



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**PARÁMETROS DE LA FUENTE DE SISMOS CON EPICENTRO EN EL VALLE  
DE MÉXICO DURANTE 2008-2012**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
(SISMOLOGÍA)

PRESENTA

FÍS. DELIA IRESINE BELLO SEGURA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LUIS QUINTANAR ROBLES  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

JURADO

DR. JAIME YAMAMOTO VICTORIO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

M EN C. MIGUEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

DR. FRANCISCO J. CHÁVEZ GARCÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

DR. CARLOS MENDOZA

CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

MÉXICO D.F., NOVIEMBRE 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

A mi esposo

*Nessun dorma - Giacomo Puccini  
dall'opera "Turandot"*

Nessun dorma! Nessun dorma!  
Tu pure, o Principessa,  
Nella tua fredda stanza  
Guardi le stelle  
Che tremano d'amore e di speranza.  
Ma il mio mistero è chiuso in me,  
Il nome mio nessun saprà!, no, no  
Sulla tua bocca lo dirò!...  
Quando la luce splenderà,  
Ed il mio bacio scioglierà il silenzio  
Che ti fa mia!...

Dilegua, o notte!...  
Tramontate, stelle! Tramontate, stelle!...  
All'alba vincerò!  
vincerò!  
vincerò!

*Que nadie duerma - Giacomo Puccini  
dall'opera "Turandot"*

¡Que nadie duerma! ¡Que nadie duerma!  
También tú, oh Princesa,  
en tu fría habitación  
miras las estrellas  
que tiemblan de amor y de esperanza.  
Mas mi misterio está encerrado en mí,  
Mi nombre nadie lo sabrá. No, no  
Sobre tu boca lo diré  
Cuando la luz brille  
Y mi beso derretirá el silencio  
que te hace mía.

¡Disípate, oh noche!  
¡Tramontad, estrellas! ¡Tramontad, estrellas!  
¡Al alba, venceré!  
¡Venceré!  
¡Venceré!

## Agradecimientos

Al Dr. Quintanar por su apoyo, enseñanzas, comprensión y tiempo en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Yamamoto por su tiempo y aportaciones en la revisión del presente trabajo.

Al M en C Miguel Rodríguez por sus comentarios y aportaciones al presente trabajo.

Al Dr. Francisco Chávez por sus valiosos comentarios y aportaciones al presente trabajo.

Al Dr. Carlos Mendoza por su tiempo, comentarios y aportaciones al presente trabajo.

Al M en C Zenón Jiménez por su ayuda en la localización de los eventos.

Al personal del SSN, Dr. Víctor Hugo Espíndola y el Ing. Arturo Cárdenas por su ayuda y tiempo en la obtención de señales.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y a los profesores por el conocimiento proporcionado.

A CONACYT por su apoyo, sin el cual no habría sido posible realizar el presente trabajo.

Al proyecto PAPIIT por su apoyo, sin el cual no habría sido posible concluir el presente trabajo.

## Dedicatorias

A mi esposo Ivan por soportar mis múltiples cambios de humor y aquellos momentos oscuros transformarlos en luz y escaleras al cielo. Te amo.

A mi madre Maguis mi mejor amiga, hermana, psicóloga, gracias por tu confianza y palabras de aliento en todo momento. A mi segunda madre Manue por escucharme, por tus palabras, por tus plegarias, por tu amor. Las quiero mucho.

A Valeria mi hermana, mi amiga, mi confidente por tomarme de la mano y ayudarme a levantar en todo momento.

A Iván mi hermano, por creer en mi y por sus consejos psicopedagógicos. A Rubí por su apoyo en momentos de necesidad.

A mi papá Francisco y a Rebeca, mis segundos padres, gracias por creer en mí.

A mi tía Elsa, gracias por tus plegarias y palabras de aliento todo el tiempo.

A mi nueva familia, mis suegros Juana y Rodrigo por su apoyo en nuevos proyectos, a mi cuñada Bere una nueva amiga y a sus preciosos ángeles Joanne y Dulce, gracias por hacerme reír.

A Flor, gracias a tus palabras de aliento y tus consejos pude continuar en esta travesía, y llegar a puerto. Gracias por escucharme.

A mis amigos Arturo, Adriana, Ulises, Nestor, Fernando, Gabriel, Noemi, Memo, Itzel por su apoyo, amistad y por siempre estar presentes en los momentos importantes. A los geofísicos Ximena, Gaby, Jorge, Víctor, Oscar, Said por su compañerismo transformado en amistad, por las horas de estudio y pláticas amenas.

A mis amigas de tantos años y tantos recuerdos, Bris y Ceci. A mi nueva gran amiga Liz, por compaginar tan bien, por entenderme y escucharme. A mi primera gran amiga Claudia de ti aprendí que la amistad es eterna y más valiosa que los diamantes, además que en esta vida siempre existe algo porque vivir. Y a mis queridas Pléyades, Magos, Laura, Ericka y Anita por tantos recuerdos, años de hermandad, años de amistad y ahora con pequeños ángeles en brazos. Gracias amigas.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
CAPÍTULO 1 .....	3
1.1 Ubicación del Valle de México. ....	3
1.2 Tectónica del Valle de México .....	5
a. Sistema de fallas Las Cruces .....	6
b. Sistema de fallas de la Sierra de Guadalupe .....	8
c. Sistema de fallas del área de Tepetlaoxtoc y Tezoyo .....	8
d. Sistema de fallas de Iztapalapa .....	8
e. Sierra de Santa Catarina .....	9
1.3 Zonificación del Valle de México de acuerdo con el tipo de suelo .....	10
CAPÍTULO 2 .....	13
2.1 Calculo del momento sísmico, caída de esfuerzo y frecuencia de esquina a partir del espectro de amplitudes de Fourier. Parámetros que definen un foco sísmico de dimensiones finitas 13	
2.2 Relación entre el espectro de amplitudes y el momento sísmico .....	14
2.2.1 Atenuación .....	16
2.3 Espectro de amplitudes de la onda S .....	16
2.4 Mecanismos focales.....	17
CAPÍTULO 3 .....	20
3.1 Calibración de los sismómetros de la Red del Valle de México .....	20
3.1.1 Creación de archivos de polos y ceros para emplearse en el programa SAC de los datos de salida del instrumento Guralp. ....	22
3.1.2 Archivos de polos y ceros en formato SAC de los datos de salida de Reftek. ....	23
3.2 Obtención de los espectros de sismos con epicentro en el Valle de México. ....	23
3.3 Obtención de mecanismos focales de sismos con epicentro en el Valle de México.....	25
3.4 Modelo de velocidad local.....	26
CAPÍTULO 4 .....	28
4.1 Localización de los sismos (2008-2012).....	28
4.2 Análisis de resultados .....	29
4.2.1 Región 1. Sismicidad en el norte y centro de la Cuenca del Valle de México.....	30
4.2.2 Región 2. Sismicidad en el Poniente de la Cuenca del Valle de México. ....	33
4.2.3 Región 3. Sismicidad en el oriente del Valle de México. ....	34
4.2.4 Región 4. Sismicidad en el Sur del Valle de México (Sierra del Chichinautzin). ....	36
4.2.5 Región 5. Sismicidad al Noreste del Valle de México .....	37
CONCLUSIONES .....	39
REFERENCIAS.....	42

APÉNDICE I. Tabla con la ubicación de las estaciones sísmicas de la red del Valle de México (RSVM), todas son telemétricas. ....	46
APÉNDICE II. Ejemplo de los archivos de respuesta de la estación MZVM. ....	50
APÉNDICE III. Tabla con los resultados y otros valores usados para el cálculo del mecanismo y de la caída de esfuerzo. ....	51
APÉNDICE IV. Resultados de los 15 eventos del Valle de México. ....	52
1. 9 de agosto de 2008 a las 02:59:32.9 (GMT). Localizado al Noroeste de Santa María Ixcotla, Tlaxcala. ....	52
2. 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F. ....	55
3. 3 de mayo de 2009 a las 22:01:40.4 (GMT) Localizado al este de Juchitepec, Estado de México. ....	58
4. 11 de julio de 2009 a las 21:29:31.3 (GMT), localizado en la colonia Narvarte de la Delegación Benito Juárez, D.F. ....	60
5. 10 de febrero de 2010 a las 05:07:39.2 (GMT), localizado al este de Teotihuacan, Estado de México. ....	62
6. 7 de marzo de 2010 a las 17:11:23.6 (GMT), localizado al este de Tenango del Aire, Estado de México. ....	64
7. 5 de abril de 2010 a las 20:06:26.8 (GMT), localizado en San Pablo Atlazalpan, Estado de México. ....	66
8. 24 de junio de 2010 a las 05:36:20.4(GMT), localizado en el colonia Del Valle en la Delegación Benito Juárez, D.F. ....	68
9. 24 de junio de 2010 a las 15:36:16.3(GMT), localizado en la colonia Granjas Estrella de la Delegación Iztapalapa, D.F. ....	70
10. 28 de junio de 2010 a las 23:09:57 (GMT), localizado al norte de Ixtapaluca, Estado de México. ....	72
11. 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), localizado al norte de Tres Marías, Estado de Morelos. ....	74
12. 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos. ....	76
13. 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México. ....	78
14. 8 de julio de 2012 a las 17:20:23.6 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México. ....	81
15. 9 de julio de 2012 a las 00:29:17.5 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México. ....	83

## RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de la sismicidad en el Valle de México, el cual ha sido posible gracias a los registros de las estaciones sísmicas cercanas. También se proponen las causas de dicha sismicidad. Se presenta el procedimiento para generar los archivos de respuesta instrumental para los equipos de las marcas comerciales Guralp y Reftek de las 30 estaciones de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM). Esto permite convertir los registros de cuentas a unidades métricas de cm/s. De los sismos ocurridos en el Valle de México durante el periodo 2008-2012, se escogieron 15 eventos cuya señal fuera clara, es decir, se distinguiera la llegada de la onda P y de la S, sin filtrar la señal. Se encontró su espectro de aceleración y mediante el análisis espectral se determinaron el momento sísmico ( $M_0$ ), la caída de esfuerzo ( $\sigma$ ) y el factor de atenuación ( $t^*$ ). Se empleó la misma señal y se realizó una inversión usando funciones de Green para obtener el mecanismo focal de cada uno de los eventos. Se encontraron diferencias significativas en el factor de atenuación de cada región. Se encontró una caída de esfuerzo media  $\Delta\sigma=1.2$  MPa. Con respecto al valor de  $t^*$ , se encontró un promedio de  $t^*=0.04$  s para sismos en el Valle de México, lo que indica que el Valle de México exhibe atenuaciones altas. Se encontró que en su mayoría la sismicidad del Valle de México presenta mecanismos de tipo Normal.

## INTRODUCCIÓN

México pertenece a la placa de Norte América bajo la cual subduce la placa de Cocos. Esta zona de subducción se extiende a lo largo de 1300 km de la costa del Océano Pacífico. Es en ella donde ocurren la mayoría de los sismos de México. Estadísticamente hay por lo menos un sismo de  $M_w \geq 6.5$  cada año, y uno de  $M_w \geq 7.0$  cada diez años. Los sismos debido a la subducción de estas dos grandes placas pueden ser intraplaca o interplaca. Los primeros ocurren en el interior de la placa lejos de las zonas de frontera debido a que el interior de la placa no es perfectamente rígido. Los interplaca son aquellos generados en el contacto entre la placa que subduce y la placa superior.

Históricamente han ocurridos sismos en el Valle de México y algunos incluso han causado daños en las estructuras. En el año 1475 antes de la llegada de los españoles ocurrió un sismo que pudo haber tenido su epicentro en el Valle de México y fue de gran intensidad, el cual llegó a causar desgajamientos. Otro ejemplo, es el sismo de Acambay de 1912 que tuvo una magnitud de 7.0 y ocasionó grandes daños en los pueblos de Acambay y Tixmadejé en el Estado de México e incluso provocó algunos daños en la Ciudad de México (Bravo-Chávez et al., 1988). Con el incremento de la instrumentación sismológica en el Valle de México ha sido posible comprobar que hay un nivel alto de sismicidad, que hasta ahora ha sido de magnitud pequeña; sin embargo, no se descartar la posibilidad de que alcance magnitudes mayores y en algún momento llegar a causar daños en la infraestructura de la ciudad de México.

El presente trabajo pretende contribuir al conocimiento del Valle de México e integrar nuevos resultados sismológicos de propagación de ondas sísmicas, para proporcionar las causas probables de la sismicidad en zonas como el Valle de Chalco. Para realizar el análisis, en el marco teórico (capítulo 1 y 2), se estable el área de estudio, su geología y su tectónica. Además se incluyen las herramientas matemáticas y físicas empleadas en el análisis. Se emplearon los registros sismológicos de los temblores obtenidos de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) además de los datos de algunas estaciones de la red del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Los eventos a estudiar son de magnitudes entre 2 y 4 y de profundidad somera ( $< 20$  km), los registros claros fueron principalmente de las estaciones más cercanas al epicentro, sólo se usaron estaciones de la RSVM primordialmente, con excepción de algunos casos, en donde se emplearon los registros de las estaciones CUIG o PPIG del SSN. En la interpretación se supone la existencia de fallas ciegas.

## CAPÍTULO 1

### Antecedentes y marco geotectónico del Valle de México

*En este capítulo se presenta la descripción del Valle de México, su ubicación, marco geológico y tectónico.*

#### 1.1 Ubicación del Valle de México.

El Valle de México pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), relacionado con la subducción de la placa de Cocos y la de Rivera (localizadas en el litoral del Pacífico al sur de México) por debajo de la placa de Norteamérica. Esa subducción ocurre a lo largo de la *Trinchera de Acapulco* o *Mesoamericana*. En la zona de subducción se acumula energía, que al liberarse provocan los sismos que afectan a México. De acuerdo a Ferrari et al. (2012), la FVTM es un arco volcánico continental, con una edad del Mioceno al reciente. Su longitud es de 1,000 km y su ancho varía de 50 km a 250 km. Esta provincia geológica está constituida fundamentalmente de rocas volcánicas, acumuladas durante las etapas sucesivas de actividad volcánica, desde hace unos 35 millones de años hasta el presente. La FVTM se ha dividido en tres sectores: el occidental, caracterizado por la intercepción de tres fosas tectónicas denominadas Tepic, Colima y Chapala; la porción central, constituida por vulcanismo monogenético de la región de Michoacán–Guanajuato; y el oriental, caracterizado por el alineamiento de grandes estratovolcanes en dirección general N–S (Pasquaré *et al.*, 1987) (Figura 1.1). En el sector oriental se localiza el Valle de México, el cual es una cuenca cerrada. La porción central se localiza entre los paralelos 19°22' y 19°30' N y entre los meridianos 98°47' y 98°51' W. Al norte limita con la población Otumba, el cerro Gordo y Teotihuacan; al sur, con la población de Amecameca y la Sierra del Chichinautzin; al oriente, con la Sierra Nevada (hasta el Volcán Iztaccíhuatl) y con el Ex Lago de Texcoco; al poniente con la Sierra de las cruces (García-Palomo, et al., 2008). Tiene una extensión de 5 297 km<sup>2</sup> (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002) y una altitud media de 2240 msnm (Figura 1.2) (García-Palomo, et al. 2006). Posee un contorno irregular, alargado de norte a sur. Al principio permaneció abierta aproximadamente hasta hace 700,000 años. Posteriormente, la actividad volcánica formó una enorme cortina natural es decir a la sierra del Chichinautzin dejó de ser exorreica y se obstruyó el drenaje que se dirigía al río Balsas (Mooser y Montiel-Rosado, 1989). El almacenamiento de agua dio origen a varios lagos. Los ríos que descendían de las sierras circundantes depositaron materiales limo-arenosos, limo-arcillosos y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes.

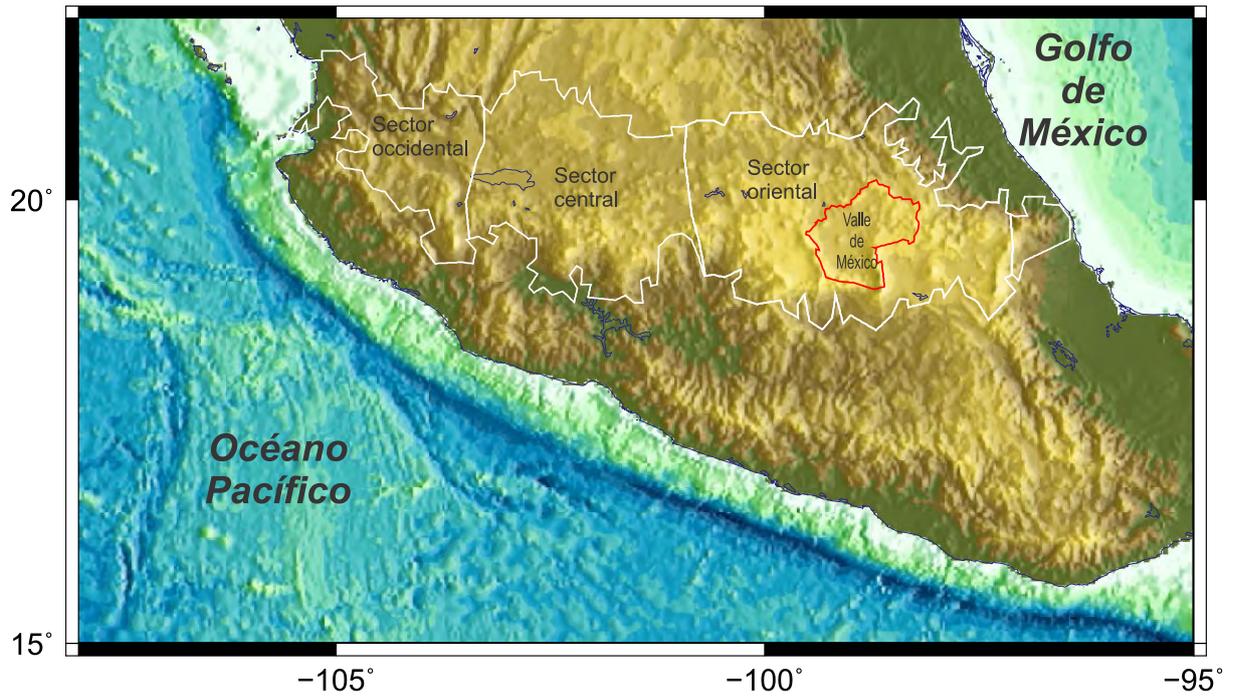


Figura 1.1 Límites de la FVTM (línea blanca) y sus tres sectores: occidental, central y oriental (imagen modificada de Ferrari, et al., 2012). Además se muestra el límite del Valle de México (línea roja, límite tomado de SMA (2002)).

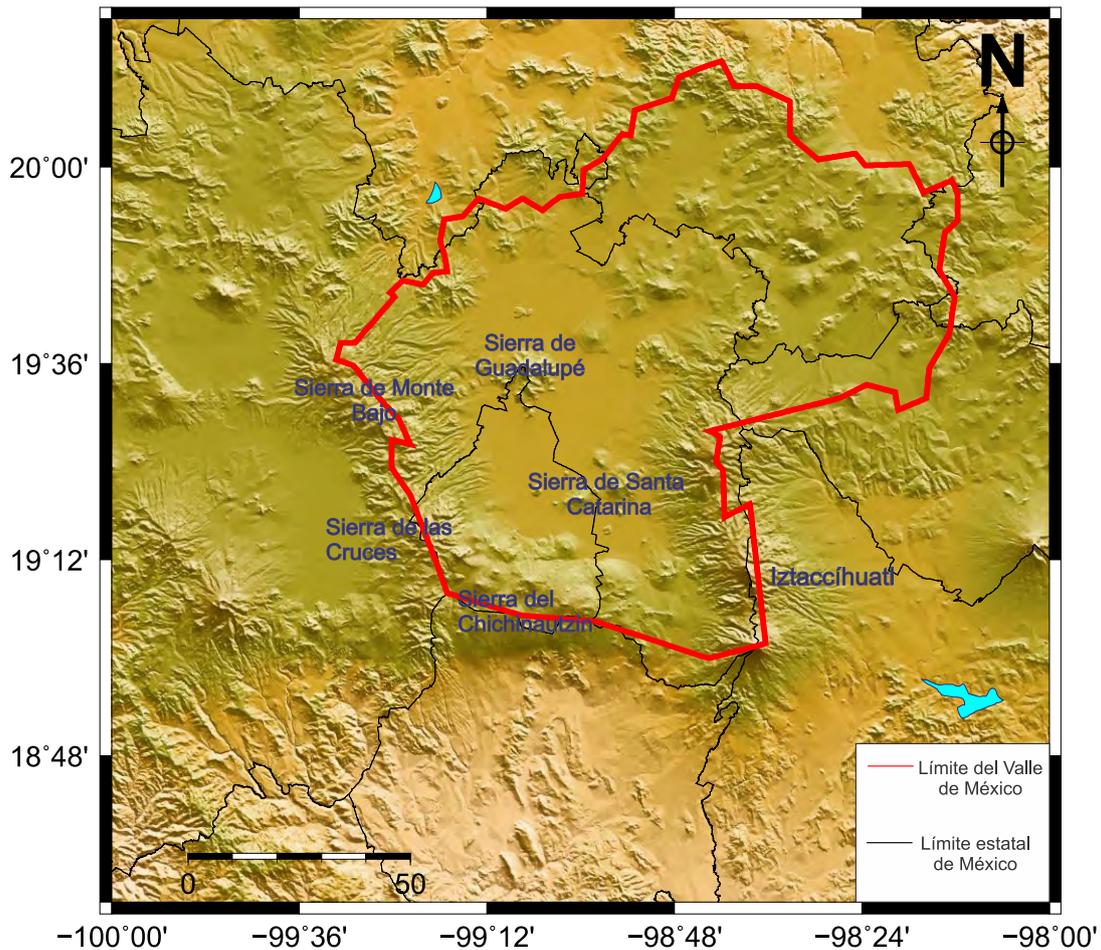


Figura 1.2 Límite del Valle de México y principales elevaciones dentro de éste (límite según SMA, 2002)

## 1.2 Tectónica del Valle de México

De acuerdo con Rosenblueth et al, 1987, las principales fuentes sísmicas son: sismos locales ( $M \leq 5.5$ ), originados dentro o cerca de la cuenca; sismos tipo Acambay ( $M \leq 7.0$ ), que se originan en el resto de la placa de Norteamérica; sismos de profundidad intermedia de falla Normal, causados por rompimientos de la placa de Cocos ya subducida, pudiendo llegar hasta  $M=6.5$  debajo del Valle de México; y sismos de subducción ( $M \leq 8.2$ ) (Figura 1.3 ).

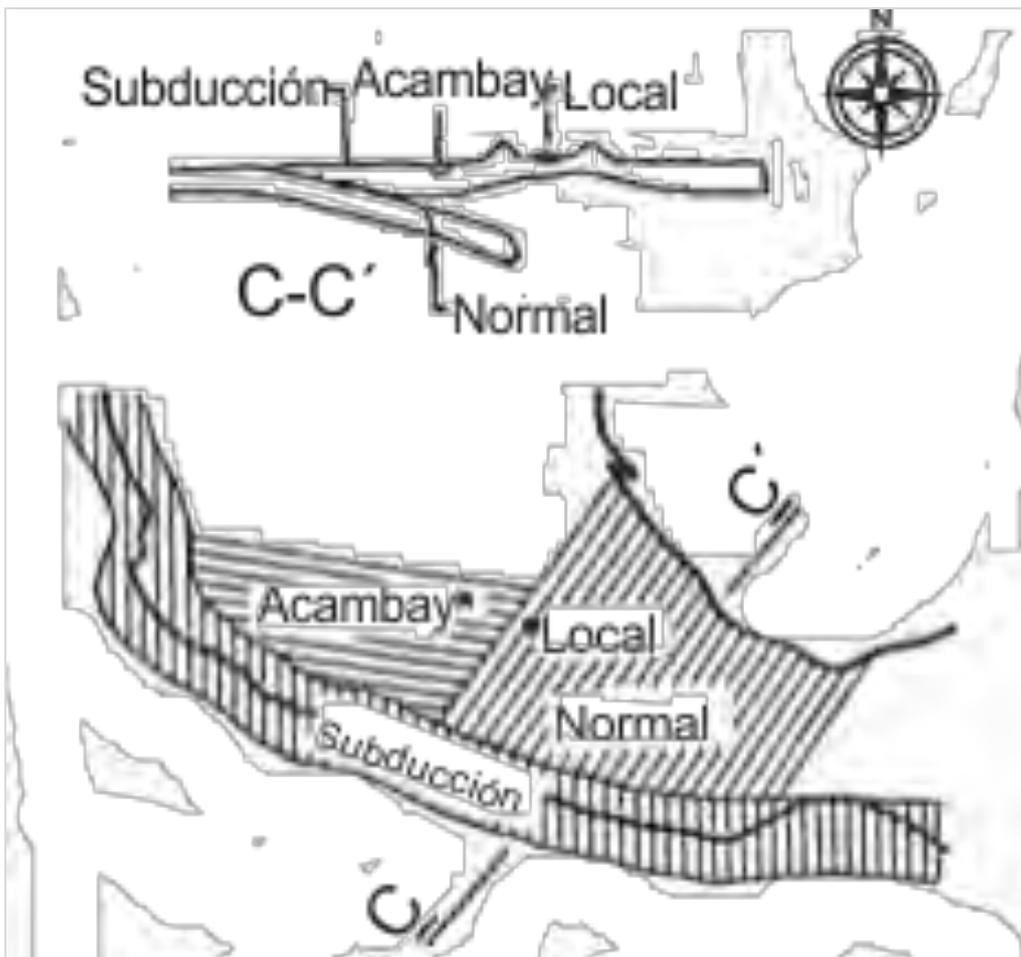


Figura 1.3 Los cuatro tipos de sismos que afectan a la Ciudad de México (de acuerdo a Rosenblueth, 1987). Dentro de la zona de Subducción se origina los temblores producidos en este límite convergente de placas; en la zona Normal se producen sismos asociados a rompimientos de la placa de Cocos ya subducida; la zona Acambay se refiere a sismos como el ocurrido en 1912 (Urbina y Camacho, 1913), debido a la falla que encuentra en esta zona; finalmente, la zona Local, es donde se originan los sismos del Valle de México

Durante años se han realizado estudios geológicos y tectónicos, con el propósito de estudiar las fallas, algunas de ellas activas, que se encuentran dentro del Valle de México, las cuales pueden ser la causa de la sismicidad local. A continuación se describen las fallas: en el sector Occidental,

se encuentran el sistema de fallas Las Cruces; en el sector nororiental, el sistema de fallas del área de Tezoyo y Tepetlaoxtoc; sector Oriental, la sierra de Santa Catarina y el sistema de fallas de Iztapalapa; por último al Norte, se encuentra el sistema de fallas de la Sierra de Guadalupe (Figura 1.4).

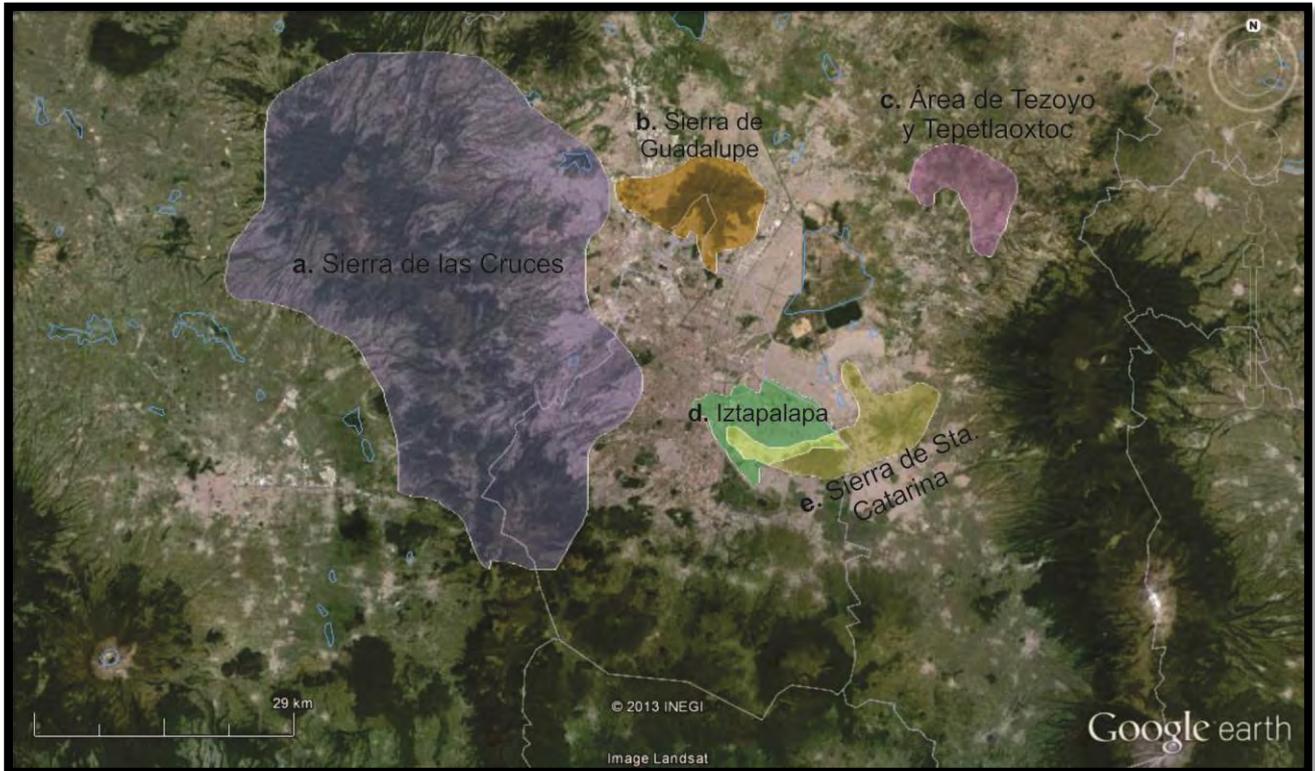


Figura 1.4 Cinco zonas con presencia de fallas dentro del Valle de México; a. Sierra de las Cruces, b. Sierra de Guadalupe, c. Área de Tezoyo y Tepetlaoxtoc, d. Iztapalapa, e. Sierra de Santa Catarina; límite estatal en gris.

#### a. Sistema de fallas Las Cruces

La sierra de Las Cruces (SC) constituye un límite morfológico entre las cuenca de México (2,220 msnm) y Toluca (2,400 msnm). Tiene una longitud de 110 km y un ancho de 47 km en su parte norte y 27 km en su parte sur. Este sistema lo componen fallas Normales desde el Pleistoceno hasta el Reciente. La caracterizan tres sistemas de fallas: N–S, NE–SW y E–W. El sistema de fallas N-S exhibe rumbos que varían entre N15°W a N 20°E, la zona de fallas NE-SW presenta un rumbo entre N45°E a N65°E y el tercer sistema de fallas presenta rumbos E-W. Una falla importante que pertenece a este primer sistema es la denominada falla Tula–Mixhuca. Esta es una amplia zona de deformación con dirección N–S a NNW–SSE localizada entre la ciudad de Tula, Estado de Hidalgo, y la porción sur de la cuenca de México, con una longitud aproximada de 80 km y un ancho de 30 km (Petit, 1987). Otras fallas reconocidas dentro de este sistema son las denominadas fallas Ayotuzco (Romero–Terán, 2001), que consisten en una serie de fallas NNW–

SSE que buzanan hacia el SW y están basculadas hacia el NE (Figura 1.5). La zona de fallas NE-SW es el segundo sistema de fallas que caracteriza a la sierra de Las Cruces y pertenece a la zona de cizallamiento Tenochtitlan (de Cserna *et al.*, 1988), que se localiza entre Petatlán, Guerrero, y la porción norte de la cuenca de México. Se trata de una estructura reactivada (García-Palomo, 2002). En la sierra de Las Cruces este sistema de fallas presenta un rumbo general entre N45°E a N 65°E, y también son definidas tendencias N20°E con un arreglo geométrico paralelo. Dentro de este sistema se reconocen varias zonas de fallas importantes, como la que se localiza en la parte norte de la SC y se denomina zona de fallas de La Catedral, la cual define zonas de más de 40 km de longitud, con dirección NNE-SSW y Buzamiento hacia el NW. La fosa de Cuernavaca (Macías, 2006) es una estructura de 45 km de largo y 25 de ancho, con un rumbo general NE-SW. Estructuralmente está delimitada por la falla Malinalco y la falla de Cañón de Lobos al oeste y este, respectivamente (Figura 1.5). El tercer y último sistema reconocido dentro de la SC es el sistema activo de fallas E-W, el cual está regionalmente asociado a la zona de fallas Chapala-Tula (Johnson y Harrison, 1990) o sistema de fallas de Acambay-Morelia (Suter *et al.*, 1991).

