



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“ANÁLISIS DE COCIENTES ESPECTRALES PARA LA
DETERMINACIÓN DE AMPLIFICACIONES SÍSMICAS
EN EL VALLE DE MÉXICO”

T E S I S

para obtener el título de:
INGENIERO GEOFÍSICO

p r e s e n t a:
GEOVANNI MARTÍNEZ MENDOZA

Director de Tesis
DR. CARLOS VALDÉS GONZÁLEZ



Ciudad Universitaria, México, D.F. 2015

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero dar gracias a mis padres por todo lo que han hecho a lo largo de mi vida, en especial a mi madre, ya que por ti he llegado hasta aquí, por motivarme cuando parecía todo iba muy mal. Muchas gracias Justina Mendoza Osorio, por ser mi madre, por estar siempre en mi vida y por apoyarme en todo incondicionalmente.

También quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado todo los recursos, tanto la parte académica, como la parte de la infraestructura, ya que han permitido formarme como persona y como profesional a lo largo de los años que he estado en ella.

Agradezco enormemente a mi tutor, el Dr. Carlos Valdés Gonzáles, ya que me ha ayudado mucho en la realización de este trabajo, como también de su amistad, paciencia y conocimientos compartidos en el tiempo que tengo en conocerlo, y sobre todo, la gran confianza y apoyo que me ha brindado.

Agradezco a mis sinodales, por el tiempo que se han tomado en revisar este trabajo, en todos sus comentarios que han permitido el mejorarlo y la confianza que me han brindado.

Me gustaría también agradecer al personal del Servicio Sismológico Nacional, ya que han sido muy amables en todo momento y las facilidades que me han brindado para poder obtener los datos que se utilizaron en este trabajo.

Por último y no menos importante, quiero dar gracias a todos mis amigos y compañeros que han formado parte de mi vida, los momentos que hemos compartido y las experiencias aprendidas de ellos y que me permitieron crecer como persona.

RESUMEN

El presente estudio se lleva a cabo en la región denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en donde existen un total de 21,020 escuelas desde preescolar hasta bachillerato, correspondientes al ~8.5% del total nacional, también se encuentran en ella ~1,540 unidades médicas (INEGI, 2014). Según los resultados del censo elaborado por el INEGI en el año 2010, en esta zona se concentraban aproximadamente 20 millones de habitantes. Aquí se genera el 27.2% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (POZMVM, 2012), por lo que un temblor con características importantes, como los de 1985, podrían ocasionar un daño considerable a la ZMVM.

Para el presente trabajo se utilizaron 16 eventos telesísmicos, los cuales tienen un rango de distancias entre 974 y 17,000 km y con magnitudes de 7 hasta 9. Se utilizaron dos tipos de sensores, Guralp CMG-6TD (pertenecientes a la Red del Valle de México) y Reftek 151-60A (pertenecientes a la Red Delegacional del Distrito Federal), con un total de 30 estaciones, 14 para el primer sensor y 16 para el segundo. Se hizo uso de los componentes N-S, E-W y el Z (vertical), por lo tanto, contemplando los registros obtenidos por las tres direcciones, se trabajó con un total aproximado de 500 registros sísmicos.

El análisis consistió en obtener el factor de amplificación relativo a partir de los cocientes espectrales entre la estación y la estación de referencia, utilizando 16 telesismos, cuyas características se mencionaron anteriormente. Para ello, se hizo uso de la onda P y en algunos casos la onda S, para esta última, se muestra un ejemplo. El rango analizado va de 0.1 a 1 Hz, ya que a frecuencias mayores que 1 Hz la relación señal/ruido para la señal telesísmica es claramente mayor que la del ruido.

Los cocientes espectrales determinaron qué zonas del Valle de México tienen mayor amplificación de las ondas sísmicas. Se observa que las zonas que amplifican más el movimiento del terreno corresponden a la zona de lago, por

ejemplo, las estaciones VRVM (Venustiano Carranza), ICVM (Iztacalco), TXVM (Texcoco), VCVN (Valle de Chalco) se encuentran en esta zona y presentan las mayores amplificaciones. De los eventos estudiados, la estación VRVM muestra las máximas amplificaciones, en el componente este, el evento 14 (proveniente de Louise Island, Canadá) presenta una amplificación máxima de 100 veces en 0.7 Hz. En el componente norte, tiene un valor de amplificación máxima de 50 veces en 0.75 Hz, esto para el evento 3 (proveniente de Japón). Para la dirección vertical, la amplificación es de 55 veces en 0.8 Hz y corresponde al evento 18 (proveniente del SE de Irán). Por otro lado, las estaciones que tienen menor amplificación corresponden con la denominada zona de lomas y las estaciones que obtuvieron las menores amplificaciones son AZVM (Atizapán) y TOVM (Toluca), con amplificaciones máximas de 5 veces. También se observó que la influencia azimutal en las amplificaciones sísmicas es nula y que la profundidad del evento tampoco influye en la magnitud de la amplificación, esto se muestra en las gráficas de los cocientes espectrales para los eventos 4 y 6, en donde la única diferencia importante es la profundidad de dichos eventos.

Nuestros resultados están en concordancia con estudios anteriores (p.e. Singh et al. (1988,1995); Ordaz y Singh (1992); Chávez-García et al. (1995)) ya que los valores de amplificación para la zona de lago se encuentran en el rango obtenido para este estudio. Para la realización de este trabajo, se han utilizado sensores de banda ancha, lo que ha permitido registrar eventos telesísmico con magnitud mínima de 7, por lo que a medida que se cuente con más registros con características similares, se podrá agregar esta nueva información, lo que permitirá el mejor entendimiento de la zona del Valle de México y posibilitará que los estudios realizados sean mejorados.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	10
2.1. Efectos de amplificación regional	10
2.2. Marco geológico	13
2.3. Estudios previos	16
3. MARCO TEÓRICO.....	21
3.1. Series de Fourier	21
3.2. La Integral de Fourier.....	23
3.3. Respuesta de instrumento	27
3.4. Cocientes espectrales	31
4. DATOS Y METODOLOGÍA	34
4.1. Red Sismológica del Valle de México	34
4.1.1. Sensores Guralp.....	36
4.1.2. Sensores RefTek.....	38
4.2. Obtención de datos	43
4.3. Procesamiento de datos.....	54
4.3.1. Eliminación de la respuesta del instrumento.....	54
4.3.2. Obtención de los cocientes espectrales	57
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS	63
5.1. Eventos con acimut SE	67
5.2. Eventos con acimut NW	77
5.3. Eventos con acimut NE	81
5.4. Eventos con acimut SW	81
5.5. Discusión de las amplificaciones observadas.....	83
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	88

ANEXO.....	91
A - Eventos con Acimut SE.....	91
A.1. Evento 1.....	91
A.2. Evento 2.....	93
A.3. Evento 5.....	95
A.4. Evento 12.	97
A.5. Evento 13.	99
A.6. Evento 15.	101
B. Eventos con Acimut NW.....	103
B.1. Evento 3.....	103
B.2. Evento 9.....	105
B.3. Evento 10.	107
B.4. Evento 14.	109
B.5. Evento 16.	111
B.6. Evento 19.	113
C. Eventos con Acimut NE.....	115
C.1. Evento 7.	115
C.2. Evento 18.	117
D. Eventos con Acimut SW.....	119
D.1. Evento 4.	119
D.2. Evento 6.	121

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se lleva a cabo en la denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en donde existen un total de 21,020 escuelas desde Preescolar hasta Bachillerato, correspondientes al ~8.5% del total nacional, también se encuentran en ella ~1,540 unidades médicas (INEGI, 2014). Según los resultados del censo elaborado por el INEGI en el año 2010, en esta zona se concentraban aproximadamente 20 millones de habitantes. Aquí se genera el 27.2% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (POZMVM, 2012), por lo que un temblor con características importantes, como los de 1985, podrían ocasionar un daño muy grande a la ZMVM.

En la región de estudio, anteriormente se encontraba el Lago de Texcoco, ésta ha sido dividida en tres regiones generales: la zona de lago, la de transición y la de lomas (Singh et al., 1988). Los suelos de la ZMVM se componen de sedimentos lacustres a rocosos. La evaluación de los suelos blandos es importante ya que los sismos pueden generar amplitudes más grandes que en las zonas rocosas y un sismo de magnitud mayor puede causar problemas graves tanto a edificios como a la población en general. Entonces, es necesario conocer la respuesta del subsuelo a frecuencias específicas de las ondas sísmicas que puedan causar un daño mucho mayor a la infraestructura.

La ZMVM puede ser afectada severamente debido a sismos originados en la zona de subducción del Pacífico Mexicano a más de 300 km de distancia. El ejemplo más claro que se presenta es el sismo de Michoacán ocurrido el 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$) (Singh et al., 1988). Las consecuencias de este sismo fueron muy grandes, tanto en pérdida de vidas humanas (con cifras reportadas que varían de 2,831 a 15,000 Archundia, 2011), como en los daños a muchos edificios (2,831 inmuebles, con un costo de daños materiales de ~4,100 MDD; CENAPRED, 2015).

El sismo del 19 de septiembre de 1985 fue un motivo para que diversos grupos de investigadores (Singh et al., 1988; Ordaz y Singh, 1992; Chávez-García et al., 1995) decidieran evaluar el comportamiento del suelo de la ZMVM, para finalmente, poder llegar a entender los factores que influyeron en este evento. Estos investigadores pudieron observar dos fenómenos de características inusuales: la amplificación del movimiento sísmico y el incremento en la duración del evento.

Estudios posteriores al sismo de Michoacán de 1985 mostraron que otros factores habían contribuido a las grandes amplitudes del movimiento del terreno. Uno de estos factores, resultando ser significativo, se le conoce como *amplificación regional* (Singh et al., 1988; Ordaz y Singh, 1992; Chávez-García et al., 1995; Cárdenas-Soto et al., 1997; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003).

La amplificación regional es el movimiento sísmico para sitios clasificados como firmes en el Valle de México, respecto a sitios en roca con la misma distancia epicentral pero con trayectorias perpendiculares a la costa (Singh et al., 1988,1995).

En años recientes, la red del Valle de México, compuesta de sensores verticales de período corto, fue sustituida por sensores sísmicos triaxiales de banda ancha. Un proyecto para evaluar la sismicidad dentro de la Ciudad de México permitió la instalación de 16 sismómetros también triaxiales y de banda ancha en cada una de las delegaciones políticas de la Cd. de México. Estas redes con 30 sensores sísmicos de banda ancha cubren una región aproximada de 100 × 130 km.

Los sensores han permitido el registro de telesismos a distancias de entre 974 y 17,000 km, y con un rango de magnitudes de 7 hasta 9. Estos telesismos contienen información tanto de la estructura como de la tectónica de la tierra debajo de la red de estaciones (Aki et al., 1976). Los registros sísmicos son

ricos en ondas de periodos largos, que frecuentemente no eran registrados en esta región del Valle de México y ahora se cuentan con 30 sensores de banda ancha distribuidos en esta región.

El propósito de esta tesis es usar los arribos de las ondas P y S para obtener cocientes espectrales de estaciones en terreno blando y terreno duro, con el fin de evaluar efectos de amplificación en periodos largos y compararlos con los resultados de estudios anteriores, haciendo uso de la técnica de razón espectral estándar (S.S.R. por sus siglas en inglés). Se pretende también observar la influencia del acimut en las amplificaciones sísmicas.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Efectos de amplificación regional

La amplificación regional es el movimiento sísmico para sitios clasificados como firmes en el Valle de México, respecto a sitios en roca con la misma distancia epicentral pero con trayectorias perpendiculares a la costa (Singh et al., 1998, 1995).

Singh et al. (1988) mostraron evidencia de esta amplificación, presente inclusive en sitios de roca. Ordaz y Singh (1992), a partir del análisis de datos de movimientos fuertes, indicaron la presencia de amplificación en estaciones del centro del país. Mostraron que en la banda de 1 a 3 s, el movimiento del terreno firme está amplificado por un factor de más de 10, relativo a la misma distancia pero en una trayectoria paralela a la costa. Esta amplificación no puede atribuirse a efectos de sitio, debido a que las estaciones empleadas en el análisis se encuentran localizadas sobre roca. Ordaz y Singh (1992) sugieren que esta amplificación se podría deber a la existencia de grandes valles sedimentarios.

Chávez-García et al. (1995) mostraron que la Faja Volcánica Transmexicana genera trenes de ondas superficiales que causan la larga duración sísmica del movimiento en el Valle de México, el cual resultaba de la interacción de las ondas guiadas por la estructura profunda de la cuenca con una resonancia 1D de las capas superficiales.

Por otro lado, Furumura y Kennett (1988), mediante un modelo numérico, propusieron que la amplificación y duración del movimiento en la región central de México se produce por la propagación eficiente de ondas Lg.

Cárdenas-Soto et al. (1997) determinaron la región geográfica donde la amplificación ocurre y presentaron modelos que relacionan la amplificación regional con la estructura cortical irregular entre la costa y centro del país.

Cárdenas-Soto y Chávez-García (2003), mediante los registros de 19 sismos obtenidos de siete sensores de banda ancha, mostraron que la amplificación regional afecta una gran área del centro de México.

Se define al efecto de sitio como la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional; es decir, es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica con la distancia (CENAPRED, 2015).

A diferencia de la amplificación regional (en donde se observan amplificaciones importantes en sitios considerados de roca dura), los efectos de sitio de gran amplificación en la zona del lago de la Ciudad de México se identifican como la causa más importante de los daños sufridos en esa región de la ciudad.

En la Figura 2.1 se ejemplifica este efecto, se observa que para un suelo firme las amplificaciones son más pequeñas comparadas con los efectos que tienen las ondas sísmicas en un suelo blando.

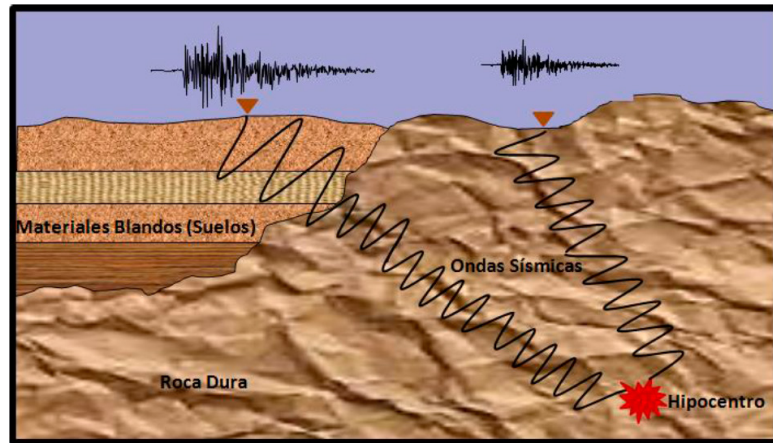


Figura 2.1 Efectos de las amplificaciones de las ondas sísmicas que muestra el efecto de sitio en suelo firme y en suelo blando (Tomado de Valle Orozco, 2013).

En la Figura 2.2 se muestra el evento 5 (ver Tabla 4.3). Se puede observar el efecto en las zonas de suelo firme y de suelo blando. En el caso de la Ciudad de México se observa en la Figura 2.2a la zona de lomas, 2.2b y 2.2c la zona de transición y 2.2d la zona de lago. El registro mostrado es de tres minutos 20 segundos y corresponde al componente vertical. Para la ventana del área sombreada, de la onda de cuerpo, se tienen las siguientes amplitudes pico a pico en m/s: PTVM (Pico Tres Padres $4.6e-5$); APVM (Azcapotzalco $7.35e-5$); XCVM (Xochimilco $7.3e-5$); BJVM (Benito Juárez $8.7e-5$).

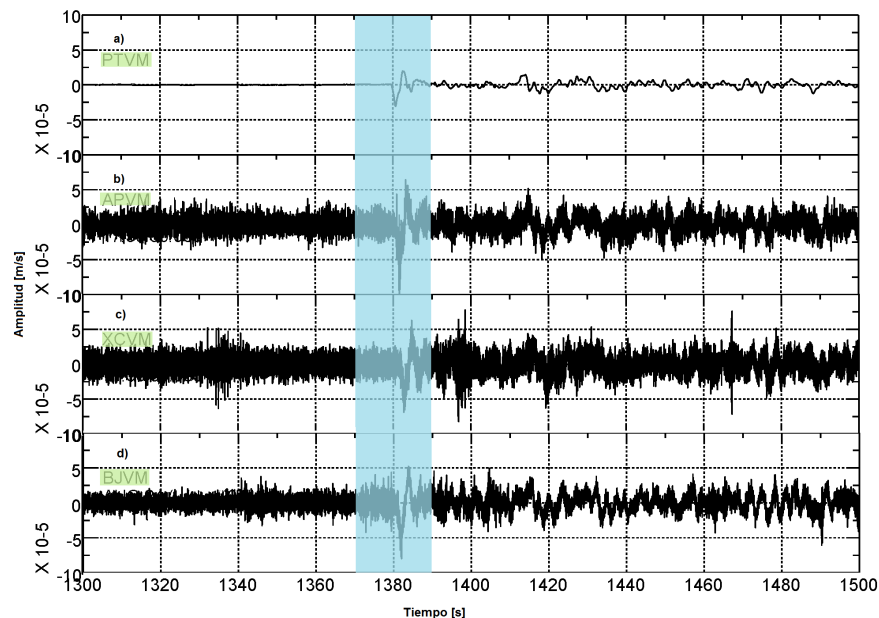


Figura 2.2. Efectos de amplificación para el evento 5 (24/08/2011). Se muestra a) zona de lomas, b) y c) zona de transición, d) zona de lago. Se observa una ventana de 20 segundos (en color azul), la cual muestra el primer arribo de la onda de cuerpo. Se tienen las siguientes amplitudes pico a pico en m/s: PTVM (Pico Tres Padres $4.6e-5$); APVM (Azcapotzalco $7.35e-5$); XCVM (Xochimilco $7.3e-5$); BJVM (Benito Juárez $8.7e-5$).

2.2. Marco geológico

El Valle de México se ubica en la región de lagos y volcanes del Anáhuac de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Trans Mexicana. El valle está rodeado por las sierras de Monte Alto, Monte Bajo, Las Cruces, Pachuca, así como la Sierra Nevada y la serranía del Chichinauhtzin (Figura 2.3).

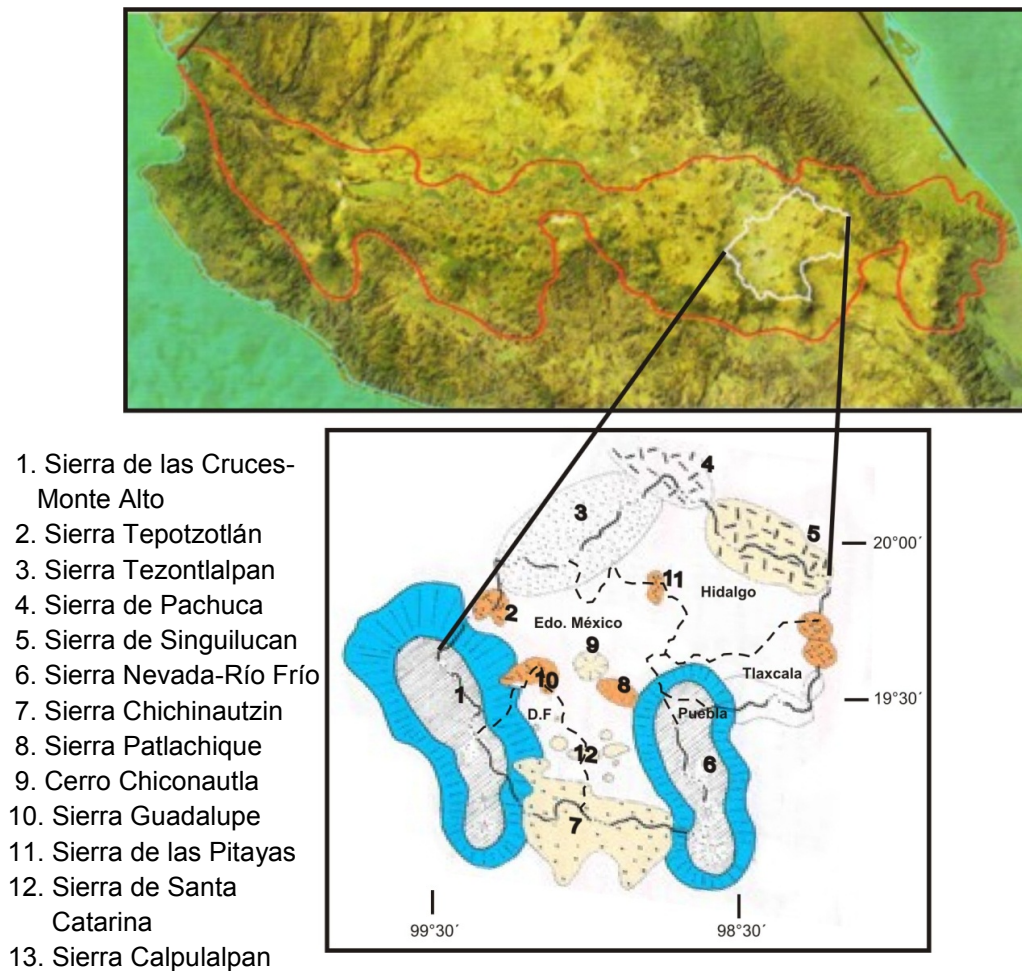


Figura 2.3 Localización del Valle de México (Modificado de Mooser et al., 1996)

La Cuenca de México es endorreica y pertenece a las planicies escalonadas que forman parte del Arco Volcánico Trans-Americano (AVT), es una extensa altiplanicie lacustre con altitud promedio de 2240 m.s.n.m. y se encuentra rodeada por sierras volcánicas y por abanicos y llanuras aluviales (Vázquez Sánchez et al., 1989).

La Figura 2.4 superior muestra la sección A (N-S), la cual va desde el Mezquital hasta el Tepozteco (Santoyo et al., 2005), a lo largo de unos 150 km; en el norte domina la tectónica del Arco Tarasco, en el sur la del Arco Chichinautzin. Esta última caracterizada por los hundimientos más pronunciados.

En la Figura 2.4 inferior (Santoyo et al., 2005) se muestra la sección B (W-E) debajo de la ciudad, que se extiende desde la Sierra de las Cruces hasta el Cerro Telapón. El fracturamiento tectónico observado en esta sección es intenso.

La Figura 2.5 muestra de manera gráfica tridimensional casi todo lo esencial de la cuenca. En ella se muestra desde el Chichinautzin hasta la Sierra de Pachuca, desde la Sierra de las Cruces hasta la Sierra Nevada y Sierra Río Frío. Se puede observar en ella los Arcos Tarasco y Chichinautzin, también se puede observar la planicie aluvial y la zona lacustre de la cuenca (Santoyo et al., 2005).

Por la complicada diversidad estructural se define a la elevada sierra como la Fosa Compleja del Chichinautzin (Santoyo et al., 2005). Su falla tectónica de mayor longitud, parece ser la de Santa Catarina; se extiende desde el oriente de la caldera, situada entre el Telapón y Tlaloc, hasta el poniente del Nevado de Toluca. Cubre una distancia aproximada de 140 km, lo cual lo hace un magnífico conducto para magmas profundos. De acuerdo a Campillo et al., (1996) su longitud mide tres veces el espesor de la corteza terrestre (~45 km).

En la Figura 2.6 se muestra una sección de la secuencia estratigráfica para las arcillas y el relleno aluvial debajo de la Ciudad de México. Se trata de: a) arcillas superiores, b) capa dura, c) arcillas inferiores consolidadas y d) depósitos profundos (Santoyo et al., 2005).

