



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA ZONA URBANA DE
ZACATELCO, TLAXCALA MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

RÚBEN DARÍO VALLE OROZCO

Director de Tesis:

M. C. FRANCISCO JAVIER LERMO SAMANIEGO

Noviembre 2013

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	2
OBJETIVOS Y ALCANCES	2
DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS	3
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	4
1.1 EFECTO DE SITIO	4
1.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE SITIO	5
1.3 METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL EFECTO DE SITIO MEDIANTE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	7
1.3.1. <i>Función de transferencia</i>	7
1.3.2. <i>Técnicas para obtener la función de transferencia empírica</i>	8
1.4. CÁLCULO DE LAS INTENSIDADES SÍSMICAS DE INTERÉS	12
1.4.1 <i>Parámetro de intensidad sísmica</i>	13
1.4.2 Espectros de respuesta	13
1.4.3 Escenario sísmico	14
1.4.4 Elección del parámetro de intensidad sísmica	15
CAPÍTULO 2: MAPA DE ZONIFICACIÓN PARA FINES DE DISEÑO SÍSMICO	16
2.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA URBANA DE ZACATELCO	16
2.2 DETERMINACION DE ZONAS CON EFECTO DE SITIO	17
2.2.1 <i>Geomorfología y geología</i>	17
2.2.2 <i>Zonas de inundación</i>	21
2.3 MONITOREO SÍSMICO DE LAS ZONAS CON EFECTO DE SITIO	23
2.3.1 <i>Validación de las funciones de transferencia empíricas (FTE)</i>	25
2.3.2 <i>Utilización de las funciones de transferencia empíricas para estimar efectos de sitio</i>	30
2.3.3 <i>Familias Espectrales y mapa de zonificación</i>	30
CAPÍTULO 3: FUENTES SÍSMICAS SELECCIONADAS PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS	33
3.1 SISMOS DE SUBDUCCIÓN O DE FALLA INVERSA	34
3.1.1 <i>Sismo ocurrido el 13 de Abril del 2007 y localizado en Atoyac de Alvarez, Guerrero (M 6.3)</i>	34
3.1.2 <i>Sismo ocurrido el 30 de Junio del 2010 localizado en las Costas de Oaxaca (M = 6.0)</i>	35
3.2 SISMOS INTRAPLACA O DE FALLA NORMAL	36
3.2.1 <i>Sismo ocurrido el día 15 de Junio de 1999 y localizado en Tehuacán, Puebla (M 7.0)</i>	36
3.2.2 <i>Sismo ocurrido el 12 de Febrero del 2008 y localizado en el Istmo de Tehuantepec (M = 6.6)</i>	38
3.2.3 <i>Sismo ocurrido el día 25 de Febrero de 2011 y localizado en la Costa de Veracruz (M = 6.0)</i>	39
3.2.4 <i>Sismo ocurrido el día 7 de Abril de 2011 y localizado en el Istmo de Tehuantepec (M = 6.7)</i>	40
3.3 SISMOS CORTICALES Y LOCALES	41
3.3.1 <i>Sismo ocurrido el 6 de Abril de 1959 y localizado en Tlaxcala (M 4.7) (Sismo Simulado)</i>	41

CAPÍTULO 4: ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA ZONA URBANA DE ZACATELCO	43
4.1 CÁLCULO DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS Y MAPAS DE ACELERACION ESPECTRAL UTILIZANDO FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS (FTE)	43
4.1.1 Metodología para la obtención de mapas de aceleración espectral.	44
4.2 PRIMER ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS DE SUBDUCCIÓN O DE FALLA INVERSA	45
4.2.1 Sismo del 13 de Abril de 2007 Atoyac de Alvarez, Guerrero (M 6.3).....	45
4.2.2 Sismo del día 30 de Junio de 2010, Costas de Oaxaca (M = 6.0)	47
4.3 SEGUNDO ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS DE FALLA NORMAL O INTRAPLACA	49
4.3.1 Sismo del 15 de Junio de 1999 Tehuacán, Puebla (M 7.0)	49
4.3.2 Sismo del día 12 de Febrero de 2008, Istmo de Tehuantepec (M = 6.6)	51
4.3.3 Sismo del día 25 de Febrero de 2011, Costa de Veracruz (M = 6.0)	53
4.3.4 Sismo del día 7 de Abril de 2011, Istmo de Tehuantepec (M = 6.7).....	55
4.4 TERCER ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS CORTICALES Y LOCALES	57
4.4.1 Sismo 6 de Abril de 1959, Tlaxcala (M 4.7) (Sismo Simulado)	57
4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	62
ANEXO: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS	64

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi amada Universidad, que orgullo pertenecer a la máxima casa de estudios.

Al Instituto de Ingeniería que desde la mitad de mis estudios me ha dado un espacio en sus cubículos como becario y gracias por permitirme ayudar en sus proyectos de investigación, por ello fue posible este trabajo de tesis.

A mi tutor *M. C. Javier Francisco Lermo Samaniego* gracias. A mis sinodales, por su amable colaboración muchas gracias.

A mi madre *Rita Orozco*, le agradezco por toda su paciencia, comprensión y su infinito apoyo, gracias a usted hoy soy lo que soy.

Le agradezco a Julio Romero por ayudarme con la edición de esta Tesis.

A *Samuelisaac Valle Orozco* gracias por tu apoyo durante la carrera, eres un gran amigo.

A *Isaí Sánchez, Diego Armando*, a Rodrigo Durán, Al buen Deimon, al Stamina y principalmente al

Comecuandohay les agradezco amigos por haber estado presentes en esta etapa universitaria.

Por la Horda!!!

RESUMEN

Zacatelco es una de las ciudades con mayor población del Estado de Tlaxcala, y de acuerdo a la zonificación del Estado de Tlaxcala se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico, esta zona puede llegar a evolucionar con el tiempo en infraestructura y construcciones, este crecimiento debe considerar el peligro sísmico. Por lo cual se propone una zonificación sísmica del terreno, realizando una clasificación del suelo, para identificar zonas con efecto de sitio, utilizando la técnica de Nakamura y la integración de familias espectrales. A partir de las familias espectrales se estimaron intensidades sísmicas, con base en acelerogramas sintéticos obtenidos a partir de sismos registrados en estaciones ubicadas en roca cercanas a la zona. Esto dio paso a generar 3 escenarios sísmicos de gran potencial sísmico para nuestra zona de estudio; el primero correspondiente a sismos de tipo subducción o fallamiento inverso, el segundo para sismos de tipo intraplaca o de fallamiento normal, y el tercero para sismos de tipo cortical y local, los tres escenarios fueron analizados para periodos estructurales de $T=0$ [s] y para el periodo que presentara las máximas aceleraciones espectrales.

ABSTRACT

Zacatelco is one of the most populous cities of the State of Tlaxcala, and according to the zoning of the State of Tlaxcala is located in an area of high seismic risk, this area can get to evolve over time in infrastructure and buildings, this growth should consider seismic hazard. Therefore we propose a seismic zoning of the land, making a soil classification, to identify areas with effect of the site, using the technique of Nakamura and integration of spectral families. From of spectral families were estimated seismic intensities, based on synthetic accelerograms obtained from earthquakes recorded on rock stations located near the site. This gave way to generate three potential scenarios seismic seismic our study area, the first corresponding to subduction earthquakes of reverse faulting type, the second for intraplate earthquakes or normal faulting, and the third for cortical type earthquakes and local levels, the three scenarios were analyzed for structural periods $T=0$ [s] and for the period to submit the maximum spectral accelerations.

INTRODUCCIÓN

Los edificios presentan cierta vulnerabilidad en su construcción cuando son sometidos a movimientos debidos a la actividad sísmica del país, esto se debe a las amplificaciones que el tipo de suelo provoca, este fenómeno es conocido como efecto de sitio y fue reconocido desde principios del siglo XX. Este fenómeno fue estudiado con más detalle a partir del sismo de Michoacán-México en el año de 1985, y comenzó a ser tomado en cuenta en los reglamentos de construcción.

La actividad tectónica del país está regida principalmente por la interacción de las placas del Pacífico, Rivera y Cocos con la de Norteamérica por lo cual la mayoría de los sismos se presenta en la costa del Pacífico. Por otro lado se han presentado sismos con menor frecuencia asociados a fuentes secundarias, con epicentros dentro del continente, producto de la deformación interna de las placas subducidas debajo del continente y a las deformaciones corticales existentes en la corteza terrestre.

Debido a lo anterior, no es suficiente con realizar solo una zonificación, dado que no todas las fuentes sísmicas representaran el mismo riesgo en estructuras, por lo cual es de suma importancia realizar estudios sobre la respuesta dinámica del suelo en ciudades importantes de nuestro país y de alta densidad poblacional, tomando en cuenta no solo el tipo de terreno, sino también el origen de nuestra fuente sísmica.

ANTECEDENTES

Uno de los estudios realizados en el Estado de Tlaxcala y que proporcionó información importante para el desarrollo de este trabajo es el siguiente:

Lermo y Bernal (2006), publican en el Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, un artículo que tiene como título “Zonificación Sísmica del Estado de Tlaxcala”, en el que proponen tres zonas sísmicas a partir de la caracterización de la sismicidad del estado, para ello se estableció una base de 45 sismos registrados entre 1984 a 2004, todos de magnitudes $M_d \leq 4.0$. Los registros fueron obtenidos por las redes del sistema de Información Sismotelemétrica de México (SISMEX), el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y la Red Sísmica del Valle de México, teniendo SISMEX el mayor número de estaciones sísmicas y es la que mayor cobertura tiene sobre el estado de Tlaxcala.

De acuerdo a la distribución y la localización de los sismos se realizó la zonificación, en la cual se divide al estado en 3 zonas; Zona I de alta sismicidad, la cual comprende la región central y sur del estado; Zona II de sismicidad media, ubicada al noroeste del estado; y finalmente la Zona III de baja sismicidad que se caracteriza por no tener hasta el momento actividad sísmica.

A partir de este trabajo surgió la necesidad de realizar estudios más a detalle en cada una de las ciudades con mayor densidad poblacional en el Estado de Tlaxcala, por esta razón Bernal (2006) desarrolló la zonificación del municipio de Tlaxcala, evaluando efecto de sitio, proponiendo mapas de isoperiodos y clasificación del terreno; para este trabajo se realizara lo mismo en la ciudad de Zacatelco, ya que también se encuentra en la Zona I de alta simicidad.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Zacatelco es una de las 5 ciudades con mayor número de habitantes del estado de Tlaxcala, debido a ello requiere en un futuro determinar normas técnicas de construcción para evitar problemas en edificios, por esta razón se debe realizar un estudio sobre peligro sísmico, para que con ello puedan

determinarse dichas normas. Los objetivos principales de este trabajo son, proponer un método partículas en la ciudad de Zacatelco para la zonificación sísmica, clasificando el tipo de suelo a partir de la estimación del efecto de sitio, asimismo se estimaran las intensidades sísmicas con el parámetro de aceleración que pueda presentarse para tres escenarios sísmicos determinísticos.

Las etapas para la realización de este trabajo son las siguientes:

- Revisión y recolección de información geológica, geomorfológica y tectónica de los alrededores del municipio de Zacatelco.
- Campaña de monitoreo sísmico, la cual consiste en la colocación de una red temporal para el registro de sismos y microtremores, distribuida en zonas de interés sobre el área urbana.
- Validación de los métodos utilizados en la zonificación, para posteriormente desarrollar una metodología particular de la ciudad de Zacatelco.
- Definir las zonas a partir de familias espectrales, clasificando las funciones de transferencia empíricas, de acuerdo a su forma espectral y a la frecuencia dominante.
- Elaboración de mapas a partir de los parámetros obtenidos por el análisis de los registros sísmicos.
- Estimar las intensidades sísmicas para cada escenario determinista, seleccionando eventos sísmicos de magnitud considerable para las zonas sismogénicas de mayor peligro para el área de estudio.

DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS

En el capítulo 2 se presenta nuestro marco teórico, el cual presenta una revisión bibliográfica acerca del efecto de sitio, así como también, la metodología para estimar este fenómeno, además se mencionan los fundamentos para el cálculo de intensidades sísmicas de interés.

El capítulo 3 integra los estudios geológicos, geomorfológicos y tectónicos de nuestra zona y los criterios utilizados para la realización de la zonificación del municipio de Zacatelco. En este mismo capítulo se muestra nuestra validación del método y metodología para la realización para la obtención de nuestros mapas de zonificación.

En el capítulo 4 se presenta las características de cada una de nuestras fuentes sísmicas seleccionadas para la generación de nuestros escenarios sísmicos.

El capítulo 5 se estiman las intensidades sísmicas que se pudieran presentar debido a diversos eventos sísmicos que presenten un gran peligro para nuestra zona de estudio, considerando 3 escenarios sísmicos. Se generaron mapas de aceleración espectral para los dos niveles más probables de intensidades sísmicas que se pueden presentar en la zona urbana de Zacatelco.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y comentarios finales de este trabajo de tesis.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 EFECTO DE SITIO

Los daños producidos sobre estructuras cuando ocurre un sismo, están bastante influenciados por la respuesta del terreno, este fenómeno se conoce como *efecto de sitio* y es mejor definido como la amplificación de las ondas sísmicas ante las condiciones geológicas y topográficas de los estratos más superficiales de la corteza terrestre. Este fenómeno ha sido reconocido desde principios de la sismología, y es un parámetro muy importante que debe ser tomado en cuenta para la determinación de la intensidad del movimiento debido a un sismo.

Cuando ocurre un sismo de magnitud considerable, la energía generada se atenúa con respecto a la distancia y el tiempo, el comportamiento del movimiento vibratorio es afectado por las estructuras geológicas que atraviesa, formando ondas P, ondas S, reflexiones y refracciones de las ondas de cuerpo y de las ondas superficiales. Para ejemplificarlo podemos comparar el movimiento de las ondas en roca dura, con el movimiento de un suelo blando a las mismas frecuencias, el movimiento se amplifica de manera muy relevante, como se muestra en la Figura 1.1.

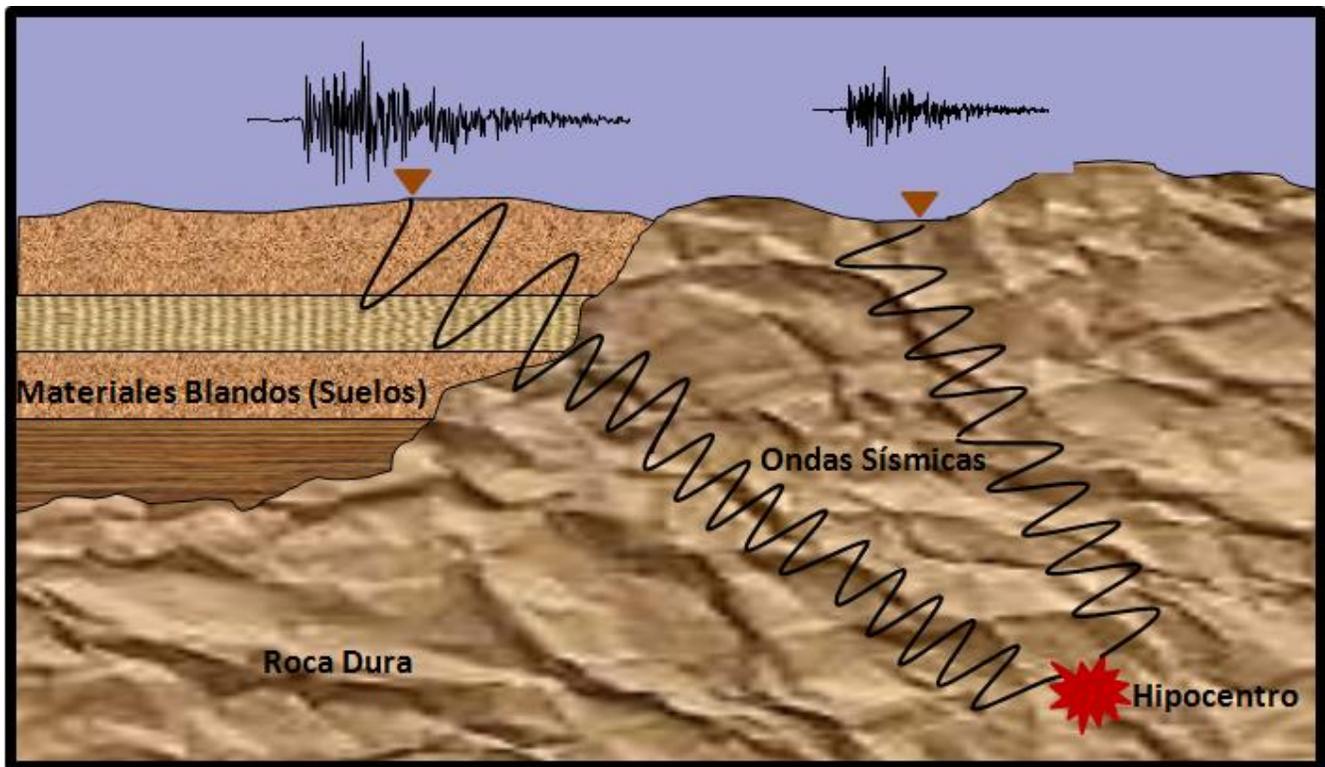


Figura 1.1. En la imagen se muestra el concepto de efecto de sitio, por un lado una señal que muestra que la roca presenta menor amplitud y por lo tanto el efecto de sitio es menor o nulo, y por el otro una señal que modifica su amplitud considerablemente al tener contacto con el suelo blando.

1.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE SITIO

El efecto de amplificación de una señal en suelos blandos y poco consolidados es un parámetro importante para caracterizar el efecto de sitio y consiste de dos elementos importantes, la amplificación geométrica y la amplificación dinámica.

La ***amplificación geométrica*** corresponde a los efectos del contraste de las impedancias del medio (I_c).

$$I_c = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad \text{para } V_b > V_s \quad (1)$$

Donde b es el substrato rocoso, s corresponde a los depósitos estratigráficos, ρ es la densidad y V es la velocidad de las ondas sísmicas.

El contraste de impedancia (I_c) es mayor cuando se tienen unidades estratigráficas recientes y poco consolidadas de gran tamaño. La velocidad de las ondas sísmicas S en el subsuelo decrece particularmente cuando el depósito sedimentario se encuentra sobre el lecho rocoso aumentando así el contraste de impedancias. Los depósitos sedimentarios se consideran filtros de energía de alta frecuencia (periodos cortos), afectando a estructuras de gran tamaño como edificios y puentes, sin embargo, la amplificación de las altas frecuencias puede causar daños potenciales en estructuras que presentan frecuencias naturales bajas como estructuras de poco tamaño.

La ***amplificación dinámica*** a este término se le conoce cómo efecto de resonancia. Este concepto considera la frecuencia de las ondas sísmicas (H) y la frecuencia natural del suelo (f_n), este concepto se describe en la ecuación 2:

$$f_n = \frac{V_s}{4H} \quad (2)$$

donde V_s es la velocidad de las ondas S.

Apoyándose en el método teórico de Haskell (1962) el cual tiene como base la teoría unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados. La teoría parte de la hipótesis de que el suelo se comporta de manera lineal para cualquier nivel de excitación, asimismo se compone de estratos horizontales, lateralmente infinitos, por lo qué, se descartan los efectos de irregularidad lateral. Finalmente se considera que los estratos sobreyacen sobre un semiespacio homogéneo.

A esta hipótesis se puede sumar la incidencia vertical de las ondas S polarizadas horizontalmente y se simplifica el modelo estratigráfico real en un sólo estrato infinitamente lateral, sin perder sus características principales, el periodo dominante y la velocidad de la onda de corte S, como se muestra en la Figura 1.2 (Limaymanta 2009).

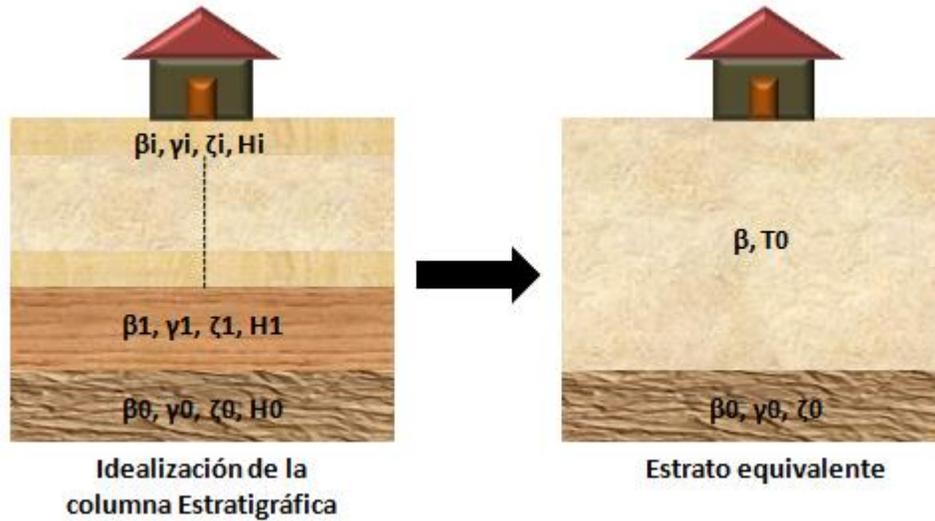


Figura 1.2. Modelo estratificado idealizado y modelo simplificado, estrato equivalente.

La figura representa el perfil estratigráfico, el primero describe el medio real o idealizado de la estratigrafía y cada estrato se caracteriza por los parámetros, β_i , velocidad de cortante S ; densidad del material γ_i , amortiguamiento del material ζ_i , y el espesor del estrato H_i . Por otro lado, realiza un estrato equivalente al idealizado con parámetros β , velocidad de onda cortante S y T_0 periodo predominante de vibración del medio. El semiespacio se caracteriza por los mismos parámetros ($\beta_0, \gamma_0, \zeta_0$).

El tiempo de viaje del i -ésimo estrato es $\frac{H_i}{\beta_i}$, y el tiempo total de viaje T , para llegar a la superficie es:

$$T = \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (3)$$

Si tomamos el perfil estratigráfico formado por un sólo estrato de espesor H , donde $H = \sum H_i$, entonces la velocidad necesaria para que las ondas tengan el mismo tiempo de viaje es:

$$\beta = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad (4)$$

La ecuación 4 se conoce cómo la velocidad media del estrato idealizado de la Figura 2.2. De la solución de la ecuación de onda para incidencia vertical, el periodo predominante de vibración del medio T_0 es:

$$T_0 = \frac{4 H}{\beta} \quad (5)$$

Si se sustituye la ecuación (4) en la ecuación 5 se tiene:

$$T_0 = \frac{4 H}{\frac{\sum H_i}{\sum \beta_i}} \quad (6)$$

Si se sabe que $H = \sum H_i$ y se sustituye en la ecuación 6 se obtiene:

$$T_0 = \frac{4 \sum H_i}{\frac{\sum H_i}{\sum \beta_i}} = \frac{4 \sum \beta_i}{1} \quad (7)$$

La ecuación 7 muestra que el medio estratificado idealizado (Figura 2.2) se puede sustituir por un estrato equivalente, si se conservan los parámetros. β_i y T_0 . Ecuaciones 4 y 7.

De lo anterior se obtiene que si T_0 es un parámetro que caracteriza al medio, por lo tanto, es posible evaluar el efecto de sitio estimando su valor. Otro parámetro importante que se asocia al efecto de sitio es estimar el valor de la amplitud relativa de sitio (A_r) asociada a T_0 . En conjunto esto se define como la máxima amplificación al movimiento de las partículas de un suelo blando con respecto a las del semiespacio.

1.3 METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL EFECTO DE SITIO MEDIANTE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

1.3.1. Función de transferencia

Podemos describir un sistema mediante una función análoga a un modelo matemático, a través de un cociente que relaciona la señal de entrada con una señal de salida, utilizando la función de transferencia. Nuestro modelo se compone de la siguiente manera:

Función de entrada (excitación del suelo) $S(t)$

Función de transferencia (esta es dependiente de los aspectos geológicos y los modelos matemáticos que lo describen) $G(t)$

Función de salida (respuesta dinámica del suelo) $U(t)$

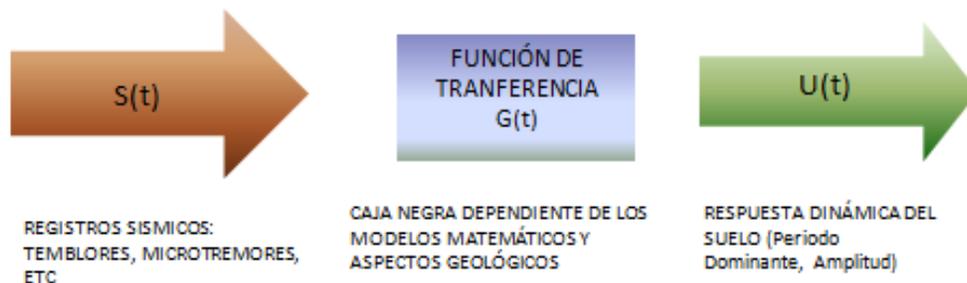


Figura 1.3. Esquema donde se describe la función de transferencia, así como sus componentes principales para obtener la respuesta dinámica del sitio.

La función de entrada corresponde a la propagación de las ondas sísmicas sobre el basamento rocoso y en superficie ante la existencia de suelo blando o no consolidado. Las propiedades geológicas están en función de la impedancia acústica y se cuantifican a partir del modelo matemático, este sistema puede resolverse con distintos métodos que se describirán más adelante.

La función de salida corresponde a la respuesta del sistema, es decir, corresponde a la estimación de las características dinámicas del suelo en función de sus propiedades dinámicas de los materiales de que está compuesto el suelo. Con esta función es posible estimar el periodo dominante (T_0) y la amplificación relativa de esta relación. Existen diversos métodos para estimar el efecto de sitio, estos métodos se dividen en dos grandes grupos; métodos teóricos y métodos empíricos.

Los Métodos teóricos consisten en el análisis de modelos matemáticos de propagación de onda, uno de ellos es el método de Haskell (1962), que tiene como base la teoría de propagación unidimensional de ondas, con este método, es posible obtener la función de transferencia en superficie de un medio estratificado (Limaymanta 2009).

Los métodos empíricos se basan en la instrumentación para registro sísmico (sensores de velocidad y aceleración), estos se distribuyen en redes temporales o arreglos a lo largo y ancho de la zona de estudio. Para determinar el periodo dominante o frecuencia fundamental, se utilizan los registros de movimientos sísmicos fuertes, movimientos sísmicos débiles y moderados, así como también, registro de microtemores.

Finalmente los resultados obtenidos por los métodos empíricos pueden complementarse con los métodos teóricos basados en la propagación de ondas, es decir, los resultados de ambos métodos, dan paso a estimar un modelo estratigráfico con un alto grado de confiabilidad.

1.3.2. Técnicas para obtener la función de transferencia empírica

Registro de movimientos sísmicos fuertes, débiles ó moderados,

Los registros de movimientos fuertes son una herramienta muy valiosa para la evaluación del efecto de sitio, ya que estos incluyen efectos no lineales y amplios contenidos de frecuencia. La desventaja de utilizar sismos fuertes es la falta de instrumentación en diversas ciudades, son pocas las oportunidades de obtener registros de este tipo para realizar zonificaciones, se necesitaría tener una gran densidad de instrumentos distribuidos en lugares de sismicidad elevada. En ciudad de México por ejemplo no fue posible realizar su zonificación, a través de sismos fuertes, (Lermo y Chávez-García 1993) debido a que muchos de los acelerógrafos fueron colocados después del sismo de Michoacán de 1985.

La Ciudad de México es una de las ciudades que cuenta con un mayor número de instrumentos, algunas otras tienen entre 1 y 10 instrumentos, mientras que otras ciudad de sismicidad importante no tienen ninguno, en consecuencia, en la mayoría de los casos los registros que se tienen no son suficientes para evaluar el efecto de sitio, pero son de gran ayuda para obtener una mejor calidad en los resultados obtenidos con registros de movimientos débiles.

1) Razón espectral relativa a un punto de referencia (razón espectral estándar “SSR”) con registros de sismos

Esta técnica fue introducida por Borchert en 1970, se le conoce comúnmente como razón espectral estándar. Consiste en realizar el cociente de las componentes horizontales en el dominio de Fourier con el objetivo de determinar la respuesta dinámica del suelo en el sitio de interés, donde el numerador es el espectro de amplitud de Fourier de la estación en el sitio de interés y el denominador es el espectro de amplitud de Fourier de un sitio de referencia.