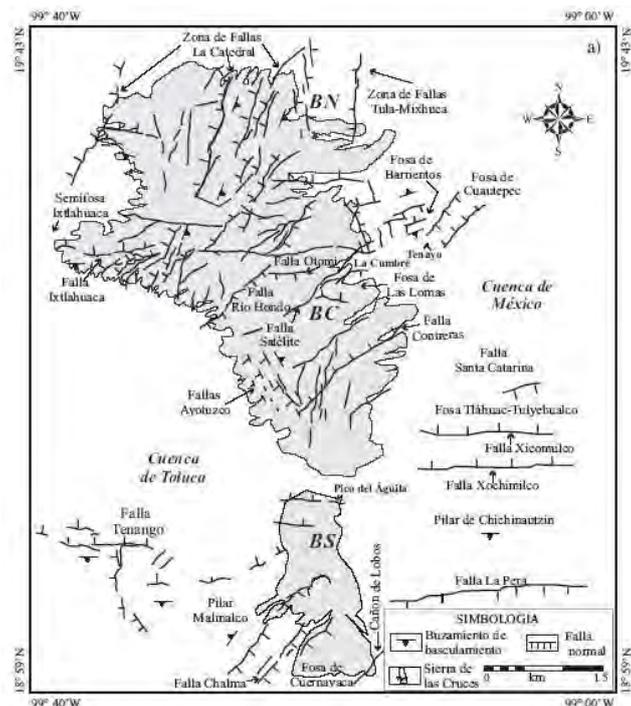


Figura 1.5 Fallas principales dentro de la sierra de Las Cruces. (García-Palomo, et al., 2008)

Entre las dos barrancas Río Hondo y Río Magdalena se localizan ocho fallas: Río Hondo, rumbo N 60°E, longitud 14 km; Hipódromo, rumbo N 53° E, longitud 6 km; Santa Fe, rumbo de N 45° E a N 80° E, 10 km; Contadero de N40° E a N 60° E, 17 km; Atzoyapán, rumbo N60°E, 11km; Colorado, rumbo N 60° E, 10 km; Colorado, rumbo N 60° E, 10 km; Contreras, rumbo N 60° E, 13 km.

#### *b. Sistema de fallas de la Sierra de Guadalupe*

Se localizaron siete fallas de las cuales las dos mayores: la falla de Tenayuca con rumbo N 40°E y longitud de ocho kilómetros presenta desplazamiento vertical, la Falla Chiquihuite, N 20° E, 12 km y presenta desplazamiento vertical, además muestran una alineación con las fallas Río Hondo e Hipódromo respectivamente (ambas forman parte del sistema Las Cruces). Además al norte de la Ciudad de México, se encuentra el sistema de fallas de Tenochtitlán-Apan (García-Palomo, et al., 2002) es una serie de fallas normales NE-SW distribuidas entre la Ciudad de México y Pachuca, originalmente definido como la zona de corte Tenochtitlán (de Cserna et al., 1988). La ocurrencia de dos eventos sísmicos de aproximadamente 5 Mw en la zona indica que esta estructura es activa (Quintanar et al, 2004).

#### *c. Sistema de fallas del área de Tepetlaoxtoc y Tezoyo*

En Tepetlaoxtoc se localizan tres fallas principalmente en este sistema: falla Hacienda la Flor con rumbo N 85° W y longitud 11 km; Falla paralela al nororiente de la falla Hacienda La Flor, rumbo N 50°W, longitud 6 km; Falla paralela al surponiente de la falla Hacienda La Flor con rumbo N 50°W, longitud tres km. En cambio Tezoyo se localiza al sur-suroriente de Coatepec y nororiente de Chalco, en la región limítrofe suroriental de la Cuenca de México. El arreglo estructural es muy similar al de la Sierra de Guadalupe, debido a la presencia de fallas mayores: falla Mirador, longitud 10 km; falla La Cañada, longitud 7 km; falla El Tezoyo, longitud 5 km y finalmente la falla El Olivar de longitud 9 km presentan desplazamiento vertical y un rumbo general de N 70-75° E.

#### *d. Sistema de fallas de Iztapalapa*

La Delegación Iztapalapa tiene una historia geológica conformada por la interacción de fallamiento regional, procesos fluvio-lacustres y la actividad volcánica Plio-Cuaternaria de la FVTM. Por otro lado, la distribución del hundimiento y deformación del terreno en la Delegación Iztapalapa está influenciada, principalmente, por la presencia de los edificios volcánicos de la sierra de Santa Catarina y Peñón del Marqués.

Existen cuatro sistemas de fracturamiento en la Delegación Iztapalapa:

1. Sistema NE-SW de orientación similar al borde de la Sierra de Santa Catarina.
2. Sistema E-W, alineado con la orientación general de la Calzada Zaragoza hacia el noreste de la Delegación Iztapalapa.
3. Sistema de fracturas que bordean el edificio volcánico del Peñón del Marqués.
4. Sistema de fracturas con dirección variable NE-SW y NS, hacia el sur de la Delegación Iztapalapa en la zona de San Lorenzo Tezonco. (Carreón-Freyre, 2012)

Y existen cinco mecanismos de fracturamiento del subsuelo en la Delegación Iztapalapa:

1. Deslizamiento gravitacional por bloques sobre una superficie de falla en los flancos norte y sur del Peñón del Marqués.
2. Deformación de materiales de alta plasticidad en las zonas lacustres de San Sebastián y Santa Cruz Meyehualco.
3. Colapso de materiales granulares no cohesivos (piroclásticos de caída) en zonas de pendiente.
4. Deformación diferencial en zonas de contacto y/o alternancia de materiales con alta heterogeneidad mecánica, como en la Colonia Santa María Aztahuacán.
5. Fracturamiento por el desplazamiento de grandes masas de bloques subyacidos por material granular a profundidades mayores de 50 m, como en la Colonia San Lorenzo Tezonco. (Carreón-Freyre, 2012)

*e. Sierra de Santa Catarina*

Debido al alineamiento de los volcanes de Santa Catarina, de oeste a este, con ligera desviación al norte. Mooser y Montiel-Rosado 1989 atribuyeron el origen de la sierra a cizalleo en un sistema de fallas al ENE sus estudios llevan a la conclusión que la sierra de Santa Catarina es producto de una falla principal inclinada al sur; y una secundaria casi paralela a la anterior inclinada al norte. De Cserna et al. (1988) reconocieron una falla de orientación N75-80°E que controla la sierra de Santa Catarina y otra N45°E sobre la que se orienta el volcán Guadalupe, la primera falla es de tensión y se ha desarrollado por la deformación debida a rotación producida por las fallas NE de desplazamiento horizontal derecho. (Lugo-Hubb, et al., 1994).

De la descripción de los cinco sistemas de fallas se entiende que generalmente están compuestos por fallas normales, la mayoría con dirección NE; sin embargo, algunos sismos de esta tesis no se ubican dentro de los sistemas de fallas antes descritos, probablemente su origen se deba a otros sistemas de fallas, pero conocer estos cinco sistemas de fallas es una referencia de lo que se puede esperar en otras áreas aún no estudiadas del Valle de México.

### 1.3 Zonificación del Valle de México de acuerdo con el tipo de suelo

Además de los sistemas de fallas presentes dentro de la cuenca del Valle de México se distinguen tres zonas diferentes, de acuerdo al tipo de suelo en la Ciudad de México (Figura 1.8):

- Zona I, firme o de lomas: localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles.
- Zona II o de transición: presenta características intermedias entre la Zonas I y III.
- Zona III o de Lago: localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco y Lago de Xochimilco). El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua.

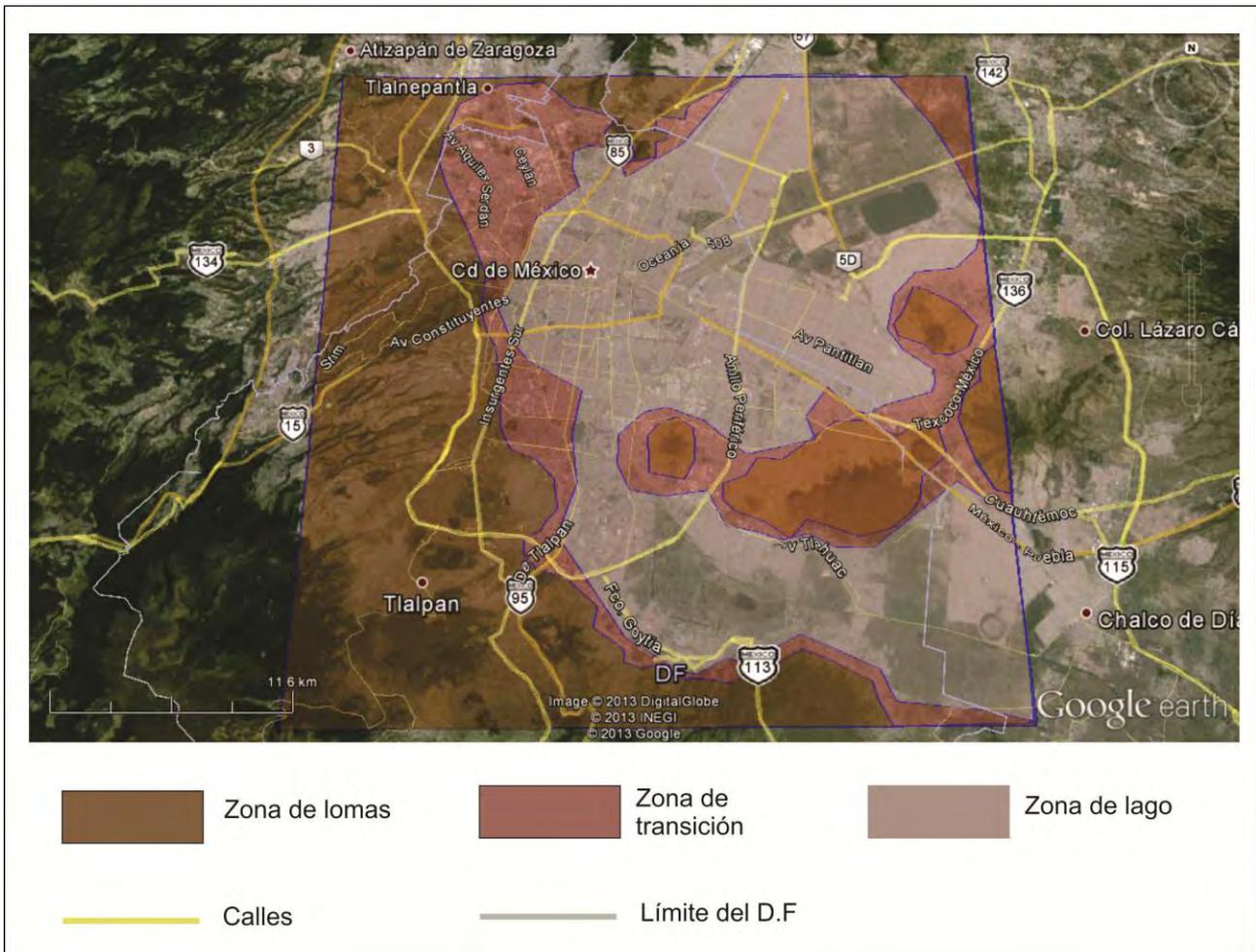


Figura 1.6 Zonificación de las regiones del valle por tipo de suelo: zona de lomas (café), transición (rosa) y de lago (gris). (Singh, et al., 2007)

Las ondas sísmicas se amplifican más en las zonas de lago con respecto a las zonas de loma de la Ciudad de México. Los resultados de Ordaz y Singh (1992) muestran que las amplitudes espectrales de estos sitios son aproximadamente 10 veces mayor de lo esperado para los sitios fuera de la Ciudad de México a distancias hipocentrales similares (Figura 1.7). Por ejemplo el análisis del sismo de Michoacán de septiembre de 1985 estuvo caracterizado por una amplificación del movimiento por un factor de 40 veces respecto de los sitios en zona de lomas (Singh et al., 1988).

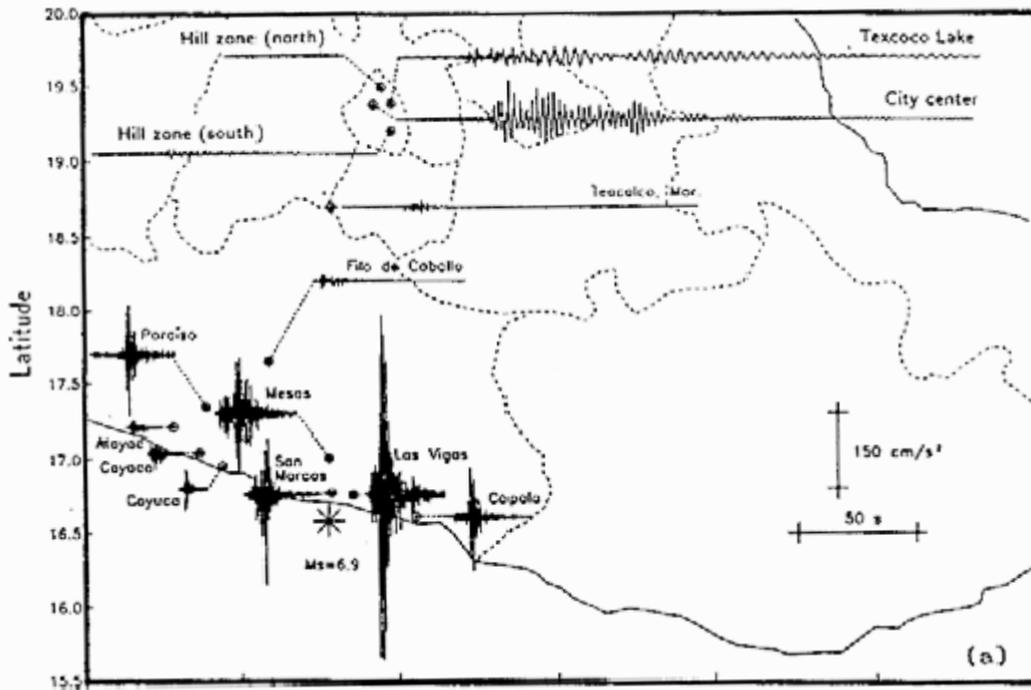


Figura 1.7 Sismo del 25 de abril de 1989, con epicentro en las costas de Guerrero.  
Sismogramas de la red acelerográfica de Guerrero.

En sus últimos estudios, Cardenas-Soto y Chávez-García (2003) demostraron que las amplificaciones regionales dependen de la trayectoria del rayo de las ondas sísmicas y sugieren que el causante de este fenómeno es la estructura geológica de la FVTM. Chávez-García y Quintanar (2010) proponen que la estructura de baja velocidad de la FVTM genera ondas de difracción y amplifica el movimiento del suelo, lo que explica las grandes amplificaciones.

## CAPÍTULO 2

### **Fundamentos teóricos para obtener los parámetros de la fuente.**

*En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y las herramientas matemáticas necesarias para obtener los parámetros de la fuente, así como la determinación del mecanismo de ruptura mediante diferentes métodos, para calcular los planos de falla.*

#### 2.1 Cálculo del momento sísmico, caída de esfuerzo y frecuencia de esquina a partir del espectro de amplitudes de Fourier. Parámetros que definen un foco sísmico de dimensiones finitas

Entre los modelos que definen una falla está el puntual, circular y rectangular. Los modelos más utilizados son el circular (Brune, 1970) y el rectangular (Haskell, 1964). El modelo de foco puntual, aunque aporta información sobre el proceso de ruptura, no es adecuado para representar la fuente de un terremoto. Es evidente que el foco tiene dimensiones, tanto en el espacio como en el tiempo. Las dimensiones de la fuente para terremotos de magnitud pequeña ( $m < 5$ ) se pueden aproximar considerando una fractura circular (Brune, 1970). Para terremotos mayores es más apropiado hacerlo por una falla rectangular de longitud  $L$  y anchura  $D$  (Haskell, 1964). En este segundo caso, se supone una fractura que se propaga a lo largo de  $L$  con velocidad uniforme de fractura  $v$  (Ben Menahen, 1961).

La magnitud de los sismos con epicentro en el Valle de México es menor o igual a 4.5, el modelo más conveniente es el de falla circular. El primer modelo de fractura de la fuente sísmica fue propuesto por Keilis-Borok (1959) quién estudió un modelo de falla circular muy simple y estableció la primera relación entre la caída de esfuerzo en el interior de la falla y la dislocación media en la misma. Aki (1967) observó que el espectro de los sismogramas en el campo lejano tiene una forma simple, lo que se llama actualmente el modelo  $\omega^{-2}$ . Él demostró que para terremotos de magnitud inferior a 8, estos espectros dependen de un sólo parámetro de escala: la dimensión característica o longitud de la ruptura del terremoto. Poco después Brune (1970) propuso un modelo de falla circular para explicar el modelo  $\omega^{-2}$ . Aunque el modelo de Brune es una aproximación semiempírica, Madariaga (1988) demostró que el espectro de los sismogramas en el campo lejano se podía explicar con un modelo muy simple de una falla circular que crece a partir de su punto de nucleación a velocidad constante. Este modelo está definido por los parámetros de fuente: Momento sísmico ( $M_0$ ), frecuencia de esquina ( $\omega_c$ ) y la caída de esfuerzos

(D<sub>s</sub>). Estos parámetros pueden estimarse a partir del espectro de amplitudes o módulo de la transformada de Fourier, obtenidos a partir del registro sísmico (Udías, et al., 1989).

## 2.2 Relación entre el espectro de amplitudes y el momento sísmico

La radiación de ondas sísmicas en el campo lejano a partir de una dislocación, ecuación (1) y (2) (Udías, et al., 1989).

$$\text{Ondas P:} \quad u^P(t) = \frac{1}{4\pi\rho_0\alpha_0^3} \sqrt{\frac{\rho_0\alpha_0}{\rho\alpha J}} R^P(\gamma) \dot{M}(t - T_\alpha) \quad (1)$$

$$\text{Ondas S:} \quad u^S(t) = \frac{1}{4\pi\rho_0\beta_0^3} \sqrt{\frac{\rho_0\beta_0}{\rho\beta J}} R^S(\gamma) \dot{M}(t - T_\beta) \quad (2)$$

Donde  $\rho$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son la densidad y la velocidad de transmisión de las ondas P y S, el subíndice cero indica que estos valores son tomados en la fuente del terremoto, J es la divergencia geométrica que mide la variación de amplitudes con la distancia y  $R^P(\gamma)$  y  $R^S(\gamma)$  representan los diagramas de radiación cuadrupolar de las ondas P y S,  $\gamma$  es un vector unitario en la dirección de radiación del rayo en la fuente. El término  $\dot{M}(t - T_\beta)$  es la derivada del momento sísmico. Esta es la señal producida por la fuente y que se propaga con la velocidad de las ondas P o S para obtener  $M(t - T_\beta)$ , Lo más conveniente es describirla en el dominio de las frecuencias. Para ello tomamos la transformada de Fourier de (1) o (2), en este caso el espectro o transformada de Fourier, de  $u^P$  o  $u^S$  es directamente proporcional al espectro de  $\dot{M}$  (Udías, et al., 1989).

La transformada de Fourier en el dominio de las frecuencias de las ecuaciones (1) y (2), se expresa como la ecuación (3) y se resuelve usando series de Fourier (Shearer, 1999)

$$\begin{aligned} U(\omega) &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{1}{T} e^{i\omega t} dt = \frac{1}{Ti\omega} (e^{i\omega T/2} - e^{-i\omega T/2}) \quad (3) \\ &= \frac{1}{Ti\omega} \left[ i\sin\left(\frac{T\omega}{2}\right) - i\sin\left(-\frac{T\omega}{2}\right) + \cos\left(\frac{T\omega}{2}\right) - \cos\left(-\frac{T\omega}{2}\right) \right] \\ &= \frac{1}{Ti\omega} 2i\sin\left(\frac{T\omega}{2}\right) \\ &= \frac{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{\frac{\omega T}{2}} \end{aligned}$$

El resultado es una función conocida como sinc  $x = (\sin x)/x$ . La amplitud espectral de la señal de la fuente es el producto del momento sísmico y dos términos sinc, donde  $T_R$  y  $T_D$  son el tiempo de ruptura y el rise time.

$$|A(\omega)| = M_0 \left| \frac{\sin(\omega T_R/2)}{\omega T_R/2} \right| \left| \frac{\sin(\omega T_D/2)}{\omega T_D/2} \right| \quad (4)$$

En función del logaritmo la ecuación (4) se escribe

$$\log A(\omega) = \log M_0 + \log[\text{sinc}(\omega T_R/2)] + \log[\text{sinc}(\omega T_D/2)] \quad (5)$$

En la figura 2.1 se muestra el modelo de Brune (1970), se gráfica  $\log A(\omega)$  vs  $\log(\omega)$ . El *momento sísmico* ( $M_0$ ) es el valor donde el primer segmento del espectro con pendiente cero corta a la ordenada, es decir, cuando la frecuencia tiende a cero, que es proporcional a  $M_0 = M(\omega \rightarrow 0)$ . La *frecuencia de esquina* ( $F_c$ ) es la intersección entre el primer y el tercer segmento del espectro (Stein & Wysession, 2003).

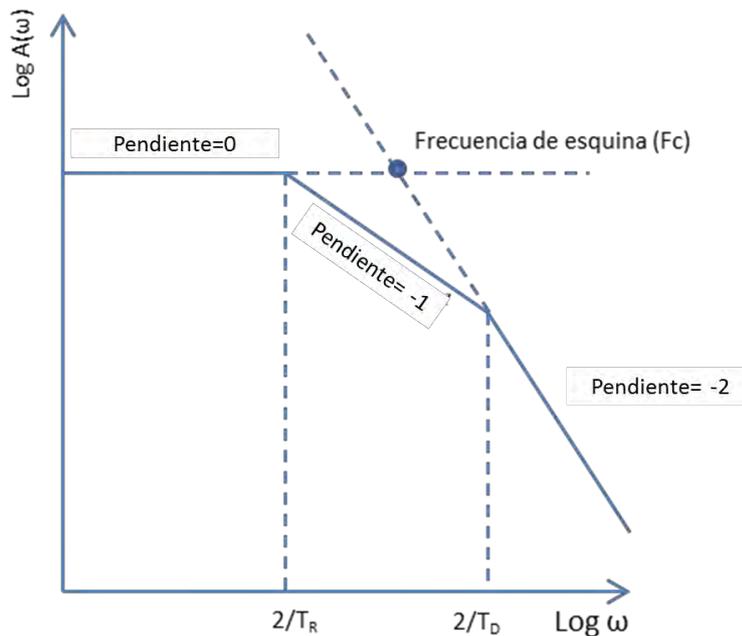


Figura 2.1 Espectro de desplazamiento modelado en tres regiones con pendientes 0, -1 y -2 divididas por la frecuencia angular que corresponden al tiempo de ruptura ( $T_R$ ) y al aumento del tiempo ( $T_D$ ). La frecuencia de esquina es la intersección entre el primer y el tercer segmento del espectro, el momento sísmico es el primer segmento con pendiente cero cuando la frecuencia es igual a cero (Stein & Wysession, 2003)

La frecuencia de esquina puede estar controlada por las dimensiones de la fuente, esto se explica cuando a frecuencias bajas, la fuente parece una dislocación puntual. A frecuencias altas, al ser las longitudes de onda más cortas que la dimensión de la fuente, la radiación es afectada por la difracción alrededor de los bordes de la falla, lo que explica el decaimiento espectral  $\omega^{-2}$ . La frecuencia de esquina está dada por:

$$f_c = N \frac{\beta}{L} \quad (6)$$

donde N representa un factor numérico cercano a 2.3,  $\beta$  es la velocidad de las ondas S y L la dimensión característica de la falla.

### 2.2.1 Atenuación

La atenuación de las ondas de cuerpo de un sismo se caracterizan por el parámetro  $t^*$ , cuando el rayo viaja a través de un medio definido por la constante Q.

$$t^* = \frac{t}{Q} = \frac{\text{tiempo de viaje}}{\text{factor de calidad}} \quad (7)$$

La  $t^*$  se calcula con la integral a lo largo de la trayectoria fuente-estación.

$$t^* = \int \frac{dt}{Q} \quad (8)$$

Para la onda P el valor de  $t^*$  es de 1 seg. aproximadamente y para la onda S generalmente  $t^*$  es de 4 seg (Stein, et al., 2003). La atenuación en el manto inferior es despreciable en comparación con aquella que se produce en la zona de baja velocidad o astenosfera, las ondas a distancias cortas, inferiores a 100 km, se propagan en la litosfera y la atenuación es más débil. El operador de atenuación  $F_Q$  se calcula a partir de  $t^*$  aplicando la siguiente ecuación.

$$F_Q = \exp(-\omega t^*) \quad (9)$$

### 2.3 Espectro de amplitudes de la onda S

El módulo del espectro de amplitudes de la onda S, registrada a distancia r, en un medio homogéneo está dado por:

$$|u(\omega, r)| = M_0 \frac{\text{sen} X}{X} \frac{R(\theta, \varphi)}{4\pi\beta^3 r \omega} \exp\left(-\frac{\omega r}{2\beta Q}\right) \quad (10)$$

donde

$$X = \frac{\omega L}{2\beta} \left( \cos\varphi - \frac{\beta}{v} \right) \quad (11)$$

En la ecuación ( 10 )  $\frac{\text{sen}X}{X}$  es el efecto de las dimensiones de la falla,  $M_0$  el momento sísmico, el ángulo de desplazamiento  $\theta$  está medido desde la vertical, el ángulo acimutal  $\varphi$  desde la traza de falla; finalmente, la función exponencial representa la atenuación inelástica. En la ecuación ( 11 ),  $\beta$  es la velocidad de la onda S,  $L$  la longitud de la falla y  $v$  la velocidad con la que se produce la fractura de forma unilateral.

En un modelo circular (Brune, 1970), es posible determinar el radio de falla ( $r$ ) a partir de la frecuencia de esquina  $f_c$ . Ya que, para las ondas S se estableció que:

$$r = \frac{2.34\beta}{f_c} \quad ( 12 )$$

Para el modelo de falla rectangular, se tiene la siguiente ecuación, que relaciona la frecuencia de esquina con el área de la falla.

$$\sqrt{LD} = \frac{3.83\beta}{f_c} \quad ( 13 )$$

Sí conocemos el *momento sísmico* ( $M_0$ ) y las dimensiones de la falla se puede encontrar la *caída de esfuerzo* ( $\Delta\sigma$ ) (Udías, 1989).

$$\Delta\sigma = c \frac{M_0}{S^{3/2}} \quad ( 14 )$$

Donde  $c$  es una constante con valor entre 2.4 y 5, que depende de la geometría de la falla. Existe una ecuación más a partir de la cual es posible relacionar el momento sísmico con la magnitud del momento sísmico  $M_w$  (Udías, 1989).

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad ( 15 )$$

## 2.4 Mecanismos focales.

El mecanismo focal se calculó usando el programa descrito en el artículo de Singh, et al. (2000), en el cual se implementa una inversión para calcular los parámetros de fuente de sismos de magnitud menor registrados a distancias cortas, es decir, inferiores a 100 km, dado que las ondas sísmicas a distancias cortas de la fuente son menos afectadas por el efecto de la trayectoria. Se supone un modelo de fuente puntual y se considera al medio como un espacio infinito.

Las componentes de desplazamiento en coordenadas esféricas en un espacio infinito debido a una fuente puntal, como se encuentran en el trabajo de Singh, et al. (2000)

$$u^R = \frac{M_0}{4\pi\rho} F^R \left[ \frac{1}{R\alpha^3} \dot{g}(t - r/\alpha) + \frac{9}{R^4} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau g(t - \tau) d\tau + \frac{4}{R^2\alpha^2} g(r - R/\alpha) - \frac{3}{R^2\beta^2} g(t - R/\beta) \right] \quad (16)$$

$$u^\theta = \frac{M_0}{4\pi\rho} F^\theta \left[ \frac{1}{R\beta^3} \dot{g}(t - r/\beta) - \frac{6}{R^4} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau g(t - \tau) d\tau - \frac{2}{R^2\alpha^2} g(r - R/\alpha) + \frac{3}{R^2\beta^2} g(t - R/\beta) \right] \quad (17)$$

$$u^\varphi = \frac{M_0}{4\pi\rho} F^\varphi \left[ \frac{1}{R\beta^3} \dot{g}(t - r/\beta) - \frac{6}{R^4} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau g(t - \tau) d\tau - \frac{2}{R^2\alpha^2} g(r - R/\alpha) + \frac{3}{R^2\beta^2} g(t - R/\beta) \right] \quad (18)$$

donde  $M_0\dot{g}(t)$  es la función tiempo-fuente y  $\int_0^\infty \dot{g}(t) dt = M_0$ .  $R$  es la distancia hipocentral,  $\alpha$  y  $\beta$  son las velocidades de P y S respectivamente, y  $\rho$  es la densidad. El primer término corresponde al campo lejano, el segundo es el campo cercano, los últimos dos al campo intermedio. A continuación se muestran los términos del campo cercano

$$F^R = \cos\lambda \sin\delta \sin^2 i_\xi \sin 2(\varphi - \varphi_s) - \cos\lambda \cos\delta \sin 2i_\xi \cos(\varphi - \varphi_s) + \sin\lambda \sin 2\delta (\cos^2 i_\xi - \sin^2 i_\xi (\varphi - \varphi_s)) \sin\lambda \cos 2\delta \sin 2i_\xi \sin(\varphi - \varphi_s) \quad (19)$$

$$F^\theta = \sin\lambda \cos 2\delta \cos 2i_\xi \sin 2(\varphi - \varphi_s) - \cos\lambda \cos\delta \cos 2i_\xi \cos(\varphi - \varphi_s) + \frac{1}{2} \cos\lambda \sin\delta \sin 2i_\xi \sin 2(\varphi - \varphi_s) \frac{1}{2 + \sin\lambda \sin 2\delta \sin 2i_\xi (1 + \sin^2(\varphi - \varphi_s))} \quad (20)$$

$$F^\varphi = \cos\lambda \cos\delta \cos i_\xi \sin(\varphi - \varphi_s) + \cos\lambda \sin\delta \sin i_\xi \cos 2(\varphi - \varphi_s) + \sin\lambda \cos 2\delta \cos 2i_\xi \cos(\varphi - \varphi_s) - \frac{1}{2} \sin\lambda \sin 2\delta \sin i_\xi \sin(\varphi - \varphi_s) \quad (21)$$

donde  $\phi$ ,  $\delta$  y  $\lambda$  corresponden al rumbo, buzamiento y el ángulo de deslizamiento de la falla,  $\phi_s$  es el rumbo de la estación e  $i_\xi$  es el ángulo de salida.

El algoritmo emplea las funciones de Green de un punto de origen en un espacio infinito para invertir las señales de sismos pequeños y moderados a distancias cortas. La inversión utiliza las formas de onda, no sólo las amplitudes y sus polaridades. Las componentes de desplazamiento, expresadas en coordenadas esférica (ecuaciones 21, 22 y 23), se pueden transformar a cualquier otro sistema de coordenadas ortogonales, como NS-EW-Z o Radial-Transversal-Z, para que coincida con los datos de entrada. Los desplazamientos observados en este sistema están dados como  $U_{1j}$ ,  $U_{2j}$ ,  $U_{3j}$ , donde  $j$  corresponde al número de cada estación. El efecto de la superficie libre se toma en cuenta multiplicando los sintéticos del espacio infinito por un factor de dos. En la longitud del registro usado en la inversión se excluye la onda SV, que llega antes de la onda SH y no es unipolar, esto asegura la validez del modelo de un espacio infinito.  $\varepsilon(M_0, \delta, \lambda, \varphi)$  es la función de desajuste.

$$\varepsilon(M_0, \delta, \lambda, \varphi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 u_{ij} \int_{R_i/\alpha_i}^{T_{ij}} (U_{ij}(t) - u_{ij}(t))^2 dt \quad (22)$$

El valor de  $N$  corresponde al número de estaciones,  $j$  es la componente e  $i$  la estación,  $T_{ij}$  corresponde a la duración de la componente  $j$  en la estación  $i$  elegida para realizar la inversión y  $R_i/\alpha_i$  corresponde al tiempo de arribo de la onda  $P$  a la estación  $i$ . El algoritmo permite asignar diferentes valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\rho$  para diferentes estaciones. Antes de iniciar la inversión, el valor de  $\beta$  se cambia hasta que la onda  $S$  del sismograma sintético se alinea con el sismograma real de cada trayectoria fuente-estación. En la selección de  $\beta$ , los sismogramas sintéticos se calculan para cada mecanismo focal y la función tiempo-fuente se determina mediante la inspección de los sismogramas grabados. La forma de esta función puede ser considerada como un triángulo o un trapecio, también puede elegirse una función arbitraria. La inversión se realiza después de que se fijan la función tiempo-fuente y la  $\beta$  para cada trayectoria origen-estación. En este caso como la distancia aumenta la solución del espacio infinito se hace menos sostenible, esto es cuanto más lejos están las estaciones, hay un decaimiento en la amplitud con la distancia.

Finalmente, el algoritmo guarda las cinco mejores soluciones con su error, al realizar una búsqueda en la retícula, que se realiza a través del  $M_0$  y los parámetros que definen el mecanismo focal, para seleccionar el mejor resultado que minimice el desajuste. En el presente trabajo se consideró una función tiempo-fuente de un triángulo isósceles y se seleccionó la mejor solución de acuerdo al menor error de las cinco soluciones dadas.

## CAPÍTULO 3.

### **Estaciones de la RSVM, espectro de aceleración y mecanismos focales**

*Este capítulo presenta la ubicación de las 30 estaciones de la red del Valle de México (RSVM) y el procedimiento para generar los archivos de respuesta instrumental. Con esos registros se obtiene el espectro de aceleración para obtener los parámetros de la fuente y además realizar una inversión para obtener mecanismos focales usando funciones de Green a fin de obtener un sismograma sintético y compararlo con el observado.*

#### *3.1 Calibración de los sismómetros de la Red del Valle de México*

La Red Sísmica del Valle de México (RSVM) cuenta con 30 estaciones digitales, 16 estaciones están instaladas en cada Delegación del Distrito Federal y las otras 14 en algunos municipios del Estado de México. Todos los sismómetros son de banda ancha; los instalados en el D.F son marca Reftek modelo 151-60 de 6 canales y antena GPS (Reftek, 2010), mientras que los instalados en el Estado de México son marca Guralp modelo CMG-6TD (Guralp, 2008) con un digitalizador de 3 canales y antena GPS (Servicio Sismológico Nacional, 2013). Su ubicación se muestra en las figuras 3.1 y 3.2 (En el apéndice I se proporcionan las coordenadas de las estaciones). Los datos de salida de estos instrumentos se encuentran en cuentas y velocidad, por lo que fue necesario crear archivos de polos y ceros para transformarlos a unidades métricas. Se aplicaron los archivos de respuesta a las formas de onda que provienen de los instrumentos Guralp y Reftek y se convirtieron a unidades cm/seg.

