

---

## ESTIMACIÓN DE INTENSIDADES SÍSMICAS EN LA CIUDAD DE APIZACO, TLAXCALA, PARA TEMBLORES PROFUNDOS DE FALLAMIENTO NORMAL

Eduardo Ismael-Hernández<sup>1</sup>, Javier Lermo<sup>1</sup>, Francisco J. Sánchez-Sesma<sup>1</sup>, Joel Angulo<sup>1</sup>,  
Daniel Vega<sup>1</sup>, José Martínez<sup>1</sup> y Angel Zuñiga<sup>1</sup>

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los estudios experimentales llevados a cabo para la estimación de intensidades sísmicas en la zona urbana de la ciudad de Apizaco, Tlaxcala. Las estimaciones se realizan para el temblor ocurrido el 15 de junio de 1999 ( $M_w$  7.0), con epicentro cercano a Tehuacán, Puebla. En este trabajo, se considera que el cociente HVNR es un estimador adecuado de los factores de amplificación del sitio. Dada la validación de las relaciones HVNR, en cada sitio se generan acelerogramas sintéticos y se estiman los correspondientes espectros de respuesta de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento del 5% del valor crítico. Los resultados obtenidos son presentados por medio de mapas.

### ABSTRACT

In this work the experimental studies for estimating seismic intensities in the urban area of the city of Apizaco Tlaxcala, are presented. The estimates are carried out for the June 15<sup>th</sup> earthquake ( $M_w$  7.0), with epicenter localized near to Tehuacan, Puebla. In this work, it is considered that the ratio HVNR is an appropriate estimator of the amplification factors at the site. Given the validation of the ratio HVNR, in each site synthetic accelerograms and the corresponding pseudo-acceleration response spectrum for damping equal to 5% are generated. The obtained results are presented by means of maps.

### INTRODUCCIÓN

Atendiendo al impacto que tienen los sismos sobre la sociedad (pérdidas de vidas humanas y económicas), se ha reconocido en todo el mundo la importancia de la mitigación del riesgo relacionado con este fenómeno. Una de las estrategias para la mitigación es contar con construcciones y obras de ingeniería capaces de soportar los efectos propiciados por los sismos, la mitigación se puede dar mediante el desarrollo y aplicación de códigos y/o recomendaciones para su diseño estructural. De lo anterior se anticipa que uno de los grandes retos de la ingeniería sísmica y la sismología, es sin duda, estimar el nivel de intensidad sísmica que puede presentarse en una región de interés dada la ocurrencia de un evento sísmico con localización y magnitud determinados.

El nivel de intensidad sísmica (peligro sísmico) en un sitio de interés (o región) depende fuertemente de la actividad que tengan las fuentes sismogénicas cercanas, la que a su vez puede describirse por la magnitud, frecuencia y localización (distancia y profundidad) de los sismos que se generan en dichas fuentes. Por otro lado, las condiciones locales de la región de interés también influyen fuertemente en tales estimaciones. Dentro de las condiciones locales se pueden mencionar el tipo de suelo, las características geológicas, hidrológicas y geomorfológicas, entre otras.

En el Estado de Tlaxcala se han dedicado esfuerzos para tratar de caracterizar la sismicidad local y regional de algunas zonas del Estado, entre estos se encuentran los trabajos realizados por Lermo y Bernal (2006) y Bernal (2006). Estos estudios permitieron, en términos preliminares, la caracterización de la sismicidad local del Estado y evaluación de los efectos de sitio en la Ciudad de Tlaxcala. Por otra parte, a principios del mes de febrero de 2010 se inician los estudios sismológicos y de peligro sísmico que permitirán, en una etapa posterior, el desarrollo de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño

---

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Torre de Ingeniería, 2do. Piso, Ala Sur, Cub. 8, Cd. Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F., Tel. (01-55) 56233500 ext.1264, [eismaelh@iingen.unam.mx](mailto:eismaelh@iingen.unam.mx), [jles@pumas.iingen.unam.mx](mailto:jles@pumas.iingen.unam.mx), [sesma@servidor.unam.mx](mailto:sesma@servidor.unam.mx), [janguloc@iingen.unam.mx](mailto:janguloc@iingen.unam.mx)

por Sismo de Construcciones convencionales en el Estado de Tlaxcala, gracias al financiamiento del Instituto Estatal de Protección Civil. Uno de los objetivos de este proyecto es el desarrollo de mapas de zonificación sísmica en las cinco ciudades de mayor población del Estado, una de las cuales es la Ciudad de Apizaco.

En el presente trabajo se presentan los estudios experimentales para estimar el nivel de intensidad sísmica en el área urbana del municipio de Apizaco. Las estimaciones se realizan para el temblor ocurrido el 15 de junio de 1999 ( $M_w$  7.0), con epicentro cercano a Tehuacán, Puebla; este evento se considera como uno de los escenarios sísmicos que puede tener una alta probabilidad para generar daños en la región de estudio. Para validar la metodología propuesta se utiliza el sismo del 25 de febrero de 2011 ( $M_w$  6.0), con epicentro cercano a Sayula de Alemán, Veracruz. Ambos eventos se consideran como sismos de falla normal. En lo que sigue se describe la metodología utilizada así como los principales resultados obtenidos.