Lo ideal es que la estación de registro sísmico de referencia se ubique en la formación del basamento rocoso, sin embargo, esto no es práctico ya que resultaría muy costoso, debido a la profundidad a la que se encuentra. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado al determinar el sitio que servirá de referencia en superficie y sus características deben cumplir para que el nivel de amplificación sea mínimo, es decir, es importante seleccionar un terreno rocoso, con el fin de que el registro sea muy cercano a un registro en roca y disminuir el error en la interpretación de los resultados.

La condición primordial de la estación de referencia, es que sea sobre un afloramiento rocoso o firme y la velocidad de corte sea mayor a 700 [m/s]. Esto se puede observar si la amplitud de la respuesta dinámica del suelo es menor que 2 veces la amplitud para una frecuencia entre 0.1 y 10 [Hz], se concluye que no tiene efecto de sitio (Limaymanta 2009), sin embargo, no es indicador de la velocidad para ello se tienen que implementar otras técnicas como reflexión, SPAC, etc.

La utilización de este método es una buena opción para realizar una microzonificación, no obstante, presenta ciertas desventajas: 1) El registro de movimientos fuertes o sismos con magnitud mayor o igual 6.5 ocurren cada 4 años y mayores o iguales a 7.5 son esperados cada 10 años, es decir, no son frecuentes en México, según las estadísticas del SSN (Kostoglodov y Pacheco 1999); 2) Al registrar eventos simultáneos, una de las estaciones puede fallar al paso de un evento, 3) No contar con una densidad adecuada de instrumentos para generar los mapas de isoperiodos y de microzonificación.

Sin embargo, este tipo de registros simultáneos pueden validar la estimación del efecto de sitio obtenidas por otras técnicas.

2) Razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical (técnica de Nakamura aplicada a Sismos, HVSR)

La razón espectral (H/V) fue utilizada por Nakamura en 1989, debido a esto se le conoce como técnica de Nakamura, aun que, también es conocida como HVNR, la técnica fue desarrollada en contexto de los microtemores, sin embargo, también es utilizada para movimientos fuertes HVSR. Lermo y Chávez-García, (1993) fueron los primeros en implementar esta técnica a movimientos fuertes para evaluar la respuesta de sitio. La técnica es utilizada con la hipótesis de que solo la componente horizontal es influenciada por la geología local, de esta manera, la técnica consiste en realizar el cociente del espectro de Fourier de las componentes horizontales entre el espectro de Fourier de la componente vertical (H/V), considerando solo la fase intensa, es decir, el arribo de la onda S.

Al igual que la técnica estándar, esta técnica sugiere una geología simple, no obstante, no se tiene el problema de contar con registros simultáneos. Una ventaja que tiene esta técnica es que puede ser

aplicada a sismos fuertes y débiles o moderados permite una mejor estimación de la amplificación relativa en comparación con la aplicada a microtremores. Una desventaja observada en muchos casos, es que presenta solo el efecto de sitio para el primer modo de vibrar y su amplitud relativa es menor a la amplitud arrojada por el método “SSR”, en la mayoría de los casos (J. Lermo, comunicación personal).

Registro de Microtremores

Los microtremores se empezaron a estudiar desde el siglo pasado para caracterizar el suelo y estructuras. Los japoneses fueron líderes de estas técnicas en los años 50's discutiendo su origen, así como también su utilización para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo (Yauri and Sheila, 2006). El estudio de esta metodología ha permitido integrarlos en estudios geotécnicos y principalmente permiten la estimación del efecto de sitio y periodo dominante.

1) Fuentes y Características Principales De Los Microtremores

Los microtremores se localizan en el intervalo de frecuencias entre 0.01 a 30 [Hz], sin embargo, en la exploración geofísica solo enfoca su interés en el intervalo de 0.1 a 10 [Hz]. Los que tienen como origen la actividad humana son denominados por periodos cortos, menores a un segundo o mayores a 1 [Hz] en el dominio de las frecuencias. Por otro lado, los microtremores que tienen origen en los fenómenos naturales tales como el clima (el viento, variaciones atmosféricas), actividad volcánica y condiciones oceánicas, comprenden un periodo dominante mayor a 1 segundo o menores a 1 [Hz] (bajas frecuencias), en la Figura 1.4 se ilustran las diversas fuentes.

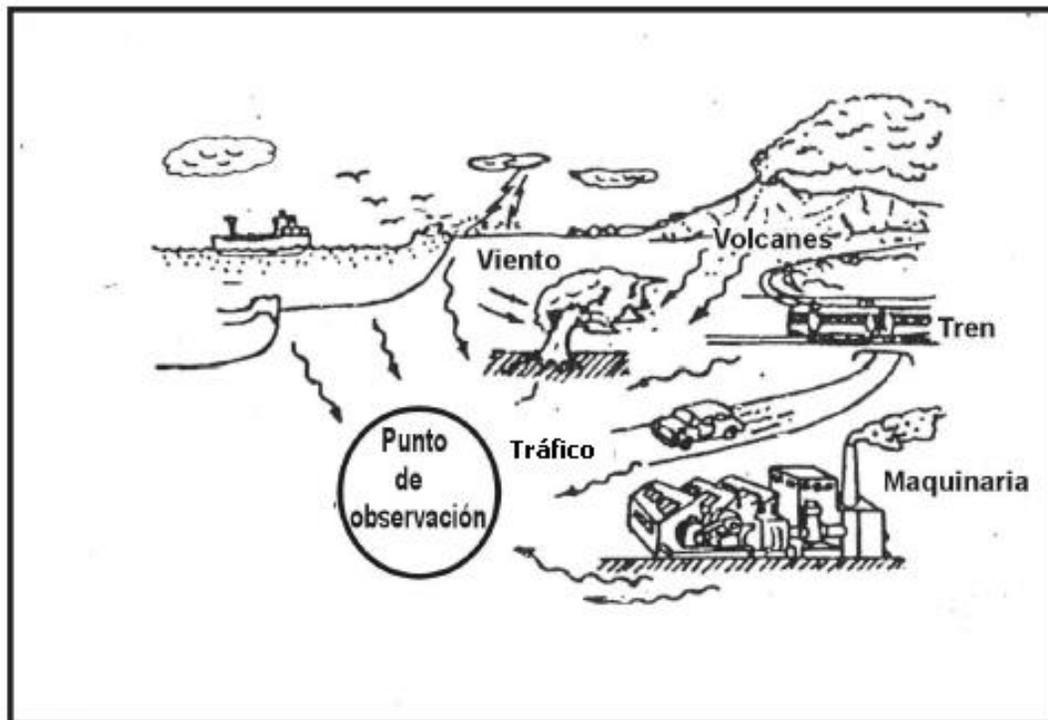


Figura 1.4. En la figura se observan las principales fuentes que generan los microtremores, por un lado las fuentes naturales tales como el viento, volcanes, efectos atmosféricos y por otro las fuentes artificiales como la industria, el tren, el tránsito vehicular, etcétera.

En este apartado se mencionan algunas de las características que rigen a los microtremores.

- Los microtremores presentan variación diurna, las amplitudes de los registros obtenidos durante el día se alteran entre 2 y 10 veces más que aquellos que se registran en la noche, es decir, que son dependientes de la hora del día en que se realiza su medición, además de la fuente que los genera.
- La amplitud de los microtremores generalmente son muy pequeñas y los desplazamientos del suelo son en el orden de 10^{-4} a 10^{-2} [mm], muy por debajo del sentir humano (Okada 2003).
- El análisis de los microtremores se enfoca básicamente en el contenido de las ondas superficiales del tipo Rayleigh (Yauri and Sheila, 2006). El ancho de banda de la exploración geofísica, es el rango en el cual parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, por lo tanto, es posible estimar sus modos y velocidades de propagación mediante arreglos instrumentales, de esta manera, es viable caracterizar las estructuras geológicas.
- Los periodos no varían con respecto el tiempo, el periodo depende de las propiedades dinámicas del suelo, y por consiguiente, pueden correlacionarse con las condiciones geológicas y geomorfológicas. Por ejemplo, los periodos menores a 0.2 [s] se asocian a suelos firmes, mientras que los periodos mayores a 0.2 [s] son típicos de depósitos más blandos.

2) Razón Espectral del Cociente H/V, Técnica de Nakamura para microtremores (Técnica HVNR)

Esta técnica propuesta por Nakamura en 1989, se basa en que el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del registro de microtremores. Nakamura parte de la hipótesis de que los microtremores principalmente son registros de ondas Rayleigh. A demás de la hipótesis mencionada también supone un medio estratificado de suelo blando que sobreyace a un espacio de suelo firme (o roca, Figura 1.5). Bajo estas condiciones y trabajando en el dominio de las frecuencias, cuatro son los espectros que se involucran en el problema.

- V_s , H_s , espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en la superficie.
- V_b , H_b , espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en el substrato.

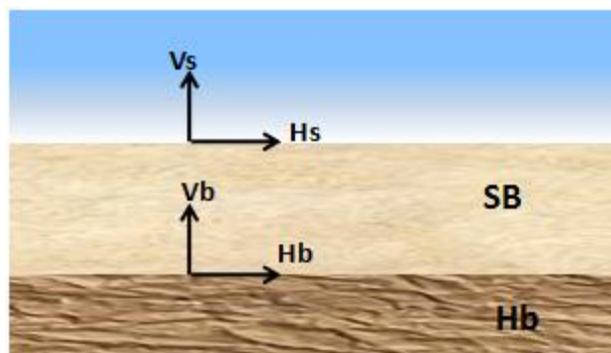


Figura 1.5. Modelo estratificado para la técnica de Nakamura (Limaymanta 2009)

De acuerdo a Nakamura el efecto de la fuente se encuentra representado por la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} \quad (8)$$

Y el efecto de sitio (*Definición de Función de Transferencia Empírica FTE*) con la ecuación 9:

$$S_E = \frac{H_s}{H_b} \quad (9)$$

Para compensar esta expresión por el efecto de fuente, define una relación espectral de efecto de sitio modificando S_M , como sigue:

$$S_M = \frac{S_E}{A_s} = \frac{\frac{H_s}{H_b}}{\frac{V_s}{V_b}} = \frac{H_s}{V_s} \frac{V_b}{H_b} \quad (10)$$

Nakamura comprobó experimentalmente la siguiente relación:

$$\frac{H_b}{V_b} = 1 \quad (11)$$

Por lo tanto, Nakamura obtuvo que el efecto de sitio se define como:

$$S_M = \frac{H_s}{V_s} \quad (12)$$

1.4. CÁLCULO DE LAS INTENSIDADES SÍSMICAS DE INTERÉS

Con el objetivo de introducir los estudios de peligro sísmico al diseño sísmico se establecen espectros de diseño, para ello se requiere una caracterización adecuada de las intensidades sísmicas para el municipio y así generar las normas técnicas para diseño sísmico,

En los últimos años la ingeniería sísmica y la sismología, han tratado de estimar la intensidad sísmica que puede manifestarse en una región con una sismicidad considerable, ante la presencia de eventos sísmicos con localización y magnitud determinados. El éxito de estimar el nivel de intensidad sísmica esperado en una región, dado un evento sísmico de magnitud y localización determinada depende enormemente de la caracterización de las condiciones locales y regionales como son; la geología, la estratigrafía, geomorfología, las propiedades mecánicas del suelo, etcétera. Para fines de diseño, es necesario que estos parámetros cuenten en gran medida, con una gran correlación con los que representen las propiedades mecánicas y dinámicas del diseño sísmico de las construcciones.

Los estudios de peligro sísmico incluyen una descripción de las fuentes sismogénicas que pueden afectar considerablemente el estado de Tlaxcala y por supuesto, el municipio de Zacatelco, para ello se

generan muestras representativas de historias detalladas del movimiento del terreno, con amplitudes y contenido de frecuencias adecuados según la fuente sismogénica, la trayectoria de las ondas sísmicas y las propiedades dinámicas del terreno.

Como resultado de lo anterior, surge la necesidad de implementar un algoritmo que permita calcular el acelerograma en superficie, mediante un acelerograma registrado instrumentalmente en una estación base, (ubicada en roca y cercana a la fuente) y la función de transferencia empírica de cada lugar donde existió un registro sísmico, sin la necesidad de obtener en primera instancia una función de transferencia teórica.

1.4.1 Parámetro de intensidad sísmica

Una forma de obtener el nivel de intensidad sísmica para el diseño de estructuras, depende no solo de la fuente, de la trayectoria, etcétera, sino también de las condiciones locales del sitio y de las propiedades de la estructura como tal.

Para el desarrollo de los espectros de respuesta, se adopta como medida de intensidad el valor de la aceleración máxima, un parámetro dinámico que puede estimarse por modelos matemáticos o ser medido instrumentalmente por acelerógrafos, sus unidades son cm/s^2 o Gales.

La aceleración manifiesta un comportamiento diferente según el tipo de terreno por el que viajan las ondas sísmicas, produciendo amplificaciones o atenuaciones de las mismas, es decir, la aceleración de las partículas del terreno, aumenta cuando las ondas sísmicas pasan de un medio de alta velocidad, a un estrato de sedimentos blandos de baja velocidad. De acuerdo con la definición de efecto de sitio en el capítulo anterior, las características del suelo tienen una importante influencia sobre la amplitud del movimiento en superficie. Por lo tanto, la intensidad del movimiento del suelo y la tasa de los daños serán mayores en suelos blandos.

La importancia de estimar la aceleración máxima, es la contribución al diseño sísmico y evaluar la severidad de un evento sísmico sobre áreas conurbadas. Entonces los espectros de respuesta describen la aceleración máxima del terreno, evaluando para un periodo de cero segundos ($T=0.0$ [s]), para un amortiguamiento del 5% de su valor crítico. Otra medida a considerar es el valor de la ordenada espectral máxima, asociada a valores de periodo de vibración estructural, correlacionando 0.2 [s] con un nivel de alguna construcción.

1.4.2 Espectros de respuesta

El espectro de respuesta es definido como la respuesta máxima en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración entre otros parámetros, que produce una acción dinámica determinada sobre el medio o una estructura. Los espectros se representan en periodo o frecuencia en las abscisas y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento ξ .

De forma conceptual, un espectro de respuesta se construye al considerar una serie de estructuras de un grado de libertad o análogamente a oscilaciones simples (conjunto de osciladores) con diferentes periodos de vibración T y con igual factor de amortiguamiento ξ vea Figura 1.6. Si se aplica la acción de un mismo terremoto a todos los osciladores (por medio de un registro de aceleración) cada uno de estos tendrá una respuesta distinta. Una vez calculada la respuesta en cada uno de los osciladores se determina el valor máximo absoluto de aceleración, estos valores se manifiestan de forma gráfica en

función del periodo de vibración T . Entonces para cada valor de periodo T , le corresponde un valor de la respuesta máxima de cada oscilador.

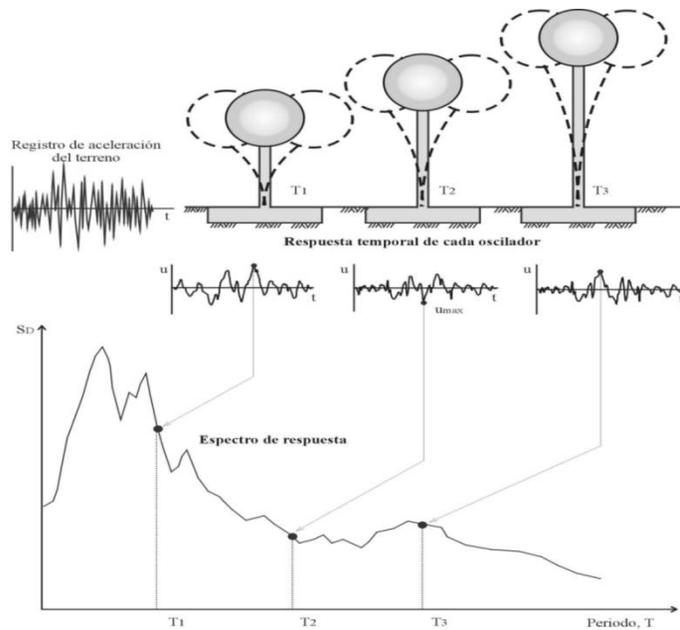


Figura 1.6. Esquema conceptual de la realización de un espectro de respuesta a partir de oscilaciones simples.

En la actualidad los espectros de respuesta juegan un papel muy importante en la dinámica estructural y en el estudio del diseño sísmico particularmente para la generación de espectros de diseño. Para establecerlos es necesario, para un sitio de interés, caracterizar adecuadamente las intensidades sísmicas.

1.4.3 Escenario sísmico

La elección de un escenario sísmico para el área de interés depende en principio de la fuente en la cual se origina un sismo y en el orden en la frecuencia en la que ocurren, y que contribuye significativamente al peligro sísmico en México. Estas fuentes sismogénicas se dividen en tres:

Sismos de subducción o de falla inversa: Este tipo de sismos tienen origen a lo largo de la costa del océano Pacífico debido al límite convergente entre las placas oceánicas de Cocos y Riviera que subducen a la placa Norteamericana, estos sismos ocurren a profundidades menores de 50 [km]

Sismos de Falla normal o intraplaca: Los cuales ocurren debajo del continente ya sea en la placa oceánica o en la placa cabalgante Norteamericana y son producto de una falla de tipo normal de la litósfera oceánica subducida con profundidades mayores de 50 [km].

Sismos corticales y locales; generados en la placa continental su característica principal es que son percibidos por la población como un movimiento considerablemente fuerte de forma vertical seguida

de una vibración constante y rápida de corta duración así como de estruendosos crujidos subterráneos, su profundidad no es mayor a los 30 [Km].

El criterio para elegir un escenario sísmico, tiene como base el determinar ese escenario a partir de la información existente en los catálogos sísmicos instrumentales e históricos disponibles, de la información sismo-tectónica de las fuentes sismogénicas, esta es la metodología que se adquirió para realizar los espectros de diseño sísmico para el distrito Federal después del sismo del 19 de septiembre de 1985 (Rosenblueth et al., 1989, Ismael et al., 2011).

1.4.4 Elección del parámetro de intensidad sísmica

La intensidad sísmica para el diseño sísmico es dependiente de las propiedades de la estructura y de las condiciones geológicas del sitio de interés. El problema de establecer las medidas de intensidad sísmica adecuadas para el diseño de estructuras ha dado la oportunidad de identificar las incertidumbres para la estimación de la demanda sísmica ya que tiene una gran correlación con la medida de intensidad que se adopta para tal estimación (Ismael et al., 2011).

Algunas medidas de intensidad sísmica que se pueden adoptar son:

- i) El valor de aceleración máxima del terreno
- ii) La ordenada máxima espectral del espectro lineal de pseudoaceleración para un amortiguamiento $\xi\%$ de su valor crítico
- iii) El valor de la ordenada espectral para valores de periodo de vibrar de las construcciones.

CAPÍTULO 2: MAPA DE ZONIFICACIÓN PARA FINES DE DISEÑO SÍSMICO

2.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA URBANA DE ZACATELCO

Ubicado en el Altiplano central mexicano a 2 210 [msnm], el municipio de Zacatelco se sitúa en un eje de coordenadas geográficas entre los 19° 13' latitud norte y 98° 14' longitud oeste. El municipio de Zacatelco colinda al norte con los municipios de Tepeyanco y San Lorenzo Axocomanitla, al sur colinda con el estado de Puebla, al oriente se establecen linderos con los municipios de Santa Catarina Ayometla y Xicotzingo, asimismo al poniente colinda con los municipios de Tetlatlahuca y Nativitas (Figura 2.1).



Figura 2.1. Localización Geográfica del municipio de Zacatelco, Tlaxcala (imagen tomada del INEGI).

Datos del Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática (INEGI) indican que el municipio comprende una extensión territorial de 14.440 [Km²], lo que representa el 0.36% del territorio del estado cuya superficie total es de 4,060.923 [Km²].

2.2 DETERMINACION DE ZONAS CON EFECTO DE SITIO

Como primera actividad se realizó un estudio geológico y geomorfológico del municipio, con el fin de obtener información que describa los tipos de terreno y las estructuras presentes, de esta manera se tomo una mejor decisión en la colocación de los puntos de medición y también se realizó un análisis hidrológico, para ubicar depósitos sedimentarios, de esta manera se optimizo la adquisición de los datos.

2.2.1 Geomorfología y geología

El relieve de la región está dominada por una diversidad de estructuras morfológicas que se caracteriza por algunas porciones de serranías alargadas formadas por pliegues orogénicos en sedimentos marinos, por otro lado, se presentan serranías alargadas pero de origen volcánico de edad reciente. Destacan también estructuras volcánicas más jóvenes, conos y domos monogénicos, y el estratovolcán “La Malinche”.

Geomorfológicamente Zacatelco se localiza en el flanco norte interno de la fosa Izta-Malinche muy cerca del límite entre los abanicos volcánicos de la Malinche y la planicie que rellena la porción hundida de esta fosa (Figura 2.2). Zacatelco se encuentra al oeste del volcán la Malinche, situado sobre altiplanicies rellenadas por productos volcánicos, compuesto por depósitos aluviales del Cuaternario limitado por bordes rectilíneos, ligados a estructuras tectónicas, también se puede encontrar algunos otros elementos volcánicos al norte de la ciudad. En general el municipio presenta zonas planas, que abarca en su totalidad la superficie municipal.

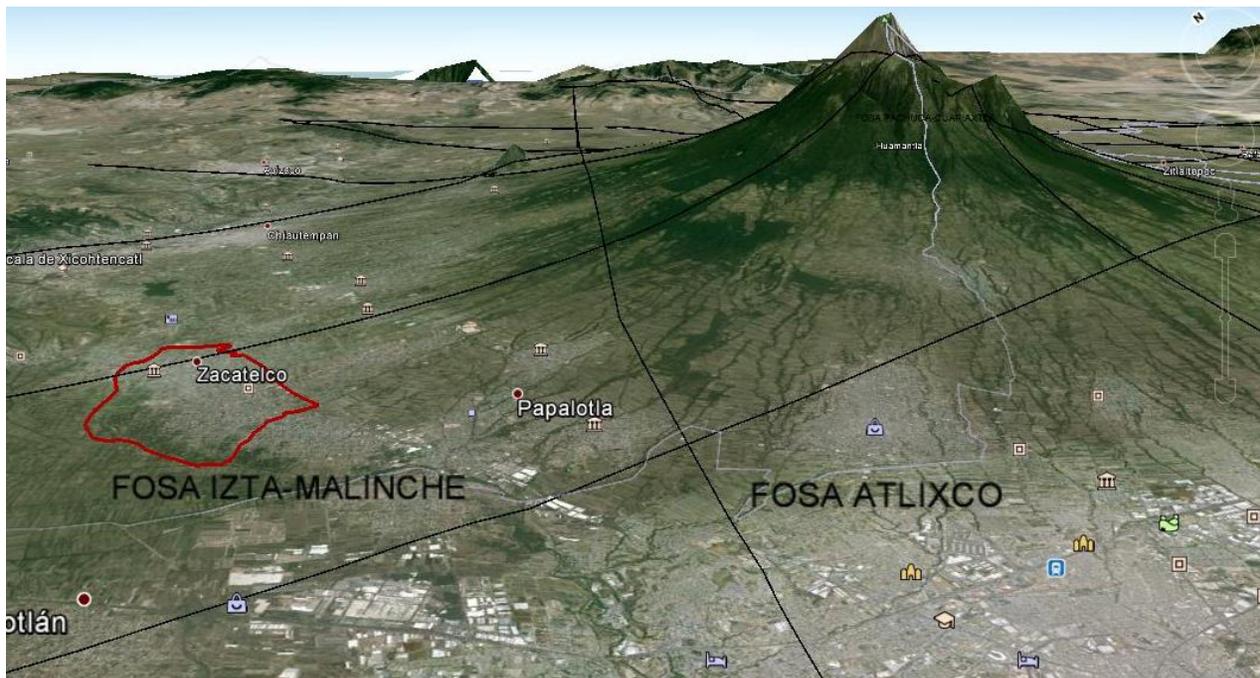


Figura 2.2. Morfología del municipio de Zacatelco. Al fondo de la imagen se observa el volcán La Malinche. La línea roja corresponde al límite de la zona de estudio (imagen obtenida de Google earth). En líneas color negro se puede apreciar la tectónica de los alrededores de la Malinche.

La secuencia litológica identificada en los alrededores de la Malinche está compuesta por una variedad de materiales rocosos que quedan restringidos al periodo comprendido entre el Cretácico inferior y el Reciente.

En la Figura 2.3, se muestra la columna estratigráfica de esta región de Tlaxcala, donde la unidad más antigua corresponde a las rocas cretácicas representadas por secuencias de calizas (Ki) desarrolladas en ambientes de arrecife y cercanos a él, estas rocas constituyen el cuerpo principal de la sierra de Soltepec. Sobre ellas se encuentran capas medianas a delgadas formadas por areniscas y lutitas del Cretácico superior; estas rocas se pueden observar en el frente de la Sierra de Soltepec y en el área de El Carmen Tequesquitla pero en afloramientos restringidos. En la falda sur de la Malinche se detectaron dos pequeñas elevaciones constituidas por calizas de arrecife (Ki), las cuales fueron cubiertas casi completamente por las emisiones piroclásticas de este gran volcán.

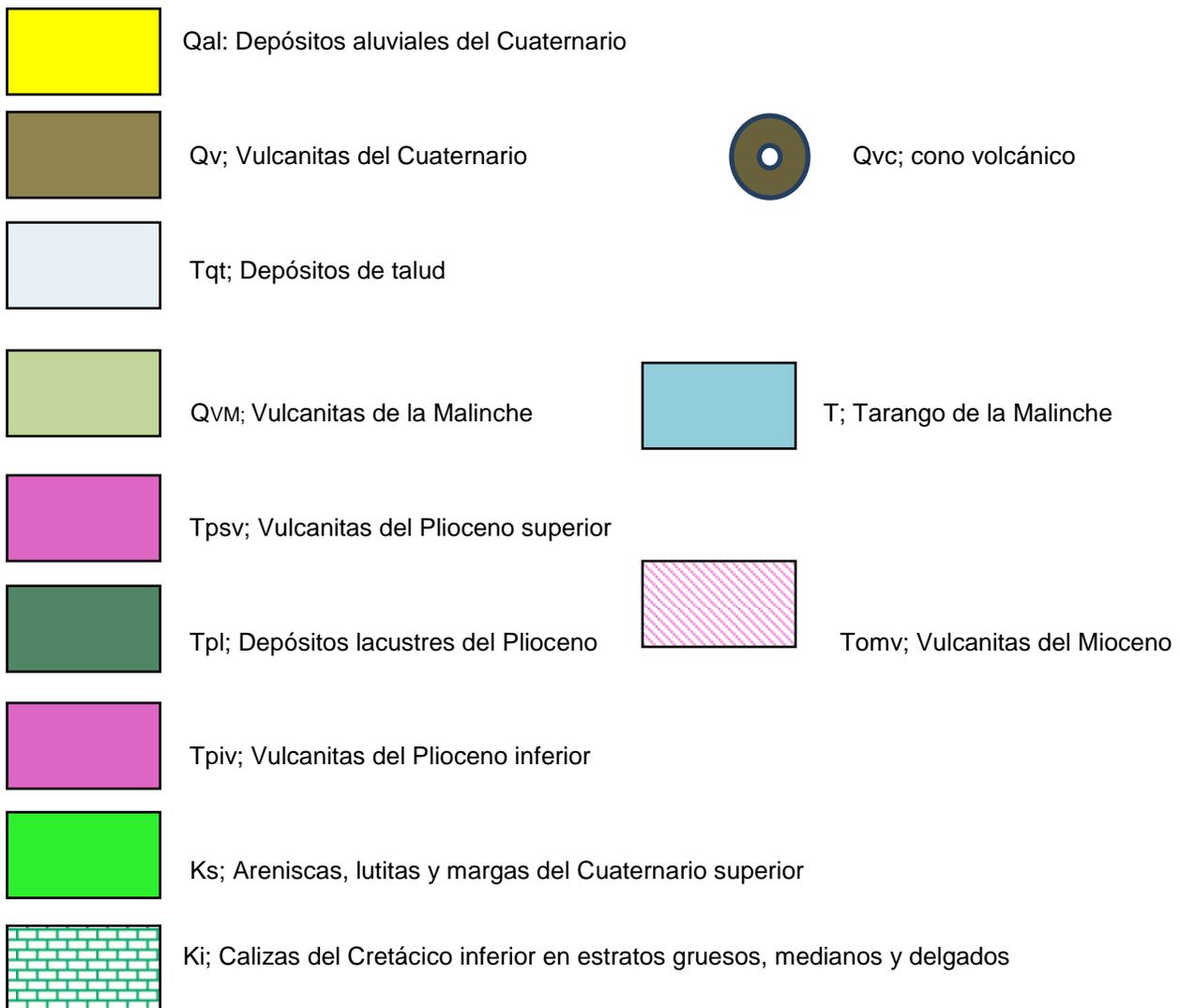


Figura 2.3. Columna estratigráfica de esta región de Tlaxcala.