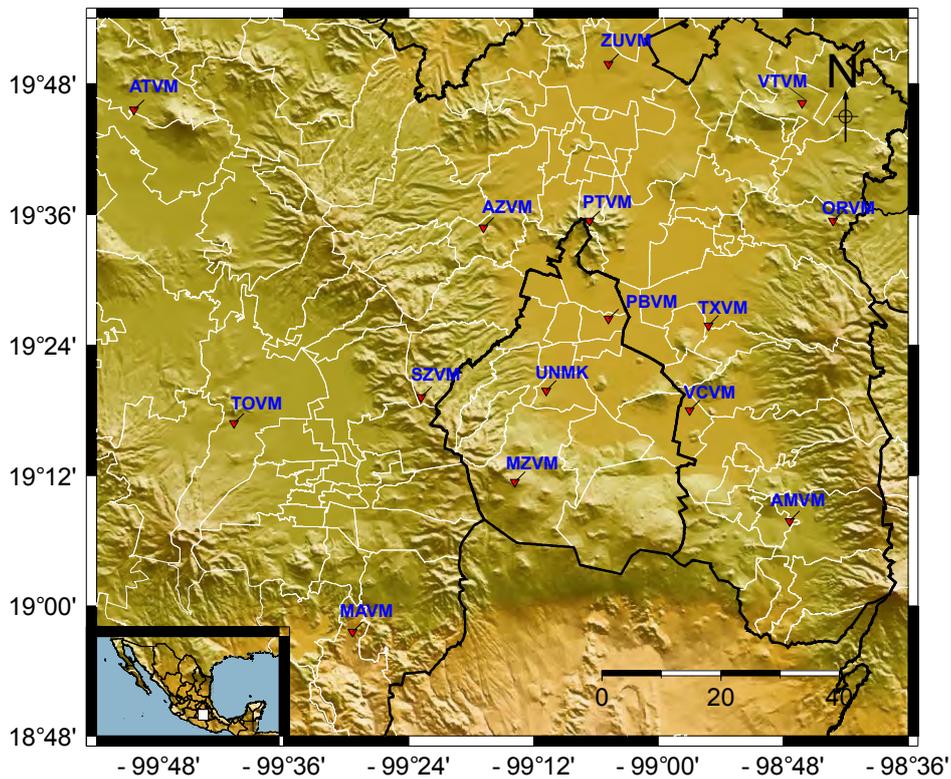


Figura 3.1 Ubicación de las estaciones Guralp (triángulos rojos) de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) con sus respectivos nombres, la línea negra marca la división estatal y la línea blanca la división municipal.

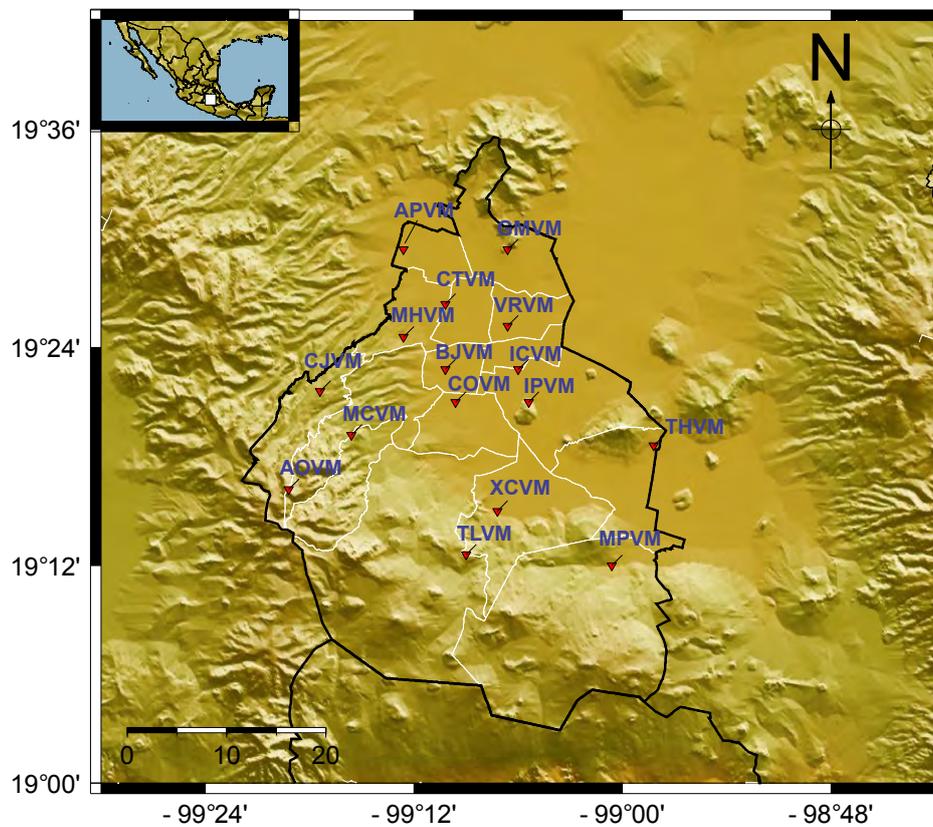


Figura 3.2 Ubicación de las estaciones Reftek (triángulos rojos) de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) con sus respectivos nombres, la línea negra marca la división estatal y la línea blanca la división municipal.

3.1.1 Creación de archivos de polos y ceros para emplearse en el programa SAC de los datos de salida del instrumento Guralp.

Se uso el programa SAC para realizar la conversión de unidades (SAC, 2013). De los documentos de información de cada instrumento se obtienen los valores de los polos y ceros [Hz], el factor de normalización A0 [Hz], la ganancia del sensor [V/m/s] y la ganancia del digitalizador [ $\mu$ V/cuentas] (Guralp, 2008) (Reftek, 2010).

Para convertir los polos y ceros a radianes, tanto la parte real como la imaginaria de los polos y ceros se multiplican por  $2\pi$ . La conversión a radianes/s del factor de normalización, el cual escala la amplitud de la función de transferencia a la unidad, se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación (Havskov, 2010).

$$A0[\text{rad/seg}] = A0[\text{Hz}] \times (2\pi)^{\text{no.polos} - \text{no.ceros}} \quad (23)$$

Se debe calcular la constante para remover la respuesta instrumental. Esta constante esta dada en términos del factor de normalización A0 [Hz], la ganancia del sensor [V/m/s] y la ganancia del digitalizador [ $\mu$ V/cuentas] (Havskov, et al., 2010).

$$\text{Constante} \left[ \frac{\text{cuentas}}{m} \right] = A0[\text{rad/s}] \times \text{Ganancia del Sensor} \left[ \frac{\text{V}}{\frac{m}{s}} \right] \times \frac{1}{\text{Ganancia del Digitalizador} \left[ \frac{\text{cuentas}}{V} \right]} \quad (24)$$

Una vez que se tienen los valores, se crea el archivo de respuesta instrumental en el formato adecuado para emplear la función *transfer* del programa SAC (Tabla 3.1).

ZEROS (No. De ceros)
Valor de cero real    valor de cero imaginario
POLES (No. De polos)
Valor del polo real    valor del polo imaginario
CONSTANT (valor de la constante)

Tabla 3.1 Estructura del archivo de polos y ceros, Usada en SAC, aplicando la función *transfer*.

Debido a que la ganancia del sensor y la del digitalizador varían en cada componente tanto horizontal como vertical de cada instrumento, entonces fue necesario crear un archivo de respuesta para cada componente de cada una de las estaciones. En el *Apéndice II* se muestran los tres archivos de respuesta de la estación MZVM (Mezontepec, D.F), fue la estación con una mejor relación señal-ruido, por lo que sus señales fueron las más usadas en el presente trabajo.

### 3.1.2 Archivos de polos y ceros en formato SAC de los datos de salida de Reftek.

En el caso de los instrumentos de Reftek, no es necesario realizar la conversión a radianes ya que los valores de Polos y Ceros y la A0 ya están dados en estas unidades. Sin embargo, con la ecuación ( 24 ) es posible calcular la constante de cada estación Reftek y con ello crear los archivos de calibración de estos instrumentos.

Con el fin de comprobar que las señales se corrigieron de manera adecuada, se usó un evento de magnitud significativa, que cumpliera ciertas características entre ellas ser de magnitud  $M > 5$ , regional y no haber saturado el registro sísmico de alguna de las estaciones de la RSVM. Se escogió el evento con epicentro a 53 km al noroeste de Zumpango del Río, Gro. del día 10 de diciembre del 2012 a las 19:47:25 (hora local), cuya forma de onda original estaba dada en velocidad y se le aplicó el archivo de respuesta. Por su cercanía y el tipo de suelo donde fue instalada la estación (COVM) fue posible comparar la señal con la registrada en la estación CUIG del SSN (instalada en C.U). Con esto se consiguió comparar las unidades y comprobar que los archivos creados para aplicar la respuesta instrumental a las señales produjeran un archivo de salida en unidades métricas congruente con la salida similar de la estación de banda ancha CUIG.

### 3.2 Obtención de los espectros de sismos con epicentro en el Valle de México.

Para obtener el espectro de aceleración, se siguió el método descrito por Singh et al. (2007) y que consiste a grandes rasgos en estimar el espectro de aceleración y ajustarlo con el observado. Además se usaron formas de onda corregidas por respuesta instrumental obtenidas como se describió en el apartado 1 de este capítulo. Lo siguiente fue transformar las formas de onda de SAC a ASCII, para leer estos archivos en el programa Degtra A4, versión 4.0 ya que el formato del archivo de salida espectral de este programa es el más conveniente para trabajar y manipular los datos. Degtra es un programa útil para visualizar y manipular señales, y éstas se pueden integrar, derivar, filtrar, calcular el espectro de amplitud, sumar, restar, corregir por línea base entre otras operaciones (Ordaz, et al., 2005).

Una vez que se tienen los archivos en formato ASCII y se leen en Degtra, se corta una ventana de un segundo antes y después de la llegada de S (el tiempo es arbitrario y cambia con cada evento). Después se deriva, con esta operación las señales se convierten a aceleración [ $\text{cm/s}^2$ ]. Se obtiene el espectro de Fourier de cada componente y aprovechando el mismo programa también se calcula la función de transferencia realizando el cociente de cada componente horizontal con respecto a la componente vertical. Se calculó el espectro promedio sólo de las componentes horizontales (Figura 3.3). Es importante señalar que los resultados del análisis espectral son obtenidos considerando el

modelado del espectro sin incluir los efectos de sitio, es decir, considerando un modelo omega cuadrada teórico.

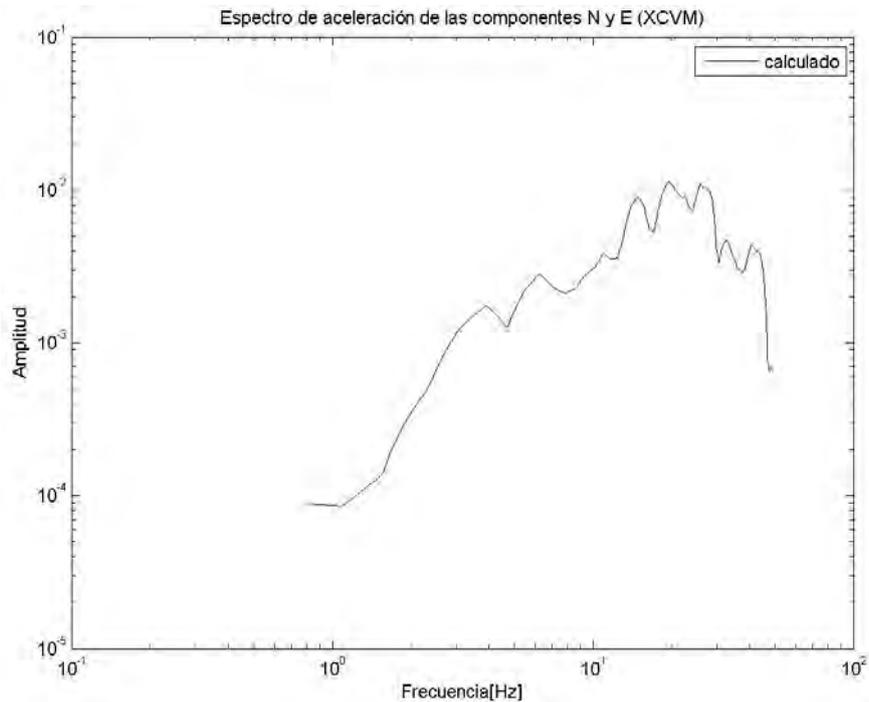


Figura 3.3. Espectro de aceleración del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México, promedio de las componentes horizontales.

A continuación, se graficó el espectro de Fourier teórico y el espectro promedio de las componentes horizontales, en escala loglog. Se compararon estos espectros y se modificaron los parámetros de entrada hasta encontrar el espectro teórico que mejor se ajustara al espectro calculado (Figura 3.4).

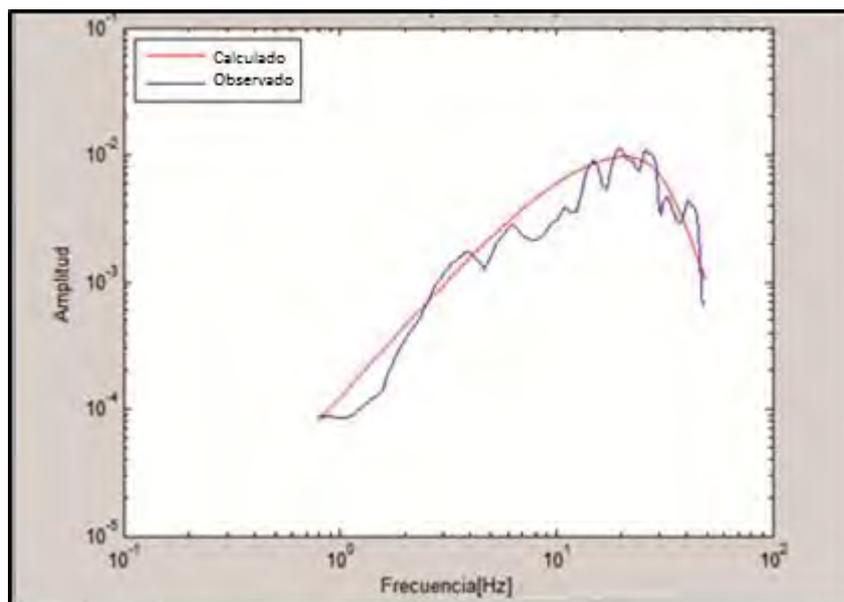


Figura 3.4. Comparación entre el espectro teórico y el estimado, del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa

Para realizar la comparación entre el espectro teórico y el espectro de aceleración de las componentes horizontales, es necesario realizar el promedio de los espectros de las componentes horizontales de cada estación. Y de igual forma se calcula el promedio de la función de transferencia del cociente de las componentes horizontales/componentes verticales, es decir E/Z y N/Z.

Cuando se ejecuta el programa, éste nos pide el archivo con los parámetros de entrada, con ellos genera un espectro de Fourier teórico, como son (tabla 3.2):

- 4 Caída de esfuerzo
- 5 Magnitud
- 6 Distancia hipocentral
- 7  $t^*$

1	Indica que se trata de un modelo $\omega^2$ , de fuente puntual
30.0,180,0.66,3.4,2.85,30,4,2,0.005,3,0.05	Se definen los parámetros del espectro y de la atenuación. (caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ), $Q_0$ , $\epsilon$ , velocidad de las ondas S en km/s ( $\beta$ ), densidad en $\text{gr/cm}^3$ ( $\rho$ ), frecuencia de corte en Hz ( $F_{\text{MAX}}$ ), número de polos del filtro Butterworth (S), factor de amplificación en la superficie libre (FS), factor de atenuación cerca de la superficie en s ( $t^*$ ))
XCVM.HZ	Es el nombre del archivo que contiene la función de transferencia

*Tabla 3.2 Parámetros de entrada para calcular el espectro teórico que será comparado con el espectro de Fourier, calculado de las componentes horizontales, columna izquierda ejemplo de los valores para el evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México. Columna derecha se define cada parámetro.*

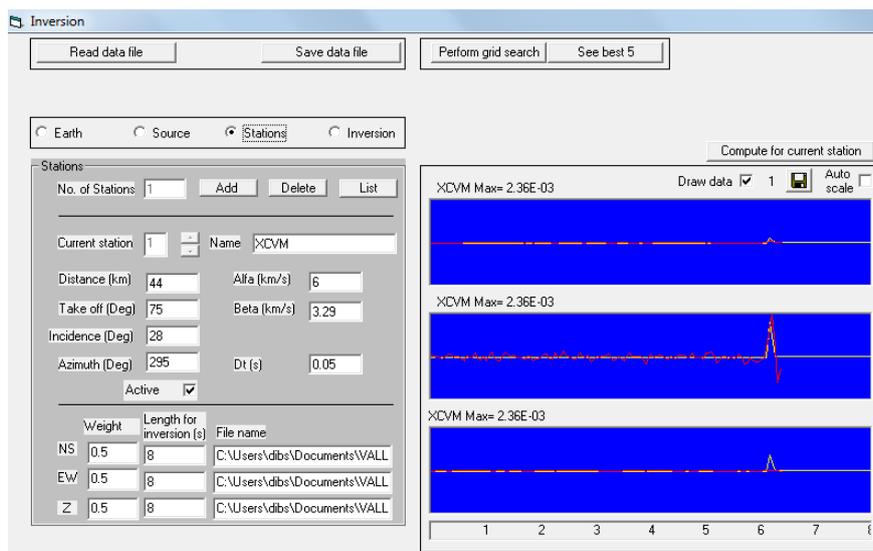
### 3.3 Obtención de mecanismos focales de sismos con epicentro en el Valle de México.

El mecanismo focal se determinó siguiendo el método descrito por Singh, et al. (2000), el cual permite recuperar los parámetros de la fuente de sismos de magnitud moderada (mayor o igual a 2 y menor o igual 4) registrados a distancias menores a 100 km. Los fundamentos teóricos sobre este método se encuentran en el subtema 2.4 del presente trabajo. En este caso se emplearon los sismogramas en unidades de desplazamiento.

Una vez con los datos en velocidad se integraron para obtener las formas de onda en unidades de desplazamiento. Fue necesario ajustarlos por línea base hasta conseguir observar únicamente la

fase P y S. Se asignan parámetros de entrada: momento sísmico y se asignó la forma a la función tiempo-fuente de acuerdo con el análisis de la forma del pulso P del sismograma. Esta función podía ser triangular, trapezoidal o podía establecerse alguna otra forma arbitrariamente. En este caso se usó la forma triangular que era la que mejor ajustaba.

Es necesario conocer algunos datos de entrada como son: la distancia hipocentral, el rumbo, ángulo de entrada con respecto a la estación que registró el sismo, el ángulo de salida con respecto al hipocentro (Figura 3.5).



*Figura 3.5. La ventana izquierda es donde se asignan los parámetros de entrada: la distancia hipocentral, el rumbo, ángulo de entrada con respecto a la estación que registró el sismo, el ángulo de salida con respecto al hipocentro y el modelo de velocidades y la ventana del lado izquierdo muestra la correlación entre el sismograma sintético y el original.*

Se genera el sismograma sintético y se compara con el observado, finalmente, se escoge una de las cinco mejores soluciones con el menor error presentadas por el programa, la elección depende de tener un conocimiento previo de la tectónica regional que es esencial para limitar la solución. Cada solución proporciona el rumbo, el buzamiento, el ángulo de deslizamiento y el momento sísmico, además del error del momento sísmico.

### 3.4 Modelo de velocidad local

A partir del registro de explosiones en la Cantera que se encuentra cerca de Ciudad Universitaria, Jiménez estimó un modelo de velocidades de capas planas para el sur de la ciudad de México, a partir de los tiempos de viaje observados. Este modelo (Tabla 3.2), es el que se ha empleado para localizar los eventos, también para calcular las funciones de Green y determinar el mecanismo focal (sección 3.2 y 3.3).

<b>Profundidad superior [Km]</b>	<b>Velocidad P [Km/s]</b>	<b>Velocidad S [km/s]</b>
0	2.9	1.7
2	4.7	2.7
5	6	3.5
12	6.8	3.9
23	7.7	4.5
45	8.1	4.7
100	8.3	4.8
150	8.6	5.0

*Tabla 3.2 Modelo de velocidades de la zona sur del D. F. específicamente Ciudad Universitaria, Coyoacán.  
Calculado por Jiménez*

Aunque de los estudios geológicos se sabe de la heterogeneidad de los suelos del Valle de México y se debería emplear un modelo de velocidades para cada zona del Valle, se optó sin embargo, por emplear el modelo de velocidades de Jiménez; por ser el que, hasta el momento, mejor representa la velocidad de las ondas a esas profundidades, en esta zona.

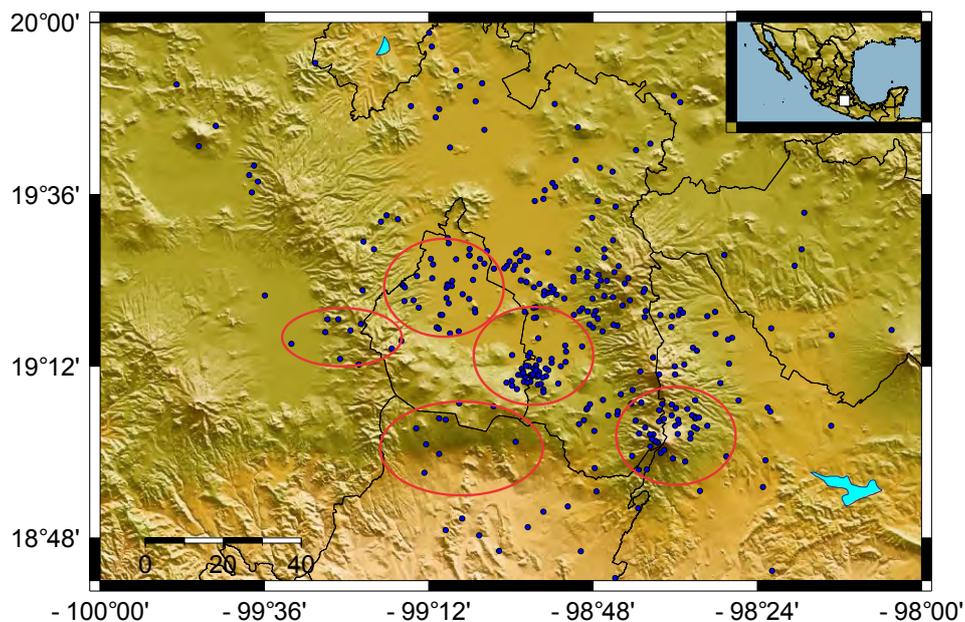
## CAPÍTULO 4

### Resultados y análisis

*Se realizó un análisis por regiones, dividiendo al Valle de México en cinco regiones basados en la sismicidad: región norte del Valle de México, región oriente, poniente, sur y nororiente. Se presenta su mecanismo focal y el tipo de falla causante de la sismicidad. Se realiza un análisis de las caídas de esfuerzo obtenidas y de la  $t^*$  como indicador de la atenuación del medio.*

#### 4.1 Localización de los sismos (2008-2012)

La RSVM entró en funcionamiento a partir del año 1995. El catálogo de eventos con epicentro en el Valle de México no había sido actualizado desde 2008, por lo que se actualizó con las formas de onda del SSN y la RSVM, la figura 4.1 muestra la recopilación de eventos desde 1994 a la fecha. Además se eligieron cinco regiones, separadas por su ubicación geográfica y de acuerdo a su semejanza por el tipo de mecanismo focal. Sin embargo, como se puede observar en la figura 4.1 ocurren sismos fuera de estas cinco regiones. Durante el periodo 2008-2012 no se tiene registro de alguno de sismos con epicentro afuera de los círculos rojos señalados en la figura 4.1 y no fue posible estudiar otras regiones excepto las cinco mostradas.



*Figura 4.1 Localización de los eventos desde 1994 al 2012, los círculos azules muestran la ubicación de cada evento, los círculos rojos muestran las cinco regiones de sismicidad, separadas por su ubicación geográfica y de acuerdo a sus semejanzas por el tipo de mecanismo focal.*

Al realizar la actualización del catálogo, se seleccionaron 15 eventos de acuerdo a su distancia hipocentral (menor a 100 km de las estaciones del Valle de México) y su magnitud mayor a 2, a continuación se ordenaron cronológicamente (figura 4.2).

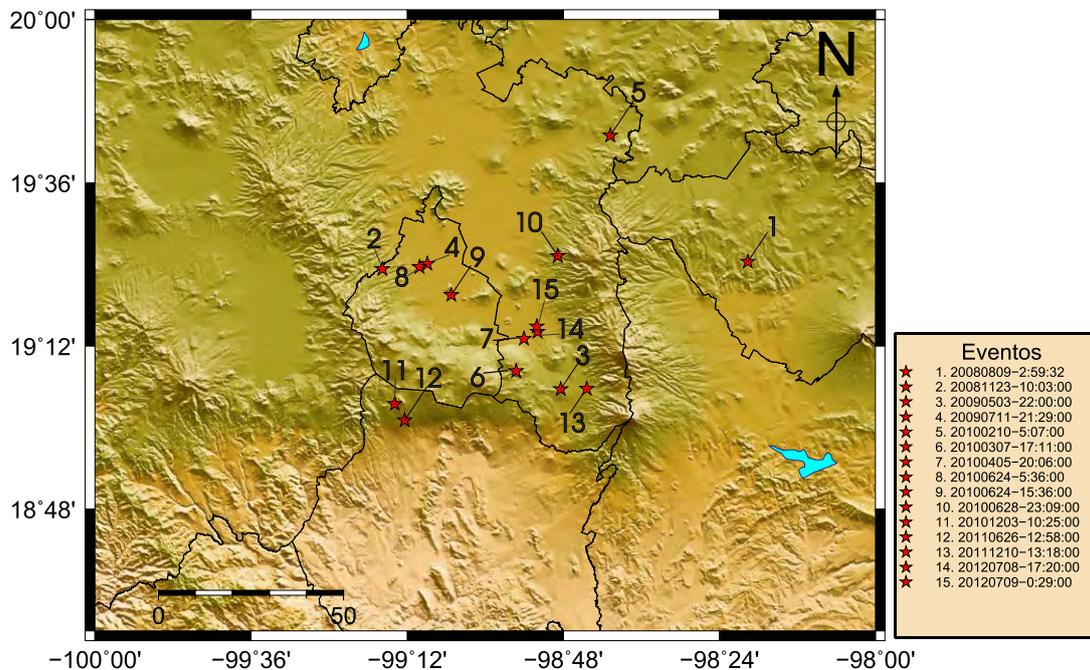


Figura 4.2 Ubicación de los sismos registrados en el Valle de México, durante el periodo 2008-2012, las estrellas rojas representan la ubicación de cada evento enumerados del 1 al 15, en la tabla del lado derecho se encuentra la fecha y hora de cada evento.

#### 4.2 Análisis de resultados

En los siguientes subtemas se muestran los mecanismos focales y el análisis espectral de los 15 eventos, divididos en cinco subtemas que corresponden a las cinco regiones de la figura 4.1. El detalle del análisis de cada evento (tanto el análisis espectral como la determinación del fallamiento) se puede consultar en el apéndice IV. La figura 4.3 incluye el mecanismo focal de los 15 eventos junto con su ubicación epicentral.

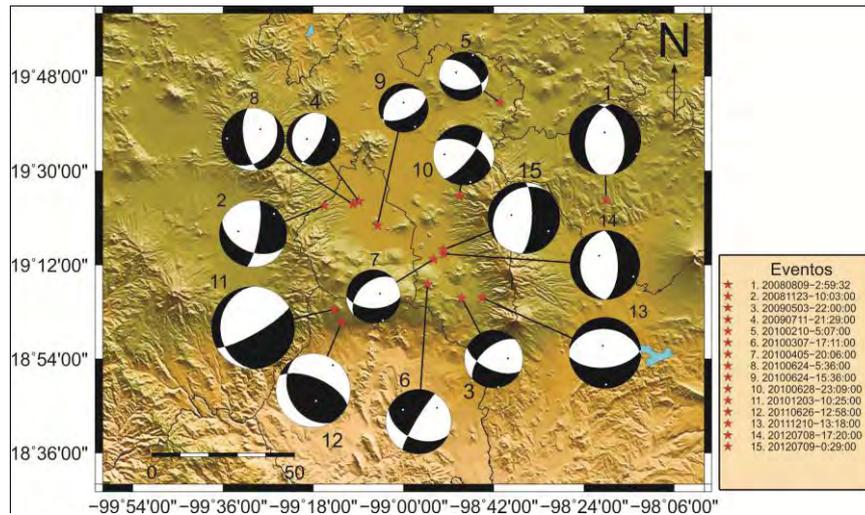


Figura 4.3. Mecanismos focales de los 15 sismos con epicentro en el Valle de México, durante el periodo 2008-2010, (estrellas rojas) ubicación de la sismicidad, el recuadro derecho indica la fecha y hora a la que ocurrió cada evento.

#### 4.2.1 Región 1. Sismicidad en el norte y centro de la Cuenca del Valle de México.

La primera región corresponde al Norte del Distrito Federal. La figura 4.4 muestra las fallas normales en el noroeste del Valle de México, también se identifican otras fallas y fracturas inferidas en la zona Norte del Distrito Federal digitalizadas a partir del Atlas de riesgos de Protección civil D.F (2012), En la figura 4.4 se observa que los tres eventos presentan mecanismos focales de tipo Normal con dirección NE, y tienen la misma dirección que las fracturas cartografiadas.

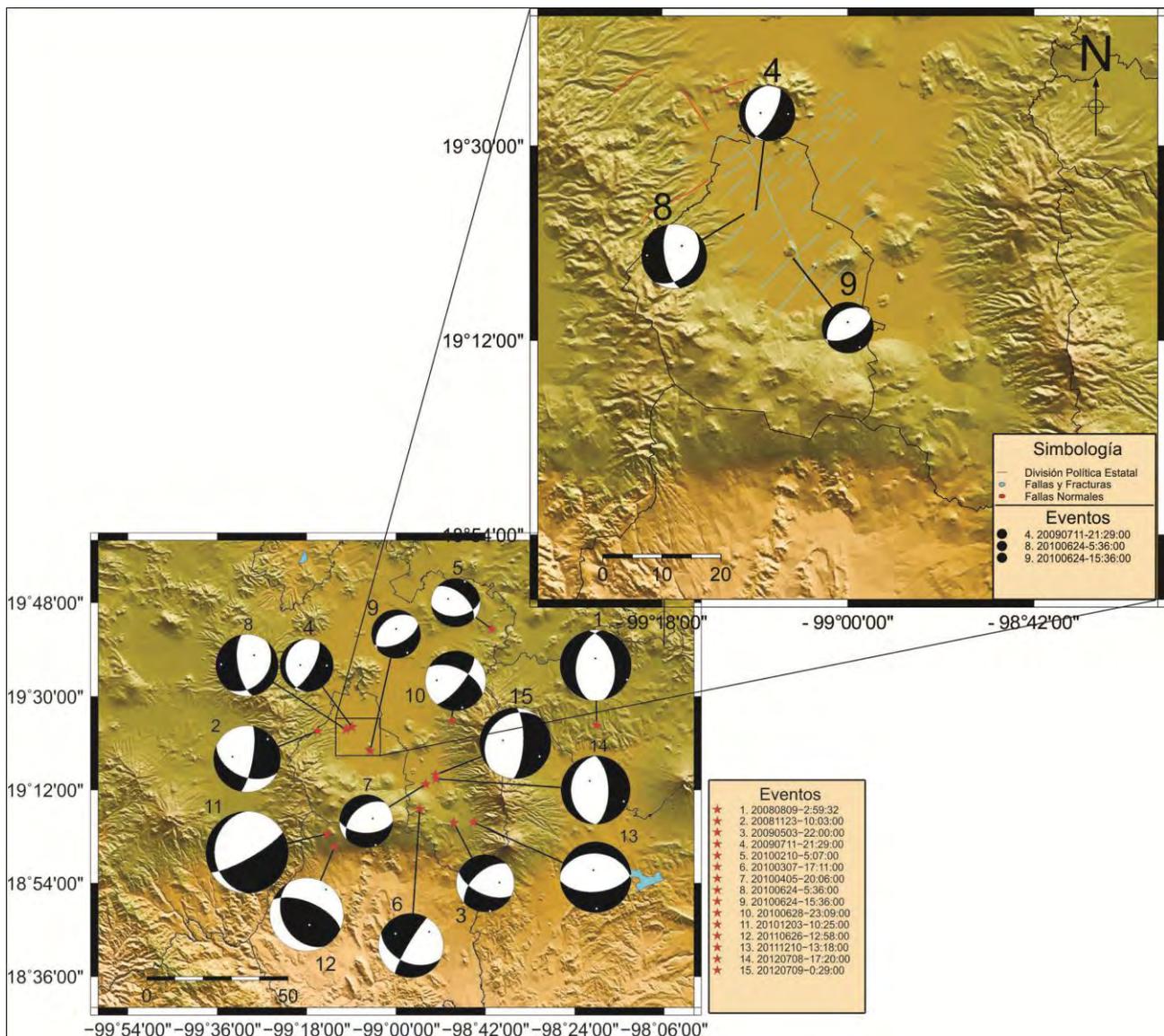


Figura 4.4 Región 1, sismicidad al Norte del Valle de México y mecanismo focal de cada evento, La imagen superior derecha muestra las fracturas conocidas en la zona (de acuerdo a Protección civil D.F, 2012)

El sismo no. 4 del 11 Julio del 2009, con epicentro en la colonia Narvarte a una profundidad de 7 km, presenta un mecanismo tipo Normal con dirección NE-SW. Huesca (2008) reporta un sismo en la misma región el día 13 de septiembre del 2004 a las 20:58:35 hrs (GMT) con una magnitud de 2.6 Mc, con epicentro en la colonia Narvarte a una profundidad de 5.1 km, el cual presenta un mecanismo tipo Normal con dirección Norte-Sur. Ambos eventos presentan el mismo tipo de mecanismo. Esto genera dos hipótesis, en la primera se asocia a las fallas hipódromo y Santa Fe como las causantes de la sismicidad en la región. De Cserna (1988) en su trabajo sobre el sistema las Cruces, describe la falla Hipódromo con un rumbo N 53° E y una longitud aproximada de 6 km y la falla Santa Fe con rumbo N 80° E, en esta región. En la segunda hipótesis se establece como causa de la sismicidad en la región a fallas aún no estudiadas geológicamente.

