiento de los registros se realizó la rotación del sistema cardinal ZNE al sistema ZRT, una vez efectuado este tratamiento previo es posible continuar con el proceso de obtención de las *FRS*. El procedimiento que sigue es la rotación de ejes del sistema ZRT al sistema LQT, basado en el método de Kanesevich (1973) y descrito en la Figura 3.14.

La apariencia de las componentes rotadas del sistema ZRT al sistema LQT se observa en la Figura 3.16.

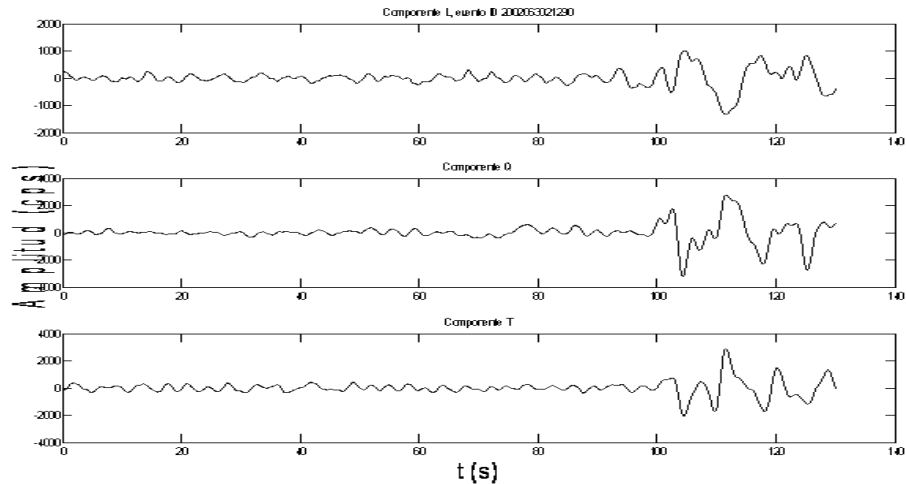


Figura 3.16. Aspecto del evento de la estación NE77 rotado al sistema LQT con el método de energía mínima, registrado el 30 junio de 2002.

### 3.3.3 Descripción del método de deconvolución iterativa en el dominio del tiempo utilizado

Anteriormente comentábamos las ventajas y desventajas de los métodos de deconvolución con base en ello optamos por la deconvolución iterativa en el dominio del tiempo. El diagrama de flujo de la Figura 3.17 muestra tal procedimiento, donde:

L, Q y T → son respectivamente las componente L, Q y T.

$ESL_1$  → Es la 1° estimación de la componente L.

$ESL_i$  → Representa las sucesivas estimaciones de la componente L.

$FTR_{1M}$  → Representa la 1a estimación de la *FRS*.

$FTR_{1Mi}$  → Representa las sucesivas estimaciones de la *FRS*.

DI → Es la diferencia entre la componente L original y la componente L estimada.

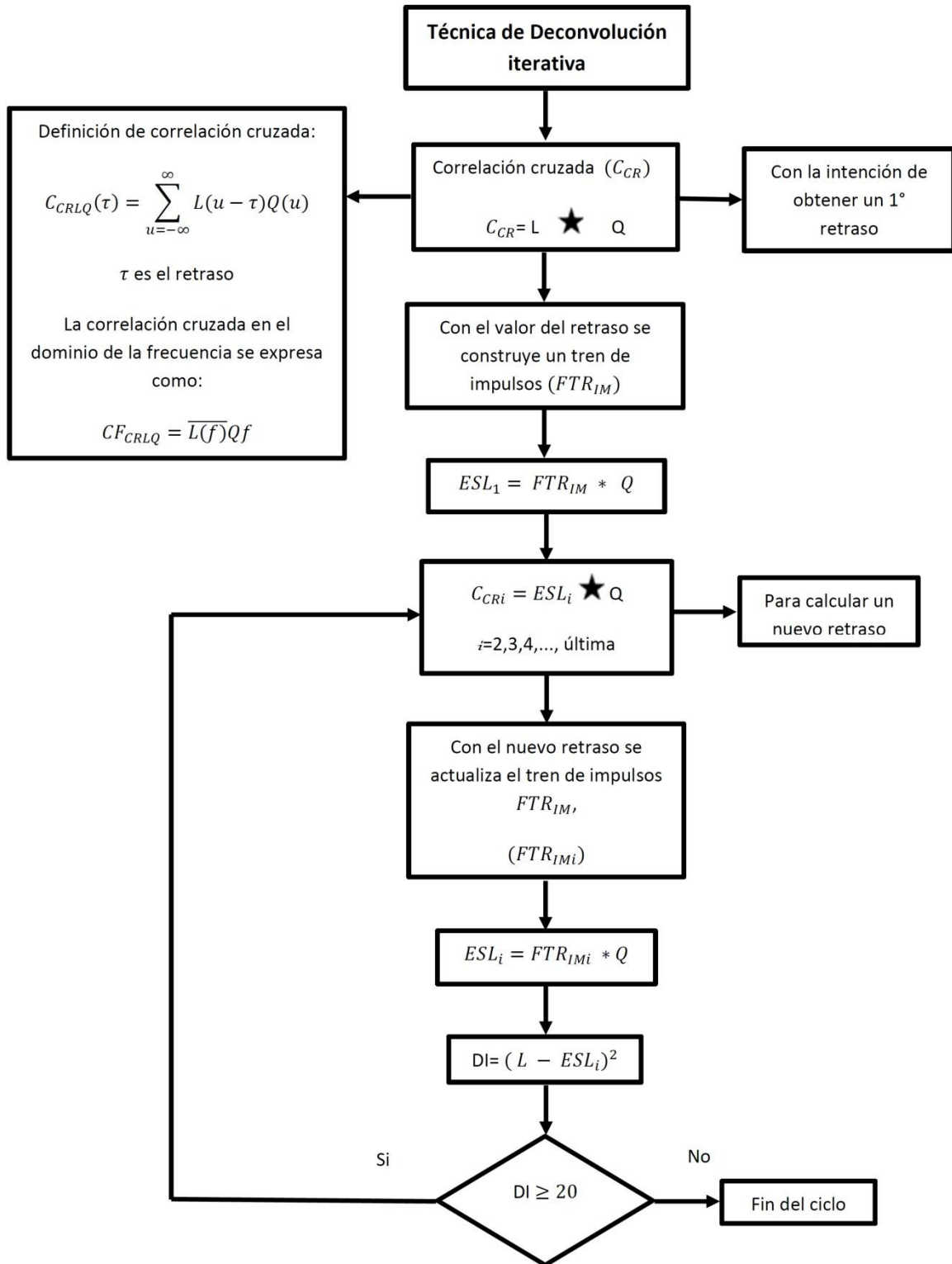


Figura 3.17. Diagrama de flujo que expone la técnica de deconvolución iterativa en el dominio del tiempo.

En la Figura 3.18 mostramos las trazas de *FRS* de la estación NE82, a la izquierda ordenadas por distancias epicentrales y a la derecha por azimuts inversos. La razonable “alineación” de los pulsos de las *FRS* se interpreta como un contraste de impedancias debido a una discontinuidad. Considerando la forma en que presentamos las *FRS*, los pulsos positivos representan un cambio de impedancia positivo. Los pulsos positivos localizados entre los 3 y 5 s los correlacionamos con el Moho, en tanto que los pulsos negativos (cambio de impedancia negativo) que se encuentran entre los 8 y 11 s los hemos relacionado con la frontera litosfera-astenosfera.

## NE82

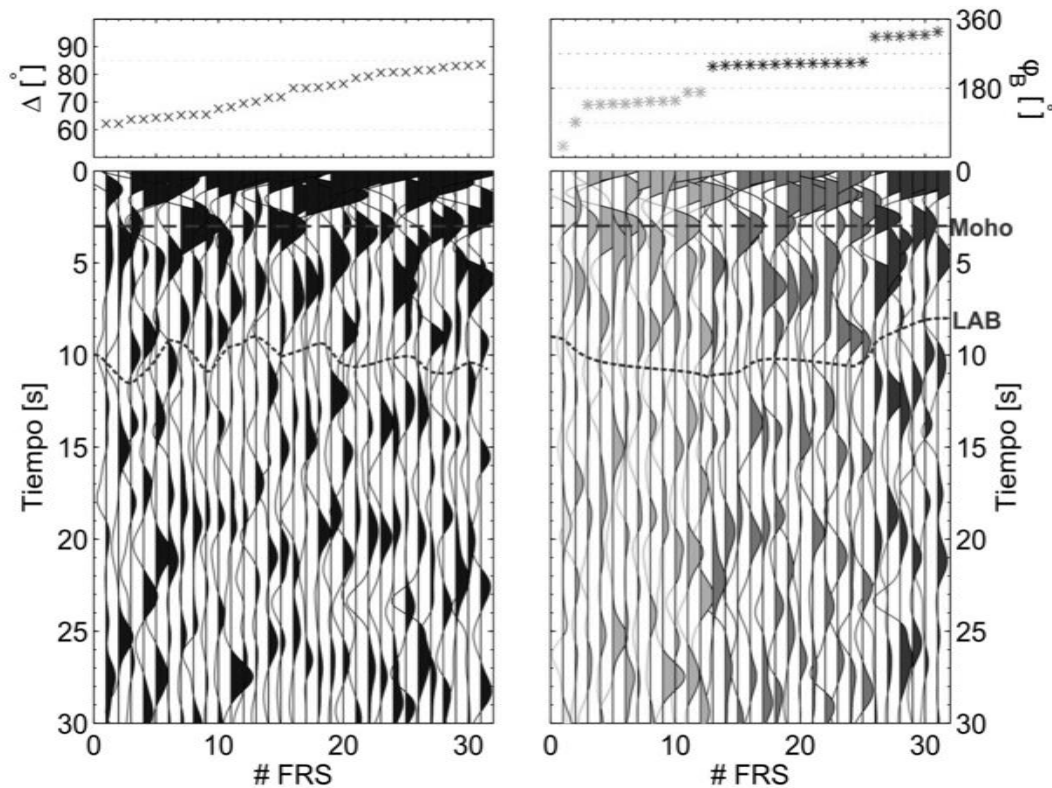


Figura 3.18. Izquierda: trazas de las *FRS* ordenadas por distancias epicentrales, en el panel superior observamos las distancias epicentrales a la que corresponde cada una de las *FRS* mostradas. Derecha: trazas de las *FRS* ordenadas por azimuts inversos y en el panel superior tenemos los azimuts inversos correspondientes a las *FRS*. En línea discontinua gruesa está marcado el Moho y en línea discontinua delgada la frontera litosfera-astenosfera.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

En este capítulo presentamos los resultados que se derivan del procesamiento de las *FRS* descrito en el Capítulo 3. En primera instancia mostramos las trazas de las *FRS* en tiempo ordenadas por azimut inverso. Posteriormente continuamos con los resultados en profundidad de cada una de las estaciones.

El número total de eventos por estación<sup>15</sup> se muestra en la Figura 4.1. Estos eventos cumplen con las características específicas de magnitud y distancia epicentral descritas en el Capítulo 3. Para su selección también se tomó en cuenta el período de operación de la estación.

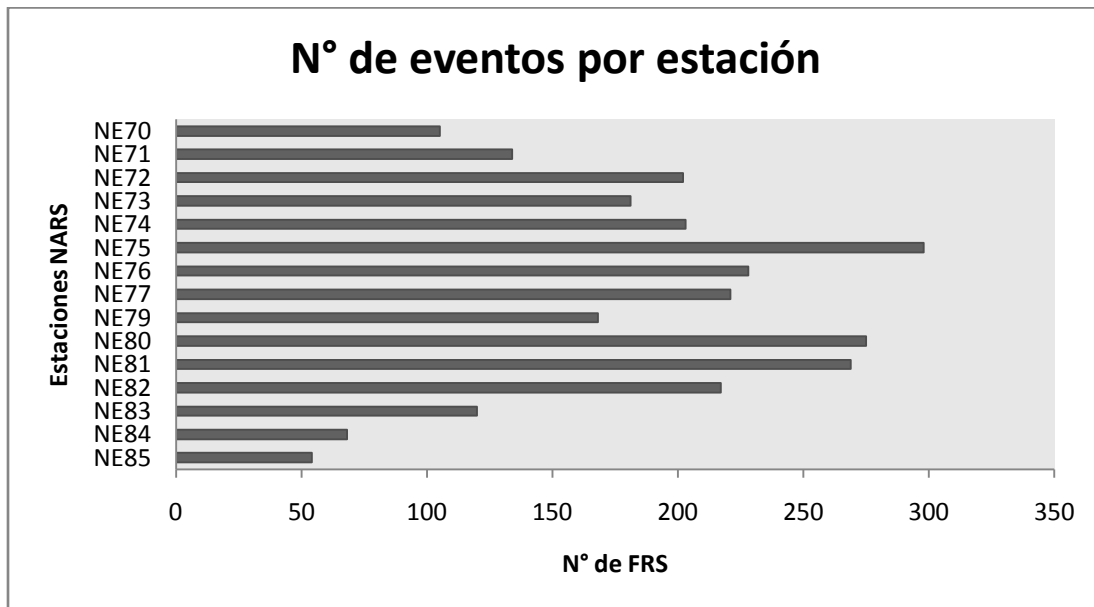


Figura 4.1. Número de eventos por estación que cumplen las características requeridas (magnitud y distancia epicentral).

El nivel de ruido presente en las señales ocasiona que el número de *FRS* calculadas sea inferior al número de eventos seleccionados. El número de *FRS* resultantes por estación se muestra en la Figura 4.2; son trazas de *FRS* con pulsos definidos que permiten observar el arribo de la fase  $S_{LABp}$ , estas trazas se muestran por estación más adelante en este capítulo.

<sup>15</sup> Debido a la poca cantidad y calidad de las *FRS* calculadas en la estación NE78 se decidió no incluirla en los resultados.

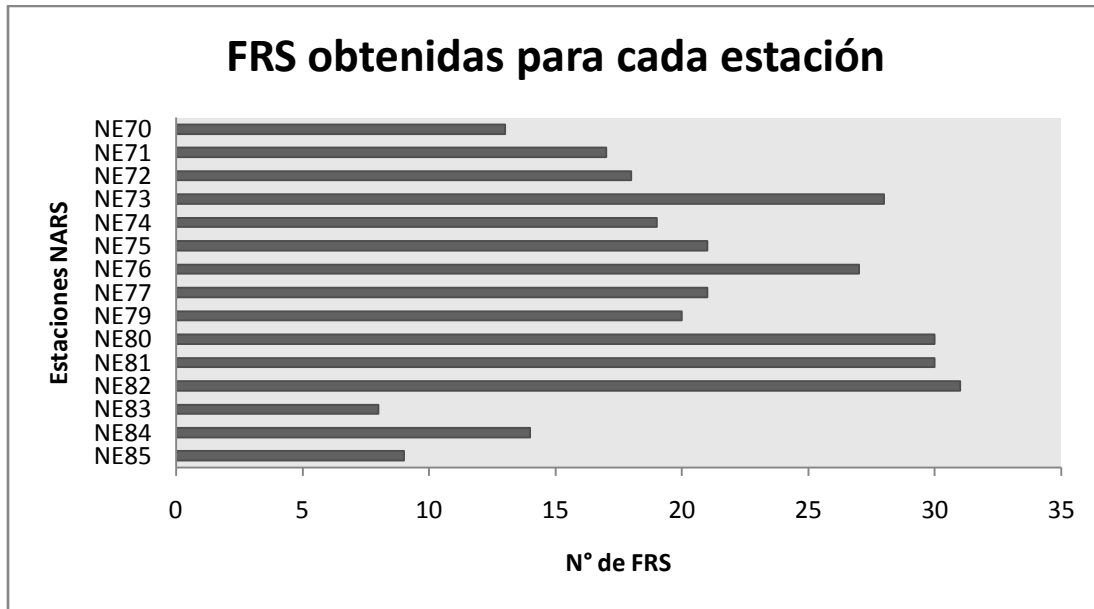


Figura 4.2. Número de *FRS* obtenidas para cada estación. Note la diferencia que existe en número entre los eventos utilizados (Fig. 4.1) y la cantidad de *FRS* obtenidas. Solo fue posible conservar el 11% del total de eventos.

#### 4.1 *FRS* observadas en tiempo

La frontera litosfera-astenosfera se ha relacionado con observaciones de bajas velocidades sísmicas en el manto superior, de tal manera que el límite entre la litosfera y la astenosfera podrá observarse como un conjunto de pulsos negativos (Sodoudi, 2005).

A continuación se muestran las trazas de *FRS* para cada una de las estaciones; en las cuales es posible observar dos fases:  $S_{MohoP}$  y  $S_{LABP}$ , esta última en las funciones de receptor P es ocultada por los múltiples. El orden de presentación es de norte a sur, presentando en pares las estaciones NE72-NE80, NE73-NE81, NE76-NE82 y NE83-NE84, con el propósito de comparar la respuesta de la frontera litosfera-astenosfera en las estaciones ubicadas en la península de Baja California y las localizadas en Sonora y Sinaloa.