El fin del Cretácico marca un parte aguas geológico, los mares terminan retirándose de la superficie actual del territorio mexicano e inician depósitos de materiales rocosos continentales incluidos vulcanitas y depósitos aluvio-fluvio-lacustres. Después de la orogenia Laramide ocurrida en los inicios del Terciario se formaron una serie de depósitos continentales representados por areniscas, conglomerados, limolitas, paleosuelos, tobas y hasta alguna capa de lavas aisladas, todos ellos se asocian a la formación Balsas del Eoceno-Oligoceno

Posteriormente en el Oligoceno-Mioceno se verifica un intenso vulcanismo en toda una franja paralela a la subducción de la placa Farallón; en el área de la Malinche y hasta la Cuenca de oriental se depositan vulcanitas (lavas y tobas) correlacionables con este vulcanismo y con aquel de la Sierra Madre Occidental y se reconocen en este trabajo con el símbolo Tomv. El Mioceno marca un cambio en el vulcanismo, termina el vulcanismo ligado a la Sierra Madre Occidental e inicia aquel asociado con la subducción de la placa Cocos que persiste hasta la actualidad y es el responsable del origen del Eje Neovolcánico.

Secuencias de rocas del Plioceno inferior y superior (Tpiv y Tpsv respectivamente) se observan en la sierra de Tlaxco, al noreste de la Malinche, en efecto en esta sierra se encuentran evidencias de grandes cuerpos volcánicos que formaron eventualmente estructuras de calderas por la que fueron emitidos probablemente grandes volúmenes de lavas y tobas. Intercalados entre estas dos secuencias volcánicas del Plioceno se encuentra una importante serie de productos lacustres incluidas arcillas, diatomitas, tobas arcillosas, travertinos y hasta algunas lavas aisladas que se reconocen en general como los depósitos lacustres del Plioceno (Tpl) y se observan en la región al norte de la Malinche desde las cercanías con Texmelucan en el poniente hasta la zona del Carmen Tequesquitla en el oriente.

En el Cuaternario continúa el vulcanismo ligado a la subducción de la placa Cocos en la Trinchera de Acapulco, aquel que dio origen a la Malinche (Qvm) formó un volcán central del cual se observan dos elementos claros, una caldera debajo del enorme cono volcánico más reciente que se observa en la cúspide del volcán; a los pies de esta mole volcánica se observan extensos abanicos volcánicos que se prolongan hasta las planicies aluvio-lacustres que rodean al volcán (T) (Figura 2.4).

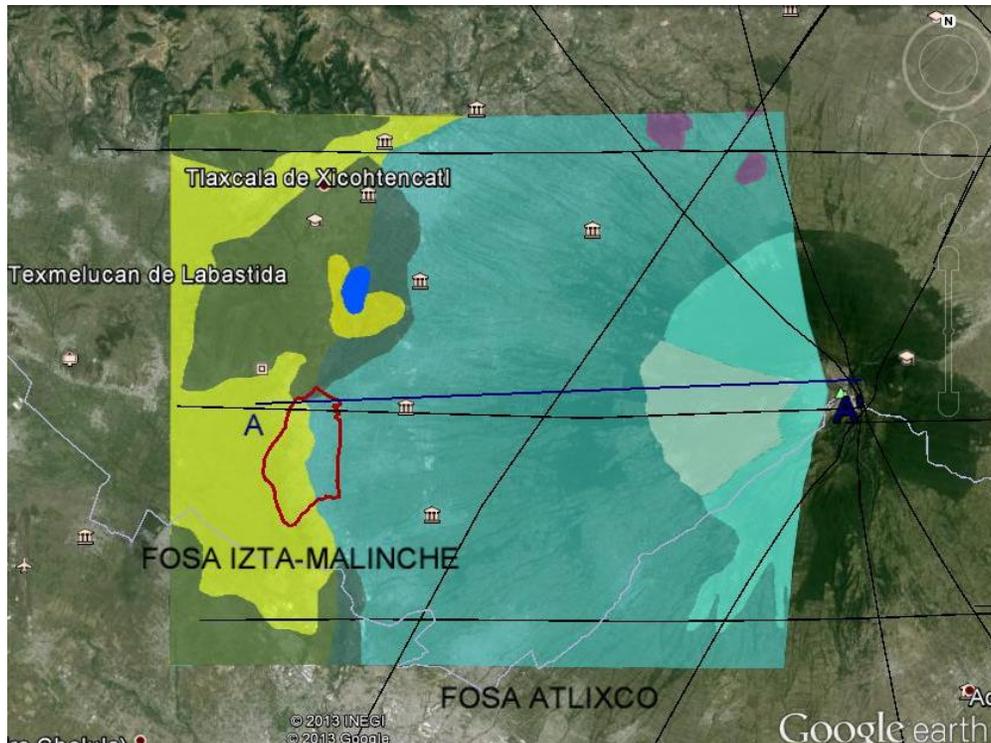


Figura 2.4. Mapa geológico de la región de Zacatelco en él se observan las principales unidades que afloran en el municipio. En líneas color negro se puede apreciar la tectónica de los alrededores de la Malinche.

Sin embargo también se observan numerosos volcanes monogenéticos de composición basáltica ligados con magmas profundos que formaron pequeños conos y domos por los cuales se emitieron lavas fluidas (Qv) que forman reducidos campos volcánicos, como aquel que se observa en los alrededores de Zacatelco, como se muestra en el mapa geológico de la región de Zacatelco (Figura 2.4).

Finalmente en la cima de la secuencia lito-estratigráfica se observan depósitos aluviales, fluviales y lacustres rellenando parcialmente regiones bajas como fosas tectónicas y valles, se identificaron con el símbolo (Qal)

Se elaboró también un perfil AA´ con dirección W-E, como se muestra en la Figura 2.5 trazada con una línea continua oscura, que atraviesa el municipio de Zacatelco, en ella se puede apreciar la secuencia litológica teórica debajo de esta poblacion así como las estructuras involucradas. Esta sección se presenta en la siguiente figura.

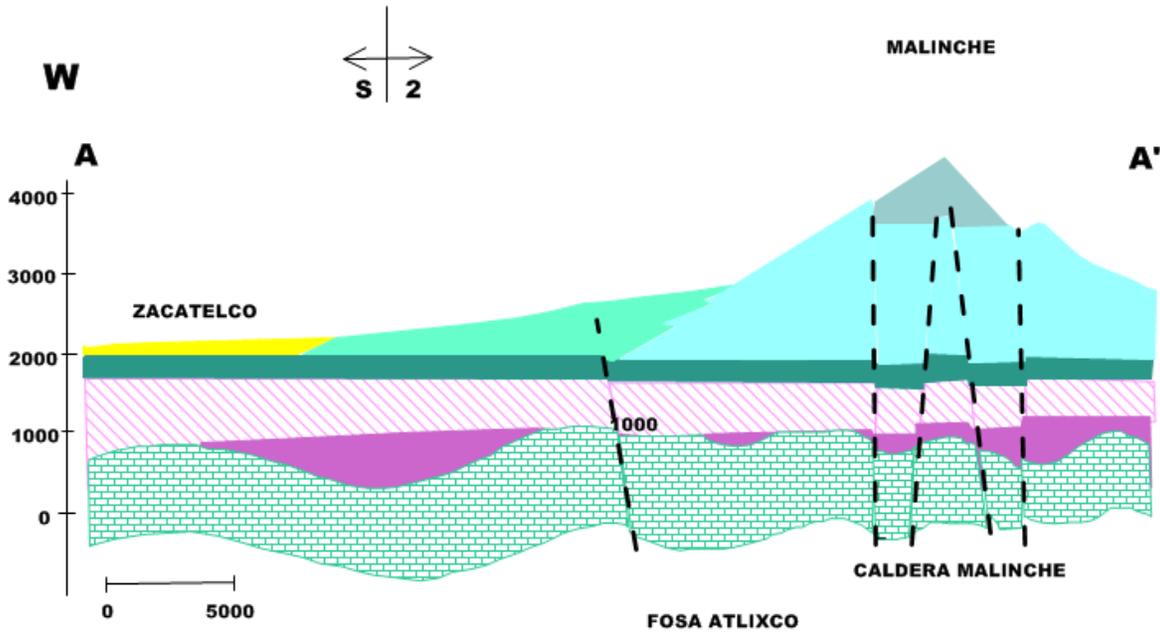


Figura 2.5. Perfil geológico AA', trazado de oeste a este en la planta geológica mostrada en la figura 3.4.

2.2.2 Zonas de inundación

Análisis unidimensional de “HEC-RAS” y sistemas de información geográfica “SIG” para determinar zonas de inundación y sedimentación

El análisis considera el empleo de una metodología que se basa en la determinación de áreas de inundación, creando modelos digitales de elevación de la zona de estudio, con la ayuda de programas computacionales tales como SIG, MapInfo y Arc View, esta último permite realizar redes de drenaje, utilizando únicamente la topografía de la región, tomando en cuenta rasgos característicos como son; los cambios antropogénicos, parteaguas, y subcuencas que drenan a la zona conurbada del municipio de Zacatelco.

Se partió de la hipótesis de que en las zonas de lomeríos, es llevado a cabo el proceso de erosión hídrica significativa del material, debido a la energía cinética del flujo, el cual aumenta en zonas de pendientes de mayor inclinación. En consecuencia se genera la sedimentación de los diversos materiales transportados por este proceso, cuando la velocidad del flujo disminuye, formando lo que la Geotecnia denomina terrenos blandos.

Es importante conocer el gasto líquido, para ello se emplean mapas de isoyetas para periodos de retorno de 10, 100 y 1000 años, con base en eventos hidrometeorológicos históricos (Espinoza, 2012).

Es preciso realizar un modelo hidrológico de la cuenca para obtener los parámetros que definen el nivel de escurrimiento y de erosión. Lo siguiente es efectuar un estudio hidráulico a cada sección transversal de las corrientes que atraviesan la región y municipios vecinos. Los datos arrojados de este estudio son la velocidad del flujo, así como también el tirante de la sección transversal. En la Figura 2.6 se muestra el sistema de drenaje natural del municipio de Zacatelco.



Figura 2.6. *Análisis hidrológico e hidráulico del municipio de Zacatelco.*

Por último se delimitan y determinan las zonas de inundación o también conocidas como áreas de sedimentación, realizando el análisis hidráulico unidimensional del flujo agua-sedimentos, calibrando variables de escurrimiento para diferentes gastos y considerando el gasto sólido que se sedimenta, todo esto es posible empleando el programa computacional “HEC-RAS”, del cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de Norte América.

A continuación se muestran las zonas de inundación y sedimentación que se obtuvieron para el municipio de Zacatelco, este tipo de información permite planear la logística del levantamiento de los datos, además, es posible determinar donde debe haber mayor densidad de registros de acuerdo a este análisis (Figura 2.7).

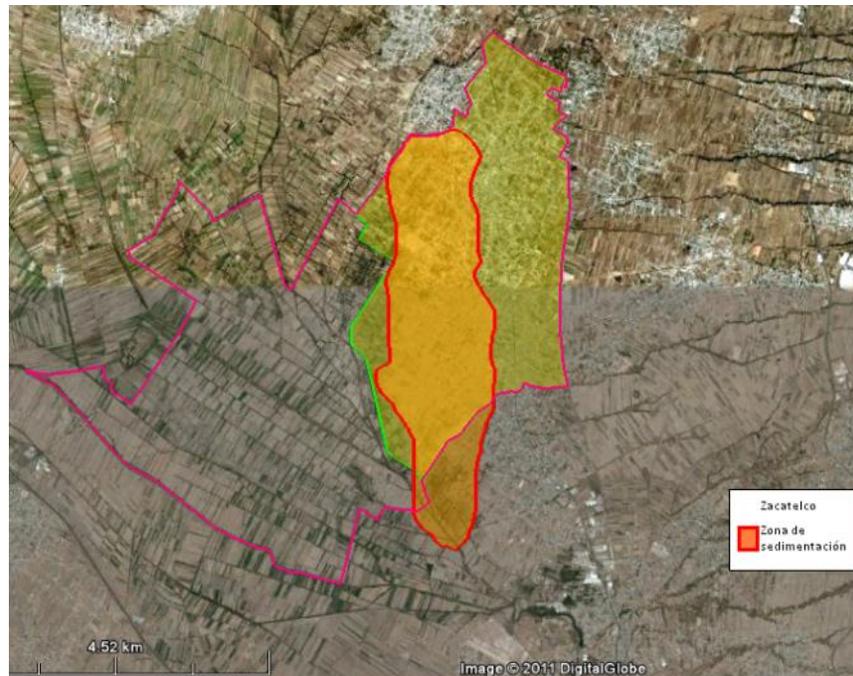


Figura 2.7 Mapa de inundación o sedimentación para el municipio de Zacatelco, Tlaxcala, (Espinoza 2012)

De acuerdo con este análisis, se realizó la distribución de los puntos de registro sísmico, poniendo mayor atención en las zonas de inundación y en zonas de depósitos aluviales, descritas en la geomorfológica y geológica de esta región. De esta manera se da paso a las campañas de registro sísmico.

2.3 MONITOREO SÍSMICO DE LAS ZONAS CON EFECTO DE SITIO

Como primera tarea se realizó una distribución de los puntos de medición, sobre los mapas de sedimentación, geológicos y geomorfológicos. La ubicación de los puntos debe ser en áreas donde se presente el menor nivel de ruido ambiental. Se ha observado que los sismógrafos de banda ancha arrojan una mejor aproximación del efecto de sitio en comparación con los acelerógrafos cuando se registran microtemores. En mesetas y zonas de lomeríos se asignó una menor número de puntos de medición a lo largo de la superficie debido a que se infirió que en estas zonas el efecto de sitio sería menor.

Se colocaron 26 estaciones de sismógrafos de banda ancha de la marca Guralp. La red temporal tuvo la tarea de registrar microtemores y sismos durante 5 meses aproximadamente, donde se obtuvo un evento importantes: el sismo del 21 de Enero de 2012 que tuvo su epicentro cerca del poblado de Mapastepec, Chiapas. Este sismo, permitió observar el comportamiento del suelo en dos diferentes puntos (Zaca04 y Zaca07). La distribución de la red temporal se muestra en la Figura 2.8 y los datos correspondientes al sismo se muestran en la Tabla 2.1.

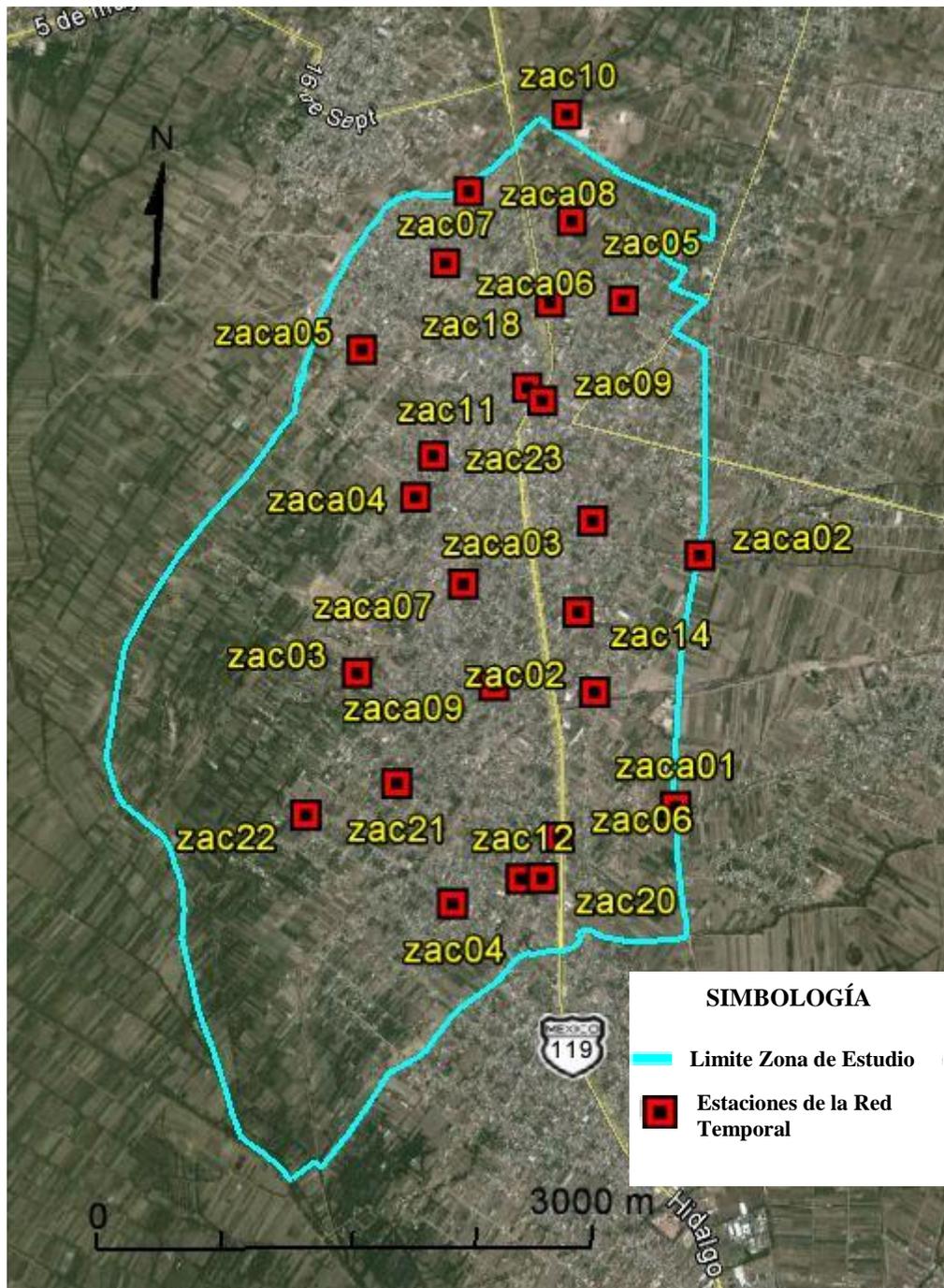


Figura 2.8. Red Temporal de Zacatelco con sismómetros de banda ancha.

Tabla 2.1. Se muestran los datos correspondientes al sismo de 21 de enero del 2012.

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof (Km)	Mag.	Zona	Registrado en:
21/01/2012	12:47:15	17.74	93.24	16	6	86 [Km] al suroeste de Mapastepec, Chiapas	ZACA04, ZACA07

2.3.1 Validación de las funciones de transferencia empíricas (FTE).

Durante algún tiempo se ha dicho que las FTE obtenidas con microtremores nos dan una buena aproximación del periodo fundamental, para la estimación del efecto de sitio, pero para las amplitudes los resultados no son buenos (Bonney-Claudet et al, 2006), por lo que se decidió realizar un análisis que nos demostrara que bajo ciertas condiciones, se puede obtener una buena aproximación tanto de los periodos fundamentales como de amplitudes correspondientes, y de esta manera obtener una buena metodología para el registro y análisis de microtremores en la zona urbana de Zacatelco.

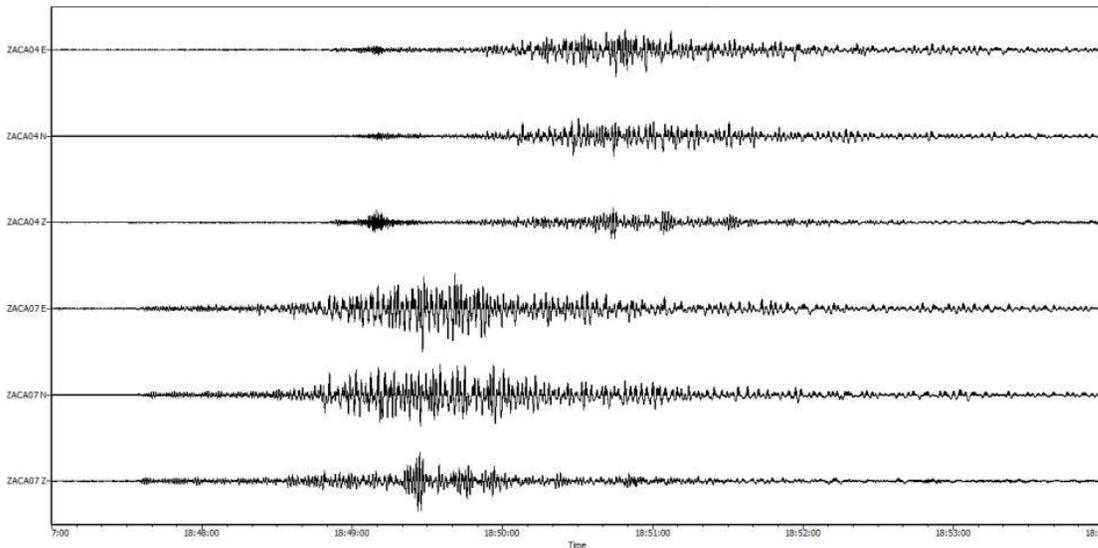


Figura 2.9. Sismogramas del sismo del 21 de enero de 2012 ($M=6.0$) registrado en las estaciones ZACA04 y ZACA07 de la Red Temporal Zacatelco.

Como primer análisis se obtuvo la FTE con el método de Nakamura para sismos (HVSR) para las estaciones Zaca04 y Zaca07, a partir del sismo del 21 de enero del 2012, la cual se muestra en la grafica de la Figura 2.10 línea gruesa de color roja, donde se puede apreciar dos máximos espectrales, uno a bajas frecuencias de 0.4 a 0.6 [Hz] y otro para altas frecuencias de 2 a 7 [Hz]. Posteriormente se obtuvieron FTE con el método de Nakamura para microtremores (HVNR) con registros de una duración de 15 [min], 30 [min], 1 [h], 2 [h], 3 [h] y 6 [h], tomadas de un registro de ruido a partir de la 1am (hora local), con el objetivo de realizar una comparación entre estos dos métodos y verificar en que tiempo es suficiente para la obtención de FTE.

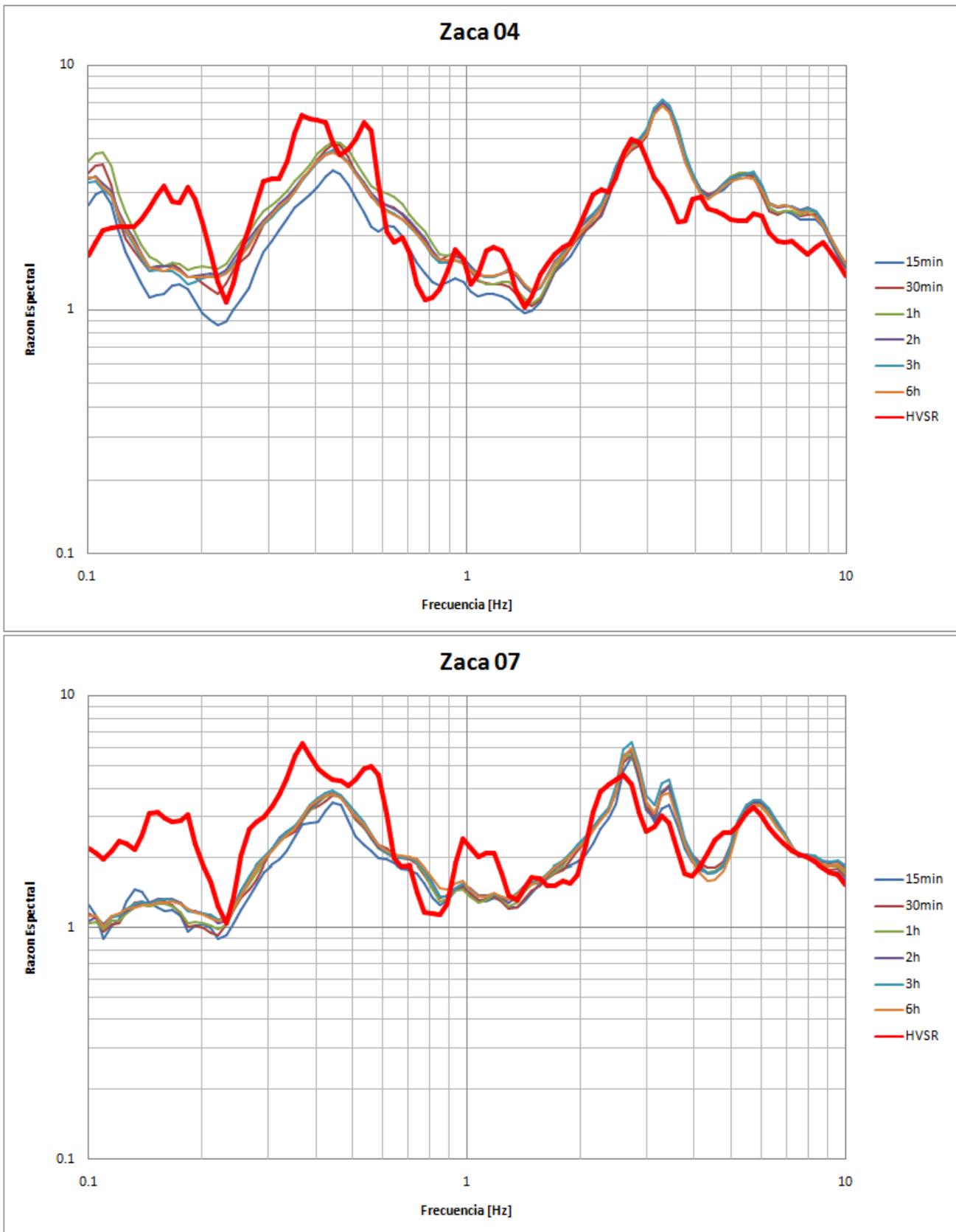
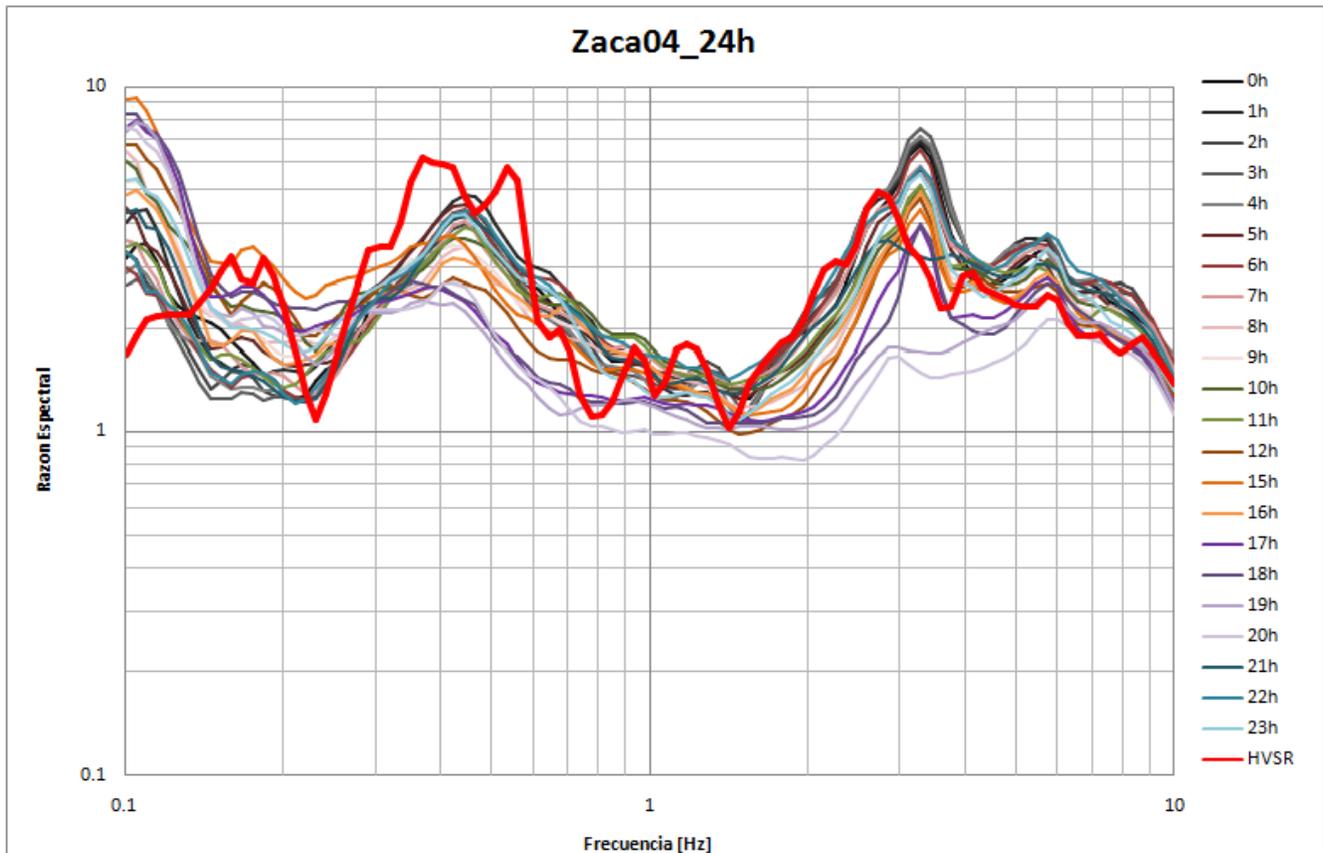


Figura 2.10. Funciones de Transferencia Empíricas para microtremores (HVNR) con registros de 15min, 30min, 1h, 3h y 6h. La FTE para el sismo del 21 de Enero del 2012 (HVSR) se encuentra en color rojo.