Inclusive, los eventos podrían ser causados por fallas ciegas que no son observadas en la superficie y cuyos efectos son las fracturas cartografiadas por Protección civil D.F (2012).

El evento no. 8 del 24 de Junio del 2010 que ocurrió a las 05:36:00 hrs (GMT) con epicentro en la colonia Del Valle a una profundidad de 3.4 km, presenta un mecanismo normal; este sismo se encuentra a 2 km de la falla Hipódromo. En cambio el evento no. 9 del día 24 de Junio del 2010 a las 15:36:00hrs (GMT) ocurrió en la colonia Granjas Estrella, en la Delegación Iztapalapa, presenta un mecanismo Normal, con dirección NE-SW. De Cserna (1988) reporta cuatro sistemas de fracturas, por lo que el sistema de fallas que se puede atribuir como causa del sismo es el que se localiza al sur de la Delegación Iztapalapa en la zona de San Lorenzo Tezonco con dirección variable NE-SW y NS. El trabajo de De Cserna (1988) no presenta un mapa con la ubicación exacta de esta falla por lo que sólo se puede suponer como causa de esta sismicidad por su aproximación geográfica calculada.

Lo relevante del estudio de esta región es que el mecanismo focal de los sismos estudiados nos permite saber que existen fallas activas en esta región a profundidades de entre 2 y 7 km y son de tipo Normal con dirección NS.

- *Análisis Espectral*

El sismo localizado en la colonia Narvarte presentó una caída de esfuerzo de .8 MPa y además se determinó una  $t^*$  de 0.04 s igual que el sismo de la Colonia Granjas Estrella, ambos registrados en la estación CUIG. En cambio el sismo de la colonia Del Valle presentó una caída de esfuerzo de 1.0 MPa, y una  $t^*$  de 0.06 s, pero fue registrado en la estación MZVM. Ambos sitios se sabe se encuentran sobre sitios de roca, por lo que los bajos valores de  $t^*$  concuerdan con observaciones en las que se dice que sitios de roca presentan valores bajos del factor de atenuación (Boore, 1997)

Estos valores de  $t^*$  contrastan con los obtenidos por Singh et al (2012); quienes reportan valores de  $t^*$  = 0.02 a 0.03 seg, para la ciudad de Morelia, Mich., al analizar una secuencia de sismos del 2007 con epicentro en la ciudad de Morelia, México, todos ellos con magnitudes  $2.5 < M_w < 3.5$ , lo que indica que en esta zona y en otras del Valle de México existen atenuaciones altas.

#### 4.2.2 Región 2. Sismicidad en el Poniente de la Cuenca del Valle de México.

En la figura 4.5 se observa el sismo del día 23 de Noviembre del 2008 que ocurrió a las 10:03:23.8hrs (GMT) cuyo mecanismo muestra un tipo de falla Normal y dirección NE-SW. Este sismo por su ubicación se infiere pertenece al sistema de fallas Las Cruces, con una dirección NE-SW, una de las fallas de este sistema y muy cercana al sismo es al falla de Satélite la cual buza al SE, podría tratarse de un sismo debido a la continuación de esta falla.

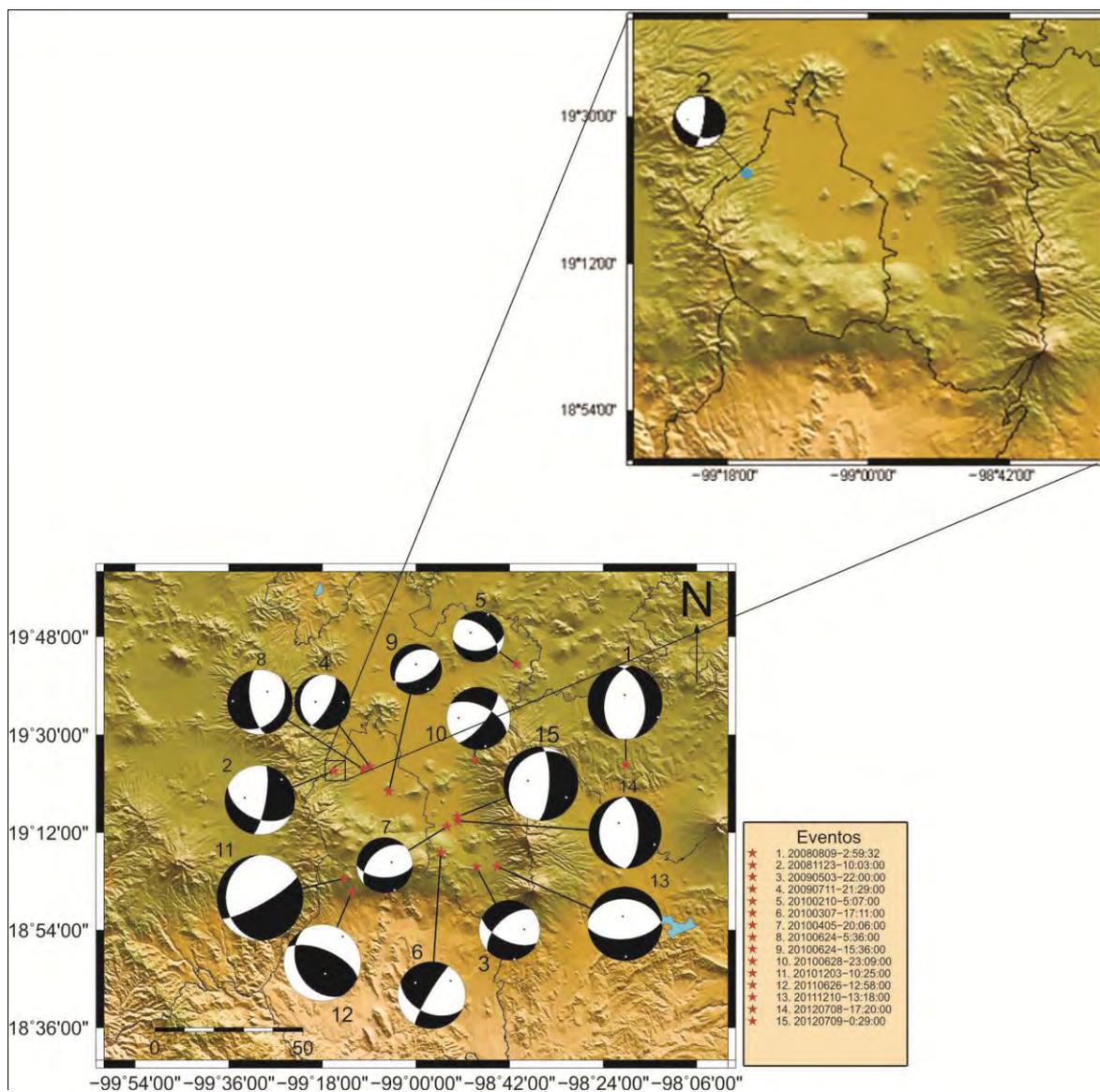


Figura 4.5. Región 2-(círculo azul) ubicación del evento del 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F y su mecanismo focal.

- *Análisis espectral*

El evento analizado presenta una caída de esfuerzo de 3.0 MPa, además de una atenuación de  $t^*=0.02$  s. Este es el evento sísmico con la menor  $t^*$ , lo que indica que la zona donde se registró el evento existe una menor atenuación.

#### 4.2.3 Región 3. Sismicidad en el oriente del Valle de México.

El evento número 3 del día 3 de mayo del 2009 a las 22:01:40.4 (GMT), localizado al este de Juchitepec, Edo. de México, a una profundidad de 10 km, presenta una falla con corrimiento de rumbo con dirección NW-SE y Rumbo S113.6°E. A 13 km de este evento al oeste de Tenango del Aire, Edo. de México ocurrió el evento no. 6 el día 07 de marzo del 2010 a las 17:11:24 (GMT) a 13.8 km de profundidad, el cual presenta una falla con corrimiento de rumbo con dirección NW-SE y Rumbo S 94.7° (Figura 4.6). El evento número 7 del día 05 de abril del 2010 a las 20:06:27 (GMT), aproximadamente a 10 Km al Norte en el municipio de Chalco, Edo. de México a una profundidad de 9 km (Figura 4.6), presenta un mecanismo Normal con Rumbo NW 227.36° SE. El 7 Julio del 2012 se presentó una serie de eventos, el primero ocurrió a las 17:20:24(GMT) a una profundidad de casi 1 km y presenta un mecanismo Normal con rumbo N 180° S, el segundo a las 0:29:18 (GMT) a una profundidad de 8 km con un mecanismo Normal con rumbo N 222° S (Figura 4.6).

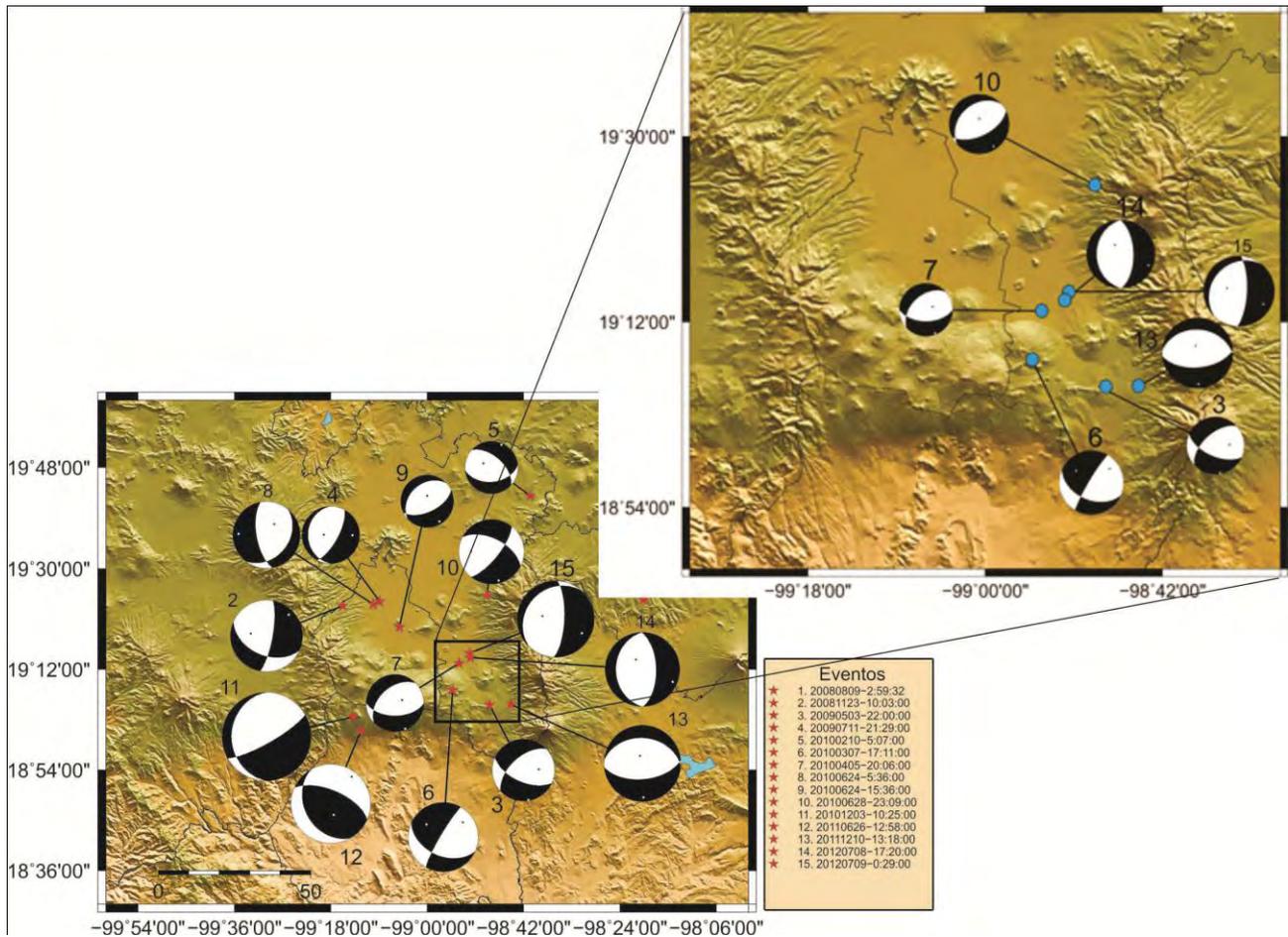


Figura 4.6. Región 3- Mecanismos focales del oriente del Valle de México, los círculos azules representan la ubicación de la sismicidad en la región

Los sismos reportados en la zona oriente son los que se presentan con mayor frecuencia en el Valle de México desde 1996 hasta la fecha. La hipótesis sobre el origen de esta sismicidad es el efecto de subsidencia debido a la extracción de agua en la zona, lo que se sustenta en el hecho del incremento de la extracción de agua que a su vez ocasiona porosidad en el suelo y que en un momento dado provoca desplazamientos verticales del suelo sobre la horizontal, a este fenómeno se le conoce como subsidencia. Es importante mencionar que los estudios de subsidencia en la ciudad de México según Osmanoglu et al. (2011) reportan profundidades menores a un kilómetro. Debido a que en el presente trabajo todas las profundidades de los sismos en esta zona son mayores a un kilómetro y a que presentan el mismo mecanismo focal tipo Normal, una caída de esfuerzo de aproximadamente 1.0 MPa y atenuación de  $t^*=0.03$  s, concluimos que la subsidencia no es la causa de esta sismicidad. Por las características antes mencionadas, en este trabajo se asocia la sismicidad de la región a fallas de tipo Normal aún no cartografiadas.

#### 4.2.4 Región 4. Sismicidad en el Sur del Valle de México (Sierra del Chichinautzin).

El estudio de dos sismos registrados en la Sierra del Chichinautzin (Figura 4.7), por su ubicación podrían asociarse con la falla La Pera, la cual está cartografiada en el trabajo de García-Palomo (2008), en el cual indica que pertenece al sistema de fallas La Pera-Tenango y el análisis de la estratigrafía muestra que el sistema de Tenango-La Pera es esencialmente un conjunto de fallas normales. De la Figura 4.7 podemos observar que el mecanismo de ambos sismos: evento no. 11 del 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), a una profundidad de 5.1 km, localizado al norte de Tres Marías, Estado de Morelos y el evento no. 12 del 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos a una profundidad de 22.8 km, nos indican mecanismos tipo Normal con dirección NW-SE.

Existe un evento estudiado con anterioridad en la zona del Chichinautzin del día 26 de octubre de 1998 que ocurrió a las 02:35:09 (GMT). En este caso se reporta un mecanismo con corrimiento de rumbo y movimiento lateral derecho Rumbo 271°, Buzamiento 85° y deslizamiento 151.6° (Huesca, 2008).

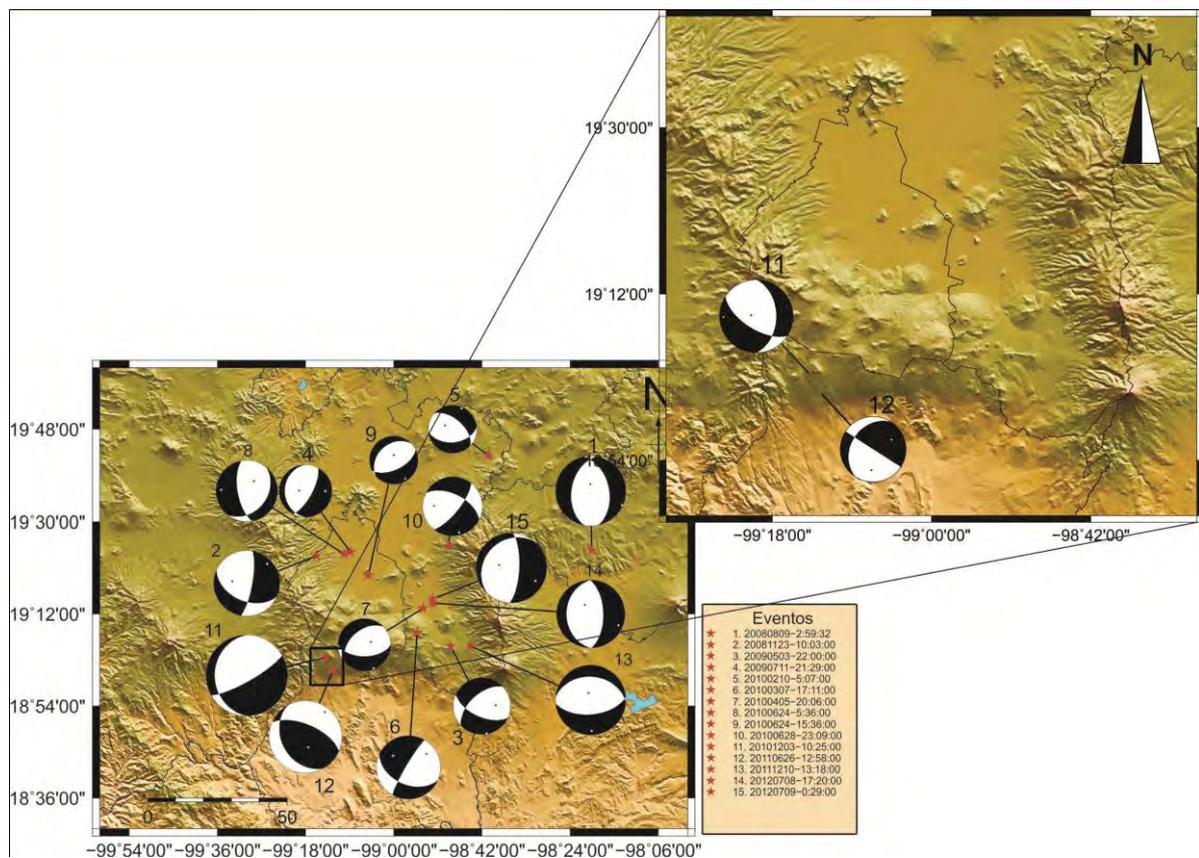


Figura 4.7. Región 4-Sur del Valle de México. Localización del sismo no. 11 del del 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT) y del no. 12 del 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), con su respectivo mecanismo focal de tipo Normal

### *Análisis espectral*

El sismo del día 03 de diciembre del 2010 (evento número 11) presenta una caída de esfuerzo ( $\Delta\sigma=1.3$  MPa) la cual es muy semejante a la del sismo del día 26 de noviembre del 2011 ( $\Delta\sigma=1.6$  MPa).

El sismo del día 03 de diciembre del 2010 se encontró una  $t^*=0.06$  s para y el del día 26 de noviembre del 2011 se encontró una  $t^*=0.08$  s. Ambos eventos presentan la  $t^*$  más grande, esto significa que hay una mayor atenuación. Del trabajo de Boore, 1997, se entiende que a mayor factor de atenuación el tipo de sedimentos es más blando esto se refiere al sitio donde se está registrando la señal, es decir, donde se encuentra la estación que registró estos eventos, en este caso MZVM y YAIG respectivamente.

#### 4.2.5 Región 5. Sismicidad al Noreste del Valle de México

Los siguientes dos eventos (evento número 1 y 5) que pertenecen a la región 5, se encuentran fuera del Distrito Federal uno en la frontera entre el Estado de México y Puebla y el otro en el estado de Tlaxcala casi frontera con el Estado de México (Figura 4.8). Ambos presentan mecanismo focal de tipo Normal. El evento no. 1 del día 9 de agosto del 2008 a las 2:59:32, tiene un rumbo  $190^\circ$  y tiene dirección N-S. El evento no. 5 del día 10 de febrero del 2010 a las 5:07:39, también presenta mecanismo focal tipo Normal, con rumbo  $84.7^\circ$ .

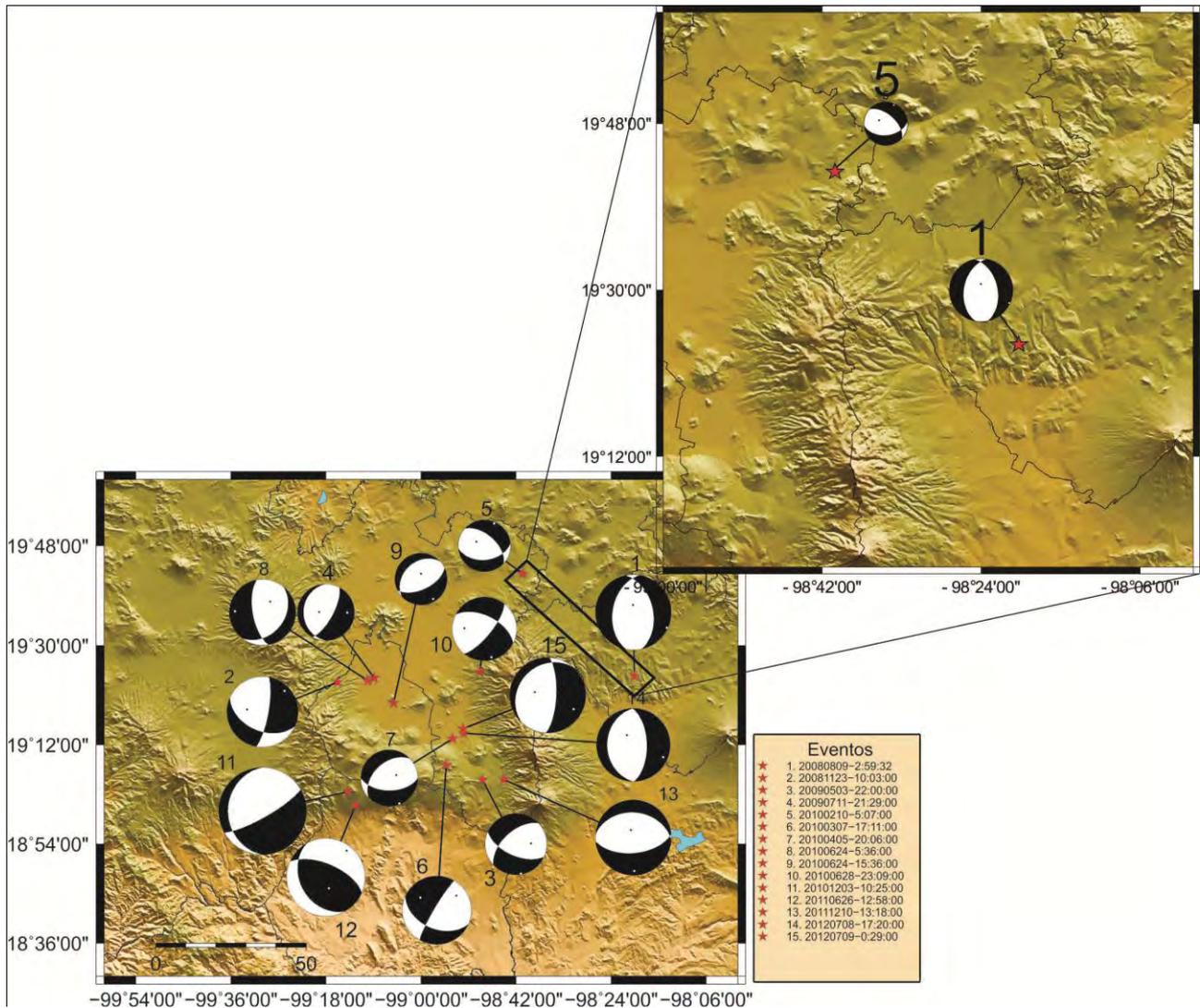


Figura 4.8 Región 5 Sismicidad del Noreste del Valle de México. (Círculo azul) localización del evento no.5. Localizado en el Estado de México (10/02/2010-5:07:39 GMT) y el evento no. 1. Localizado en Tlaxcala (09/08/2008-2:59:32 GMT), con su respectivo mecanismo focal tipo Normal.

- *Análisis espectral.*

Se trata de dos sismos con epicentro en la frontera entre el Estado de México y Tlaxcala. El primero presenta una caída de esfuerzo de 1.2 MPa que corresponde al sismo del día 08 de agosto del 2008 y el segundo del día 10 de febrero del 2010 su caída de esfuerzo es de 1.0 MPa, El resultado de ambos eventos fue  $t^*=0.02$ . Ésto, significa que existen atenuaciones bajas en el lugar donde se registraron los eventos.

## CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo fue encontrar los parámetros de fuente de los eventos localizados en el Valle de México durante el período 2008-2012, mediante el análisis espectral y calculando el mecanismo focal utilizando polaridades y amplitudes de las fases P y S. Para tales fines se analizaron 15 sismos registrados en la Red Sísmica del Valle de México. El objetivo fue que con una red de mayor cobertura dentro del área de estudio, el número de registros se incrementa y su análisis mejora. Es importante tomar en cuenta que para realizar el análisis se cubrió desde el 2008, aún cuando la red completa de estaciones sísmicas dentro del D.F entró en funcionamiento a partir de finales del 2010, por lo anterior no se tienen registros sísmicos suficientes para encontrar el mecanismo focal usando técnicas que utilizan solo polaridades. Como se puede leer en el presente trabajo no se descartan las estaciones del Servicio Sismológico Nacional (2013), como la estación de C.U (CUIG), Popocatépetl (PPIG) o Yautepec (YAIG), cuando la calidad de sus registros así lo permitía.

En cuanto a la localización hipocentral, se utilizó el modelo de velocidades del Valle de México de Jiménez (1973) que, aunque es un modelo para la zona sur, mejora la localización de los eventos de todo el Valle y en algunos casos es posible asociarlos con alguna falla activa debido a su localización. La importancia de un buen modelo de velocidades para todo el Valle se observó al localizar y analizar los eventos del 2012 del Valle de Chalco, debido a que la profundidad del hipocentro podía fluctuar entre los 0.8 Km y los 2 Km. Se recomienda mejorar el modelo de velocidades del Valle de Chalco así como un estudio geológico y de subsidencia más detallado, ya que la mayoría de los eventos dentro del Valle se agrupan en esta región. Hay estudios de fracturas tanto del Instituto de Geofísica como de otras empresas de Ingeniería y geotecnia, inclusive algunos estudios pagados por el INFONAVIT (Dirección General de Protección Civil, 2010a) (Dirección General de Protección Civil, 2010b) (Civil, 2007); sin embargo, no son suficientes o no abarcan toda la región oriente.

En el presente trabajo se reportan mecanismos de tipo Normal y algunos compuestos, esto es importante porque refuerza los trabajos sobre los sistemas de fallas en el Valle de México, en los cuales describen fallas de tipo Normal (de Cserna *et al.*, 1988), (García-Palomo, et al., 2000), (García-Palomo, et al., 2008). La tendencia en el rumbo de los mecanismos es variada dependiendo de la región, las profundidades en promedio se encuentran a 8 km lo cual indica la existencia de fallas de poca profundidad lo que es importante desde el punto de vista del riesgo sísmico.

El estudio de la sismicidad del Valle de México durante el 2008-2012 proporcionó información acerca de la fuente de estos eventos sísmicos. Se encontró una caída de esfuerzo media  $\Delta\sigma=1.2$  MPa que es 7 veces menor que la que se libera en los sismos intraplaca de la costa de México analizados en el trabajo de García et al. (2004) donde la caída de esfuerzo media es de 7.6 MPa. Con respecto al valor de  $t^*$ , se encontró un promedio de  $t^*=0.04$  s para sismos en el Valle de México. Este valor contrasta con el obtenido por Singh et al (2012); quienes reportan valores de  $t^* = 0.02$  a  $0.03$  seg, para la ciudad de Morelia, Mich., al analizar una secuencia de sismos del 2007 con epicentro en la ciudad de Morelia, México, todos ellos con magnitudes  $2.5 < M_w < 3.5$ , lo que indica que el Valle de México exhibe atenuaciones altas. Este resultado es acorde con las determinaciones más recientes del factor de calidad  $Q_0$  de las ondas sísmicas dentro del Valle de México (Ortega et al, 2003), y refuerza la hipótesis de que, en general, el centro de México está caracterizado por un rápido decaimiento de la amplitud de las ondas con la distancia, similar al ocurrido en otras regiones tectónicamente activas. Para explicar las altas amplificaciones regionales observadas en el centro de México, recientemente se ha propuesto (Chávez-García y Quintanar, 2010) que el origen de dichas amplificaciones se encuentra en un alto contraste de velocidades de grupo entre el Eje Neovolcánico y los terrenos fuera de él. En todo caso, nosotros enfatizamos que la importancia de los sismos locales se comprenderá a plenitud cuando entendamos las diferencias del movimiento del suelo debido a fuentes locales y regionales, lo cual pasa por el cabal conocimiento de la estructura del Eje Neovolcánico.

Molina-Berbeyer (1955) menciona la existencia de fracturas en el Valle de Chalco, por las cuales fluye el agua que abastece los mantos acuíferos del Valle de Chalco, pero son aguas subterráneas que están a 100 mts. de profundidad, por lo cual esas fallas o grietas no son tan profundas para ser las causantes de la sismicidad en la región. En el presente trabajo las profundidades más someras reportadas son del orden de 0.8 Km, por lo que se propone como hipótesis sobre el origen de esta sismicidad la presencia de fallas a profundidades por debajo de 1 Km. Si bien la subsidencia estudiada en el Valle de México ocasiona la aparición de fracturas en la superficie, no es la causa directa de la sismicidad.

Gracias a que la RSVM está funcionando casi en su totalidad se detectaron dos enjambres de sismos uno en julio del 2012 en el municipio de Valle de Chalco y otro en junio del 2013. El primero ocurrió después del sismo de magnitud 7.4 del día 20 de marzo de 2012 con epicentro en Pinotepa Nacional, Oax., y el segundo después del sismo de magnitud 5.8 del día 16 de junio de 2013 con epicentro en el municipio de Huitzucó, Gro. Estudios previos (v.g. Singh, et al., 1998.) reportan que la ocurrencia de un sismo importante puede desencadenar la activación de microsismicidad en el Valle de México, por lo que especulamos que esta podría ser la causa de la sismicidad en la región.

Los resultados de este trabajo contribuyen a tener una mejor comprensión de la fuente sísmica de los sismos con epicentro en el Valle de México. Éstos, aunados a un modelo de velocidades más detallado de esta zona ayudarán a estimar parámetros de la fuente y las aceleraciones esperadas dentro del Valle de México para grandes sismos costeros o intraplaca.

## REFERENCIAS

- Boore, D., & Joyner, W. (1997). Site Amplifications for Generic Rock Sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2), 327-341.
- Bravo-Chávez, H., Lautaro-Ponce, M., Suárez-Reynoso, G., & Zuñiga-Dávila-Madrid, R. (1988). *Estudios sobre sismicidad en el Valle de México*. Secretaría General de Obras, Departamento del Distrito Federal. México, D.F: Editora e Impresora Internacional.
- Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res*, 4997-5009.
- Cárdenas-Soto, M. & Chávez-García, F.J. (2003). Regional path effects on seismic wave propagation in central Mexico, *Bull. seism. Soc. Am.*, 93, 973–985.
- Carreón-Freyre, D. C. (2012). *Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal*. Ciudad de México, Distrito Federal.
- Chávez-García, F.J. y L. Quintanar (2010). Velocity structure under the Trans-Mexican Volcanic Belt. Preliminary results using correlation of noise, *Geophys. J. Int.*, 183, 1077-1086, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04780.x.
- Cruz -Jiménez, H. (2011) *Simulación numérica del movimiento sísmico: Aplicaciones a Colima y el Valle de México*. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Civil, D. G. (2007). *Detección de Fracturas en el subsuelo en la zona sur del complejo habitacional Los reyes, La paz*. Gobierno del estado de México.
- De Cserna, Z., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L. M., & Mota-Polimo, R. (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México. *Boletín* 104(104), 1-67. (F. Ortega-Gutiérrez, Ed.) México, D.F, México: Instituto de Geología, UNAM.
- Dirección General de Protección Civil. (2010a). *Detección de fracturas y su remediación en el desarrollo habitacional villas de San Martín, municipio de Chalco, México*. Gobierno del Estado de México.

- Dirección General de Protección Civil. (2010b). Informe sobre la inspección de daños en viviendas por un movimiento de tierra en la zona del relleno sanitario Neza II. Gobierno del Estado de México.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico. *Tectonophysics*, 522-523.
- García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Pacheco, J. F., & Ordaz, M. (Junio de 2004). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Q, Source Spectra, and Stress Drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3), 789–802.
- García-Palomo, A., Zomorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces; México Central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.*, 25(1), 158-178.
- Guralp, S. (2008). Test and calibration data CMG-6TD. Distributor of Guralp Systems Seismological and Instrumentation.
- Haskell, N. (1964). Total Energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bull. Seim, Soc. Am*, 54, 1811-1841.
- Havskov, J., & Ottemöller, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Springer.
- Jiménez, Z. Conversación personal
- Lugo-Hubb, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A., & Zamorano-Orozco, J. (1994). Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 43-52.
- Madariaga, R. (1988). *Física del interior del Tierra/Propagación de ondas sísmicas en el campo cercano*. Francia.
- Molina-Berbeyer, R. (1955). Contribución geoquímica en el estudio de las aguas subterráneas de la cuenca del Valle de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58-60.