Analizaremos a las *FRS* mediante el estudio de retrasos en tiempo. Con esta finalidad, las hemos graficado ordenadas por azimut inverso. Las trazas de *FRS* han sido mostradas con el eje del tiempo y polaridad invertido, esto con el propósito de poder compararlas con las funciones de receptor P; las amplitudes coloreadas indican amplitud positiva e indican que la velocidad aumenta conforme aumenta la profundidad; por el contrario, las amplitudes sin color muestran que la velocidad disminuye con el aumento de la profundidad.

##### 4.1.1 Estación NE70

En la estación NE70 obtuvimos un total de 13 *FRS*, los pulsos negativos que se asocian a la frontera litosfera-astenosfera (fase  $S_{LABP}$ ) se encuentran marcados en línea discontinua gruesa en la Figura 4.3, el valor promedio leído en tiempo fue de 6.9 s.

El cuadrante de azimut inverso mayormente muestreado es el NW, mientras que los cuadrantes SE y SW se encuentran moderadamente muestreados en tanto que en el cuadrante NE no hay eventos.

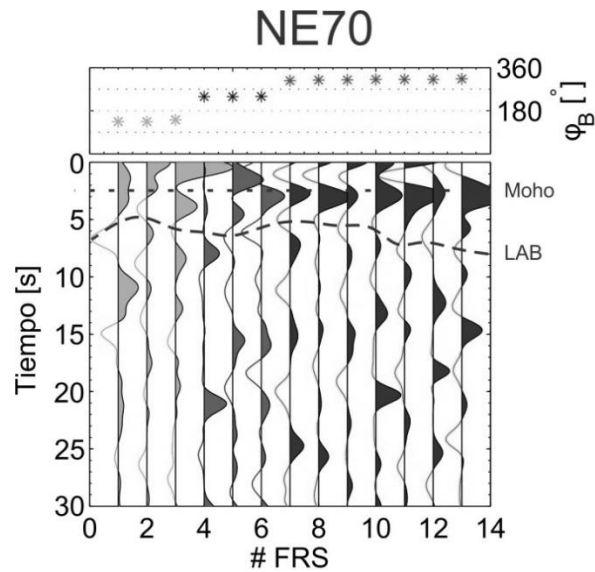


Figura 4.3. Estación NE70. Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en gris claro corresponden a los azimuts inversos entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro, entre  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa, y se encuentran alrededor de los 6.9 s. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación DVT.

#### 4.1.2 Estación NE71

En la estación NE71 se obtuvo un total de 17 *FRS*, los pulsos negativos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera se encuentran ubicados alrededor de los 9.5 s y 14 s, este pulso se observa en la Figura 4.4 marcado con línea discontinua gruesa.

El cuadrante mayormente muestreado es el SW seguido por el NW y el SE, mientras que en el cuadrante NE solo tiene una *FRS*.

#### 4.1.3 Estaciones NE72 y NE80

En la estación NE72 se obtuvieron un total de 18 *FRS*, los pulsos negativos que representan a la frontera litosfera-astenosfera se encuentran entre los 9.5 s y 12.5 s; en cuanto a los cuadrantes de azimut inverso: el cuadrante NE tiene un solo evento, los cuadrantes SE y SW se encuentran moderadamente muestreados mientras que el cuadrante NW tiene la mayor cantidad de muestras.

En la estación NE80 se tienen 30 *FRS*; los pulsos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera se observan entre los 7.5 s y 13.7 s. La distribución de eventos en los cuadrantes de azimut inverso es muy parecida a la estación NE72.



En la Figura 4.5 es posible apreciar que el valor en tiempo leído para los pulsos asociados con la frontera litosfera-astenosfera es muy similar.

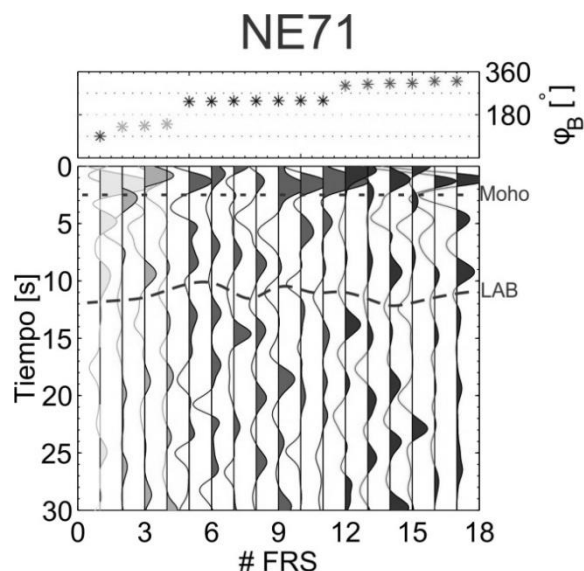


Figura. 4.4. Estación NE71. Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos negativos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua y se presentan alrededor de los 9.5 s y 14 s. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación correspondiente.

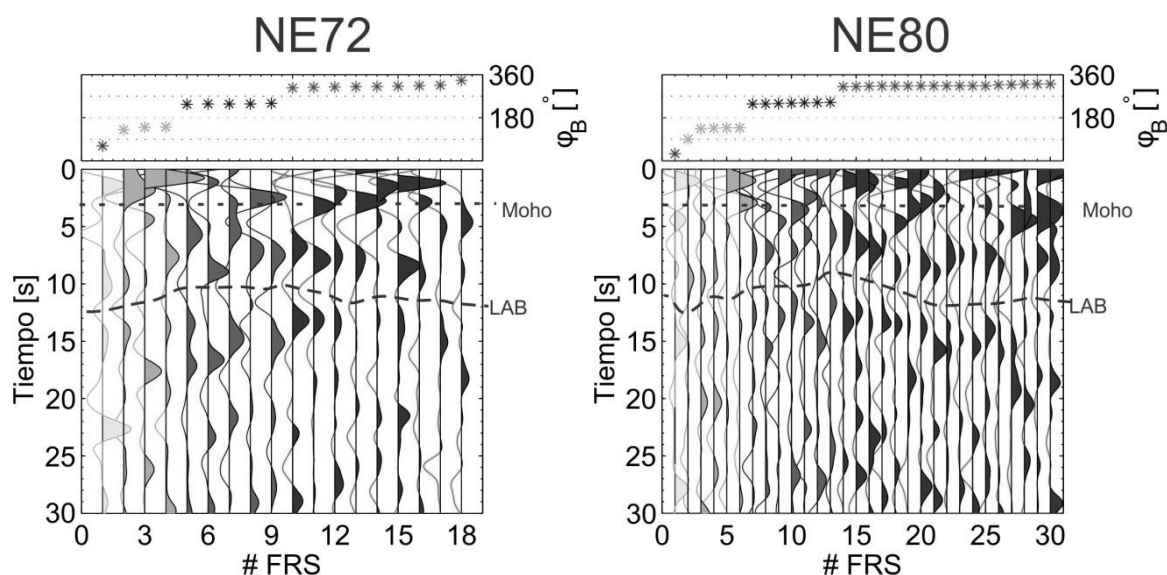


Figura 4.5. Estaciones NE72 (izquierda) y NE80 (derecha). Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa. El valor en tiempo leído promedio del pulso negativo como la frontera litosfera-astenosfera de ambas estaciones es de 11 s. Con línea punteada está señalado el Moho, los valores en tiempo fueron obtenidos de Persaud et al. (2007) de las estaciones correspondientes.

#### 4.1.4 Estaciones NE73 y NE81

Continuamos con las estaciones NE73 y NE81. En la estación NE73 se presentan 28 *FRS*, los valores leídos para esta estación se encuentran entre 7.5 s y 12.5 s. En la estación NE81 se obtuvieron 30 *FRS*, los pulsos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera se encuentran entre 7.5 s y 13 s.

En cuanto a los cuadrantes de azimut inverso, la distribución de eventos para las estaciones NE73 y NE81 es prácticamente igual al de las estaciones NE72 y NE80.

En la Figura 4.6 se ha marcado con línea discontinua gruesa los pulsos asociados con la frontera litosfera-astenosfera, de esta manera podemos visualizar el gran parecido que existe entre los valores leídos. El valor medio de la estación NE73 es de 10 s y de la estación NE81 es de 10.2 s.

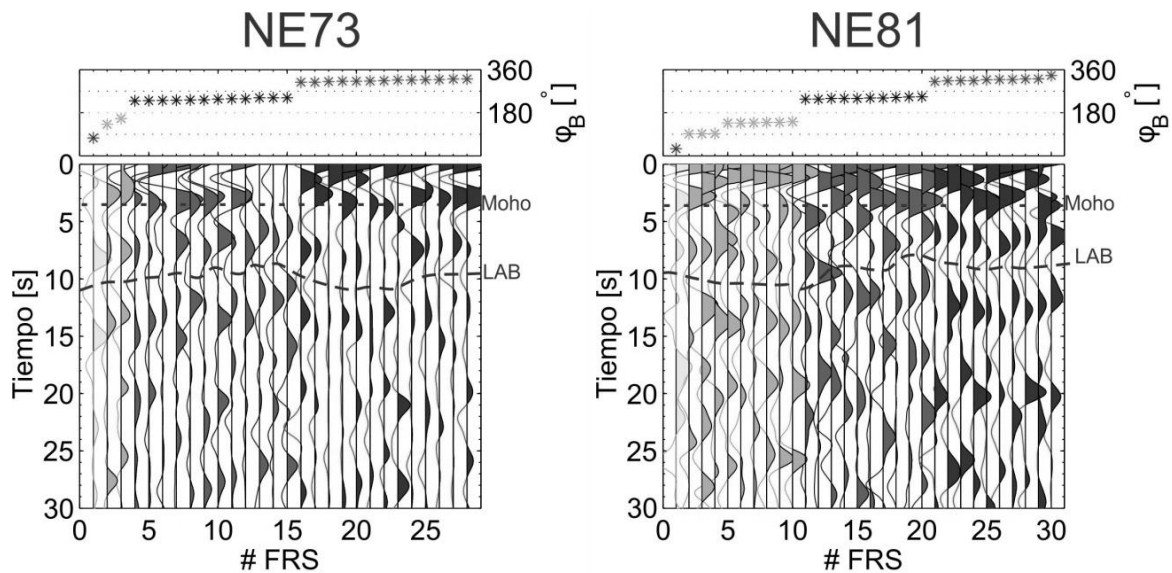


Figura 4.6. Estaciones NE73 (izquierda) y NE80 (derecha). Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa, el valor medio de la estación NE73 es de 10s y de la estación NE81 es de 10.2 s. Con línea punteada está señalado el Moho, los valores en tiempo fueron obtenidos de Persaud et al. (2007) de las estaciones correspondientes.

#### 4.1.5 Estación NE74

En la estación NE74 se obtuvo un total de 19 *FRS*, los pulsos que se relacionan con la frontera litosfera-astenosfera se encuentran entre los 9.7 s y los 13 s (Figura 4.7).

Con respecto a la distribución de eventos en los cuadrantes de azimut inverso: en el cuadrante NE tenemos solo dos eventos, mientras que los cuadrantes NE, SW y NW se encuentran moderadamente muestreados.

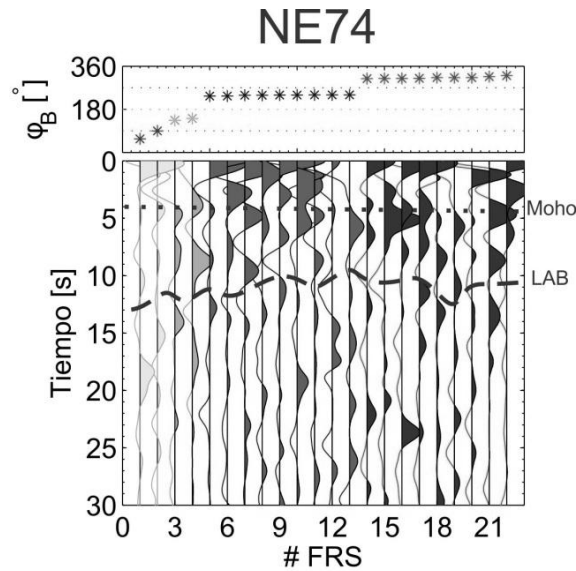


Figura 4.7. Estación NE74. Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre 0° y 90°; en gris claro, entre 90° y 180°; en gris oscuro 180° y 270° y en negro, entre 270° y 360°. Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa, se encuentran alrededor de los 9.7 s y 13 s. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación correspondiente.

#### 4.1.6 Estación NE75

En la estación NE75 se obtuvieron un total de 21 *FRS*, los pulsos negativos asociados con la frontera litosfera-astenosfera se encuentran alrededor de los 8.5 s y 13.5 s, tal y como se muestra en la Figura 4.8, se encuentran marcados con línea discontinua gruesa.

La distribución de eventos en los cuadrantes de azimut inverso es la siguiente: cuadrante NE pobremente muestreado, cuadrantes SE y SW medianamente muestreados en tanto que el cuadrante NW es el cuadrante con mayor número de muestras.

#### 4.1.7 Estaciones NE76 y NE82

Ahora toca el turno de las estaciones NE76 y NE82; en la estación NE76 obtuvimos 27 *FRS*, la serie de pulsos negativos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera se encuentra entre los 8.5 s y 14 s. Mientras que en la estación NE82 se tiene un total de 30 *FRS*, los pulsos negativos identificados están alrededor de los 7.5 s y 12.5 s.

El muestreo de los eventos en los cuadrantes de azimut inverso de menor a mayor (para ambas estaciones): NE, NW, SE y SW.

Comparando los valores leídos para los pulsos asociados con la frontera litosfera-astenosfera para ambas estaciones es posible apreciar cierta similitud entre ellos tal y como lo podemos observar en la Figura 4.9.

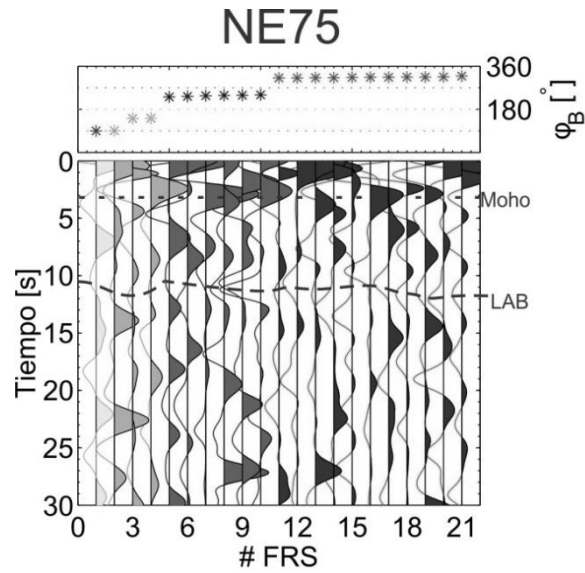


Figura 4.8. Estación NE75. Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa, y se encuentran alrededor de los 8.5 s y 13.5 s. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación correspondiente.

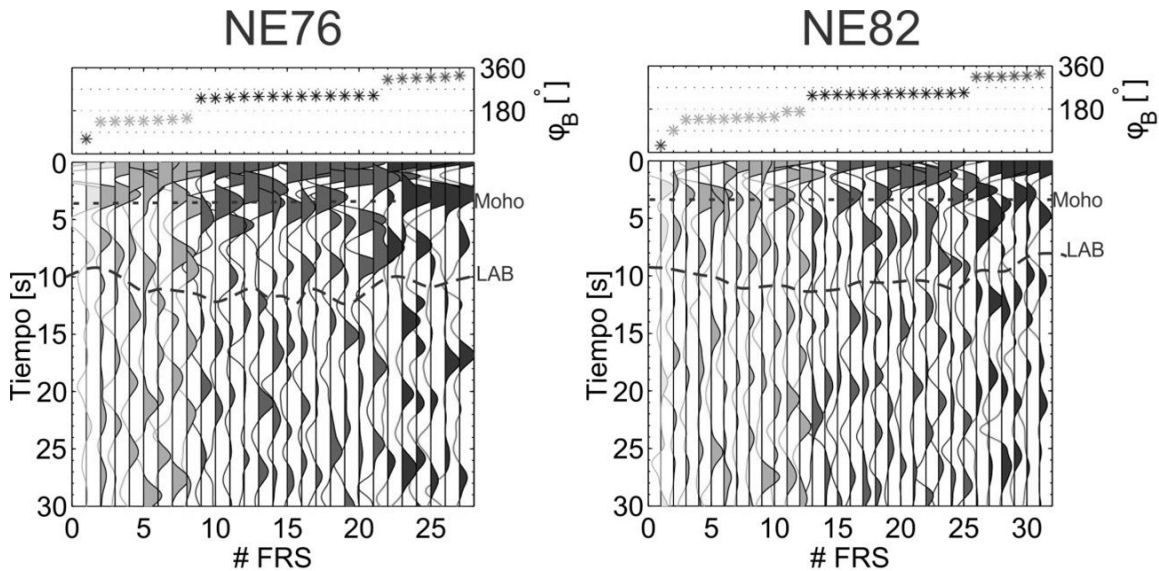


Figura 4.9. Estaciones NE76 (izquierda) y NE82 (derecha). Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa alrededor de los 7.5 s y 12.5 s. Con línea punteada está señalado el Moho, los valores en tiempo fueron obtenidos de Persaud et al. (2007) de las estaciones correspondientes.