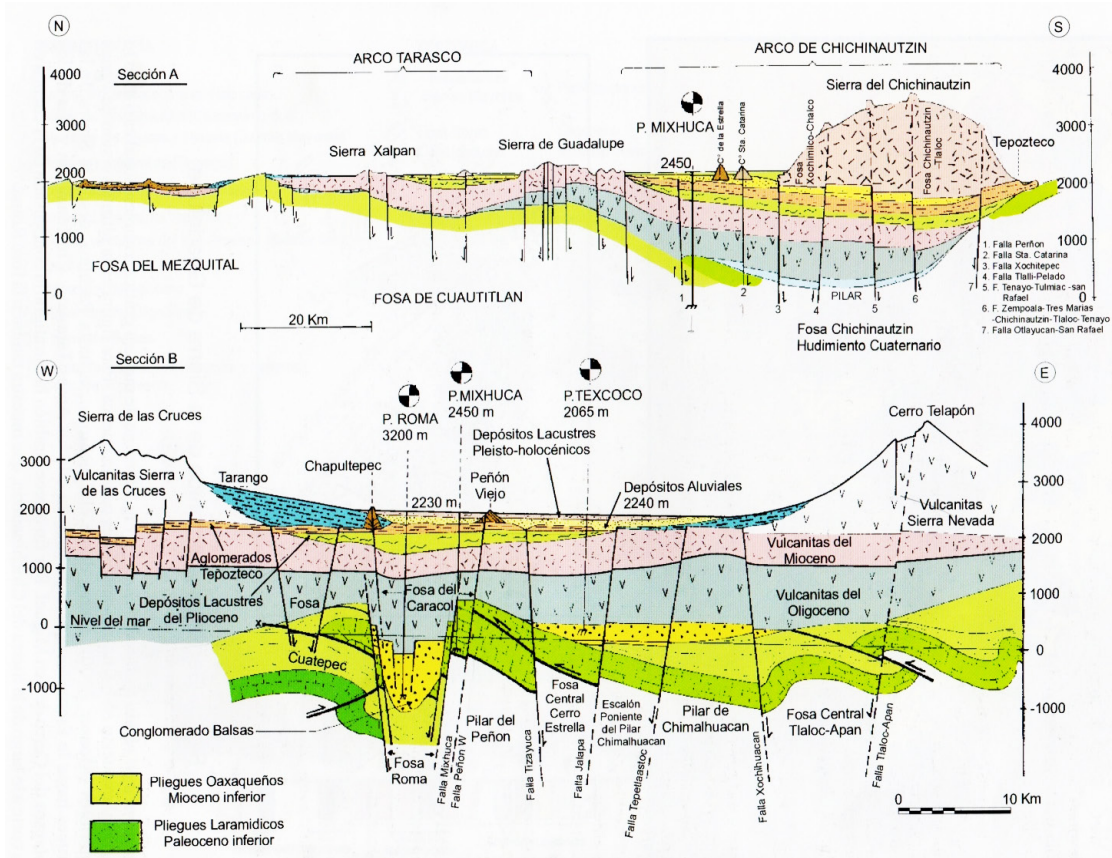


Figura 2.4 Secciones geológicas de la Cuenca (Figura tomada de Mooser et al., 1996)

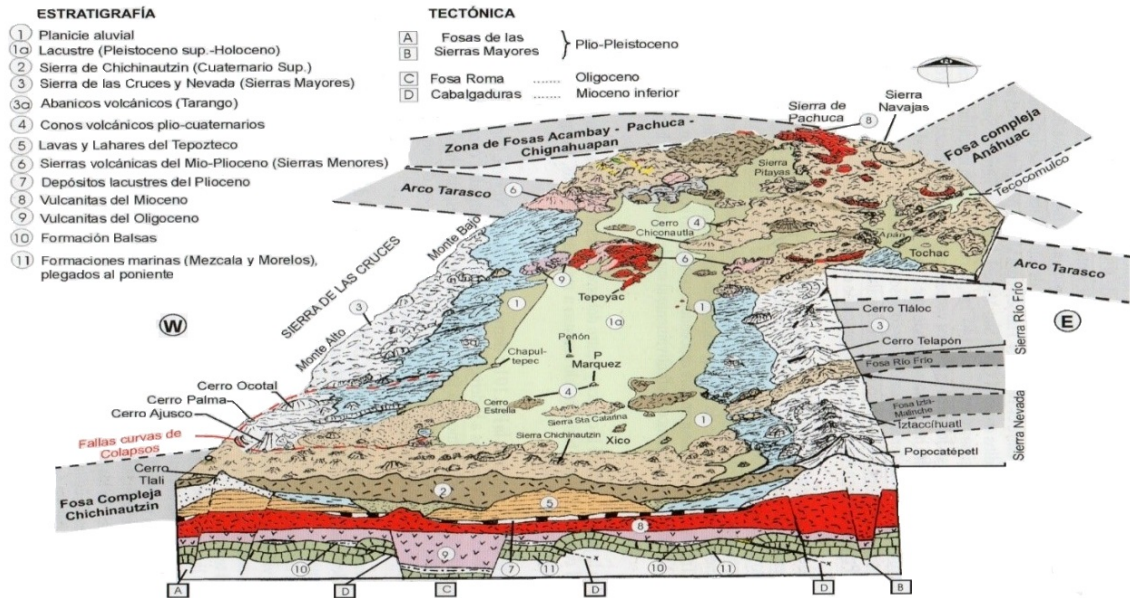


Figura 2.5 Geología y morfología de la Cuenca (Figura tomada de Mooser et al., 1996)

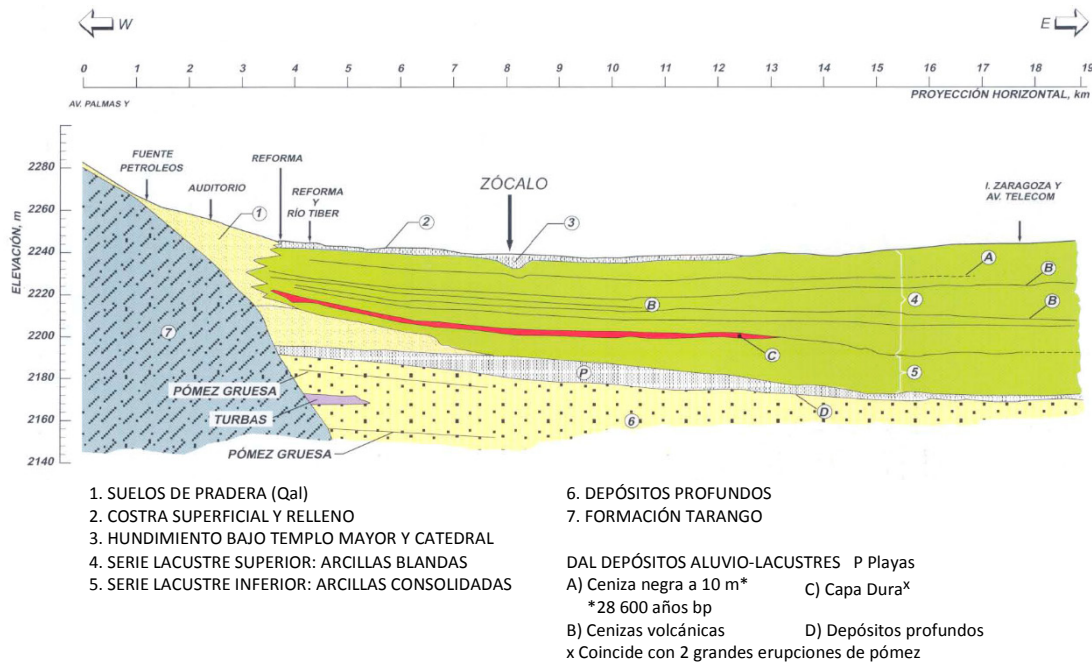


Figura 2.6 Secuencia pleistocénica debajo de la Ciudad de México (Figura tomada de Mooser et al., 1996)

2.3. Estudios previos

Para propósitos de códigos de construcción, el subsuelo de la Ciudad de México ha sido dividido en tres zonas: la zona de lago, la cual consiste en depósitos de 10 a 80 m de arcillas altamente compresibles, con alto contenido de agua sustentado por arenas resistentes; la zona de lomas, básicamente formada por una capa superficial de flujos de lavas o tobas volcánicas; y la zona de transición, compuesta de arenas aluviales y capas limosas con intervalos ocasionales de capas arcillosas (Singh et al., 1988).

Singh et al. (1988) utilizaron el análisis de los datos de movimientos fuertes registrados en la Ciudad de México. Estos registros muestran que el movimiento del suelo en la zona de lago es amplificado de 8 a 50 veces con respecto a la zona de lomas en Ciudad Universitaria. Obtuvieron que la

frecuencia en la cual la máxima amplificación relativa ocurre varía de sitio a sitio y se encuentra entre 0.2 y 0.7 Hz. Sugirieron que la energía cercana a 0.5 Hz fue responsable por el daño a la ciudad.

Ordaz y Singh (1992) utilizaron el análisis de cociente espectral para definir los efectos de amplificación en la zona de lomas de la Ciudad de México. Sus resultados muestran que, en la zona de lomas, las amplitudes espectrales son casi 10 veces más grandes que lo esperado para sitios afuera de la Ciudad de México a distancias hipocentrales similares. Esto implica que la zona de lago sea amplificado por un factor de 100 a 500 en algunas frecuencias entre 0.2 y 0.7 Hz. Los autores llegaron a la conclusión de que es debido a una estructura geológica de gran escala de depósitos arcillosos depositados entre el Oligoceno tardío y el Plioceno.

Lermo & Chávez-García (1993) seleccionaron para su estudio cinco estaciones sísmicas, tres para la zona de lago, una para la zona de transición y una más como estación de referencia en la zona de lomas. Concluyeron que grandes amplificaciones del movimiento del suelo se debe a una capa delgada y extremadamente blanda de arcilla, la cual alcanzó un factor de amplificación de 50 en algunas frecuencias, esto durante el gran sismo de Michoacán de 1985.

Pérez-Campos (1996) concluyó que bajo el Valle de México existe una estructura cortical somera compleja, la cual afecta la transmisión de las ondas sísmicas de manera acimutal. El rango estudiado y en donde se observó este comportamiento es de 2 a 10 Hz.

Martínez et al. (2011) evaluaron el cambio de los periodos fundamentales de vibración del suelo por efecto del hundimiento regional en la zona lacustre de la Cuenca de México en los últimos 20 años. Concluyeron que se presenta un cambio en la geometría de la curva 0.5 s para la zona comprendida entre el

cerro de la Estrella y Ciudad Universitaria, comprobaron cuál es la variación de periodo dominante, observaron que en la zona de lomas no varía, en la zona de transición existe una variación de 0.1 a 0.2 s, mientras que en la zona de lago se presenta una variación mayor a los 0.3 s, llegando en algunos sitios hasta 0.9 s.

Jaramillo et al. (2012) realizaron mediciones de microtemores en la zona noroeste del Estado de México con el fin de estimar la respuesta de sitio. Utilizaron en su estudio la técnica de cocientes espectrales H/V. Obtuvieron una primera frecuencia característica que varía desde 1.23 hasta 1.41 Hz. Esta frecuencia la atribuyen al contraste de velocidades de cizalla entre la capa deformable y el basamento. La segunda frecuencia observada varía de 1.8 a 10 Hz, indicando que hay un contraste de velocidades solamente entre las capas deformables muy superficiales.

En la Figura 2.7 se muestra un mapa de zonificación para diseño por sismo para el Distrito Federal, realizado por Martínez et al. (2011). Se mencionan a continuación los principales cambios observados (respecto a las normas técnicas complementarias para diseño por sismo de 1990) por los autores: en el mapa de zonificación se observa que la curva de 4 s prácticamente ha desaparecido; la curva de periodo 1.0 s ha sufrido un cambio en su forma al noroeste de la ciudad y en la zona del paleovalle de Culhuacán verificaron que pertenecen a zona IIIa; la zona IIIb presenta un cambio en su extensión en la parte central; las zonas IIIc y IIId disminuyeron notablemente.

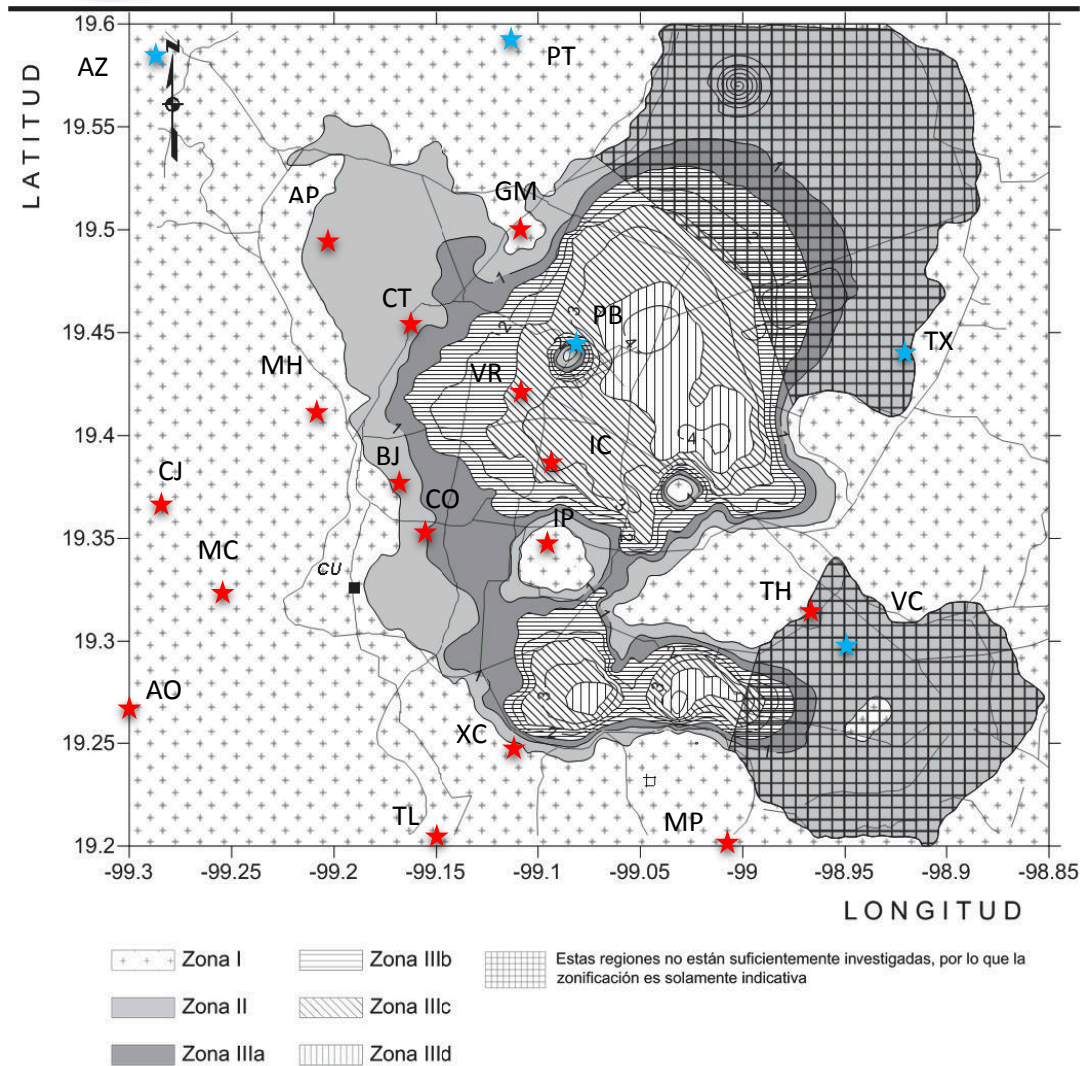


Figura 2.7 Mapa de zonificación para diseño por sismo para el Distrito Federal. Las estrellas en color rojo representan las estaciones pertenecientes a la Red Delegacional del Distrito Federal y las de color azul, a la Red del Valle de México (modificado de Martínez et al., 2011).

En el presente trabajo se utilizaron sensores de banda ancha, lo cual nos permite ver la señal sísmica en un rango más amplio de frecuencias o periodos. En las figuras 2.8 y 2.9 se puede observar la diferencia entre un telesismo y un sismo local. Un telesismo tiene una duración mucho mayor a un sismo local (dependiendo de la magnitud del evento), también se pueden observar las distintas fases del telesismo (por ejemplo, P, S, Pdif, Sdif, pP, PP, PcP, ScP, SKS, SS, etc.). Las ondas superficiales llegan a tener duraciones de más de 20 s, lo cual nos indica que las ondas sísmicas atravesaron

estructuras corticales muy grandes. En un registro local se pueden observar algunas fases como la P, S, Pn, Sn, pP, sP.

La Figura 2.8 muestra un sismo registrado el 06/02/2013. El sismo se ubica al sur-este de las Islas Salomón, al Noreste de Australia, con una magnitud M_w 8. Este evento se registró en la estación Álvaro Obregón en la Ciudad de México, fue registrado por la Red Sismológica del Valle de México, la cual está bajo el cargo del SSN.

El sismo de la Figura 2.9 se registró el 14/04/1995. El sismo se ubica en Taxco-Iguala, Guerrero y tuvo una magnitud de 3.7.

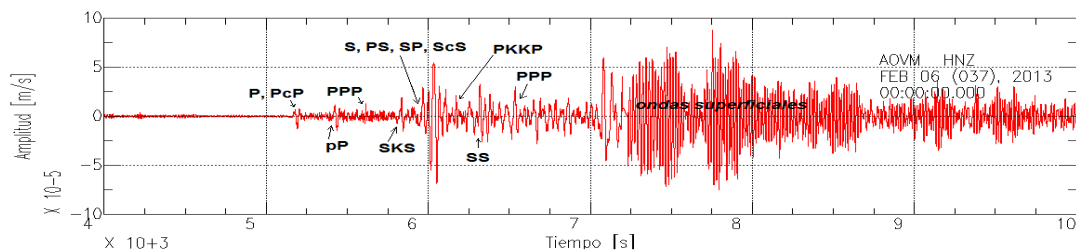


Figura 2.8 Sismograma de un telesismo con registro de más de una hora, registrado el 06/02/2013. Se observan algunas fases del telesismo (Ubicados con ayuda del software Taup Toolkit).

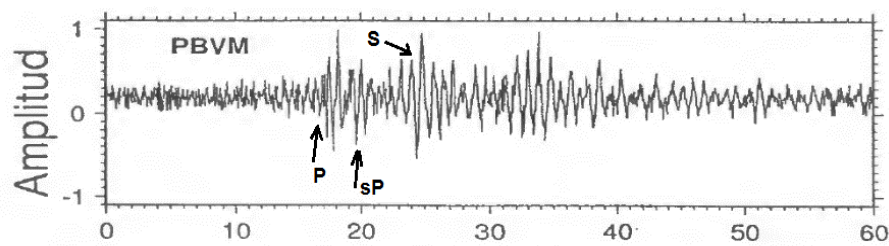


Figura 2.9 Sismograma del sismo del 14/04/1995, con un registro de 60 segundos. Se observan las principales fases del evento local (Modificado de Pérez-Campos, 1996).

3. MARCO TEÓRICO

El trabajar en el dominio de las frecuencias ofrece grandes ventajas para el análisis de señales sísmicas, ya que los cálculos se vuelven más sencillos, en este caso, el poder realizar la división de una señal sísmica con otra. En este trabajo se pretende utilizar la transformada de Fourier para el análisis de cocientes espectrales.

3.1. Series de Fourier

De acuerdo con el teorema de Fourier, cualquier función $f(t)$, que satisfaga ciertas restricciones, puede ser expresada como una suma de un número infinito de términos sinusoidales. En 1829 Dirichlet formuló restricciones bajo los cuales el teorema es válido, éstas se pueden resumir como sigue (Bäth, 1974):

- 1) $f(t)$ debe ser periódica; es decir, $f(t) = f(t + T)$, donde T es el periodo y se define como $T = 2\pi$. Si $f(t)$ no es periódica, pero está definida en un rango finito, la suma de los términos sinusoidales convergerá a $f(t)$ en el rango definido. Fuera de éste, la suma representará repeticiones de $f(t)$.
- 2) $f(t)$ debe ser al menos continua por intervalos, con un número finito de discontinuidades y saltos.
- 3) $f(t)$ debe tener un número finito de máximos y mínimos.
- 4) La integral $\int_{-T/2}^{T/2} f(t)dt$ debe converger. Otra forma común de expresar esta condición es que la integral $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|dt$ debe ser finita, donde $|f(t)|$ es el valor absoluto de $f(t)$.

Fejér demostró en 1904 que el teorema de Fourier es válido para una clase más amplia de funciones, demostrando que el único requisito es que $f(t)$ sea integrable. Sin embargo, esta extensión es más que nada un interés

puramente matemático ya que puede no tener un significado físico. Todas las funciones encontradas en el mundo físico cumplen con las condiciones más restrictivas de Dirichlet (Bäth, 1974)

De acuerdo con el teorema de Fourier, una función $f(t)$ con un periodo fundamental T y que satisfaga las condiciones de Dirichlet, puede ser expresado por la siguiente serie infinita de Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right),$$

3.1-1

en donde a_0 , a_n y b_n son constantes:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt,$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin \frac{2n\pi t}{T} dt.$$

Se puede probar que los coeficientes a_n y b_n convergen a cero conforme n crece a infinito, siempre que $f(t)$ sea integrable.

Los coeficientes a_n y b_n son llamados *coeficiente de Fourier* y su cálculo es llamado *análisis de Fourier o análisis armónico*, más específicamente *análisis de forma de onda*.

3.2. La Integral de Fourier

La integral de Fourier está definida por la expresión

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt.$$

3.2-1

Si la integral existe para cada valor del parámetro f , entonces la Ecuación 3.2.1 define $H(f)$, la transformada de Fourier de $h(t)$. Típicamente, $h(t)$ se denomina una función de la variable tiempo y $H(f)$ es denominado una función de la variable frecuencia. Se usa la siguiente terminología: t es el tiempo y f es la frecuencia. (Brigham, 1974)

En general, la transformada de Fourier es una cantidad compleja:

$$H(f) = R(f) + jI(f) = |H(f)|e^{j\theta(f)},$$

3.2-2

en donde

$R(f)$ es la parte real de la transformada de Fourier;

$I(f)$ es la parte imaginaria de la transformada de Fourier;

$|H(f)|$ es la amplitud o el espectro de Fourier de $h(t)$ y está dado por

$$\sqrt{R^2(f) + I^2(f)}.$$

$\theta(f)$ es el ángulo de fase de la transformada de Fourier y está dada por

$$\tan^{-1}[I(f)/R(f)].$$

La transformada inversa de Fourier está definida como

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{j2\pi ft} df.$$

3.2-3

La Ecuación 3.2.3 permite la determinación de una función en tiempo a partir de la transformada de Fourier. Si las funciones $h(t)$ y $H(f)$ están relacionadas por las ecuaciones 3.2.1 y 3.2.3, las dos funciones son denominadas un par de transformada de Fourier, y se indica la relación por la notación

$$h(t) \quad \Leftrightarrow \quad H(f)$$

Las condiciones para la existencia de la integral de Fourier siguen la realizada por (Papoulis, 1975):

1.- Si $h(t)$ es integrable en el sentido que

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt < \infty,$$

3.2-4

entonces la transformada de Fourier $H(f)$ existe y satisface la transformada inversa de Fourier.

Es necesario hacer notar que la condición 1 es una condición suficiente pero no necesaria para la existencia de la transformada de Fourier. Hay funciones que no satisfacen la condición 1 pero tienen una transformada que satisface la Ecuación 3.2.3.

2.- Si $h(t) = \beta(t)\sin(2\pi ft + \alpha)$, donde f y α son constantes arbitrarias, si $\beta(t+k) < \beta(t)$ y si para $|t| > \lambda > 0$, la función $h(t)/t$ es absolutamente integrable en el sentido de la Ecuación 3.2.4, por lo que $H(f)$ existe y satisface la transformada inversa de Fourier.

3.- Aunque no está indicado específicamente, todas las funciones para las cuales las condiciones 1 y 2 se mantienen, se asume que son de variación acotada; esto es, pueden ser representadas por una curva de altura finita y un intervalo de tiempo finito.

Una característica importante de la transformada directa y de la transformada inversa es que sus dimensiones son diferentes. Por ejemplo, si $f(t)$ es un sismograma que tiene dimensiones de desplazamiento, su transformada $F(\omega)$ tiene las dimensiones de desplazamiento multiplicado por el tiempo. Por lo tanto, si $f(t)$ da el movimiento del suelo en centímetros, $F(\omega)$ nos da la transformada del movimiento del suelo en centímetros-segundos (Steinn 1991).

En la Figura 3.1 se muestra un sismograma (componente vertical) en el dominio del tiempo y en la Figura 3.2 en el dominio de la frecuencia. El sismograma fue registrado en la estación Álvaro Obregón en la Ciudad de México. El sismo ocurrió al sur de Guatemala y tuvo una magnitud Mw 7.4.

Una de las ventajas que ofrece la transformada de Fourier es el poder eliminar la respuesta del instrumento, esto se realiza de una forma más fácil en el dominio de las frecuencias. La eliminación de la respuesta del instrumento (Sección 4.3.1) fue realizada debido a que los sensores utilizados en este trabajo corresponden a dos sensores diferentes; uno correspondiente al sensor Guralp CMG-6TD, y el otro correspondiente al sensor Reftek 151-60A.

En el dominio del tiempo es necesario hacer una deconvolución para eliminar dicha respuesta, en cambio, en el dominio de la frecuencia solo se realiza una división. Se observa en la Figura 3.2 que la frecuencia máxima que se obtiene es la Frecuencia de Nyquist, definida como $f_N = \frac{1}{2\Delta t}$ [Hz], en donde Δt es el intervalo de muestreo. Para nuestro caso el $\Delta t = 0.01$, el cual equivale a 100 muestras por segundo, por lo tanto, se obtiene una f_N de 50 [Hz].

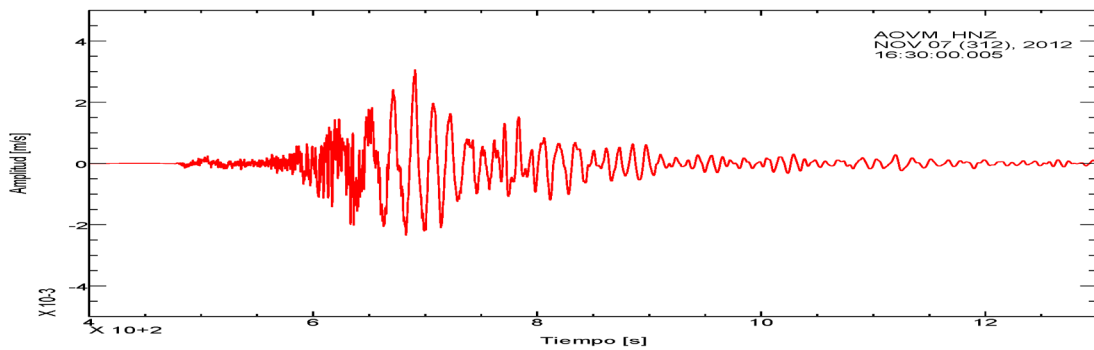


Figura 3.1 Sismograma para el sismo del 07/11/2012, registrado por el componente Z de la estación AOVM (Álvaro Obregón). Se muestran 15 minutos de señal, el eje horizontal está en segundos y empiezan en 400 s.

Para la transformada de Fourier se eligieron ventanas de veinte segundos (ver sección 4.3.2), esto con el fin de poder observar el primer arribo de la onda de cuerpo. Se eligió la ventana de tal forma que el programa rellenara con el menor número de ceros. Dado que el $dt = 0.01$, para una ventana de 20 s (2000 muestras) se agregan 48 ceros, de esta manera se cumple con la restricción 2^n de la transformada de Fourier.

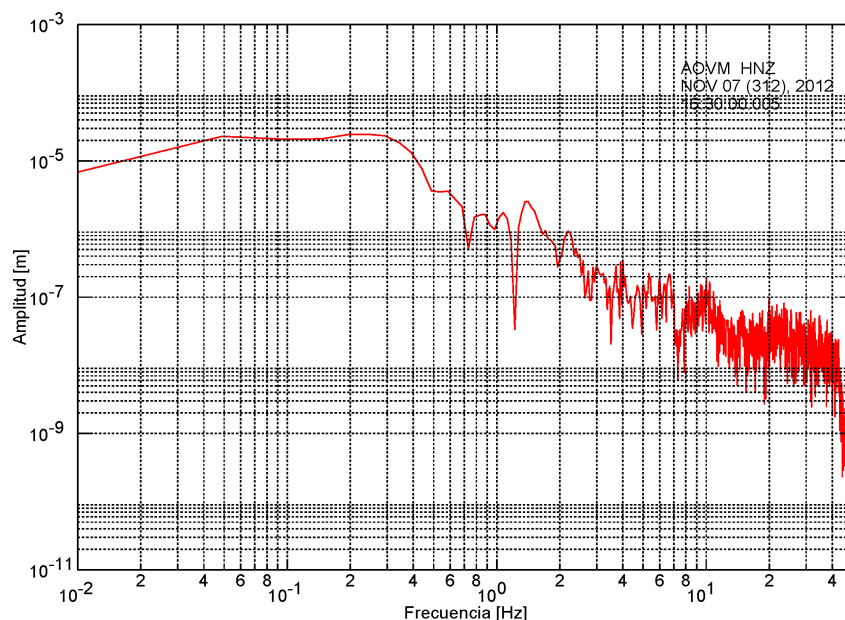


Figura 3.2 Espectro de Amplitud para el sismo del 07/11/2012. El eje horizontal muestra las frecuencias y el vertical, la amplitud.

Se observa en la Figura 3.2 un espectro de amplitud con altas frecuencias (el espectro de amplitud corresponde a una ventana de 20 s del primer arribo del componente vertical, mostrado en la Figura 3.1), especialmente para frecuencias mayores a 5 Hz, estas altas frecuencias probablemente se deben al ruido local. Dado que se quiere mostrar el contenido total de frecuencias del sismograma, el espectro de amplitud que se muestra en la figura no se le aplicó ningún tipo de filtro.

3.3. Respuesta de instrumento

Un dispositivo que detecta el movimiento de las ondas sísmicas es llamado *sismómetro*; el paquete completo del instrumento, incluyendo los registradores, es llamado sismógrafo. El tipo de sismógrafo más común está basado en la inercia de una masa suspendida, la cual tenderá a permanecer estacionaria en respuesta a vibraciones externas (Shearer, 2009).

En la Figura 3.3 se muestra un sismómetro simple, el cual mide el movimiento vertical. El movimiento del imán suspendido induce un voltaje en la espira; la señal es después amplificada y registrada.