- Mooser, F., & Montiel-Rosado, A. (1989). El relleno post-Chichinautzin del Valle de México y su relación con la intensidad sísmica. (A. Ramírez-Rascón, Ed.) 55-60.
- Ordaz, M., Singh S. (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. Bull. Seism. Soc. Am., Vol 82, 24-43.
- Ordaz, M., Castellanos, F., & Zapata, A. (2005). Manual de uso del programa Degtra A4. Versión 4.0. Degtra A4 (XP).
- Ortega, R.; Herrmann, R. B.; Quintanar, L. (2003) Earthquake Ground-Motion Scaling in Central Mexico between 0.7 and 7 Hz. BULLETIN- SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA; 93; 397-413.
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 1-12.
- Protección civil D.F. (diciembre de 2012). Obtenido de <http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/>
- Reftek (2010). Calibration data.
- Rosenblueth, E., Sánchez-Sesma, F., Ordaz, M., & Singh, S. (1987). "Espectros de diseño en el reglamento para las construcciones del Distrito Federal. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, A1-A17. Queretaro, México.
- Servicio Sismológico Nacional (Enero, 2013). Obtenido de <http://www.ssn.unam.mx/>
- Shearer, P. (1999). Introduction to seismology. Cambridge University Press.
- Singh, S K, E Mena y R Castro (1988). "Some aspects of the source characteristics and ground motion amplifications in and near Mexico City from acceleration data of the September 1985 Michoacán, Mexico earthquakes", Bull. Seism. Soc. Am., No. 78, 451-477.
- Singh, S., & Ordaz, M. (1993). Strong motion seismology in Mexico. Tectonophysics, 43-57.

- Singh, S., Ordaz, M., Pacheco, J., & Courboux, F. (2000). A simple source inversion scheme for displacement seismograms recorded at short distances. *Journal of Seismology*, 267-284.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Pacheco, J., Alcántara, L., Iglesias, A., Alcocer, S., Almora, D. (2007). A Report on the Atoyac, Mexico, Earthquake of *Seismological Research Letters*, 78(6), 635-648.
- Singh, S. K., Iglesias, A., Garduño, V. H., Quintanar, L., & Orda, M. (2012). A source study of the October, 2007 earthquake sequence of Morelia, Mexico and ground-motion estimation from larger earthquakes in the region. *Geofísica Internacional*, 73-86.
- SMA. (2002). Diagnóstico geológico y geohidrológico preliminar de la microcuenca del Río Magdalena. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, México, D.F.
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An Introduction to seismology, earthquakes and earth structure*. MA, USA: Blackwell Publishing.
- Tapia-Varela, G., & López-Blanco, J. (2002). Mapa geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100, 000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 50-65.
- Udías, A., Muñoz, D., Sevilla, M., Romero, P., Hernández, E., & Cano, J. (1989). *Física de la Tierra, Movimientos fuertes del suelo y riesgo de terremotos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

APÉNDICE I. Tabla con la ubicación de las estaciones sísmicas de la red del Valle de México (RSVM), todas son telemétricas.

<b>Estación</b>	<b>Coordenadas</b>
AMVM: Amecameca, Edo. Méx., Digital, .	19° 07.9123'N 98° 47.1540'W 2458 msnm
ATVM: Atlacomulco, Edo. Méx., Digital.	19° 45.7108'N 99° 50.4629'W 2532 msnm
AZVM: Atizapán, Edo. Méx., Digital.	19° 35.0900'N 99° 16.9759'W 2415 msnm
MAVM : Malinalco, Edo. Méx., Digital.	18° 57.4325'N 99° 29.6454'W 1842 msnm
MZVM: Mezontepec, DF., Digital.	19° 11.3509'N 99° 13.7590'W 3510 msnm
ORVM: Órganos, Edo. Méx., Digital Telemétrica.	19° 35.5481'N 98° 43.3907'W 2888 msnm
PBVM: Peñón de los Baños, DF., Digital Telemétrica.	19° 26.4415'N 99° 04.9931'W 2304 msnm
PTVM: Pico Tres Padres, DF., Digital.	19° 35.4765'N 99° 06.7502'W 2897 msnm
SZVM: Salazar, Edo. Méx., Digital.	19° 19.4256'N 99° 22.8605'W 3351 msnm

Estación	Coordenadas
TXVM: Texcoco, Edo.Méx., Digital.	19° 26.0061'N 98° 55.0530'W 2242 msnm
TOVM: Toluca, Edo. Méx., Digital.	19° 16.9705'N 99° 40.6613'W 2733 msnm
UNMK: IGEF, DF., Digital, Local.	19° 19.624'N 99° 10.555'W 2249 msnm
VCVM : Valle de Chalco, Edo. Méx., Digital.	19° 17.8804'N 98° 57.2661'W 2238 msnm
VTVM : Valle de Teotihuacán, Edo. Méx. Digital.	19° 46.2060'N 98° 46.4721'W 2460 msnm
ZUVM: Zumpango, Edo. Méx., Digital.	19° 49.5889'N 99° 04.6507'W 2285 msnm
AOVM: Álvaro Obregón, DF., Digital.	19° 16.054'N 99° 19.314'W 3732 msnm
APVM: Azcapotzalco, DF., Digital.	19° 29.281'N 99° 12.519'W 2265 msnm
BJVM: Benito Juárez, DF., Digital.	19° 22.500'N 99° 10.239'W 2246 msnm
COVM: Coyoacán, DF., Digital.	19° 21.066'N 99° 09.370'W 2178 msnm

Estación	Coordenadas
CJVM: Cuajimalpa, DF., Digital, Telemétrica	19° 21.699' 99° 17.108' 2204 msnm
CTVM: Cuauhtémoc, DF., Digital.	19° 26.588'N 99° 09.936'W 2238 msnm
GMVM: Gustavo A. Madero, DF., Digital.	19° 29.582'N 99° 06.661'W 2245 msnm
ICVM: Iztacalco, DF., Digital.	19° 23.069'N 99° 05.937'W 2235 msnm
IPVM: Iztapalapa, DF., Digital.	19° 20.766'N 99° 05.488'W 2372 msnm
MCVM : Magdalena Contreras, DF., Digital.	19° 19.238'N 99° 15.319'W 2637 msnm
MHVM: Miguel Hidalgo, DF., Digital.	19° 24.479'N 99° 12.545'W 2336 msnm
MPVM: Milpa Alta, DF., Digital.	19° 12.086'N 99° 00.688'W 2274 msnm
THVM: Tláhuac, DF., Digital.	19° 18.658'N 98° 58.396'W 2256 msnm

Estación	Coordenadas
TLVM : Tlalpan, DF., Digital.	19° 12.598'N 99° 09.246'W 2697 msnm
VRVM: Venustiano Carranza, DF., Digital.	19° 25.071'N 99° 06.864'W 2230 msnm
XCVM : Xochimilco, DF., Digital.	19° 15.164'N 99° 07.011'W 2281 msnm

APÉNDICE II. Ejemplo de los archivos de respuesta de la estación MZVM.

Componente vertical

CONSTANT 6.003579e+17  
ZEROS 3  
-31.6174300 0.0000000  
POLES 6  
-0.1485973 0.1485973  
-0.1485973 -0.1485973  
-2469.3610000 0.0000000  
-47.0635700 0.0000000  
-336.7655000 -136.6555000  
-336.7655000 136.6555000

Componente N-S

CONSTANT 6.017989e+17  
ZEROS 3  
-31.6174300 0.0000000  
POLES 6  
-0.1485973 0.1485973  
-0.1485973 -0.1485973  
-2469.3610000 0.0000000  
-47.0635700 0.0000000  
-336.7655000 -136.6555000  
-336.7655000 136.6555000

Componente E-W

CONSTANT 5.959073e+17  
ZEROS 3  
-31.6174300 0.0000000  
POLES 6  
-0.1485973 0.1485973  
-0.1485973 -0.1485973  
-2469.3610000 0.0000000  
-47.0635700 0.0000000  
-336.7655000 -136.6555000  
-336.7655000 136.6555000

APÉNDICE III. Tabla con los resultados y otros valores usados para el cálculo del mecanismo y de la caída de esfuerzo.

Núm.	Fecha	Hora [GMT]	Epicentro		Profundidad [Km]	Mc	Mecanismo Focal			Caída de esfuerzo [MPa]	Mo [N•m]	t* [s]	Mw
			Latitud [°]	Longitud [°]			Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]				
1	20080809	2:59:32	19.41	-98.33	5.1	3.2	190	45	-74	1.2	4E+13	0.02	3
2	20081123	10:03:00	19.39	-99.26	6.2	3	113.7	45	-161	3.0	2E+13	0.02	2.8
3	20090503	22:00:00	19.10	-98.81	10	2.6	227.4	56.25	-142	1.0	1E+12	0.04	2
4	20090711	21:29:00	19.40	-99.15	7	2.4	180	22.5	-116	.8	5E+12	0.04	2.4
5	20100210	5:07:00	19.72	-98.68	7	2.2	84.71	45	-127	1.0	5E+12	0.04	2.4
6	20100307	17:11:00	19.14	-98.92	13.8	2.9	113.7	45	-9.47	1.3	3E+13	0.04	2.9
7	20100405	20:06:00	19.22	-98.90	9	2.4	227.4	45	-123	1.0	5E+12	0.06	2.4
8	20100624	5:36:00	19.39	-99.17	3.4	2.8	37.89	33.75	-47.4	1.0	5E+12	0.06	2.4
9	20100624	15:36:00	19.33	-99.09	2.7	2.2	227.4	33.75	-104	1.0	2E+12	0.04	2.1
10	20100628	23:09:00	19.42	-98.81	17.7	2.7	296.5	56.3	-21.2	1.0	1.7E+12	0.04	2.1
11	20101203	10:25:00	19.06	-99.23	5.1	3.7	180	22.5	-148	1.3	4E+14	0.06	3.7
12	20110626	12:58:00	19.02	-99.21	22.8	3.3	151.6	33.75	123.2	1.6	2E+14	0.08	3.5
13	20111210	13:18:00	19.10	-98.74	11.6	3.2	84.7	56.3	-95.3	1.6	2.2E+14	0.08	3.5
14	20120708	17:20:00	19.24	-98.87	3.5	3.1	180	30	-89	1.0	6E+13	0.04	3.1
15	20120709	0:29:00	19.25	-98.87	0.8	3.2	222	23	-53	1.0	8E+13	0.04	3.2

APÉNDICE IV. Resultados de los 15 eventos del Valle de México.

1. 9 de agosto de 2008 a las 02:59:32.9 (GMT). Localizado al Noroeste de Santa María Ixcotla, Tlaxcala.

Aunque el evento no se encuentra en la zona delimitada por el Valle de México, pero sí está ubicado cercano a la zona del Valle, además fue registrado por las estaciones de la RSVM. Su coordenada epicentral es  $19.407^{\circ}\text{N}$  y  $98.327^{\circ}\text{W}$ , a una profundidad focal de 5.1 Km,  $M_c=3.2$ , posteriormente se calculó la magnitud del momento sísmico a partir del espectro de aceleración, encontrándose  $M_w=3$ . Este evento fue registrado en cinco estaciones, tres de ellas pertenecen a RSVM y dos a la red del SSN; la estación más cercana al evento es ORVM (Figura 1).

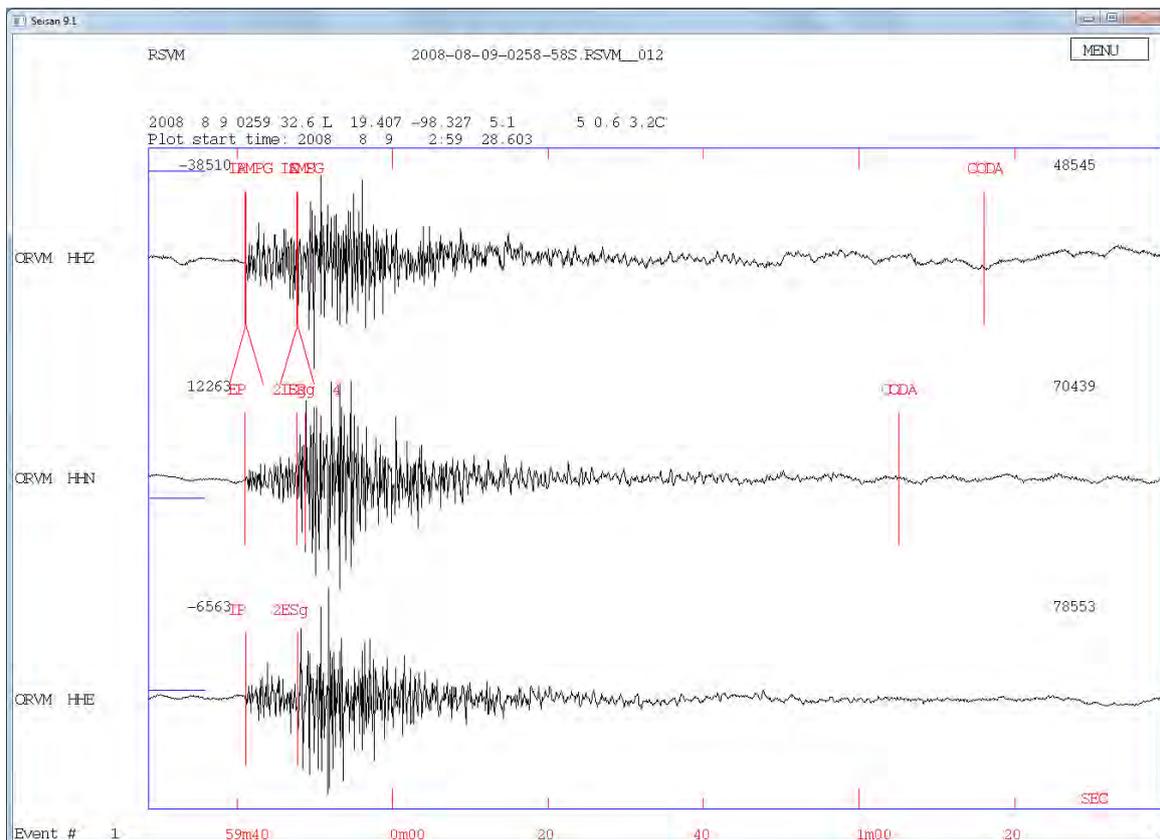
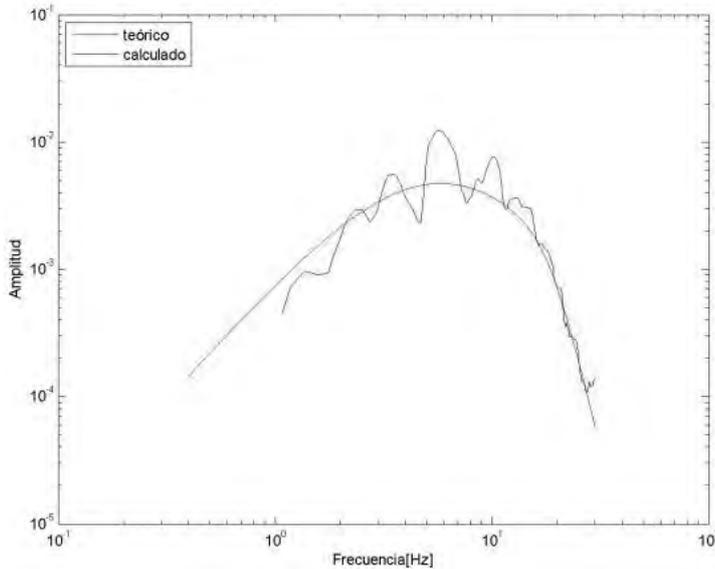


Figura 1 Registro sísmico de velocidad de la estación ORVM, la estación se encuentra al NW del estado de Tlaxcala, a 46 Km del epicentro del sismo del día 9 de agosto de 2008 a las 02:59:32.9 (GMT), localizado al Noroeste de Santa María Ixcotla, Tlaxcala. Corresponde a un registro de velocidad, se muestran las tres componentes de arriba hacia abajo: vertical Z, horizontal N-S y horizontal E-W. Las líneas rojas indican el arribo de la onda P, de la onda S y la coda.

El proceso para encontrar el espectro de aceleración y el mecanismo focal ya se trató en la sección 3.2 y 3.3. El resultado de la comparación entre el espectro teórico y el observado (figura 2).



Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	$t^*$ [s]
1.2	3.98107E+13	0.02

Figura 2. La ventana izquierda indica el ajuste de espectros de aceleración de la estación ORVM, que corresponde al registro de la figura 1. En rojo el espectro teórico y en azul el calculado. La tabla del lado derecho muestra los parámetros de la fuente encontrados.

Se encontró una caída de esfuerzo de 1.0 MPa, y un momento sísmico  $M_0=3.98107E+20$  [dina•cm]. Para realizar la inversión se considera el sismograma en unidades de desplazamiento desde la llegada de P hasta S y se fija el valor de  $\beta$ , es decir la velocidad de S para obtener el sismograma sintético, el programa da cinco posibles soluciones, esas soluciones se encuentran en términos de los valores que definen el mecanismo focal (rumbo, buzamiento y ángulo de deslizamiento), se escoge la solución que mejor ajuste entre el sismograma sintético y el observado (figura 2), la otra forma de escoger la mejor solución es a partir de los valores del mecanismo focal, se selecciona aquella, que muestre un mecanismo focal de acuerdo a lo que se conoce, previamente del comportamiento de las fallas de la región.

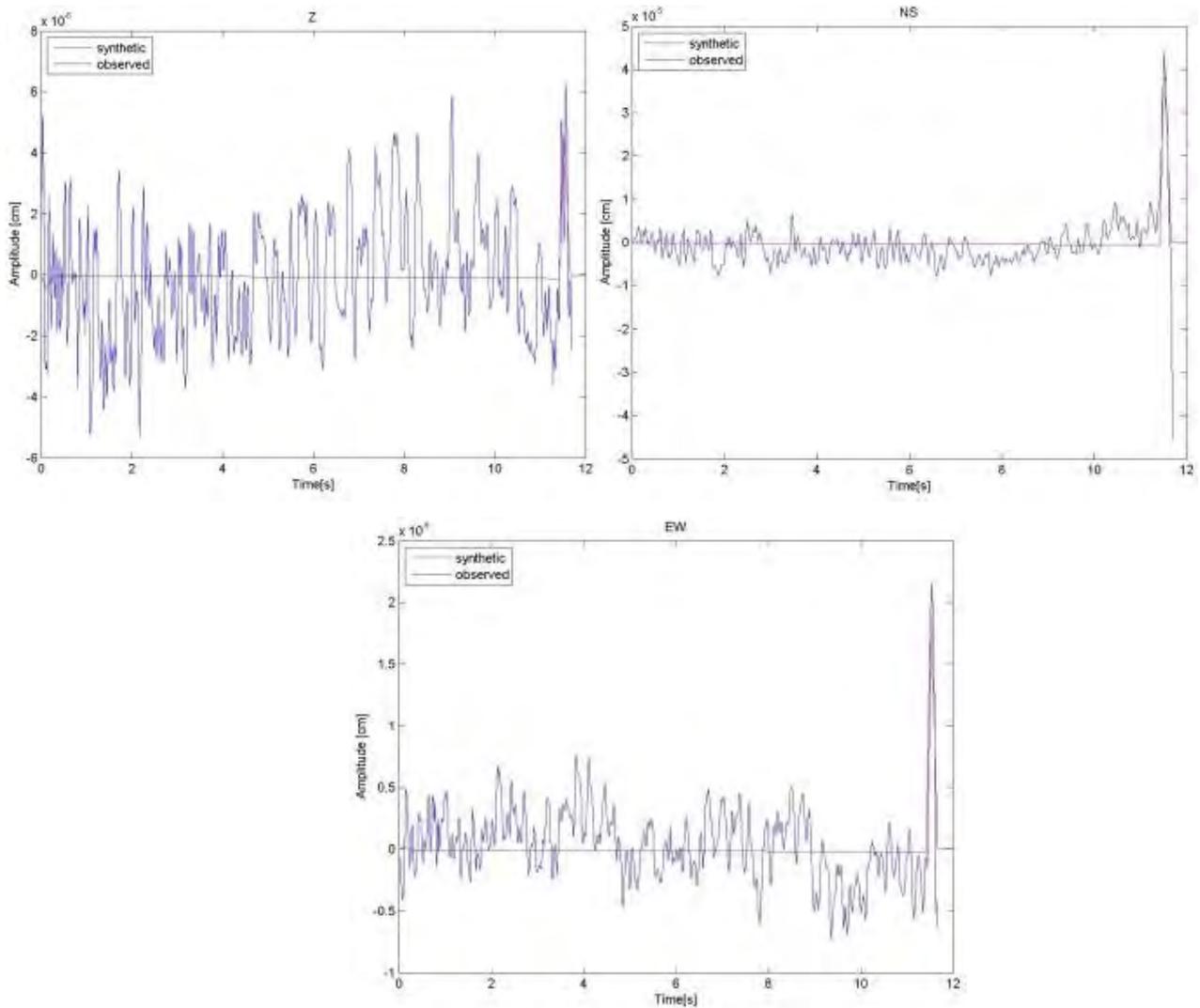
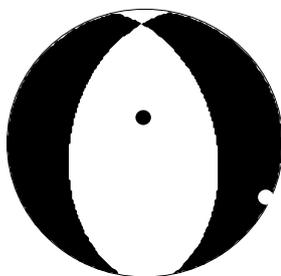


Figura 3. Comparación entre el sismograma sintético (rojo) obtenido con la inversión y el observado (azul), del sismo del día 1. 9 de agosto de 2008 a las 02:59:32.9 (GMT). Localizado al Noroeste de Santa María Ixcotla, Tlaxcala. **(Arriba-izquierda)** componente vertical Z, **(arriba-derecha)** componente horizontal Norte,

**(abajo-centro)** componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
190	45	-74

Figura 4. Mecanismo focal y sus parámetros, corresponde al evento del 9 de agosto de 2008 a las 02:59:32.9 (GMT). Localizado al Noroeste de Santa María Ixcotla, Tlaxcala.

2. 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F.

Este es un evento de la zona Noroeste del Valle de México. Su epicentro se encuentra a 19.389°N y 99.263°W, el hipocentro está a una profundidad de 6.2 Km, inicialmente con magnitud coda M=3. El evento fue registrado en cinco estaciones de la RSVM. El mejor registro fue de la estación MZVM a 22 Km del epicentro. Sin embargo, la estación más cercana es SZVM a 14 Km del epicentro.

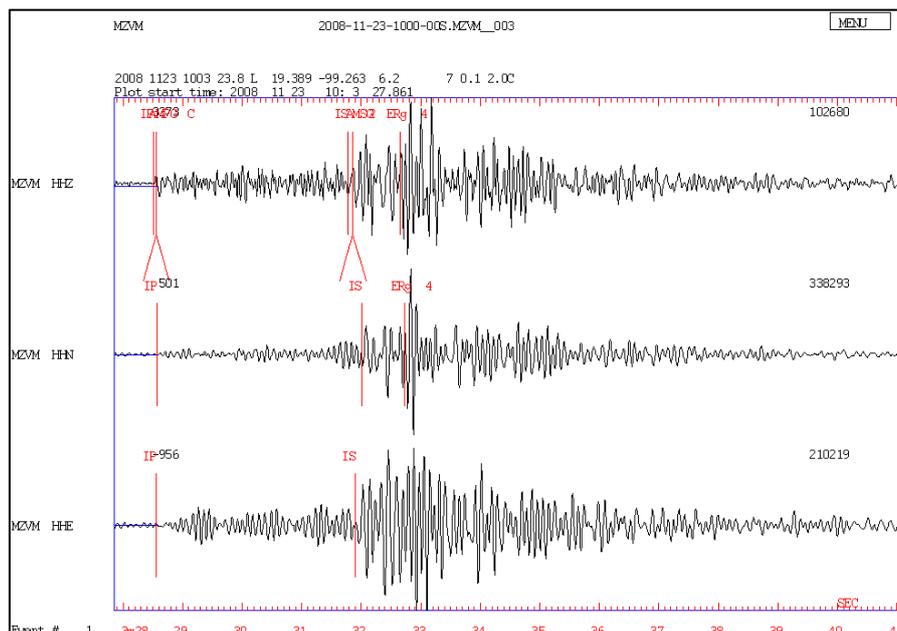
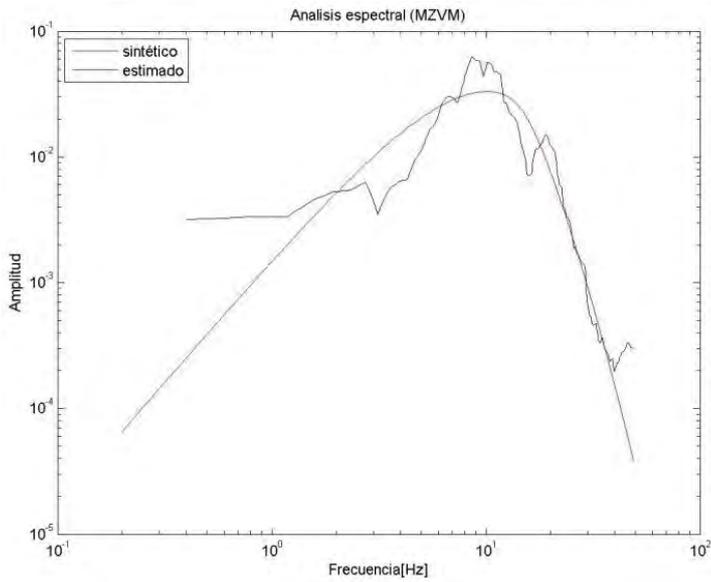


Figura 5. Registro sísmico de la estación MZVM, la estación se encuentra en Santo Tomás Ajusco, DF, a 21 Km del epicentro del sismo del día 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F. Corresponde a un registro de velocidad, se muestran las tres componentes de arriba hacia abajo: vertical Z, horizontal N-S y horizontal E-W. Las líneas rojas indican el arribo de la onda P, de la onda S y la coda.



Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	$t^*$ [s]
3.0	1.25893E+13	0.02

Figura 6. Espectro de aceleración de la estación MZVM, corresponde al evento del día 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F

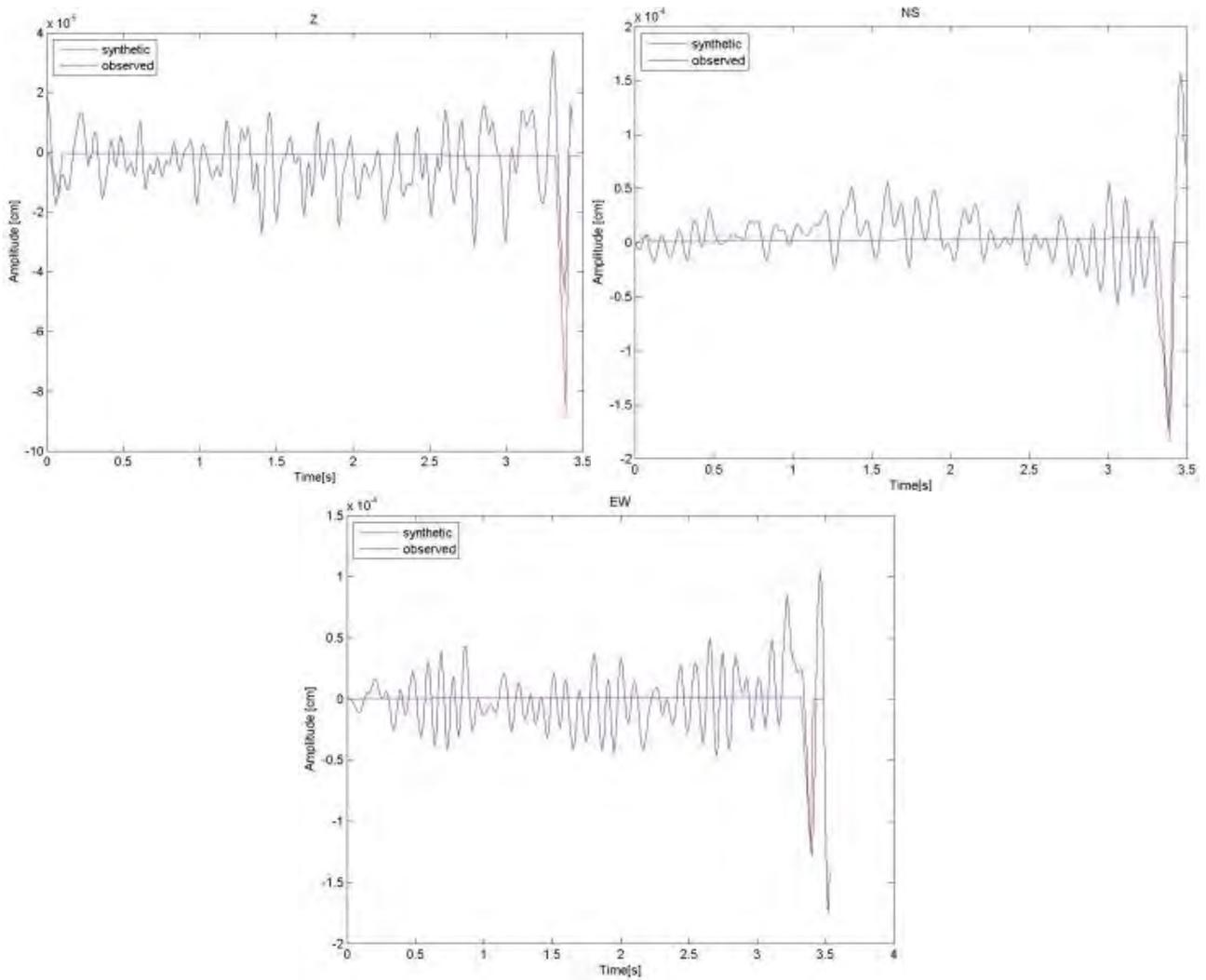
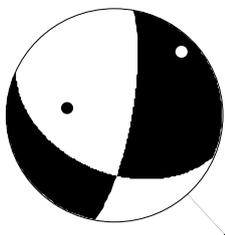


Figura 7. Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del día 23 de noviembre de 2008 a las 10:03:23.8 (GMT). Localizado entre las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, D.F. (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
113.68	45	-161

Figura 4.10. Mecanismo focal calculado y sus parámetros.

3. 3 de mayo de 2009 a las 22:01:40.4 (GMT) Localizado al este de Juchitepec, Estado de México.