## TECTÓNICA Y SISMICIDAD DEL ESTADO DE TLAXCALA

La descripción detallada de la tectónica y sismicidad del estado queda fuera del alcance de este estudio, sin embargo se presentan los rasgos más significativos de éstas. Los rasgos tectónicos del Estado de Tlaxcala tienen una influencia importante del Volcán la Malinche. En la figura 1 se muestra el mapa geomorfológico y de tectónica local para el estado de Tlaxcala. Las líneas rojas representan las fallas y lineamientos. Los puntos verdes representan eventos sísmicos registrados en el periodo de 1984 a 2004 (Lermo y Bernal, 2006). Los contornos amarillos son los municipios de Apizaco (al centro del Estado) y de Huamantla (oriente), respectivamente. Los contornos en azul representan las isosistas de un evento histórico ocurrido el 6 de abril de 1959 ( $M_b$  4.7) cuyo epicentro se localizó al oriente del Estado (Lermo, 2011).



**Figura 1. Mapa geomorfológico, de tectónica local y sismicidad para el estado de Tlaxcala. Las líneas rojas representan las fallas y lineamientos. Los puntos verdes representan eventos sísmicos registrados en el periodo de 1984 a 2004. Los contornos amarillos son los municipios de Apizaco (al centro del Estado) y de Huamantla (oriente), respectivamente**

Apizaco se ubica al norte de la Malinche, estratovolcán que alcanza los 4461 msnm sobre un nivel promedio de 2200 msnm, es decir presenta una altura mayor a los 2000 m; este enorme estratovolcán se formó sobre un complejo sistema de fallas normales asociadas a la tectónica global. Estas fallas se desarrollaron en sistemas de fosas, destacan por sus dimensiones aquellas orientadas WE (fosa Izta-Malinche) que pueden ser las más jóvenes, aquellas orientadas NW-SE (fosa Pachuca-Apizaco), tal vez algo menos jóvenes y finalmente aquellas orientadas SW-NE (fosa Atlixco-Huamantla), probablemente

las más antiguas; asimismo se encuentran otros rasgos tectónicos evidenciados por alinear conos volcánicos recientes, los cuales marcan debilidades corticales por donde pudieron ascender los magmas básicos que dieron origen a estos conos volcánicos.

Apizaco se ubica en el flanco occidental de la fosa Pachuca-Apizaco que representa además uno de los límites meridionales del Eje Neovolcánico; al poniente de este flanco se encuentra la secuencia lacustres del Plioceno y al oriente del mismo dominan rocas basálticas de edad reciente, las cuales rellenaron parcialmente dicha fosa; además los conos de esta región se encuentran alineados según trazas orientadas SW-NE.

## REGISTRO INSTRUMENTAL EN LA ZONA DE INTERÉS

### Descripción de la zona de estudio

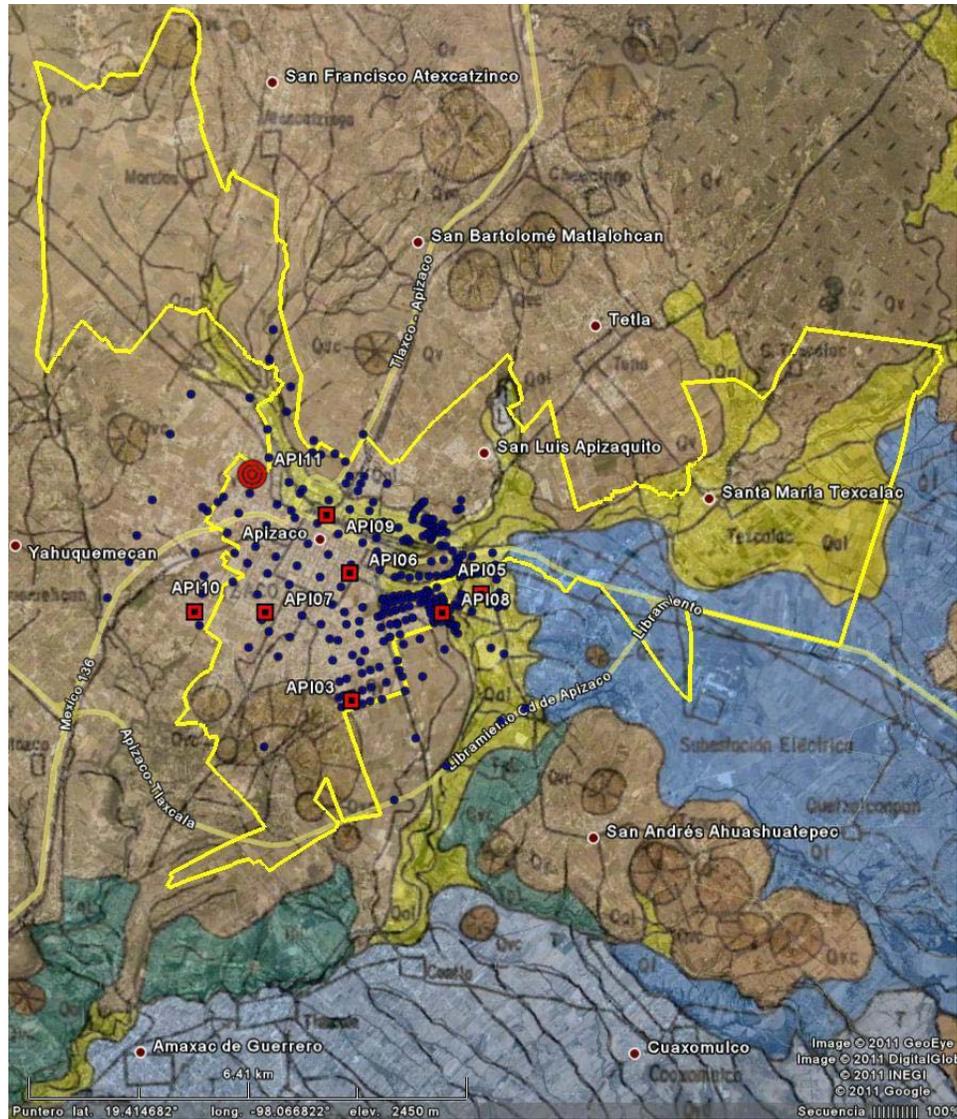
La Ciudad de Apizaco se localiza entre los 19° 25' - 19° 20' de latitud norte y 98° 10' - 98° 5' de longitud oeste con una altura promedio de 2 380 metros sobre el nivel del mar. La ciudad limita al norte con el municipio de Tetla de la Solidaridad, al oriente con Xaloztoc y Tzompantepec, al poniente con Muñoz de Domingo Arenas y Yauquemecan y al Sur con los municipios de Amaxac de Guerrero y Santa Cruz Tlaxcala. Datos del Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática (INEGI) indican que el municipio comprende una extensión territorial de 45.5 kilómetros cuadrados, lo que representa el 1.20% del territorio del estado.