#### 4.1.8 Estación NE77

En la estación NE77 obtuvimos un total de 21 *FRS*, los valores en tiempo leídos para los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera oscilan alrededor de los 7.5 s y 13.5 s (Figura 4.10). La cantidad de eventos en los cuadrantes de azimut inverso de menor a mayor es la siguiente: NW, SW y SE. En el cuadrante NE no hay eventos.

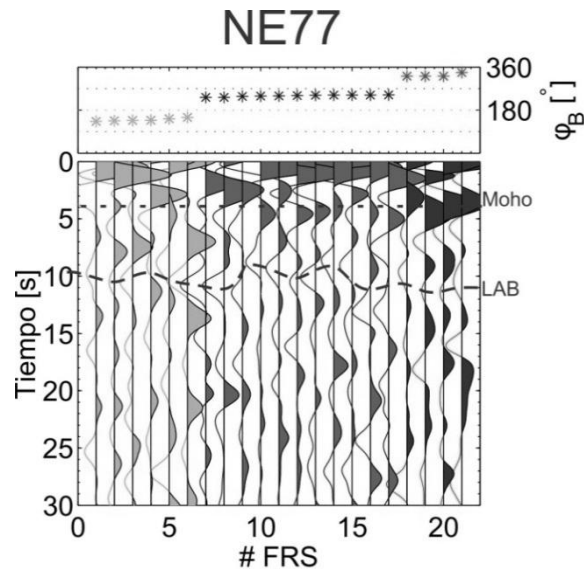


Figura 4.10. Estación NE77. Panel superior: valores de azimuts inversos para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa entre los 7.5 s y 13.5 s. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación correspondiente.

#### 4.1.9 Estación NE79

En la estación NE79 se obtuvieron 20 trazas de *FRS*, identificamos nuestro pulso objetivo entre los 6.5 s y 10.5 s (Figura 4.11). A pesar de que las *FRS* provienen de diferentes rangos de azimut inverso, la variación en tiempo de los pulsos leídos es mínima. La cantidad de eventos para los cuadrantes de azimut inverso de menor a mayor es la siguiente: NW, SE y SW.

#### 4.1.10 Estaciones NE83 y NE84

Continuamos con las estaciones NE83 y NE84 (Figura 4.12), para la estación NE83 tenemos un total de ocho *FRS*, los pulsos de interés se encuentran entre los 6 s y 13 s, en tanto que en la estación NE84 tenemos 14 *FRS* y el tiempo para la serie de pulsos leídos está entre los 5.5 s y 10 s. Los resultados de la estación NE84 son más confiables que los de la estación NE83 debido a la cantidad y calidad de *FRS* obtenidas.

La distribución del muestreo de eventos en los cuadrantes de azimut inverso de menor a mayor para ambas estaciones: SE, NW y SW.

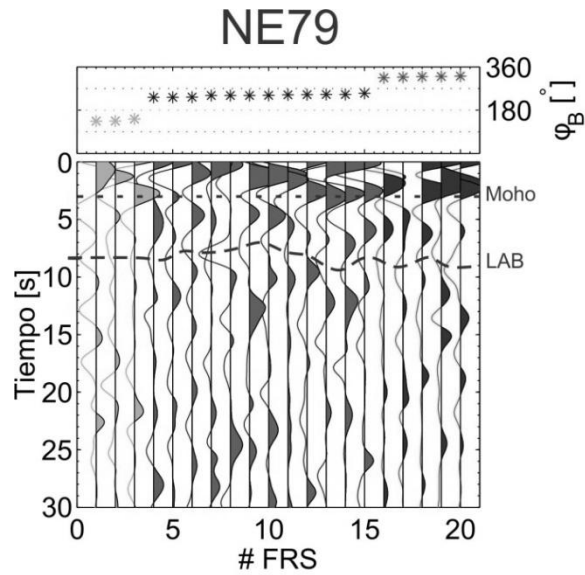


Figura 4.11. Estación NE79. Panel superior: valores de azimut inverso para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua entre los 6.5 s y 10.5 s aproximadamente. Con línea punteada está señalado el Moho, este valor fue tomado de Persaud et al. (2007) de la estación correspondiente.

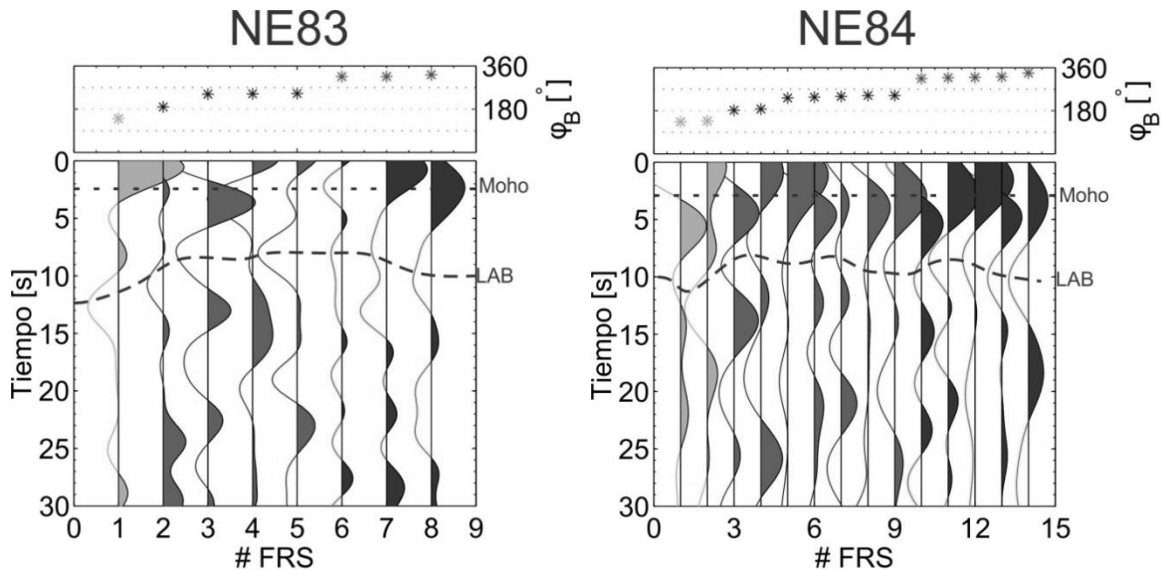


Figura 4.12. Estación NE83 (izquierda) y NE84 (derecha). Panel superior: valores de azimuts inversos para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; en gris claro, entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ ; en gris oscuro  $180^\circ$  y  $270^\circ$  y en negro, entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua; para la estación NE83 se encuentran entre los 6 s y 13 s y en la estación NE84 se encuentran alrededor de los 5.5 s y 10 s. Con línea punteada está señalado el Moho, los valores en tiempo fueron obtenidos de Persaud et al. (2007); en el caso de la estación NE84 los valores correspondientes al Moho son de la estación NE78.

#### 4.1.11 NE85

Por último, en la estación NE85 obtuvimos un total de nueve *FRS*, es una de las estaciones con menor cantidad de *FRS*, el valor leído e interpretado en tiempo para la serie de pulsos asociada con la frontera litosfera-astenosfera oscila entre los 5.5 s y los 9.5 s (Figura 4.13).

La calidad y cantidad de *FRS* en esta estación es pobre; sin embargo, es posible apreciar el pulso asociado a la frontera litosfera-astenosfera.

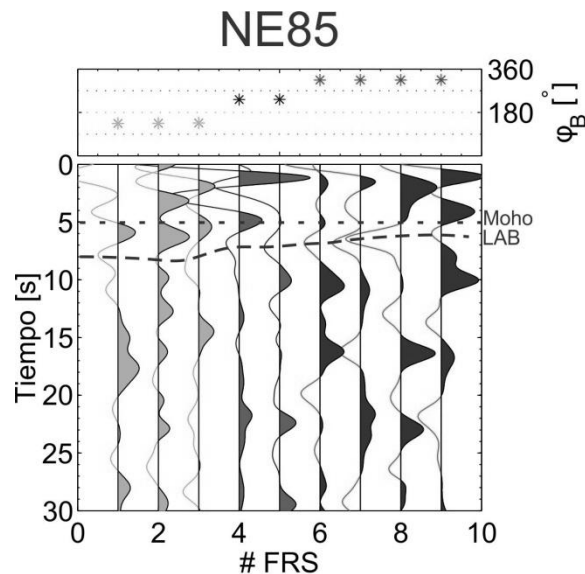


Figura 4.13. Estación NE85. Panel superior: valores de azimuts inversos para cada una de las *FRS*. Panel inferior: *FRS* ordenadas por azimut inverso; en blanco corresponden a los azimuts inversos entre 0° y 90°; en gris claro, entre 90° y 180°; en gris oscuro 180° y 270° y en negro, entre 270° y 360°. Los pulsos que se interpretan como la frontera litosfera-astenosfera están marcados con línea discontinua gruesa entre los 5.5 s y 9.5 s. Con línea punteada está señalado el Moho, los valores en tiempo fueron obtenidos de Persaud et al. (2007) de la estación NE78.

#### 4.1.12 Resumen de resultados de *FRS* en tiempo

La distribución de los valores leídos en tiempo para cada una de las trazas de *FRS* y para cada estación se encuentra en los histogramas de la Figura 4.14, la mediana de los valores está señalada en cada histograma.

El valor de mediana en cada una de las estaciones permite observar diferentes regiones que existen en la zona mapeada:

- 1.- De acuerdo con su valor de mediana, las estaciones ubicadas en la placa de Norteamérica (Tabla 4.1) muestran diferencias con respecto a las localizadas en la península de Baja California (Tabla 4.2), mientras que la diferencia en tiempos entre el valor más pequeño y el mayor es de 0.8 s (estaciones ubicadas en la placa de Norteamérica). En tanto que la diferencia para las estaciones localizadas en la península de Baja California es de 4.4 s, tomando en cuenta la estación NE71 y NE85.

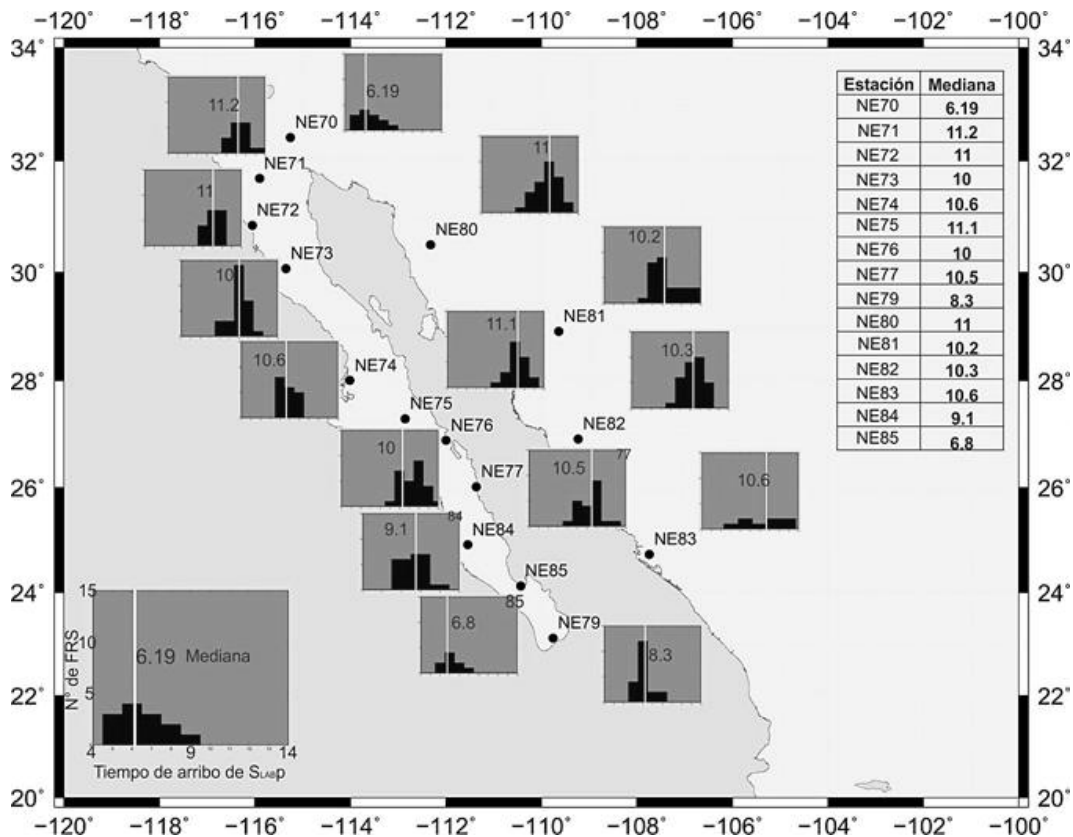


Figura 4.14. Mapa de la red de estaciones NARS-Baja; en cada histograma se encuentra representada la distribución de los valores en tiempo leídos en las *FRS* para el pulso negativo que indica la conversión de ondas S a P en la frontera litosfera-astenosfera; la mediana de los valores está marcada con una línea blanca y es el valor indicado en cada histograma.

Tabla 4.1. Tiempo para  $S_{LABP}$  en las estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa (placa de Norteamérica).

Estaciones	NE80	NE81	NE82	NE83
Mediana (s)	11	10.2	10.3	10.6

Tabla 4.2. Tiempo para  $S_{LABP}$  en las estaciones ubicadas en la península de Baja California.

Estaciones	NE71	NE72	NE73	NE74	NE75	NE76	NE77	NE84	NE85	NE79
Mediana (s)	11.2	11	10	10.6	11.1	10	10.5	9.1	6.8	8.3

2.- Debido a la diferencia entre los valores de mediana en la península de Baja California, es posible dividir esta región en dos subregiones:

a) Estaciones ubicadas al norte y centro de la península de Baja California (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Tiempo para  $S_{LABP}$  en las estaciones ubicadas al norte de la península de Baja California.

Estación	NE71	NE72	NE73	NE74	NE75	NE76	NE77
Mediana (s)	11.2	11	10	10.6	11.1	10	10.5



b) Estaciones ubicadas al sur del golfo (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Tiempo para  $S_{LABP}$  en las estaciones localizadas al sur de la península de Baja California.

Estación	NE84	NE85	NE79
Mediana (s)	9.1	6.8	8.3

Observamos que en general las estaciones del norte y centro de la península de Baja California presentan valores mayores que aquellas estaciones ubicadas al sur de la península.

En la península de Baja California los valores de mediana varían de acuerdo a la cercanía a la costa del golfo (los valores son menores si la estación se encuentra cercana a la costa del golfo), a excepción de la estaciones NE77 y NE84.

Los tiempos de las parejas de estaciones NE71-NE80 y NE77-NE83 (Figura 4.14) son comparables. La característica importante de estas parejas de estaciones es que están conformadas por una estación en la península y la otra en la placa de Norteamérica.

#### 4.2 Valores de profundidad de LAB por debajo de cada una de las estaciones

Para estimar la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera (LAB) por debajo de las estaciones en estudio, adaptamos la técnica de inversión que presentaron Zhu & Kanamori (2000) para funciones de receptor P.

La diferencia en tiempos de viaje de las fases S y  $S_{LABP}$  depende del espesor  $H_{Tot}$  (ver figura 4.15) y de los promedios de velocidades ( $V_P$  o  $V_S$ ) y  $V_P/V_S$ ;  $H_{Tot}$  es la suma del espesor de la corteza,  $H_m$ , y del espesor entre el Moho y LAB, que llamaremos  $H_2$ .