De las graficas obtenidas (Figura 2.10) se observa que para altas frecuencias la aproximación es buena en frecuencia y amplitud, incluso con 15 [min], el problema se encuentra para bajas frecuencias, donde se aprecia que con 15 y 30 minutos la aproximación de la FTE no es buena, ya que no alcanza los picos máximos de amplitud, una buena aproximación tanto en altas y bajas frecuencias se encuentra a partir de registros de una hora, estos definieron claramente los modos principales de vibración del suelo y dieron mejores resultados en la aproximación de las amplitudes.

Con este resultado se decidió hacer un segundo ejercicio para determinar en qué horario los resultados obtenidos son los mejores, debido a que la vibración ambiental cambia durante el transcurso del día. Se obtuvieron FTE con registros de una hora durante las 24 horas del día, y se compararon con las obtenidas con el sismo del 21 enero de 2012 (HVSr), los resultados se muestran en la grafica de la Figura 2.11.

De estas graficas se pudo comprobar que en ciertos horarios del día las funciones obtenidas nos arrojan muy malos resultados, principalmente a partir de las 6 de la tarde y hasta las 11 de la noche. Con esto se llego a una segunda conclusión, el mejor horario para la toma de datos es en la madrugada, entre la 1 y las 5 de la mañana (hora local).



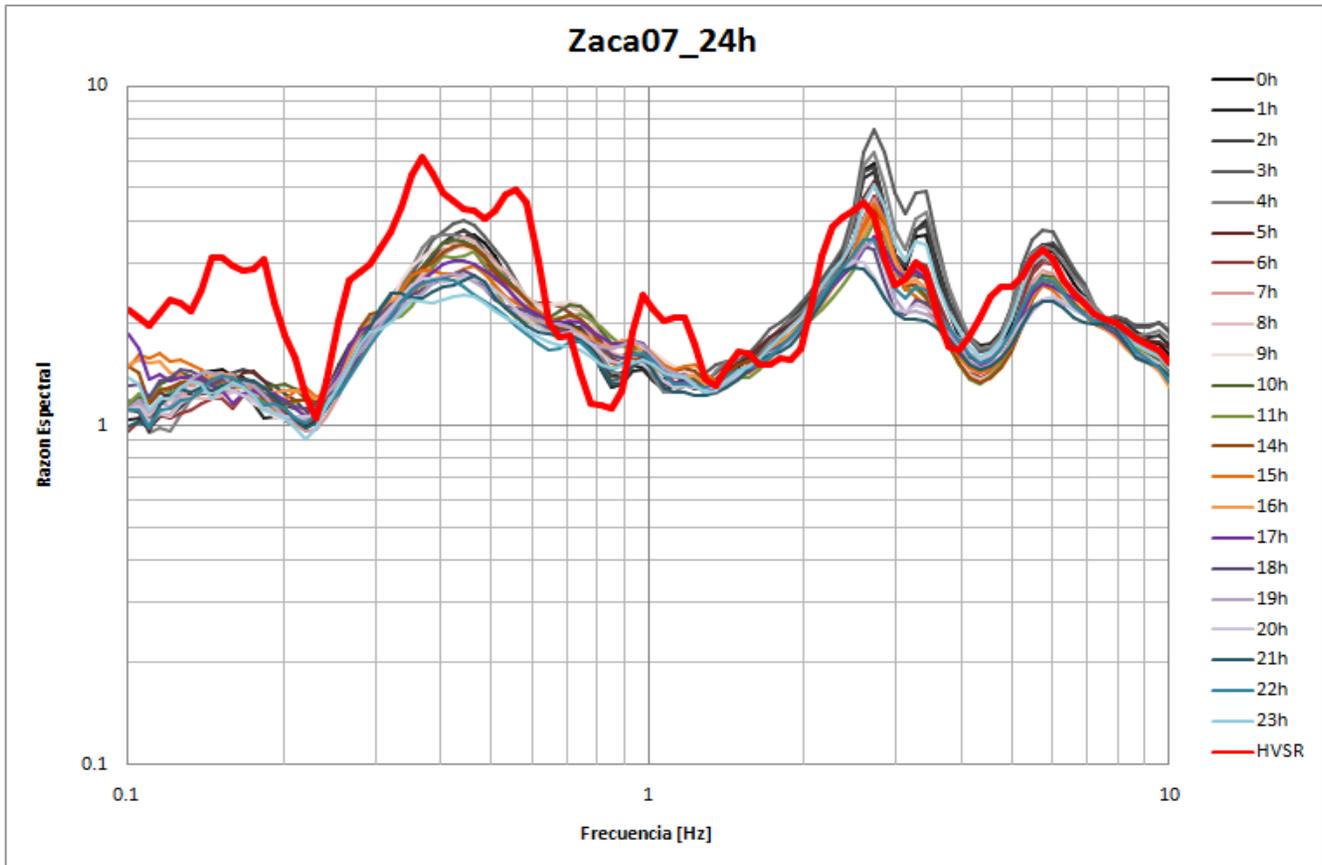
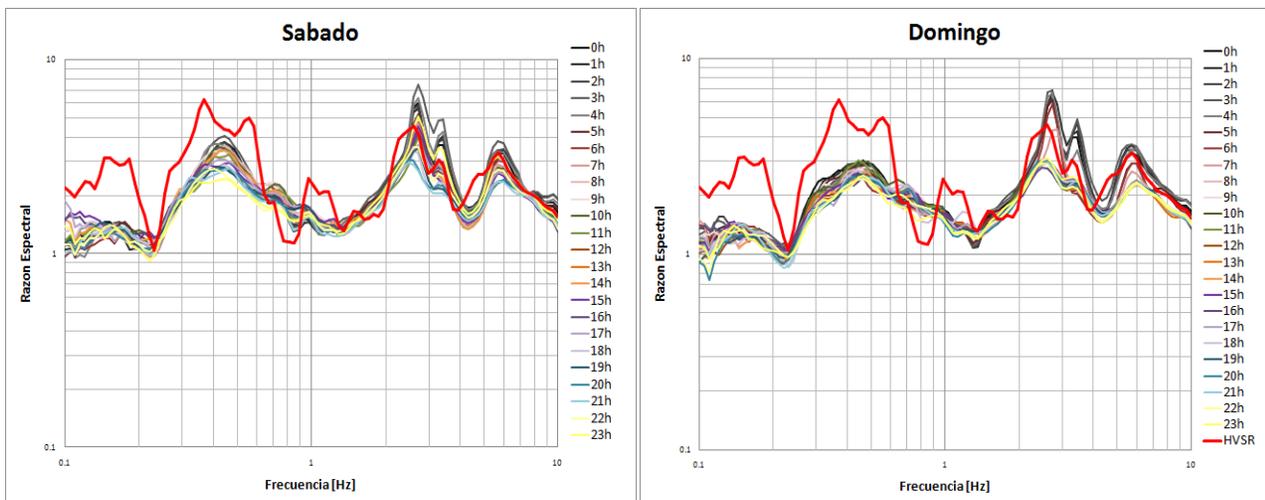


Figura 2.11. Funciones de Transferencia Empíricas para microtremores (HVNR) de 1h durante las 24 horas del día, la FTE para el sismo (HVS) se encuentra en color rojo.

El siguiente paso fue realizar el mismo análisis anterior para los 7 días de la semana, con el fin de observar si el comportamiento es similar, y verificar que día es el más adecuado para la obtención de las FTE. Únicamente se hizo el análisis para la estación Zaca07, dado que solo se contaba con registros de una semana en esta estación (Figura 2.12).



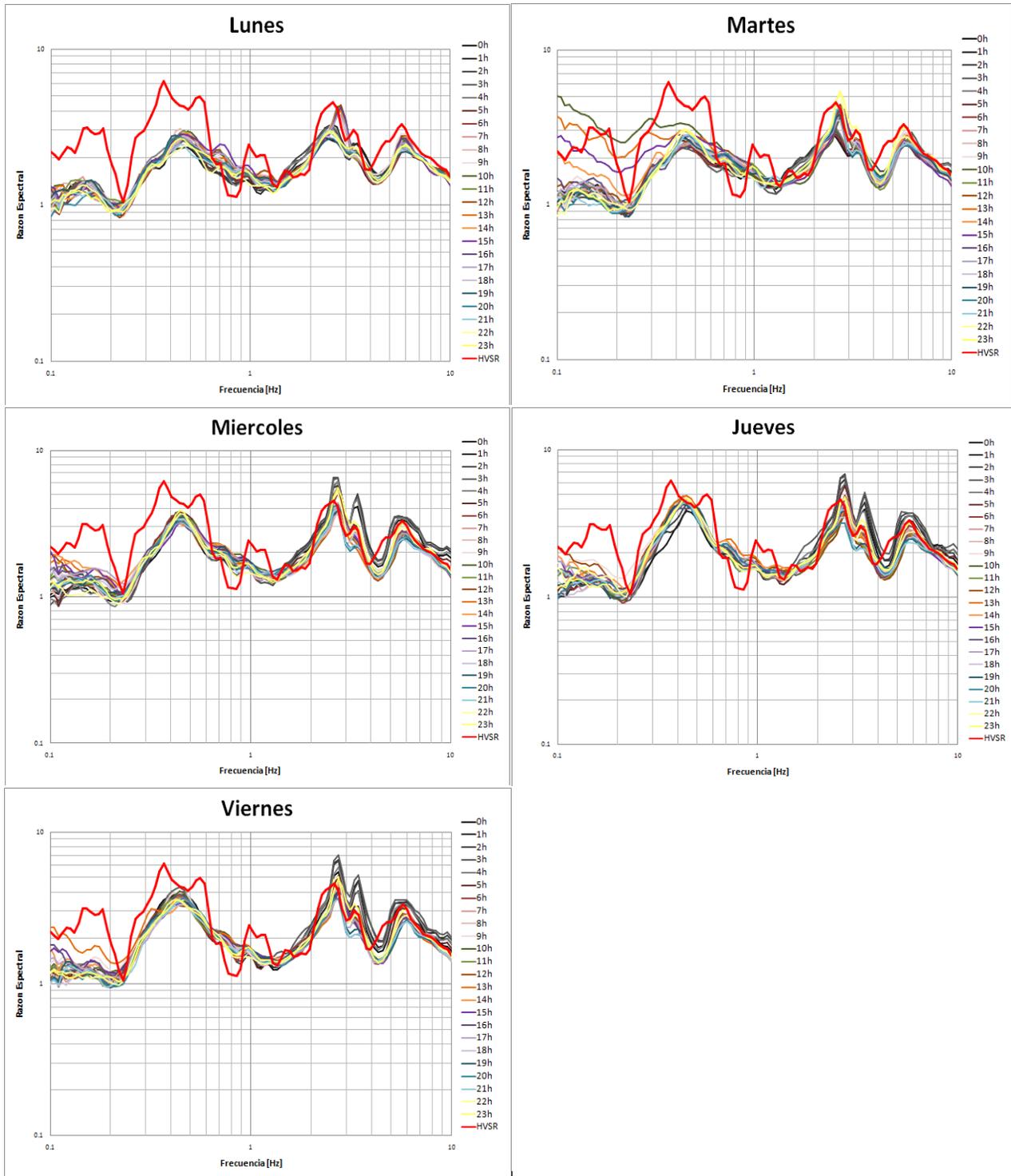


Figura 2.12. Funciones de Transferencia Empíricas para microtremores (HVNR) de 1h durante las 24 horas del día, para cada día de la semana, la FTE para el sismo (HVSR) se encuentra en color rojo.

De acuerdo con las graficas, la tendencia es muy similar sin importar el día de la semana, sin embargo, los días jueves y viernes presentan una mejor estabilidad en la variación de las amplitudes, por lo que es recomendable realizar la toma de datos en estos días para el análisis del efecto de sitio en la Ciudad de Zacatelco.

Como ejercicio final, para corroborar nuestros resultados y llegar a una conclusión final, se tomaron otras estaciones de nuestra zona para realizar el mismo análisis, que aunque no tuvieran un registro de algún sismo, nos serían de gran utilidad para observar si presentaban las mismas variaciones en las amplitudes que las estaciones Zaca04 y Zaca07. El resultado fue el mismo, todas las estaciones reflejaban variaciones similares durante el transcurso del día, y que la variación durante la semana no era muy significativa, aunque presentaban mejor estabilidad los días jueves y viernes,

En conclusión la metodología para la toma y análisis de nuestros datos, consiste en tomar registros de 1[h], entre la 1 y las 6 horas (hora local), preferentemente los días jueves o viernes, para finalmente obtener las FTE con solo 1 hora de registro, de esta forma los resultados para altas y bajas frecuencias nos darán una buena aproximación de las FTE tanto para altas como para bajas frecuencias.

2.3.2 Utilización de las funciones de transferencia empíricas para estimar efectos de sitio

A partir de los resultados anteriores se obtuvieron las FTE para nuestras 26 estaciones de nuestra red temporal, utilizando el programa GEOPSY para cada una, el programa usa la técnica de Nakamura (el cociente de las componentes horizontales con la componente vertical), las funciones obtenidas nos dan como resultado la amplificación del movimiento del suelo en términos de la frecuencia de vibración (f). En los últimos años investigadores proponen una teoría donde apuntan que el cociente HVNR, es un estimador de la frecuencia dominante, así como del nivel de amplificación del sitio, siempre y cuando se utilice el instrumento adecuado y la duración optima del registro, por lo tanto, tal cociente es el adecuado para describir las propiedades dinámicas del suelo, para determinar la respuesta de sitio (Sánchez-Sesma et al., 2011).

2.3.3 Familias Espectrales y mapa de zonificación.

Para la clasificación de familias espectrales se agruparon las funciones de transferencia empíricas de acuerdo a su forma espectral, este método sólo considera los rasgos predominantes de las formas espectrales, con este propósito se definieron un número razonable de microzonas. De esta manera, se puede decidir que la forma espectral de cada familia obtenida, nos describe el comportamiento dinámico según el tipo de terreno al que corresponde, en términos de periodos de vibración. Consecuentemente, es posible realizar una clasificación de acuerdo a las propiedades dinámicas del terreno y presenta ciertas ventajas, puesto que uno de los parámetros del diseño sísmico de las construcciones es precisamente el periodo fundamental de la construcción.

A partir de las Funciones de Transferencia Empíricas obtenidas para cada punto de medición, se pudo obtener 2 familias espectrales, y de esta manera clasificar nuestro terreno en 2 zonas:

Zona 1 (Firme o de Lomas); En la Figura 2.14 se observó una frecuencia predominante alrededor de los 0.4 [Hz] en las funciones de transferencia empírica, por lo tanto se considera que el efecto de sitio corresponde a un efecto regional debido a depósitos lacustres subyacentes a la unidad más joven, sin embargo para las frecuencias entre 1 y 10 [Hz] el valor de la amplitud de las FTE no rebasa las 2 veces, por lo tanto el efecto de sitio para viviendas entre 1 y 10 niveles no muestra riesgo alguno.

Zona 2 (Baja o de Depósitos Aluviales); Se encontraron frecuencias fundamentales en 3 y 6 [Hz], las cuales se observaron en todas las graficas de esta zona. Se puede concluir que habrá daños fuertes provocados por sismos con frecuencias altas (entre 3 y 6 [Hz]), esto para viviendas entre 1 y 3 pisos (las cuales son comunes en Zacatelco), esta hipótesis será comprobada cuando se haga el análisis de escenarios sísmicos con diferentes fuentes sísmicas en el capítulo 4.

En la siguiente figura se muestra la distribución de las funciones empíricas en las 2 familias obtenidas.

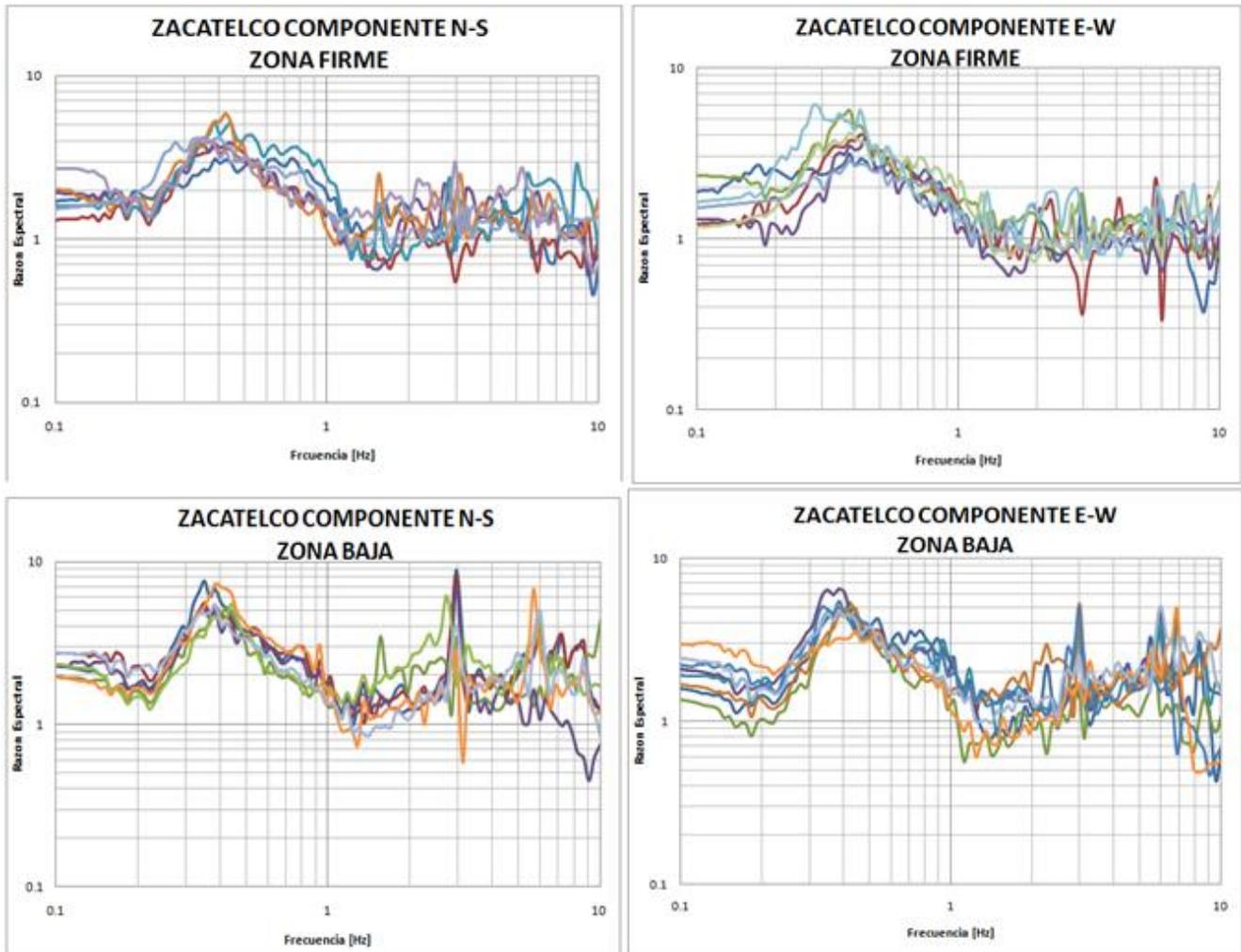


Figura 2.13. Familias espectrales de la zona urbana de Zacatelco criterio que define las microzonas sísmicas a partir de su forma espectral y depende de la frecuencia fundamental.

De los resultados anteriores se realizo el mapa de zonificación utilizando el programa Surfer, a partir el método de Kriging para la interpolación de los periodos fundamentales del terreno. En el mapa podemos observar las curvas de isoperiodos y nuestras 2 zonas (Figura 2.14).

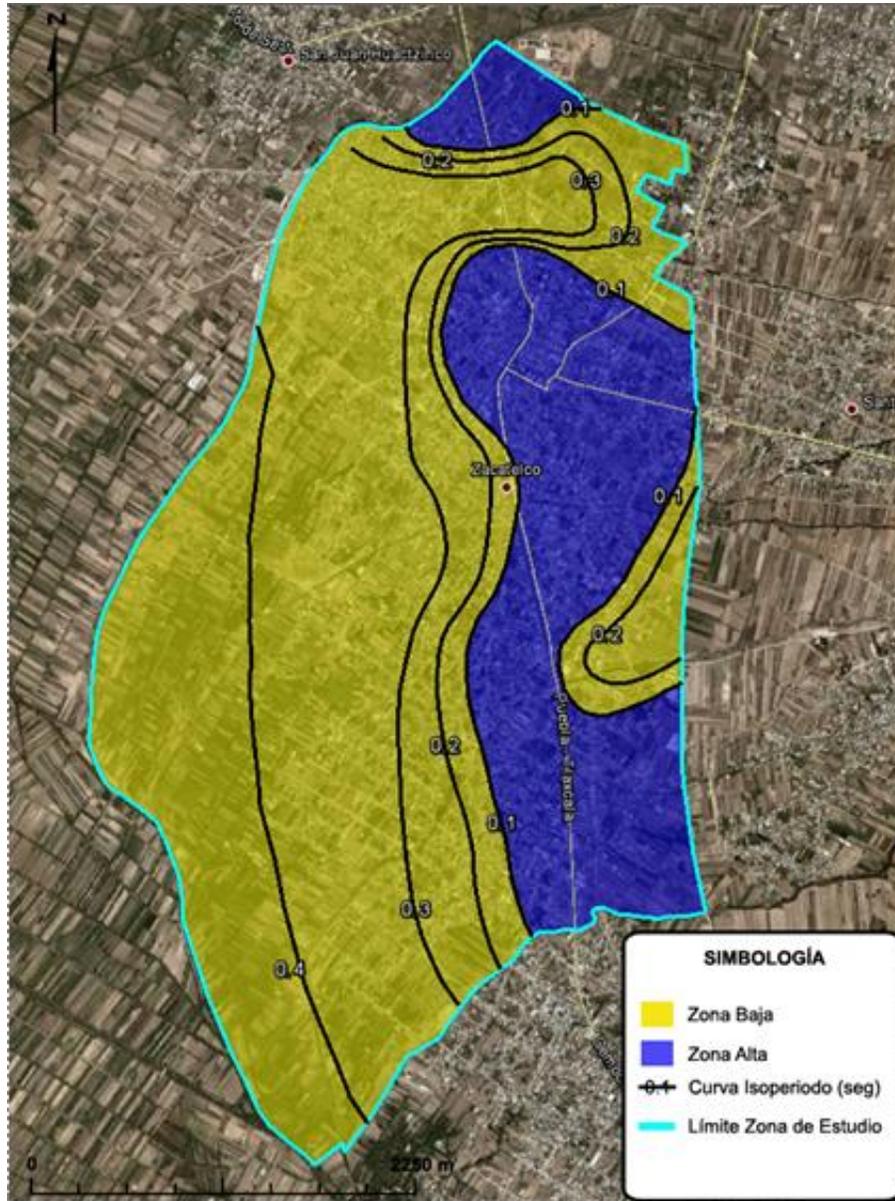


Figura 2.14 Mapa de Isoperiodos y Microzonificación propuesto para el municipio de Zacatelco, de color amarillo corresponde a la zona de depósitos aluviales y la zona de color azul indica la zona de lomas.

CAPÍTULO 3: FUENTES SÍSMICAS SELECCIONADAS PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS.

La elección de las fuentes sísmicas se hizo a partir de la base de datos sísmicos existentes, tomando como referencia una estación la estación LMPP, la cual se encuentra cercana a la zona de estudio y está ubicada en roca. En 2013 Lermo et al, demostraron que esta estación no presenta amplificación relativa entre los 0.2 y 10 [Hz], por lo que el efecto de sitio es nulo. Se consideraron tres tipos de fuentes sismogénica que aportan gran potencial sísmico al estado de Tlaxcala:

- **Sismos de subducción o de falla inversa.**
- **Sismos de falla normal o intraplaca.**
- **Sismos corticales y locales.**

La Figura 3.1 muestra la ubicación de los epicentros de cada sismo elegido, así como la zona sismogénica a la que pertenece.



Figura 3.1. Epicentros de cada uno de los sismos elegidos para la generación de escenarios sísmicos, en color verde se encuentra la estación de referencia en donde se registraron estos sismos. También se presentan las zonas sismogénicas del sur de la república (Zuñiga et al., 1997).

La siguiente información fue obtenida de Zuñiga et al, donde se describen las zonas mostradas en la Figura 3.1:

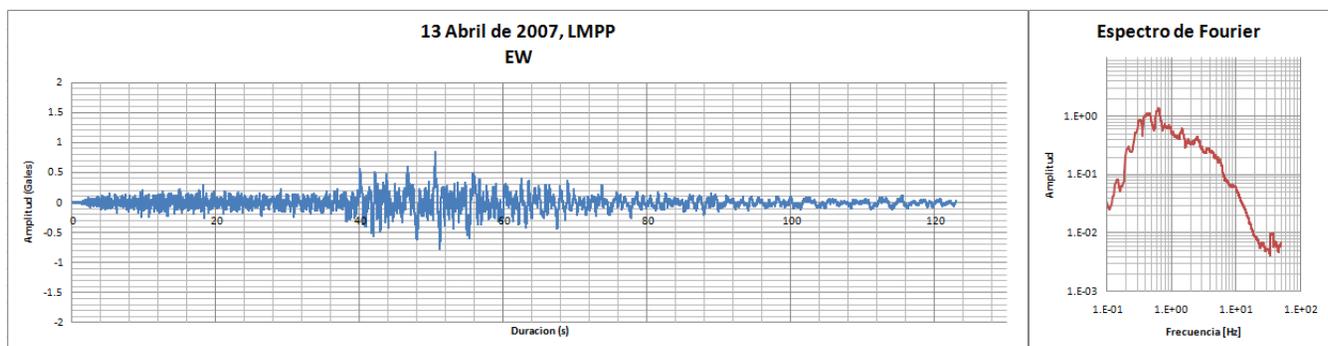
- Región SUB2: Zona de eventos interplaca someros del tipo subducción. Convergencia entre la placa de Cocos y Norteamérica.
- Región SUB3: Zona de eventos interplaca someros del tipo subducción. Convergencia entre la placa de Cocos y Norteamérica, zona de transición.
- Región IN1: Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ($40 \text{ [Km]} < h < 120 \text{ [Km]}$). Relacionados a la interface entre las placas de Cocos y Norteamérica.
- Región IN2: Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia. Relacionados a la zona de transición.
- Región IN3: Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia. Relacionados a la interface entre las placas de Cocos y del Caribe.

3.1 SISMOS DE SUBDUCCIÓN O DE FALLA INVERSA

3.1.1 Sismo ocurrido el 13 de Abril del 2007 y localizado en Atoyac de Alvarez, Guerrero (M 6.3)

El día 13 de Abril de 2007 el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo con magnitud 6.3 localizado en las cercanías de Atoyac de Álvarez, en el estado de Guerrero. El sismo, ocurrido a las 00:42 de la madrugada, fue sentido en la ciudad de México, en Acapulco y en otras localidades del estado de Guerrero. En Atoyac de Álvarez se presentaron únicamente dos casas con daños estructurales, de acuerdo al reporte de Protección Civil. Las coordenadas del epicentro son 17.09 latitud N y -100.44 longitud W y la profundidad es de 41 [Km] el cual se muestra en la Figura 3.1.