El marco geológico de Apizaco se caracteriza por dos hechos principales, por un lado la secuencia litológica está formada por rocas basálticas (lavas y pocas cenizas) superficiales más bien competentes que descansan sobre las secuencias lacustres del Plioceno (arcillas, tobas arcillosas, travertinos y pocas lavas) en general poco competentes; por otro lado los rasgos tectónicos detectados evidencian fallas orientadas NW-SE (fosa Pachuca-Apizaco) y fracturas orientadas SW-NE que alinean conos cineríticos recientes; lo cual debe regir la sismicidad y el comportamiento del suelo de Apizaco al encontrarse en una zona tectónicamente activa en el Eje Neovolcánico Transmexicano. En la figura 2 se muestra la geología del municipio de Apizaco según Mooser et al. (1996).

### Ubicación de los puntos de registro instrumental

La distribución espacial de los puntos de registro instrumental también se presenta en la figura 2, en cuadros rojos se muestra la ubicación de las estaciones temporales, en puntos azules los registros de microtremores, en círculo rojo la estación API11 considerada como estación de referencia. En total se instalaron once estaciones temporales de registro sísmico y se efectuaron 150 mediciones de microtremores. El tiempo promedio de registro de cada estación temporal fue de seis semanas, mientras que para los microtremores fue de 75 minutos, aproximadamente. En todos los casos se utilizaron sensores de velocidad de banda ancha de la marca Guralp Systems. El criterio para establecer el tiempo mínimo de registro de los microtremores es un tema que aún falta por estudiar, sin embargo Sánchez-Sesma et al. (2011) analizaron registros de microtremores para el lago de Texcoco, donde ellos realizaron pruebas considerando tiempos de registro de entre 3 y 6 horas sin observar una variación importante en sus resultados. Con el fin de optimizar los trabajos de campo, en el presente estudio se realizaron pruebas para determinar el tiempo mínimo de registro (que finalmente fue de 75 minutos), dichas pruebas consistieron en efectuar el cálculo de las razones espectrales para 1, 3, 5 y 7 horas y para diferentes ventanas de tiempo, se utilizaron los registros de microtremores de 3 de las estaciones temporales; se observó que los resultados no presentaron variaciones importantes, por lo que se optó por establecer como mínimo una hora de registro.

Gracias a la Red Temporal de Registro Sísmico instalada en la Ciudad de Apizaco, se pudo registrar el sismo del 25 de febrero de 2011 ( $M_w$  6.0), con epicentro cercano a Sayula de Alemán, Veracruz. Los registros de este evento se presentan en la figura 3, en la cual se incluyen ocho de las once estaciones de Apizaco y el registro de la estación CTVE ubicada en el Estado de Veracruz.