Las señales registradas, ya sean análogas o digitales, raramente nos da el movimiento real del suelo, incluso usando un factor de escala constante. Los sensores de velocidad nos darán una salida proporcional a la velocidad para frecuencias arriba de la frecuencia natural del instrumento; sin embargo, debajo de la frecuencia natural, no existe una relación tan simple. Además, los sismólogos generalmente quieren medir el desplazamiento del suelo y una tarea muy importante es, por lo tanto, recuperar el desplazamiento del suelo a partir de una señal dada. Esto es la llamada corrección por instrumento (Havskov y Alguacil, 2010).

Para un instrumento dado, la función de respuesta en frecuencia de la amplitud, puede ser determinada tal que, para un desplazamiento armónico del suelo $U(\omega)$, la salida $Z(\omega)$ puede ser calculada como,

$$Z(\omega) = U(\omega)A_d(\omega),$$

3.3-1

en donde $Z(\omega)$ puede ser la amplitud de un sismógrafo mecánico, voltaje de salida de un sismómetro o amplificador o cuentas de un sistema digital, y $A_d(\omega)$ es la respuesta en amplitud del desplazamiento. Con el fin de recuperar el desplazamiento, $U(\omega)$ puede ser simplemente calculado como

$$U(\omega) = Z(\omega)/A_d(\omega).$$

3.3-2

Similarmente, si queremos determinar la velocidad del suelo, obtendríamos

$$\dot{U}(\omega) = Z(\omega)/A_v(\omega),$$

3.3-3

en donde A_v es la respuesta en amplitud de la velocidad.

La función de transferencia del sensor puede ser expresado en una forma factorizada.

$$A(\omega) = \frac{\prod_{n=1}^N (i\omega - z_n)}{\prod_{m=1}^M (i\omega - p_m)},$$

3.3-4

en donde z_n son las raíces del polinomio del numerador, dando los ceros de la función de transferencia, y p_m son las raíces del polinomio del denominador dando los polos de la función de transferencia.

Para poder remover la respuesta de instrumento fue necesario crear los archivos de polos y ceros, también se calculó la constante de normalización A_0 (para más detalles, ver el documento de Brisbane y Horleston, 2007), necesaria para poder convertir las unidades de cuentas a unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración. El formato utilizado en este trabajo se muestra a continuación. Los archivos de polos y ceros, fueron proporcionados por Víctor Hugo Espíndola Castro¹, los cuales fueron realizados por Bella-Segura (2013).

```
ZEROS 2
0.000000E+00 0.000000E+00
0.000000E+00 0.000000E+00
POLES 4
-0.07405 +0.07405
-0.07405 -0.07405
-222.11 +222.11
-222.11 -222.11
CONSTANT 8.070571E+013
```

Estas líneas son las mínimas necesarias para poder remover la respuesta del instrumento con ayuda de SAC (Seismic Software Analysis). El número de ceros y polos varía un poco de acuerdo con el tipo de instrumento, la constante de normalización también varía de acuerdo con la estación, esto debido a que existen variaciones en los valores de sensibilidad de los instrumentos y en la constante del digitalizador.

En la Figura 3.4 se observa la terminal de Ubuntu desde donde se ejecuta SAC.

¹ Analistas de Sismogramas (SSN)

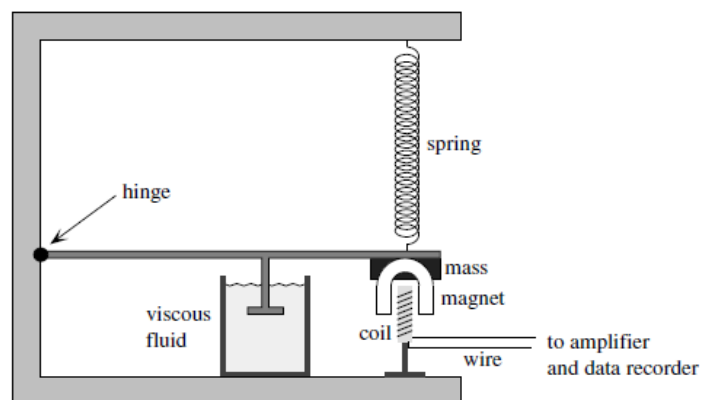


Figura 3-3. Bosquejo de un simsómetro simple inercial que mide el movimiento vertical del suelo (Tomado de Shearer, 2009).

```
geo@geo-VirtualBox: ~/sac
geo@geo-VirtualBox:~/sac$ sac
SEISMIC ANALYSIS CODE [06/12/2013 (Version 101.6)]
Copyright 1995 Regents of the University of California
SAC> 
```

Figura 3-4. Pantalla principal en Linux para la utilización de SAC.

3.4. Cocientes espectrales

Con un procedimiento similar al trabajo realizado por Lermo y Chávez-García (1993) y por Borcherd (1970), se realizaron los cocientes espectrales presentados en este trabajo.

Este trabajo difiere con respecto al método de Nakamura (p.e. Nakamura, 1989; Nakamura, 2000; Nakamura, 2008), ya que no considera el cociente H/V, sino los cocientes espectrales estándares.

En la Figura 3.5 se muestra un bosquejo de la Cuenca del Valle de México, en ella se observa desde la Sierra de Guadalupe hasta la Sierra del Chichinautzin. Consideramos un medio de tres capas: a) sedimentos lacustres, b) vulcano-sedimentarios y c) formaciones marinas.

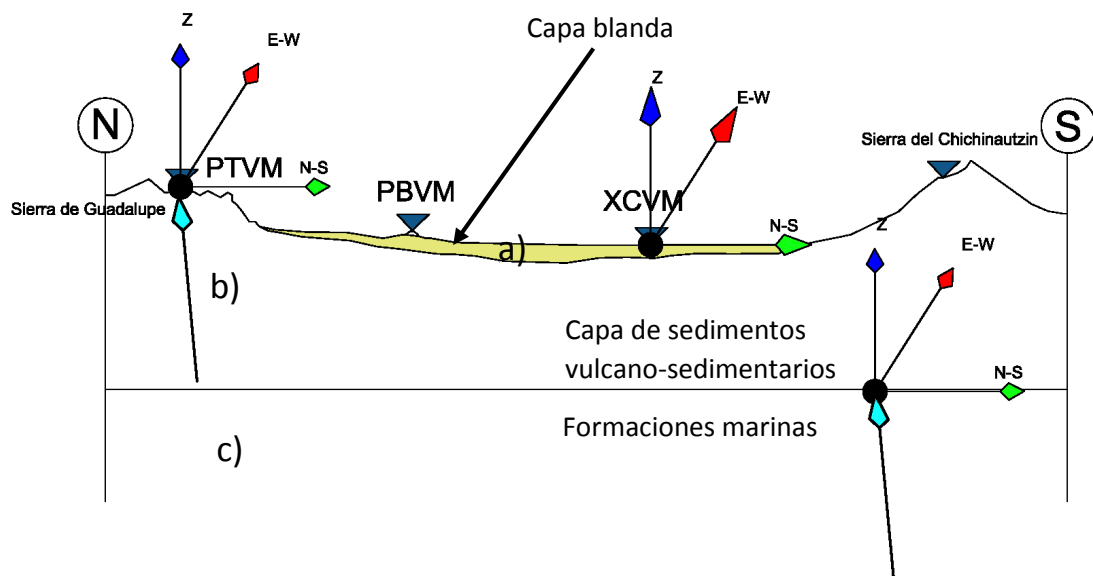
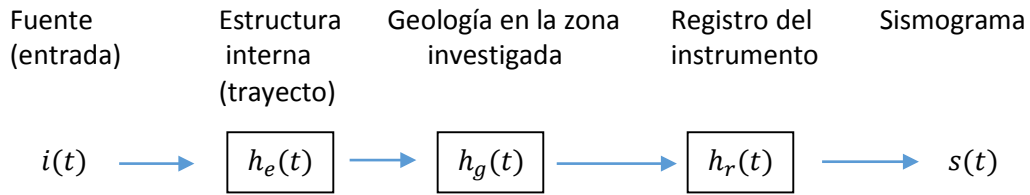


Figura 3-5. Bosquedo del Valle de México, en el cual se muestran tres principales capas: a) Capa blanda (sedimentos), b) Capa vulcano-sedimentaria y c) Formaciones marinas. Se observan tres estaciones: PTVM (Pico Tres Padres), PBVM (Peñón de los Baños) y XCVN (Xochimilco), al igual que los componentes utilizados para el presente estudio.

Los efectos que afectan un sismograma pueden ser visualizados de la siguiente manera:



En una primera aproximación, cada efecto para la mayoría de los sismogramas puede ser tratado como un sistema lineal, por lo que al hacer pasar una fuente a través de estos sistemas lineales, el sismograma final puede ser escrito como

$$s(t) = i(t) * h_e(t) * h_g(t) * h_r(t),$$

3.4-1

en donde “ * ” denota el operador de convolución.

Mediante la utilización de la transformada de Fourier, podemos escribir la expresión anterior como

$$S(f) = I(f) H_e(f) H_g(f) H_r(f).$$

3.4-2

Los cocientes en la banda de frecuencias para el cual existe una buena relación señal-ruido debería mostrar solo las respuestas características de la geología local sin los efectos de la fuente, trayecto, y del instrumento (Borcherdt, 1970).

Si consideramos que los desplazamientos horizontales y el vertical tienen el mismo comportamiento tanto en el fondo de la cuenca como en superficie (para el caso de la estación de referencia), al realizar los cocientes espectrales

para los tres componentes: este, norte y vertical, estaríamos observando las diferencias de la geología debajo de las estaciones que registraron los eventos.

En nuestro caso, para los componentes horizontales y el vertical, se obtuvieron los cocientes espectrales como la relación,

$$A(f) = \frac{H_{gs}(f)}{H_{gb}(f)}$$

3.4-3

En donde $A(f)$ es el cociente de amplitud espectral de cada componente, $H_{gs}(f)$ es el espectro de amplitud de Fourier de la señal sísmica registrada en el sitio de interés y $H_{gb}(f)$ es el espectro de amplitud de Fourier de la señal sísmica registrada en un sitio de referencia. En la expresión anterior se considera que los efectos debido a efectos de la fuente, trayecto y del instrumento han sido eliminados, y únicamente se tendría el efecto producido por la geología local.

En el caso de que la geología debajo de las estaciones fuera la misma, esperaríamos que la amplitud de los cocientes espectrales fuera cercano a uno en el rango de frecuencias estudiado, en caso contrario, podríamos observar amplificaciones y/o atenuaciones a frecuencias específicas.

4 DATOS Y METODOLOGÍA

4.1. Red Sismológica del Valle de México

El gobierno de México decretó la fundación del Servicio Sismológico Nacional (SSN) el 5 de septiembre de 1910, quedando bajo el cargo del Instituto Geológico Nacional dependiente de la Secretaría de Minería y Fomento (SSN, 2015)

En 1929 el SSN pasó a ser parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y desde 1949 quedó adscrito al Instituto de Geofísica de la UNAM (SSN, 2015).

A partir de 1992, con apoyo presupuestal de la Secretaría de Gobernación y de la UNAM, se inició la modernización de la Red Sismológica Nacional con la instalación de equipos de nueva tecnología. Así, nació la red de Observatorio Sismológicos de Banda Ancha. Hoy el SSN cuenta con 56 observatorios sísmicos en todo el país (SSN, 2015).

La Red Sísmica del Valle de México (RSVM) fue creada en 1993, el financiamiento fue con ayuda del Departamento del Distrito Federal, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y manejada por el Instituto de Geofísica. En un inicio, la RSVM fue planeada como una red sísmica local enfocada al registro de señales sísmicas de periodo corto provenientes de eventos (de cualquier tipo) originados dentro de la cuenca de México (Quintanar et al., 2001).

Los sismos que afectan al Valle de México provienen principalmente de la costa del Pacífico y del propio Valle, cuyas magnitudes son bajas (3.0 aproximadamente). Las observaciones con instrumentos de alta amplificación

y resolución en el Valle de México son muy difíciles, debido a que el alto nivel de ruido en el suelo producido por la actividad antropogénica enmascara las señales (SSN, 2014).

La RSVM cuenta a la fecha con 31 estaciones digitales. Una parte de ellas están equipadas con sensores marca Guralp modelo CMG-6TD con un digitalizador de 3 canales y antena GPS; mientras que otra parte están equipadas con sensores marca Reftek modelo 151-60A de 6 canales y antena GPS. La transmisión se realiza vía Internet o radio frecuencia y cuentan también con equipo de alimentación eléctrica (SSN, 2014).

Para este estudio se hizo uso de los registros sísmicos obtenidos de 30 estaciones pertenecientes a la RSVM, estas estaciones se listan en las Tablas 4.1 y 4.2. Se realizaron dos tablas con el fin de separar las estaciones que cuentan con sensores Guralp CMG-6TD de las que cuentan con sensores Reftek 151-60A. En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestra el nombre de la estación, sus siglas y las coordenadas geográficas correspondientes (latitud y longitud).

En la Figura 4.3 se muestra la distribución de las estaciones correspondientes a la RSVM. Las estrellas en color rosado representan a las estaciones con sensor tipo Guralp CMG-6TD y las estrellas en color rojo representan a las estaciones con sensor tipo Reftek 151-50A.

4.1.1. Sensores Guralp

El Guralp CMG-6TD de banda ancha es un sismómetro digital, triaxial, ultra ligero, que consiste en tres sensores que se encuentran dentro de una cubierta sellada. Puede medir los componentes norte/sur, este/oeste y el vertical del movimiento del suelo simultáneamente. Cada sensor es sensible a las vibraciones del suelo sobre un amplio rango de frecuencias (0.033 - 50 Hz como estándar). Esta respuesta de frecuencia es posible por los circuitos avanzados de fuerza balanceada. Un digitalizador interno de 24 bits convierte el movimiento del suelo a datos digitales de la fuente con una fidelidad máxima (Systems, Guralp, 2014).

El CMG-6TD tiene un diseño resistente, a prueba de agua, fácil para su instalación. Se muestra en la Figura 4.1 una imagen de este sismómetro.



Figura 4.1 Equipo Guralp CMG-6TD.

En la Figura 4.1.1 se muestran imágenes de las estaciones sísmicas pertenecientes al sensor Guralp y que forman parte de la Red del Valle de México. Las estaciones PTVM (Pico Tres Padres) y PBVM (Peñón de los Baños) fueron seleccionadas como estación de referencia, con excepción de dos eventos, en donde fueron elegidas MAVM (Malinalco) y TOVM (Toluca).

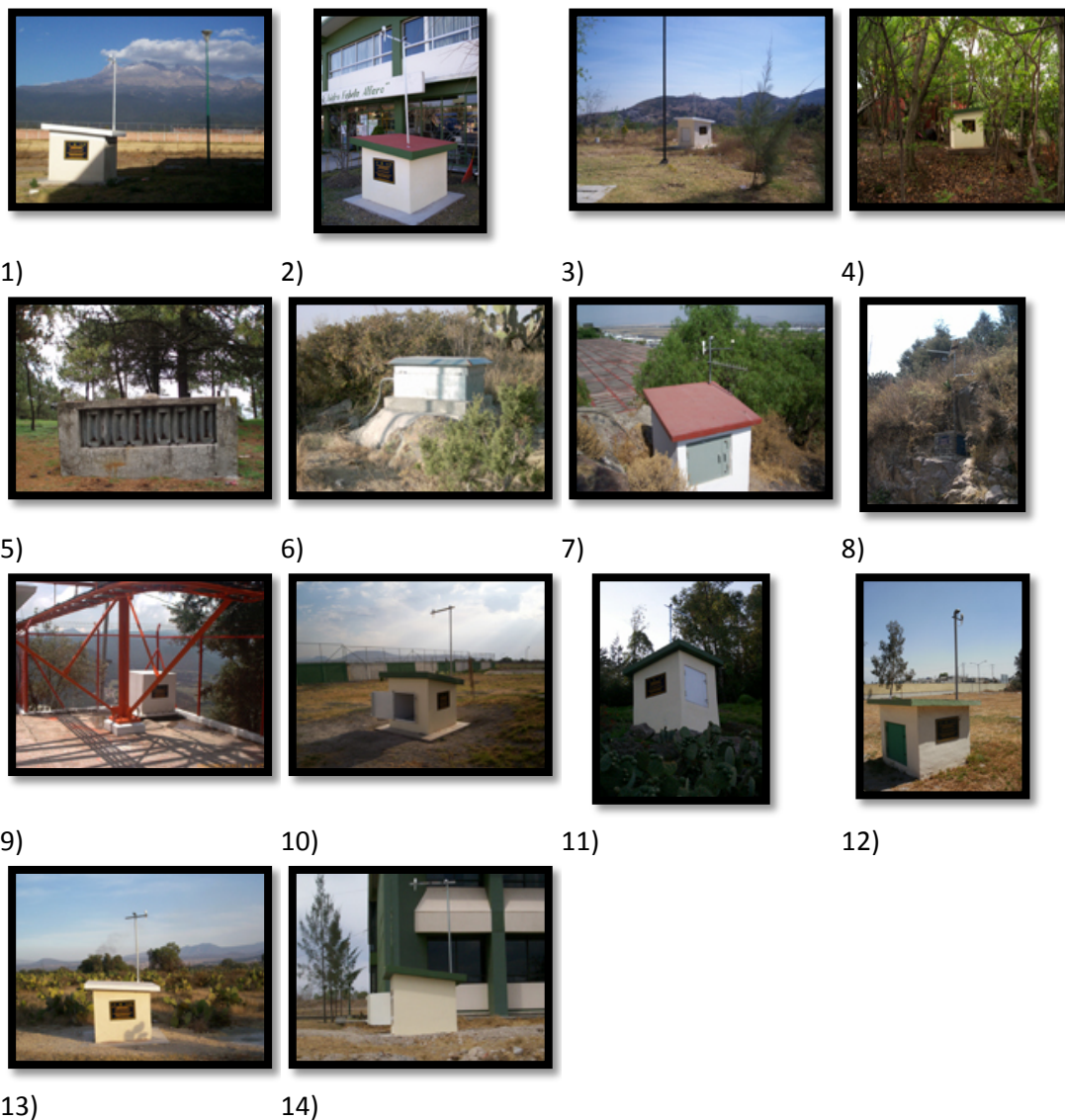


Figura 4.1.1. Fotografía de las casetas sísmicas pertenecientes a la Red del Valle de México, a continuación se enlista las estaciones: 1)AMVM (Amecameca), 2)ATVM (Atlacomulco), 3)AZVM (Atizapán), 4)MAVM (Malinalco), 5)MZVM (Mezontepec), 6)ORVM (Órganos), 7)PBVM (Peñón de los Baños), 8)PTVM (Pico Tres Padres), 9)SZVM (Salazar), 10)TXVM (Texcoco), 11)TOVM (Toluca), 12)VCVM (Valle de Chalco), 13)VTVM (Valle de Teotihuacán), 14)ZUVM (Zumpango). Las estaciones PTVM y PBVM fueron seleccionadas como estación de referencia, con excepción de dos eventos, en donde fueron elegidas MAVM y TOVM.

ESTACIÓN	SIGLAS	COORDENADAS	
		Lat. N	Long. W
Guralp			
Amecameca	AMVM	19°07.9123'	98° 47.154'
Atlacomulco	ATVM	19° 45.7108'	99° 50.4629'
Atizapán	AZVM	19° 35.0900'	99° 16.9759'
Malinalco	MAVM	18° 57.4325'	99° 29.6454'
Mezontepec	MZVM	19° 11.3509'	99° 13.7590'
Órganos	ORVM	19° 35.5481'	98° 43.3907'
Peñón de los Baños	PBVM	19° 26.4415'	99° 04.9931'
Pico Tres Padres	PTVM	19° 35.4765'	99° 06.7502'
Salazar	SZVM	19° 19.4256'	99° 22.8605'
Texcoco	TXVM	19° 26.0061'	98° 55.0530'
Toluca	TOVM	19° 16.9705'	99° 40.6613'
Valle de Chalco	VCVM	19° 17.8804'	98° 57.2661'
Valle de Teotihuacán	VTVM	19° 46.2060'	98° 46.4721'
Zumpango	ZUVM	19° 49.5889'	99° 04.6507'

Tabla 4-1. Estaciones de la Red del Valle de México (RVM) con sensor tipo Guralp CMG-6TD y sus coordenadas geográficas.

4.1.2. Sensores RefTek

El sismómetro Reftek 151-50A de banda ancha es un sensor de fuerza balanceada retroalimentada. El sensor 151-60A contiene tres sensores independientes (uno vertical y dos horizontales) con un circuito electrónico retroalimentado, circuitos de control y conversión de energía interno, bajo ruido, amplio rango dinámico y de fácil instalación y uso (RefTek, 2014).

El 151-60A es un sismómetro que tiene un amplio rango de frecuencias (0.0166 - 50 Hz). Tiene una nivelación y un bloqueo/desbloqueo de la masa interna. El mecanismo de nivelación incluye dos niveles de burbuja, tres pies ajustables y tres tuercas de seguridad que se encuentran en el chasis del sismómetro. En la Figura 4.2 se muestra una imagen de un sismómetro Reftek 151-60A.



Figura 4.2 Equipo RefTek 151-60A.

ESTACIÓN	SIGLAS	COORDENADAS	
		LAT. N	LONG. W
RefTek			
Álvaro Obregón	AOVM	19° 16.054'	99° 19.314'
Azcapotzalco	APVM	19° 29.281'	99° 12.519'
Benito Juárez	BJVM	19° 22.500'	99° 10.239'
Coyoacán	COVM	19° 21.066'	99° 09.370'
Cuajimalpa	CJVM	19° 21.699'	99° 17.108'
Cuauhtémoc	CTVM	19° 26.588'	99° 09.936'
Gustavo A. Madero	GMVM	19° 29.582'	99° 06.661'
Iztacalco	ICVM	19° 23.069'	99° 05.937'
Iztapalapa	IPVM	19° 20.766'	99° 05.488'
Magdalena Contreras	MCVM	19° 19.238'	99° 15.319'
Miguel Hidalgo	MHVM	19° 24.479'	99° 12.545'
Milpa Alta	MPVM	19° 12.086'	99° 00.688'
Tláhuac	THVM	19° 18.658'	98° 58.396'
Tlalpan	TLVM	19° 12.598'	99° 09.246'
Venustiano Carranza	VRVM	19° 25.071'	99° 06.864'
Xochimilco	XCVM	19° 15.164'	99° 07.011'

Tabla 4-2. Estaciones de la Red Delegacional del Distrito Federal (RDDF) con sensor tipo RefTek 151-60^a y sus coordenadas geográficas.

En la Figura 4.2.1 se muestran imágenes de las estaciones sísmicas pertenecientes al sensor Reftek y que forman parte de la Red Delegacional del Distrito Federal.

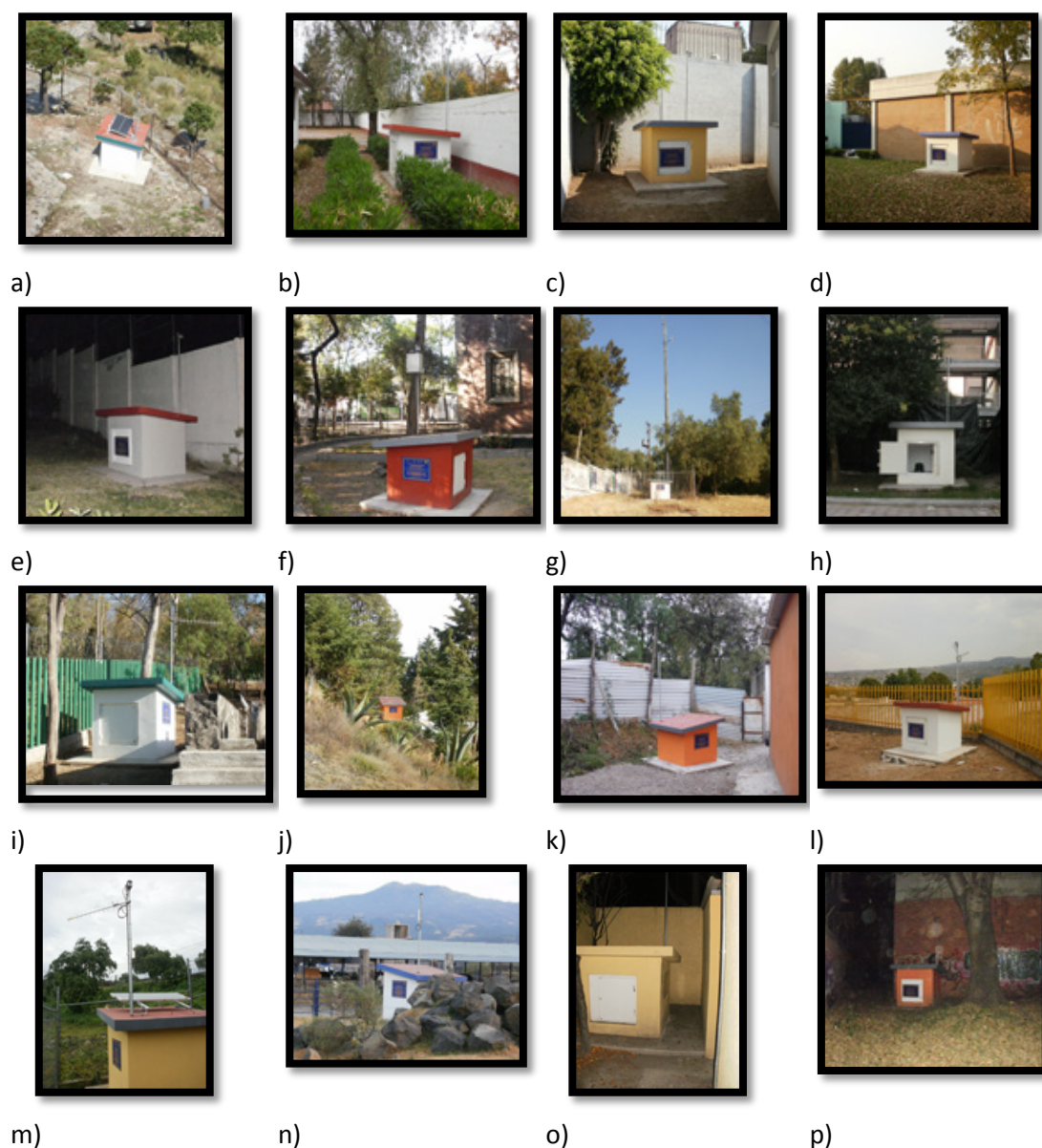


Figura 4.2.1. Fotografía de las casetas sísmicas pertenecientes a la Red Delegacional del Distrito Federal, a continuación se enlista las estaciones: a)AOVM (Álvaro Obregón), b)APVM (Azcapotzalco), c)BJVM (Benito Juárez), d)COVM (Coyoacán), e)CJVM (Cuajimalpa), f)CTVM (Cuauhtémoc), g)GMVM (Gustavo A. Madero), h)ICVM (Iztacalco), i)IPVM (Iztapalapa), j)MCVM (Magdalena Contreras), k)MHVM (Miguel Hidalgo), l)MPVM (Milpa Alta), m)THVM (Tláhuac), n)TLVM (Tlalpan), o) VRVM (Venustiano Carranza), p)XCVM (Xochimilco).