Este evento se encuentra localizado en las siguientes coordenadas 19.095°N y 98.806°W

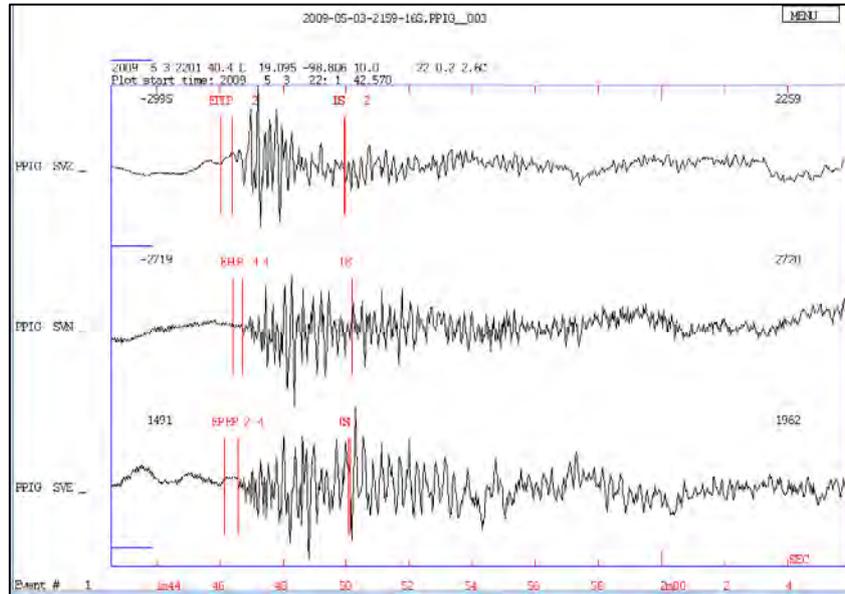
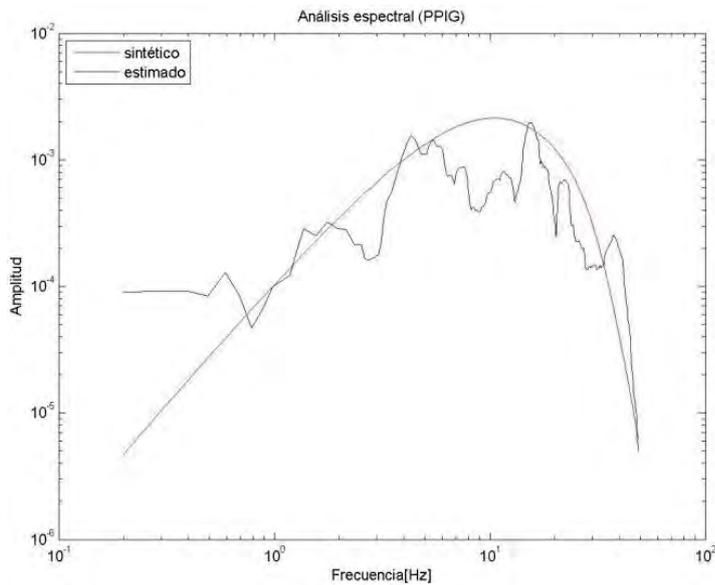
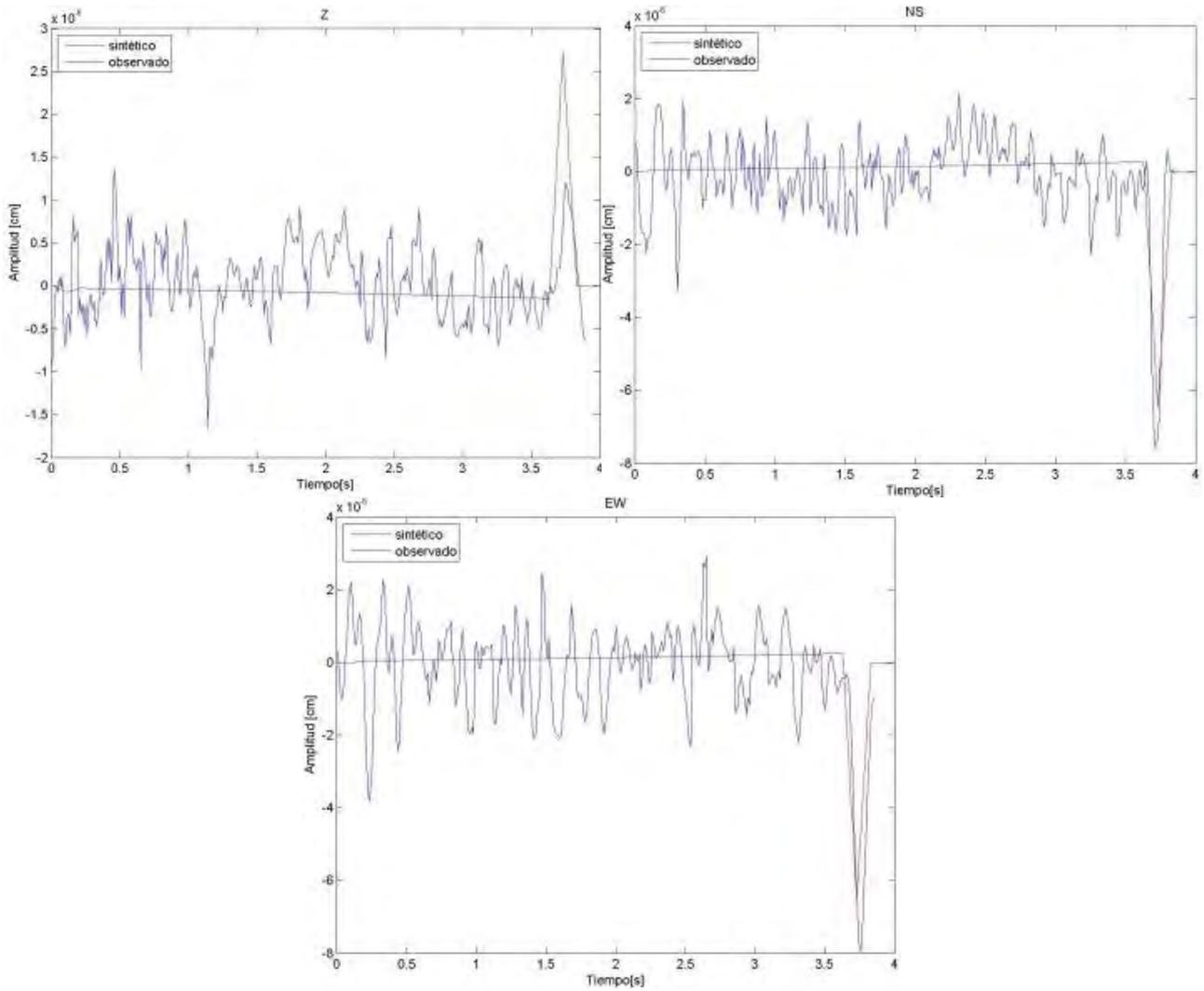


Figura 8 Registro sísmico de la estación PPIG, la estación se encuentra en el volcán Popocatepetl, Edo. de México, a 19 Km del epicentro del sismo del día 3 de mayo de 2009 a las 22:01:40.4 (GMT) Localizado al este de Juchitepec, Estado de México.

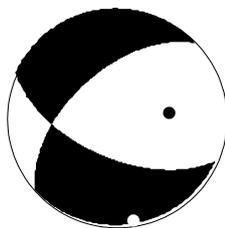


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.25893E+12	0.04

Figura 9. Espectro de aceleración de la estación PPIG del evento del día 3 de mayo de 2009 a las 22:01:40.4 (GMT) Localizado al este de Juchitepec, Estado de México, con sus respectivos parámetros de la fuente.



Figuras 10 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del sismo del día 3 de mayo de 2009 a las 22:01:40.4 (GMT) Localizado al este de Juchitepec, Estado de México (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
113.68	56.25	104.2

Figura 11. Mecanismo focal calculado.

4. 11 de julio de 2009 a las 21:29:31.3 (GMT), localizado en la colonia Narvarte de la Delegación Benito Juárez, D.F.

Las coordenadas del epicentro de este evento son 19.402°N y 99.148°W.

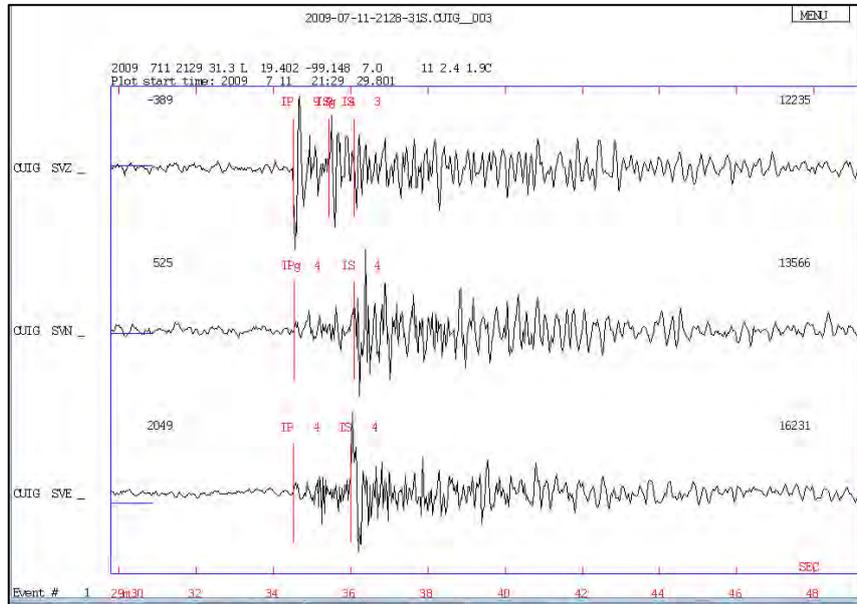
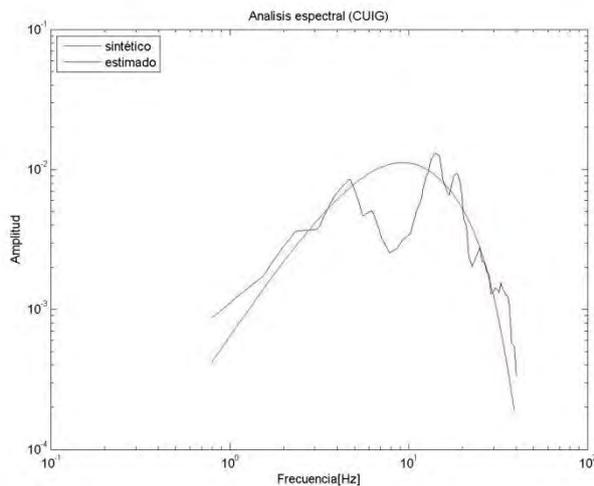
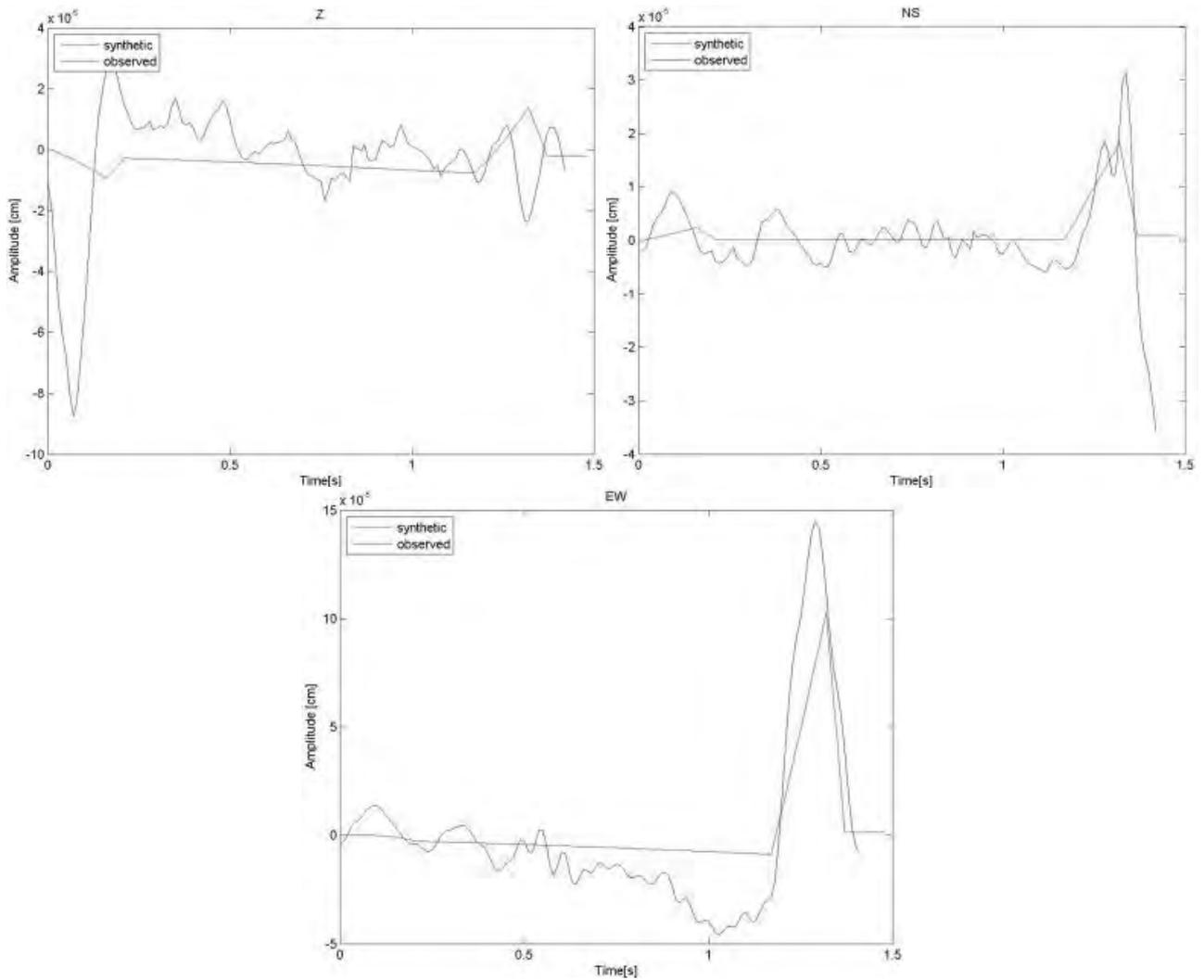


Figura 12 Registro sísmico de la estación CUIG, la estación se encuentra el pozo de Ciudad Universitaria, D.F, a 6 Km del epicentro del sismo del día 11 de julio de 2009 a las 21:29:31.3 (GMT), localizado en la colonia Narvarte de la Delegación Benito Juárez, D.F.

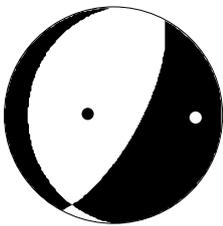


Amplitud de sfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
.8	1.25893E+12	0.04

Figura 13. Espectro de aceleración de la estación CUIG del sismo del día 11 de julio de 2009 a las 21:29:31.3 (GMT), localizado en la colonia Narvarte de la Delegación Benito Juárez, D.F.



Figuras 14 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del sismo del día 11 de julio de 2009 a las 21:29:31.3 (GMT), localizado en la colonia Narvarte de la Delegación Benito Juárez, D.F. (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
180	22.5	-116

Figura 15. Mecanismo focal calculado.

5. 10 de febrero de 2010 a las 05:07:39.2 (GMT), localizado al este de Teotihuacan, Estado de México.

Este evento su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.716°N y 98.679°W.

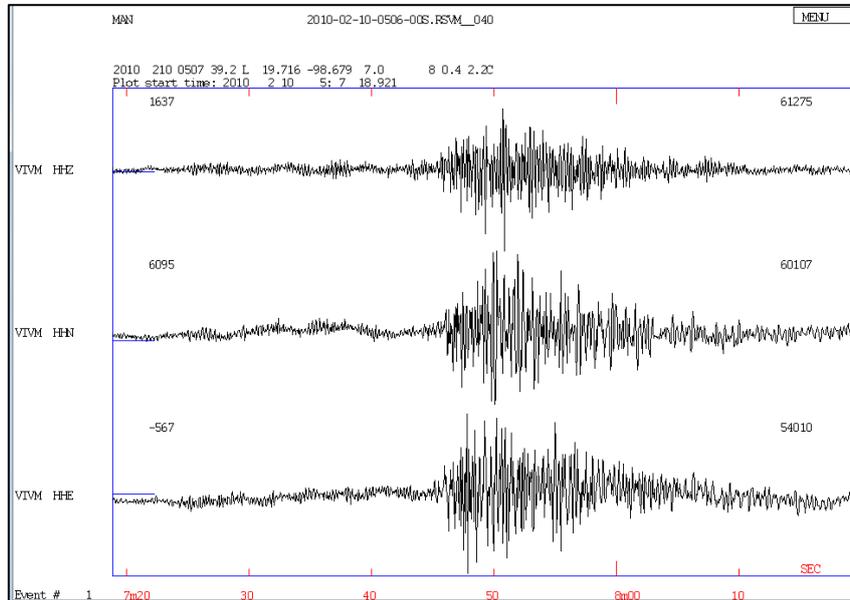
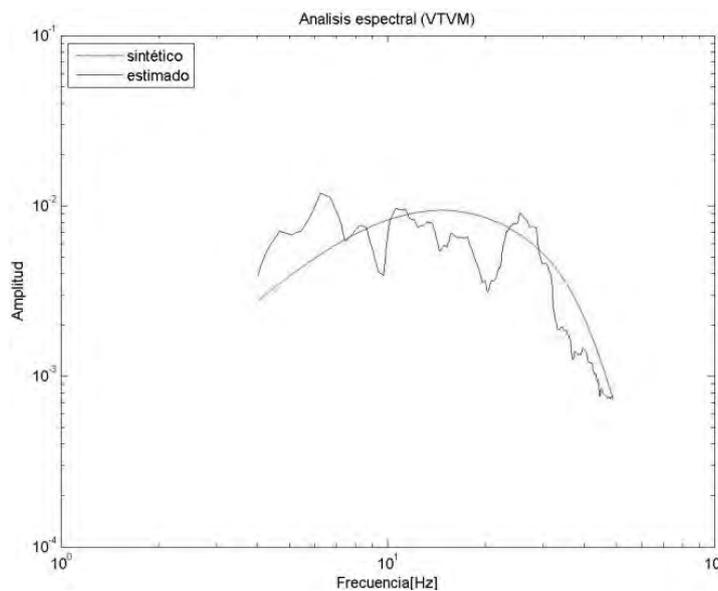
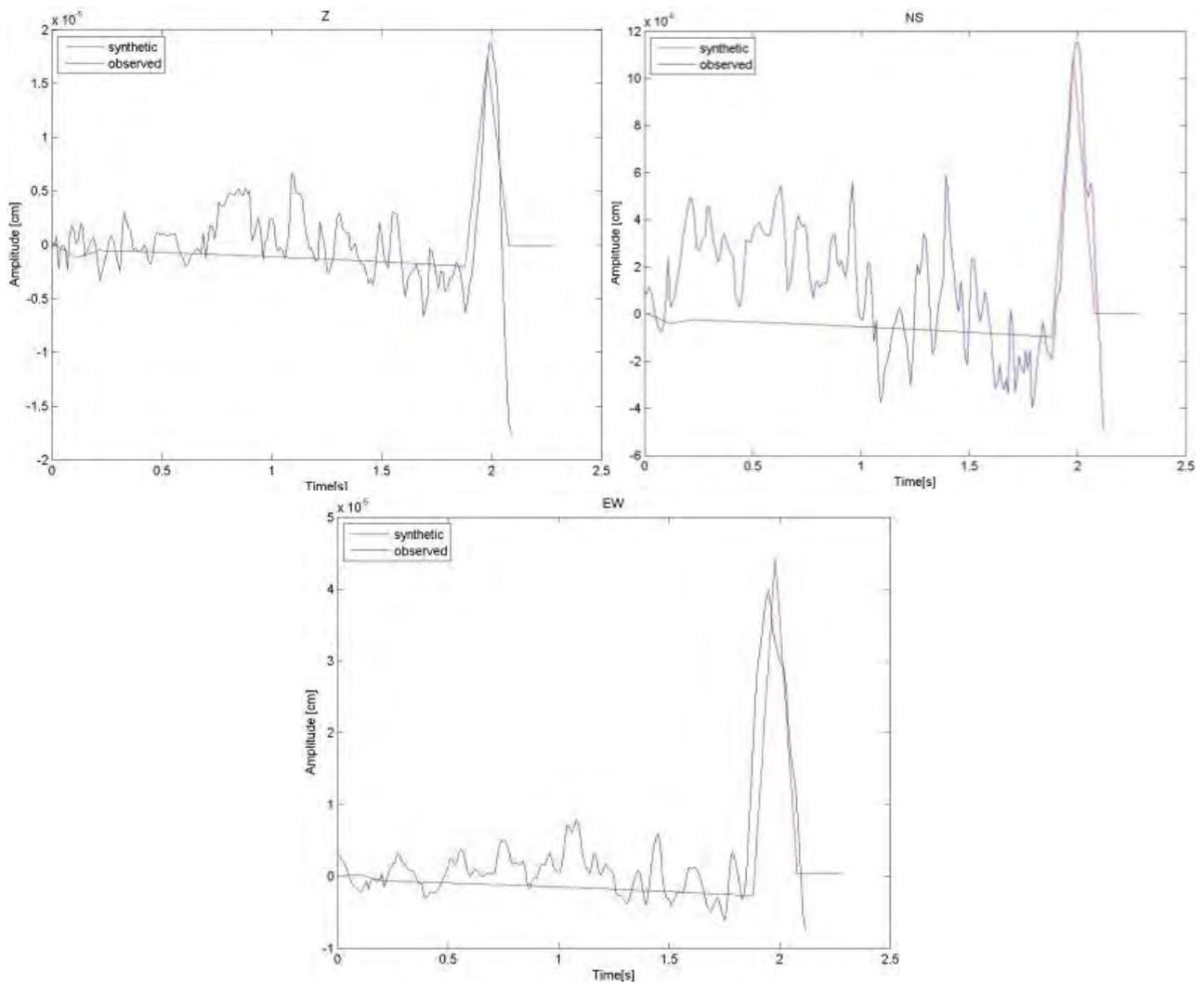


Figura 16 Registro sísmico de la estación VTVM, la estación se encuentra en el Valle de Teotihuacán, Edo. Méx, a 10 Km del epicentro del sismo del día 10 de febrero de 2010 a las 05:07:39.2 (GMT), localizado al este de Teotihuacan, Estado de México.

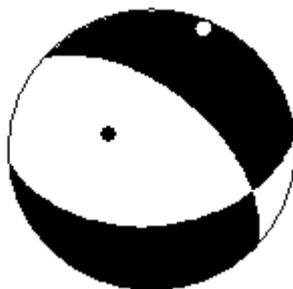


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.77828E+12	0.02

Figura 17. Espectro de aceleración de la estación VTVM del sismo del día 10 de febrero de 2010 a las 05:07:39.2 (GMT), localizado al este de Teotihuacan, Estado de México.



Figuras 18 Comparación entre el sismograma sintético y el observado. del sismo del día 10 de febrero de 2010 a las 05:07:39.2 (GMT), localizado al este de Teotihuacan, Estado de México. (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
84.706	45	-127

Figura 19. Mecanismo focal calculado.

6. 7 de marzo de 2010 a las 17:11:23.6 (GMT), localizado al este de Tenango del Aire, Estado de México.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.139°N y 98.920° W.

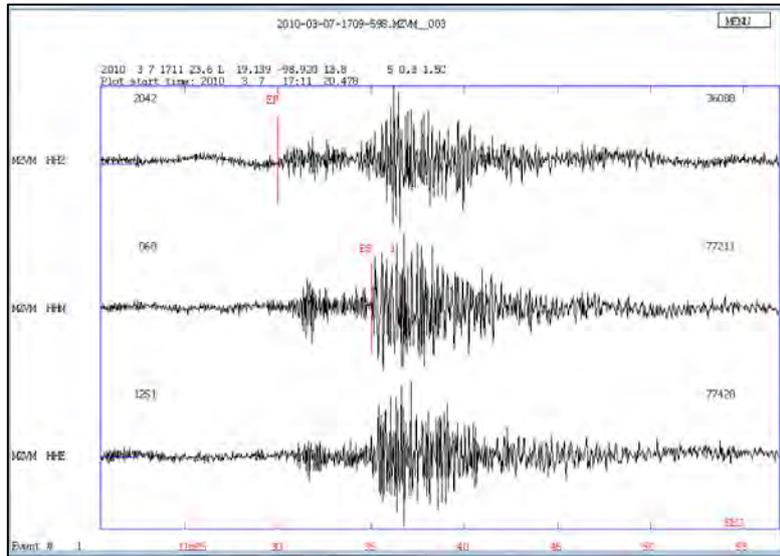
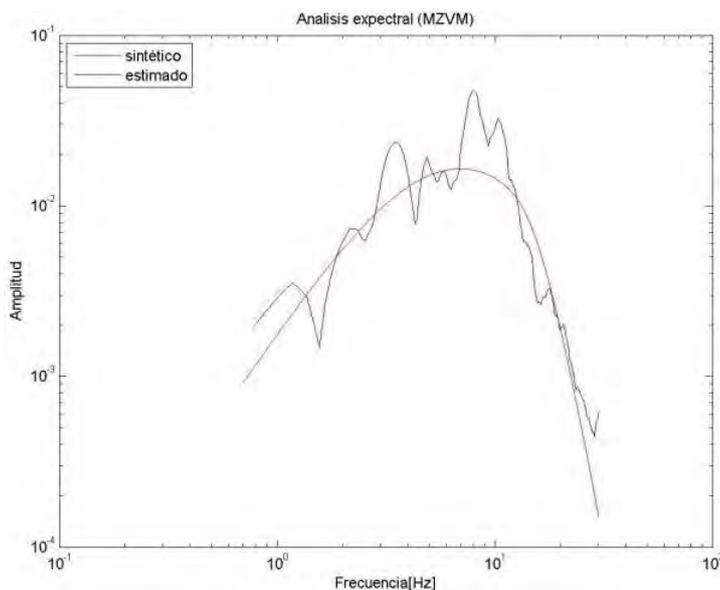
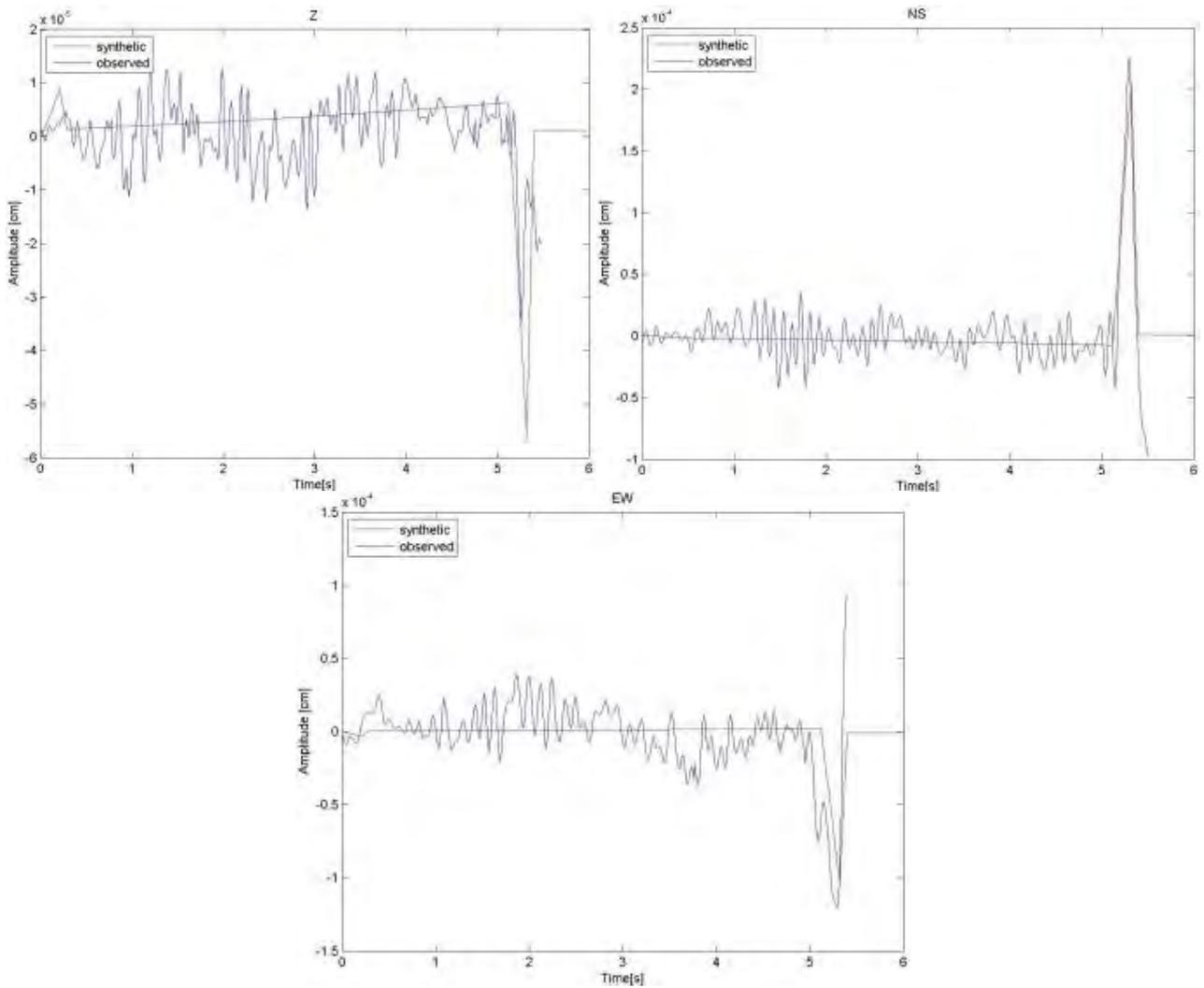


Figura 20. Registro sísmico de la estación MZVM, la estación se encuentra en Santo Tomás Ajusco, DF, a 30 Km del epicentro del sismo del día 7 de marzo de 2010 a las 17:11:23.6 (GMT), localizado al este de Tenango del Aire, Estado de México.

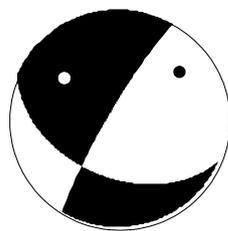


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.3	3.98107E+13	0.03

Figura 21. Espectro de aceleración de la estación MZVM corresponde al evento del 7 de marzo de 2010 a las 17:11:23.6 (GMT), localizado al este de Tenango del Aire, Estado de México.



Figuras 22 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 7 de marzo de 2010 a las 17:11:23.6 (GMT), localizado al este de Tenango del Aire, Estado de México. **Arriba-izquierda**) componente vertical Z, **(arriba-derecha)** componente horizontal Norte, **(abajo-centro)** componente horizontal Este.



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
94.737	67.5	66.32

Figura 23. Mecanismo focal calculado.

7. 5 de abril de 2010 a las 20:06:26.8 (GMT), localizado en San Pablo Atlazalpan, Estado de México

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.218° N y 98.900° W

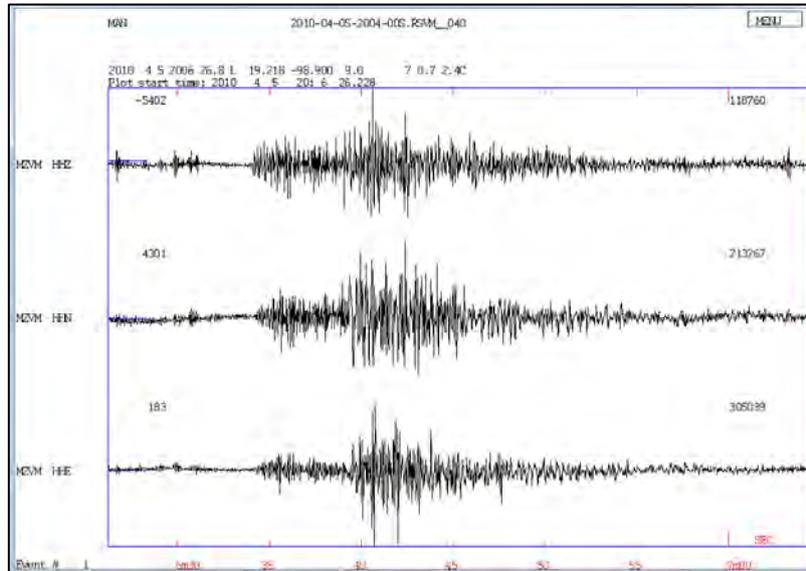
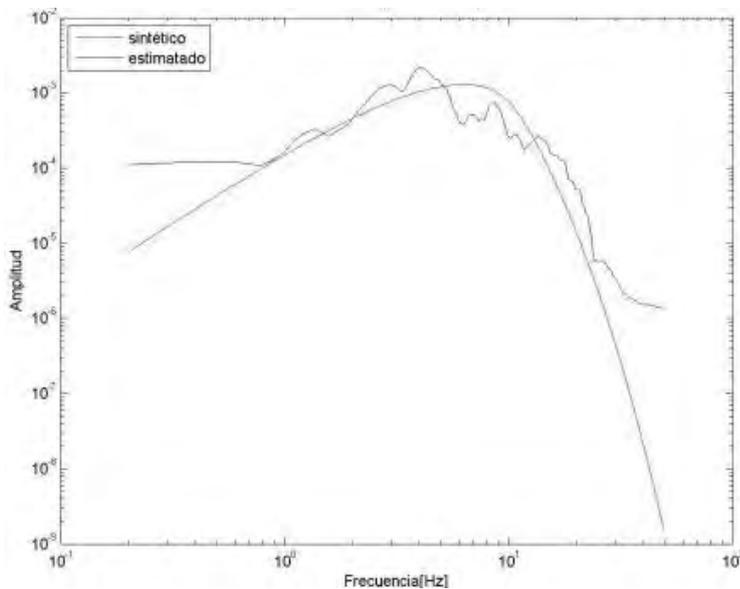
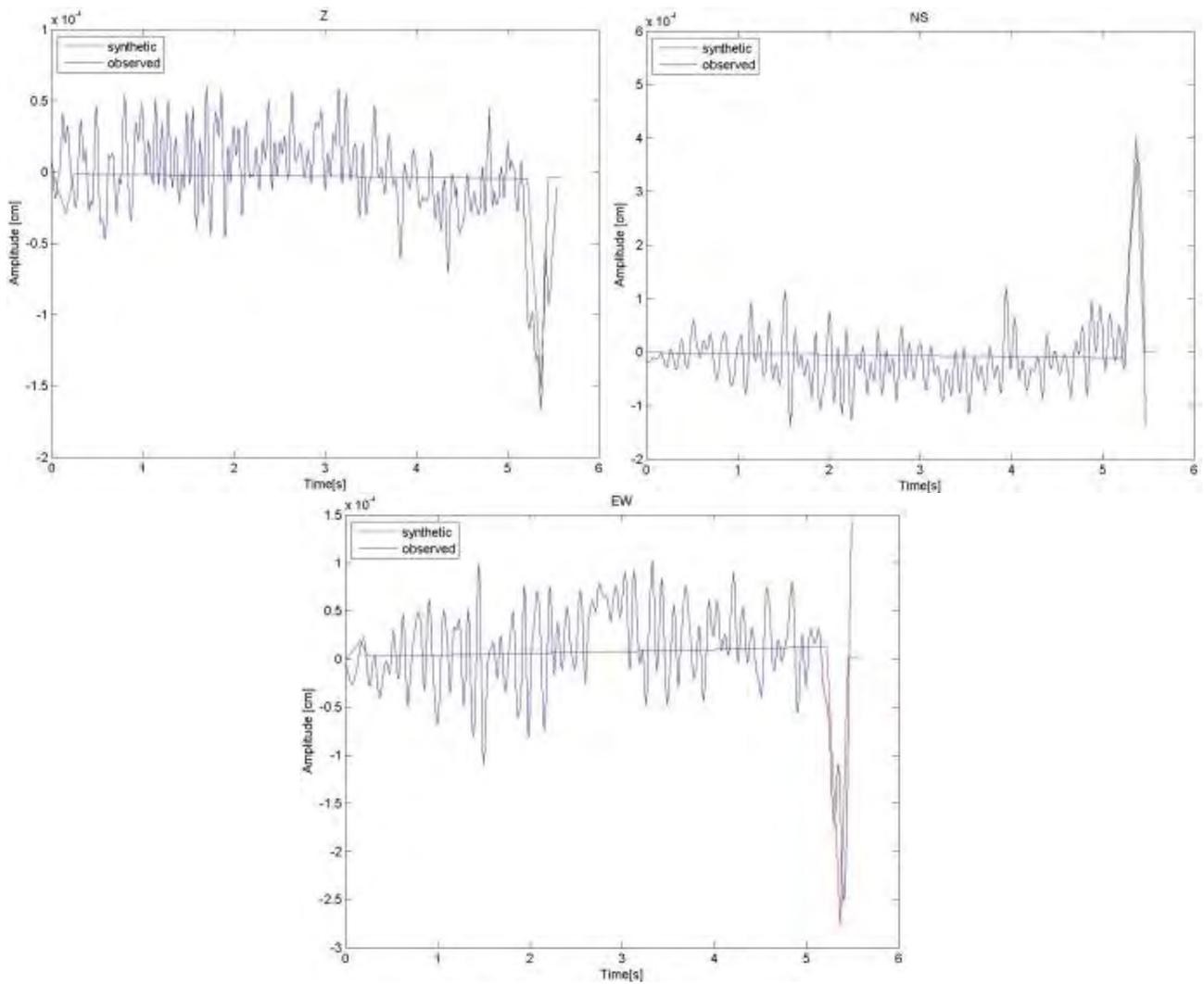


Figura 24 Registro sísmico de la estación MZVM, la estación se encuentra en Santo Tomás Ajusco, DF, a 34 Km del epicentro del evento del 5 de abril de 2010 a las 20:06:26.8 (GMT), localizado en San Pablo Atlazalpan, Estado de México



Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.25893E+12	0.06

Figura 25. Espectro de aceleración de la estación MZVM del evento del 5 de abril de 2010 a las 20:06:26.8 (GMT), localizado en San Pablo Atlazalpan, Estado de México



Figuras 26 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 5 de abril de 2010 a las 20:06:26.8 (GMT), localizado en San Pablo Atlazalpan, Estado de México (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
227.37	45	-123

Figura 27. Mecanismo focal calculado.