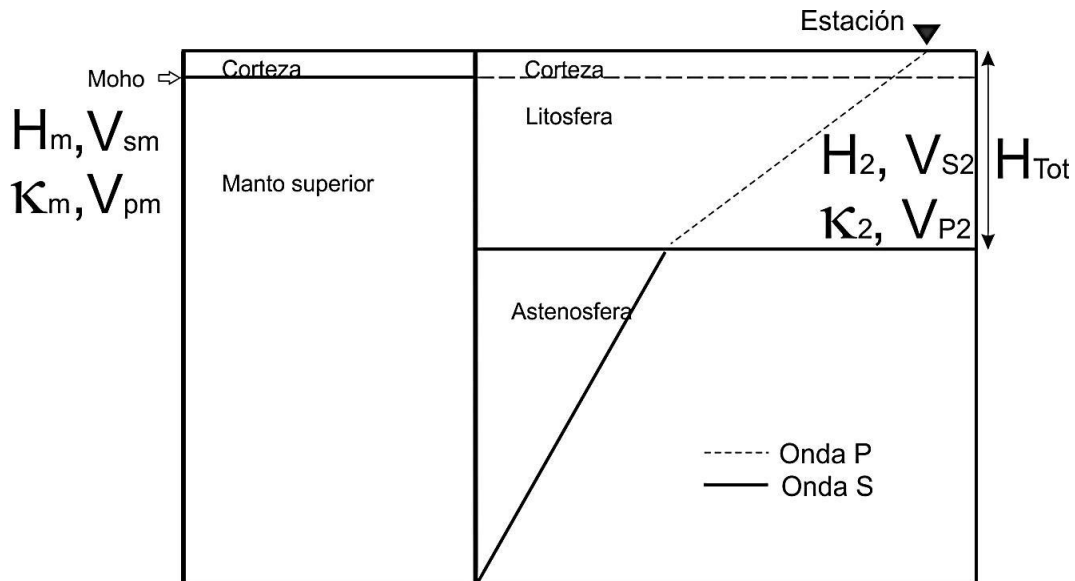


Figura 4.15. Modelo utilizado; donde  $H_m$  es la profundidad al Moho (1ª capa),  $\kappa_m = V_{Pm}/V_{Sm}$  de la primera capa,  $V_{Pm}$  y  $V_{Sm}$  son los promedios de velocidades P y S, respectivamente, en la corteza (1ª capa);  $H_2$  es el espesor entre la corteza y la astenosfera (2ª capa),  $\kappa_2 = V_{P2}/V_{S2}$  en la 2ª capa,  $V_{P2}$  y  $V_{S2}$  son los promedios de velocidades P y S de la 2ª capa respectivamente.  $H_{Tot}$  es el valor de espesor calculado para la litosfera.

Empleamos los valores de  $H_m$  y  $\kappa = V_p/V_s$  para la corteza obtenidos por Persaud et al. (2007), de tal manera que solo resta estimar  $H_2$  y  $\kappa_2$ , para finalmente poder calcular  $H_{Tot}$  (profundidad de LAB por debajo de las estaciones en estudio).

Deducimos la expresión 4.1 para calcular la diferencia en tiempos de las fases S y  $S_{LABp}$  de acuerdo al modelo de capas utilizado (Figura 4.15):

$$t_S - t_{S_{LABp}} = H_2 \left[ \sqrt{\frac{1}{V_{S2}^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_{P2}^2} - p^2} \right] + H_m \left[ \sqrt{\frac{1}{V_{Sm}^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_{Pm}^2} - p^2} \right], \quad 4.1$$

donde:

$t_S$  = Tiempo teórico de arribo de la fase S.

$t_{S_{LABp}}$  = Tiempo teórico de arribo de la fase  $S_{LABp}$ .

$p$  = Parámetro de rayo cuya relación con el ángulo de incidencia está dada por  $p = \text{sen}(i)/V$ .

$V_{S2}$  = Promedio de velocidades de la onda S en la segunda capa.

$V_{P2}$  = Promedio de velocidades de la onda P en la segunda capa.

$V_{Sm}$  = Promedio de velocidades de la onda S en el Moho.

$V_{Pm}$  = Promedio de velocidades de la onda P en el Moho.

En este método, el valor  $V_{P2}$  debe ser especificado, el valor que empleamos fue el de 8.04 km/s para todas las estaciones, de acuerdo con el modelo de velocidades IASP91.

El procedimiento apila las amplitudes de las *FRS* en el tiempo predicho por la Ecuación 4.1; cuando las fases se encuentran apiladas coherentemente se realiza la búsqueda del error mínimo con la técnica de recristalización simulada (*simulated annealing*) (Figura 4.16) y una técnica de remuestreo (*bootstrap*), detalladas en Persaud et al. (2007).

Debido al corte de las ventanas de tiempo<sup>16</sup> (Capítulo 3) y a la baja amplitud de los múltiples de la fase  $S_{LABp}$ , no es posible darle robustez al método mediante el empleo de múltiples; sin embargo es posible dar robustez al procedimiento mediante la identificación en tiempo de la fase  $S_{MohoP}$  en las *FRS*.

En la Tabla 4.5 mostramos, para cada estación, los valores de profundidad calculados para la frontera litosfera-astenosfera derivados de este estudio con sus respectivas incertidumbres. Con la finalidad de mostrar de manera gráfica los espesores determinados en este trabajo elaboramos la Figura 4.17, en donde para cada estación el valor de profundidad está representado mediante un círculo.

<sup>16</sup> Los sismogramas fueron cortados en ventanas de tiempo que incluían 90 s antes del arribo de la onda S directa y 30 s después.

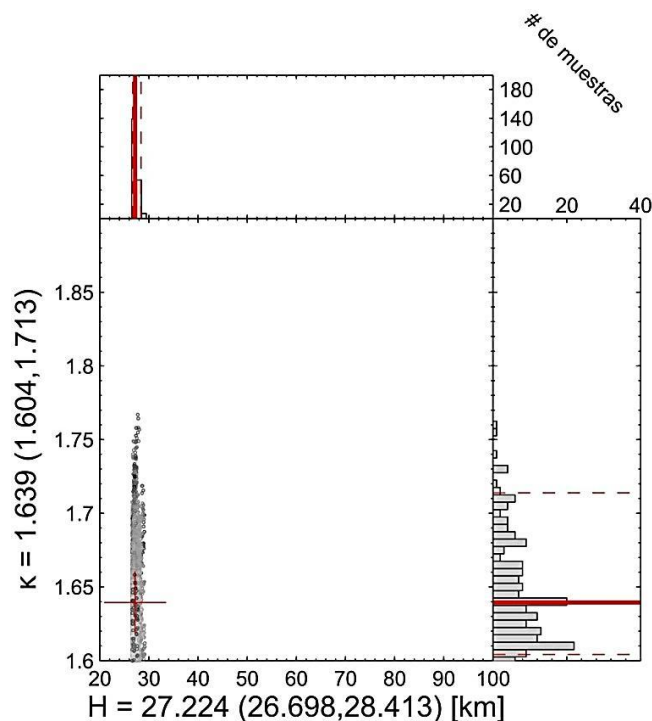


Figura 4.16. Apilado de *FRS* de la estación NE70, la cruz roja indica la mejor solución. Los histogramas muestran la distribución de resultados posibles para los valores del espesor  $H_2$  (histograma horizontal), de la segunda capa (entre el Moho y LAB), y  $\kappa_2 = V_{P2}/V_{S2}$  (histograma vertical).

Tabla 4.5. Resumen de los datos de profundidad obtenidos y los datos a priori empleados.

Estación	Espesor de la 1ª capa (corteza) <sup>a</sup> (km)	$\kappa$ de la 1ª capa (corteza) <sup>a</sup>	Espesor entre Moho y LAB (km)	$\kappa$ entre Moho y LAB	Profundidad Total a LAB (km)
NE70	26.6(26.1,27.1) <sup>b</sup>	1.84(1.81,1.86) <sup>b</sup>	27.2(26.7,28.4)	1.63(1.60,1.71)	53.8(52.8,55.5)
NE71	33.7(33.2,33.9)	1.80(1.79,1.81)	49.6(46.9,52.5)	1.80(1.72,1.88)	83.3(80.1,86.4)
NE72	31.9(31.2,32.5)	1.85(1.82,1.88)	65(61.5,68.5)	1.65(1.61,1.72)	96.9(92.7,101)
NE73	37.5(35.8,39.6)	1.81(1.75,1.87)	38.3(37.6,39.8)	1.80(1.70,1.89)	75.8(73.4,79.4)
NE74	33.9(32.4,35.4)	1.77(1.70,1.82)	62(58.9,64.61)	1.78(1.67,1.88)	95.9(91.3,100)
NE75	27.6(27.3,27.9)	1.79(1.78,1.81)	57.8(54.7,61.6)	1.78(1.67,1.89)	85.4(82.0,89.5)
NE76	20.9(20.5,21.4)	1.83(1.80,1.85)	63.8(60.4,67.4)	1.79(1.67,1.89)	84.7(80.9,88.8)
NE77	23.7(23.3,24.0)	1.80(1.77,1.8)	48.1(45.8,50.7)	1.79(1.69,1.88)	71.8(69.1,74.7)
NE79	25.8(25.1,26.5)	1.70(1.66,1.75)	36.2(34.6,37.9)	1.78(1.69,1.89)	62(59.7,64.4)
NE80	32.1(30.8,33.4)	1.64(1.60,1.68)	67.4(64.2,71.3)	1.63(1.60,1.71)	99.5(95,104.7)
NE81	28.1(27.2,29.2)	1.74(1.71,1.77)	54.5(51.4,57.3)	1.64(1.60,1.73)	82.6(78.6,86.7)
NE82	25.9(25.4,26.5)	1.73(1.71,1.76)	53(50.7,56)	1.77(1.67,1.89)	79(75.2,82.5)
NE83	20.3(20.0,21.2)	1.76(1.69,1.82)	55.4(52.9,58.6)	1.64(1.60,1.71)	75.7(72.9,79.8)
NE84	29.5(28.2,31.0) <sup>c</sup>	1.75(1.71,1.79) <sup>c</sup>	54.9(51.9,57.9)	1.63(1.60,1.70)	84.4(80.1,88.9)
NE85	29.5(28.2,31.0) <sup>c</sup>	1.75(1.71,1.79) <sup>c</sup>	30.8(29.7,32.6)	1.63(1.6,1.71)	60.3(57.3,63.6)

<sup>a</sup> Persaud et al. (2007); <sup>b</sup> Valor tomado de la estación DVT; <sup>c</sup> Valor correspondiente a la estación NE78.

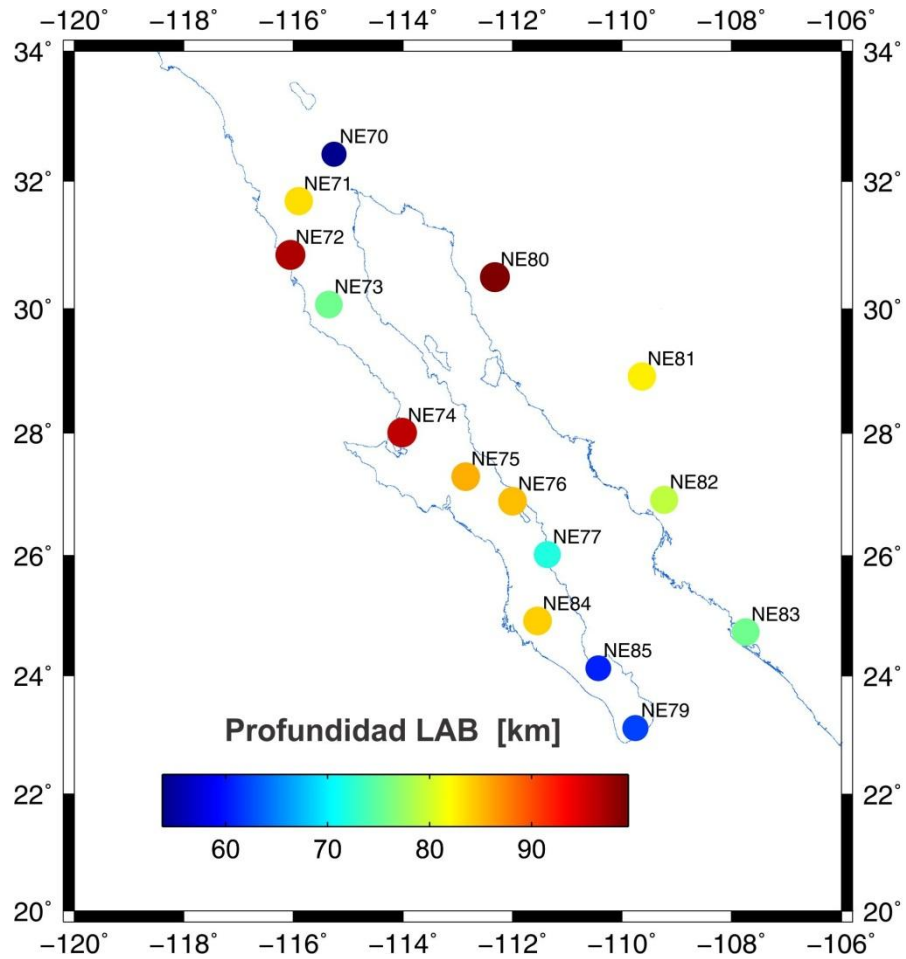


Figura 4.17. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera bajo las estaciones de la red NARS-Baja (modelo de referencia IASP91). Los colores representan el valor de profundidad de acuerdo con la barra de colores.

# CAPÍTULO 5

## Discusión y conclusiones

Este capítulo pone fin a este trabajo de tesis; el propósito de este apartado es reunir y discutir la información del Capítulo 2 concerniente a la apertura del golfo de California con los datos de espesor de la litosfera calculados en el Capítulo 3 y analizados en el Capítulo 4, para discutir el estado actual de la litosfera que rodea al golfo de California.

Iniciaremos el capítulo revisando nuestros resultados de las *FRS* en tiempo, continuamos con el análisis de nuestros resultados en profundidad de la litosfera relacionados a los diferentes procesos tectónicos ligados a la apertura del golfo de California.

Para aceptar cualquier hipótesis sobre los procesos tectónicos que sucedieron o se llevan a cabo en el golfo de California es indispensable conocer las propiedades físicas de la litosfera en la zona de estudio. Con el propósito de contribuir a tales conocimientos en este trabajo se ha llevado a cabo la estimación de la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera, además al hacer ese cálculo también estamos estimando el grosor de las secciones rígidas de la litosfera (placas tectónicas) que se mueven como una unidad sobre el material de la astenosfera.

### 5.1 Frontera litosfera-astenosfera mapeada en las *FRS* en tiempo

El manto superior está relacionado con una zona de bajas velocidades sísmicas probablemente asociadas a zonas de fusión parcial del manto (Wittlinger et al., 2004). La respuesta sísmica de la frontera litosfera-astenosfera está representada por la fase convertida  $S_{LABP}$  observable en las trazas de *FRS* mostradas en el capítulo anterior.

En este apartado examinaremos primero las estaciones ubicadas en la península de Baja California (NE70, NE71, NE72, NE73, NE74, NE75, NE76, NE77, NE79, NE84 y NE85).

Los valores en tiempo leídos para la fase convertida  $S_{LABP}$  es mayor para las estaciones situadas al norte y centro (excepto la estación NE70); en estos valores se encuentra reflejado el efecto de una gran tasa de sedimentación en la zona o de una capa muy gruesa (González-Fernández et al., 2005).

La estación NE70 se encuentra sobre el límite entre placas Pacífico-Norteamérica, los valores en tiempos leídos para la fase  $S_{LABP}$  son menores (4.3-9.6 s) con respecto a la estación más cercana NE71 (9.5-14 s); las lecturas de la estación NE70 son menores debido a la influencia de la región de Salton Through, que es una zona que fue afectada por procesos de extensión en la corteza. Persaud et al. (2007) mostraron mediante *FRP* en estaciones cercanas a la estación NE70 que la corteza tiene un espesor pequeño con respecto a las demás estaciones (~20 km), de ahí que los valores en tiempo leído para la respuesta de la frontera litosfera-astenosfera son consistentes con los valores leídos para el Moho.

En estaciones ubicadas en los márgenes del golfo observamos que los tiempos leídos de los pulsos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera son menores que las de aquellas estaciones que no lo están, tal es el caso de la estación NE85. Este adelgazamiento es consistente con la disminución en espesor observado en la corteza (por ejemplo, Persaud et al., 2007).

Comparando en su conjunto las estaciones ubicadas en la península de Baja California y las que se encuentran en Sonora y Sinaloa, observamos que los valores leídos que son significativamente diferentes son aquellos que provienen de estaciones ubicadas en el sur de la península de Baja California (tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 del Capítulo anterior).

La variación que existe entre los valores en tiempo leídos para las estaciones localizadas en Sonora y Sinaloa (NE80, NE81, NE82 y NE83) es mínima aunque es posible observar que en el norte los valores leídos son mayores (por ejemplo la estación NE80).

## **5.2 Profundidad de la litosfera bajo la red estaciones NARS-Baja**

En el mapa de la Figura 5.1 se encuentran los principales rasgos tectónicos de la región del golfo de California y el movimiento relativo y absoluto de las placas (Pacífico y Norteamérica). Además se muestra la red de estaciones empleada en este trabajo y los perfiles que se discutirán posteriormente. Con el propósito de comparar los resultados obtenidos, primero analizaremos aquéllos en la península de Baja California, después proseguiremos con las estaciones localizadas en Sonora y Sinaloa.

A partir de los cinco perfiles trazados en la Figura 5.1 es posible dilucidar el estado que guarda el espesor de la litosfera a lo largo de la península de Baja California (perfil D-D', Figura 5.2). Los perfiles A-A', B-B' y C-C' (figuras 5.3 a 5.5), van de norte a sur, son paralelos entre sí y transversales a los perfiles D-D' y E-E'; incluyen estaciones tanto en la península de Baja California como en Sonora y Sinaloa, permitiendo comparar directamente el espesor de la litosfera en la península de Baja de California y en la placa de Norteamérica. El perfil E-E' (Figura 5.6) es paralelo al perfil D-D' y se encuentra ubicado en los estados de Sonora y Sinaloa.