En la Figura 3.2 se muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación LMPP. La aceleración máxima fue de $0.84 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ para la componente EW, $0.98 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ para la componente NS y $0.72 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.3 a 1 [Hz], como nos muestran los Espectros de Fourier.



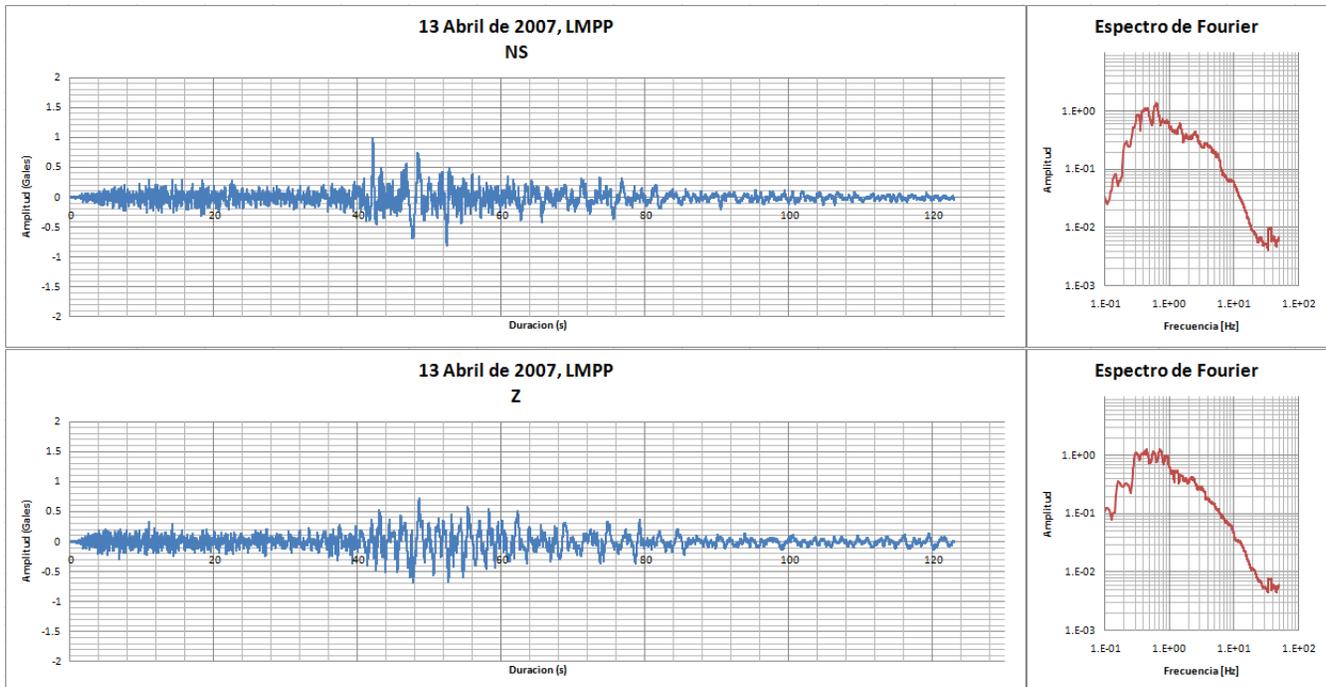
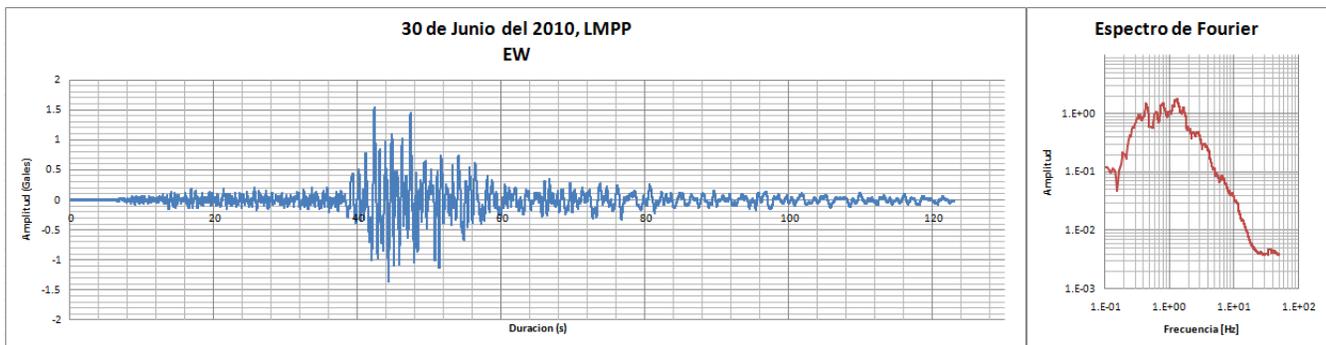


Figura 3.2. Acelerogramas registrados en la estación LMPP durante el sismo del 13 de Abril de 2007, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.1.2 Sismo ocurrido el 30 de Junio del 2010 localizado en las Costas de Oaxaca ($M = 6.0$)

El día 30 de Junio de 2010 el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo con magnitud 6.0 localizado en las costas del estado de Oaxaca, a 13 km aproximadamente al Sur de Pinotepa Nacional. El sismo ocurrió a las 02:22 horas, tiempo del centro de México. Las coordenadas del epicentro son 16.27 latitud N y 98.03 longitud W (Figura 3.1).

A continuación se muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación LMPP. La aceleración máxima fue de 1.54 [cm/s²] para la componente EW, 1.45 [cm/s²] para la componente NS y 1.78 [cm/s²] para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.3 a 2 [Hz], como nos muestran los Espectros de Fourier.



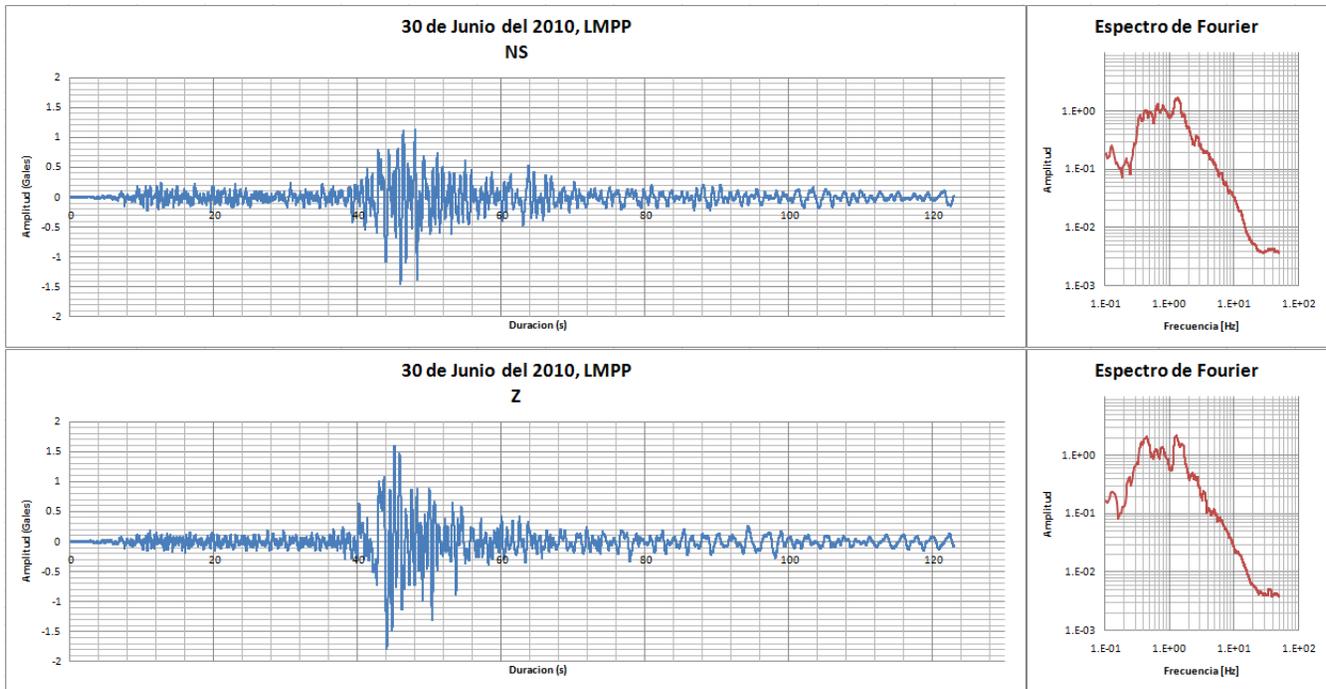


Figura 3.3. Acelerogramas registrados en la estación LMPP durante el sismo del 12 de Febrero del 2008, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.2 SISMOS INTRAPLACA O DE FALLA NORMAL

3.2.1 Sismo ocurrido el día 15 de Junio de 1999 y localizado en Tehuacán, Puebla (M 7.0)

El 15 de junio de 1999, a las 15:41:06 hrs. (hora local), ocurrió un sismo de magnitud Mw 7.0 (mb 6.3) con epicentro localizado a 35 km al suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla. Los daños más relevantes se concentraron en hospitales, viviendas, escuelas y monumentos históricos. Aunque los mayores daños se produjeron en el estado de Puebla, también resultaron afectadas algunas partes de los estados de Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala y Morelos. El sismo causó intensidades de hasta VIII (Escala Mercalli Modificada) en una amplia zona entre las ciudades de Huajuapán y Puebla, tal como se muestra en el mapa de isosistas de la Figura 3.4 (Gutiérrez, 1999).

Se ha seleccionado el sismo del 15 de junio de 1999 (Mw7.0) porque es el sismo máximo más reciente y que ocurrió a menos de 100 kilómetros del estado de Tlaxcala, provocando intensidades de Mercalli entre VI y VIII grados, como ya se ha mencionado. Por otro lado, dado que no existen registros de este sismo en el estado de Tlaxcala, y la estación más cercana al estado de Tlaxcala es la estación CHFL, ubicada en roca, y que tiene registros de aceleración, se tomará como semilla para generar los acelerogramas sintéticos utilizando las funciones de transferencia empíricas (FTE) obtenidas en la ciudad de Zacatelco.

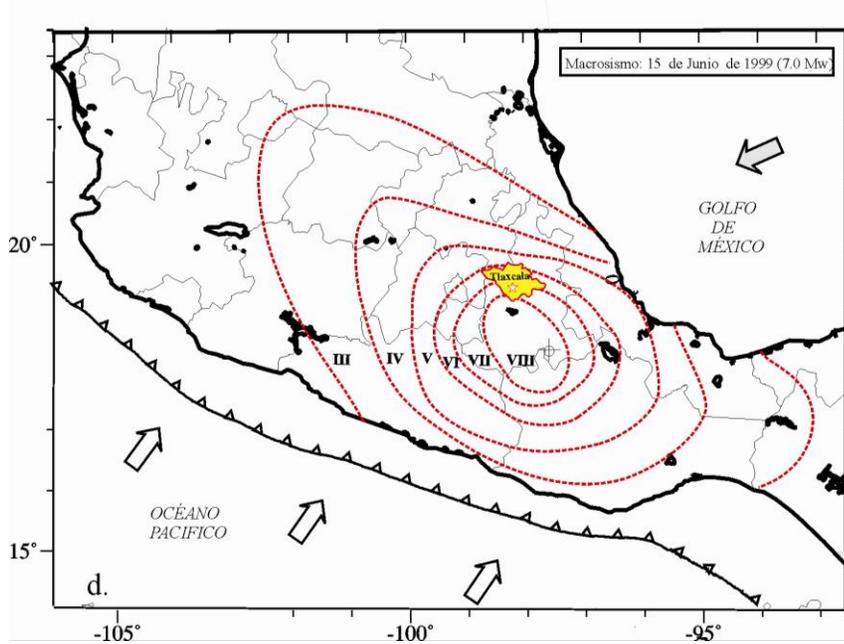
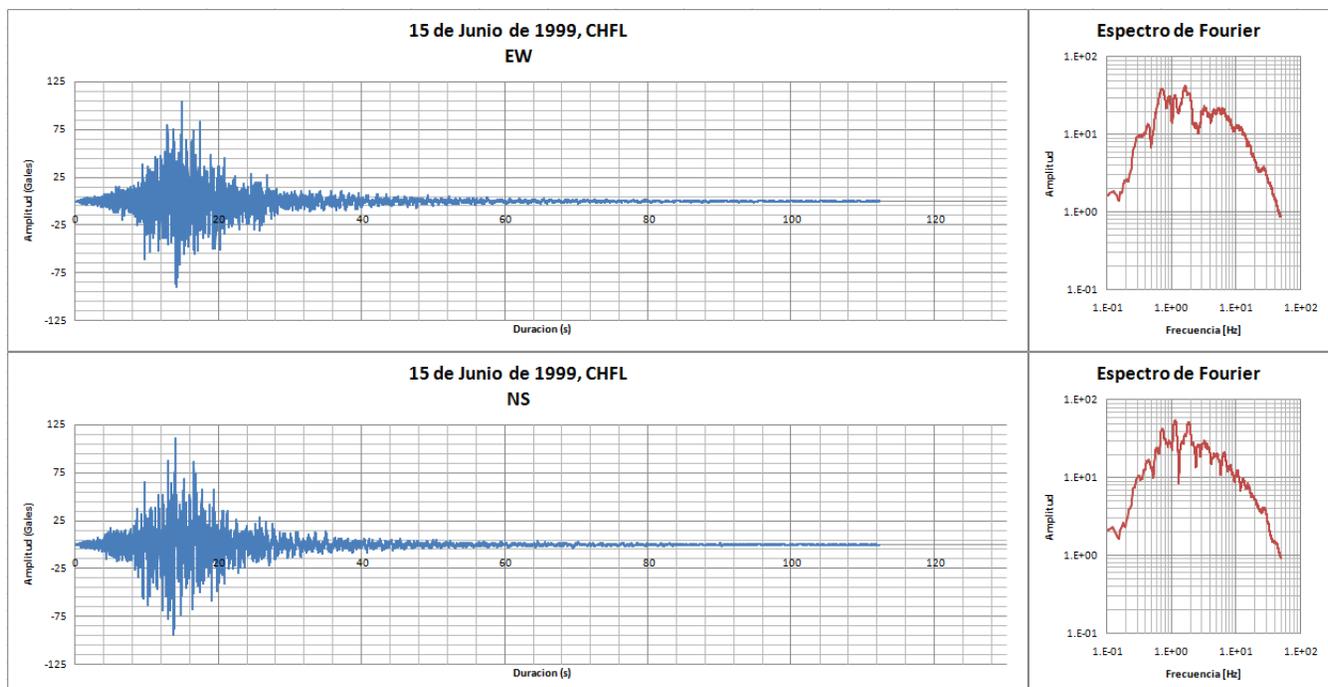


Figura 3.4. Mapa de isosistas en la escala Mercalli Modificada para el sismo del 15 de junio de 1999 ocurrido en Tehuacán, Puebla, que causo daños en el estado de Tlaxcala (Singh et al., 1999).

La Figura 3.5 nos muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación CHFL, la cual se encuentra cercana a la zona de estudio. La aceleración máxima fue de 104 [cm/s²] para la componente EW, 110 [cm/s²] para la componente NS y 72 [cm/s²] para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.5 a 11 [Hz], como puede apreciarse en los Espectros de Fourier.



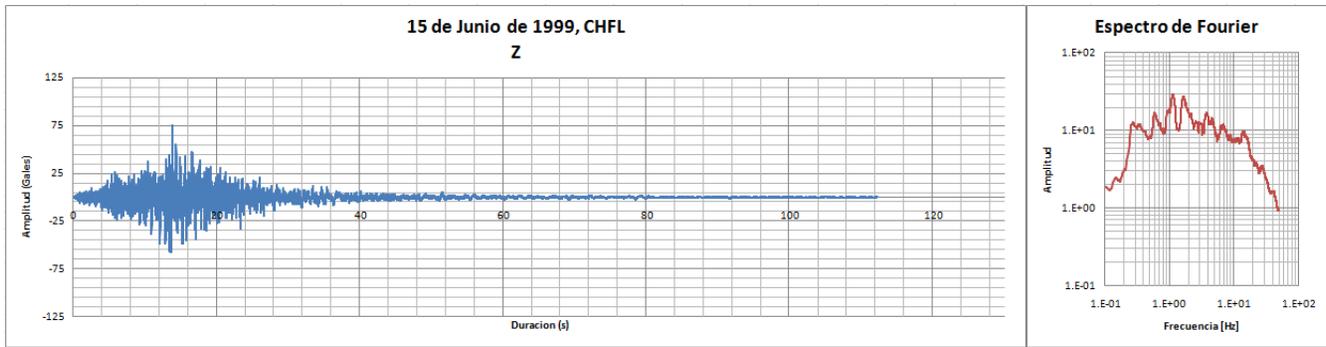
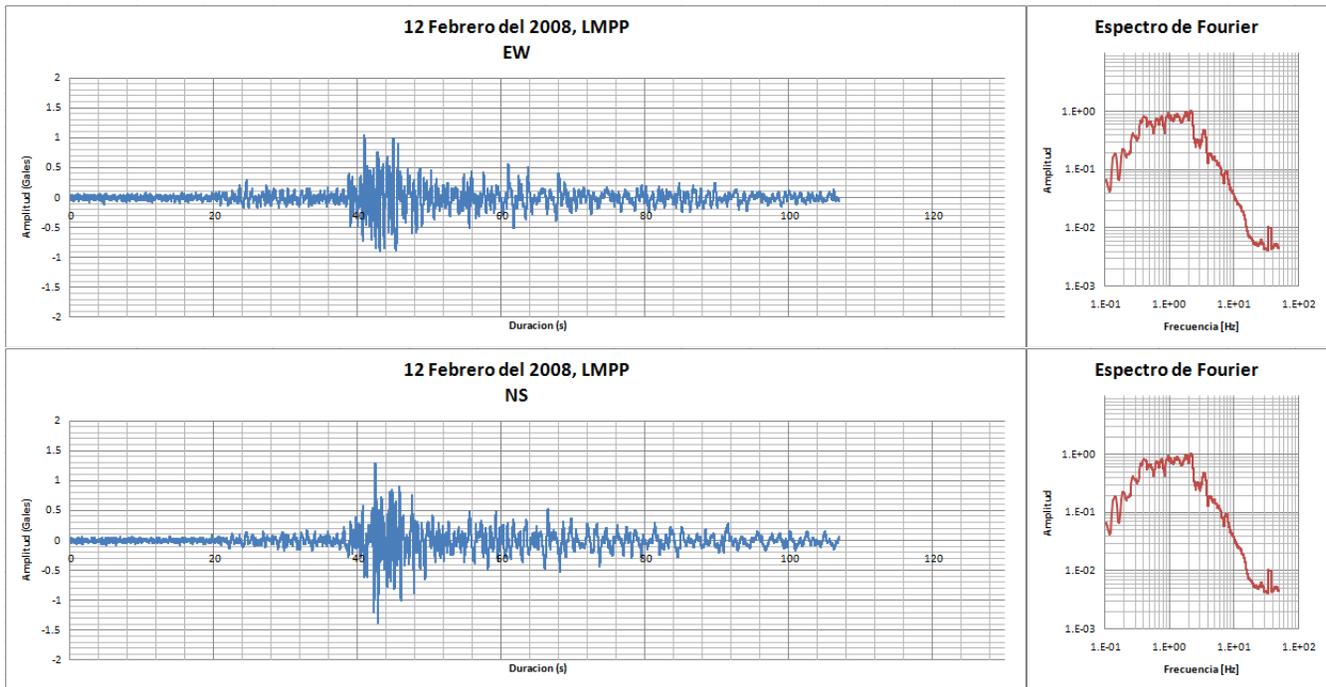


Figura 3.5. Acelerogramas registrados en la estación CHFL durante el sismo del 15 de Junio de 1999, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.2.2 Sismo ocurrido el 12 de Febrero del 2008 y localizado en el Istmo de Tehuantepec ($M = 6.6$)

El día 12 de Febrero de 2008 a las 06:50:18 hora local ocurrió un sismo con epicentro en las coordenadas geográficas 16.19 y -94.54, a 44 [Km] al sureste de unión Hidalgo, Oaxaca. El evento ocurrió a una profundidad de 90 [Km].

La siguiente figura muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación LMPP. La aceleración máxima fue de 1.04 [cm/s²] para la componente EW, 1.38 [cm/s²] para la componente NS y 0.76 [cm/s²] para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.3 a 2 [Hz], como nos muestran los Espectros de Fourier.



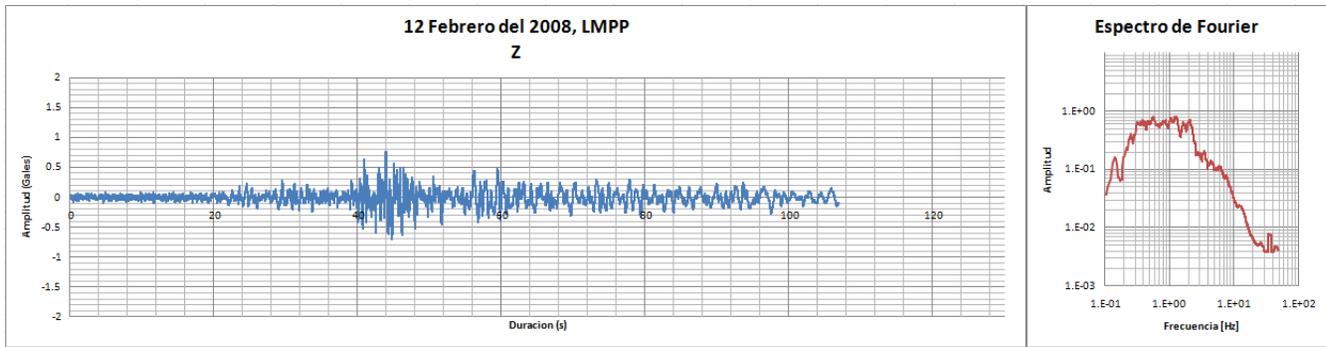
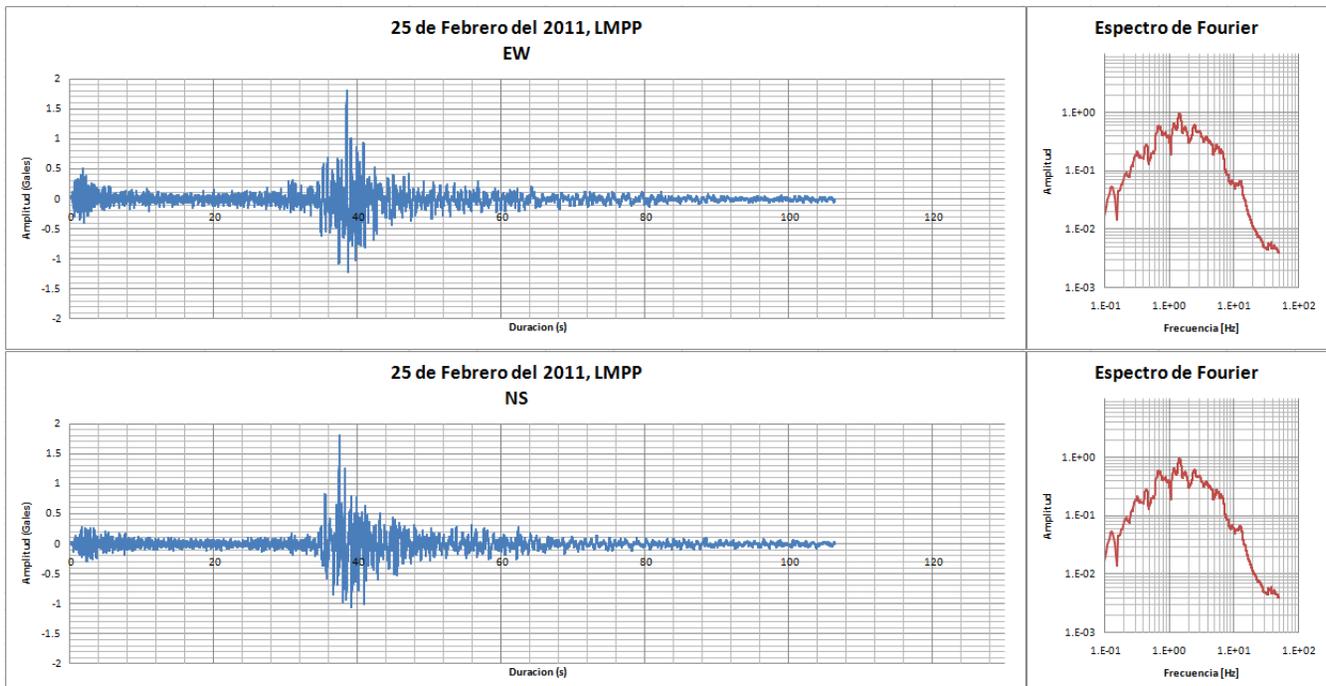


Figura 3.6. Acelerogramas registrados en la estación LMPP durante el sismo del 12 de Febrero del 2008, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.2.3 Sismo ocurrido el día 25 de Febrero de 2011 y localizado en la Costa de Veracruz ($M = 6.0$)

El día 25 de febrero de 2011 el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo con magnitud 6.0 localizado en la costa del estado de Veracruz, a 30 km al Suroeste de Sayula de Alemán, Veracruz. El sismo ocurrió a las 07:07 horas, tiempo del centro de México. Las coordenadas del epicentro son 17.76 latitud N y 95.21 longitud W (Figura 3.1).

La Figura 3.7 nos muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación LMPP. La aceleración máxima fue de 1.8 [cm/s²] para la componente EW, 1.81 [cm/s²] para la componente NS y 1.63 [cm/s²] para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.2 a 10 [Hz], como puede apreciarse en los Espectros de Fourier.



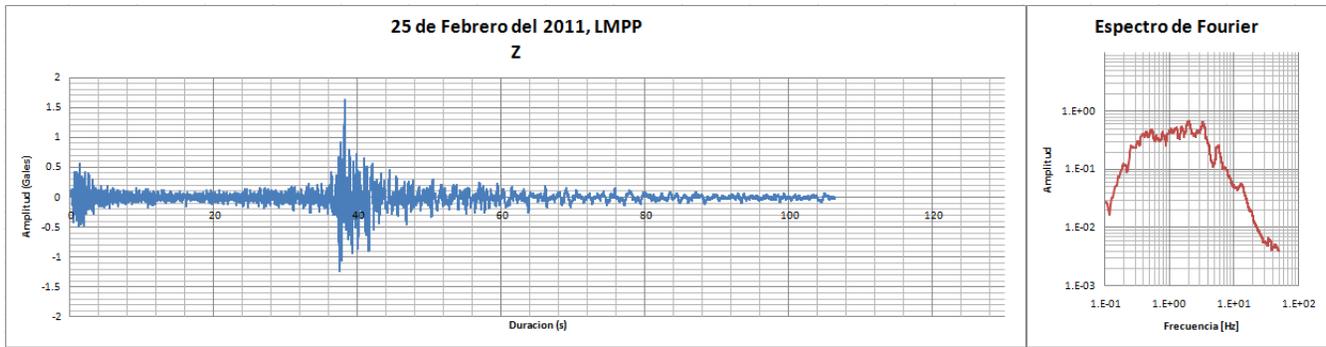
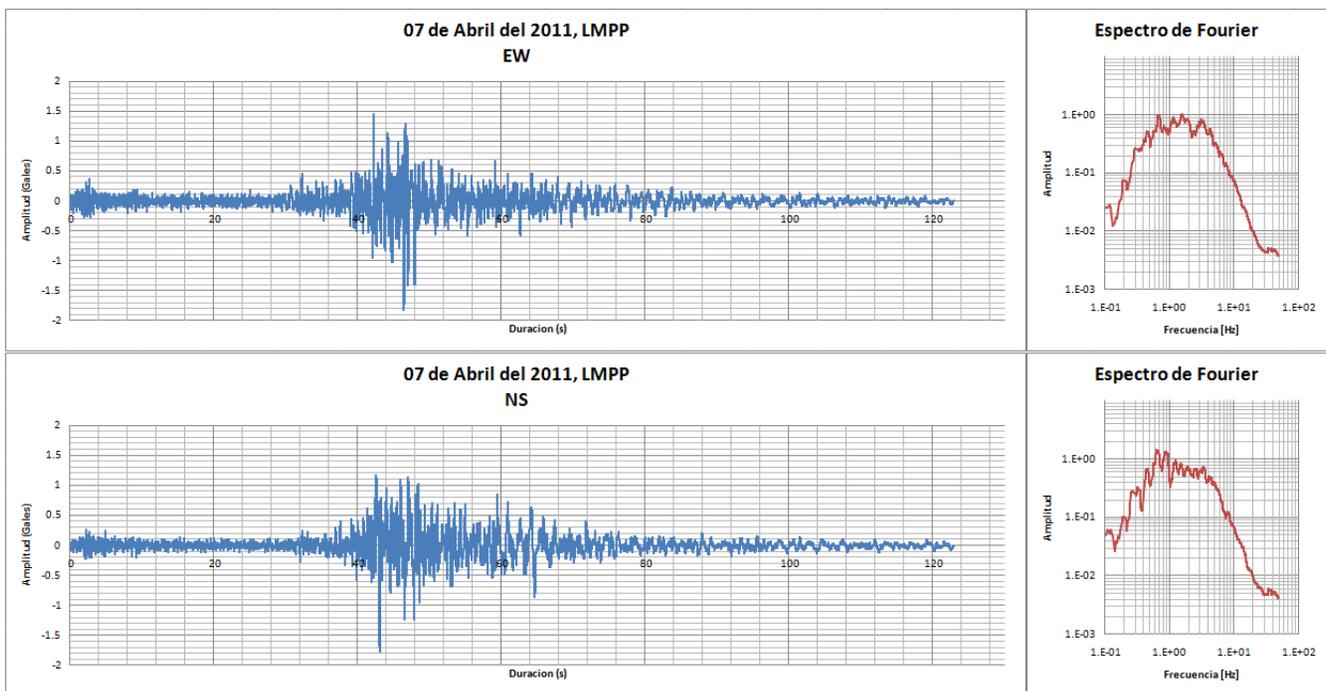


Figura 3.7. Acelerogramas registrados en la estación LMPP durante el sismo del 25 de Febrero del 2011, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.2.4 Sismo ocurrido el día 7 de Abril de 2011 y localizado en el Istmo de Tehuantepec ($M = 6.7$)

El día 7 de Abril de 2011 el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo con magnitud 6.7 localizado en el Istmo de Tehuantepec, a 83 km aproximadamente al Suroeste de Las Chopas, Veracruz. El sismo ocurrió a las 8:11 horas, tiempo del centro de México. Las coordenadas del epicentro son 17.20 latitud N y 94.34 longitud W (Figura 4.14). La profundidad del hipocentro es 167 km. Fue sentido en las regiones cercanas al epicentro e incluso en la Ciudad de México.