**Figura 2. Geología del municipio de Apizaco (tomada y adaptada de Mooser et al., 1996), en cuadros rojos se muestra la ubicación de las estaciones temporales, en puntos azules los registros de microtemores, en círculo rojo la estación API11 considerada como estación de referencia**

2011-02-25-1307-34S.APIZ\_033

Plot start time: 2011 2 25 13: 7 34.780

2011 225 13 7 34.8 L

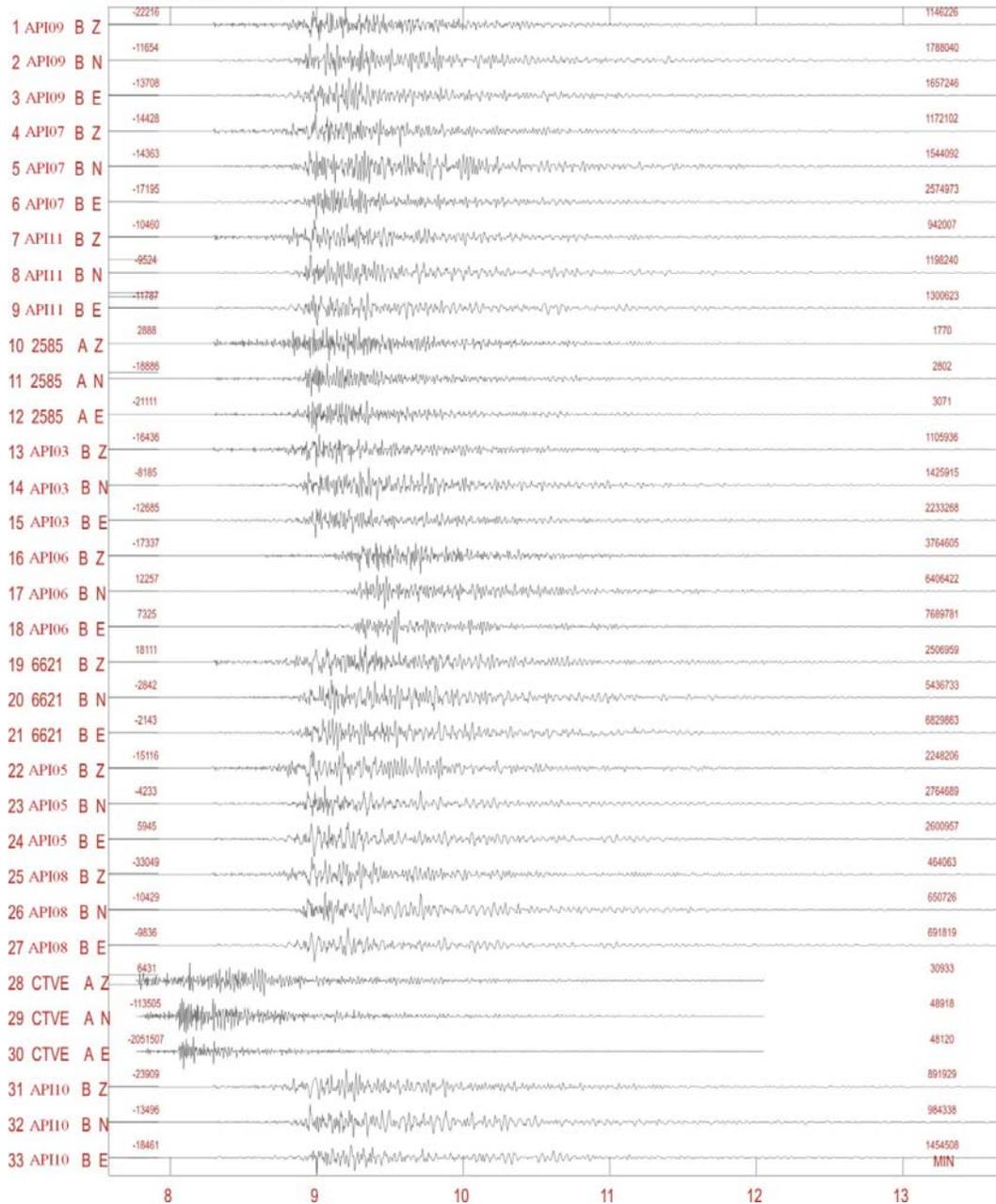


Figura 3. Registros obtenidos del sismo del 25 de febrero de 2011 ( $M_w$  6.0) en ocho estaciones temporales de la Ciudad de Apizaco, Tlaxcala