### **5.2.1 Península de Baja California**

La Provincia Extensional del Golfo representa un lugar muy interesante en la región del golfo de California (observar Figura 5.1). Esta zona fue resultado de la transferencia de la península de Baja California a la placa del Pacífico; se encuentra limitada al oeste por la cordillera de Baja California y al este por la Sierra Madre Occidental. Se piensa que dicha provincia se formó principalmente en dos fases: un primer período temprano de extensión y separación continental que formaron las primeras cuencas marinas; la segunda fase continuó con un período de expansión de piso oceánico y formación de fallas transformantes (Fletcher & Munguía, 2000), estos últimos procesos continúan hoy en día. De acuerdo a lo anterior, el régimen de los márgenes del golfo se comportarían mecánicamente de manera diferente con respecto al régimen al interior del golfo (Fletcher & Munguía, 2000). La manera en que este comportamiento se encuentra reflejado en nuestros resultados es el siguiente: observamos

que las estaciones que se encuentran en lo que se ha llamado la Provincia Extensional del Golfo muestran un aparente adelgazamiento en su espesor de litosfera con respecto a las estaciones cercanas (por ejemplo las estaciones NE74 y NE75).

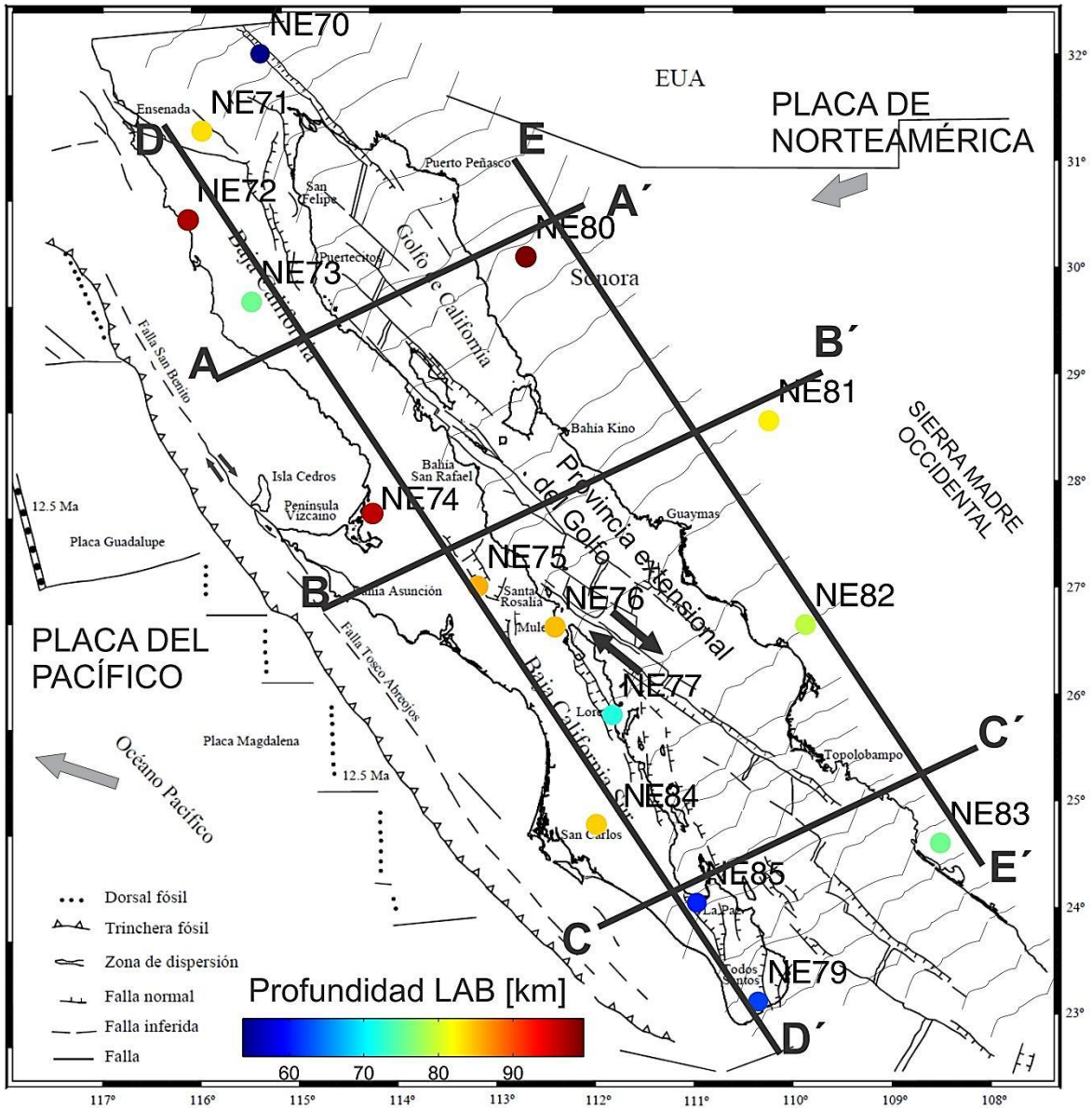


Figura 5.1. Principales rasgos tectónicos de la región del golfo de California (Modificado de Romo et al., 2001). Los espesores estimados de la litosfera están señalados mediante círculos de colores. La Provincia Extensional del Golfo se encuentra señalada con líneas delgadas y tenues. Las líneas negras representan los perfiles obtenidos a partir del apilamiento de *FRS*. Las flechas indican el movimiento de las placas (el color gris claro indica el movimiento absoluto y el color gris oscuro, el movimiento relativo), los movimientos pronosticados son del modelo global HS3-NUVEL1A (Gripp & Gordon, 2002). Los perfiles A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E' corresponden a las figuras 5.2 a 5.5.

La estación NE70 nos permite conocer el espesor de la litosfera al norte del golfo de California. El régimen de extensión durante la apertura del golfo y posterior movimiento entre placas (Pacífico y Norteamérica) que sufrió esta zona ha causado un adelgazamiento importante de la corteza continental; esta extensión se encuentra evidenciada por la existencia de cuencas abandonadas y activas (como la cuenca de Wagner), además de sistemas de fallas pobremente organizadas. A su vez, dicho adelgazamiento de la corteza se encuentra reflejado en el espesor de la litosfera reportado en nuestro trabajo (ver Figura 5.7), aunque nuestro valor de espesor estimado para la litosfera es pequeño, correlaciona muy bien con el ambiente tectónico; a pesar de dicha extensión, en la región no existe evidencia de generación de nuevo piso oceánico como sucede en la boca del golfo (Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989).

La subducción y posterior ruptura de la antigua placa oceánica de Farallón dio como resultado la aparición de dos micro-placas: la de Guadalupe y Magdalena, placas que cesaron su subducción hace aproximadamente 12 millones de años, en varios artículos se ha reportado remanentes de dichas micro-placas (por ejemplo, Zhang et al., 2007; Persaud et al., 2007). De acuerdo con evidencias de anisotropía, Persaud et al. (2007) mostraron que podrían existir remanentes de la placa de Farallón en la estación NE75. La posible ubicación de tales micro-placas se encuentra representada en la Figura 5.1; de ahí que se espera la respuesta de dichos remanentes en las estaciones NE74, N75, NE76, NE77 y NE84.

En general, las estaciones de Baja California Norte y centro (perfil D-D', Figura 5.2) presentan un valor de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera mayor que las estaciones de Baja California Sur (excepto la estación NE70). La diferencia en espesores entre el norte-centro y el sur es de 15.9 km, tomando en cuenta que el promedio del espesor para las estaciones del norte-centro es de  $84.5 \pm 9.3$  km y para el sur es de  $68.9 \pm 13.5$  km.

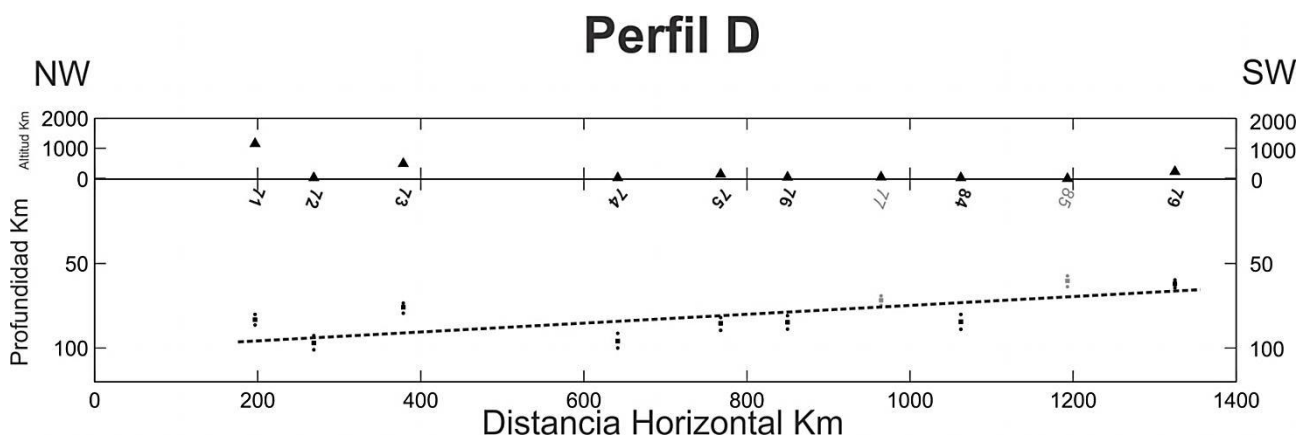


Figura 5.2. Profundidad a la frontera litosfera-astenosfera a lo largo de perfil D-D'. Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde la distancia horizontal a lo largo perfil y en el eje de las ordenadas la profundidad; la línea punteada denota la frontera litosfera-astenosfera. La escala vertical del panel está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación. Las estaciones NE77 y NE85 (gris claro) son estaciones ubicadas en la costa Este de la península de Baja California y cuyo valor es significativamente diferente a las estaciones hacia el Oeste.



El espesor de la litosfera también varía de oeste a este (perfil A-A', Figura 5.3; perfil B-B', Figura 5.4; perfil C-C', figura 5.5; perfil D-D', Figura 5.2) en la península de Baja California (a excepción de la estación NE76); las estaciones del oeste muestran un valor de espesor mayor que las del este.

La variación promedio de la profundidad a la frontera litosfera-astenosfera en las estaciones en la península de Baja California de oeste (NE72) a este (NE71 y NE73, profundidad promedio de  $79.6 \pm 5.3$  km), en el perfil A-A' (Figura 5.3) es de 17.3 km.

En el perfil B-B' (Figura 5.4) se puede ver que la variación del espesor de la litosfera de oeste a este es de hasta de 24.1 km (diferencia entre las profundidades encontradas en las estaciones NE74, al oeste, y NE77, al este). Mientras que la diferencia en las estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa es de 3.6 km.

En el perfil C-C' (Figura 5.5), la diferencia de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera entre las estaciones del oeste (NE84) y del este (NE85 y NE79, profundidad promedio de  $61.2 \pm 1.2$  km) en península de Baja California es de 23.2 km.

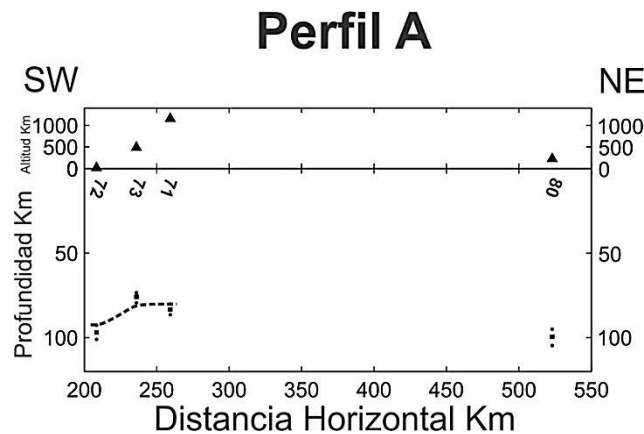


Figura 5.3. Profundidad hacia la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil A-A'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este en la península) de la litosfera interpretada. La escala vertical está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

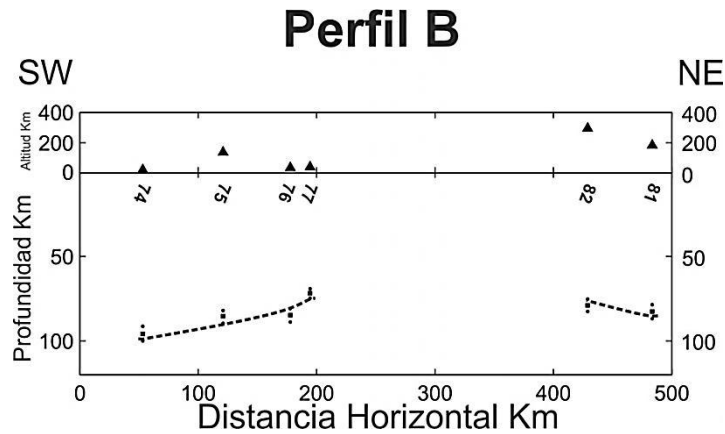


Figura 5.4. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil B-B'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este) de la litosfera interpretada. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación. La escala vertical del panel inferior esta exagerada dos veces.

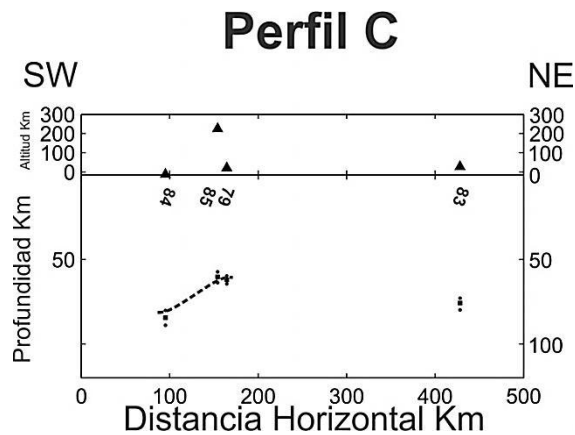


Figura 5.5. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo de perfil C-C'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este en la península) de la litosfera interpretada. La escala vertical del está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

## 5.2.2 En la placa de Norteamérica (estados de Sonora y Sinaloa, México)

El espesor de la litosfera en esta zona disminuye de norte a sur (perfil E-E', Figura 5.6) alcanzando su valor máximo en la estación NE80 y el mínimo en la estación NE83, esta variación es observable también en la corteza (ver Figura 5.6). La diferencia de los espesores de la litosfera entre estas dos estaciones es de 23.8 km.

## Perfil E

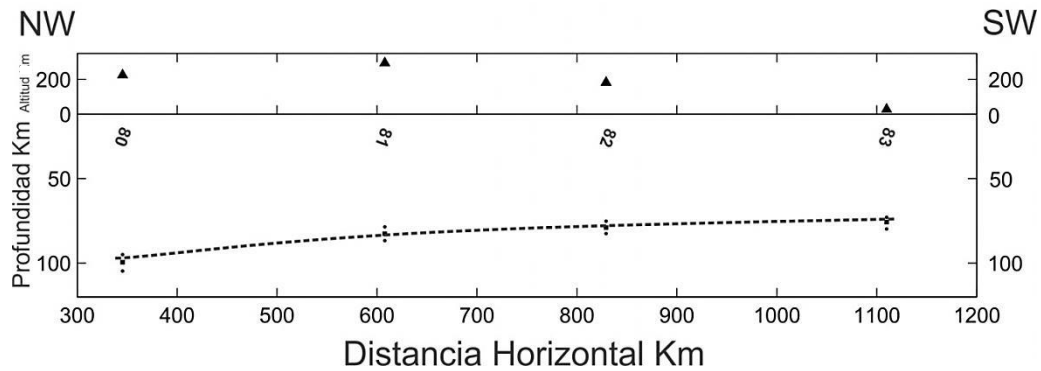


Figura 5.6. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil E-E'. Estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose hacia el sur) de la litosfera interpretada. La escala vertical está exagerada dos veces. En el panel superior se representa las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

Las estaciones NE80, NE82 y NE83 se encuentran en la zona que se ha marcado como la Provincia Extensional del Golfo; dado que la estación NE81 no se encuentra en dicha zona nos podría servir de referencia, entonces tenemos que en esta estación el valor estimado para la litosfera no varía en gran proporción con respecto a las estaciones cercanas (NE80 y NE82) y más aun, nuestros resultados nos hacen pensar en una litosfera por debajo del continente americano de espesor con muy poca variación.