La Figura 3.8 nos muestra el registro sísmico de las 3 componentes junto con sus Espectros de Fourier registrados en la estación LMPP. La aceleración máxima fue de 1.83 [cm/s²] para la componente EW, 1.78 [cm/s²] para la componente NS y 1.21 [cm/s²] para la componente vertical, las máximas amplitudes ocurrieron en un intervalo de frecuencias de 0.2 a 6 [Hz], como puede apreciarse en los Espectros de Fourier.



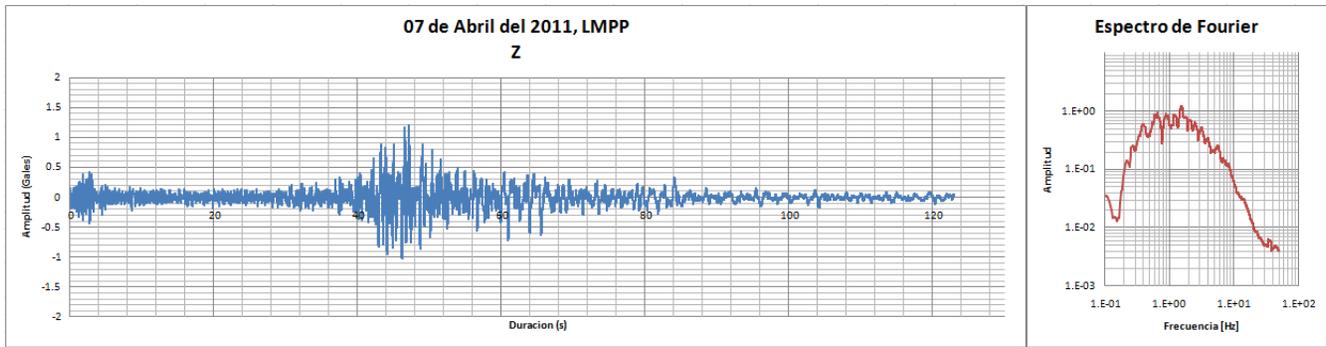


Figura 3.8. Acelerogramas registrados en la estación LMPP durante el sismo del 07 de Abril del 2011, para las 3 componentes junto con sus Espectro de Fourier.

3.3 SISMOS CORTICALES Y LOCALES

3.3.1 Sismo ocurrido el 6 de Abril de 1959 y localizado en Tlaxcala (M 4.7) (Sismo Simulado)

Para este escenario, se tomara en cuenta el registro del sismo local y cortical que ha provocado la mayor aceleración hasta la fecha (49 gales en la componente NS) en la estación acelerografica de Ciudad Universitaria (CU) de la UNAM (Prince, 1974, Chavacán, 2007). Este sismo fue localizado en la Sierra del Chichinautzin, a menos de 11 [Km] de la estación sismológica, sus parámetros hipocentrales son:

Fecha	hh mm ss	Lat	Long	Prof	Mag
A M D		grados	Grados	Km	MI
1974-07-12	14:38:27	19.291	99.200	7.0	3.7

Utilizando este sismo como una semilla se logro generar un acelerograma sintético de magnitud 4.7, por medio del método de Funciones de Green, para lo cual se utilizo los parámetros de fuente mencionados en la Tabla 4.1, para una falla normal. En la Figura 3.9 se muestra el registro y su espectro de Fourier de este acelerograma simulado.

Tabla 3.1. Parámetros para generar el acelerograma sintético de un sismo de falla normal generado para la zona de terreno firme en la estación CU de Ciudad Universitaria, de la UNAM.

Fuente	Ms	Función de Green	R	Duración (s)		Caida de esfuerzos	Q	densidad	Vs
			Km	Fuente	Sitio	Bares		gr/cm ³	Km/s
Local	4.7	CU , Ms=3.7	11	7	20	50-100	200	2.5	2.3

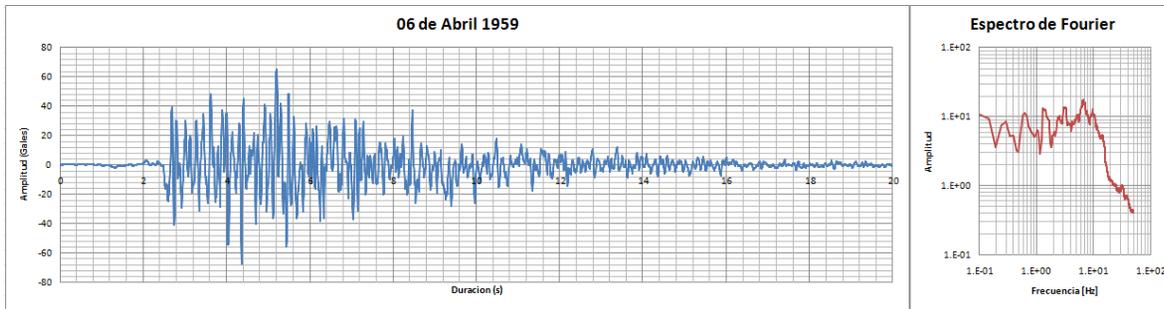


Figura 3.9. Registro y su espectro de Fourier del acelerograma sintético desarrollado para simular el sismo del 6 de abril de 1959.

Dado que el sismo semilla, pertenece a un sismo cortical superficial, asociado al sistema de fallas normales de Milpa Alta de la Sierra del Chichinautzin, así como se pudo simular un sismo de mayor magnitud, en este caso de 4.7; nos permiten tomar esta simulación como una alternativa para utilizarlo también de semilla en nuestro escenario sísmico para un sismo local, cortical superficial y que haya ocasionado daños a las poblaciones cercanas al epicentro como el ocurrido el 06 de abril de 1959 al oriente del Estado de Tlaxcala en las cercanías de los municipios de Cuapiaxtla, Tlaxcala y el de Lara Grajales, Puebla.

Por otro lado, también se tomo en cuenta la similitud en la magnitud de este sismo simulado, con la magnitud del sismo ocurrido el 06 de abril de 1959 al oriente del estado de Tlaxcala, que también es 4.7.



Figura 3.10. Mapa de isosistas del terremoto del 6 de Abril de 1959 ($m_b=4.7$), con líneas azules se muestran la isosistas. Líneas amarillas, falla y fracturas. Con un círculo rojo la ubicación del sismo principal.

CAPÍTULO 4: ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA ZONA URBANA DE ZACATELCO

En los últimos años la ingeniería sísmica y la sismología, han tratado de estimar la intensidad sísmica que puede manifestarse en una región con una sismicidad considerable, ante la presencia de eventos sísmicos con localización y magnitud determinados. Desde el punto de vista de la ingeniería sísmica este tipo de problemas se considera probabilista por ser un fenómeno aleatorio, sin embargo, en esta ocasión será considerado con un enfoque determinista.

El éxito de estimar el nivel de intensidad sísmica esperado en una región, dado un evento sísmico de magnitud y localización determinada depende enormemente de la caracterización de las condiciones locales y regionales como son: la geología, la estratigrafía, geomorfología, las propiedades mecánicas del suelo, etcétera. Para fines de diseño, es necesario que estos parámetros cuenten en gran medida, con una gran correlación con los que representen las propiedades mecánicas y dinámicas del diseño sísmico de las construcciones.

Los estudios de peligro sísmico incluyen una descripción de las fuentes sísmogenéticas que pueden afectar considerablemente el estado de Tlaxcala y por supuesto, el municipio de Zacatelco, para ello se generan muestras representativas de historias detalladas del movimiento del terreno, con amplitudes y contenido de frecuencias adecuados según la fuente sísmogénica, la trayectoria de las ondas sísmicas y las propiedades dinámicas del terreno.

Como resultado de lo anterior, surge la necesidad de implementar un algoritmo que permita calcular el acelerograma en superficie, mediante un acelerograma registrado instrumentalmente en una estación base, (ubicada en roca, sin efecto de sitio y cercana a la fuente) y la función de transferencia empírica de cada lugar donde existió un registro sísmico, sin la necesidad de obtener en primera instancia una función de transferencia Teórica.

4.1 CÁLCULO DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS Y MAPAS DE ACELERACION ESPECTRAL UTILIZANDO FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS (FTE).

El valor de la intensidad sísmica dentro de la microzonificación del municipio de Zacatelco, se obtiene al realizar el cálculo de las historias de aceleración en la superficie, generando acelerogramas sintéticos, en donde se tenga la función de transferencia empírica correspondiente y posteriormente determinar los espectros de respuesta.

El cálculo se realizó generando un algoritmo que permite estimar el acelerograma en superficie (sintético) que consiste en el escalamiento entre la función de transferencia empírica que se obtuvo de cada punto de registro sísmico y la componente horizontal del sismo seleccionado que presenta la mayor aceleración o mayor energía. Como primer paso se obtuvo el espectro de Fourier del sismo para realizar el producto de este con la función de transferencia empírica en el dominio de las frecuencias, en la Figura 4.1 se muestra como ejemplo el Espectro de Fourier del la componente EW del sismo ocurrido el 15 de Junio de 1999, junto con la FTE de la estación Zac05.

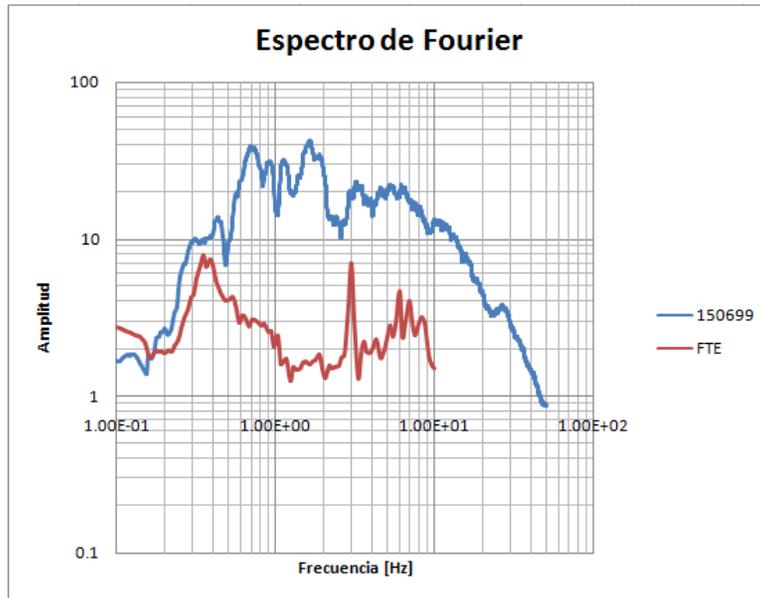


Figura 4.1. Espectro de Fourier para el sismo del 15 de junio de 1999 y la función de transferencia empírica de la estación Zac05.

Un segundo paso es aplicar la transformada inversa de Fourier a este producto para obtener el acelerograma en superficie en el dominio del tiempo para cada punto donde se tiene un registro sísmico dentro de la ciudad de Zacatelco, en la siguiente figura se muestra en color rojo el acelerograma de la componente horizontal del sismo del 15 de Junio de 1999 y en color azul se muestra el acelerograma sintético obtenido para la estación Zac05.

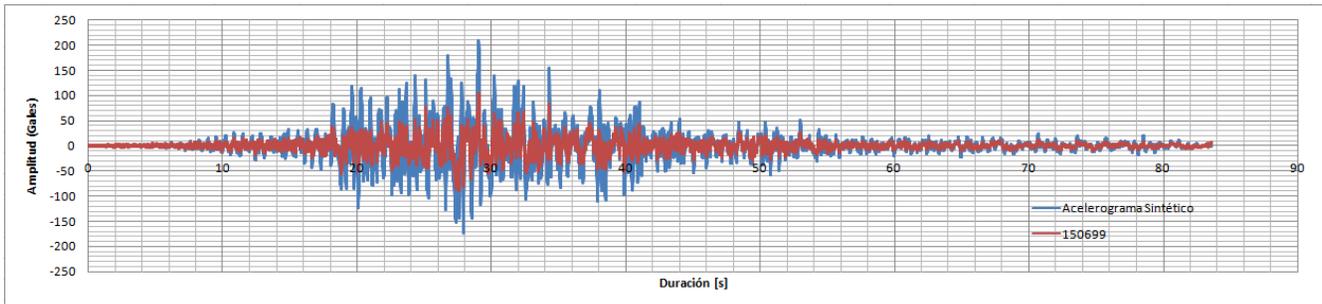


Figura 4.2. Acelerograma de la componente horizontal del sismo del 15 de Junio de 1999, junto con el acelerograma sintético obtenido para la estación Zac05.

4.1.1 Metodología para la obtención de mapas de aceleración espectral.

A partir de los valores de pseudoaceleración producto de los espectros de respuesta, se representan los niveles más probables de intensidades sísmicas que se pueden presentar en la zona urbana de Zacatelco, Tlaxcala, a partir de tres escenarios sísmicos deterministas: el primero para sismos de tipo subducción o falla inversa, el segundo para sismos de tipo intraplaca o fallamiento normal y el tercero para un sismo cortical ó local, considerando tres condiciones importantes:

- a) Las tres fuentes sismogénicas representan gran peligro para la región.
- b) Las fuentes están ubicadas lo más cerca posible a la zona de estudio.

c) Se requiere de una estación de referencia, que presente efecto de sitio nulo y que este cercana a la zona de estudio.

La elaboración de los mapas, son el resultado del análisis de los periodos estructurales críticos, es decir, los periodos más representativos para valores máximos de pseudoaceleración para un amortiguamiento del 5% de su valor crítico.

Cada periodo estructural se representa en un mapa de distribución de aceleraciones utilizando el método geoestadístico de interpolación Kriging con el programa SURFER. Finalmente la distribución de aceleración se visualiza con su escala en gales [cm/s²] y es posible exportar esta interpolación a cualquier Sistema de Información Geográfica (“GIS”, por sus siglas en Ingles).

4.2 PRIMER ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS DE SUBDUCCIÓN O DE FALLA INVERSA

Utilizando el método anterior se obtuvieron acelerogramas sintéticos para cada estación de nuestra red temporal, con cada acelerograma sintético se obtuvo una función de transferencia empírica y se obtuvieron sus espectros de respuesta correspondientes con un amortiguamiento del 5% de su valor crítico.

4.2.1 Sismo del 13 de Abril de 2007 Atoyac de Alvarez, Guerrero (M 6.3)

Sismo generado por la subducción entre la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica, el día 13 de Abril de 2007 con magnitud 6.3 localizado en las cercanías de Atoyac de Álvarez, en el estado de Guerrero, en la siguiente figura se muestran algunos acelerogramas sintéticos obtenidos para la zona baja.

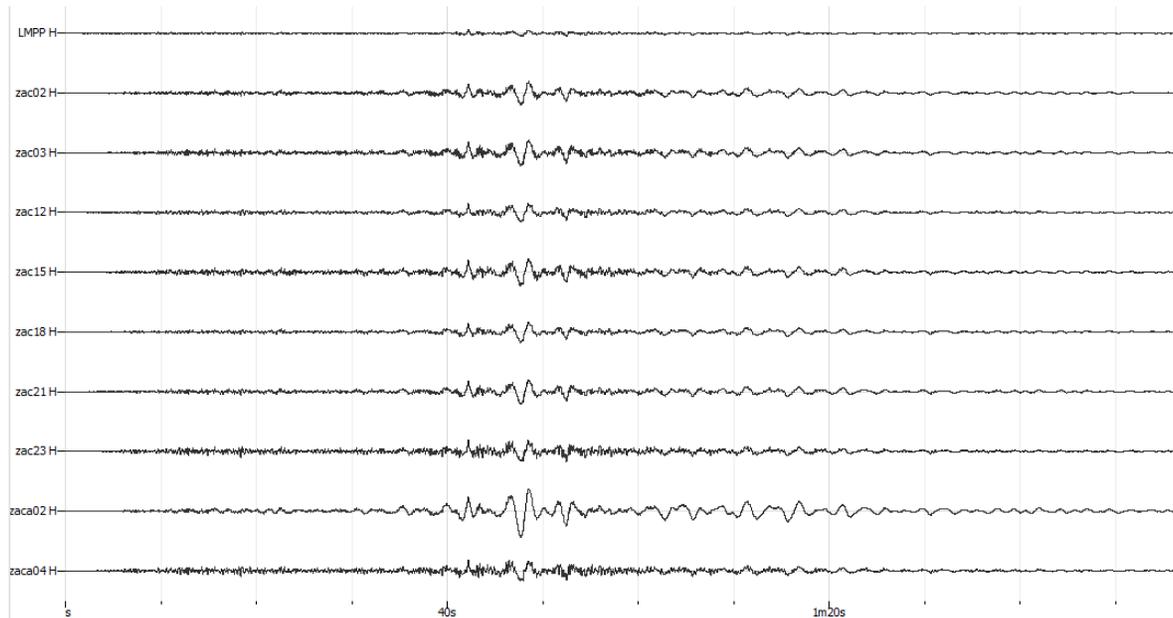


Figura 4.3. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 13 de Abril de 2007 (Mw6.3) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

En la Figura 4.4 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimados en los dos tipos de terrenos obtenidos.

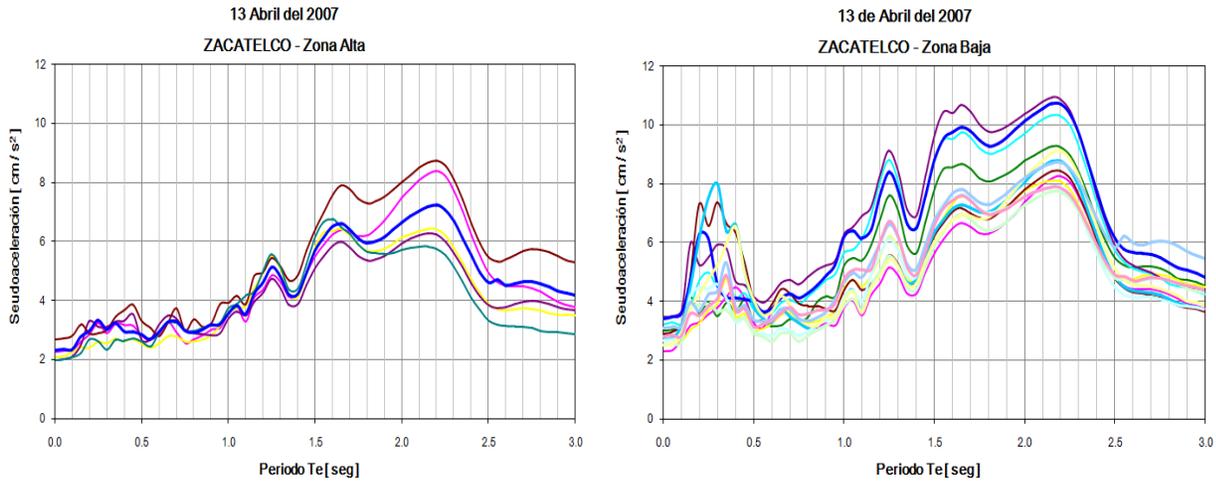


Figura 4.4. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 13 de Abril del 2007 (Mw6.3) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

A partir de los valores de pseudoaceleración producto de los espectros de respuesta, se representan los niveles más probables de intensidades sísmicas que se pueden presentar en la zona urbana de Zacatelco, Tlaxcala, y se generaron los mapas de intensidades sísmicas, para los periodos $T=0.2$ [s] en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en la azotea de una casa de 2 niveles y para el periodo que presentó la aceleración máxima del suelo en los espectros de respuesta $T=2.2$ [s], en la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos y a continuación los mapas.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos para el temblor del 13 del Abril de 2007. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, Ar=amplificación relativa.

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	Ar	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 13/04/07 Gales[cm/s ²]	Ordenada Espectral para $T=2.2$ [s] Sismo del 13/04/07 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.23627	19.1997	Z. B.	0.2	7.2	3.62	9.25
Zac03	-98.25032	19.2009	Z. B.	0.2	6.8	3.66	8.26
Zac05	-98.23871	19.2266	Z. B.	0.3	7.0	3.70	8.07
Zac06	-98.23804	19.1918	Z. A.	0.0	0.0	3.62	8.38
Zac07	-98.24631	19.2243	Z. B.	0.3	6.5	4.25	10.72
Zac09	-98.24007	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	3.13	9.47
Zac10	-98.23928	19.2329	Z. A.	0.0	0.0	3.67	8.73
Zac11	-98.24102	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	2.67	5.77
Zac12	-98.24017	19.1896	Z. B.	0.3	5.0	3.51	7.87
Zac14	-98.23742	19.2042	Z. A.	0.0	0.0	2.67	5.77
Zac18	-98.23988	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	3.51	7.87
Zac20	-98.23888	19.1896	Z. A.	0.0	0.0	2.85	8.38
Zac21	-98.24765	19.1948	Z. B.	0.3	4.0	4.69	10.31
Zac22	-98.25284	19.1931	Z. B.	0.3	9.0	5.25	10.88
Zac23	-98.24644	19.2131	Z. B.	0.3	8.0	3.25	8.44
Zaca01	-98.23133	19.1935	Z. A.	0.0	0.0	2.39	6.41
Zaca02	-98.23036	19.2073	Z. B.	0.2	3.0	4.54	10.31
Zaca03	-98.23678	19.2093	Z. A.	0.0	0.0	2.99	8.40
Zaca04	-98.24737	19.2107	Z. B.	0.3	9.2	6.19	8.77
Zaca05	-98.25106	19.2192	Z. B.	0.3	5.0	4.45	7.83
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	3.85	7.73
Zaca07	-98.24429	19.2058	Z. B.	0.3	8.0	4.25	9.11
Zaca08	-98.24506	19.2285	Z. A.	0.0	0.0	3.30	6.24
Zaca09	-98.24226	19.2002	Z. A.	0.0	0.0	2.89	8.75

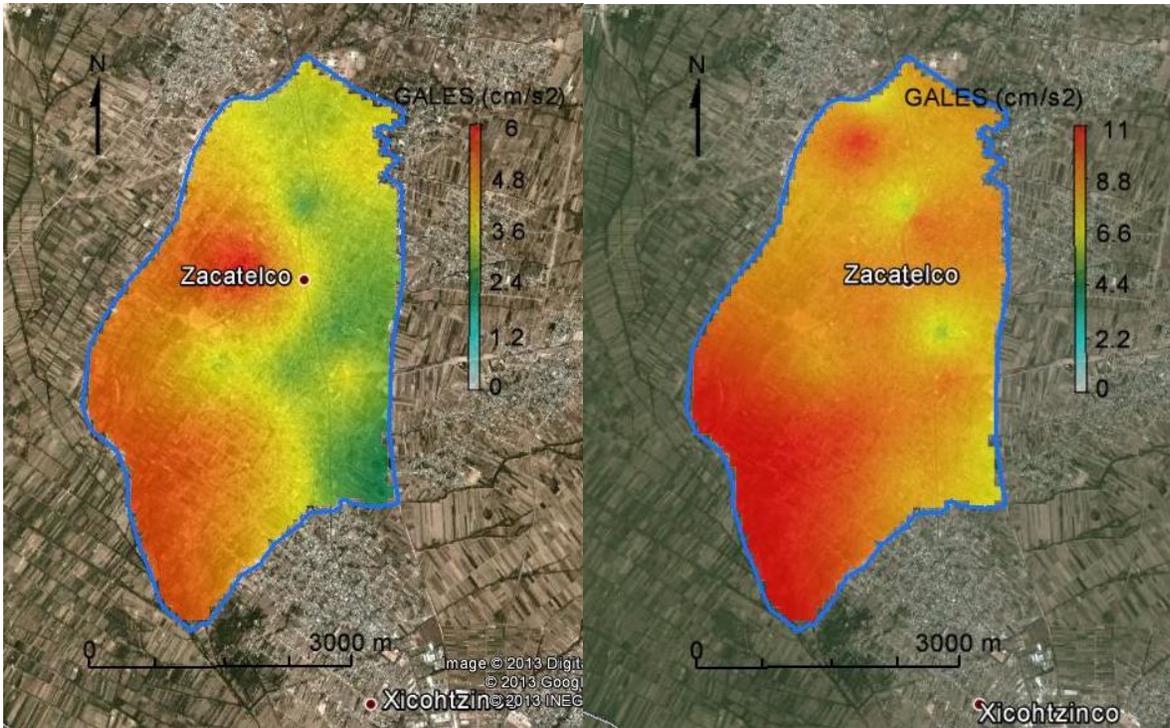


Figura 4.5. Parte izquierda, mapa de aceleración espectral para periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos) estimado para el sismo del 13 de Abril del 2007 (Mw6.3). Parte derecha, Mapa de aceleración máxima, obtenida en un periodo de 2.2 [s].

4.2.2 Sismo del día 30 de Junio de 2010, Costas de Oaxaca (M = 6.0)

Sismo de magnitud 6.0 localizado en las costas del estado de Oaxaca, a 13 km aproximadamente al Sur de Pinotepa Nacional, en la Figura 4.6 se muestran algunos acelerogramas sintéticos obtenidos a partir de las FTE, para la zona baja.

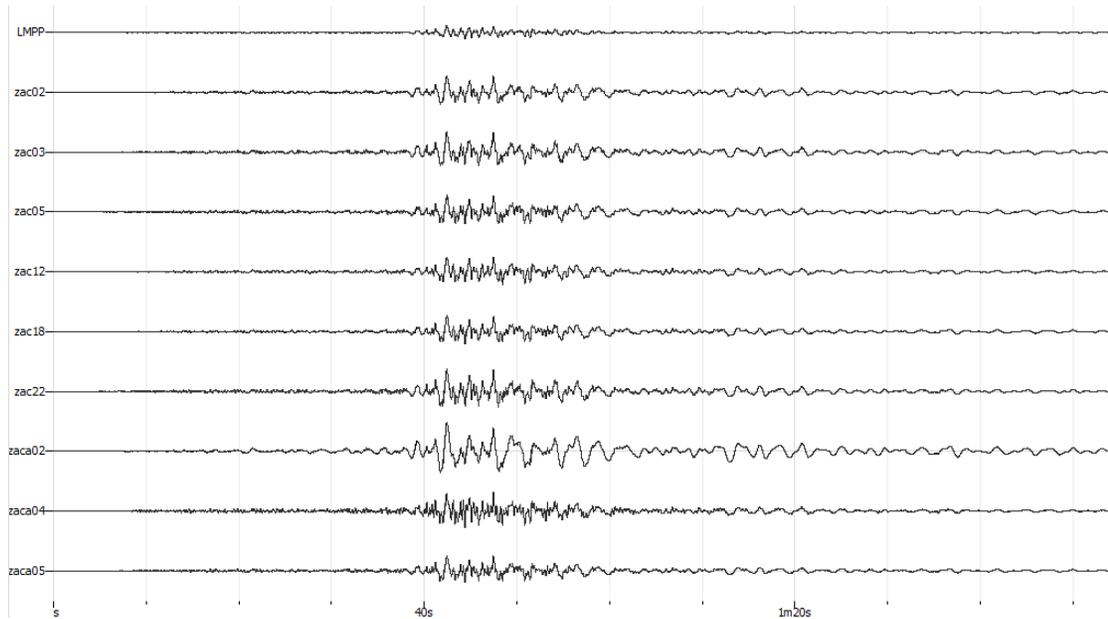


Figura 4.6. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 30 de Junio del 2010 (Mw6.0) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

La siguiente figura nos muestra los espectros de respuesta con un amortiguamiento del 5% en los acelerogramas sintéticos estimados, para los dos tipos de terrenos obtenidos.