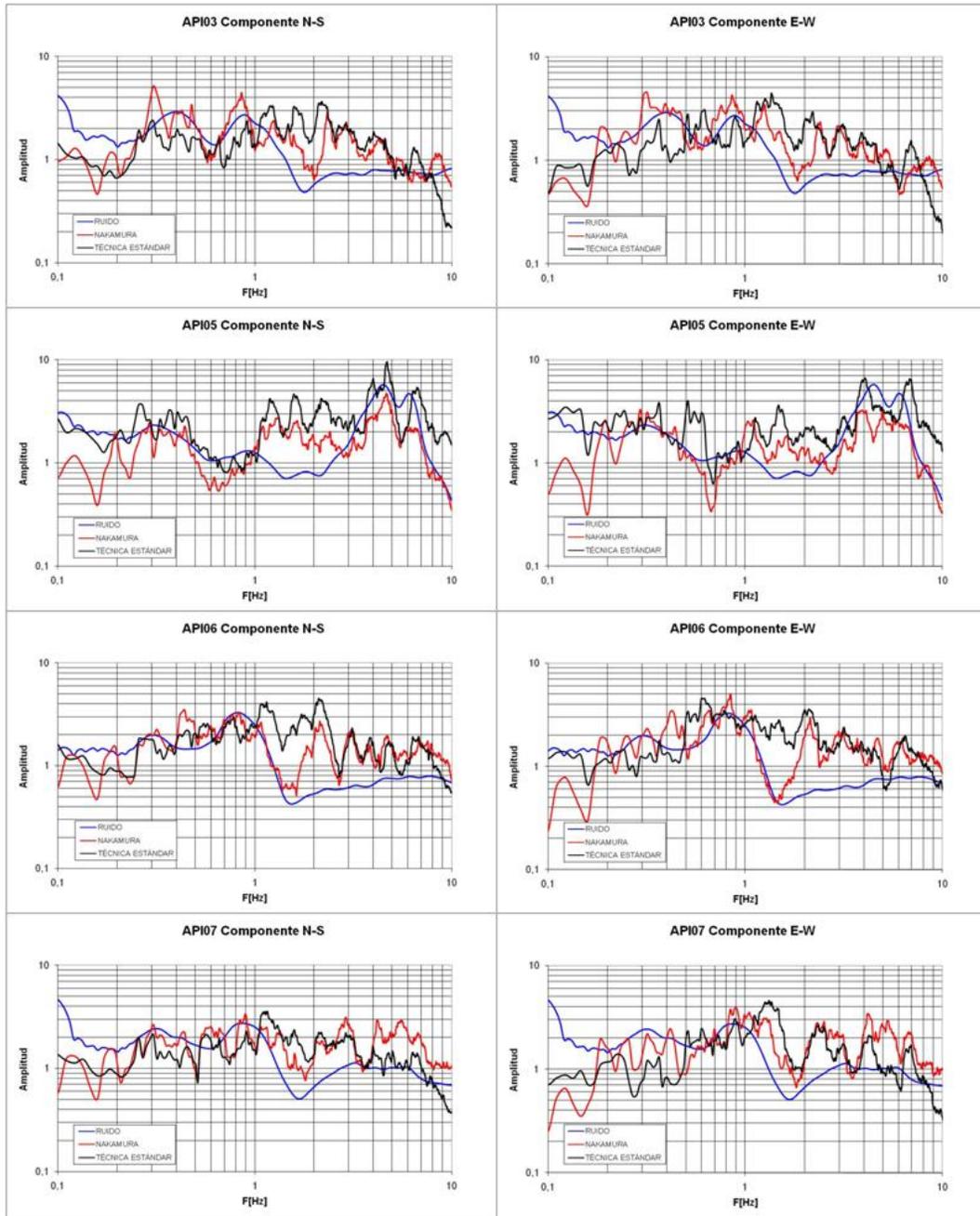
## VALIDACIÓN DEL MÉTODO

En estudios recientes realizados por Sánchez-Sesma et al., (2011) se propone una teoría que sugiere que el cociente HVNR es un estimador adecuado del nivel de amplificación del sitio, lo anterior es válido si se cumple con las condiciones que en el trabajo referido se establecen. En el presente estudio se adoptan tales condiciones, a excepción del tiempo de registro, por lo que se considera que tal cociente describe adecuadamente las principales propiedades dinámicas de suelo que interesan evaluar para determinar la respuesta del sitio. Para más detalles sobre la teoría se recomienda consultar la referencia mencionada.

Para validar esta hipótesis se procedió a realizar la estimación de los efectos de sitio, en términos de las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE), en cada una de las estaciones temporales que registraron el sismo del 25 de febrero de 2011 (Mw6.0). La estimación se realizó aplicando dos técnicas reconocidas. Por un lado, se utilizó la técnica estándar, en la cual se consideró a la estación API11 como estación de referencia; por otro lado, se utilizó la Técnica de Nakamura (Nakamura, 1989) para el sismo en cuestión. Por otro lado, se estimó el cociente HVNR para cada uno de los sitios de interés considerando lo siguiente; los registros de microtremores obtenidos en la Ciudad de Apizaco fueron analizados usando ventanas de tiempo de 40.96 s, éstas no fueron traslapadas. Se consideró un filtrado de las señales para un ancho de banda de 0.1 a 10 Hz. No se consideró suavizado alguno.

En la figura 4 se muestra la comparación de las FTE estimadas con las dos técnicas descritas en el párrafo anterior, además se presenta la FTE estimada a partir del cociente HVNR (en la figura se describe como “ruido”). Del análisis de la figura se observa, en general, una buena aproximación de la técnica HVNR, sin embargo se presentan casos como el de las estaciones API03, API5 y API06, donde la técnica HVNR subestima el nivel de amplitud para frecuencias comprendidas en el intervalo de 1 a 3Hz, con respecto a la Técnica Estándar, es probable que esto se deba a que la estación API11, considerada como de referencia, en realidad presenta efectos de sitio. Cabe mencionar al respecto, que en toda la región de estudio no se ha encontrado una estación que cumpla con las características adecuadas para poder establecerla como de referencia, pero esta discusión queda fuera del alcance del presente estudio.

Con el objetivo de fortalecer la validación descrita en los párrafos anteriores, también se procedió a efectuar la estimación de los espectros de respuesta de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento del 5% para el sismo del 25 de febrero de 2011 (Mw6.0), el cual fue registrado en ocho de las estaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5, donde el espectro de respuesta teórico corresponde al estimado utilizando al cociente HVNR como factor de amplificación. Del análisis de la figura, en general, se observan ordenadas espectrales pequeñas. Se observa una aproximación razonable para la mayoría de las estaciones, sin embargo algunas subestiman el valor de la ordenada para el intervalo de periodos de 0.5 a 1.0 s, tal es el caso de las estaciones API03 y API06.