Los sitios fueron elegidos en función de la facilidad para localizar los sismos que pudieran generarse en el Valle de México y en el D.F., también fue necesario que la transmisión de datos se realizara de una forma sencilla.

Las casetas en donde se alojan los sensores tienen una dimensión aproximada de 1.5x1.5x1.5 m, las paredes son de doble muro y existe un espacio entre ambos que funciona como aislante térmico. La construcción de la base sobre la cual se encuentra el sensor, se realizó con concreto y sin ninguna estructura de metal en su interior, la dimensión de dicho “cubo” es de 1 m de profundidad y de 60x60 cm. Las estaciones MAVM, MZVM, ORVM, PBVM, PTVM, SZVM, TXVM, TOVM y VCVM cuentan con los siguientes elementos adicionales (Figura 4.1.2): un material llamado arboron® en medio y sobre el cubo de concreto, el cual actúa como un aislante eléctrico y mecánico entre el sensor y el cubo. En medio del arboron® se coloca un vidrio, es aquí en donde se coloca el sensor, los tornillos que se observan sirven para colocar una carcasa de aluminio, la cual va rellena de foamular®, esto con el fin de aislar el instrumento de la humedad y los cambios bruscos de temperatura. Las casetas sísmicas de la Red Delegacional del D.F. y las faltantes de la Red del Valle de México que no fueron listadas arriba, no cuentan con estos materiales adicionales, en cambio, el sensor se coloca sobre el pilar de concreto, tal y como se muestra en la Figura 4.1.3.

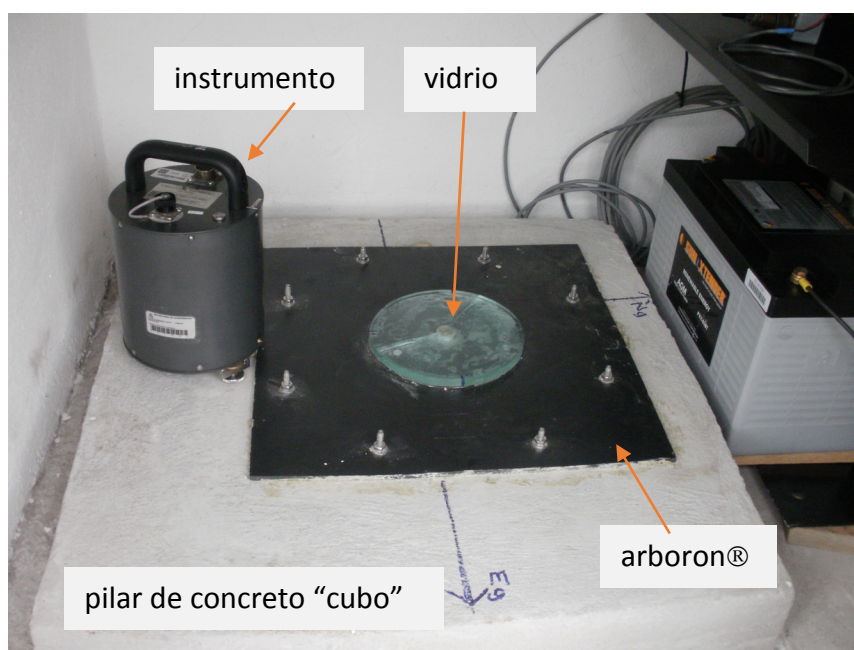


Figura 4.1.2. Materiales adicionales para la colocación del instrumento de las siguientes estaciones: MAVM (Malinalco), MZVM (Mezontepec), ORVM (Órganos), PBVM (Peñón de los Baños), PTVM (Pico Tres Padres), SZVM (Salazar), TXVM (Texcoco), TOVM (Toluca) y VCVM (Valle de Chalco).

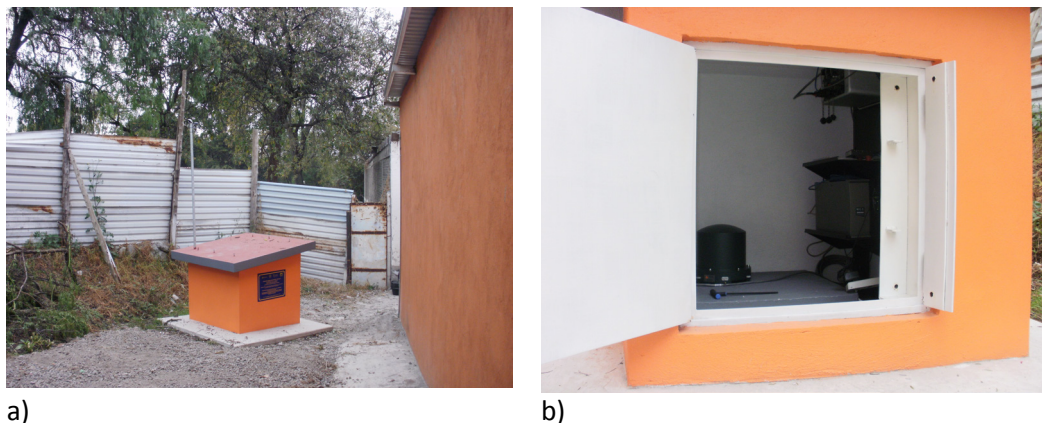


Figura 4.1.3. a) Diseño de las caseta sísmicas para las estaciones pertenecientes a la RVM y para la RDDF, b) ubicación del instrumento para el caso de las estaciones que no tienen los materiales mencionados en la Figura 4.1.2 (arboron[®], virdio, cubierta metálica y foamular[®]).

Las siguientes estaciones tienen un sistema de comunicación proporcionada por la UAEM (Universidad Autónoma del Estado de México): AMVM, ATVM, AZVM, VTVM, TOVM, TXVM, VCVM, ZUVM. La estación de MAVM tiene un sistema de internet satelital. Por otro lado, PTVM, ORVM, MZVM se comunican por radio inalámbrico, SZVM también se comunica de la misma forma hasta transmitir a PBVM, en donde ambas estaciones se conectan a una línea de internet privada. Todas las estaciones pertenecientes a la RVM necesitan un convertidor de serie a Ethernet para poder conectarse a internet.

Para el caso de las estaciones de la Red Delegacional, se describe a continuación el tipo de comunicación utilizada: AOVVM por medio de radio inalámbrico; APVM por internet satelital; BJVM mediante Internet de Cablevisión[®]; COVM a través de la red UNAM; CJVM red IEMS, DF; CTVM mediante Internet Prodigy; GMVM, IPVM y MCVM por Internet inalámbrico; ICVM, XCVM con la red UNAM; MHVM por red inalámbrico hasta Tacubaya y después ingresa a un Prodigy; MPVM radio Internet inalámbrico a Tláhuac e ingresa a un Internet satelital; THVM, VRVM internet satelital; TLVM tiene un enlace de ~500 m de radio inalámbrico hasta un centro de cómputo e ingresa a la red UNAM.

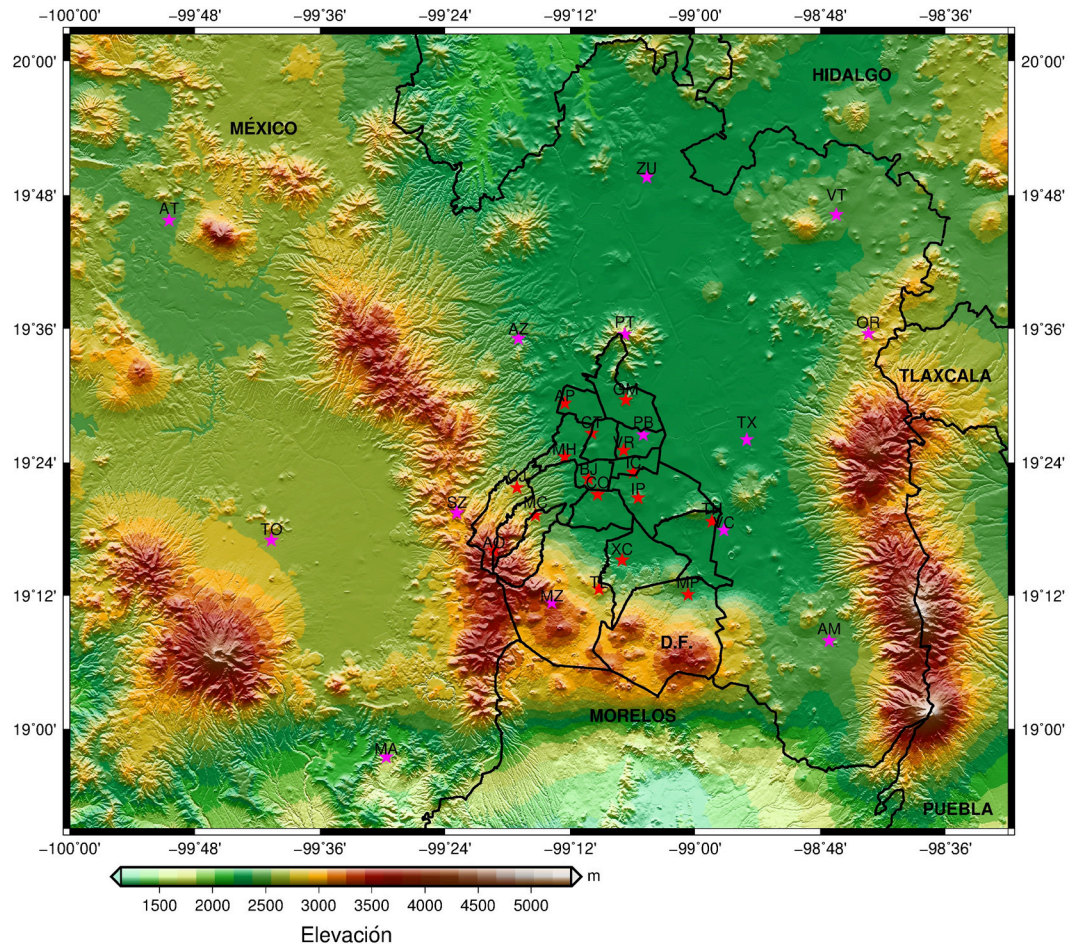


Figura 4-3. Mapa topográfico en donde se ubican las estaciones de la Red Sísmica del Valle de México. Los puntos color rosado corresponden a las estaciones con sensor tipo Guralp (Red del Valle de México) y los puntos color rojo corresponden a las estaciones con sensor tipo Reftek (Red Delegacional del Distrito Federal).

4.2. Obtención de datos

El análisis realizado, como se mencionó en el capítulo anterior, hizo uso de los tres componentes (este, norte y vertical). Por ejemplo, para el evento 12 con las siguientes características: magnitud Mw 7.6; profundidad de 35 km; distancia de 1808 km; proveniente del este de Mansión, Costa Rica, registró, para el caso de la Red del Valle de México (RVM), en el componente este, un total de 6 trazas sísmicas y para la Red Delegacional del D.F. (RDDF), 9, por lo que en total serían 45 registros sísmicos contemplando ambas redes y las tres direcciones. Siguiendo este análisis e incluyendo los 16 eventos utilizados, se trabajó con un total aproximado de 500 registros sísmicos.

La ubicación de las estaciones pertenecientes a la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) fueron elegidas de tal manera que se pudiera tener una mejor localización de los temblores originados en el Valle de México y que la transmisión de los datos fuera con mayor facilidad (SNN, 2015). Para el resguardo de las estaciones sísmicas, fueron seleccionados en la mayoría de los casos, edificios como: escuelas, capillas, panteones. Por lo que se tienen estaciones que contienen mucho ruido antropogénico, lo cual podría enmascarar las señales de los telesismos en algunos casos. Las estaciones VRVM (Venustiano Carranza), ICVM (Iztacalco) y VCVM (Valle de Chalco) muestran amplitudes muy grandes (en el dominio temporal, 2 ó 3 veces más) comparadas con las otras estaciones, principalmente en los componentes horizontales. La estación MZVM (Mezontepec, Figura 4.1.1, imagen 5) también muestra amplitudes grandes (2 ó 3 veces más) en el dominio temporal, a pesar de estar en un suelo rocoso. El Ing. Arturo Cárdenas Ramírez y el Dr. Víctor H. Espíndola comentaron (comunicación personal) que la estación MZVM se encuentra en una zona de relleno y que hay árboles muy grandes alrededor de la estación, por lo cual, en condiciones de vientos, estos podrían ocasionar un registro ruidoso. También comentaron que las estaciones VRVM, ICVM y VCVM (Figura 4.1.2) se encuentran en terreno de suelo blando (zona de lago), por lo que se pueden generar amplificaciones debido a la geología local.

Los datos utilizados en este trabajo son registros sísmicos digitales obtenidos a partir del 1 de enero de 2011 hasta el 19 de abril de 2013. Estos datos pertenecen a las diferentes estaciones de la RSVM a cargo del SSN.

Se utilizaron dos tipos de equipos, unos son los Guralp CMG-6TD y el otro tipo de equipo son los RefTek 151-60A, ambos equipos funcionan con una tasa de muestreo de 100 muestras por segundos.

En la elección de los registros sísmicos se tomaron en cuenta los siguientes criterios,

- Claros arribos para la onda P
- Eventos registrados para al menos cinco estaciones
- La cobertura acimutal máxima, de preferencia que contemplara a toda la zona del Valle de México
- Magnitud del sismo ($M_w \geq 7.0$)

Debido a que el trabajo está enfocado en la utilización de telesismos, lo primero que se hizo fue elegir una magnitud mínima, ya que con la gran distancia de dichos eventos no iba a ser posible observar las fases de interés. La magnitud mínima elegida fue de $M_w=7.0$. Se buscó tener la cobertura azimutal máxima y los eventos que cumplieran con este requisito fueron 19.

Si consideramos que la distancia hipocentral de los eventos es grande comparada con la apertura del arreglo, el campo de onda sísmica podría ser considerado uniforme dado que llega debajo del área investigada y podríamos asumir que las diferencias en las formas de las ondas telesísmicas están correlacionadas con la estructura superficial (Dolenc et al., 2005). Con esta afirmación podríamos considerar que para los eventos con fase de onda P difractada, se puede utilizar el mismo procedimiento que para la fase de onda P directa.

Se muestra en la Tabla 4.3 los eventos sísmicos utilizados, la tabla contiene nueve columnas, las cuales se describen a continuación: fecha, el formato está dado por el día, mes y año; la hora (UTC), está dada por la hora, minuto y segundo; latitud, está dada en grados decimales; longitud, está dada en grados decimales; profundidad, está dada en kilómetros; magnitud del sismo (M_w); ubicación del evento; distancia acimutal, dada en kilómetros; evento, ordenado del evento uno (fecha más antigua) al evento 19 (fecha más reciente).

En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran los registros sísmicos para tres eventos. En dichas figuras se observan los tres componentes del registro, se observa en las figuras a) los registros obtenidos por los sensores RefTek 151-60A y en las figuras b) los registros obtenidos por los sensores Guralp CMG-6TD.

En este estudio lo que se hizo fue identificar los primeros arribos de la onda P, después seleccionar una ventana en el cual el número de muestras fuera cercano a 2^n ($\forall n \in \mathbb{N}: n > 0$) y así cumplir con la restricción de la transformada rápida de Fourier.

Se puede observar que en las Figuras 4.5 y 4.6, la onda P no es tan notoria, en cambio, en la Figura 4.4, la onda se ve muy claramente.

En la mayoría de los registros digitales se observa este patrón, debido a que, la distancia entre la fuente y las estaciones que registraron dicho evento es muy grande. En los eventos profundos (≥ 200 km), la forma de la onda del primer arribo se puede observar más claramente que para eventos someros.

Fecha	Hora	Lat.	Long.	Prof. [km]	Mag. Mw	Ubicación	Distancia [km]	Evento
01/01/2011	09:56:58	-26.803	-63.136	576.8	7	Norte Argentina	6410	1
02/01/2011	18:20:18	-38.355	-73.326	24	7.2	Sur Chile	6925	2
11/03/2011	05:46:24	38.297	142.373	29	9	Japon	10970	3
06/07/2011	19:03:18	-29.539	-176.34	17	7.6	NE, Nueva Zelanda	9880	4
24/08/2011	17:46:12	-7.641	-74.525	147	7	Norte Pucallpa, Perú	4020	5
15/09/2011	19:31:04	-21.611	-179.528	644.6	7.3	NE, Nueva Zelanda. Sur Fiyi	9840	6
23/10/2011	10:41:23	38.722	43.513	16	7.1	Este Turquía	12507	7
20/03/2012	18:02:47	16.493	-98.231	20	7.4	Santiago Llano Grande, Oax	300	8
11/04/2012	10:43:11	0.802	92.463	25.1	8.4	Oeste Malasia	17430	9
14/08/2012	02:59:38	49.8	145.064	583.2	7.7	Norte Japón	10095	10
31/08/2012	12:47:33	10.811	126.638	28	7.6	Filipinas	13990	11
05/09/2012	14:42:08	10.085	-85.315	35	7.6	Este Mansión, Costa Rica	1808	12
30/09/2012	16:31:36	1.929	-76.362	170	7.3	Norte Villa de Fátima, Colombia	3135	13
28/10/2012	03:04:09	52.788	-132.101	14	7.8	Louise Island, Canada	4678	14
07/11/2012	16:35:47	13.963	-91.854	24	7.4	Sur Guatemala	974	15
10/12/2012	16:53:09	-6.533	129.825	155	7.1	Mar de Banda, NW Papua Nueva Guinea	14560	16
06/02/2013	01:12:27	-10.738	165.138	28.7	8	SE Islas Salomon, SE Papua Nueva Guinea	10991	17
16/04/2013	10:44:21	28.107	62.053	82	7.7	SE Irán	14390	18
19/04/2013	03:05:53	46.224	150.783	112.2	7.2	NE Japón	9935	19

Tabla 4-3 Localización de los eventos sísmicos con magnitud mínima de 7.0. Se enlistan la fecha, hora, latitud, longitud, profundidad del evento en km, magnitud Mw, su ubicación aproximada, la distancia del evento a la región de estudio y el número de evento correspondiente.

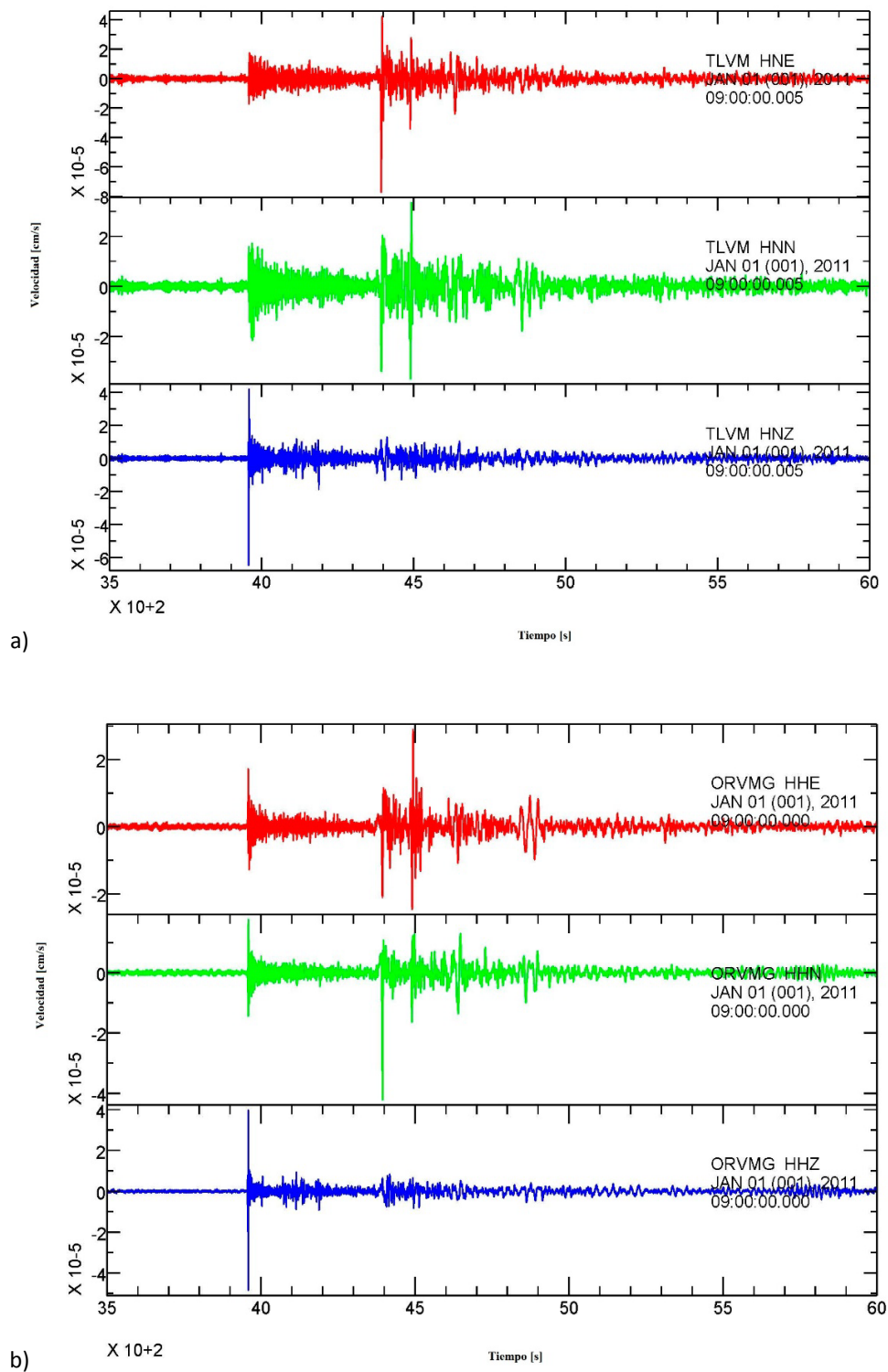
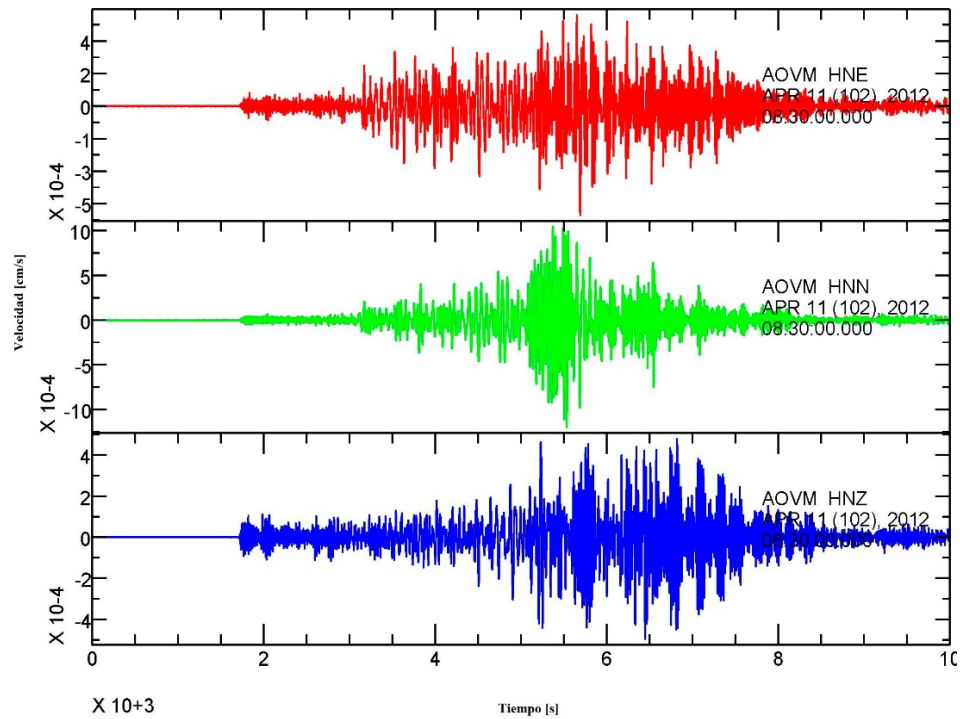
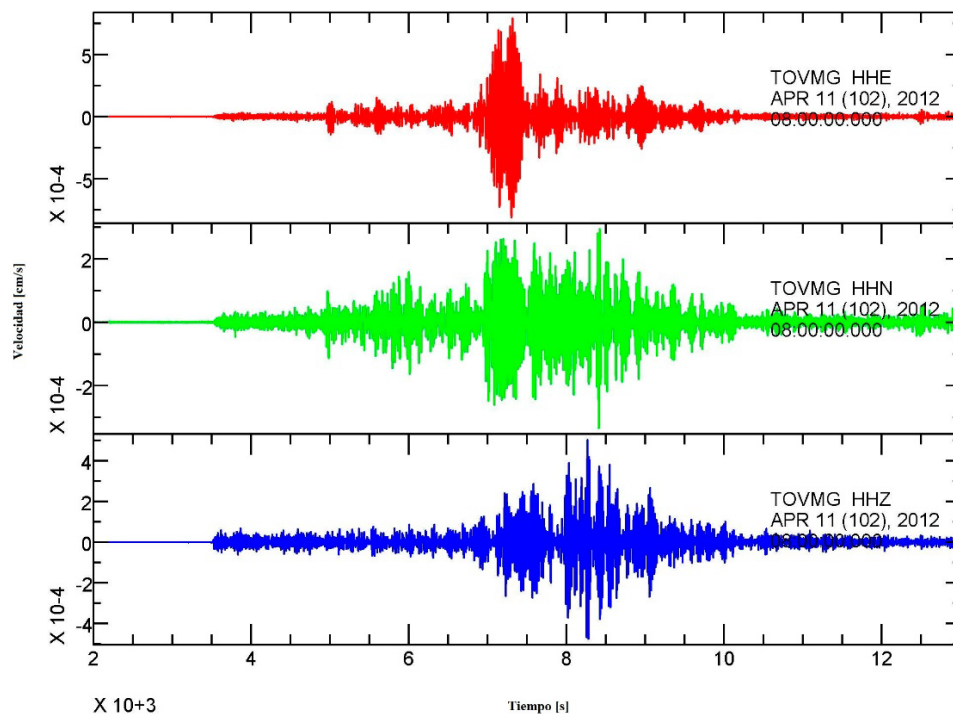


Figura 4-4. Sismogramas para el evento del 01/01/2011, a) registrado por la estación Tlalpan, b) registrado por la estación Órganos.