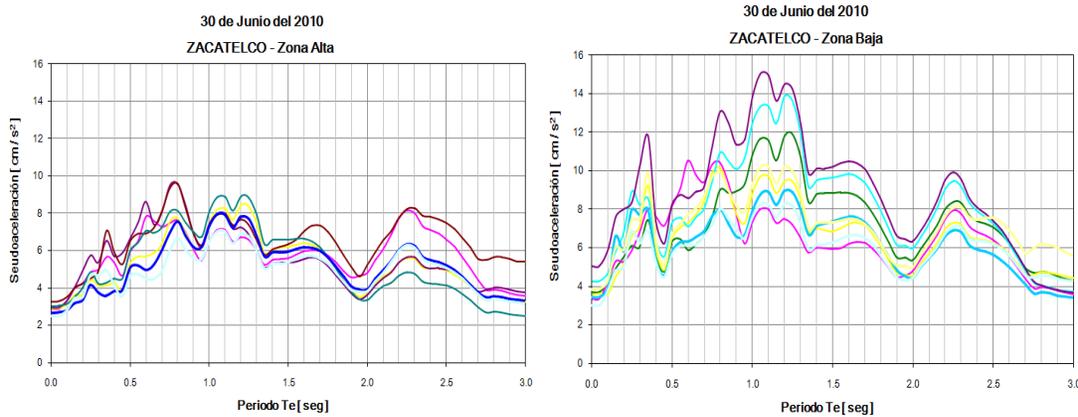


Figura 4.7. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 30 de Junio del 2010 (Mw6.0) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

También se generaron los mapas de intensidades sísmicas, para los periodos $T=0.2$ [s] en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en la azotea de una casa de 2 niveles, y para $T=1.05$ [s] el cual presento la máxima aceleración del suelo en los espectros de respuesta.

Tabla 4.2. Resultados obtenidos para el temblor del 30 Junio del 2010. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, Ar=amplificación relativa, y valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.2$ [s] y $T=1.05$ [s].

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	Ar	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 30/06/10 Gales[cm/s ²]	Ordenada Espectral para $T=1.05$ [s] Sismo del 30/06/10 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	4.54	11.58
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	7.54	12.99
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	5.15	9.71
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	4.24	13.51
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	4.58	9.08
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	5.90	10.23
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	3.98	8.87
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	5.77	10.81
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	3.36	7.94
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	4.54	7.84
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	3.52	7.03
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	4.24	7.10
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	6.80	13.35
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	7.54	14.95
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	7.49	9.83
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	3.62	8.26
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	7.54	20.36
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	4.38	10.77
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	7.54	8.41
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	5.85	8.91
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	5.03	8.24
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	7.39	8.32
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	4.90	7.90
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	4.23	7.98

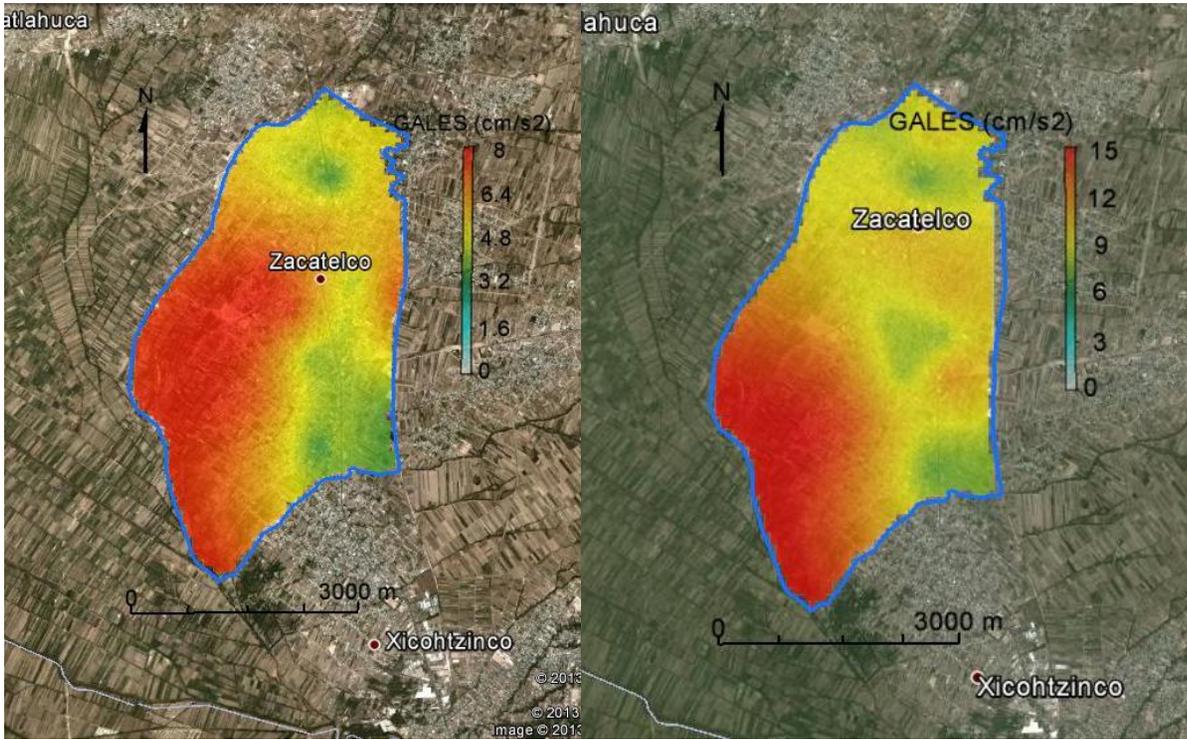


Figura 4.8. Parte izquierda, mapa de aceleración espectral para periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos) estimado para el sismo del 30 de Junio del 2010 (Mw6.0). Parte derecha, Mapa de aceleración máxima, obtenida en un periodo de 1.05 [s].

4.3 SEGUNDO ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS DE FALLA NORMAL O INTRAPLACA

4.3.1 Sismo del 15 de Junio de 1999 Tehuacán, Puebla (M 7.0)

Sismo de tipo intraplaca ocurrido el 15 de junio de 1999 de magnitud Mw 7.0 con epicentro localizado a 35 km al suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla. En la Figura 4.9 se presentan los acelerogramas obtenidos para este sismo.

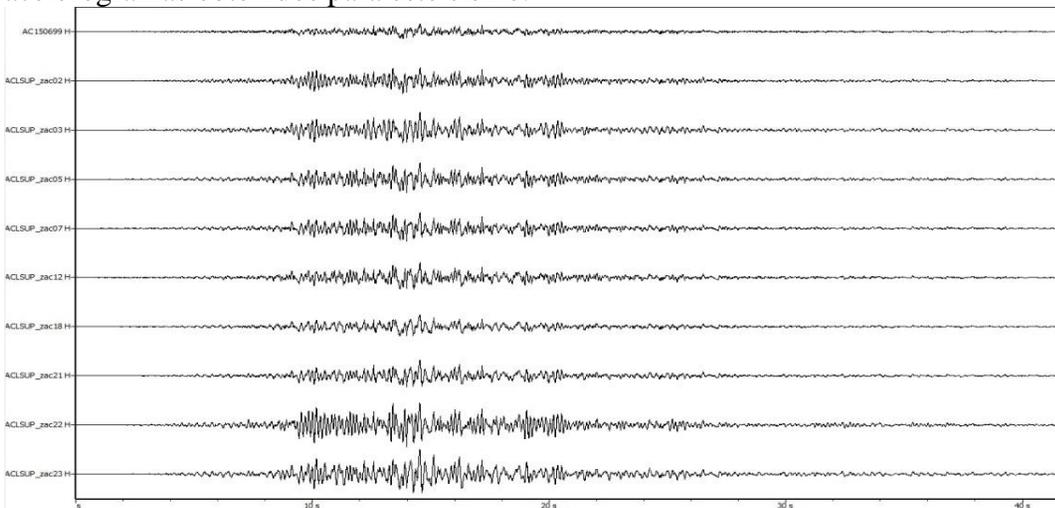


Figura 4.9. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 15 de Junio de 1999 (Mw7.0) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

En la Figura 4.10 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 15 de Junio de 1999 (Mw7.0) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los tres tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

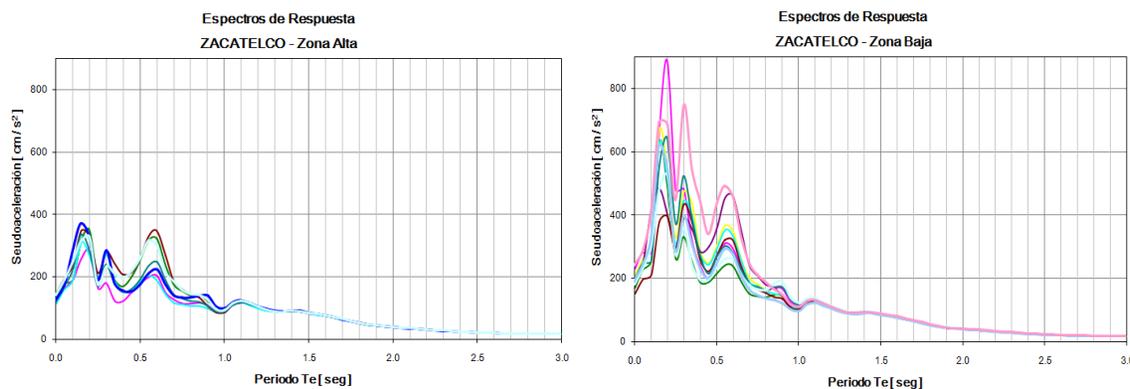


Figura 4.10. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 15 de Junio de 1999 (Mw7.0) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

A continuación se muestra la tabla de resultados y sus correspondientes mapas de intensidades sísmicas.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos para el temblor del 15 Junio del 1999. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, A_r =amplificación relativa, y valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.2$ [s] que en este caso también representa la máxima aceleración del suelo.

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	A_r	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 15/06/99 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	493.69
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	889.31
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	543.30
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	350.88
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	517.61
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	284.60
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	369.89
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	271.22
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	405.36
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	354.94
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	396.94
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	329.78
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	644.23
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	804.48
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	640.00
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	285.00
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	525.82
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	328.29
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	640.00
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	642.92
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	541.64
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	687.11
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	529.62
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	327.60

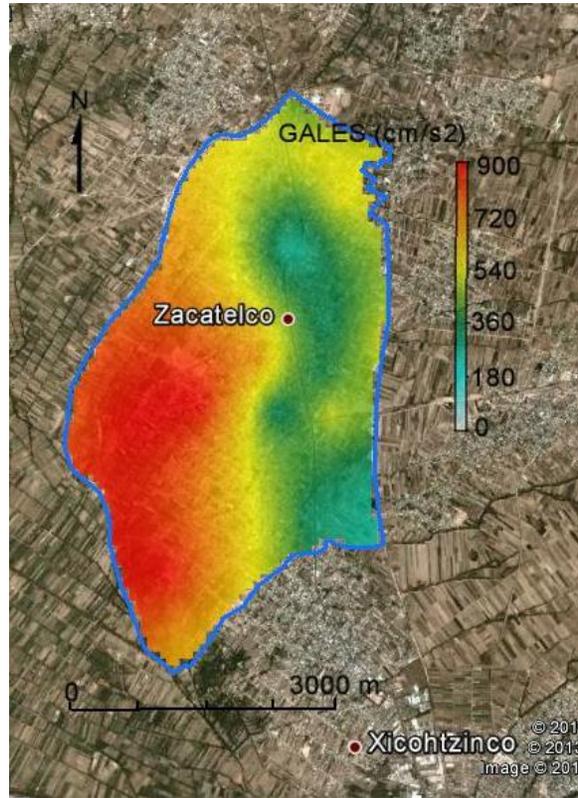


Figura 4.11. Mapa de aceleración espectral para periodo de 0.2 s (edificios de 2-3 pisos), estimado para el sismo del 15 de junio de 1999 (Mw7.0).

4.3.2 Sismo del día 12 de Febrero de 2008, Istmo de Tehuantepec (M = 6.6)

Sismo del día 12 de Febrero de 2008 ocurrió a las 06:50:18, con una magnitud de 6.6 Mw al sureste de unión Hidalgo, Oaxaca. Sismo generado por las placas de Cocos y de Norteamérica, en donde la placa de Cocos subduce por debajo de la placa de Norteamérica a una razón de aproximadamente 6,8 cm al año. A continuación se muestran algunos acelerogramas sintéticos obtenidos para la zona baja (Figura 4.12).

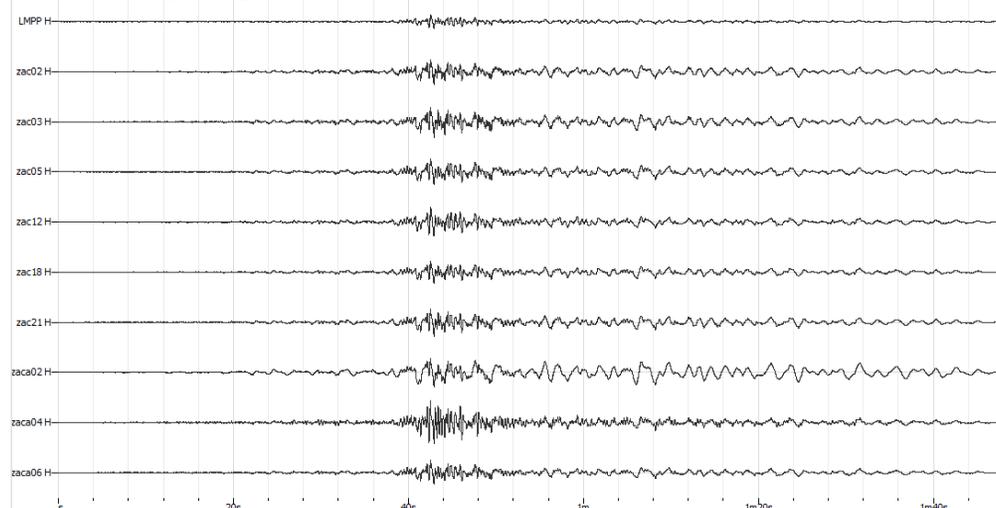


Figura 4.12. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 12 de Febrero del 2008 (Mw6.6) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

En la Figura 5.7 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimados en los dos tipos de terrenos obtenidos.

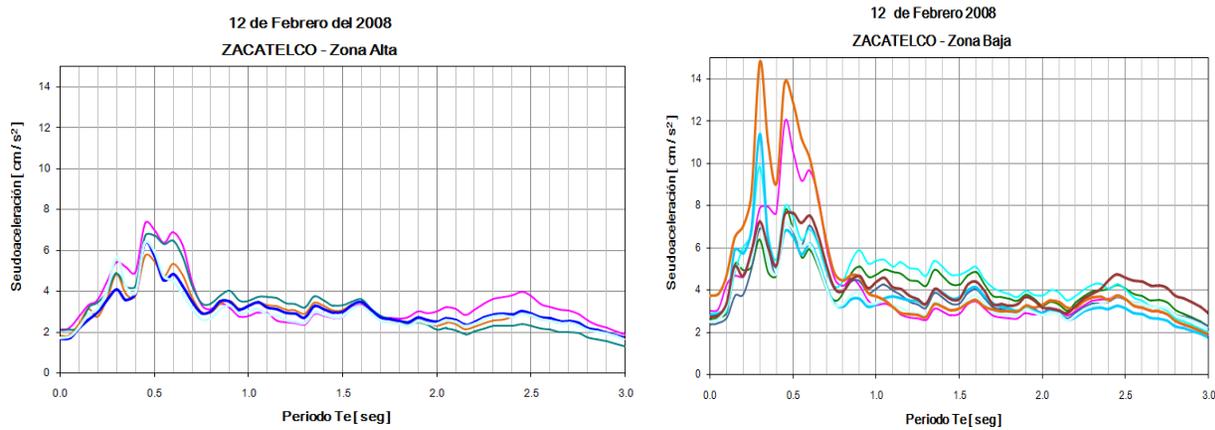


Figura 4.13. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 12 de Febrero del 2008 (Mw6.6) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

También se generaron los mapas de intensidades sísmicas, para los periodos $T=0.2$ [s] en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en la azotea de una casa de 2 niveles, y para $T=0.3$ [s] el cual presento la máxima aceleración del suelo en los espectros de respuesta.

Tabla 4.4. Resultados obtenidos para el temblor del 12 de Febrero del 2008. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, A_r =amplificación relativa, y valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.2$ [s] y $T=0.3$ [s].

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	A_r	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 12/02/08 Gales[cm/s ²]	Ordenada Espectral para $T=0.3$ [s] Sismo del 12/02/08 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	4.94	6.40
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	4.67	7.87
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	3.75	6.90
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	6.20	9.89
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	3.98	6.19
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	4.66	7.24
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	3.44	4.88
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	4.83	6.77
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	2.96	4.10
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	3.91	6.37
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	3.14	5.68
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	3.56	5.42
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	6.00	9.88
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	6.41	12.73
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	3.32	17.69
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	2.74	4.81
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	5.38	7.59
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	3.12	6.05
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	6.46	22.73
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	5.73	11.38
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	5.20	7.21
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	7.06	14.82
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	5.04	6.90
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	3.57	5.34

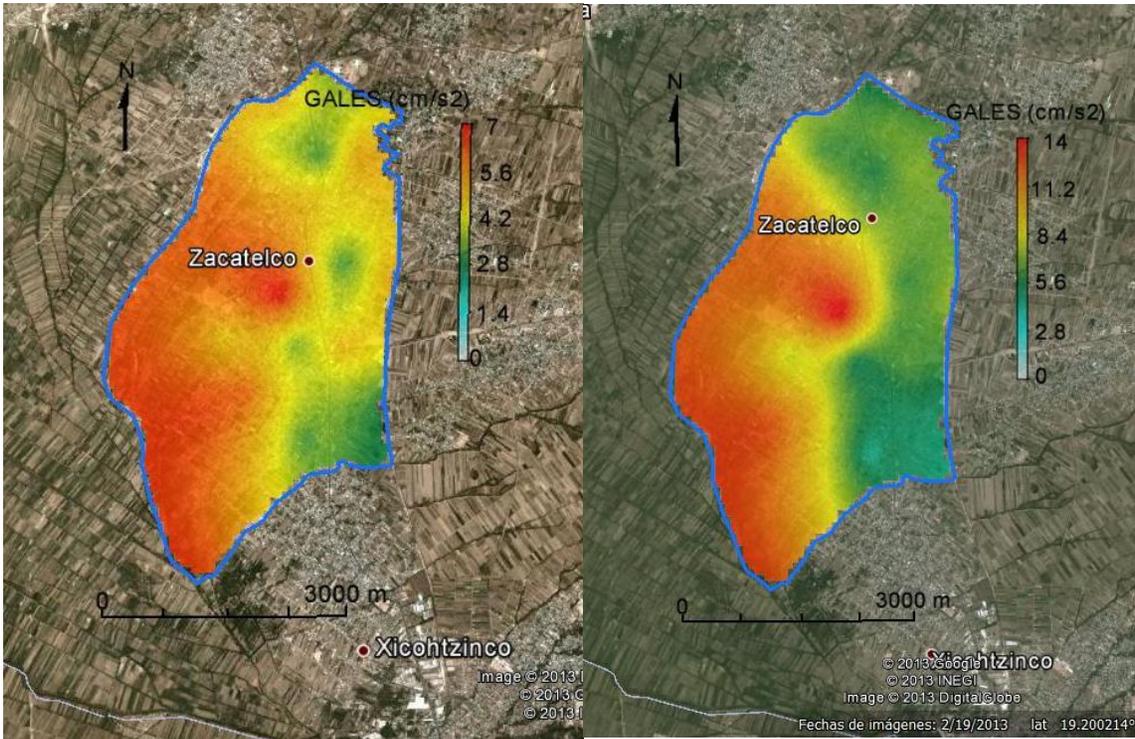


Figura 4.14. Parte izquierda, mapa de aceleración espectral para periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos) estimado para el sismo del 12 de Febrero del 2008 (Mw6.6). Parte derecha, Mapa de aceleración máxima, obtenida en un periodo de 0.3 [s].

4.3.3 Sismo del día 25 de Febrero de 2011, Costa de Veracruz (M = 6.0)

Sismo de magnitud 6.0 localizado en la costa del estado de Veracruz, a 30 km al Suroeste de Sayula de Alemán, Veracruz. Las coordenadas del epicentro son 17.76 latitud N y 95.21 longitud W.

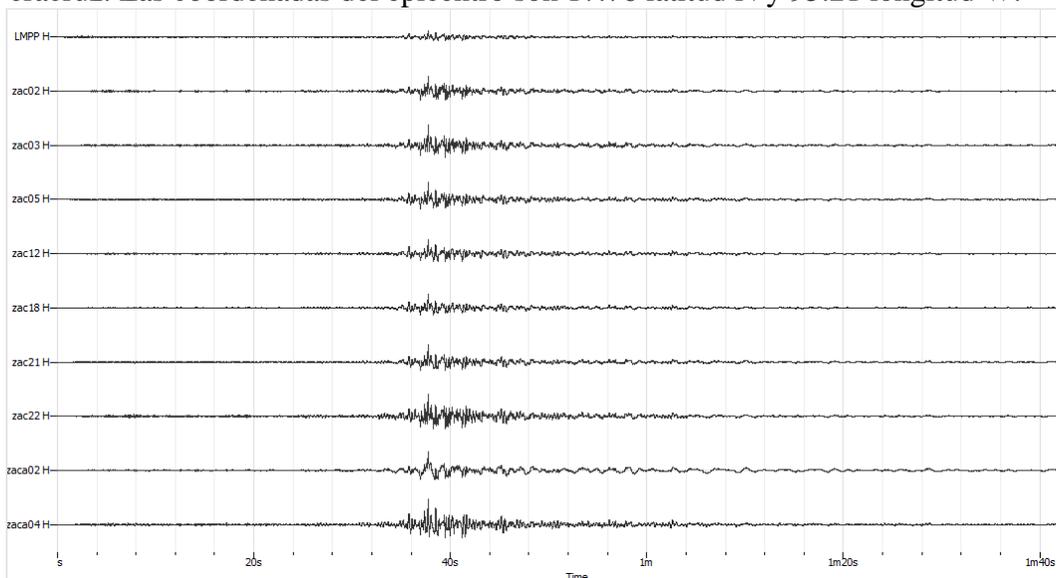


Figura 4.15. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 25 de Febrero del 2011 (Mw6.0) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

La siguiente figura nos muestra los espectros de respuesta con un amortiguamiento del 5% en los acelerogramas sintéticos estimados, para los dos tipos de terrenos obtenidos.

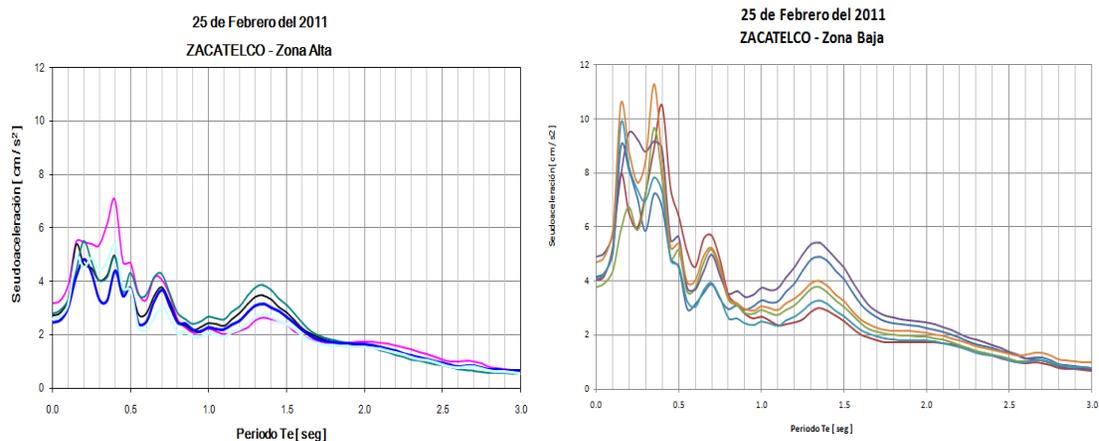


Figura 4.16. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 25 de Febrero del 2011 (Mw6.0) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

También se generaron los mapas de intensidades sísmicas, para los periodos $T=0.2$ [s] y $T=0.4$ [s] en los cuales se obtuvieron las máximas aceleraciones.

Tabla 4.5. Resultados obtenidos para el temblor del 25 de Febrero del 2011. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, A_r =amplificación relativa, y valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.2$ [s] y $T=0.4$ [s].

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	A_r	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 25/02/11 Gales[cm/s ²]	Ordenada Espectral para $T=0.4$ [s] Sismo del 25/02/11 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	8.11	6.73
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	12.41	10.50
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	6.73	7.79
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	5.48	7.19
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	6.72	6.22
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	8.83	8.42
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	5.51	4.90
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	8.49	8.44
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	4.83	4.40
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	6.05	6.65
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	4.52	5.38
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	5.48	7.07
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	9.48	8.91
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	12.41	9.64
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	10.34	8.42
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	4.67	4.94
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	9.03	6.54
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	5.30	4.93
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	8.24	8.42
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	9.39	7.29
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	8.24	7.31
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	10.34	9.20
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	7.89	8.12
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	5.43	8.09

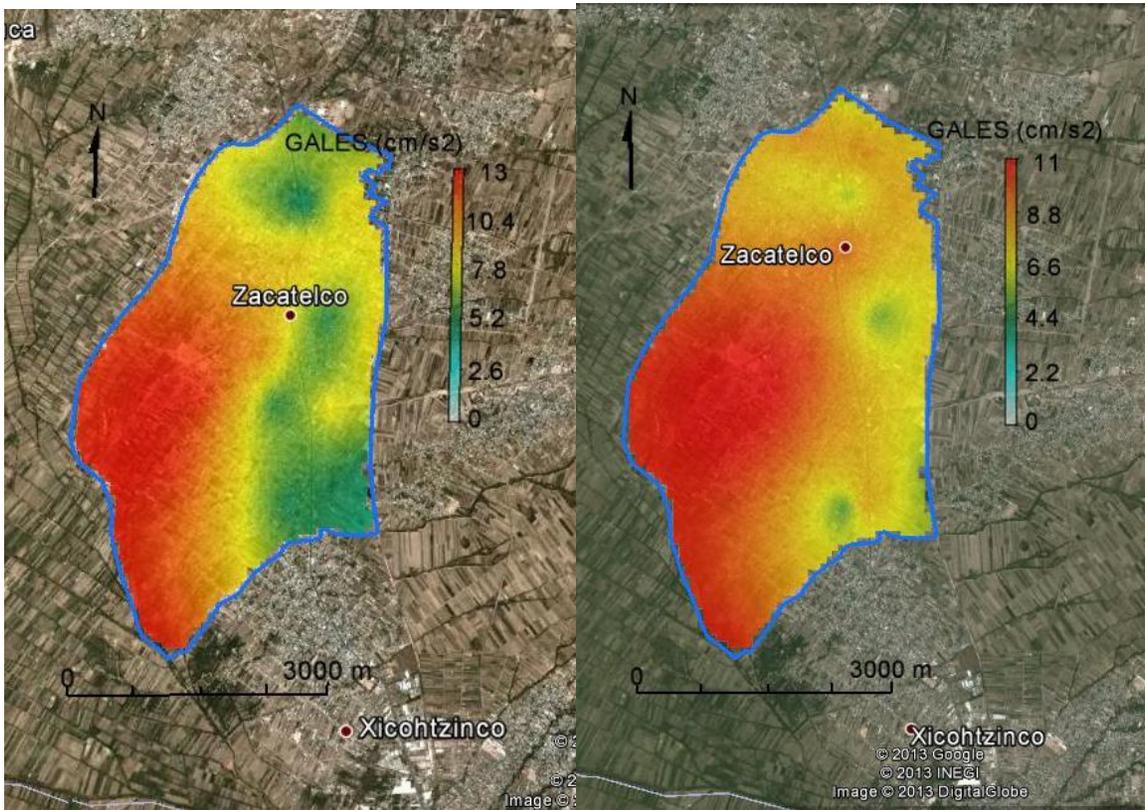


Figura 4.17. Parte izquierda, mapa de aceleración espectral para el periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos). Parte derecha, mapa de aceleración espectral para el periodo de 0.4 [s].