**Figura 4. Comparación de las diferentes técnicas para estimar los efectos de sitio**

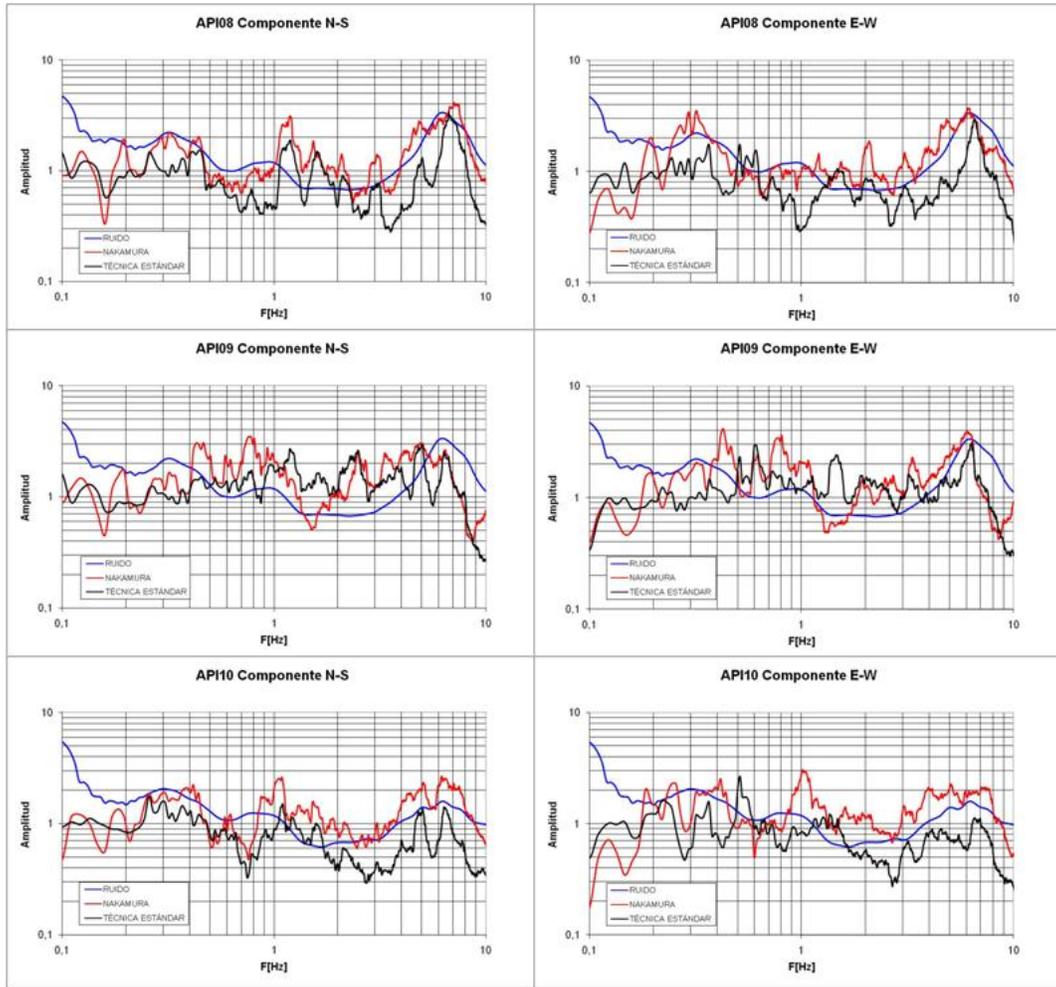
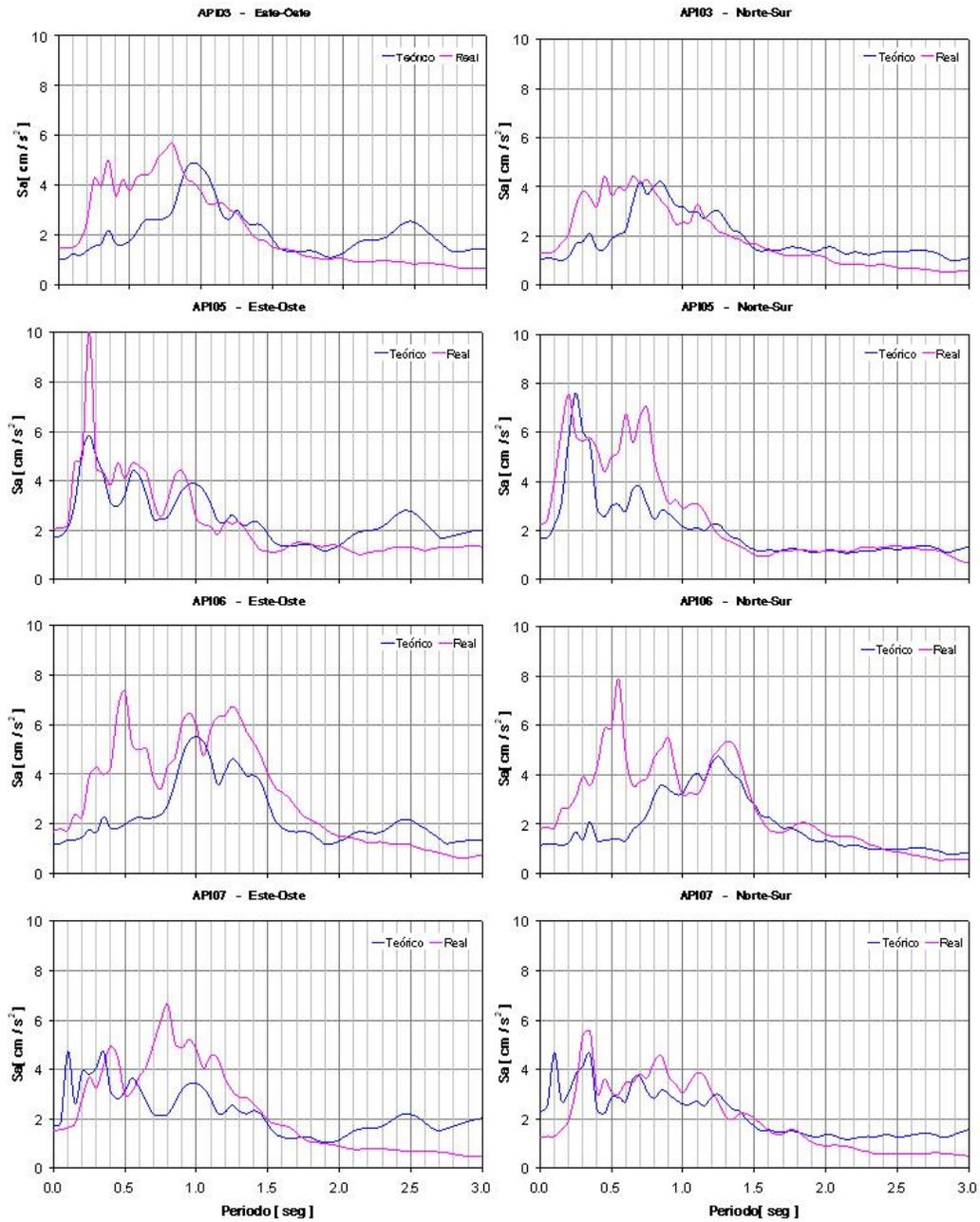