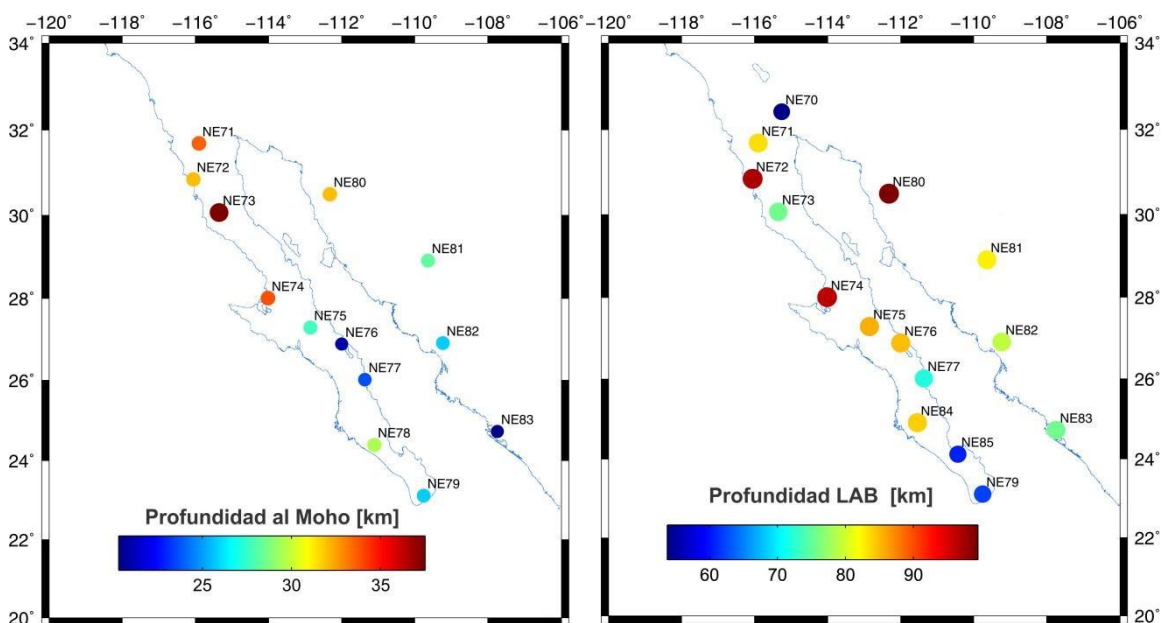


Figura 5.7. Profundidades al Moho (izquierda, los valores fueron tomados de Persaud et al., 2007), y profundidades a la frontera litosfera-astenosfera (derecha), modelo de referencia IASP91.

Las variaciones de espesor de la litosfera reportadas en los perfiles anteriormente presentados son consistentes con la variación del espesor de la corteza (Figura 5.7). Persaud y colaboradores (2007) obtuvieron mediante un análisis de *FRP* valores de espesor de la corteza determinando que disminuye de norte a sur (con un factor de dos) y de oeste a este en la península de Baja California.

### 5.2.3 Estudios preexistentes de espesor de la litosfera alrededor del golfo de California

Trabajos previos han mapeado la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a nivel global, coincidiendo en que el promedio de grosor de la frontera litosfera-astenosfera varía según el ambiente tectónico, los valores que se han calculado son los siguientes (Rychert & Shearer, 2009):  $70\pm 4$  km (océanos);  $81\pm 2$  km (regiones orogénicas del Fanerozoico y cinturones magmáticos);  $82\pm 6$  km (plataformas del Fanerozoico) y  $95\pm 4$  km (escudos del Precámbrico y plataformas). Asimismo, en trabajos previos se ha investigado el espesor de la litosfera en la región del golfo de California (por ejemplo, Rychert & Shearer, 2009; Abt et al., 2010; Seavey et al., 2010; Fischer et al., 2010), dichos estudios se han llevado a cabo sobre todo al norte del golfo, la Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos por los diferentes trabajos.

Tabla 5.1. Valores de profundidad (en kilómetros) para la frontera litosfera-astenosfera calculados por diferentes autores.

Estación	Rychert & Shearer (2009) <sup>1</sup>	Fischer et al. (2010) <sup>2</sup>	Abt et al. (2010)	Seavey et al. (2010)	Este trabajo
NE70	x	50	52	X	53.8 (52.8,55.5)
NE71	60	63	67	X	83.3 (80.1,86.4)
NE79	X	X	x	58	62 (59.7,64.4)
NE81	X	X	x	73	82.6 (78.6,86.7)

<sup>1</sup> Valor tomado de un mapa global de profundidades de la frontera litosfera-astenosfera publicado por Rychert & Shearer, (2009).

<sup>2</sup> Datos obtenidos de Fischer et al. (2010) a partir de un mapa global.

Analizando los valores de la Tabla 5.1 observamos:

- En la estación NE70, el valor de profundidad calculado en este trabajo concuerda prácticamente con el obtenido por Fischer et al. (2010) y el conseguido por Abt et al. (2010). El valor de Seavey et al. (2010) presentado en la tabla 5.1 corresponde al valor de profundidad de la litosfera-astenosfera calculado en Salton Trough. La estación NE70 se encuentra en una zona que fue afectada por procesos de extensión que probablemente provocaron un adelgazamiento en la litosfera, de tal manera que los resultados son consistentes con la historia tectónica de la zona.
- Bajo la estación NE71 estimamos un espesor de la litosfera de 83 km, valor 16 km mayor al presentado por los demás autores (Rychert & Shearer, 2009; Fischer et al., 2010; Abt et al., 2010; Seavey et al., 2010). Cabe destacar que en esta estación fue particularmente difícil marcar los pulsos correspondientes a la respuesta de la frontera litosfera-astenosfera. Los valores presentados por Rychert & Shearer (2009) y

Fisher et al. (2010) provienen de un mapa global (resultado de un método de interpolación), mientras que las estimaciones de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera presentadas en este trabajo son estimaciones de espesor de la litosfera por debajo de las estaciones.

Parte de la diferencia entre los valores de Abt et al. (2010) es atribuible a la falta de robustez en el método para calcular las profundidades. La falta de robustez en el procedimiento es provocada por la gran dependencia que existe entre  $H_2$  (espesor del manto litosférico) y  $\kappa_2=V_p/V_s$  (cociente del promedio de velocidades de onda P y S en el manto litosférico); ésta puede ser reducida como comentábamos en el Capítulo 4 incorporando al algoritmo las lecturas de la fase  $S_{\text{MohoP}}$ .

- La estación NE79 representa un punto de coincidencia entre los resultados obtenidos por Seavey et al. (2010) y los nuestros, la diferencia es de tan sólo 4 km. Es una diferencia razonable considerando que los cálculos fueron hechos con métodos diferentes; Seavey et al. (2010) realizaron sus cálculos a partir de estudios de ondas Rayleigh. Cabe mencionar que en la estación NE79, las *FRS* calculadas son de buena calidad, esta condición contribuye a que la estimación de profundidad realizada tenga un menor margen de error.
- En la estación NE81, la diferencia entre los resultados calculados por Seavey et al. (2010) y los nuestros es de 9.6 km. La calidad y cantidad de trazas de *FRS* en la estación NE81 es una de las mejores de este trabajo. Esta condición nos permite respaldar el resultado que ofrecemos en este trabajo.

### 5.3 Conclusiones

Hemos constatado que la técnica de *FRS* es una buena herramienta para mapear la frontera litosfera-astenosfera, debido a sus características técnicas. Probablemente la más importante de ellas es que las trazas de *FRS* no se encuentran contaminadas por múltiples de la corteza. Los tiempos de arribo de la fase  $S_{\text{LABP}}$  cambian de acuerdo a la región mapeada:

- a) Las estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa (placa de Norteamérica, estaciones NE80, NE81, NE82 y NE83) en general presentan mayores tiempos de arribos que aquellas situadas en la península de Baja California. Estas estaciones muestran a la litosfera en esa zona como un gran bloque que disminuye su espesor de norte a sur.
- b) En las estaciones ubicadas en la península de Baja California (NE71, NE72, NE73, NE74, NE75, NE76, NE77, NE84, NE85 y NE79) se observa que los cambios en los tiempos de arribo se dan de oeste a este y de norte a sur. Las estaciones que se encuentran más cercanas al golfo de California presentan tiempos de arribo menores que aquellas que no lo están. En tanto que las estaciones que se encuentran al norte y centro de la península de Baja California presentan lecturas de tiempos de arribo mayores (excepto NE70) que aquellas que se encuentran al sur (NE84, NE85 y NE79).

La compleja historia tectónica de la apertura del golfo de California se encuentra muy relacionada con la separación de la península de Baja California de la placa de Norteamérica.

Además de la subducción de antiguas placas tectónicas (placa de Farallón). Esta historia se encuentra evidenciada en el adelgazamiento reportado en la corteza por Persaud et al. (2007) y Zhang et al. (2007). Tal adelgazamiento también se encuentra reflejado en los resultados de espesor de la litosfera registrados en este trabajo.

El espesor de la litosfera ( $H_2$ ) y el cociente  $\kappa_2=V_p/V_s$  pueden ser estimados con el procedimiento de apilamiento de *FRS* mostrado en el Capítulo 4. Sin embargo, aunque el método empleado para obtener las profundidades de la frontera litosfera-astenosfera da una buena aproximación, el método puede ser mejorado incorporando al procedimiento las lecturas de los arribos de la fase  $S_{\text{MohoP}}$  y los múltiples de la fase  $S_{\text{LABP}}$ . Para poder utilizar estos múltiples necesitaríamos ventanas de tiempo que incluyeran al menos 120 s antes del arribo de la onda S.

Este trabajo constituye un primer vistazo a la frontera litosfera-astenosfera de la región del golfo de California. Con el objetivo de obtener un modelo más general de la zona y continuando con nuestra línea de estudio es necesario obtener *FRS* de todas las estaciones disponibles en la zona; una vez calculadas dichas *FRS*, mostrarlas de diferentes maneras, por ejemplo en perfiles, migradas a profundidad, etc.; además de incluir eventos con distancias epicentrales en el intervalo de  $85^\circ$ - $105^\circ$  para estudiar la fase *SKS* con el propósito de mapear otras discontinuidades (por ejemplo la discontinuidad de Lehmann o las discontinuidades a 410 ó 660 km). Todo con el único fin de describir las características del golfo de California que puedan ser referidas mediante la evidencia sísmica.

# REFERENCIAS

- Abt, D. L., Fischer, K. M., French, S.W., Ford, H. A., Yuan, H. & Romanowicz B., 2010. North American Lithospheric Discontinuity Structure Imaged By Ps and Sp Receiver Functions, *J. Geophys. Res.*, submitted.
- Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Benoit, M., Bellon, H., Maury, R., Cotten, J., Bourgois, J., Michaud, F., 2001. Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California?, *Geology*, 29, 531-534.
- Ammon, C.J., 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 81, 2504-2510.
- Angus, D. A., Wilson, D. C., Sandvol, E. & Ni, J. F., 2006. Lithospheric structure of the Arabian and Eurasian collision zone in eastern Turkey from S-wave receiver functions, *Geophys. J. Int.*, 166, 1335-1346.
- Atwater, T. M., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, 3513-3636.
- Atwater, T. & Stock, J., 1998. Pacific-North America plate tectonics of the Neogene Southwestern United States: An Update, *Int. Geology Rev.*, 40, 375-402.
- Benoit, M., Aguillón -Robles, A., Calmus, T., Maury, R., Bellon, H., Cotten, J., Bourgois, J., Michaud, F., 2002. Geochemical diversity of Late Miocene volcanism in southern Baja California, México: implication of mantle and crustal sources during the opening of an asthenospheric window, *J. Geol.*, 110, 627-648.
- Buck, W. R., 1991. Modes of continental lithospheric extension, *J. Geophys. Res.*, 96, 20 161-20 178.
- Calmus, T., Aguillón-Robles, A., Maury, R., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J. & Michaud, F., 2003. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaites") from Baja California, México: the role of slab melts, *Lithos.*, 66, 77-105.
- Clayton, R. W. et al., 2004. The NARS-Baja seismic array in the Gulf of California rift zone, *MARGINS Newslett.*, 13, 1-4.
- Clayton, R.W. & Wiggins, R. A., 1976. Source shape estimation and deconvolution of teleseismic bodywaves, *J. R. Astr. Soc.*, 47, 151-177.
- Conly, A., Brenan, J., Bellon, H. & Scott, S., 2005. Arc to rift transitional volcanism in the Santa Rosalía Region, Baja California Sur, Mexico, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 142, 303-341.

Demant, A., 1975. Caracteres Químicos Principales del Vulcanismo Terciario y Cuaternario de Baja California Sur. Relaciones con la Evolución del Margen Continental Pacífico de México. *Revista Instituto Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México, 75(1), 70-83.

DeMets, C. A., 1995. Reappraisal of seafloor spreading lineation in the Gulf of California: implications for the transfer of California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3545-3548.

Dickinson, W. & Snyder, W., 1979. Geometry of subducted slabs related to San Andreas transform, *J. Geol.*, 87, 609-627.

Di Luccio, F. & Clayton, R. W., 2008. Seismic velocity in the Gulf of California from the analysis of Rayleigh wave group velocities, *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract T11A-1849.

Faber, S. & Müller, G., 1980. Sp phases from the transition zone between the upper and lower mantle, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 487-508.

Farra, V. & Vinnik, L., 2000. Upper mantle stratification by P and S receiver functions, *Geophys. J. Int.*, 141, 699-712.

Fenby, S. S., & Gastil, R. G., 1991. A seism-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B. R., eds., *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 47, 79-83.

Fischer, K. M., Ford, H. A., Abt, D. L. & Rychert, C. A., 2010. The lithosphere-Asthenosphere Boundary, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, doi:10.1146/annurev-earth-040809-152438.

Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O. & Gehrels, G.E., 2007. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas: *Geolog. Soc. Am. Bull.*, 119, 1313-1336, doi:10.1130/B26067.1.

Fletcher, J. M. & Munguía, L., 2000. Active continental rifting in southern Baja California, México: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California, *Tectonics*, 19 (6), 1107-1123.

Gastil, R. G., 1981. Volcanic correlations across the Gulf of California, *National Geographic Society Research Reports*, 13, 231-234.

Gastil, G., Diamond, J., Knaack, C., Walawender, M., Marshall, M., Boyles, C. & Chandwick, B., 1990. The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California, *Geolog. Soc. Am. Memoir*, 174, 19-32.

Gastil, R. G., Krummenacher, D. & Minch, J., 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California, *Geolog. Soc. Am. Bull.*, 90, 839-857.



Glazner, A.F., 2009. Drawing the curtain on slab windows in southwestern North America. *GSA*, 105<sup>th</sup> Annual Meeting, Session N° 4.

González-Fernández, A., Dañobeitia, J. J., Delgado-Argote, L. A., Michaud, F., Córdoba, D. & Bartolomé, R., 2005. Mode of extension and rifting history of upper Delfin basins, northern Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 110, B01313, doi:10.1029/2003JB002941.

Gripp, A. E. & Gordon, R. G., 2002. Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophys. J. Int.* 150, 321-361.

Gurrola, H., Baker, G. E. & Minster, J. B., 1995. Simultaneous time domain deconvolution with application to the computation of receiver functions, *Geophys. J. Int.* 120, 537-543..

Havskov, J. & Ottemöller, L., 2010. *Routine data processing in earthquakes seismology with sample data, exercises and software*, Department of Earth Science, University of Bergen, Norway, 380 p..

Hausback, B. P., 1984. Cenozoic volcanism and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. In: Frezell, V.A. (Ed.), *Geology of the Baja California Peninsula: Pacific Section, Soc. Eco. Pal. And Min.*, 39, 219-236.

Heit, B., Sodoudi, F., Yuan, X., Bianchi M. & Kind, R., 2007. An S receiver function analysis of the lithospheric structure in South America, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14307, doi:10.1029/2007GL030317.

Henry, C. D. & Aranda-Gomez, J. J., 2000. Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range, *Tectonophysics*, 318, 1-26.

Kanasewich, E. R., 1973. *Time Sequence Analysis in Geophysics*, The University of Alberta Press., 364.

Karing, D. E. & Jensky, W., 1972. The protogulf of California, *Earth Planet Sci. Lett.*, 17, 169-174.

Klitgord, K. D., Mudie, J. D., Bischoff, J. L. & Henyey, T. L., 1974. Magnetic Anomalies in the Northern and Central Gulf of California, *Geolog. Soc. Am. Bull.*, 85, 815-820.

Kumar, P., 2005. The lithosphere-asthenosphere boundary in the North West Atlantic region. *Earth planet. Sci. Lett.*, 236, 249-257.

Kumar, P., Yuan, X., Kind, R. & Kosarev, G., 2005a. The lithosphere-asthenosphere boundary in the Tien Shan-Karakoram region from S receiver functions - evidence of continental subduction, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L07305, doi:10.1029.

Kumar, P., Yuan, X., Kind, R. & Ni, J, 2005b. Imaging the collision of the Indian and Asian Continental lithospheres beneath Tibet, *J. Geophys. Res.*, 111, B06308, DOI:10.1029/2005JB003930.

Langston, C. A., 1979. Structure under Mount Rainer, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.*, 87, 6725-6750.

Larson, P. A., Mudie, J. D., & Larson, R. L., 1972. Magnetic anomalies and fracture zone trends in the Gulf of California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 3361-3368.

Lewis, J. L., Day, S. M., Magistrale, H., Eakins, J. & Vernon, F., 2000. Regional crustal thickness variations of the Peninsular Ranges, southern California, *Geology*, 28(4), 303-306.