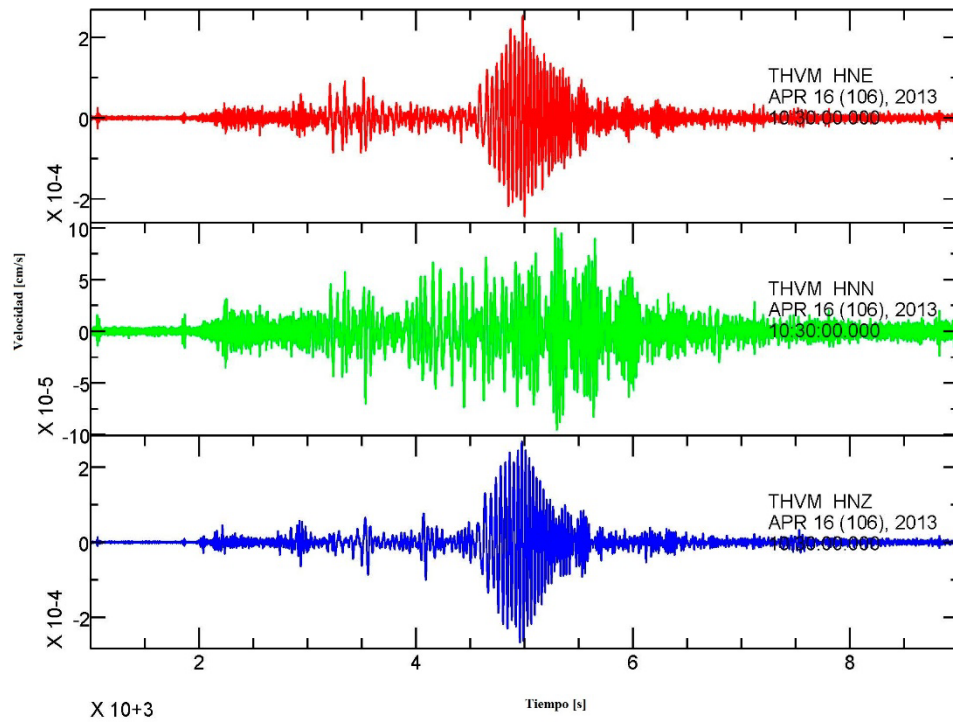


a)

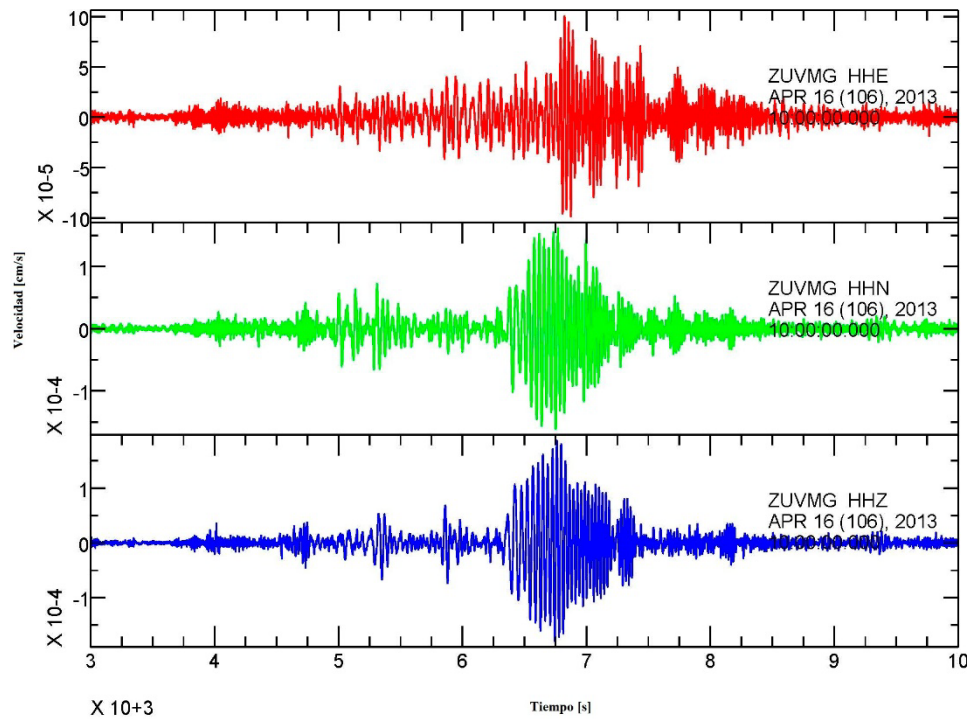


b)

Figura 4-5. Sismogramas para el evento del 11/04/2012, a) registrado por la estación Álvaro Obregón, b) registrado por la estación Toluca.



a)



b)

Figura 4-6. Sismogramas para el evento del 16/04/2013, a) registrado por la estación Tláhuac, b) registrado por la estación Zumpango.

En la Figura 4.7 se muestra que no todos los registros digitales son de buena calidad, ya que como se ve para la dirección este de la estación VTVM (Tabla 4.1) el sensor no registró el evento, por lo que para este estudio se descarta dicha componente en el análisis de cocientes espectrales. Esto sucede en varios registros de los eventos mostrados en la Tabla 4.3.

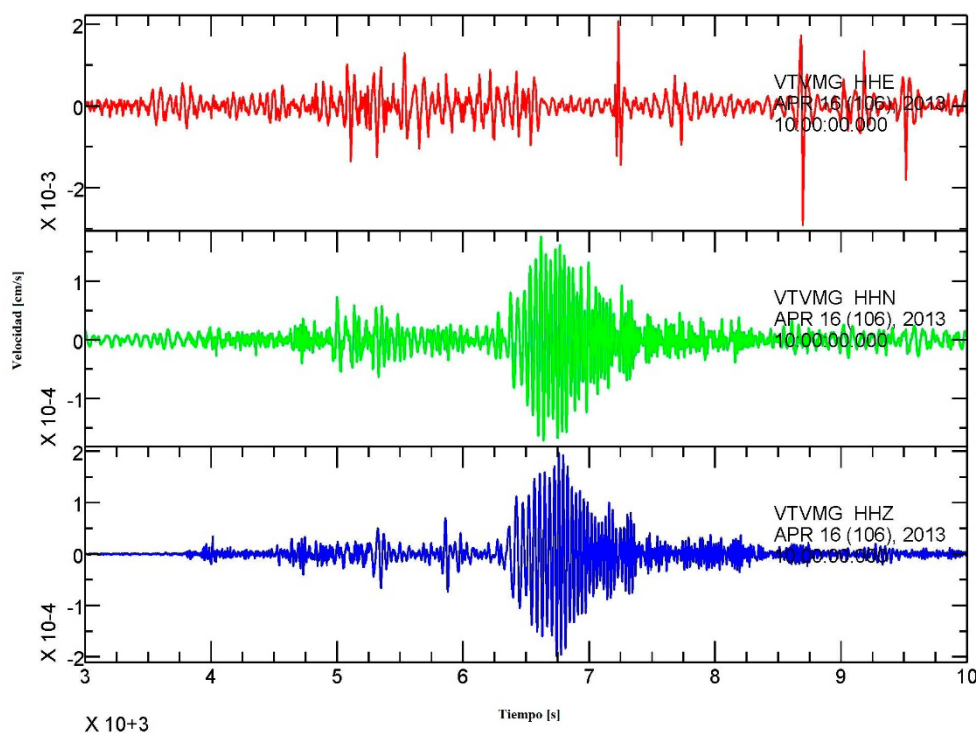


Figura 4-7. Sismogramas para el evento del 16/04/2013, registrado por la estación Valle de Teotihuacán.

Se presentan en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 una ventana en donde se puede ver el primer arribo, el cual fue utilizado en este estudio. En la Figura 4.8 se puede observar el primer arribo muy claramente, la traza sísmica contiene muy poco ruido de alta frecuencia.

En la Figura 4.9 se aprecia muy bien el arribo de la onda en el componente vertical de la estación Toluca, los componentes horizontales presentan ondas con periodos de aproximadamente 10 s, esto se debe probablemente a algún problema del sensor, ya que no se observa en los otros componentes.

En la Figura 4.10 podemos apreciar que las trazas sísmicas presentan ruido de alta frecuencia y debido a que el evento mostrado está a una distancia muy grande (14,000 km, aproximadamente) y con una profundidad del evento relativamente somero (28 km aproximadamente) el primer arribo no se nota con claridad.

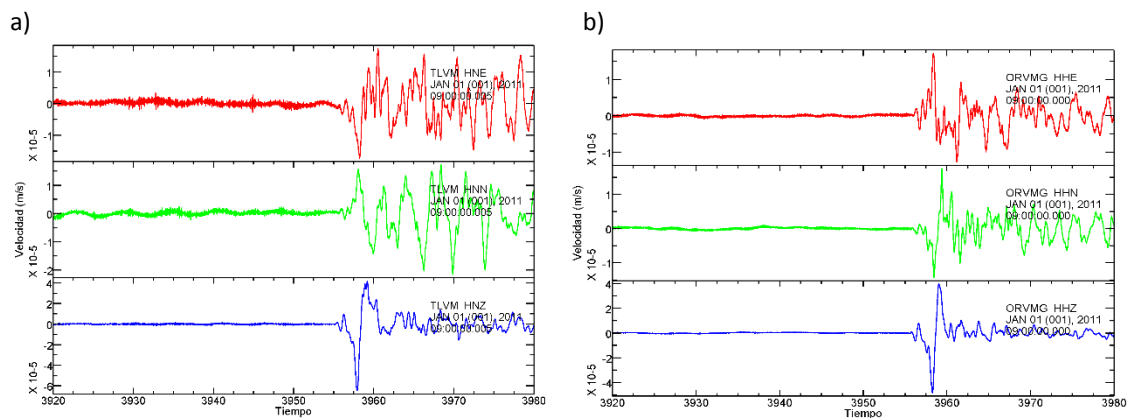


Figura 4-8. Sismogramas para el evento del 01/01/2011, a) registrado por la estación Talpan, b) registrado por la estación Órganos.

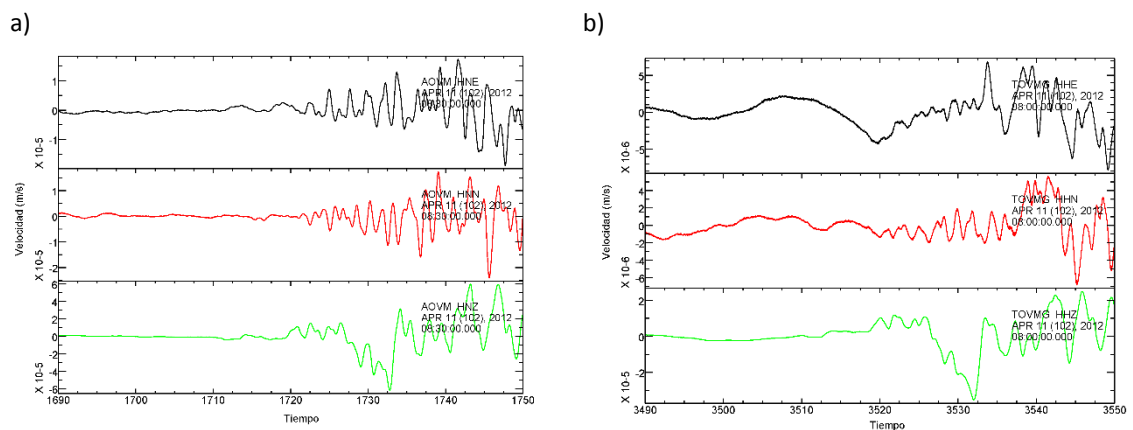


Figura 4-9. Sismogramas para el evento del 11/04/2012, a) registrado por la estación Álvaro Obregón, b) registrado por la estación Toluca.

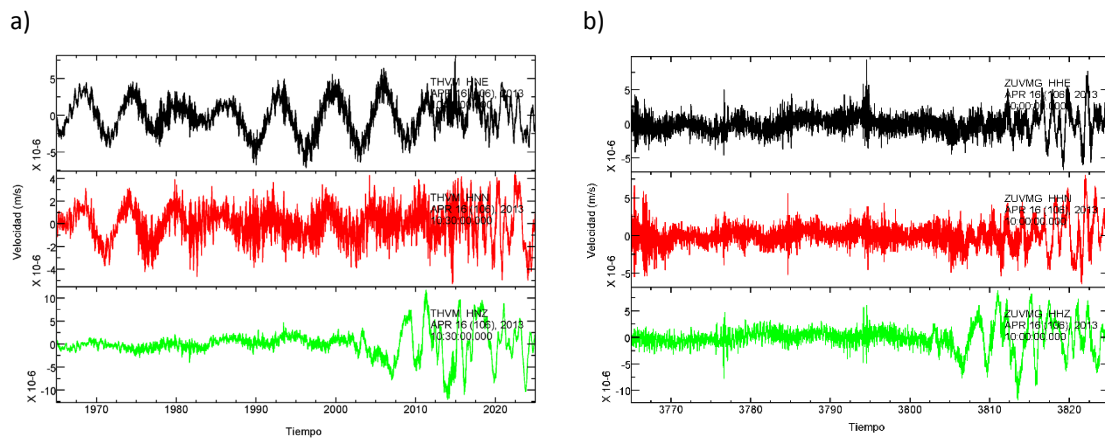


Figura 4-10. Sismogramas para el evento del 16/04/2013, a) registrado por la estación Tláhuac, b) registrado por la estación Zumpango.

En la Figura 4.11 se presenta la estación Valle de Teotihuacán. Se aprecia que el componente este no registró adecuadamente el evento sísmico, debido probablemente a una falla del sensor. Los componentes norte y vertical se aprecian mejor.

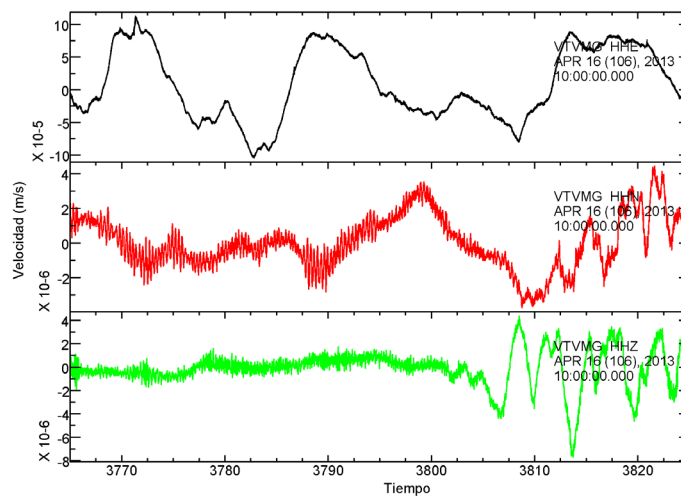


Figura 4-11 Sismogramas para el evento del 16/04/2013, registrado por la estación Valle de Teotihuacán.

4.3. Procesamiento de datos

Los datos se obtuvieron en dos formatos, uno para cada tipo de sensor, los registros obtenidos por los sensores Guralp utilizan un formato .gcf y los registros obtenidos por los sensores RefTek utilizan un formato .reftek. Debido a que ambos sensores tienen respuestas instrumentales distintas, fue necesario remover la respuesta de dicho instrumento.

Una vez eliminada la respuesta del instrumento se procedió a la obtención de los cocientes espectrales. En las gráficas de los cocientes espectrales, se muestran los componentes este, norte y vertical de los sensores Guralp y Reftek, esta separación se realiza debido a la facilidad que presenta el poder mostrar los resultados, ya que como se mencionó, la respuesta del instrumento ha sido eliminada. Para el caso de los sensores Guralp, se muestra como la Red del Valle de México (RVM) y para los Reftek, Red Delegacional del Distrito Federal (RDDF).

4.3.1. Eliminación de la respuesta del instrumento

El primer paso fue llevar los registros sísmicos con formatos .gcf y .reftek a un formato .miniseed. Una vez que los registros se convirtieron a miniseed, el paso siguiente fue convertirlos a .sac, el cual es el formato en el que se realizaron los procedimientos en este trabajo.

Una vez que se logró convertir todos los archivos a .sac, lo siguiente fue remover la respuesta del instrumento. Este procedimiento se logró con el software SAC (*Seismic Analysis Code*), el cual se obtuvo de la página de IRIS.

Los eventos sísmicos en este trabajo se ordenaron por años, se crearon tres carpetas con los años 2011, 2012 y 2013, esto con la finalidad de facilitar el procesamiento de las señales sísmicas.

El procedimiento se realizó desde cada carpeta, lo primero que se hizo fue cargar las trazas sísmicas a la memoria de SAC, esto se realiza mediante el comando “read”. Se utilizó el símbolo de asterisco (*) para evitar escribir todo el nombre del archivo, por ejemplo, para la traza sísmica registrada por la estación Álvaro Obregón con componente este (AB.AOVM.00.HNE.D.2011.258.184806.SAC) no fue necesario escribir todo el nombre del archivo, sino que se escribió *AO*HNE*SAC.

El siguiente paso fue remover la tendencia y la media de la señal sísmica, mediante rtrend y rmean, respectivamente. Una vez aplicados estos comandos se procedió a aplicar un taper. El taper elegido fue tipo Hanning y se aplicó mediante el comando “taper”.

Un taper es una función que varía monótonamente entre cero y uno. Es aplicada en una manera simétrica a los datos para que la señal sea cero en su primer y último punto y se incremente suavemente a su valor original en un punto interior respecto a cada extremo (SAC, 2014). La forma general para el taper es,

$$dato(j) = dato(j) * (F_0 - F_1 * \cos(\omega * (j - 1)))$$

en donde $\omega = \pi/N$, $F_0 = 0.5$ y $F_1 = 0.5$

El siguiente paso fue la utilización del comando “transfer from polezero subtype AAAA.BBB.pz to vel freqlimits $f_1 f_2 f_3 f_4$ ” para remover la respuesta del instrumento. En donde f_1 , f_2 , f_3 y f_4 representan los límites de frecuencia en los que el sensor opera, AAAA representa las iniciales de la estación y BBB representa el componente de dicha estación. Los límites de frecuencia utilizados para los sensores Reftek son $f_1 = 0.01$, $f_2 = 0.016$, $f_3 = 40$ y

$f_4 = 50$. Los límites de frecuencia para los sensores Guralp son $f_1 = 0.02$, $f_2 = 0.033$, $f_3 = 40$ y $f_4 = 50$. El archivo con extensión .pz es el archivo de polos y ceros, necesarios para poder eliminar la respuesta del instrumento. El último paso fue el guardar los archivos a los que se le removió la respuesta del instrumento, este procedimiento se realizó mediante el comando “write over”.

Se muestra a continuación un ejemplo de los comandos utilizados en SAC para remover la respuesta del instrumento, el ejemplo presentado pertenece al componente este de la estación Álvaro Obregón, con sensor tipo Reftek. El procedimiento es similar para el sensor tipo Guralp, sólo cambian los límites de frecuencia.

```
SAC > read * AO * HNE *.SAC
SAC > rtrend
SAC > rmean
SAC > taper
SAC > transfer from polezero subtype AOVM.HNE.pz to none freqlimits
      0.01 0.016 40 50
SAC > write over
```

4.3.2. Obtención de los cocientes espectrales

El análisis de los eventos sísmicos presentado está ordenado por acimut inverso (o acimut de arribo de la onda sísmica). Se tienen 19 eventos sísmicos para este estudio. Debido a que el evento 11 (31/08/2012) y el 17 (06/02/2013) presentan un efecto constructivo en el periodo de la onda sísmica, se decidió no tomarlos en consideración.

Con ayuda del software Taup Toolkit (Crotwell et al., 1999) se obtuvieron las fases de las ondas sísmicas para el evento 17 (Tabla 4.4), el modelo de velocidades de la Tierra utilizada fue el AK135 (Kennett et al., 1995).

Se observa en la Tabla 4.4 que las fases P y PcP tienen el mismo tiempo de viaje, de mismo modo, las ondas pP y sP llegan cercanamente a las dos fases anteriores. En la Figura 4.12 se muestra un sismograma para el componente vertical, en la cual se observa el arribo de las fases mencionadas. La traza mostrada fue registrada por la estación Peñón de los Baños. Con base en los tiempos de viajes y en las trazas sísmicas del evento 17, concluimos que este apilamiento de fases debe estar causando el efecto constructivo mencionado anteriormente.

En la Figura 4.13 se observa el efecto constructivo para el evento 11, se muestra una señal del componente vertical, registrado por la estación PTVM (Pico Tres Padres).

Dist. (grados)	Prof. (km)	Nombre de la fase	Tiempo de viaje (s)	Param. de rayo p (s/grados)	Ángulo de salida (grados)	Ángulo de incidencia (grados)
98.93	28.7	P	817.61	4.466	15.2	13.47
98.93	28.7	PcP	817.62	4.445	15.13	13.41
98.93	28.7	pP	826.89	4.47	-15.22	13.48
98.93	28.7	sP	830.21	4.469	-8.94	13.48
98.93	28.7	PP	1059.46	7.631	26.62	23.46

Tabla 4.4. Tabla obtenido con Taup Toolkit, corresponde al evento 17. Se enlistan las columnas de izquierda a derecha: distancia del evento a la estación en grados; profundidad del evento en km; el nombre de la fase; los tiempos de viaje de la onda en s; parámetro de rayo (p) en s/grado; ángulo de salida en grados; ángulo de incidencia en grados.

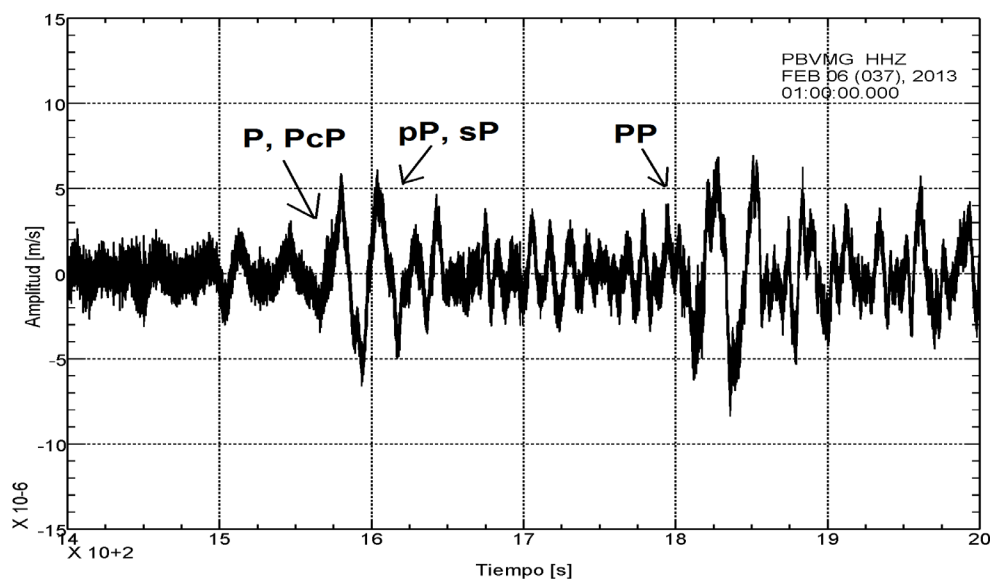


Figura 4.12. Sismograma con una duración de 10 minutos, correspondiente al evento 17. Se observa el componente vertical, registrada por la estación PBVM (Peñón de los Baños).

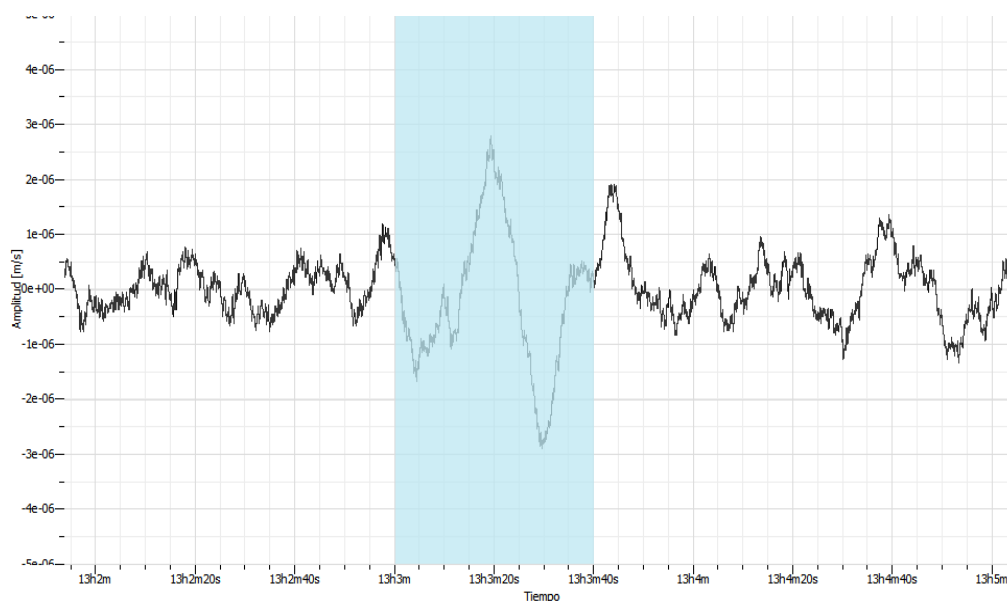


Figura 4.13. Sismograma con una duración de 3 minutos, correspondiente al evento 11. Se observa una ventana de 40 s (área en color azul), en donde se ve el primer arribo, con un periodo de mas de 10 s. Se muestra el componente vertical, registrada por la estación PTVM (Pico Tres Padres).

Se tienen 14 estaciones con sensores Guralp, y 16 estaciones con sensores Reftek. Cabe resaltar que, ningún evento fue registrado por las 30 estaciones, esto debido a los diversos problemas que presentaban éstas en el momento del evento sísmico (Tabla 4.5).

La separación máxima que se presenta entre estaciones es de 131 km aproximadamente, esta distancia se encuentra entre las estaciones ATVM (Atlacomulco) y AMVM (Amecameca). Por otro lado, la distancia mínima presente entre estaciones es de 2.6 km, esta distancia se encuentra entre las estaciones THVM (Tláhuac) y VCVM (Valle de Chalco).

Para la obtención de los cocientes espectrales se utilizaron ventanas de 20 s. Los espectros de amplitud se obtuvieron con ayuda de SAC, el cual hace una transformada de Fourier discreta. Se obtuvieron los espectros de amplitud para los tres componentes (este, norte, vertical).

Para la selección del tamaño de la ventana, primero se ubicaron los arribos de la onda P, se tuvo cuidado que la ventana seleccionada contuviera la onda P, de tal manera que se tuviera parte de la señal antes del primer arribo y además de unos ciclos extras después.

Las ventanas elegidas en este estudio son de 20 s, el objetivo principal era tener el primer arribo y un poco de ruido local, de tal manera que no afectara al espectro de amplitud de la onda P. Como se mencionó anteriormente, se tomó en consideración unos ciclos después del primer arribo de la onda P.

Después de la elección de la ventana para cada estación, para cada evento, se obtuvieron los espectros de amplitud. El espectro de amplitud se obtiene mediante la transformada discreta de Fourier. El software SAC completa con ceros, de tal manera que cumpla con la restricción de la transformada de Fourier. Para el caso de una ventana de 20 segundos, se agregan 48 ceros.

Se obtuvieron los espectros de amplitud para los tres componentes (norte, este, vertical). El espectro fue obtenido de la siguiente manera: primero se removió la media de la señal, después se removió la tendencia, y por último se le aplicó un taper tipo Hanning. El porcentaje de la ventana sometido al taper fue de 5%. Los espectros de amplitud obtenidos fueron suavizados mediante el comando “smooth” (el cual hace un promedio de tres puntos, uno

hacia adelante y uno hacia atrás) de SAC, esto para evitar los problemas que presentan las amplitudes obtenidas mediante la división espectral, mencionados por Konno y Ohmachi (1998).

Una vez obtenidos los espectros de amplitud, se eligió la estación de referencia contra la cual se realizarían los cocientes espectrales; esta selección se llevó a cabo con base en las estaciones que registraron cada evento, en donde las estaciones elegidas para funcionar como estación de referencia fueron PTVM (Pico Tres Padres) y PBVM (Peñón de los Baños).