8. 24 de junio de 2010 a las 05:36:20.4(GMT), localizado en el colonia Del Valle en la Delegación Benito Juárez, D.F.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.394° N y 99.168°W

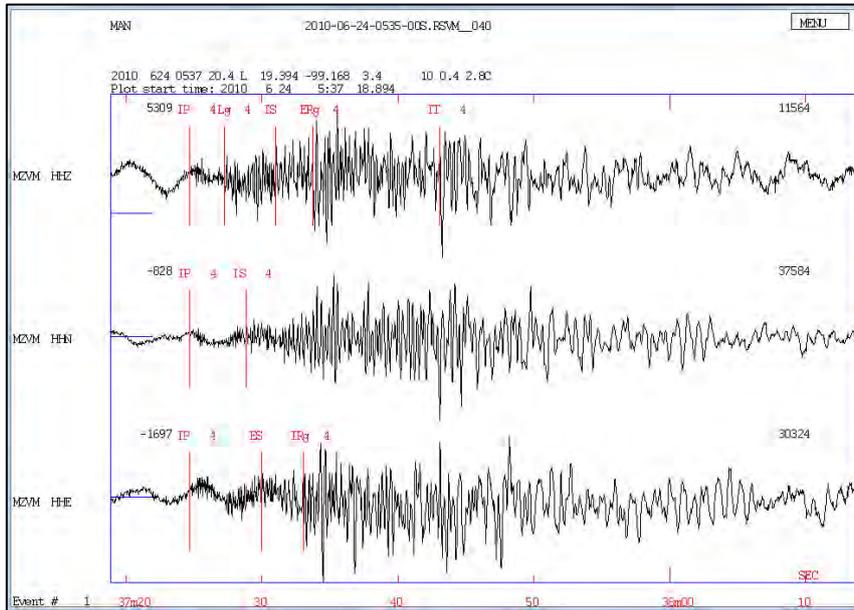
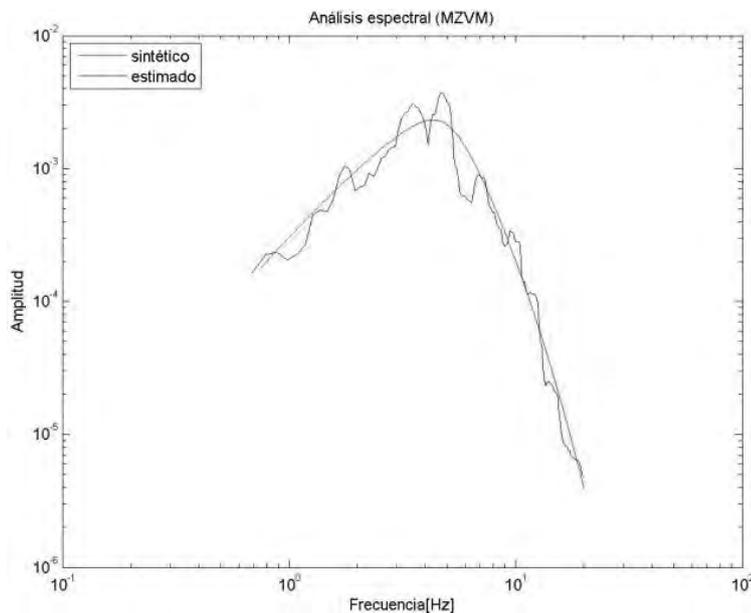
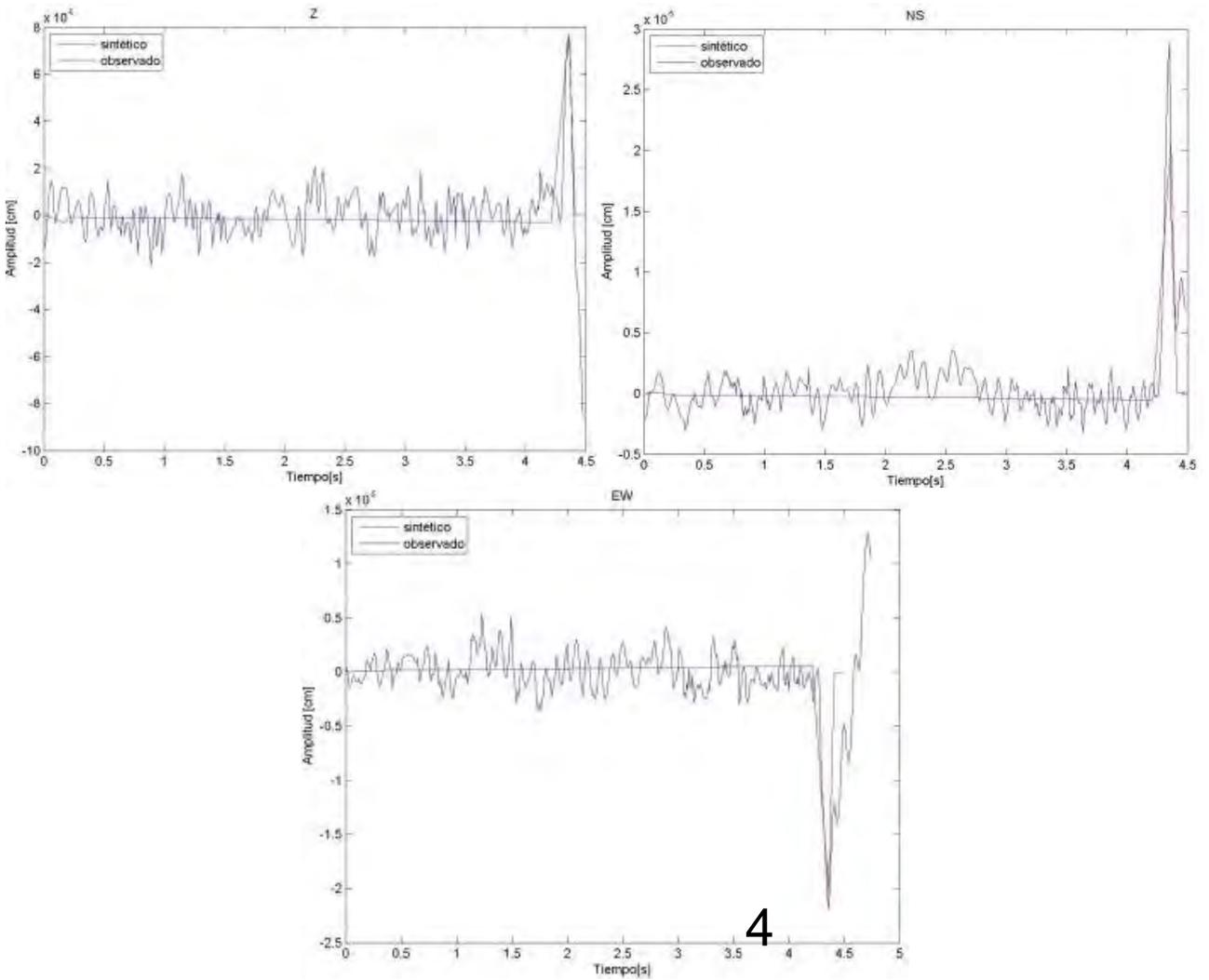


Figura 28 Registro sísmico de la estación MZVM, la estación se encuentra en Santo Tomás Ajusco, DF, a 24 Km del epicentro del evento del 24 de junio de 2010 a las 05:36:20.4(GMT), localizado en el colonia Del Valle en la Delegación Benito Juárez, D.F.

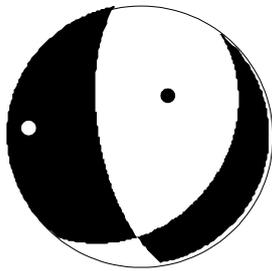


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.25893E+12	0.06

Figura 29. Espectro de aceleración de la estación MZVM del evento del 24 de junio de 2010 a las 05:36:20.4(GMT), localizado en el colonia Del Valle en la Delegación Benito Juárez, D.F.



Figuras 30 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 24 de junio de 2010 a las 05:36:20.4(GMT), localizado en el colonia Del Valle en la Delegación Benito Juárez, D.F. (Arriba-izquierda) componente vertical Z, (arriba-derecha) componente horizontal Norte, (abajo-centro) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
56.842	56.25	142.1

Figura 31. Mecanismo focal calculado.

2

5

14

7

9. 24 de junio de 2010 a las 15:36:16.3(GMT), localizado en la colonia Granjas Estrella de la Delegación Iztapalapa, D.F

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.326°N y 99.087°W

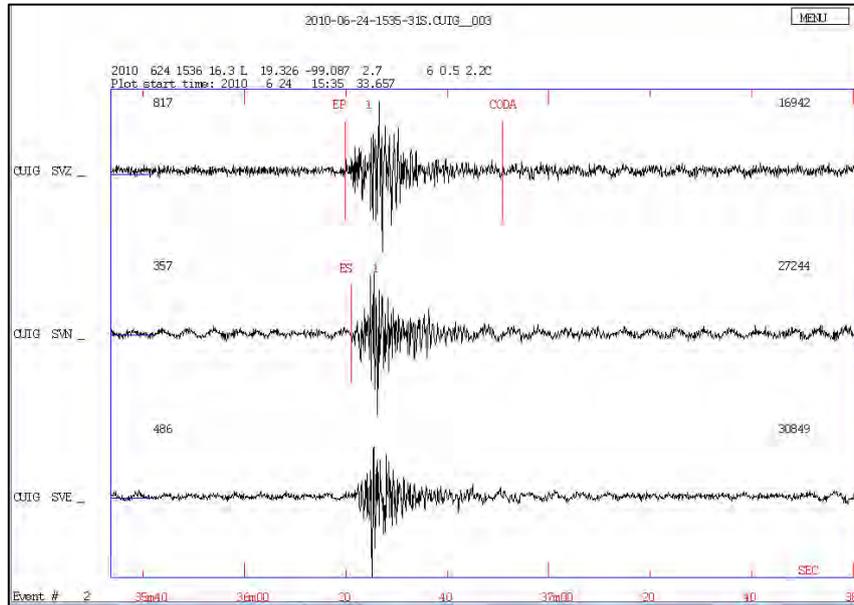
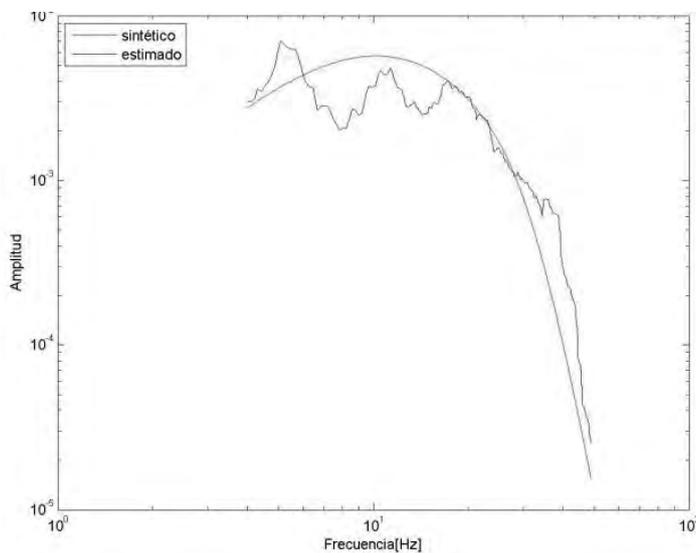
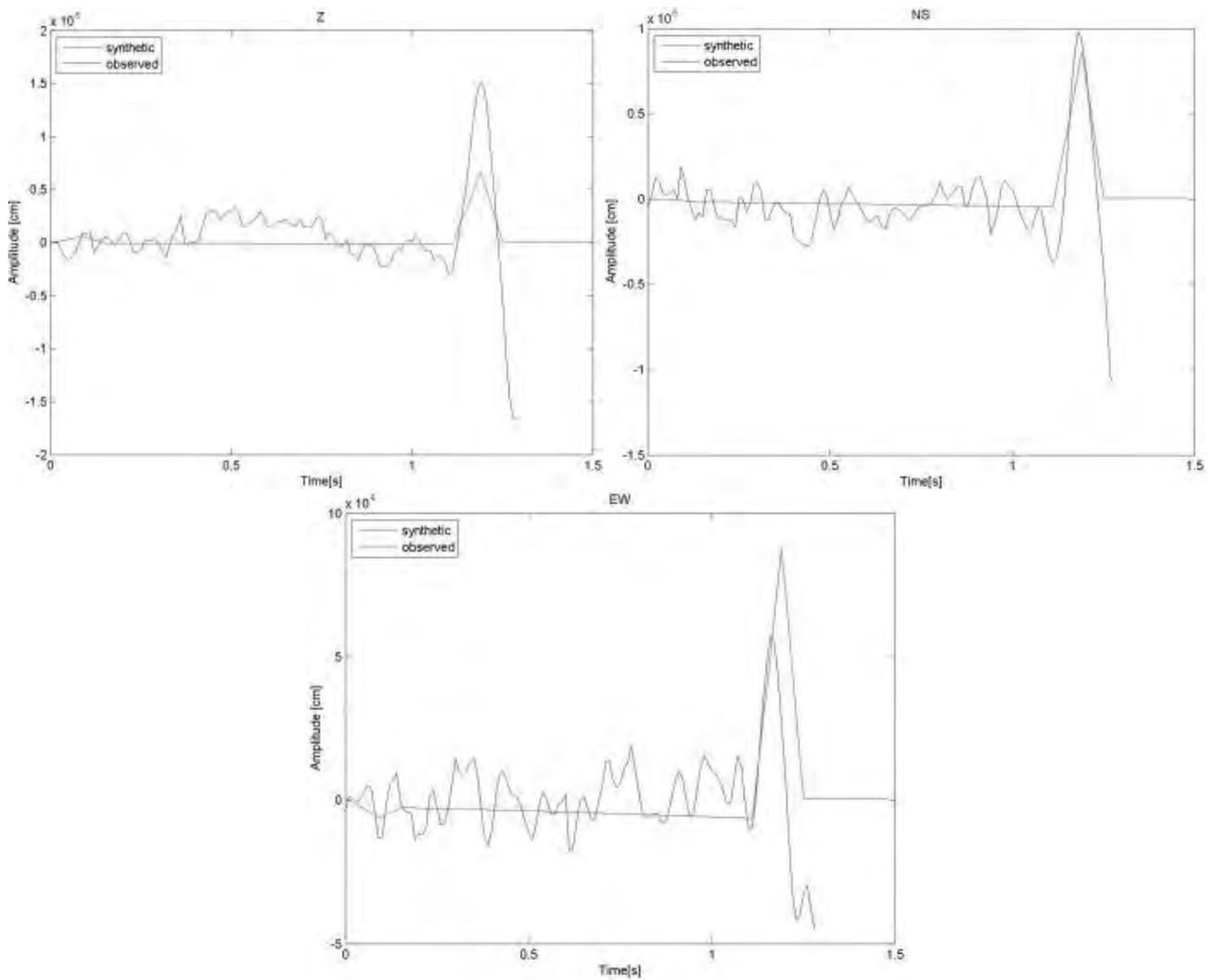


Figura 32 Registro sísmico de la estación CUIG, la estación se encuentra en Ciudad Universitaria, a 10 Km del epicentro del evento del 24 de junio de 2010 a las 15:36:16.3(GMT), localizado en la colonia Granjas Estrella de la Delegación Iztapalapa, D.F

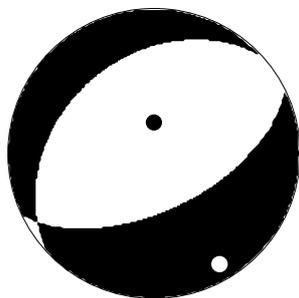


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.25893E+12	0.04

Figura 33. Espectro de aceleración de la estación CUIG del evento del 24 de junio de 2010 a las 15:36:16.3(GMT), localizado en la colonia Granjas Estrella de la Delegación Iztapalapa, D.F



Figuras 34 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 24 de junio de 2010 a las 15:36:16.3(GMT), localizado en la colonia Granjas Estrella de la Delegación Iztapalapa, D.F  
**(Arriba-izquierda)** componente vertical Z, **(arriba-derecha)** componente horizontal Norte, **(abajo-centro)** componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
227.37	33.75	-104

Figura 35. Mecanismo focal calculado.

10. 28 de junio de 2010 a las 23:09:57 (GMT), localizado al norte de Ixtapaluca, Estado de México.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.421°N y 98.814°W

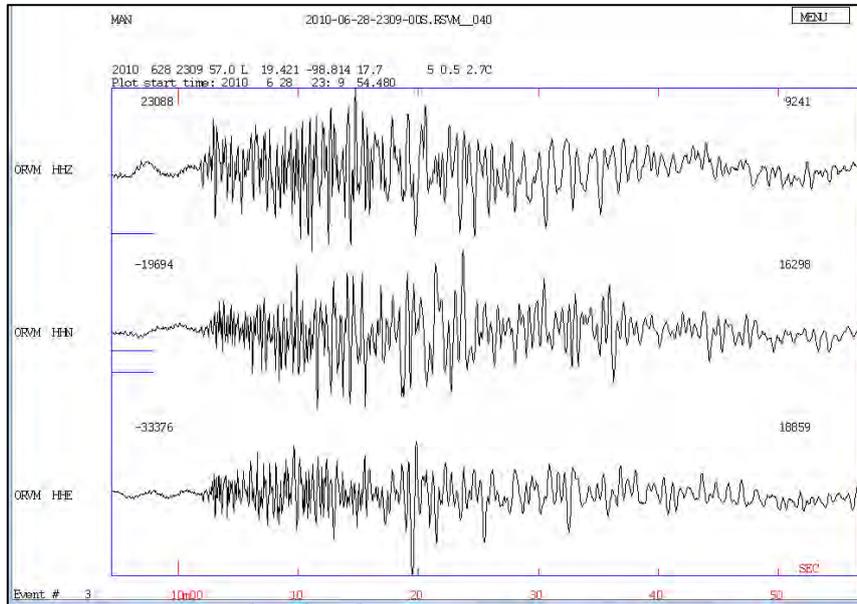
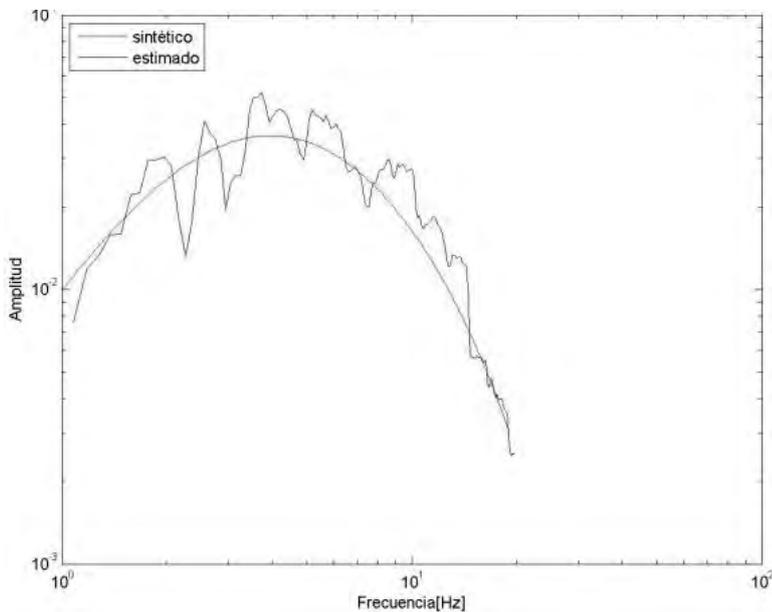
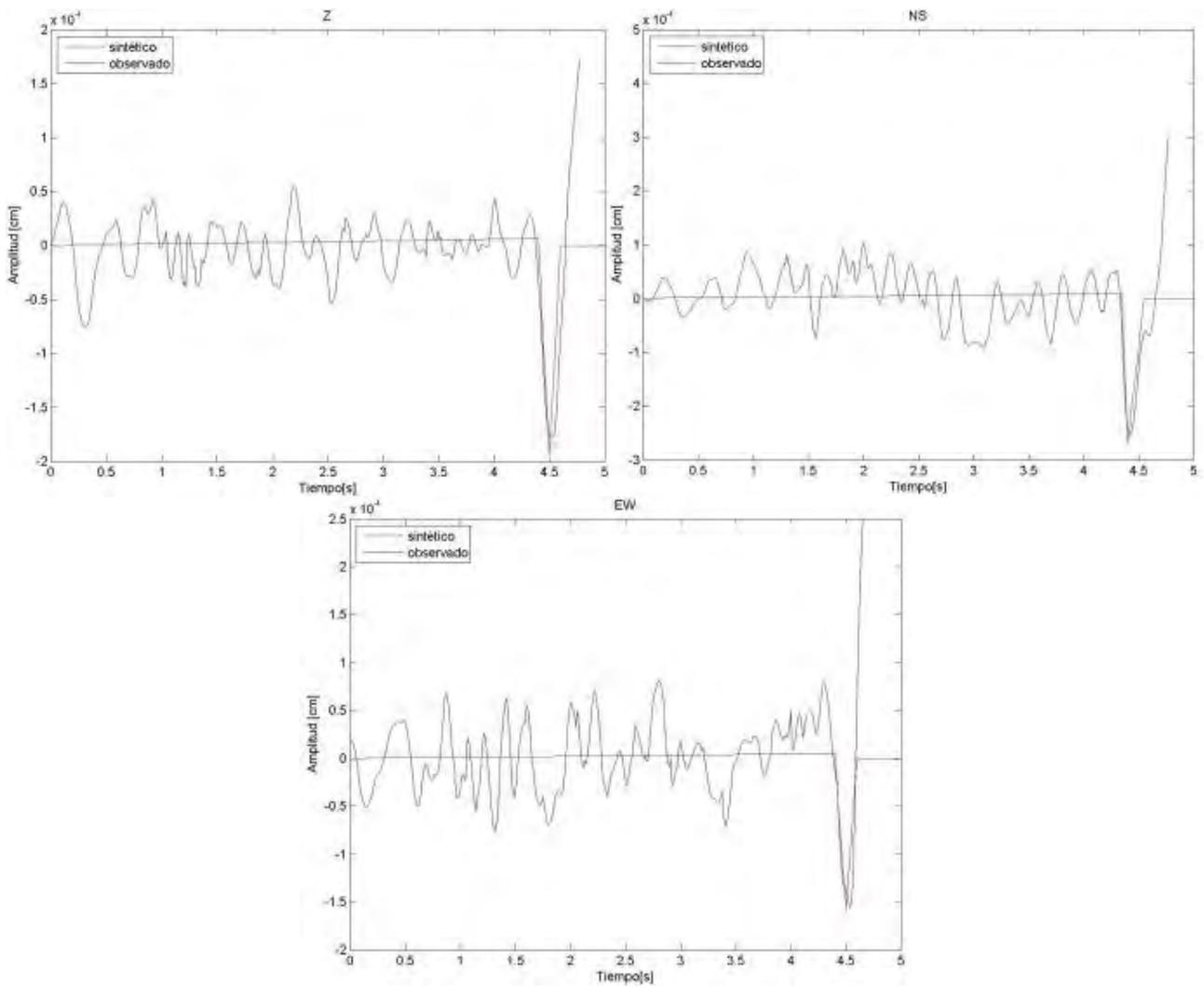


Figura 36 Registro sísmico de la estación ORVM, la estación se encuentra al NW del estado de Tlaxcala, a 11 Km del epicentro del evento del 28 de junio de 2010 a las 23:09:57 (GMT), localizado al norte de Ixtapaluca, Estado de México.

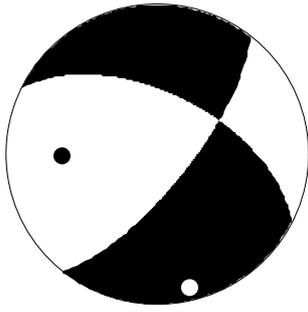


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
1.0	1.58489E+12	0.06

Figura 37. Espectro de aceleración de la estación ORVM del evento del 28 de junio de 2010 a las 23:09:57 (GMT), localizado al norte de Ixtapaluca, Estado de México.



Figuras 38 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 28 de junio de 2010 a las 23:09:57 (GMT), localizado al norte de Ixtapaluca, Estado de México. **(Arriba-izquierda)** componente vertical Z, **(arriba-derecha)** componente horizontal Norte, **(abajo-centro)** componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
296.47	56.25	-21.17

Figura 39. Mecanismo focal calculado.

11. 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), localizado al norte de Tres Marias, Estado de Morelos.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.058°N y 99.232°W

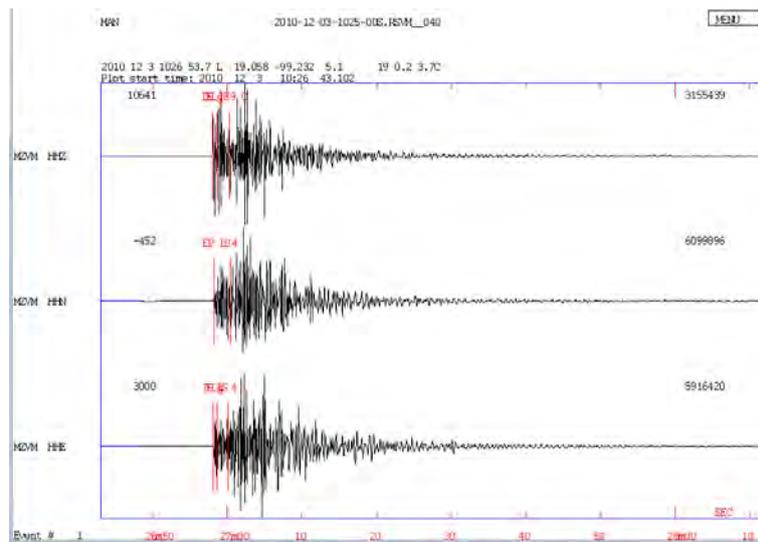
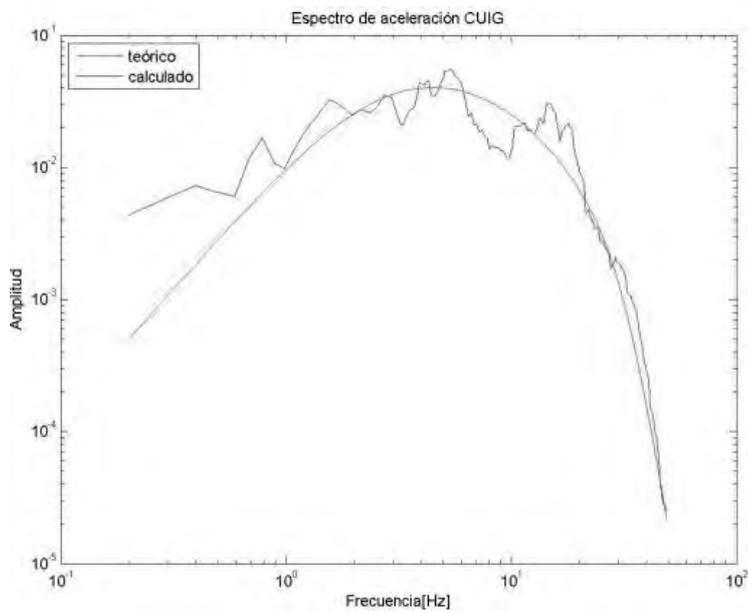
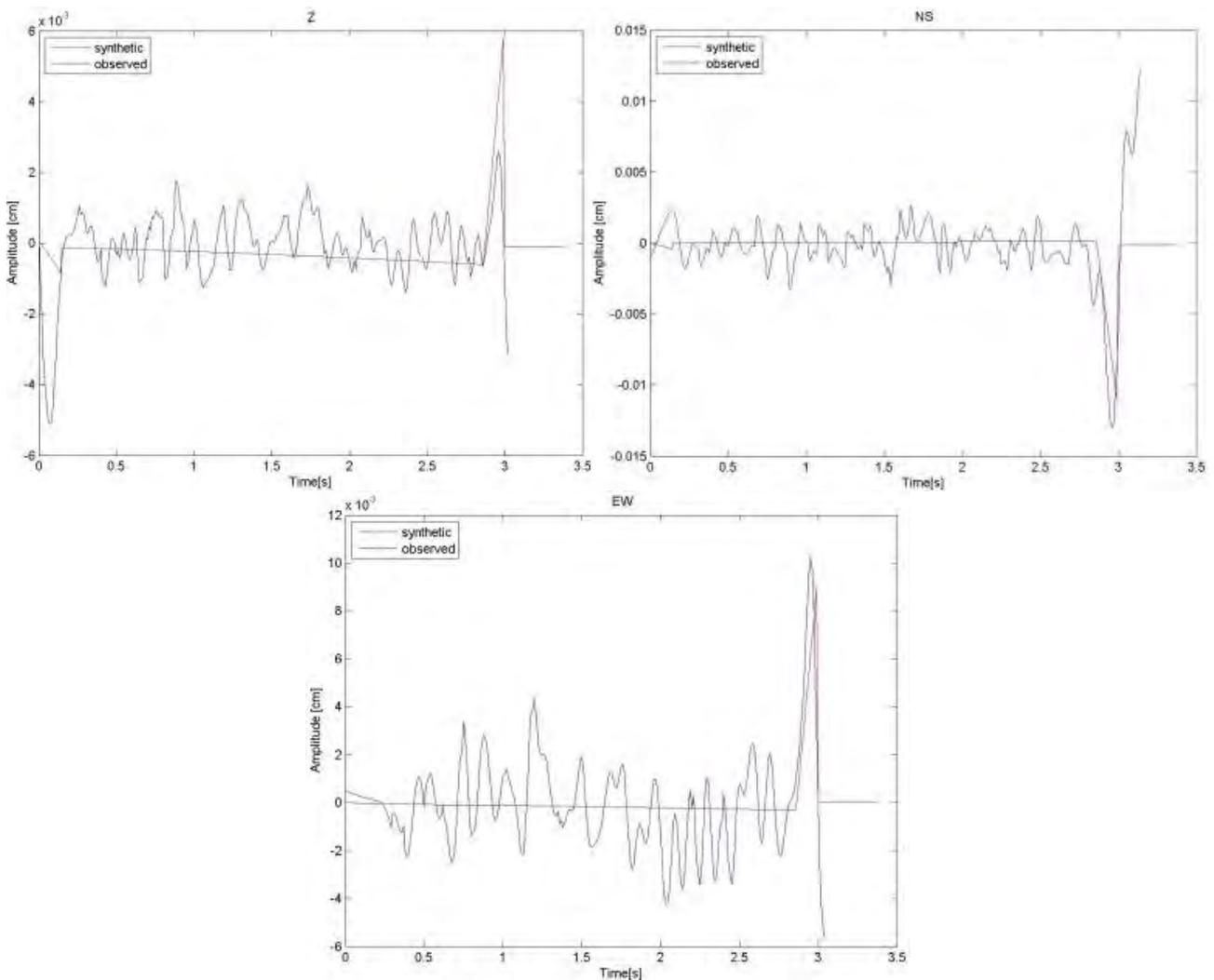


Figura 40 Registro sísmico de la estación MZVM, la estación se encuentra en Santo Tomás Ajusco, DF, a 14 Km del epicentro del evento del 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), localizado al norte de Tres Marias, Estado de Morelos



Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	$t^*$ [s]
1.3	1.25893E+14	0.06

Figura 41. Espectro de aceleración de la estación CUIG del evento del 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), localizado al norte de Tres Marias, Estado de Morelos



Figuras 42 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 03 de diciembre de 2010 a las 10:26:53.7 (GMT), localizado al norte de Tres Marías, Estado de Morelos (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este

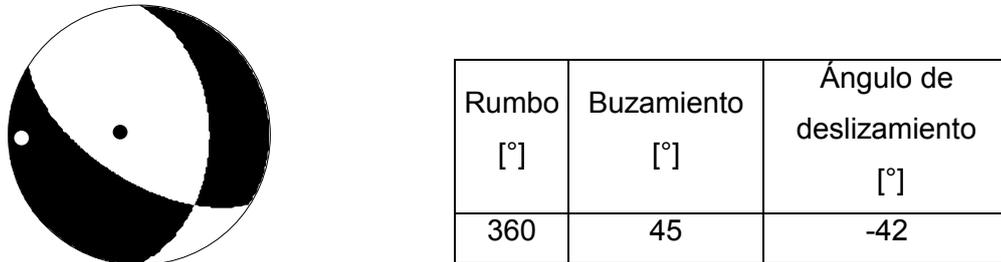


Figura 43. Mecanismo focal calculado.