Li, X., Kind, R., Yuan, X., Wölbern, I. & Hanka, W., 2004. Rejuvenation of the lithosphere by the Hawaiian plume, *Nature*, 427, 827-829.

Ligorria, J. P. & Ammon, C. J., 1999. Iterative Deconvolution and Receiver Function Estimation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 1395-1400.

Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 499-522.

Lonsdale, P. 1991. Structural patterns of the Pacific floor offshore of peninsular California, in *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, edited by J.P. Dauphin and R. Simoneit, *AAPG Mem.*, 47, 87-125.

Lonsdale, P., 2005. Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate, *Tectonophysics*, 404, 237-264.

Mammerickx, J. & Klitgord, K. D., 1982. Northern East Pacific rise: evolution from 25 m. y. B. P. to the present. *J. Geophys. Res.* 87, 6751-6759.

Menard, H. W., 1978. Fragmentation of the Farallon plate by pivoting subduction, *J. Geol.*, 86, 99-110.

Michaud, F., Royer, J.-Y., Bourgeois, J., Dymant, J., Calmus, T., Bandy, W., Sosson, M., Mortera-Gutiérrez, C., Sichler, B., Rebolledo-Viera, M. & Pontoise, B., 2006. Oceanic ridge subduction vs. slab break off: plate tectonic evolution along the Baja California Sur continental margin since 15 Ma. *Geology*, 34, 13-16.

Mina-Uink, F. 1957. Bosquejo geológico del territorio sur de la Baja California. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 9, 139-270.

Moore, D. G., 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 1883-1905.

Moore, D.G. & Buffington, E. C., 1968. Transform faulting and growth of the Gulf of California since the late Pliocene. *Science*, 161, 1238-1241.

Nagy, E. A. & Stock, J. M., 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in northern Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 105(bB7), 16,251-16,269.

Nieto-Samaniego, A. F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernandez, G. & Rosas-Elguera, R., 1999. Variations of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 3,347-363.

Oskin, M., Rockwell, T., Miller, G., Guptil, P., Curtis, M., McArdle, S. & Elliot, P., 2000. Active parasitic folds on the Elysian Park anticline: Implications for seismic hazard in central Los Angeles, California, *Geolog. Soc. Am. Bull.*, 12, 693-707.

Oskin, M. & Stock, J., 2003. Miocene to Recent Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin Basin, northern Gulf of California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 115, 1173-1190.

Owens, T. J., Zandt, G. & Taylor, S. R., 1984. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms, *J. geophys. Res.*, 89(B9), 7783-7795.

Obrebski, M. J., 2007. Estudio de la anisotropía sísmica y su relación con la tectónica de Baja California, Tesis doctorado, CICESE, 245.

Pallares, C., Maury, R. C., Bellon, H., Royer, J.Y., Calmus, T., Aguillón-Robles, A., Cotten, J., Benoit, M., Michaud, F. & Bourgois, J., 2007. Slab-tearing following ridge-trench collision: evidence from Miocene volcanism in Baja California, México. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 161, 95-117. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.11.002.

Persaud, P., 2003. Images of early continental-breakup in and around the Gulf of California and the role of basal shear in producing wide plate boundaries, Ph.D. thesis, Calif. Inst. of Technol., Pasadena.

Persaud, P., Pérez-Campos, X. & Clayton R. W., 2007. Crustal thickness variations in the margins of the Gulf of California from receiver functions, *Geophys. J. Int.*, 170, 2, 687-699.

Romanowicz, B., 2009. The thickness of tectonic plates, *Science*, 324, 474-475.

Romo, J. M., García-Abdeslem, J., Gómez-Treviño, E., Esparza, F. & Flores-Luna, C., 2001. Resultados preliminares de un perfil geofísico a través de la región central de la península de Baja California, México, *GEOS*, 21, 96-107.

Rychert, A. C. & Shearer P. M., 2009. A Global View of the Lithosphere-Asthenosphere Boundary, *Science*, 324, 495-498.

Sawlan, M. G., & Smith, J. G., 1984. Petrologic characteristics age tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico. In: Frizzell Jr., V.A. (Ed.), *Geology of the Baja California Peninsula, Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Pacific Section*, 237-251.

Seavey, J., Forsyth, D. W. & Rau, C. J., 2010. Seismic anisotropy beneath California: Constraints from Rayleigh wave tomography, AGU, Fall Meeting 2010, abstract N° DI13A-1841.

Seiler, C., Fletcher, J.M., Quigley, M.C., Gleadow, A.J.W. & Kohn, B. P., 2009. Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for proto-gulf transtension in the Gulf Extensional Province?, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.09.026.

Severinghaus, J. & Atwater, T.M., 1990. Cenozoic geometry and thermal state of the subducting slabs beneath North America. In: Wernicke, B.P. (Ed.), Basin and Range Extensional Tectonics Near the Latitude of Las Vegas, Nevada. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, 176, 1-22.

Sheehan, A. F., Abers, G.A., Lerner-Lam A. L. & Jones C. H., 1995. Crustal thickness variations across the Rocky Mountain Front from teleseismic receiver functions, *J. Geophys. Res.*, 100, 20,391-20,404.

Sodoudi, F., 2005. Lithospheric structure of the Aegean obtained from P and S receiver functions, Tesis doctorado, GeoForschungs Zentrum Potsdam, Stiftung des öffentlichen rechts, 167.

Spencer J.E., & Normark, 1989. Neogene plate-tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico, en Winterer, E.L., Hussong, D.M., y Decker, R., (eds.), The eastern Pacific Ocean and Hawaii : Boulder, Colorado, The Geology of North America, *Geol. Soc. Amer. Bull*, 489-497.

Stock, J. M. & Hodges, K. V., 1989. Pre- Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate, *Tectonics*, 8, 99-115.

Stock, J.M., & Lee, J., 1994. Do microplates in subduction zones leave a geological record? *Tectonics* 13 (6), 1472-1487. *EOS*, 84, 4, 29-32.

Tarback, E. J. & Lutgens, F. K., 2005. Ciencias de la Tierra, 8° Edición, México, Prentice Hall, p. 736.

Trampert, J., Paulssen H., Van Wettum A., Ritsema J., Clayton R., Castro R., Rebollar C., Perez-

Van Benthem, S. A. C., Valenzuela, R. W., Obrebski, M., Castro, R. R., 2008. Measurements of upper mantle shear wave anisotropy from stations around the southern Gulf of California, *Geofísica Internacional*, 47(2), 127-144.

Vertti A., 2003. New array monitors seismic activity near the Gulf of California in Mexico, *EOS*, 84, 29-32.

Umhoefer, J. P., Dorsey, R. I. & Renne, P., 1994. Tectonics of the Pliocene Loreto Basin, Baja California Sur, México and evolution of the Gulf of California, *Geology*, 22, 649-652.

Umhoefer, P.J., Mayer, L. & Dorsey, R.J., 2002. Evolution of the margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Peninsula, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull*, 114, 849-868.

Wittlinger, G., Farra, V. & Vergne,, J. 2004. Lithospheric and upper mantle stratifications beneath Tibet: New insights from Sp conversions, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19615.

Yuan, X., Kind, R., Li, X. & Wang, R., 2006. The S receiver functions: synthetics and data example, *Geophys. J. Int.*, 165(2), 555-564.

Zhang, X., Paulssen, H., Lebedev, S., & Meier, T., 2007. Surface wave tomography of the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.* 34 (L15305), doi 10.1029/2007GL030631.

Zhang, X., Paulssen, H., Lebedev, S. & Meier, T., 2009. 3D shear velocity structure beneath the Gulf of California from Rayleigh wave dispersion, *Earth Pl. Sci. Lett.*, 279, 255-262.

Zhu, L., & Kanamori, H., 2000. Moho depth variations in southern California from teleseismic receiver functions, *J. Geophys. Res.*, 105(B2), 2969-2980.

**Páginas de internet consultadas:**

<http://eqseis.geosc.psu.edu> , mayo 2011.

<http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/RftnDocs/seq01.html>, mayo 2011.

<http://www.uwg.edu>, mayo 2011.

[http://www.data.scec.org/NARS-Baja/nars\\_php/all\\_net\\_station\\_avail\\_year.php](http://www.data.scec.org/NARS-Baja/nars_php/all_net_station_avail_year.php), mayo 2011.

# APÉNDICE A

Tabla A.1 Ubicación de las estaciones de la red NARS-Baja.

Estación	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]
NE70	32.4209	-115.2608	-23
NE71	31.6897	-115.9053	1155
NE72	30.8484	-116.0586	17
NE73	30.0651	-115.3485	489
NE74	28.0075	-114.0138	21
NE75	27.2933	-112.8565	137
NE76	26.889	-111.9991	35
NE77	26.0158	-111.3613	40
NE79	23.1194	-109.7561	225
NE80	30.5	-112.3199	225
NE81	28.9183	-109.6363	295
NE82	26.9157	-109.2308	183
NE83	24.7309	-107.7393	28
NE84	24.9135	-111.5452	21
NE85	24.1296	-110.4368	-12

# APÉNDICE B

Tabla B.1. Localización y magnitud de los eventos empleados para la obtención de las *FRS*.

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
1	2002	4	18	16	8	-27.53	-70.59	62	6.7
2	2002	4	20	15	59	-16.38	173.26	33	6
3	2002	4	24	11	0	-56.13	-122.31	10	6.2
4	2002	5	8	5	26	-17.95	-174.57	130	6.2
5	2002	5	8	19	45	53.81	160.77	39	5.9
6	2002	5	15	3	27	-21.41	-174.26	10	5.9
7	2002	5	23	15	52	-30.75	-71.2	52	6
8	2002	5	28	4	4	-28.94	-66.8	22	6
9	2002	6	16	6	55	-17.87	-178.7	569	5.9
10	2002	6	18	13	56	-30.81	-71.12	54	6.6
11	2002	6	28	17	19	43.75	130.67	566	7.3
12	2002	6	30	21	29	-22.2	179.25	620	6.5
13	2002	7	19	6	43	-56.62	-140.69	10	6.1
14	2002	8	4	9	50	-45.02	-80.73	10	5.9
15	2002	8	9	13	31	-16.31	-176.17	364	6.1
16	2002	8	19	11	1	-21.7	-179.51	580	7.7
17	2002	8	20	10	59	30.99	141.97	9	6.3
18	2002	8	24	18	40	43.11	146.12	42	6.1
19	2002	9	7	8	14	-20.27	-176.04	209	6
20	2002	9	8	13	15	-22.84	178.93	618	6
21	2002	9	15	8	39	44.83	129.92	586	6.4
22	2002	9	24	3	57	-31.52	-69.2	119	6.3
23	2002	10	4	19	5	-20.99	-179.02	621	6.3
24	2002	10	13	20	55	-14.6	-175.42	10	6.1
25	2002	10	14	14	12	41.17	142.25	61	6.1
26	2002	10	16	10	12	51.95	157.32	102	6.2
27	2002	10	16	14	13	-15.68	-173.05	33	6
28	2002	10	17	4	23	-19.84	-178.4	627	6.2
29	2002	10	18	11	16	-57.19	-142.75	10	6.1
30	2002	10	19	12	9	44.3	149.96	33	6.3
31	2002	10	22	11	39	-20.63	-178.39	549	6.2
32	2002	11	3	3	37	38.89	141.98	39	6.4
33	2002	11	7	15	14	51.2	179.33	33	6.6

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
34	2002	11	17	4	53	47.82	146.21	459	7.3
35	2002	12	1	7	56	-16.08	-172.96	33	5.9
36	2002	12	10	1	28	-50.03	-114.12	10	6
37	2002	12	10	4	27	-24.14	179.24	530	6.1
38	2002	12	28	3	20	-18.25	-178.53	626	5.9
39	2003	1	4	5	15	-20.57	-177.66	378	6.5
40	2003	1	9	2	50	-19.66	-176.29	10	6
41	2003	1	9	9	49	-44.44	-79.24	10	5.9
42	2003	2	19	5	1	44.15	141.8	214	5.9
43	2003	2	21	22	13	-25.95	-178.3	255	5.9
44	2003	3	10	10	2	-28.07	-177.68	146	5.9
45	2003	3	14	12	54	-17.42	-175.18	274	6.4
46	2003	3	15	19	41	52.25	160.39	30	6.1
47	2003	3	17	16	36	51.27	177.98	33	7.1
48	2003	3	17	18	55	51.29	177.97	33	6.2
49	2003	3	28	17	31	-15.32	-173.51	41	6.2
50	2003	4	2	3	43	35.28	-35.73	10	6.3
51	2003	4	24	10	56	48.76	154.99	43	6.1
52	2003	4	29	13	53	43.71	147.8	62	6
53	2003	5	3	5	3	-15.14	-173.75	33	6.2
54	2003	5	4	13	15	-30.53	-178.23	62	6.7
55	2003	5	4	20	8	-30.59	-178.29	45	6.4
56	2003	5	19	10	43	-18.04	-178.67	563	6
57	2003	5	26	9	24	38.85	141.57	68	7
58	2003	6	3	23	58	-17.36	-72.81	33	6
59	2003	6	15	19	24	51.55	176.92	20	6.5
60	2003	6	16	22	8	55.49	160	174	6.9
61	2003	6	20	13	30	-30.61	-71.64	33	6.8
62	2003	6	23	12	12	51.44	176.78	20	6.9
63	2003	7	2	23	52	42.32	144.84	23	5.9
64	2003	7	3	6	21	-21.28	-174.52	10	6
65	2003	7	25	22	13	38.42	141	6	6.1
66	2003	7	27	2	4	-21.08	-176.59	212	6.6
67	2003	7	27	6	25	47.15	139.25	470	6.8
68	2003	7	27	11	41	-20.13	-65.18	345	6
69	2003	8	14	18	23	-19.9	-177.98	563	5.9
70	2003	8	28	4	48	-49.82	-114.81	10	6.2
71	2003	8	31	23	8	43.39	132.27	481	6.2



N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
72	2003	9	2	18	28	-15.23	-173.22	10	6.4
73	2003	9	25	19	50	41.81	143.91	27	8.3
74	2003	9	25	21	8	41.77	143.59		7.4
75	2003	9	26	6	26	42.16	144.67	33	5.9
76	2003	9	26	20	38	41.99	144.58	33	6
77	2003	9	29	2	36	42.45	144.38	25	6.5
78	2003	9	30	14	8	-30.44	-177.4	10	6.4
79	2003	9	30	15	22	-30.49	-177.18	33	6
80	2003	10	7	4	55	-16.53	-170.19	10	6.2
81	2003	10	8	9	6	42.65	144.57	32	6.7
82	2003	10	8	13	32	42.23	144.72	33	5.9
83	2003	10	13	9	52	-15.94	-178.43	10	6
84	2003	10	15	2	19	-17.82	-178.7	582	6
85	2003	10	28	21	48	43.84	147.75	65	5.9
86	2003	10	31	1	6	37.81	142.62	10	7
87	2003	11	1	13	10	37.74	143.08	10	5.9
88	2003	11	11	13	44	-30.62	-179.01	33	6.1
89	2003	11	14	4	28	-16.74	172.33	10	6.1
90	2003	11	17	6	43	51.15	178.65	33	7.8
91	2003	12	3	14	11	42.36	144.73	33	5.9
92	2003	12	5	21	26	55.54	165.78	10	6.7
93	2003	12	29	1	30	42.42	144.61	33	6.1
94	2003	12	30	9	50	47.05	154.19	33	5.9
95	2003	12	31	21	57	46.97	154.24	33	5.9
96	2004	1	11	8	7	-16.24	-176.18	366	5.9
97	2004	1	11	9	29	-20.14	-179.15	673	6
98	2004	1	16	18	7	7.64	-37.7	10	6.2
99	2004	1	23	5	0	-23.05	-69.89	71	5.9
100	2004	1	24	13	1	52.12	-30.18	10	5.9
101	2004	1	25	11	43	-16.83	-174.2	129	6.7
102	2004	1	29	3	52	-50.21	-114.78	10	6.1
103	2004	2	23	16	4	-14.74	-175.63	31	6.3
104	2004	3	8	23	39	10.48	-43.92	10	6
105	2004	3	12	22	13	-15.58	-175.1	271	6
106	2004	3	14	16	30	-17.27	-172.32	12	6.1
107	2004	3	17	3	21	-21.12	-65.59	289	6.1
108	2004	3	18	20	4	-23.76	-176	10	6.2
109	2004	4	3	23	2	36.43	141.01	31	6
110	2004	4	5	20	34	-20.44	-173.94	8	6.2