Las estaciones elegidas se encuentran en roca firme y ambas estaciones están ubicadas en cerros. En la Tabla 4.5 se puede observar que las estaciones PTVM y PBVG registraron casi todos los eventos, con excepción de los eventos 9 y 19, en donde ninguna de las dos estaciones anteriores registraron el evento.

En la Tabla 4.5 se observa que seis eventos (1, 2, 6, 10, 13 y 14) fueron registrados tanto por la estación PTVM como por la estación PBVM. La elección de la estación de referencia en estos casos se realizó en base a la señal sísmica, se tomó en cuenta que la señal no contuviera mucho ruido local y que el primer arribo se observara con mayor claridad. La estación elegida fue PTVM, de acuerdo a los criterios mencionados.

Las estaciones PBVM y PTVM no registraron los eventos 9 y 19, en este caso, las estaciones de referencia fueron TOVM y MAVM, respectivamente. Para el evento 9, la única estación disponible con sensor Guralp fue TOVM (Toluca), ésta cumplía con los criterios para ser elegida como estación de referencia. Para el evento 19, la estación MAVM (Malinalco) cumplía con los criterios para ser la estación de referencia.

En la descripción de los mapas del Valle de México (en donde se tienen las gráficas de barras) se hace mención de un rango de periodos o frecuencias,

en la cual se observan las amplificaciones que se tienen en el Valle de México, y además pueden ser vistas en las gráficas de los cocientes espectrales.

Para la realización de las gráficas de barras, fue necesario obtener la amplitud máxima de cada componente, obtenida de los cocientes espectrales, y así, posteriormente realizar la división del valor de la estación con el valor de la amplitud máxima de cada componente, esto con la finalidad de realizar la normalización. El valor de amplificación (A) varía entre $0 < A \leq 1$, en donde el valor cercano a cero representa nula amplificación, y el valor de uno representa la amplificación máxima.

Las amplitudes máximas y las frecuencias se ordenaron por fecha y por componente. El periodo dominante de la onda sísmica se obtuvo como el recíproco de la frecuencia.

En las gráficas de barras, los números inferiores representan el valor del periodo fundamental y los números en la parte superior representan el valor A , en donde $0 < A \leq 1$ (Figura 4.6).

FECHA	Evento	Estaciones que registraron el evento																			
		Reftek										Guralp									
01/01/2011	1		AP	BJ													MA	MZ	OR	PB	PT
02/01/2011	2		AP	BJ													MA	MZ	OR	PB	PT
11/03/2011	3		AP	BJ													MA	MZ	OR	PB	PT
06/07/2011	4																MA	MZ	OR	PB	PT
24/08/2011	5		AP	BJ	CO	CJ											MA	MZ	OR	PB	PT
15/09/2011	6	AO	AP	BJ	CO												MA	MZ	OR	PB	PT
23/10/2011	7																MA	MZ	OR	PB	PT
20/03/2012	8		AP	BJ	CO	CT	GM	IC	IP								MA	MZ	OR	PB	PT
11/04/2012	9	AO	AP														MA	MZ	OR	PB	PT
14/08/2012	10	AO		BJ	CO	CJ	CT										MA	MZ	OR	PB	PT
31/08/2012	11	AO		BJ	CO	CJ	CT										MA	MZ	OR	PB	PT
05/09/2012	12	AO	AP		CO	CJ	CT	IC									MA	MZ	OR	PB	PT
30/09/2012	13	AO	AP	BJ	CO	CJ		IC	IP	MC							MA	MZ	OR	PB	PT
28/10/2012	14	AO	AP	BJ	CO	CJ	MP		IP	MC	MH	TH	TL				MA	MZ	OR	PB	PT
07/11/2012	15	AO	AP	BJ	CO	CT	MP	IC									MA	MZ	OR	PB	PT
10/12/2012	16	AO	AP	BJ	CO	CJ			IP								MA	MZ	OR	PB	PT
16/04/2013	18	AO	AP	BJ	CO	CJ	CT	IC									MA	MZ	OR	PB	PT
19/04/2013	19	AO	AP	BJ		CJ											MA	MZ	OR	PB	PT

Tabla 4-5. Estaciones sísmicas que registraron los eventos. Los eventos 14 y 15 fueron registrados por el mayor número de estaciones (20 estaciones) y el evento 7 fue registrado por el menor número de estaciones (nueve estaciones).

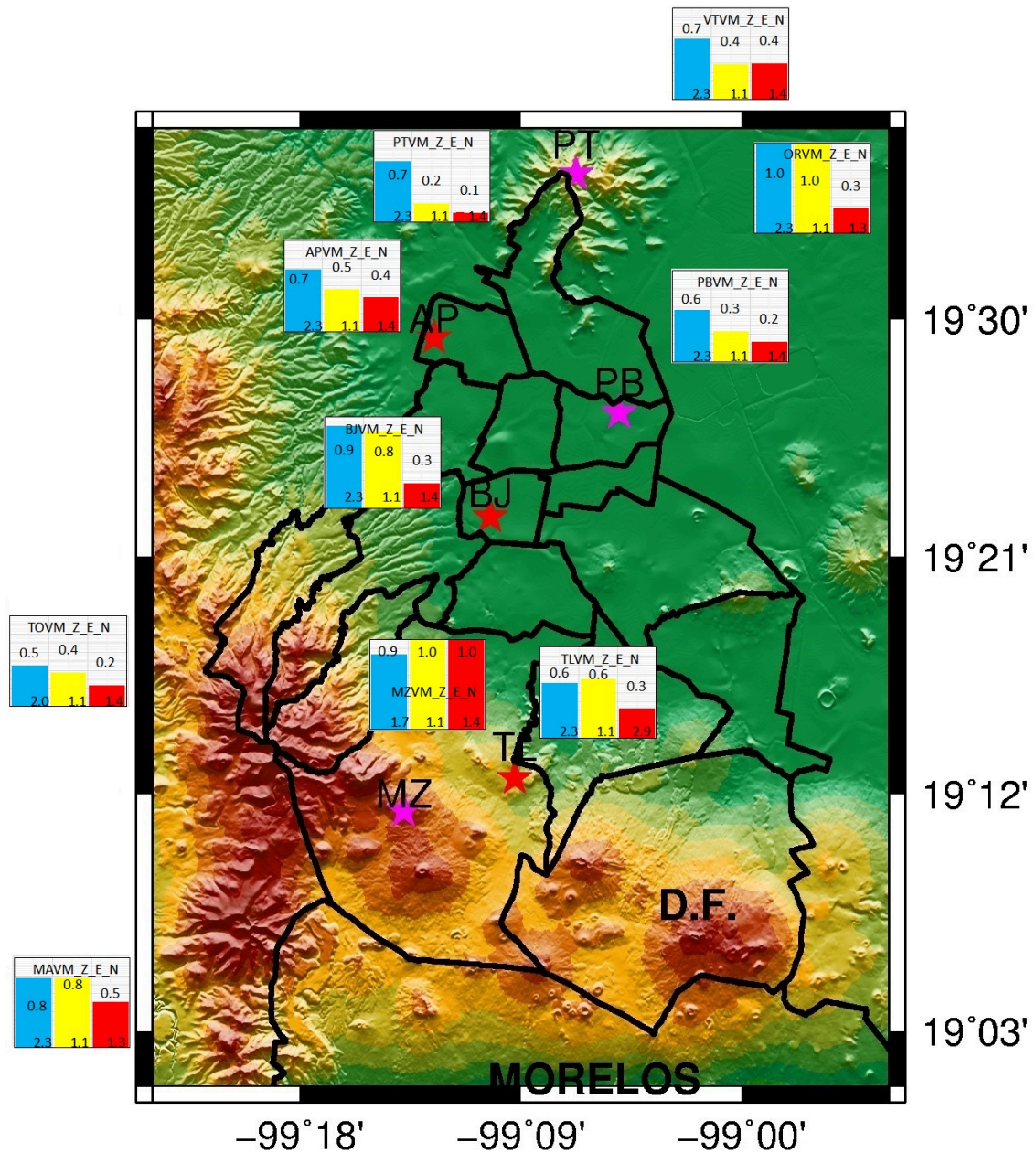


Figura 4-6. Para el caso de las gráficas del D.F., se muestra un ejemplo del contenido de las gráficas de barras. Se tiene un mapa topográfico del D.F. con división delegacional, el cual muestra las ampliaciones en cada estación, en color azul, amarillo y rojo se muestran los componentes vertical, este y norte, respectivamente. Las ampliaciones (normalizadas) se presentan en la parte superior de la gráfica de barras y en la parte inferior se muestran los periodos fundamentales. Las estaciones pertenecientes a los sensores Guralp (Red del Valle de México) se ubican aproximadamente en la dirección en donde se encontrarían.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

En este estudio se presenta el análisis de 16 eventos sísmicos, los cuales se encuentran divididos en cuatro regiones acimutales preferenciales: el primero con dirección NW, con un total de siete eventos; el segundo con dirección NE, con un total de dos eventos; el tercero con dirección SE, con un total de cinco eventos; el cuarto con dirección SW, con un total de dos eventos. En la Tabla 5.1 se muestran los eventos utilizados en este trabajo, en ella se enlistan los principales parámetros del sismo: fecha, hora, profundidad, magnitud, distancia y su acimut de arribo.

Fecha	Hora	Profundidad [km]	Magnitud Mw	Acimut	Evento	Distancia [km]
01/01/2011	09:56:58	576.8	7	SE	1	6410
02/01/2011	18:20:18	24	7.2	SE	2	6925
11/03/2011	05:46:24	29	9	NW	3	10970
06/07/2011	19:03:18	17	7.6	SW	4	9880
24/08/2011	17:46:12	147	7	SE	5	4020
15/09/2011	19:31:04	644.6	7.3	SW	6	9840
23/10/2011	10:41:23	16	7.1	NE	7	12507
11/04/2012	10:43:11	25.1	8.4	NW	9	17430
14/08/2012	02:59:38	583.2	7.7	NW	10	10095
05/09/2012	14:42:08	35	7.6	SE	12	1808
30/09/2012	16:31:36	170	7.3	SE	13	3135
28/10/2012	03:04:09	14	7.8	NW	14	4678
07/11/2012	16:35:47	24	7.4	SE	15	974
10/12/2012	16:53:09	155	7.1	NW	16	14560
16/04/2013	10:44:21	82	7.7	NE	18	14390
19/04/2013	03:05:53	112.2	7.2	NW	19	9935

Tabla 5-1. Se enlistan en la tabla los principales parámetros del sismo: fecha, hora, profundidad, magnitud, distancia y su acimut de arribo. Se contemplan 16 eventos, los cuales fueron utilizados en la obtención de los cocientes espectrales.

En la Figura 5.1 se muestran las cuatro regiones acimutales preferenciales de arribo de los eventos sísmicos, en donde las flechas en color azul hacen referencia a las trayectorias de arribo. Los números que se encuentran al lado de las flechas azules señalan los eventos sísmicos, los cuales se enlistan en la Tabla 5.1.

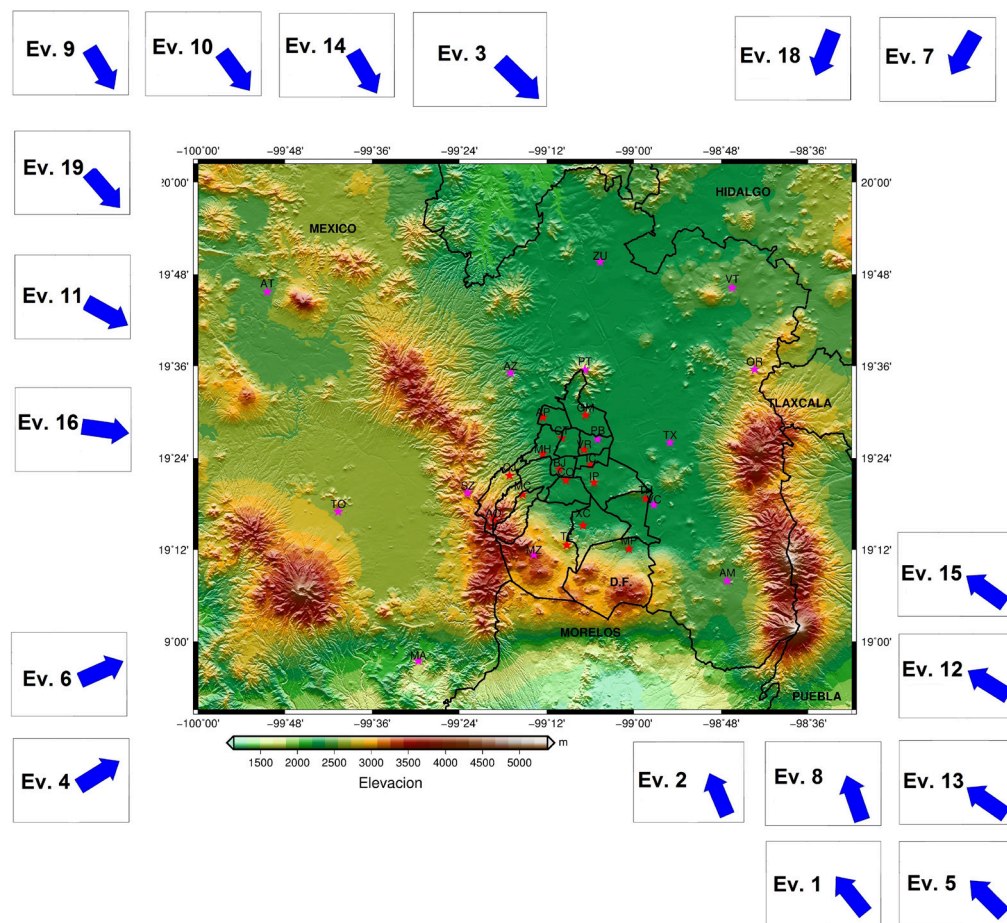


Figura 5-1. Mapa topográfico del Valle de México, en ella se muestra la región del Distrito Federal(D.F., con sus 16 delegaciones) y el Estado de México. El color rojo corresponde a las estaciones ubicadas en las delegaciones del D.F., las cuales operan con sensores Reftek. En color rosado se tienen las estaciones con sensores Guralp, las cuales se encuentran fuera del D.F., con excepción de las estaciones PBVM (Peñón de los Baños) y MZVM(Mezontepec), ambas se encuentran dentro del D.F.

En la Figura 5.2 se muestra la ubicación de los sismos utilizados en este estudio y se observan las trayectorias mínimas de las ondas sísmicas, desde el evento hasta el arribo al Valle de México. Las trayectorias acimutales están divididas en cuatro regiones, tal y como se mencionó anteriormente.

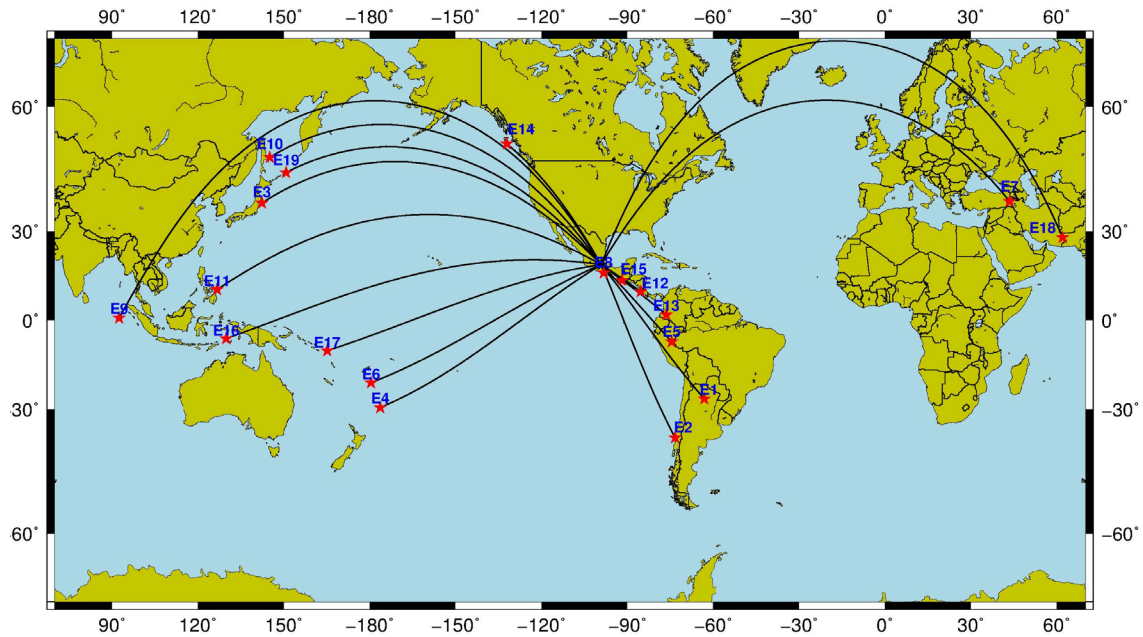


Figura 5-2. Ubicación de los sismos utilizados en este estudio, el cual muestra las trayectorias mínimas de los eventos sísmicos, desde el epicentro hasta el arribo al Valle de México. Se encuentra dividido en cuatro regiones: NW, NE, SE y SW. Los eventos tienen el siguiente orden y se enlistan en forma descendente: izquierda, E10, E19, E3, E11, E9, E16, E17, E6, E4; centro, E14, E8, E15, E12, E13, E5, E1, E2; derecha, E7, E18.

Como se mencionó en la Sección 4.3.2, se tienen 19 eventos sísmicos. No fueron contemplados tres eventos (11 y 17), esto debido al efecto constructivo de la onda P. El evento 8 no se consideró debido a que no está catalogado como un telesismo, su distancia es de 300 km desde el epicentro al Valle de México. Los cocientes espectrales fueron realizados para los tres componentes (este, norte y vertical) respecto a un sitio de referencia. Se tienen como estación de referencia a PBVM (Peñón de los Baños) y PTVM (Pico Tres Padres) en donde cada uno registró siete y ocho eventos, respectivamente. Los evento 9 y 19 tienen como estación de referencia a TOVM (Toluca) y MAVM (Malinalco), respectivamente, debido a que PBVM y PTVM no registraron esos eventos. Las estaciones seleccionadas para ser la estación de referencia fueron elegidas debido a que se encuentran en zona rocosa y se cuidó que el ruido local en el sismograma fuera mínimo.

Se presenta a continuación el análisis de las gráficas obtenidas con los cocientes espectrales. Se presenta la descripción para el evento 1, el cual muestra dos mapas: uno correspondiente a un mapa “regional”, en donde se tiene el Valle de México (Figura 5.3); y el otro (Figura 5.4) en donde se observa el Distrito Federal.

La Figura 5.3 corresponde a un mapa del Valle de México, en ella se tienen gráficos individuales, obtenidos a partir de los cocientes espectrales. Los gráficos de barra fueron normalizados con respecto al valor con mayor amplificación de cada componente. En dicha figura se contempla la estación de referencia, en el caso del evento 1, la estación de referencia corresponde a PTVM (Pico Tres Padres), por lo que en la Figura 5.3 se muestra la amplificación relativa correspondiente a esa estación. Las gráficas de barras muestran los tres componentes en color azul, amarillo y rojo, indicando los componentes z, este y norte, respectivamente. En las gráficas de barras se muestran las amplificaciones relativas (normalizadas) en la parte superior y en la parte inferior se tienen los periodos fundamentales.

En la Figura 5.4 se tiene un mapa con un acercamiento, el cual contempla el Distrito Federal (D.F) y su división delegacional, en esta gráfica se aprecian mejor las gráficas de barra. Para el caso de las gráficas de los cocientes que se encuentran fuera del D.F., estos fueron colocados aproximadamente en la dirección de su ubicación, como en el caso de las estaciones VTVM (Valle de Teotihuacán) y ORVM (Órganos), ambos se encuentran en la parte superior derecha de la gráfica, por otro lado, las estaciones TOVM (Toluca) y MAVM (Malinalco) se ubicaron en la parte inferior izquierda.

Las descripciones para los demás eventos se realizan de la misma forma, pero con las imágenes en el anexo de este documento, debido a la facilidad que esto presenta.

5.1. Eventos con acimut SE

El evento 1 (Figura 5.3 y 5.4) con magnitud M_w 7, profundidad de 576 km y una distancia de 6410 km, proveniente del norte de Argentina, presenta amplificaciones de más de 0.5 veces en tres estaciones dentro del D.F. y se observa que una estación fuera de los límites del D.F. tiene amplificaciones relativas de 0.8 veces en los componentes horizontales. Las estaciones con mayor amplificación se encuentran dentro del límite del D.F. y son: BJVM (Benito Juárez), MZVM (Mezontepec), TLVM (Tlalpan), con excepción de la estación VTVM (Valle de Teotihuacán). Los periodos que se observan en este sismo van de 2 a 5 s, y en el rango de frecuencias de 0.2 a 0.5 Hz.

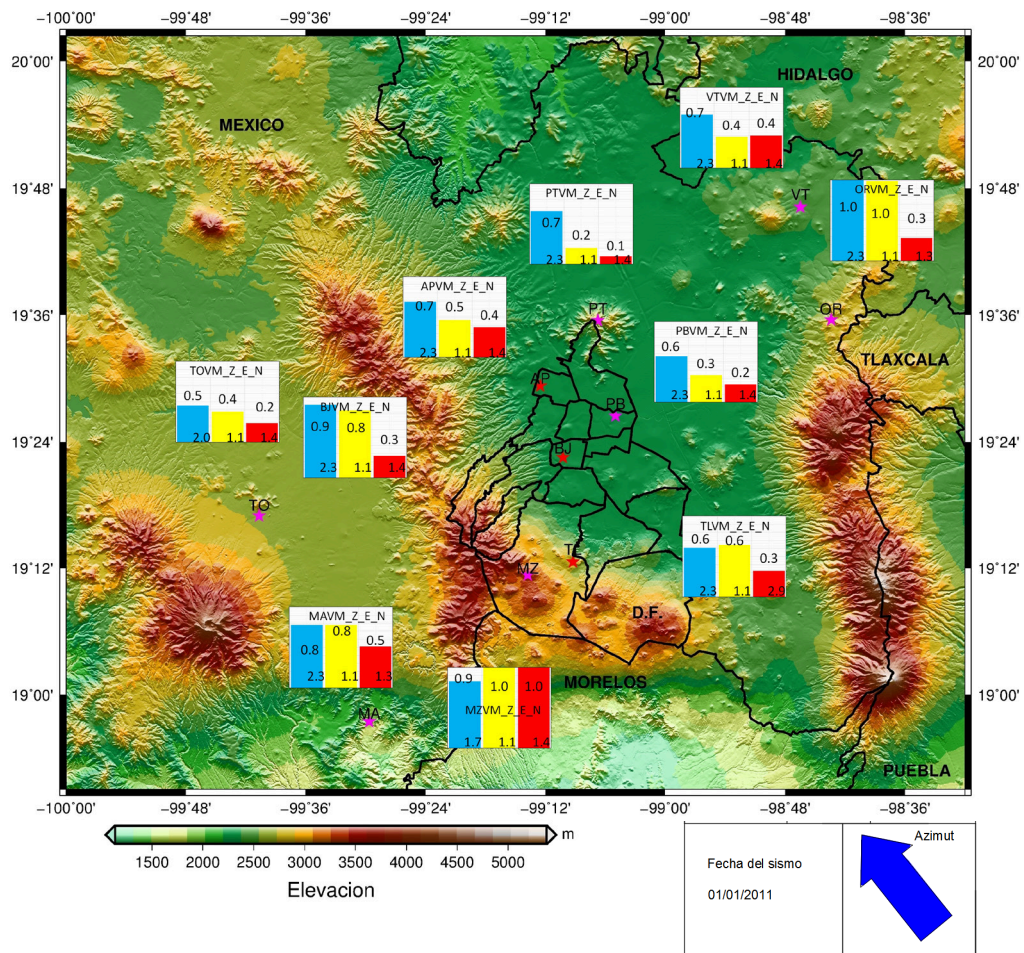


Figura 5-3. Mapa topográfico del Valle de México, correspondiente al evento 1 (Tabla 5.1), el cual proviene del norte de Argentina. Se muestra el Estado de México y el D.F. (con división delegacional). En ella se muestran las gráficas individuales (gráficas de barras) obtenidas de los cocientes espectrales. El color azul, amarillo y rojo representan los componentes vertical, este y norte, respectivamente. La estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres) y se encuentra al norte del D.F. Las gráficas de barras están normalizadas respecto a la amplitud máxima de cada componente, en la parte superior se encuentra el valor de amplificación y en la parte inferior se tienen los periodos fundamentales.

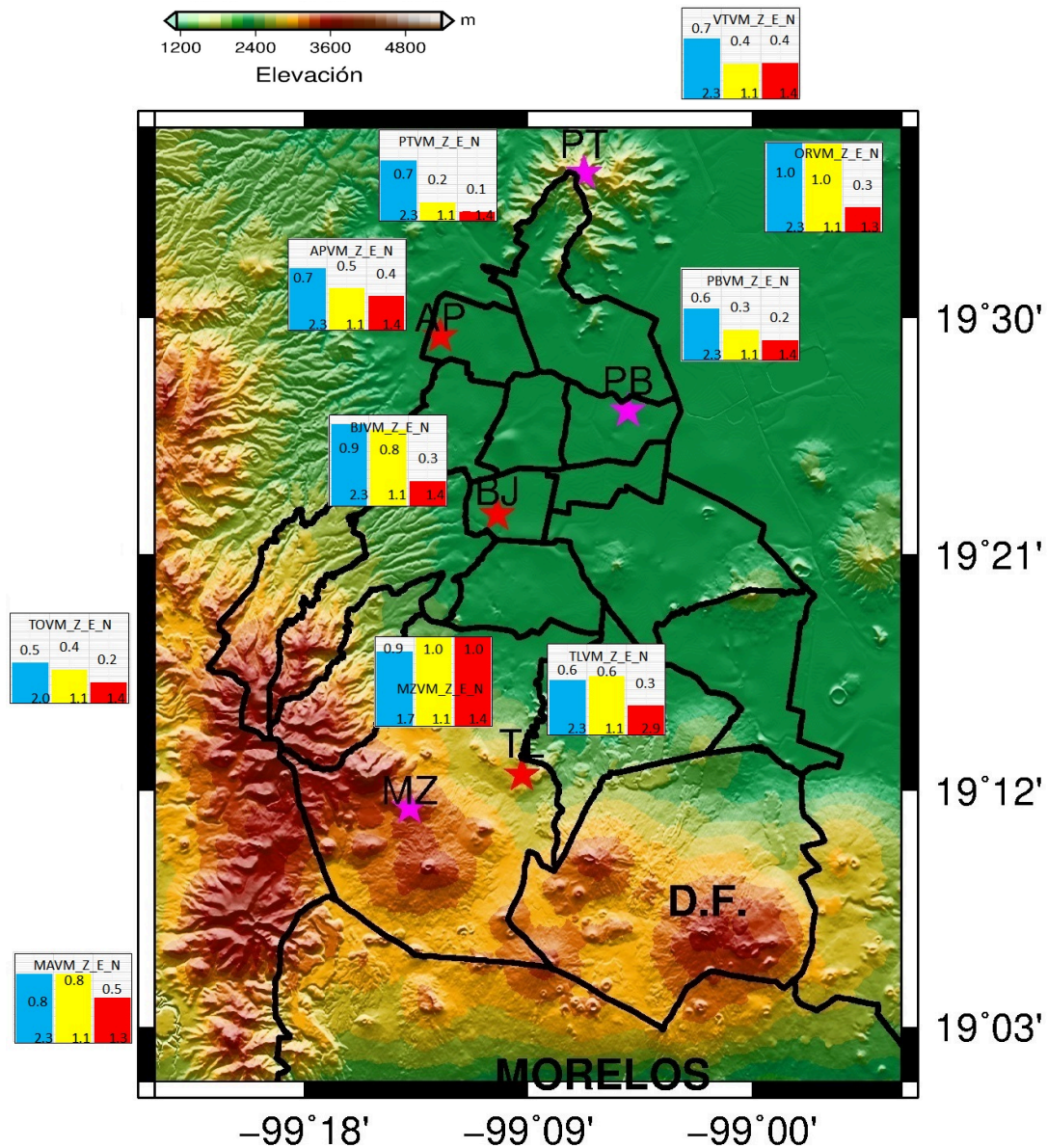


Figura 5-4. Mapa topográfico del D.F., se observa la división delegacional. Se muestran las amplificaciones obtenidas a partir de los cocientes espectrales para el caso de la onda P. Las estaciones que están fuera del D.F. se ubican aproximadamente en la dirección en que se encontrarían. El color azul, amarillo y rojo representan los componentes vertical, este y norte, respectivamente. La estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres) y se encuentra al norte del D.F. Las gráficas de barras están normalizadas respecto a la amplitud máxima de cada componente, en la parte superior se encuentra el valor de amplificación y en la parte inferior se tienen los periodos fundamentales.