4.3.4 Sismo del día 7 de Abril de 2011, Istmo de Tehuantepec ($M = 6.7$)

Sismo ocurrido el día 7 de Abril de 2011 con magnitud 6.7 localizado en el Istmo de Tehuantepec, a 83 km aproximadamente al Suroeste de Las Chopas, Veracruz. La siguiente figura muestra los acelerogramas sintéticos obtenidos a partir de las FTE.

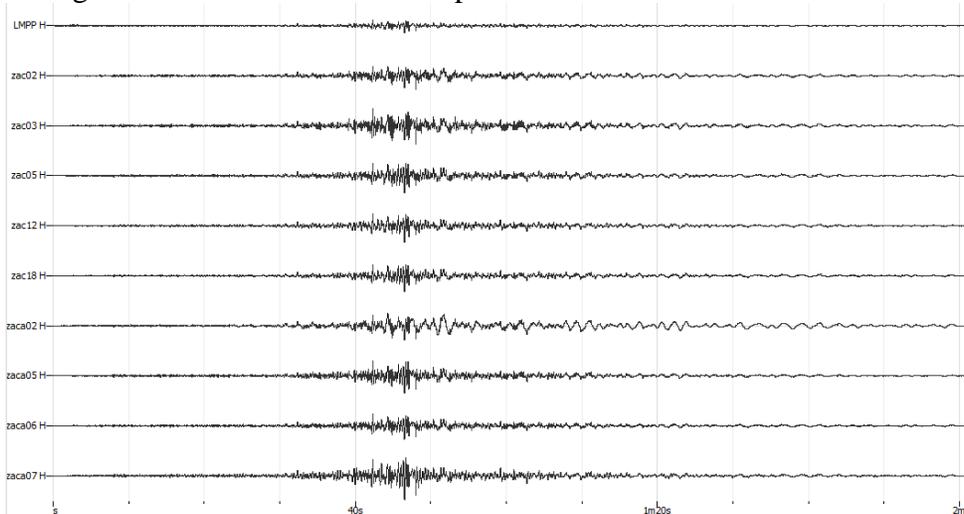


Figura 4.18. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 7 de Abril del 2011 ($M_w 6.7$) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona baja. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

La siguiente figura nos muestra los espectros de respuesta con un amortiguamiento del 5% en los acelerogramas sintéticos estimados, para los dos tipos de terrenos obtenidos.

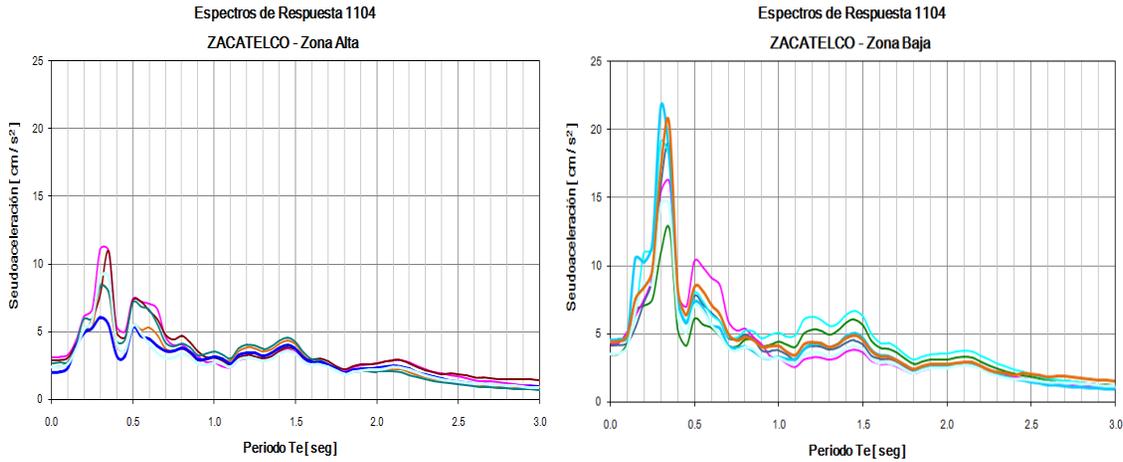


Figura 4.19. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 7 de Abril del 2011 (Mw6.7) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los dos tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

También se generaron los mapas de intensidades sísmicas, $T=0.2$ [s] en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en la azotea de una casa de 2 niveles, y $T=0.35$ [s], en el cual se obtuvieron las máximas aceleraciones.

Tabla 4.6. Resultados obtenidos para el temblor del 7 de Abril del 2011. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, Ar=amplificación relativa, y valores de aceleración para los periodos estructurales de $T=0.2$ [s] y $T=0.35$ [s].

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	Ar	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 07/04/11 Gales[cm/s ²]	Ordenada Espectral para $T=0.35$ [s] Sismo del 07/04/11 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	7.08	12.71
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	12.08	16.14
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	7.28	11.02
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	5.84	9.11
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	6.29	10.74
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	8.42	20.48
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	5.94	7.94
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	8.15	19.13
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	4.92	5.54
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	7.04	12.05
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	5.16	9.11
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	6.12	10.97
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	10.95	17.78
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	12.08	22.47
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	10.89	17.10
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	4.93	7.85
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	8.30	10.15
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	5.43	8.37
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	11.63	18.40
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	10.23	18.13
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	8.78	14.50
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	11.51	17.10
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	8.23	12.23
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	4.87	10.93

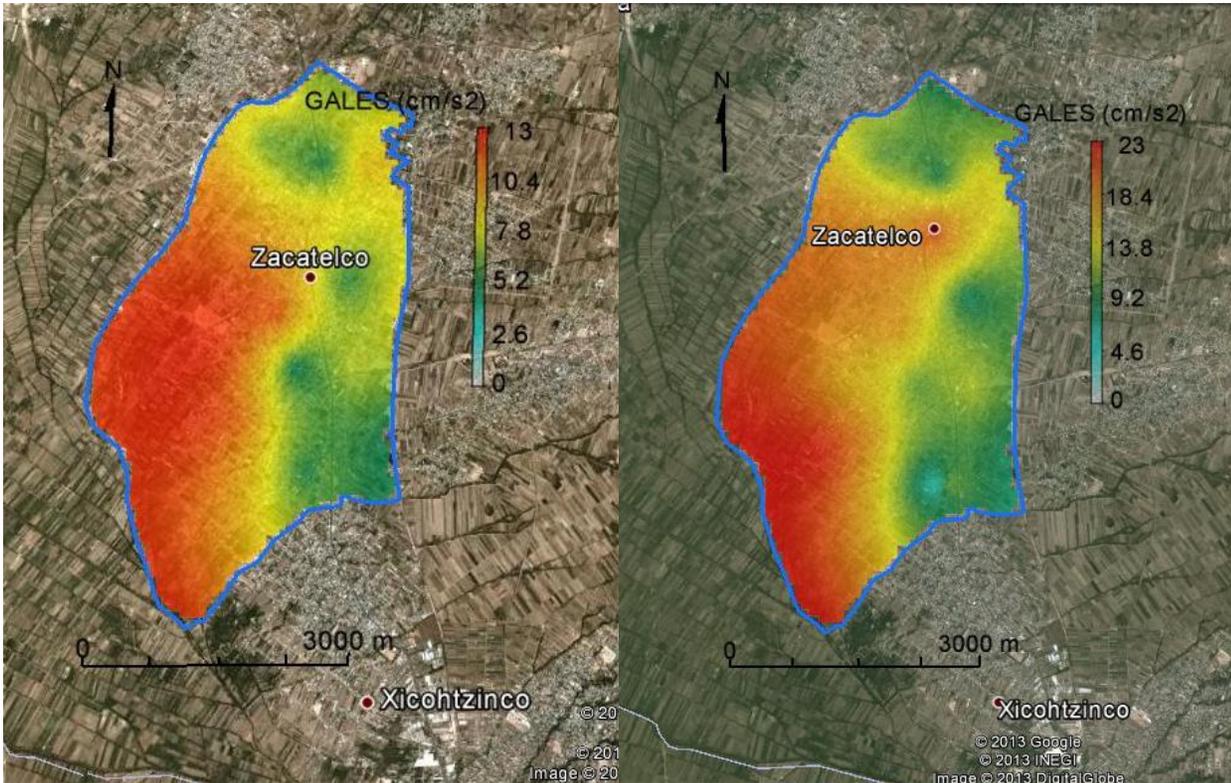


Figura 4.20. Parte izquierda, mapa de aceleración espectral para periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos) estimado para el sismo del 7 de Abril del 2011 (Mw6.7). Parte derecha, Mapa de aceleración máxima, obtenida en un periodo de 0.35 [s].

4.4 TERCER ESCENARIO SÍSMICO: SISMOS CORTICALES Y LOCALES

4.4.1 Sismo 6 de Abril de 1959, Tlaxcala (M 4.7) (Sismo Simulado)

Sismo simulado de tipo cortical, para un sismo similar ocurrido el 06 de abril de 1959 al oriente del Estado de Tlaxcala en las cercanías de los municipios de Cuapiaxtla, Tlaxcala y el de Lara Grajales, Puebla. La Figura 4.21 se presentan los acelerogramas obtenidos para este sismo.

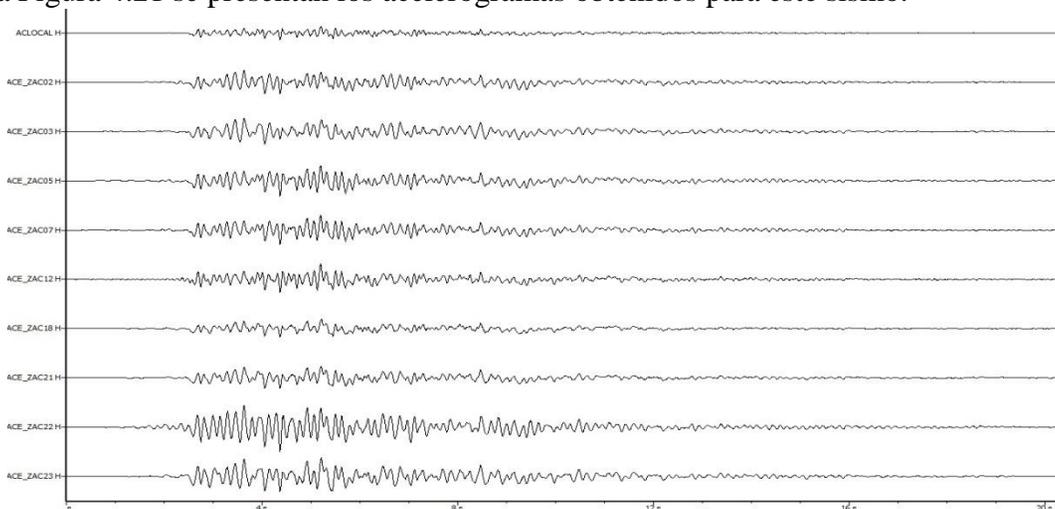


Figura 4.21. Acelerogramas sintéticos para el temblor del 06 de Abril de 1959 (Mb 4.7) utilizando nueve FTE obtenidos en la zona. En la parte superior se muestra el acelerograma real registrado en roca.

En la Figura 4.22 se muestran los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 06 de Abril de 1959 (Mw4.7) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los tres tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

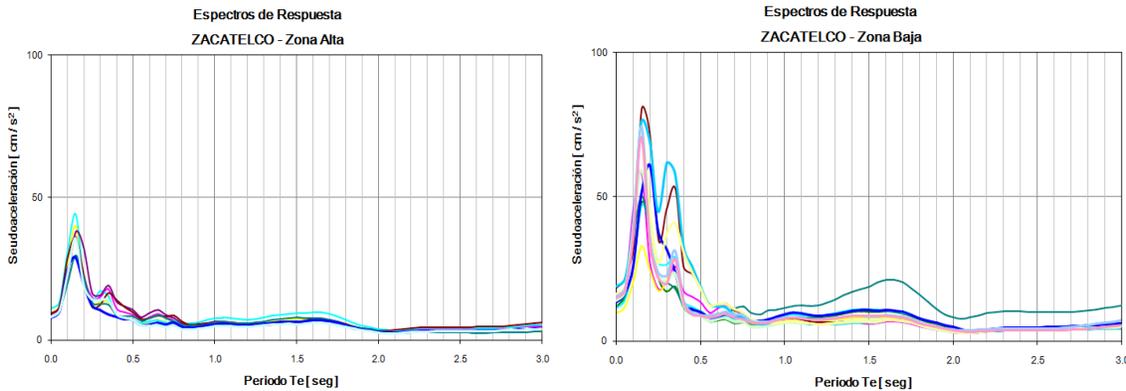


Figura 4.22. Espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% para los acelerogramas sintéticos estimado para el temblor del 6 de abril de 1959 (mb 4.7) en los sitios de la zona urbana de Zacatelco para los tres tipos de terrenos para diseño sísmico obtenidas.

También se generó el mapa de intensidades sísmicas en $T=0.2$ [s] en este periodo estructural se tienen los valores de pseudoaceleración que se sentirían en la azotea de una casa de 2 niveles y en el cual en este caso, también es el que obtuvo las máximas aceleraciones del suelo.

Tabla 4.7. Resultados obtenidos para el temblor del 06 de Abril de 1959. Coordenadas geográficas, tipo de terreno (zona baja Z.B., y zona alta Z.A.), T_0 =periodo dominante, A_r =amplificación relativa, y valores de aceleración para el periodo $T=0.2$ [s].

Estación	Longitud	Latitud	Familia Espectral	T_0 [s]	A_r	Ordenada Espectral para $T=0.2$ [s] Sismo del 06/04/1959 Gales[cm/s ²]
Zac02	-98.236272	19.19974	Z. B.	0.2	7.2	41.29
Zac03	-98.250315	19.20091	Z. B.	0.2	6.8	27.76
Zac05	-98.238713	19.22661	Z. B.	0.3	7.0	24.68
Zac06	-98.238041	19.19184	Z. A.	0.0	0.0	22.43
Zac07	-98.246307	19.22428	Z. B.	0.3	6.5	40.39
Zac09	-98.240074	19.2162	Z. A.	0.0	0.0	30.00
Zac10	-98.239276	19.23293	Z. A.	0.0	0.0	29.00
Zac11	-98.241021	19.2170	Z. A.	0.0	0.0	30.45
Zac12	-98.240168	19.18962	Z. B.	0.3	5.0	34.69
Zac14	-98.23742	19.20417	Z. A.	0.0	0.0	22.20
Zac18	-98.239877	19.2219	Z. B.	0.3	6.1	33.52
Zac20	-98.238884	19.18964	Z. A.	0.0	0.0	19.43
Zac21	-98.247648	19.19481	Z. B.	0.3	4.0	24.98
Zac22	-98.252839	19.19311	Z. B.	0.3	9.0	24.98
Zac23	-98.246438	19.21309	Z. B.	0.3	8.0	40.39
Zaca01	-98.231325	19.19347	Z. A.	0.0	0.0	19.34
Zaca02	-98.230363	19.20729	Z. B.	0.2	3.0	37.46
Zaca03	-98.236777	19.20929	Z. A.	0.0	0.0	21.91
Zaca04	-98.24737	19.21075	Z. B.	0.3	9.2	40.39
Zaca05	-98.251056	19.21925	Z. B.	0.3	5.0	42.61
Zaca06	-98.23542	19.2219	Z. B.	0.2	5.0	39.85
Zaca07	-98.244288	19.20583	Z. B.	0.3	8.0	44.17
Zaca08	-98.245055	19.22845	Z. A.	0.0	0.0	32.69
Zaca09	-98.24226	19.20016	Z. A.	0.0	0.0	23.16

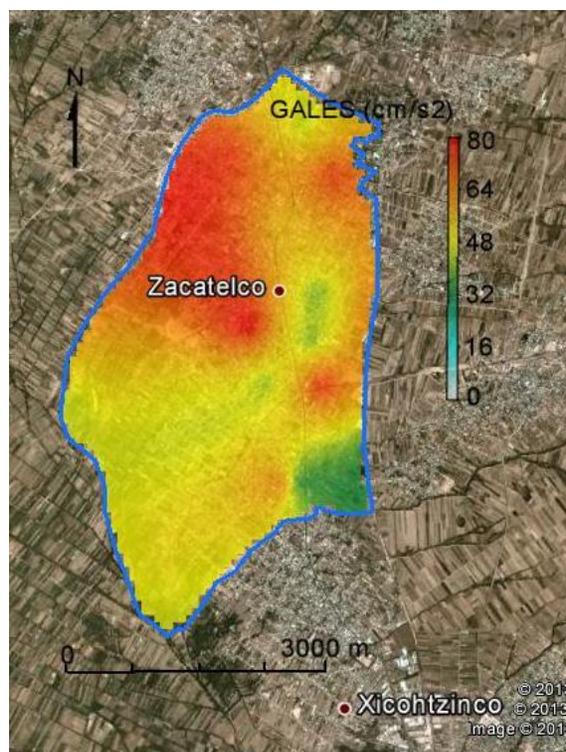


Figura 4.23. Mapa de aceleraciones promedio del suelo para un periodo de 0.2 [s] (edificios de 2-3 pisos) estimado para el sismo del 6 de Abril de 1959 (Mb 4.7), considerando que el epicentro se localiza a 20 kilómetros de distancia del Municipio de Zacatelco, Tlaxcala.

4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior se observan una gran diferencia en la forma espectral de nuestros espectros de respuesta, estos varían dependiendo del tipo de sismo y de la zona sismogénica a la que pertenecen.

Para nuestro **primer escenario sísmico**, en el cual se evaluaron sismos de subducción, las máximas aceleraciones se presentan en periodos largos mayores a los 1 [s], este tipo de sismos representaron el menor peligro debido a que sus aceleraciones máximas fueron menores en comparación a los otros 2 escenarios, y debido también a que los periodos en las que se encontraron no representan un gran peligro para las construcciones que hasta ahora se encuentran en nuestra zona de estudio.

Para el sismo del 13 de Abril del 2007 en Atoyac de Alvarez-Guerrero (M6.3), las aceleraciones para un periodo $T=0.2$ [s], el cual representa peligro para edificios de 2 a 3 pisos y los cuales son más comunes en Zacatelco, en la zona baja se encuentran entre los 4 y 8 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 2 hasta los 4 gales [cm/s²]. Con respecto a las aceleraciones máximas, se encontraron en un periodo de 2.2 [s], en la zona baja van desde los 8 hasta los 11 gales [cm/s²], en la zona alta las aceleraciones máximas están en el rango de los 5 a 8 gales [cm/s²].

De manera similar para el sismo del 30 de Junio del 2010 en las Costas de Oaxaca (M6.0), las aceleraciones para el periodo $T=0.2$ [s], se presentaron en la zona baja desde los 6 hasta los 8 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 3 hasta los 6 gales [cm/s²]. En cuanto a las aceleraciones máximas, las cuales fueron encontradas en un periodo de 1.05 [s], en la zona baja van desde los 9 hasta

los 15 gales [cm/s²], en la zona alta las aceleraciones máximas están el rango de los 4 a 9 gales [cm/s²].

Para nuestro **segundo escenario sísmico**, sismos de tipo intraplaca, las máximas aceleraciones se encontraron en periodos cortos entre los 0.2 y 0.4 [s]. Este tipo de sismos son los que representan una mayor peligrosidad principalmente los más cercanos a la zona de estudio, debido a que presentaron aceleraciones máximas mayores en comparación a los otros 2 escenarios, y debido a que se encontraron en periodos muy representativos del tipo de estructuras que se encuentran con mayor frecuencia en el municipio de Zacatelco.

Para el sismo del 15 de Junio de 1999 en Tehuacán-Puebla (M7.0), las aceleraciones máximas se presentaron precisamente en un periodo de $T=0.2$ [s], el cual representa las construcciones más comunes en Zacatelco, en la zona baja se encuentran entre los 500 hasta los 900 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 200 hasta los 500 gales [cm/s²].

Para el sismo del 12 de Febrero del 2008 en el Istmo de Tehuantepec (M6.6), las aceleraciones para un periodo $T=0.2$ [s], en la zona baja se encuentran entre los 5 y 7 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 2 hasta los 5 gales [cm/s²]. En cuanto a las aceleraciones máximas, se encontraron en un periodo de 0.3 [s], en la zona baja van desde los 8 hasta los 11 gales [cm/s²], en la zona alta las aceleraciones máximas están el rango de los 5 a 8 gales [cm/s²].

Para el sismo del 25 de Febrero del 2011 en la Costa de Veracruz (M6.0), las aceleraciones máximas se encontraron en el periodo $T=0.2$ [s], en la zona baja se encuentran entre los 10 y 13 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 5 hasta los 10 gales [cm/s²]. De manera similar en un periodo $T=0.4$ [s] se encontraron aceleraciones poco menores, pero con un menor contraste entre la zona baja y la zona alta, en la zona baja van desde los 5 hasta los 8 gales [cm/s²], en la zona alta las aceleraciones máximas están el rango de los 8 a 11 gales [cm/s²].

Para el sismo del 7 de Abril del 2011 del (M6.7), las aceleraciones para un periodo $T=0.2$ [s], en la zona baja se encuentran entre los 8 y 13 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 8 hasta los 13 gales [cm/s²]. En cuanto a las aceleraciones máximas, se encontraron en un periodo de 0.3 [s], en la zona baja van desde los 14 hasta los 23 gales [cm/s²], en la zona alta las aceleraciones máximas están el rango de los 5 a 13 gales [cm/s²].

Para nuestro **tercer escenario sísmico**, sismos de tipo cortical y local, las máximas aceleraciones se encontraron en un periodos cortos alrededor de $T=0.2$ [s]. Este tipo de sismos representaron una peligrosidad intermedia, en comparación a nuestros otros 2 escenarios, pero deben ser tomados en cuenta considerablemente debido al periodo en el cual se encontraron las máximas aceleraciones. En la zona baja las máximas aceleraciones van desde los 50 hasta los 70 gales [cm/s²], mientras que en la zona alta van desde los 30 hasta los 50 gales [cm/s²].

CONCLUSIONES

Se presenta la primer propuesta de zonificación para la ciudad de Zacatelco, en la cual se desarrollo una metodología para la evaluación del peligro sísmico del municipio, con base en el empleo de cocientes espectrales para el análisis de sismos y microtemores, a partir de periodos dominantes y amplificaciones relativas, los cuales fueron necesarios para la obtención de aceleración probable para diversos escenarios sísmicos que representan un potencial sísmico en el municipio de Zacatelco.

Aunado a la zonificación se presenta un mapa de variación de periodos del municipio, correlacionando los periodos cortos de 0.1 [s] con los depósitos volcánicos, (Tarango de la Malinche, roca firme), y los periodos largos entre los 0.2 y 0.4 [s] con los depósitos aluviales (depósitos aluviales del Cuaternario, suelo blando).

El principal criterio que fue tomado en cuenta para la zonificación fue la clasificación de las FTE en familias espectrales, agrupándolas según su forma espectral y amplitudes relativas, correlacionándolas con los depósitos geológicos.

Conforme a esto, se determinaron 2 microzonas en función del periodo dominante y la clasificación de las FTE, el mapa obtenido finalmente se conforma de 2 tipos de terreno, zona baja de depósitos aluviales y zona alta de roca firme. De igual manera se presentan las intensidades sísmicas que se presentaran con mayor probabilidad ante la ocurrencia de diversos sismos, 2 de tipo subducción o fallamiento inverso, 4 de tipo intraplaca o fallamiento normal, y 1 de tipo local cortical local.

Haciendo una comparación entre los tres tipos de escenarios sísmicos, se puede concluir que los de mayor peligrosidad en particular para nuestra zona de estudio son los de tipo intraplaca, dado que en sus espectros de respuesta los periodos con aceleraciones máximas se encuentran muy cercanos a $T=0.2$ [s].

Por otro lado, si observamos con atención el mapa para el sismo cortical, presenta las mayores intensidad en la parte norte de la zona baja, lo que es totalmente diferente de los demás mapas, que presentan las mayores intensidades en la parte sur de la zona baja. Por esta razón es de suma importancia que se evalúen diferentes tipos de fuentes, ya que cada sismo, dependiendo de la zona sismogénica en la que se encuentre y del tipo fuente, presentara intensidades diferentes y los daños causados variaran dependiendo del tipo de terreno.

Otra aportación importante de este trabajo son las funciones de transferencia, las cuales ya están agrupadas en familias y listas para generar nuevos mapas de intensidades, con lo cual podrán evaluarse sismos futuros, y con ello saber que zonas serán las más afectadas.

Recomendaciones:

Con base en los esto, se observo que en nuestros 3 escenarios sísmicos la zona baja presenta mayor peligro sísmico, debido a que el periodo fundamental de vibración del suelo en la zona se encuentra entre los 0.2 y 0.3 [s], y los sismos de tipo intraplaca presentaron aceleraciones máximas en estos periodos, todo esto sumado a que la mayoría de las construcciones de la ciudad de Zacatelco son de 2 a 3 pisos (periodos de 0.2[s]), por lo cual se recomienda tomar medidas preventivas en construcciones ante la ocurrencia de sismos futuros, principalmente los de tipo intraplaca.

REFERENCIAS

- Bernal Isabel. (2006), “Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala”, México, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. and Fäh, D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.*, **167**, 827–837.
- Espinoza Villalpando Luis A (2012), “Áreas de Inundación Obtenidas Mediante Sistemas de Información Geográfica y Hec-Ras Relacionándolas con el Efecto de Sitio Presente en el Municipio de Apizaco”, Tlaxcala, México, Tesis de Especialización, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1993), “Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios With Only One Station”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83-5, pp. 1574-1594
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994), “Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84-5, pp. 1350-1364.
- Lermo J. y Bernal I (2006), “Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala”, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, No. 2, pp 215-221.
- Lermo J. y Limaymanta F. M. (2007), “Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtremores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Ixtapa Zihuatanejo, Gro.
- Lermo, J, Luis Esteva, Eduardo I. Hernández, José Cajica, José Martínez, Joel Angulo, Cándido Zamora y Ivetty Flores,(Diciembre-2010), “Estudios sismológicos y de peligro sísmico para el desarrollo de las Normas Técnicas Complementareas para Diseño sísmico del Estado de Tlaxcala”, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para Instituto Estatal de Protección Civil, Secretaria de Gobierno del Estado de Tlaxcala, Tlaxcala, proyecto Primer Informe, México.
- Limaymanta M. (2009), “Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtremores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco”, Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería (Geotecnia). División de estudios de posgrado de la facultad de Ingeniería de la UNAM.
- Gutiérrez, C (1999), “Mapa de intensidades sísmicas del evento del 15 de junio de 1999, Mw 7.0, Tehuacan Puebla”, Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán, pp. 736-743.

Ismael-Hernández, E., J. Lermo, F. Sánchez-Sesma, J. Angulo, D. Vega, J. Martínez y A. Zuñiga. (2011), “Estimación de intensidades sísmicas en la ciudad de Apizaco, Tlaxcala, para temblores profundos de fallamiento normal”, Memorias, XVIII congreso nacional de ingeniería sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, México.

Nakamura Y. (1989), “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”, QR of RTRI, 30-1, 25-33 pp.

Nogoshi, M. & Igarashi T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with english abstract). *J. of seism. Soc. of Japan* **24**, 26-40.

Rosenblueth E., Ordaz M., Sánchez-Sesma F.J. y Singh S.K. (1989), “The Mexico Earthquake of September 19, 1985- Design Spectra for Mexico’s Federal District, Earthquake Spectra”, Vol. 5-1, pp 273-291.

Oliveira C. S. Roca A. and Goula X. (2006). “Assessing and Managing Earthquake Risk, Springer”. Netherlands.

R. Zuñiga, G. Suárez, M Ordaz y V. García-Acosta, “Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe”, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Reporte Final Cap 2, México.

ANEXO: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS