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
111	2004	4	8	4	57	-36.26	-97.83	10	6.4
112	2004	4	11	18	6	42.92	144.84	41	6.1
113	2004	4	14	1	33	-17.85	-174.56	143	6
114	2004	4	14	23	7	71.07	-7.75	12	6
115	2004	4	16	16	58	-24.52	-175.88	10	6
116	2004	4	24	7	44	-21.9	-174.82	8	6.1
117	2004	5	3	4	36	-37.69	-73.41	21	6.6
118	2004	5	29	20	56	34.25	141.41	16	6.5
119	2004	5	30	21	11	-31.05	-177.12	10	5.9
120	2004	6	10	15	19	55.68	160	188	6.9
121	2004	6	15	11	16	-38.85	-73.15	37	6.1
122	2004	7	8	10	30	47.2	151.3	128	6.4
123	2004	7	15	4	27	-17.66	-178.76	565	7.1
124	2004	8	27	0	43	-27.42	-70.81	30	5.9
125	2004	8	28	13	41	-35.17	-70.53	5	6.5
126	2004	9	3	19	4	-15.25	-173.34	10	6.2
127	2004	9	7	11	53	-28.57	-65.84	22	6.4
128	2004	9	8	11	0	-15.15	-173.43	12	5.9
129	2004	9	13	3	0	44	151.41	8	6.1
130	2004	9	19	20	26	52.21	174.03	25	6.2
131	2004	9	23	10	8	-15.6	-177.28	18	5.9
132	2004	9	24	10	34	0.46	-26.4	10	5.9
133	2004	10	9	15	44	-15.19	-173.28	10	5.9
134	2004	10	23	8	56	37.23	138.78	16	6.6
135	2004	10	27	1	40	37.28	138.88	14	6
136	2004	11	4	14	3	43.62	146.81	61	5.9
137	2004	11	7	2	2	47.95	144.48	474	6.2
138	2004	11	11	10	2	42.14	144.34	32	6.1
139	2004	11	12	6	36	-26.7	-63.32	568	6.1
140	2004	11	17	21	9	-20.07	-178.71	622	6.6
141	2004	11	21	11	7	-15.4	-174.91	256	6
142	2004	11	23	21	4	-24.29	178.99	532	5.9
143	2004	11	28	18	32	43.01	145.12	39	7
144	2004	12	6	14	15	42.9	145.23	35	6.8
145	2004	12	6	16	26	-18.48	-178.08	439	6.1
146	2004	12	18	6	46	48.84	156.31	11	6.2
147	2004	12	22	21	3	-55.94	-125	10	6.1
148	2005	1	16	8	25	-25.53	-176.3	16	6.2
149	2005	1	18	14	9	42.95	144.87	42	6.3
150	2005	1	19	6	11	34.06	141.49	27	6.6

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
151	2005	2	9	18	46	26.09	144	24	6.3
152	2005	2	28	1	24	-34.92	-107.86	10	5.9
153	2005	3	6	5	21	84.95	99.39	10	6.3
154	2005	3	19	15	2	-20.41	-174.34	18	6.1
155	2005	3	19	17	34	-21.89	-179.55	598	6.3
156	2005	3	21	12	23	-24.98	-63.47	579	6.9
157	2005	3	30	17	41	-22.46	-179.75	588	6.1
158	2005	3	31	1	39	-18.55	176.01	10	5.9
159	2005	4	2	12	52	78.61	6.1	10	6.1
160	2005	4	10	22	22	35.6	140.4	43	5.9
161	2005	4	16	12	18	-54.99	-132.1	10	5.9
162	2005	5	3	19	11	-14.92	-74.62	31	5.9
163	2005	5	4	8	57	-19.41	-173.83	22	5.9
164	2005	5	12	11	15	-57.38	-139.23	10	6.5
165	2005	5	18	10	27	-15.32	-173.24	10	6.2
166	2005	5	20	12	40	-24.53	178.84	565	6
167	2005	5	29	21	44	-30.11	-178.01	18	5.9
168	2005	6	2	10	56	-24.22	-67	196	6.1
169	2005	6	13	22	44	-19.99	-69.2	115	7.8
170	2005	6	14	17	10	51.24	179.31	17	6.8
171	2005	6	15	19	52	-44.87	-80.56	10	6.4
172	2005	7	6	6	22	-35.79	-102.81	10	5.9
173	2005	7	10	4	46	-36.31	-97.26	10	6.1
174	2005	7	11	23	6	-27	-176.32	10	6
175	2005	7	13	12	6	-17.85	-70.11	79	5.9
176	2005	7	23	7	34	35.5	139.98	61	5.9
177	2005	7	23	8	51	-30.25	-178.07	10	6
178	2005	7	26	14	11	-15.35	-72.96	110	5.9
179	2005	8	6	9	56	-19.61	-175.85	205	6
180	2005	8	7	11	35	-14.45	-177.29	10	6
181	2005	8	9	5	26	-20.94	173.82	23	6.1
182	2005	8	9	14	12	-21.1	173.87	35	6.1
183	2005	8	16	2	46	38.28	142.04	36	7.2
184	2005	8	24	10	14	38.48	143.15	10	5.9
185	2005	8	30	18	10	38.48	143.18	21	6.1
186	2005	9	5	7	37	-56.41	-142.39	10	6.2
187	2005	9	21	2	25	43.89	146.15	103	6.1
188	2005	10	5	10	7	-20.53	-174.28	15	5.9
189	2005	10	15	10	6	46.82	154.11	42	6.1

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
190	2005	10	19	11	44	36.4	140.84	32	6.3
191	2005	10	23	10	8	37.38	134.56	380	5.9
192	2005	11	10	19	29	57.47	120.59	6	5.9
193	2005	11	14	21	38	38.11	144.9	11	7
194	2005	11	17	19	26	-22.36	-67.89	147	6.8
195	2005	12	2	13	13	38.09	142.12	29	6.5
196	2005	12	7	23	32	-30.01	-177.64	21	6.4
197	2005	12	13	3	16	-15.27	-178.57	10	6.7
198	2005	12	16	18	32	38.51	141.9	42	6
199	2005	12	22	12	20	-54.72	-135.87	10	6.3
200	2006	1	2	22	13	-19.93	-178.18	582	7.2
201	2006	2	2	12	48	-17.75	-178.39	597	6.7
202	2006	2	24	14	15	-18	-179.59	622	6.1
203	2006	2	26	3	8	-23.61	-179.99	535	6.4
204	2006	3	5	8	7	-20.12	-175.66	205	6.1
205	2006	3	9	17	55	0.79	-26.12	10	6
206	2006	3	19	4	36	-13.43	172.39	10	5.9
207	2006	3	24	17	46	-16.89	174.5	10	6
208	2006	3	31	13	21	-29.43	-176.77	13	6.5
209	2006	4	7	8	30	-16.53	176.99	14	6.5
210	2006	4	12	1	6	56.4	163.99	28	6
211	2006	4	15	23	50	-29.77	-72	19	6
212	2006	4	20	23	25	60.95	167.09	22	7.6
213	2006	4	21	4	32	60.53	165.82	9	6.1
214	2006	4	21	11	14	61.35	167.52	12	6.1
215	2006	4	29	16	58	60.49	167.52	11	6.6
216	2006	4	30	19	17	-27.02	-71.02	12	6.7
217	2006	4	30	21	32	-27.22	-71.22	35	5.9
218	2006	5	3	15	26	-20.19	-174.12	55	8
219	2006	5	4	11	25	-20.58	-174.04	11	6
220	2006	5	5	6	16	-19.83	-174.65	35	5.9
221	2006	5	17	3	6	-20.63	-173.95	11	6
222	2006	5	22	11	12	60.77	165.74	19	6.6
223	2006	5	22	13	8	54.27	158.45	197	6.2
224	2006	6	2	7	31	-20.84	-178.7	591	6
225	2006	6	5	6	27	1.17	-28.07	10	6
226	2006	6	9	5	58	-17.53	-178.75	564	6.1
227	2006	6	11	5	46	-20.66	-179.26	662	5.9
228	2006	6	14	4	18	51.75	177.08	14	6.5

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
229	2006	6	18	18	28	33.03	-39.7	9	6
230	2006	6	22	10	53	45.42	149.34	95	6
231	2006	6	27	2	39	52.23	176.16	17	6.2
232	2006	7	7	7	26	-15.24	-173.61	35	6
233	2006	7	16	11	42	-28.72	-72.54	10	6.2
234	2006	8	6	18	16	26.12	144.01	20	5.9
235	2006	8	15	23	53	-21.19	-176.25	154	6.1
236	2006	8	20	3	1	49.82	156.41	26	6
237	2006	8	24	21	50	51.15	157.52	43	6.5
238	2006	8	25	0	44	-24.4	-67.03	184	6.6
239	2006	9	3	22	57	-24.05	178.82	568	5.9
240	2006	9	12	13	30	-28.94	-68.9	114	6
241	2006	9	16	2	22	41.36	135.7	367	5.9
242	2006	9	17	9	34	-31.73	-67.14	137	6.2
243	2006	9	22	2	32	-26.87	-63.15	598	6
244	2006	9	28	1	36	46.46	153.36	11	5.9
245	2006	9	28	6	22	-16.59	-172.03	28	6.9
246	2006	9	30	16	26	-15.59	-73.16	107	6
247	2006	9	30	17	50	46.35	153.17	11	6.6
248	2006	10	1	9	6	46.47	153.24	19	6.5
249	2006	10	10	8	2	-56.1	-122.37	10	6
250	2006	10	10	23	58	37.2	142.66	9	6
251	2006	10	12	18	5	-31.26	-71.37	31	6.4
252	2006	10	13	13	47	46.24	153.28	4	5.9
253	2006	10	17	4	2	-21.04	-68.28	140	5.9
254	2006	11	12	21	27	48.28	154.25	36	5.9
255	2006	11	13	1	26	-26.05	-63.28	572	6.8
256	2006	11	15	11	14	46.59	153.27	10	8.3
257	2006	11	15	12	16	46.19	154.67	10	5.9
258	2006	11	15	19	25	47.01	154.98	10	6
259	2006	11	15	21	22	47.28	154.15	12	5.9
260	2006	11	16	6	20	46.36	154.47	9	6
261	2006	11	30	11	33	-21.3	-174.68	13	6
262	2006	11	30	21	20	-53.84	-134.36	10	6.2
263	2006	12	7	19	10	46.15	154.39	16	6.4
264	2006	12	26	15	19	48.32	154.84	10	6
265	2007	1	8	20	52	-18.58	-177.85	406	6.3
266	2007	1	13	4	23	46.24	154.52	10	8.1
267	2007	1	13	17	37	46.91	156.28	10	6

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
268	2007	1	15	18	17	34.89	138.64	170	5.9
269	2007	1	31	3	15	-29.78	-178	34	6.5
270	2007	2	4	21	17	-55.88	-122.72	10	6.2
271	2007	2	12	10	35	35.8	-10.31	20	6
272	2007	2	14	1	29	-29.59	-112.05	10	5.9
273	2007	2	17	0	2	41.79	143.55	31	6
274	2007	3	1	23	11	26.58	-44.59	10	6
275	2007	3	9	3	22	43.22	133.53	441	6
276	2007	3	25	0	41	37.34	136.59	8	6.7
277	2007	3	31	12	49	-56.08	-123.27	10	6.2
278	2007	4	2	2	49	-45.38	-73.06	4	6.1
279	2007	4	5	3	56	37.31	-24.62	14	6.3
280	2007	4	6	5	54	-55.37	-123.64	10	5.9
281	2007	4	7	7	9	37.31	-24.49	8	6.1
282	2007	4	9	2	24	-20.07	-178.08	593	5.9
283	2007	4	13	18	24	-35.05	-108.84	10	6.1
284	2007	4	21	17	53	-45.24	-72.65	36	6.2
285	2007	4	29	12	41	52.01	-179.97	117	6.2
286	2007	5	6	21	11	-19.4	-179.35	676	6.5
287	2007	5	7	11	15	-44.85	-80.45	10	6.1
288	2007	5	17	19	29	-30.66	-178.2	40	6
289	2007	5	25	17	47	-24.22	-67.03	180	5.9
290	2007	5	30	20	22	52.14	157.29	116	6.4
291	2007	6	14	13	37	-36.21	-100.15	10	5.9
292	2007	7	3	8	26	0.71	-30.27	10	6.3
293	2007	7	16	1	13	37.53	138.45	12	6.6
294	2007	7	17	9	39	-26.21	-177.74	10	6.1
295	2007	7	18	0	7	-26.3	-177.74	10	6.1
296	2007	7	21	15	34	-22.15	-65.78	289	6.4
297	2007	7	29	4	54	53.64	169.7	25	5.9
298	2007	8	2	2	37	47.12	141.8	5	6.2
299	2007	8	20	22	42	8.04	-39.25	6	6.5
300	2007	8	26	12	37	-17.46	-174.34	127	6.1
301	2007	9	3	16	14	45.84	150.06	94	6.2
302	2007	9	7	4	46	-56.08	-123.31	10	5.9
303	2007	9	14	11	51	-23.65	179.68	552	5.9
304	2007	10	5	7	17	-25.19	179.46	509	6.5
305	2007	10	16	21	5	-25.77	179.53	509	6.6
306	2007	10	25	13	50	46.01	154.23	20	6.1

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
307	2007	11	2	22	31	-55.47	-128.97	10	6.1
308	2007	11	14	15	40	-22.25	-69.89	40	7.7
309	2007	11	15	15	3	-22.87	-70.41	27	6.3
310	2007	11	17	17	54	-23.06	-70.6	14	5.9
311	2007	11	18	5	40	-22.64	-66.32	246	6
312	2007	11	19	0	52	-21.18	-178.75	558	6.3
313	2007	11	19	23	30	-22.79	-70.77	29	5.9
314	2007	11	20	15	28	-29.99	-177.94	32	5.9
315	2007	11	20	17	55	-22.92	-70.48	15	6.1
316	2007	11	26	13	51	37.39	141.59	42	5.9
317	2007	11	29	3	26	-36.76	-97.4	10	6.3
318	2007	12	9	7	28	-26	-177.51	152	7.8
319	2007	12	13	5	20	-23.16	-70.48	15	6
320	2007	12	13	7	23	-23.2	-70.55	16	6.2
321	2007	12	13	15	51	-15.21	-172.37	17	6.2
322	2007	12	15	18	22	-32.69	-71.69	25	5.9
323	2007	12	16	8	9	-22.95	-70.18	45	6.7
324	2007	12	25	14	4	38.5	142.03	48	6.1
325	2008	1	15	17	52	-21.98	-179.54	597	6.5
326	2008	1	22	7	55	-15.28	-175.35	6	6
327	2008	1	22	10	49	-15.42	-175.59	10	6.1
328	2008	2	1	12	10	-21.5	-179.35	604	6
329	2008	2	4	17	1	-20.17	-70.04	35	6.3
330	2008	2	8	9	38	10.67	-41.9	9	6.9
331	2008	2	16	14	45	-21.35	-68.39	130	6.1
332	2008	2	21	2	46	77.08	18.57	12	6.1
333	2008	3	3	9	31	46.41	153.18	10	6.5
334	2008	3	18	8	22	-29.25	-177.44	25	6.2
335	2008	3	24	20	39	-20.04	-68.96	120	6.2
336	2008	4	16	0	35	-18.61	-175.7	10	6.3
337	2008	4	18	20	39	-17.34	-179.02	553	6.3
338	2008	5	7	16	2	36.18	141.54	19	6.2
339	2008	5	20	13	53	51.16	178.76	27	6.3
340	2008	5	23	19	35	7.31	-34.9	8	6.5
341	2008	5	29	15	46	64	-21.01	9	6.3
342	2008	6	5	2	16	-38.84	-91.62	10	6
343	2008	6	12	5	30	-50.16	-114.17	10	5.9
344	2008	6	13	23	43	39.03	140.88	7	6.9
345	2008	6	15	1	13	-17.74	-179.73	611	5.9

N°	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Mw
346	2008	6	15	8	37	-36.62	-107.45	10	6
347	2008	6	22	23	56	67.7	141.28	18	6.1
348	2008	6	26	21	19	-20.77	-173.34	38	6.2
349	2008	6	29	20	53	45.16	137.45	326	6
350	2008	7	3	3	2	-23.37	-179.78	581	6.2
351	2008	7	5	2	12	53.88	152.89	632	7.7
352	2008	7	8	9	13	-15.99	-71.75	123	6.2
353	2008	7	19	2	39	37.55	142.21	22	7
354	2008	7	19	22	39	-17.34	-177.31	391	6.4
355	2008	7	21	11	30	37.19	142.05	22	6
356	2008	7	23	15	26	39.8	141.46	108	6.8
357	2008	7	24	1	43	50.97	157.58	27	6.2
358	2008	7	25	0	29	51.28	178.98	21	5.9
359	2008	8	19	16	30	-15.09	-173.48	8	6.1
360	2008	9	1	4	0	-25.39	-177.64	171	6
361	2008	9	3	11	25	-26.74	-63.22	569	6.3
362	2008	9	10	13	8	8.09	-38.71	9	6.6
363	2008	9	11	0	20	41.89	143.75	25	6.8
364	2008	9	12	23	7	56.31	164.07	12	5.9
365	2008	9	18	11	58	51.94	158.36	35	5.9
366	2008	9	29	15	19	-29.76	-177.68	36	7
367	2008	10	5	9	12	-30.18	-177.18	10	6.1
368	2008	10	9	17	49	-21.03	-174.42	10	5.9
369	2008	10	12	20	55	-20.12	-64.97	352	6.2
370	2008	10	19	5	10	-21.86	-173.82	29	6.9
371	2008	10	22	12	55	-18.41	-175.35	233	6.4