La Figura 5.5 se muestra el resultado obtenido para la onda S del evento 1. Se observa que las amplificaciones obtenidas en las estaciones BJVM, MZVM, TLVM que se encuentran dentro del D.F., presenta valores que siguen siendo más grandes (cerca de 2 veces) comparadas con las que se encuentran en el Estado de México. Las estaciones VTVM (Valle de

Teotihuacán) y MAVM (Malinalco) tienen amplificaciones relativas de aproximadamente 0.8 veces. Los periodos que se observan en este evento van de 2 a 5 s.

A continuación se describen los gráficos de los cocientes espectrales relativos del evento 1, tanto para la onda P como para la S, con la estación PTVM (Pico Tres Padres) como estación de referencia. Los gráficos presentados corresponden a cada estación y se enlistan por componente, tanto para la Red del Valle de México (RVM) como para la Red Delegacional del D.F. (RDDF).

En la Figura 5.6 se muestran los cocientes espectrales para el evento 1, obtenidas a partir de la onda P. Las gráficas indican la amplificación en función de la frecuencia. En el componente este, tanto para la RVM como para la RDDF se observan amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 5 veces, cercano a 0.5 Hz. La estación VRVM (Venustiano Carranza) tiene la mayor amplificación relativa, aproximadamente de 9 veces alrededor de 0.3 Hz. La estación MZVM (Mezontepec) tiene un pico de amplificación en 0.45 Hz, con una amplificación relativa de 4 veces. En la dirección norte, tanto para la RVM como para la RDDF se detectaron dos picos de amplificación relativa, que van desde 1 hasta 13 veces, ubicados en 0.35 y 0.7 Hz. Nuevamente resalta la estación VRVM, con amplificación relativa de 13 veces, la cual se ubica en 0.3 Hz. En el componente vertical, tanto para la RVM como para la RDDF se observa que para frecuencias menores a 0.6 Hz, las amplificaciones relativas muestran un comportamiento lineal, en el caso de la RDDF, se tienen amplificaciones alrededor de 1.5 veces, a diferencia de la RVM, en donde la amplificación es de 1 vez.

En la Figura 5.7 se muestran los cocientes espectrales para el evento 1, obtenidas a partir de la onda S, las gráficas indican la amplificación en función de la frecuencia. En el componente este, para la RVM se observan amplificaciones relativas desde 2 hasta un factor de 6 veces y para la RDDF, se observan amplificaciones relativas desde 4 hasta un factor de 24 veces,

cercanas a 0.5 Hz. La estación VRVM (Venustiano Carranza) muestra la mayor amplificación relativa, casi de 24 veces alrededor de 0.5 Hz. En el componente norte, la RVM tiene amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 2.5 veces, en 0.35 Hz. La RDDF presenta dos picos de amplificaciones, una en 0.4 y la otra en 0.65 Hz, con amplificaciones relativas desde 1 hasta 7 veces. Nuevamente resalta la estación VRVM, con amplificación relativa de 7 veces en 0.3 Hz. En la dirección vertical, tanto para la RVM como para la RDDF, se observan amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 3 veces, aproximadamente en 0.4 Hz.

Es importante aclarar que en las gráficas de barras no se incluyó la estación VRVM, debido a que presenta la mayor amplificación relativa (hasta 100 veces) y no hubiera permitido distinguir las amplitudes de las demás estaciones al realizar la normalización por componente. Los resultados obtenidos con esta estación no fueron descartados, ya que se incluyó en las gráficas de los cocientes espectrales, esto con el fin de ver si las amplificaciones muy grandes son debidas al instrumento, a la geología o a algún otro factor que pudiera estar produciendo esta anomalía en los cocientes.

Pasa algo similar con la estación ICVM (Iztacalco), ya que también presenta amplificaciones relativas muy grandes (hasta 70 veces), por lo que los resultados se discuten más adelante.

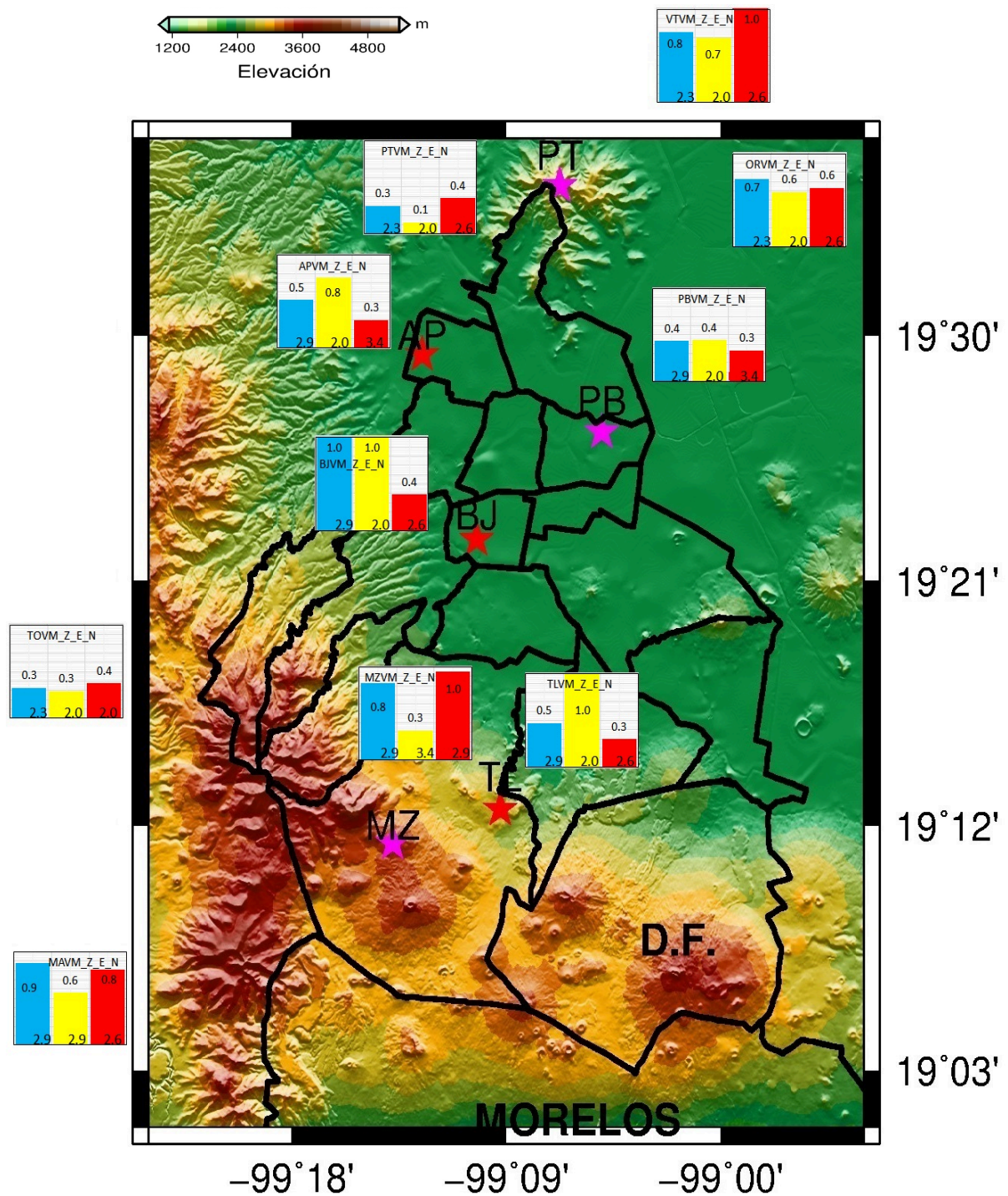


Figura 5-5. Mapa topográfico del D.F., se observa la división delegacional. Se tienen las amplificaciones obtenidas de la onda S. Las estaciones que están fuera del D.F. se ubican aproximadamente en la dirección en que se encontrarían. El color azul, amarillo y rojo representan los componentes vertical, este y norte, respectivamente. La estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres) y se encuentra al norte del D.F. Las gráficas de barras están normalizadas respecto a la amplitud máxima de cada componente, en la parte superior se encuentra el valor de amplificación y en la parte inferior se tienen los periodos fundamentales.

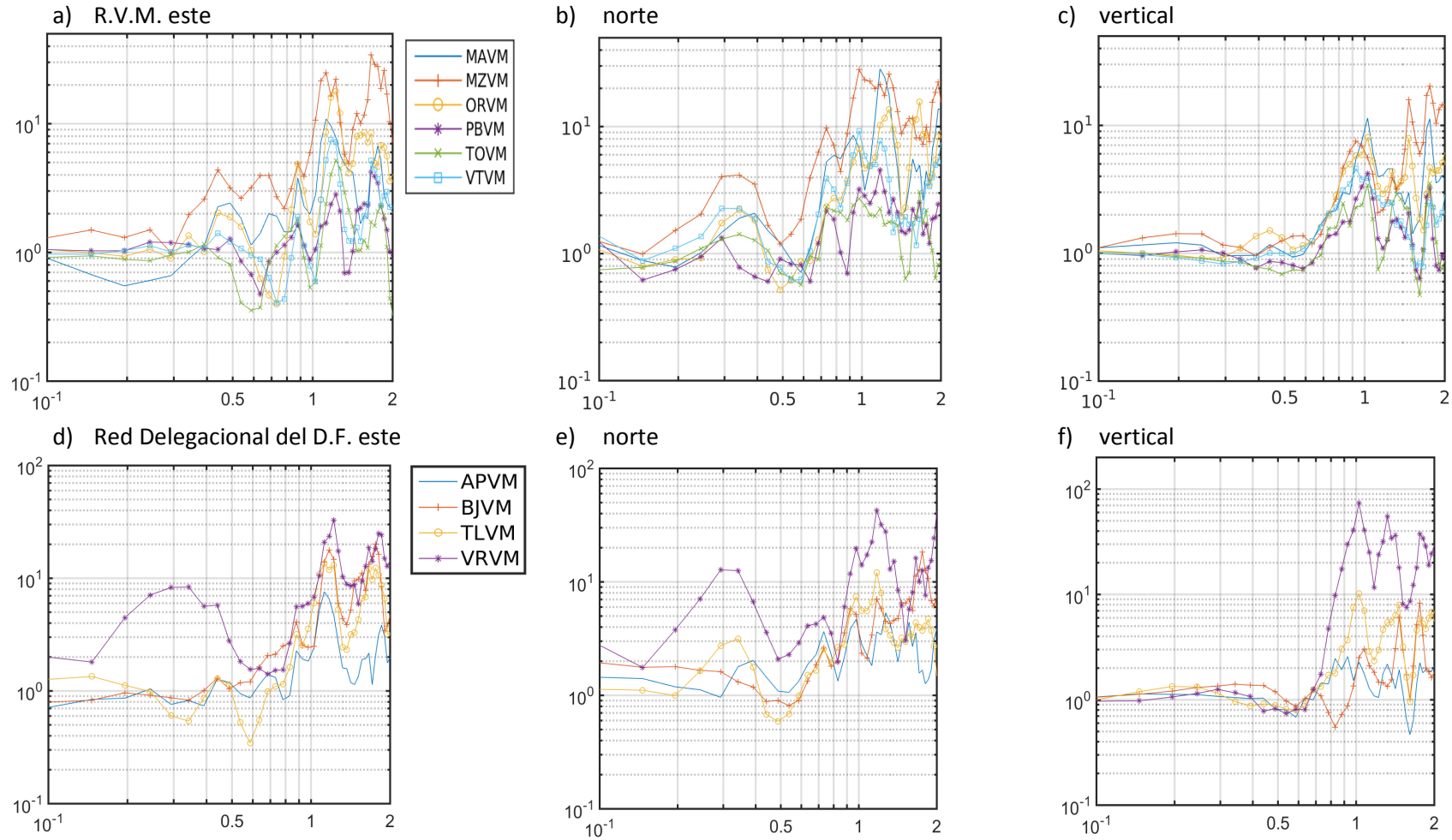


Figura 5.6 Amplitud en función de la frecuencia para 10 sitios (6 registrados por la RVM y 4 por la RDDF), correspondiente al evento 1, para la onda P. Las Figuras a), b) y c) corresponden a los componentes este, norte y vertical de la RVM, respectivamente. Las Figuras d), e) y f) corresponden a los componentes este, norte y vertical de la RDDF, respectivamente. Se observan amplificaciones (1-12 veces) en el rango de frecuencias de 0.2 a 0.5 Hz.

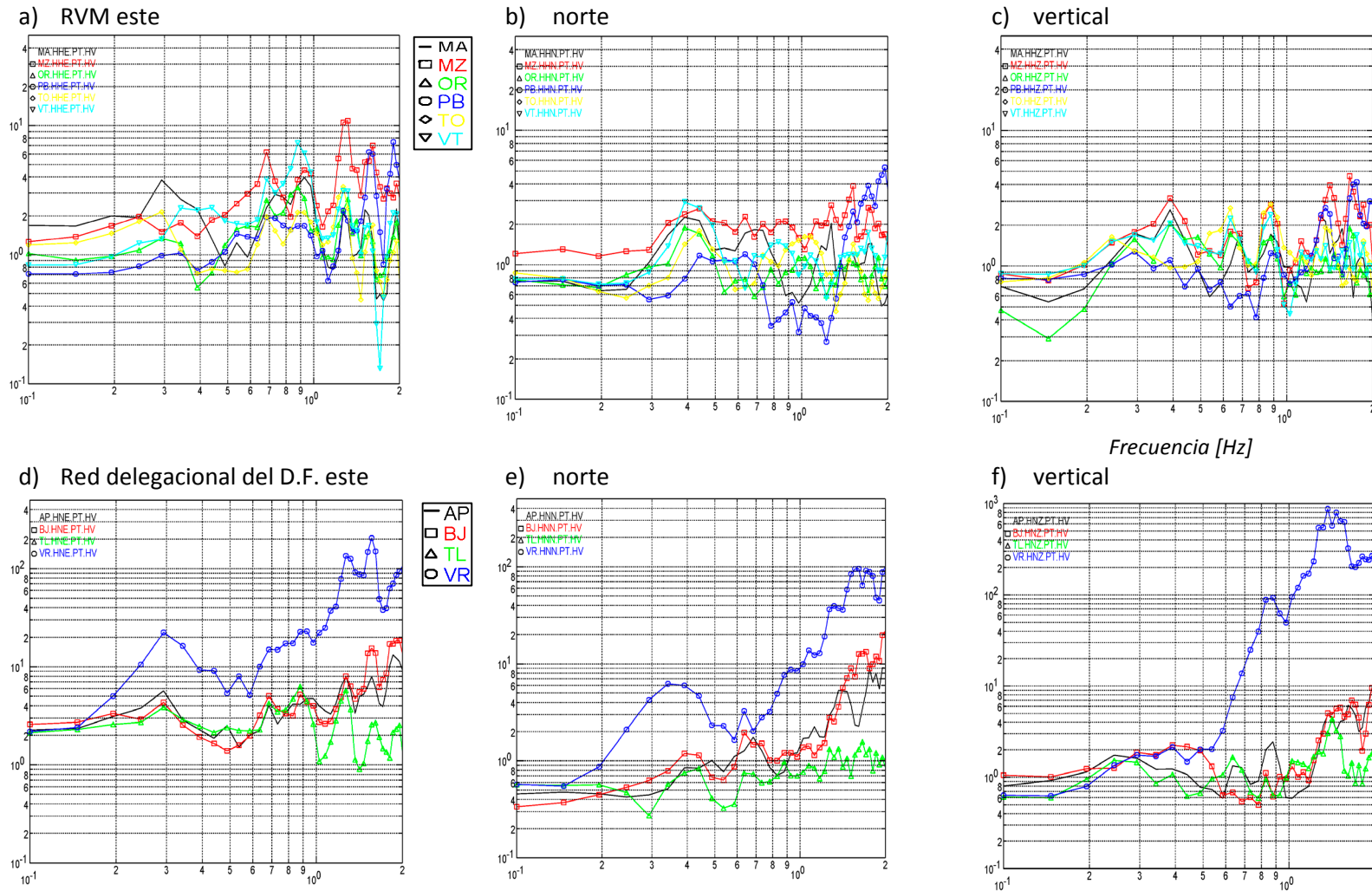


Figura 5.7 Amplitud en función de la frecuencia para 10 sitios (6 registrados por la RVM y 4 por la RDDF), correspondiente al evento 1, para la onda S. Las Figuras a), b) y c) corresponden a los componentes este, norte y vertical de la RVM, respectivamente. Las Figuras d), e) y f) corresponden a los componentes este, norte y vertical de la RDDF, respectivamente. Se observan amplificaciones (1-10 veces) en el rango de frecuencias de 0.2 a 0.5 Hz, con excepción del componente este (RDDF), en donde se tienen amplificaciones de 4-23 veces.

El evento 2 con magnitud Mw 7.2, profundidad de 24 km, una distancia de 6925 km, proviene del sur de Chile y cuya estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). En la dirección este, las estaciones de la RDDF presentan amplificaciones relativas de 1 a 2 veces en 0.5 Hz. La RVM tiene amplificaciones de 1 a 2 veces en 0.5 Hz, con excepción de MZVM (Mezontepec), el cual presenta una amplificación de 5 veces, cercana a 0.5 Hz. En el componente norte, tanto para la RVM como para la RDDF se observan dos picos de amplificación relativa, ambas desde 1 hasta 7 veces, ubicados aproximadamente en 0.5 y 0.8 Hz. MZVM y TLVM (Tlalpan) tienen amplificación relativa de 5.5 veces en 0.5 y 0.6 Hz, respectivamente. En el componente vertical, para la RVM se observa que los picos de amplificación relativa son menores a 2 veces en 0.5 Hz, y en la RDDF, van desde 1 a 2 veces en 0.5 Hz ([Anexo A.2](#)).

El evento 5 con magnitud Mw 7, profundidad de 147 km, distancia de 4020 km, proviene del norte de Perú y cuya estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Para la RVM se observan amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 8 veces en la dirección este, cercano a 0.8 Hz. Las estaciones MZVM (Mezontepec), MAVM (Malinalco) y ZUVM (Zumpango) tienen una amplificación relativa entre 5 y 8 veces en 0.8 Hz. La RDDF presenta dos picos de amplificación, una en 0.5 Hz, con amplificación relativa de 1 hasta 2 veces, y la otra en 0.8 Hz, desde 1 hasta 4 veces. COVM (Coyoacán), BJVM (Benito Juárez) y CJVM (Cuajimalpa) presentan amplificaciones relativas entre 3 y 4 veces en 0.8 Hz. En el componente norte, tanto para la RVM como para la RDDF se observan amplificaciones relativas desde 3 hasta 14 veces, aproximadamente en 0.7 Hz. ZUVM tiene la mayor amplificación relativa (14 veces) en 0.73 Hz. En la dirección vertical, tanto para la RVM como para la RDDF se observa que para frecuencias menores a 0.4 Hz, las amplificaciones relativas muestran un comportamiento lineal, en el caso de la RDDF, se tienen amplificaciones de alrededor de 1.3 veces, a diferencia de la RVM, en donde la amplificación es de 1 vez. También se

distinguen dos picos de amplificación para la RVM y la RDDF, una en 0.5 Hz y la otra en 0.8 Hz, con valores de 1 hasta 4 veces ([Anexo A.3.](#)).

El evento 12 con magnitud Mw 7.6, profundidad de 35 km, distancia de 1808 km, proviene del este de Costa Rica y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM se observan amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 5 veces en el componente este, cercano a 0.6 Hz. La estación VCVM (Valle de Chalco) tiene dos picos de amplificación, una de 5 y la otra de 4 veces en 0.25 y 0.6 Hz, respectivamente. La RDDF presenta amplificación relativa de 1 hasta 4 veces en 0.6 Hz. ICVM (Iztacalco) y VRVM (Venustiano Carranza) tienen amplificaciones relativas de 3 y 4 veces en 0.6 Hz. En la dirección norte, para la RVM se observan dos picos de amplificación relativa, que van desde 2 hasta un factor de 8 veces, en 0.25 y 0.6 Hz. VCVM tiene una amplificación relativa de 22 veces en 0.25 Hz. La RDDF muestra dos picos de amplificación, que va desde 2 hasta 30 veces, en 0.25 y 0.6 Hz. ICVM y VRVM tienen las amplificaciones relativas más grandes (30 veces) en 0.25 Hz. En el componente vertical, la RVM tiene amplificaciones relativas (1 vez) con un comportamiento lineal en frecuencias menores que 0.7 Hz y un pico de amplificación desde 2 hasta 6 veces en 0.8 Hz. En el caso de la RDDF, la amplificación es alrededor de 2 veces en 0.3 Hz y se registra otro pico de amplificación desde 1 hasta 8 veces en 0.8 Hz ([Anexo A.4.](#)).

El evento 13 con magnitud Mw 7.3, profundidad de 170 km, distancia de 3135 km, proviene del norte de Colombia y cuya estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Para la RVM se observan amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 20 veces en el componente este, cercano a 0.7 Hz. Las estaciones PBVM (Peñón de los Baños) y ZUVM (Zumpango) tienen una amplificación relativa de 10 y 20 veces en 0.8 Hz, respectivamente. La RDDF presenta dos picos de amplificación, una en 0.2 Hz, que va desde 1 hasta 7 veces, y la otra en 0.8 Hz desde 4 hasta 27 veces. ICVM (Iztacalco), VRVM (Venustiano Carranza) y AOVM (Álvaro Obregón) presentan amplificaciones

relativas desde 2 hasta 6 veces en 0.2 Hz y de 10 a 27 veces en 0.8 Hz. En la dirección norte, en la RVM se observan amplificaciones relativas que van desde 3 hasta 12 veces, alrededor de 0.7 Hz. ZUVM (Zumpango) tiene la mayor amplificación relativa (12 veces) en 0.73 Hz. La RDDF presenta dos picos de amplificación relativa, una en 0.2 Hz, desde 2 hasta 9 veces, y la otra en 0.6 Hz, con amplificaciones desde 3 hasta 40 veces. ICVM (Iztacalco), VRVM (Venustiano Carranza) y AOVM (Álvaro Obregón) presentan amplificaciones relativas desde 20 hasta 40 veces en 0.6 Hz. En el componente vertical, tanto para la RVM como para la RDDF se observa que para frecuencias menores que 0.4 Hz, las amplificaciones relativas muestran un comportamiento lineal, en el caso de la RDDF, se tienen amplificaciones de aproximadamente 2 veces, a diferencia de la RVM, en donde la amplificación es de 1 vez. La RVM y la RDDF presentan dos picos de amplificación relativa, una en 0.5 y la otra en 0.8 Hz. ICVM, VRVM, AOVM, THVM (Tláhuac), ZUVM presentan amplificaciones relativas desde 2.5 a 5 veces, en 0.5 y 0.8 Hz, respectivamente ([Anexo A.5.](#)).

El evento 15 con magnitud Mw 7.4, profundidad de 24 km, distancia de 974 km, proviene del sur de Guatemala y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM se detectaron amplificaciones relativas desde 1 hasta un factor de 5 veces en el componente este, cercano a 0.7 Hz. Las estación AMVM (Amecameca) tiene la máxima amplificación relativa (5 veces) en 0.75 Hz. La RDDF muestra dos picos de amplificación, una en 0.35 Hz, con amplificación relativa de 1 hasta 7 veces, y la otra en 0.8 Hz desde 1 hasta 5 veces. VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco) presentan amplificaciones relativas de 2.5 y 6 veces en 0.35 Hz, respectivamente, por otro lado, las estaciones AOVM (Álvaro Obregón) y CTVM (Cuauhtémoc) presentan amplificaciones relativas de 5 veces en 0.8 Hz. Las estaciones anteriores presentan las amplificaciones más grandes. En el componente norte, en la RVM se registraron dos picos de amplificación relativa, una que va desde 1 hasta 8 veces, aproximadamente en 0.35 Hz y la otra desde 1

hasta 10 veces en 0.7 Hz. TOVM (Toluca), AMVM (Amecameca) y MAVM (Malinalco) presentan las amplificaciones más grandes. Para la RDDF, esta presenta dos picos de amplificación relativa, una en 0.35 Hz, desde 2.5 hasta 20 veces, y la otra en 0.7 Hz, con amplificaciones desde 1 hasta 7 veces. ICVM y AOVM muestra amplificaciones relativas de 20 y de 7 veces en 0.35 y 0.7 Hz, respectivamente. En la dirección vertical, para la RVM se tiene amplificaciones relativas de alrededor de 1 vez para frecuencias menores a 0.5 Hz, excepto para la estación AMVM, que tiene un pico de amplificación cercano a 3 en 0.35 Hz. Se distingue otro pico de amplificación en 0.7 Hz, en donde AMVM y TOVM tienen amplificaciones relativas cercanas a 14 veces. Para el caso de la RDDF se aprecian dos picos de amplificación, una aproximadamente en 0.3 Hz, y la otra en 0.7 Hz. VRVM, AOVM e ICVM exhiben las mayores amplificaciones. Se nota claramente un pico de amplificación para la estación THVM (Tláhuac) de 4 veces en 0.45 Hz ([Anexo A.6](#)).