12. 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos.

Su epicentro se localiza en las siguientes coordenadas 19.018°N y 99.206°W

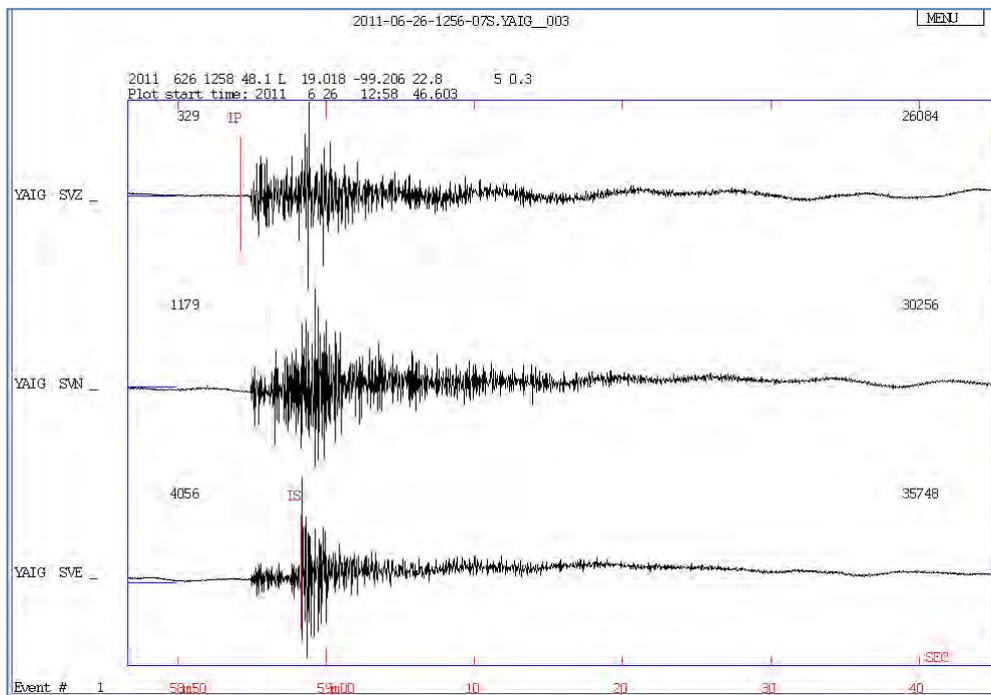
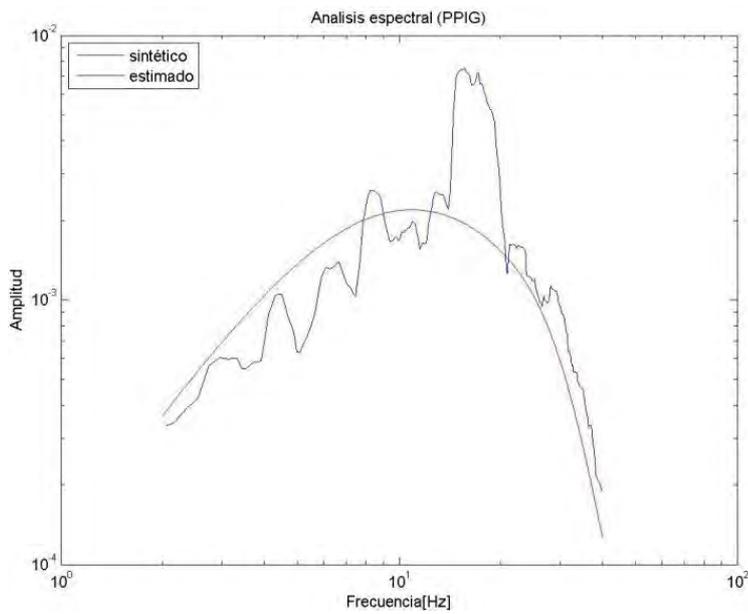
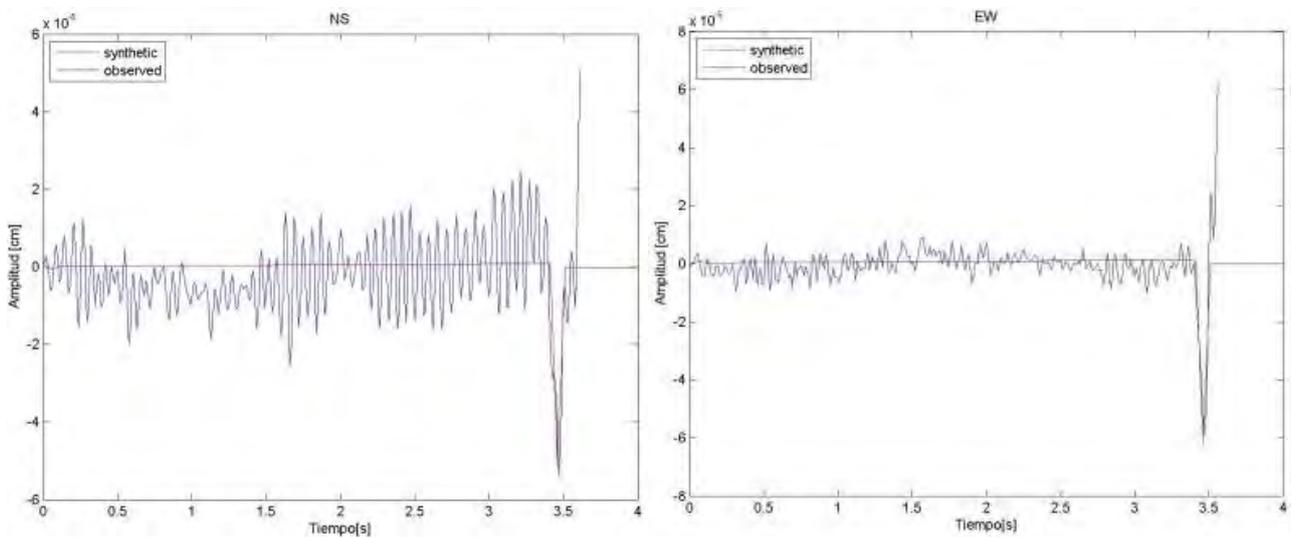


Figura 44 Registro sísmico de la estación YAIG, la estación se encuentra en Yautepec, Morelos, a 21 Km del epicentro del evento del 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos.

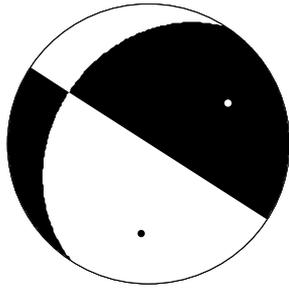


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	$t^*$ [s]
1.0	5.01187E+14	0.02

Figura 45. Espectro de aceleración de la estación MZVM del evento del 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos



Figuras 46 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 26 de junio de 2011 a las 12:58:48.1 (GMT), localizado en Huitzilac, Estado de Morelos (**izquierda**) componente horizontal N-S, (**derecha**) componente horizontal E-W,

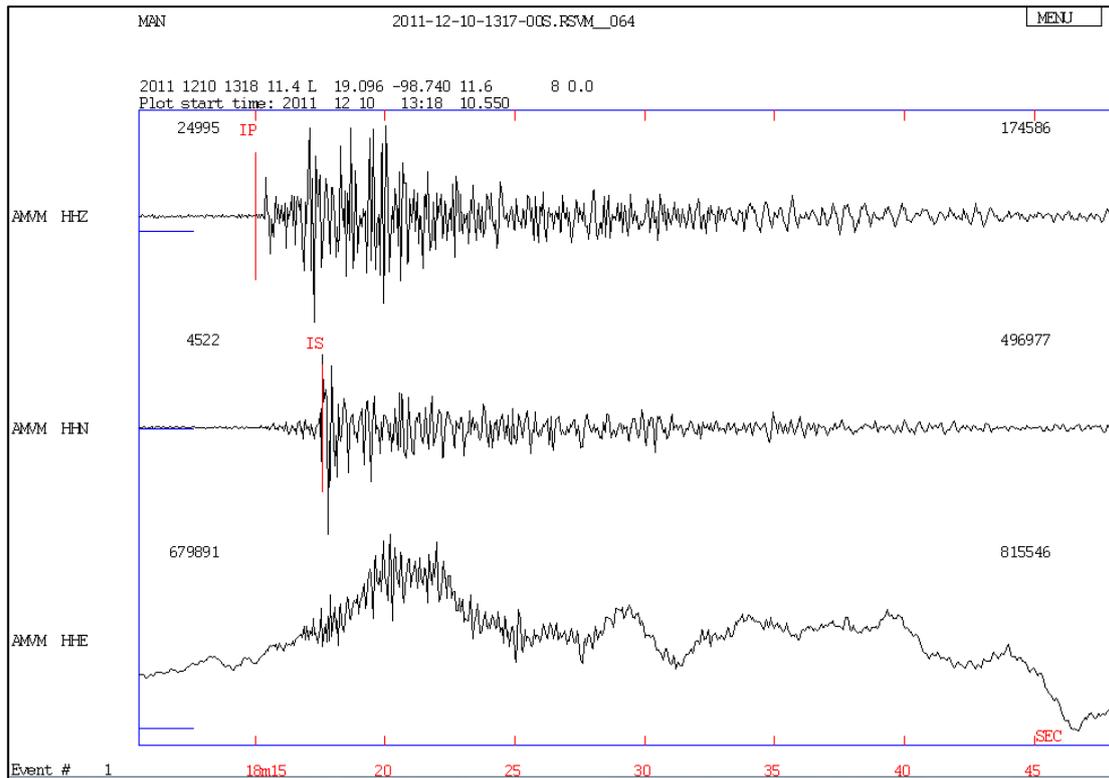


Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
151.58	33.75	-123.2

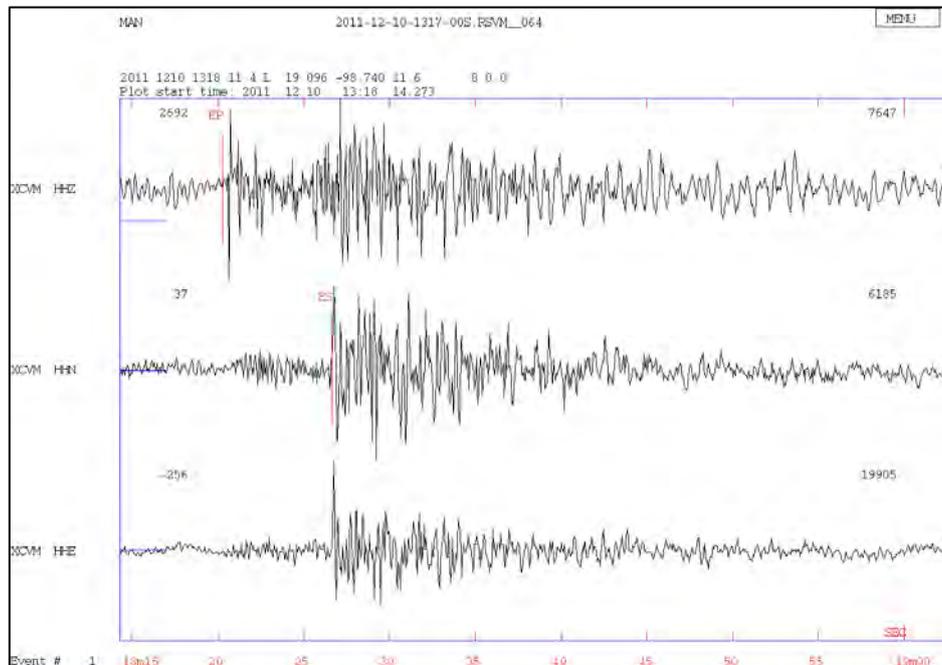
*Figura 47. Mecanismo focal calculado.*

*13. 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México.*

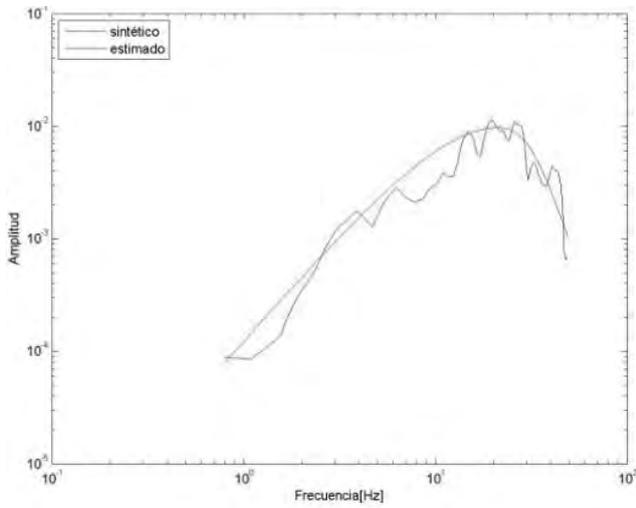
Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.96°N y 98.740°W. La estación más cercana al evento es AMVM, pero la componente vertical en ese momento presentaba fallas, como se muestra en la figura 48, por este motivo se decidió analizar la señal procedente de XCVM.



**Figura 48** Registro sísmico de la estación AMVM, la estación se encuentra en Amecameca, Edo. Méx., a 14 Km del epicentro del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México

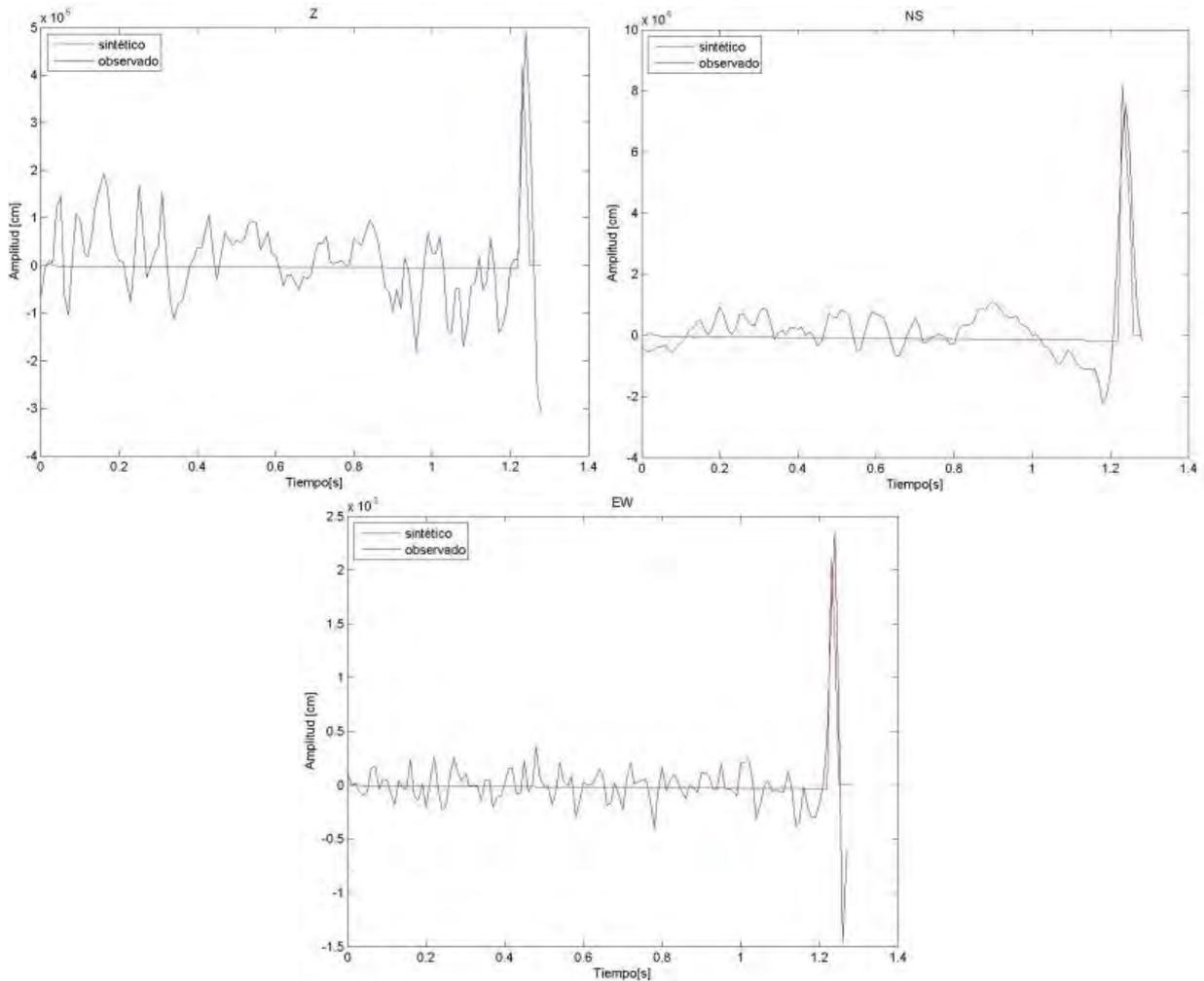


**Figura 49** Registro sísmico de la estación XCVM, la estación se encuentra en Xochimilco, DF, a 42 Km del epicentro del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México

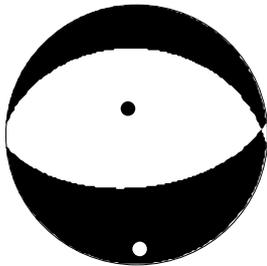


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	t* [s]
3.0	1.25893E+14	0.005

Figura 50. Espectro de aceleración de la estación XCVM del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México



Figuras 51 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 10 de diciembre de 2011 a las 13:18:11.4 (GMT), localizado al norte de San Pedro Nexapa, Estado de México (**Arriba-izquierda**) componente vertical Z, (**arriba-derecha**) componente horizontal Norte, (**abajo-centro**) componente horizontal Este



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
84.7	56.3	-95.3

Figura 52. Mecanismo focal calculado.

14. 8 de julio de 2012 a las 17:20:23.6 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.235°N y 98.865°W

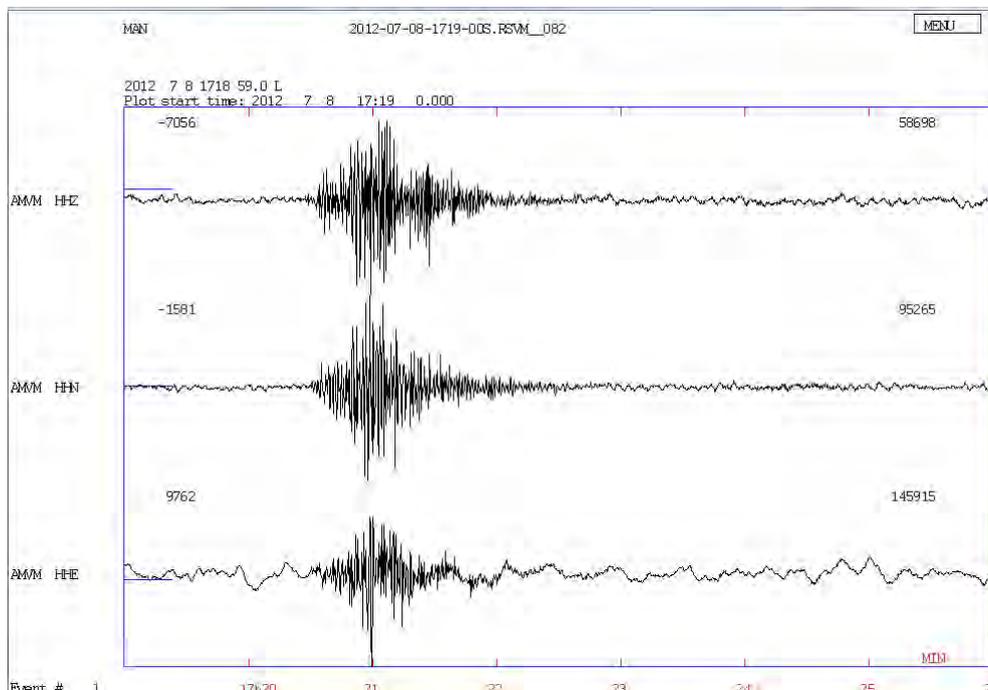
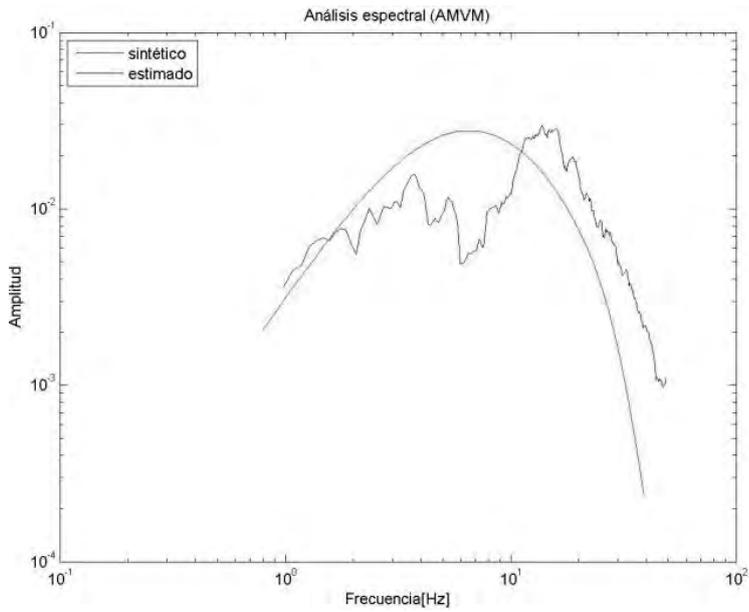
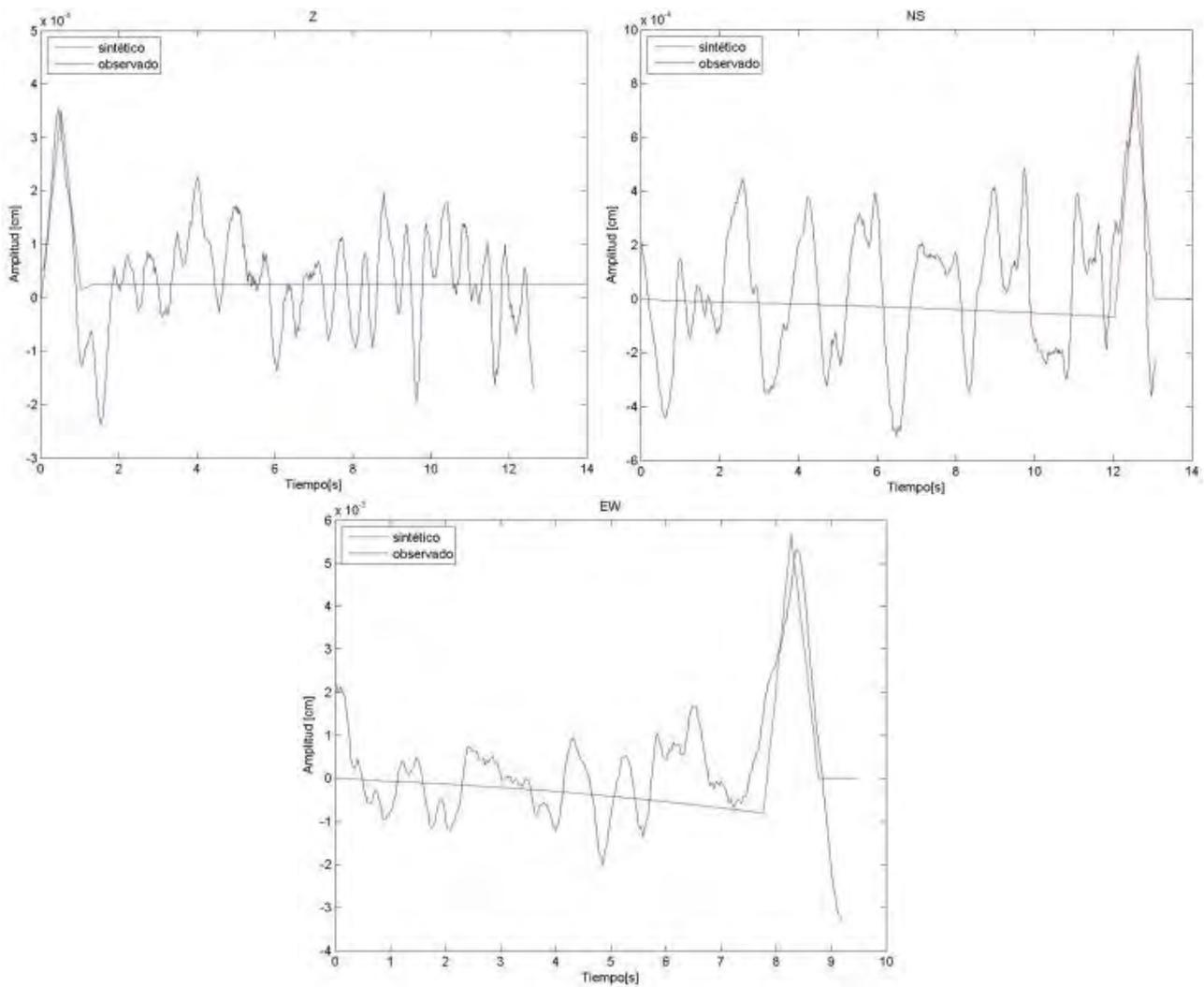


Figura 53 Registro sísmico de la estación AMVM, la estación se encuentra en Amecameca, Edo. de Mex., a 14 Km del epicentro del evento del 14. 8 de julio de 2012 a las 17:20:23.6 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.

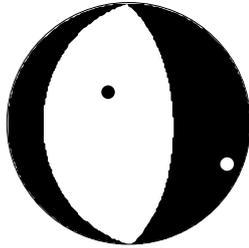


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N·m]	t* [s]
1.0	1.25893E+13	0.04

Figura 54. Espectro de aceleración de la estación AMVM del evento del 14. 8 de julio de 2012 a las 17:20:23.6 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.



Figuras 55 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 14. 8 de julio de 2012 a las 17:20:23.6 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
180	30	-89

Figura 56. Mecanismo focal calculado.

15. 9 de julio de 2012 a las 00:29:17.5 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.

Su epicentro se encuentra en las siguientes coordenadas 19.249°N y 98.868°W

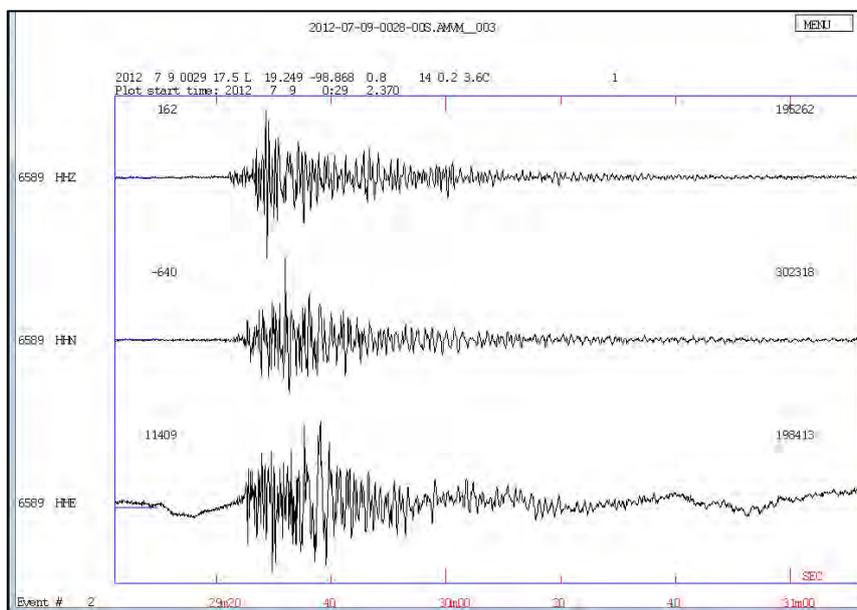
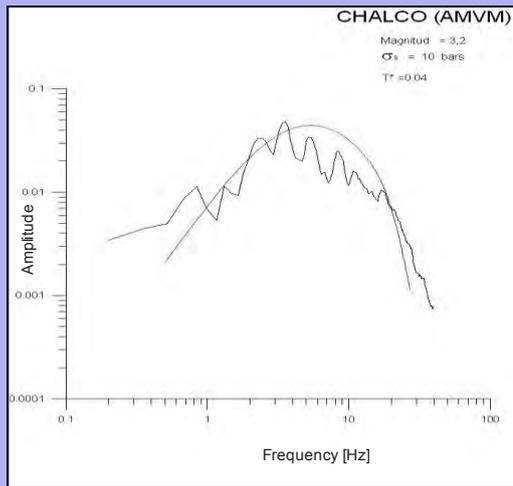
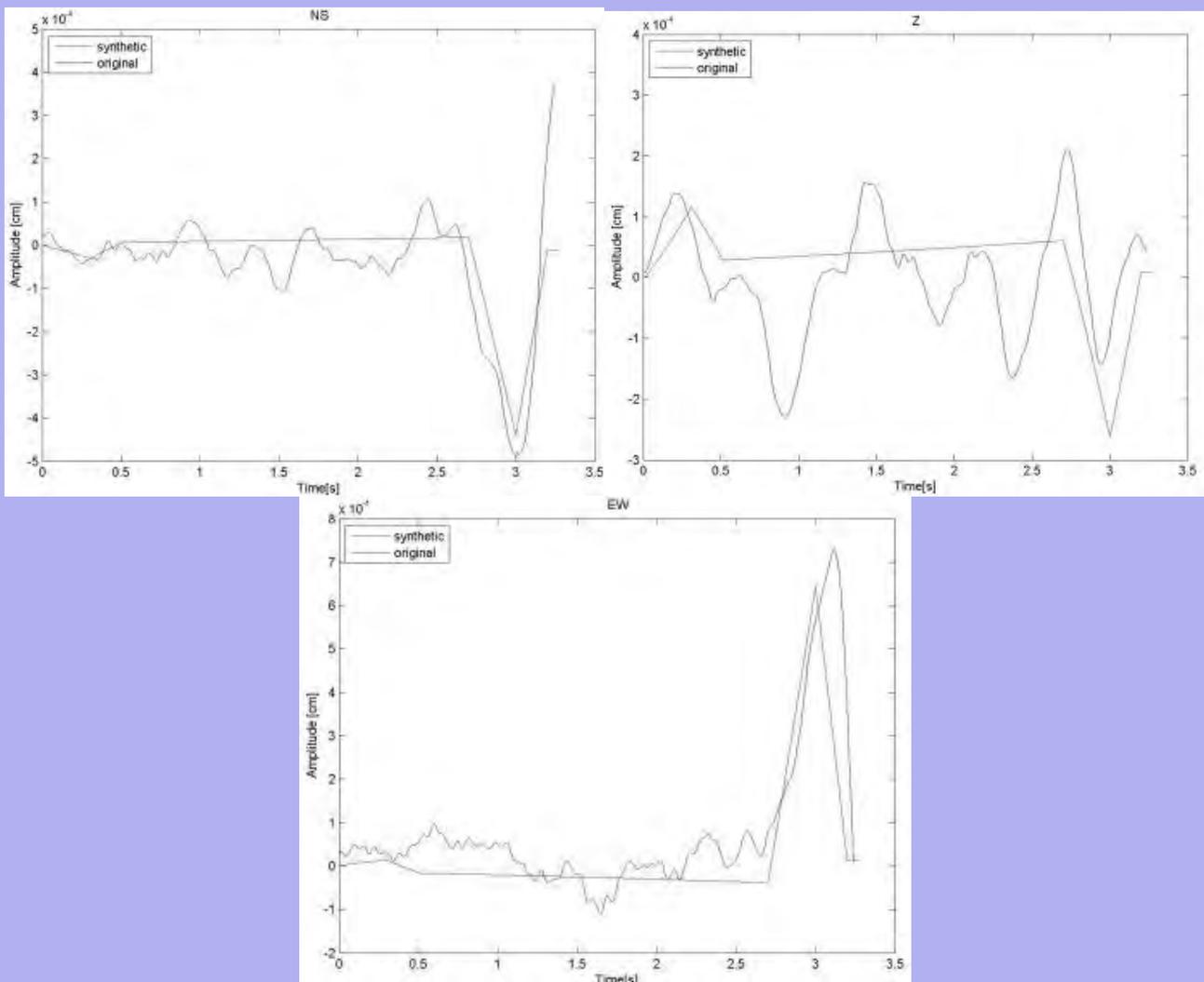


Figura 57 Registro sísmico de la estación AMVM, la estación se encuentra en Amecameca, Edo. de Mex., a 11 Km del epicentro del evento del 9 de julio de 2012 a las 00:29:17.5 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.

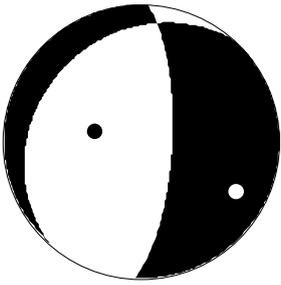


Caída de esfuerzo [MPa]	Momento sísmico [N•m]	$t^*$
1.0	1.25893E+13	0.04

Figura 58. Espectro de aceleración de la estación AMVM del evento del 9 de julio de 2012 a las 00:29:17.5 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México.



Figuras 59 Comparación entre el sismograma sintético y el observado del evento del 9 de julio de 2012 a las 00:29:17.5 (GMT), localizado al noreste de Chalco, Estado de México. **(Arriba-izquierda)** componente vertical Z, **(arriba-derecha)** componente horizontal Norte, **(abajo-centro)** componente horizontal Este-Oeste



Rumbo [°]	Buzamiento [°]	Ángulo de deslizamiento [°]
222	23	-53

*Figura 60. Mecanismo focal calculado.*