5.2. Eventos con acimut NW

El evento 3 con magnitud Mw 9, profundidad de 29 km, distancia acimutal de 10970 km, proviene de Japón y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM se observan dos picos de amplificación relativa, una desde 1 hasta un factor de 3 veces en la dirección este, cercano a 0.35 Hz, y la otra desde 1 hasta 6 veces en 0.6 Hz. Las estaciones TXVM (Texcoco), MZVM (Mezontepec) y VTVM (Valle de Teotihuacán) tiene la máxima amplificación relativa (6 veces) en 0.6 Hz. La RDDF muestra amplificaciones relativas entre 0.6 y 0.8 Hz desde 1 hasta 50 veces. VRVM (Venustiano Carranza) expone la máxima amplificación relativa (50 veces) en 0.65 Hz. En el componente norte, en la RVM se registraron dos picos de amplificación relativa, una que va desde 1 hasta 2 veces, alrededor de 0.35 Hz y la otra desde 1 hasta 5 veces en 0.7 Hz. TXVM y MZVM tienen las amplificaciones más grandes, de 5 y 4 veces, en 0.7 Hz, respectivamente. La RDDF presenta dos picos de amplificación relativa, una en 0.35 Hz, desde 2

hasta 27 veces, y la otra en 0.8 Hz, con amplificaciones desde 2 hasta 50 veces. VRVM expone la mayor amplificación relativa, de 50 veces en 0.8 Hz. En la dirección vertical, para la RVM se observa un comportamiento lineal en frecuencias menores que 1 Hz, con amplitudes relativas de alrededor de 1. Para el caso de la RDDF se aprecia un pico de amplificación, aproximadamente en 0.3 Hz con amplificaciones relativas de 1.5 a 2.5 veces ([Anexo B.1.](#)).

El evento 9 con magnitud Mw 8.4, profundidad de 25 km, distancia de 17430 km, proviene del oeste de Malasia y cuya estación de referencia es TOVM (Toluca). En la dirección este, las estaciones de la RDDF registraron amplificaciones relativas entre 1 y 9 veces en 0.6 Hz. Las estaciones ICVM (Iztacalco) y VRVM (Venustiano Carranza) tienen dos picos de amplificación, una en 0.35 y la otra en 0.6 Hz, aproximadamente de 10 veces. En el componente norte, la RDDF muestra amplificaciones relativas desde 1 hasta 8 veces, ubicados alrededor de 0.6 Hz. ICVM y VRVM tienen la mayor amplificación relativa (8 veces) en 0.4 Hz. En la dirección vertical, para la RDDF, se distingue que las amplificaciones relativas van desde 1 hasta 3 veces en 0.6 Hz. ICVM, AOVM (Álvaro Obregón) y VRVM presentan las máximas amplificaciones relativas (3, 2 y 2.3 veces, respectivamente) en 0.6 Hz ([Anexo B.2.](#)).

El evento 10 con magnitud Mw 7.7, profundidad de 583 km, distancia de 10045 km, proviene del norte de Japón y cuya estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Para la RVM, en la dirección este, se observa un comportamiento lineal para frecuencias menores que 0.6 Hz, con amplificaciones relativas de 1 vez. La estación ZUVM (Zumpango) registró la máxima amplificación relativa (2.8 veces) en 0.68 Hz. La RDDF muestra dos picos de amplificación, una en 0.35 Hz, con amplificación relativa de 1 hasta 11 veces, y la otra en 0.7 Hz desde 1 hasta 5 veces. VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco) tienen las amplificaciones máximas (11 veces)

en 0.35 Hz. En el componente norte, en la RVM se observa que ZUVM (Zumpango) y AMVM (Amecameca) tienen amplificación relativa de 4 y 3 veces en 0.65 Hz, respectivamente. La RDDF presenta dos picos de amplificación relativa, una en 0.4 Hz, desde 1 hasta 13 veces, correspondientes a las estaciones VRVM, ICVM y CJVM (Cuajimalpa), el otro pico se ubica en 0.6 Hz, con amplificaciones desde 1 hasta 6 veces. En la dirección vertical, la RVM registró amplificaciones relativas de alrededor de 1 vez para frecuencias menores que 0.8 Hz, excepto para la estación ZUVM, que tiene un pequeño pico de amplificación cercano a 1.5 en 0.45 Hz. Para el caso de la RDDF, el valor de las amplificaciones relativas es cercano a 1.5 para frecuencias menores a 0.5 Hz. Se ve un pico de amplificación relativa para la estación ICVM de 3 veces en 0.7 Hz ([Anexo B.3](#)).

El evento 14 con magnitud Mw 7.8, profundidad de 14 km, distancia de 4678 km, proviene del Louise Island, Canadá y cuya estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Para la RVM se detectaron dos picos de amplificación relativa, una desde 1 hasta un factor de 3 veces en el componente este, cercano a 0.35 Hz, y la otra desde 2 hasta 6 veces en 0.7 Hz. Las estaciones AMVM (Amecameca) y MAVM (Malinalco) tienen la máxima amplificación relativa (6 veces) cercana a 0.65 Hz. La RDDF muestra amplificaciones relativas en 0.7 Hz desde 2 hasta 100 veces. VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco) registraron la máxima amplificación relativa (80 y 100 veces, respectivamente) en 0.7 Hz. En la dirección norte, las estaciones correspondientes a la RVM exhiben amplificaciones de alrededor de 1 vez para frecuencias menores a 1 Hz, con excepción de las siguientes estaciones: ATVM (Atlacomulco), con amplificación relativa de 2.5 veces en 0.45 Hz; AMVM y MAVM con amplificaciones de 3 y 2.2 veces en 0.7 Hz, respectivamente. En la RDDF se detectó amplificaciones relativas de 2 veces para frecuencias menores que 0.8 Hz. En VRVM e ICVM se distingue la mayor amplificación relativa, de 30 y 17 veces en 0.45 Hz, respectivamente. Se tienen amplificaciones relativas cercanas a 3 para BJVM (Benito Juárez) y

MCVM (Magdalena Contreras) en 0.45 Hz. La estación AOVM (Álvaro Obregón) tiene una amplificación relativa de 3.2, cercano a 0.7 Hz. En la dirección vertical, para la RVM, se observan dos picos de amplificación, uno en 0.5 Hz, y el otro en 0.7 Hz, con amplitudes relativas desde 1 hasta 4.5 veces y desde 2 hasta 10 veces, respectivamente. Las estaciones AMVM y MAVM registraron las mayores amplificaciones. En el caso de MAVM, esta tiene una amplificación relativa cercana a 20 veces en 0.9 Hz, y para AMVM, de 9.5 veces en 0.7 Hz. Para la RDDF, se aprecia un pico de amplificación aproximadamente en 0.5 Hz, de 2 a 6 veces y el otro en 0.75 Hz, desde 2 hasta 5.5 veces. Las estaciones VRVM, ICVM y AOVM tienen las mayores amplificaciones relativas (5.6, 4.5 y 3.5 veces, respectivamente) en 0.5 Hz ([Anexo B.4](#)).

El evento 16 con magnitud Mw 7.1, profundidad de 155 km, distancia de 14560 km, proviene del NW de Papúa Nueva Guinea y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM, en el componente vertical, se observa un comportamiento lineal para frecuencias menores a 0.8 Hz, con amplificaciones relativas de 1 vez. La estación SZVM (Salazar) conserva el comportamiento lineal para frecuencias menores que 0.8 Hz, con amplificación relativa de 2 veces. La RDDF presenta un comportamiento lineal para frecuencias menores a 0.8 Hz, con amplificación relativa de 2 veces. Se nota un pico de amplificación relativa para la estación THVM (Tláhuac) de 3 veces en 0.35 Hz ([Anexo B.5](#)).

El evento 19 con magnitud Mw 7.2, profundidad de 112 km, distancia de 9935 km, proviene del NE de Japón y cuya estación de referencia es MAVM (Malinalco). Para la RVM, en el componente vertical, se observa un pico de amplificación en 0.4 Hz, desde 2 hasta 5 veces. La estación TXVM (Texcoco) tiene un pico de amplificación relativa de 5 veces en 0.4 Hz. La RDDF presenta un pico de amplificación en 0.35 Hz, con amplificación relativa desde 2 hasta

6 veces. THVM (Tláhuac) presenta la amplificación relativa máxima en 0.35 Hz de 6 veces (Anexo B.6).

5.3. Eventos con acimut NE

El evento 7 con magnitud Mw 7.1, profundidad de 16 km, distancia de 12507 km, proviene del este de Turquía y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM, en la dirección vertical, se observa un comportamiento lineal para frecuencias menores que 0.8 Hz, con amplificaciones relativas de 1.3 veces. La RDDF registra un comportamiento lineal para frecuencias menores que 0.8 Hz, con amplificación relativa de 1.3 veces. Se nota un pico de amplificación relativa para la estación THVM (Tláhuac) de 2 veces en 0.8 Hz y para la estación XCVM (Xoxhimilco) de 2 veces en 0.7 Hz ([Anexo C.1](#)).

El evento 18 con magnitud Mw 7.7, profundidad de 82 km, distancia de 14390 km, proviene del SE de Irán y cuya estación de referencia es PBVM (Peñón de los Baños). Para la RVM, en el componente vertical, se observa un pico de amplificación relativa desde 1.5 hasta 6 veces en 0.65 Hz. Las estaciones ZUVM (Zumpango) y AMVM (Amecameca) tienen amplificaciones relativas de 6 veces en 0.7 Hz. La RDDF registra un pico de amplificación relativa desde 1 hasta 60 veces. Las estaciones VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco) presentan amplificaciones de aproximadamente 60 veces alrededor de 0.75 Hz ([Anexo C.2](#)).

5.4. Eventos con acimut SW

El evento 4 con magnitud Mw 7.6, profundidad de 17 km y una distancia de 9890 km, proviene del NE de Nueva Zelanda, la estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Este evento no cuenta con registros para las estaciones de la RDDF, se describen las amplificaciones para las estaciones pertenecientes a la RVM. En la dirección este, se observa un pico de

amplificación relativa desde 1 hasta 6.5 veces en 0.7 Hz. La estación MZVM (Mezontepec) exhibe la amplificación máxima, de 6.5 veces en 0.7 Hz. En el componente norte, se tienen dos picos de amplificación relativa, una en 0.3 Hz desde 1 hasta 4.5 veces y la otra en 0.7 Hz desde 1 hasta 10 veces. En el componente vertical, se muestra un pequeño pico de amplificación relativa que va desde 1 hasta 2 veces en 0.5 Hz. La estación ATVM (Atlacomulco) presenta la amplificación máxima, de 2 veces en 0.5 Hz ([Anexo D.1](#)).

El evento 6 con magnitud Mw 7.3, profundidad de 644 km, distancia de 9840 km, proviene del NE de Nueva Zelanda y la estación de referencia es PTVM (Pico Tres Padres). Para la RVM se observan dos picos de amplificaciones relativas, una desde 1 hasta un factor de 2.8 veces en el componente este, cercano a 0.2 Hz, y la otra desde 1 hasta 7 veces en 0.65 Hz. La estación ZUVM (Zumpango) tiene la máxima amplificación relativa (7 veces) en 0.65 Hz. La RDDF presenta amplificaciones relativas en 0.65 Hz desde 1 hasta 7 veces. BJVM (Benito Juárez) y COVM (Coyoacán) muestran la máxima amplificación relativa (7 veces) en 0.65 Hz. En la dirección norte, para la RVM se tienen dos picos de amplificaciones relativas, desde 1 hasta 3 veces, cercano a 0.25 Hz, y la otra desde 3 hasta 20 veces en 0.7 Hz. ZUVM presenta la amplificación máxima (20 veces) en 0.7 Hz. La RDDF muestra dos picos de amplificaciones relativas, una desde 3 hasta un factor de 6 veces, cercano a 0.25 Hz, y la otra desde 2 hasta 14 veces en 0.7 Hz. La estación AOVM (Álvaro Obregón) presenta la máxima amplificación relativa (14 veces) cercano a 0.7 Hz. En el componente vertical, para la RVM se observan dos picos de amplificación, uno en 0.5 Hz, y el otro en 0.7, con amplitudes relativas desde 1 hasta 1.6 veces. Para el caso de la RDDF las amplitudes relativas van desde 1 hasta 2 veces ([Anexo D.2](#)).

Los eventos (4 y 6) provenientes de la región SW, tienen prácticamente la misma magnitud Mw ~ 7.4, con una distancia de 9850 km. Se analizaron con la misma estación de referencia (PTVM) y únicamente con diferencia en la

profundidad del evento, de alrededor de 620 km. Se detectó que las amplitudes relativas obtenidas son técnicamente igual y se distinguen aproximadamente en las mismas frecuencias fundamentales, por lo tanto, se podría descartar que la profundidad del evento haya tenido que ver con las amplificaciones relativas obtenidas para estos eventos.

5.5. Discusión de las amplificaciones observadas

Ordaz y Singh (1992) mencionan que la amplificación espectral en la zona de lago podría alcanzar valores de 50 en algunas frecuencias entre 0.2 y 0.7 Hz con respecto a la zona de lomas.

De acuerdo con la ubicación de las estaciones sísmicas de la Red del Valle de México (RVM) y de la Red Delegacional del D.F. (RDDF), se pudo observar que las amplificaciones altas se relacionan con la zona de lago, en donde las amplificaciones son mayores a cinco veces. En comparación con esta zona, las amplificaciones muy bajas coinciden con las zonas de lomas, con amplificaciones máximas de hasta 5 veces.

Las estaciones VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco) muestran en general amplificaciones relativas de más de 7 veces en frecuencias de 0.35 y 0.8 Hz. Por otro lado, aunque se presente una vez, la estación VCVM (Valle de Chalco) tiene un comportamiento similar a las estaciones anteriores, ya que tiende a mostrar amplificaciones muy grandes (hasta 20 veces) en frecuencias similares. Se hace la observación sobre la estación MZVM (Mezontepec), ya que en los cocientes espectrales tiende a tener amplificaciones muy grandes (hasta 10 veces), esto a pesar de ubicarse en una zona rocosa, por lo que las amplificaciones obtenidas podrían deberse a factores no necesariamente de la geología.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El comportamiento sísmico del subsuelo del Valle de México es de gran interés e importancia ya que en ella se encuentra la denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en donde existen un total de 21,020 escuelas desde Preescolar hasta Bachillerato, correspondientes al ~8.5% del total nacional, también se encuentran en ella ~1,540 unidades médicas (INEGI, 2014) y la población que allí habita es de aproximadamente 20 millones de personas (INEGI, 2010). Aquí se genera el 27.2% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (POZMVM, 2012), por lo que un temblor con características importantes, como los de 1985, podrían ocasionar un daño muy grande a la ZMVM.

Aprovechamos las redes de estaciones del Valle de México y la Delegacional del D.F., las cuales cuentan con sensores de banda ancha, que permitieron obtener registros de 19 telesismos (para un total de más de 500 trazas sísmicas). Esto nos permitió evaluar las características sísmicas de las diversas zonas o regiones del Valle de México. De los 19 temblores detectados, se usaron 16 telesismos con cuatro regiones acimutales preferenciales de arribo; NE, SE, SW, NW, con distancia epicentral mínima (evento 15) de 974 km y máxima (evento 9) de 17,430 km y con magnitud (Mw) desde 7 hasta 9.

Los datos utilizados en este estudio pertenecen a las estaciones de la Red Sísmica del Valle de México, las cuales cuentan con dos tipos de sensores, uno Reftek 151-60A y el otro Guralp CMG-6TD. El primer equipo tiene un rango de periodo de 60 s y fue utilizado para la Red Delegacional del D.F. y la última de 30 s, para la Red del Valle de México. La distribución de las estaciones de la Red Sísmica del Valle de México se encuentra entre las

longitudes -99.85°W y -99.70°W , y entre las latitudes 18.95°N y 19.83°N , cubriendo un área aproximada de 100×130 km.

A partir del análisis de los cocientes espectrales y con las estaciones de referencia de PBVM (Peñón de los Baños) y PTVM (Pico Tres Padres), se obtuvo que las estaciones que presentan más amplificación en la mayoría de los eventos son VRVM (Venustiano Carranza) e ICVM (Iztacalco), estas dos estaciones se ubican en la zona de lago y ambas se encuentran muy cerca de la zona del aeropuerto. Las amplificaciones que se observan en estas estaciones son de aproximadamente más de 10 veces, con un máximo de 100. Las estaciones que en general presentan menos amplificaciones (hasta 5 veces) corresponden a AZVM (Atizapán), ATVM (Atlacomulco), TOVM (Toluca), éstas se ubican en la zona de lomas y corresponden a la Red del Valle de México. De las estaciones anteriormente mencionadas, la estación VRVM muestra las máximas amplificaciones, se describe a continuación las amplitudes máximas obtenidas y las frecuencias a la cual se encuentran: el componente este del evento 14 (proveniente del sector NW), presenta una amplificación máxima de 100 veces en 0.7 Hz; en la dirección norte, tiene un valor de amplificación máxima de 50 veces en 0.75 Hz, esto para el evento 3 (proveniente de Japón); en el componente vertical, la amplificación es de 55 veces en 0.8 Hz y corresponde al evento 18 (proveniente del SE de Irán).

También se muestra que en la zona de lago, las ondas sísmicas sufren una amplificación de más de cinco veces, en comparación con la zona de lomas. Es posible notar que incluso en las zonas denominadas de lomas, se observan amplificaciones importantes (de hasta 5 veces), este efecto concuerda con la denominada amplificación regional (p.e. Singh et al., 1988, 1995; Ordaz y Singh, 1992; Cárdenas-Soto y Chávez-García, 2003).

Dentro del análisis se pudo determinar que en general, el acimut inverso no tuvo ninguna influencia en las amplificaciones, esto es, que no importa la

trayectoria de arribo de las ondas sísmicas. Por ejemplo, para el caso del evento 1 (Anexo A.1) con acimut de arribo SE y el evento 10 (Anexo B.3) proveniente del NW, las estaciones PBVM (Peñón de los Baños) y TOVM (Toluca) de la RVM no muestran una diferencia importante en las amplificaciones relativas obtenidas y la frecuencia a la que estas amplitudes aparecen, son prácticamente las mismas. Lozano et al., (2008) no encontraron que la amplificación en la Cd. De México tuviera una dependencia acimutal, ellos hicieron el análisis de eventos telesísmicos que provenían del sureste y suroeste.

Observamos también que la profundidad del evento no afecta significativamente las amplificaciones relativas obtenidas, esto se muestra en los eventos 4 y 6 (Anexo D.1 y D.2) provenientes de la región SW. Ambos eventos tienen la misma estación de referencia (PTVM), magnitud $M_w \sim 7.4$, con separación de 50 km en la distancia epicentral y únicamente con diferencia en la profundidad del evento, de alrededor de 620 km.

El presente trabajo hizo uso de la nueva Red Sísmica del Valle México, la cual dispone de sensores de banda ancha, lo que nos permite hacer evaluaciones de la región de estudio a frecuencias más bajas. Se contó con el registro de 19 eventos telesísmicos registrados en un periodo de 2.3 años, con más de 500 trazas sísmicas, lo que permitió que la cobertura azimutal alrededor del Valle de México fuera aceptable (con 3 gaps acimutales, el mayor de 60°) y se contó con cuatro regiones acimutales de arribo de las ondas sísmicas. A medida que se disponga con más datos de telesismos, se podrá tener un mejor y completo entendimiento del subsuelo del Valle de México, ya que permitirá detallar el estudio de la zona.

Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los que se presentan en estudios previos (p.e. Singh et al., 1988,1995; Ordaz y Singh, 1992; Lermo y Chávez-García, 1993). En general, los factores de amplificación y la

frecuencia a la que estos se distinguen son similares. Estos estudios de amplificación han sido realizados en el Valle de México, utilizando sensores de aceleración y eventos regionales que provienen de la costa del Pacífico Mexicano. De acuerdo con lo observado por Singh et al., (1988), ellos reportan una amplificación muy grande (hasta 50 veces) en 0.25 Hz para la estación CDAO (Central de Abastos, ubicada en la zona de lago) tanto para el componente NS como para el EW, con estación de referencia CUIP (Ciudad Universitaria). Ellos observan que para la zona de lago, la amplificación varía de sitio a sitio, que va de 8 hasta 50 veces (con respecto a Ciudad Universitaria) y que se encuentra en un rango de frecuencia de 0.2 a 0.7 Hz.

Uno de los grandes problemas para la determinación de las amplificaciones sísmicas en el Valle de México fue contar con muy pocas estaciones que estuvieran funcionando adecuadamente durante los eventos sísmicos, esto dificultó el poder comparar con mayor precisión las estaciones que presentaban mayor o menor amplificación. La estación TXVM (Texcoco) sólo registró cuatro eventos y las estaciones SZVM (Salazar) y VCVM (Valle de Chalco) sólo uno. Es importante contar con estaciones de sensores de banda ancha en sitios blandos, por ejemplo, en la ubicación de la estación CDAO (Singh et al., 1988), sería interesante corroborar estas grandes amplificaciones (hasta 50 veces) obtenidas, ya que un sismo con características similares al de 1985 podría causar colapsos de edificios en una zona estratégica como la Central de Abastos. También es importante mantener las estaciones de la red del Valle de México funcionando en todo momento e incluir más estaciones para tener una mayor cobertura, permitiendo así el mejor entendimiento del Valle de México.

BIBLIOGRAFÍA

- Archundia, M. (19 de septiembre de 2011). A 26 años del sismo, cifra oficial: 3 mil 692 muertes. *El Universal*.
- Bäth, M. (1974). *Spectral analysis in Geophysic*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Bello-Segura, D. (2013). Parámetros de la fuente de sismos con epicentro en el Valle de México durante 2008-2012. *Posgrado en Ciencias de la Tierra*.
- Brigham, E. (1974). *The fast Fourier Transform*. New Jersey: Prentice Hall.
- Brisbourne, A., & Horleston, A. (2007). Instrument response removal and the derivation of Wood-Anderson filters for SHM. *Seismic equipment Infra-structure in the U.K. (SEIS-UK)*, 1-4.
- Campillo, M., Bard, P., Nicollin, F., & Sánchez-Sesma, F. J. (1996). Crustal structure south of the Mexican volcanic belt based on group velocity dispersion. *Geofísica Internacional*, 35(4).
- Cárdenas-Soto, M., & Chávez-García, F. (2003). Regional path effects on seismic motion in central Mexico. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 973-985.
- Cárdenas-Soto, M., Chávez García, F., & Gustev, A. (1997). Regional amplification of ground motion in central Mexico. Results from coda magnitude data and preliminary modeling. *J. Seism.*, 341-355.
- CENAPRED. (30 de Enero de 2015). *CENAPRED*. Obtenido de http://www.cenapred.unam.mx/es/Glosario/Glosario_E.php
- CENAPRED. (2015). *SERIE Fascículos*. Obtenido de <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/163-FASCCULOSISMOS.PDF>
- CONAPO. (2015). Obtenido de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Delimitacion_zonas_metropolitanas_2010_Capitulos_I_a_IV
- Crotwell, H., Owens, T., & Ritsema, J. (1999). The Taup Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, 70(2), 154-160.
- Damon E., P.; F. K., Clark; M., Shafigullah. (1981). Evolución de los Arcos Magmáticos en México y su Relación con la Metalógenesis. *Instituto de Geología, UNAM*, 5(2), 223-238.
- Dolenc, D., Dreger, D., & Larsen, S. (2005). Basin Structure Influences on the Propagation of Teleseismic Waves in the Santa Clara Valley, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1120-1136.
- Ferrer Toledo, H. O. (2006). *La influencia del Eje Volcánico Transmexicano en el movimiento sísmico registrado en el centro de México. Un estudio de efectos de trayecto y de sitio a partir de datos de sismos fuertes*. México, D.F.: Tesis de doctorado.
- Furumura, T., & Kennett, B. (1998). On the nature of regional seismic phases-III. The influence of crustal heterogeneity on the wavefield for subduction earthquakes: the 1985 Michoacan and 1995 Copala, Guerrero, Mexico earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 1060-1084.

- Havskov, Jens; Alguacil, Gerardo;. (2010). *Instrumentation in Eartquake Seismology*. Springer.
- INEGI. (2014). *Cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México*.
- IRIS. (2014). *IRIS*. Obtenido de <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/mseed2sac/files>
- Jaramillo, A., Piña, J., & Aguilar, R. (2012). Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del Valle de México. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.*
- Keiiti, Aki; W.H.K., Lee;. (1976). Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes 1. A homogenous initial model. *Journal of Geophysical Research*, 81(23).
- Kennett, B., Engdahl, E., & Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the earth from travel times. *Geophysics J. Int.*, 122, 108-124.
- Konno, K., & Ohmachi, T. (Febrero de 1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *B.S.S.A.*, 88(1), 228-241.
- Lozano, L., Herraiz, M., & Krishna Singh, S. (2008). Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, doi: 10.1016/j.soildyn.2008.05.009.
- Lugo Hubp, J. (1984). Geomorfología del sur de la Cuenca de México. *Serie Varia T.* 1(8).
- M. Shearer, Peter;. (2009). *Introduction to Seismology* (Segunda ed.). San Diego: Cambridge University Press.
- Martínez González, J., Lermo, J., Ismael, E., & Angulo, J. (2011). Efectos del hundimiento regional en los cambios de periodo dominante del suelo de la cuenca de México: propuesta de nuevos mapas para las normas técnicas complementarias para diseño por sismo (NTCDs). *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.
- Mooser, F., Montiel, A., & Zúñiga, Á. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. *Subdirección de Construcción, Comisión Federal de Electricidad México*, 63.
- Nakamura, Y. (1989). A method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. *12WCEE*.
- Nakamura, Y. (2008). On the H/V spectrum. *The 14th world conference on earthaquake engineering*.
- Ordaz, M., & Krishna Singh, S. (Febrero de 1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 24-43.
- Papoulis, A. (Septiembre de 1975). A new Algorithm in Spectral Analysis and band-limited extrapolation. *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, Cas-22(9), 735-742.

- Perez Campos, Xyoli. (1996). Análisis Espectral de Señales de la Red Sismológica del Valle de México. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- POZMVM. (2012). *Programa de ordenación de la zona metropolitana del Valle de México*.
- Quintanar, L., Jiménez, Z., Yamamoto, J., Delgadillo, M., & Ortega, R. (2001). La Red Sísmica del Valle de México: Estado actual y perspectivas. *U.G.M.*, 286.
- RefTek. (2014). *RefTek*. Recuperado el 11 de Mayo de 2014, de <ftp://geo.uni-bonn.de/pub/lupi/reftek/Utilities/Brochures/151-60%20Brochure.pdf>
- Rubén , V. D. (2013). Escenarios sísmicos para la zona urbana de Zacatelco, Tlaxcala México. *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería*, 66.
- S.S.N. (8 de Diciembre de 2014). *Servicio Sismológico Nacional*. Obtenido de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/historia.jsp>
- SAC *Command Reference Manual*. (23 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://seismolab.gso.uri.edu/~savage/sac/commands/taper.html>
- Santoyo Villa, E., Ovando Shelley, E., Mooser, F., & León Plata, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México D.F.: TGC.
- Singh, S., Quass, R., Ordaz, M., Mooser, F., Almora, D., Torres, M., & Vásquez, R. (1995). Is the truly a "hard" rock site in the site in the Valley of Mexico. *Geophys. Res. Let.*, 481-484.
- Singh, S.K.; E., Mena; R., Castro;. (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 september 1985 Michoacán earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data. *Bulletin of Seismological Society of America*, 78(2), 451-477.
- Systems, Guralp. (2014). *Guralp*. Recuperado el 11 de Mayo de 2014, de <http://www.guralp.com/documents/MAN-T60-0002.pdf>
- Vázquez Sánchez, E., & Jaimes Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 133-190.