Figura 4. (Continuación)



**Figura 5. Comparación de los espectros de respuesta de pseudoaceleraciones para 5% de amortiguamiento crítico, en azul el espectro teórico en magenta el espectro real**

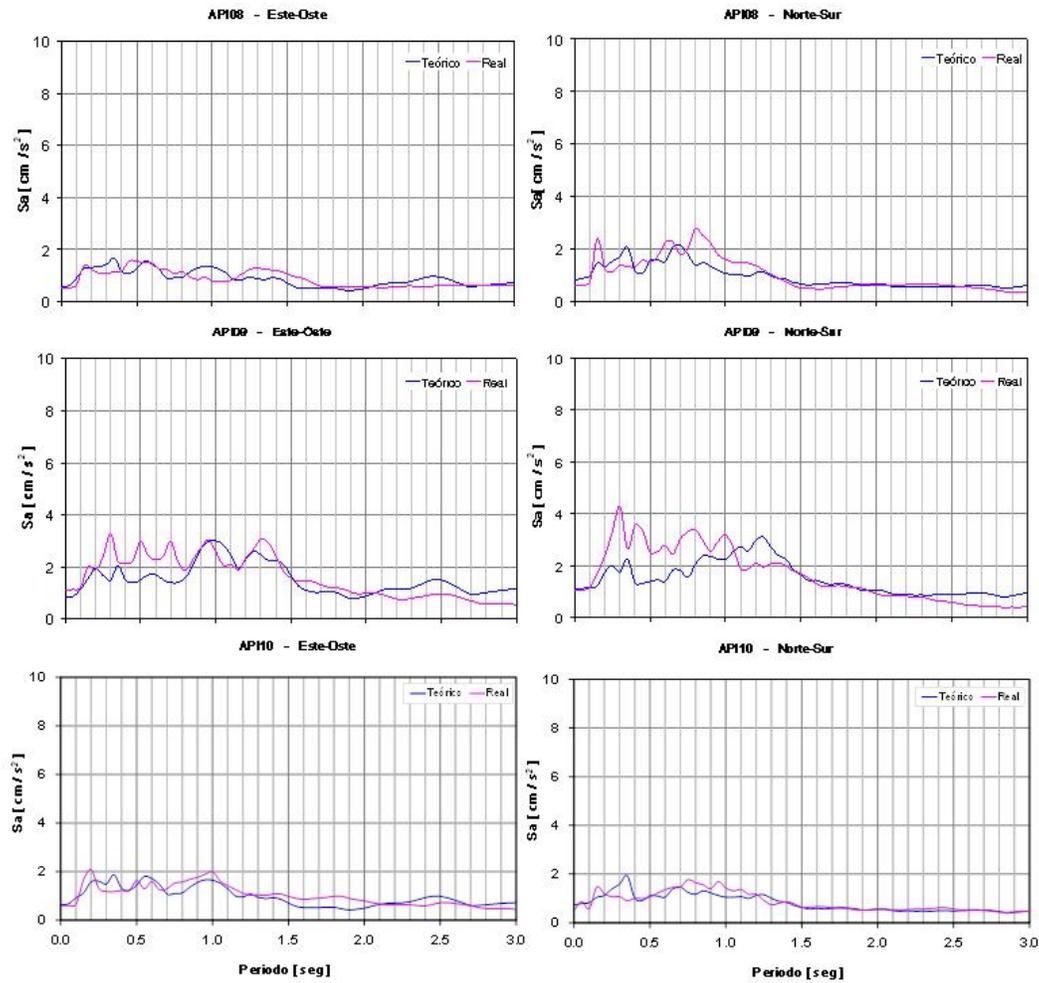


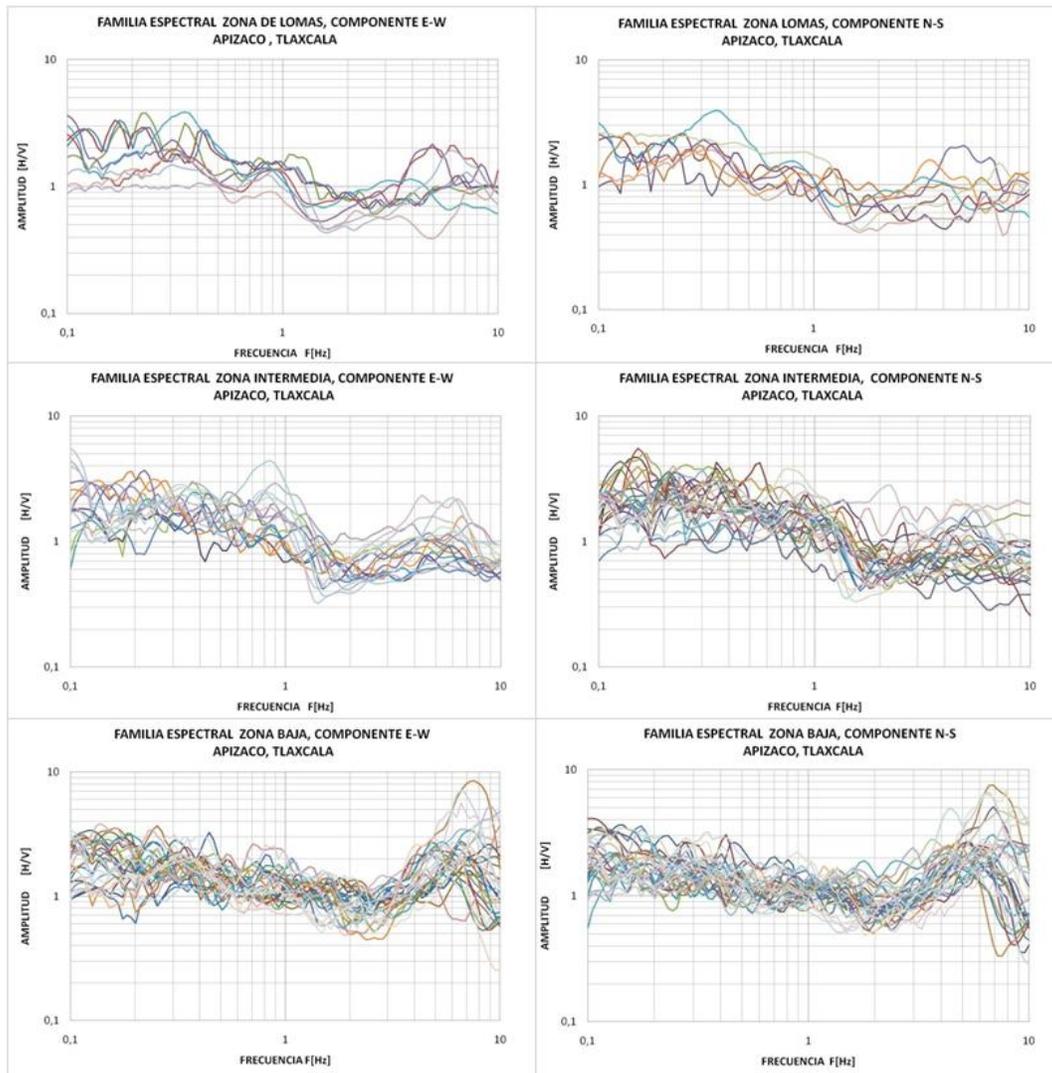
Figura 5. (Continuación)

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Determinación de microzonas a partir de las familias espectrales y su correlación con la geología

En esta etapa se realiza la delimitación detallada de las microzonas del área urbana del Municipio de Apizaco, para ello se inicia con la clasificación de las FTE obtenidas con los registros de microtremores en cada punto de interés, incluyendo los obtenidos de las estaciones temporales, y aplicando el cociente HVNR. El criterio empleado para seleccionar a las familias espectrales es uno parecido al propuesto por Lermo y Lymaymanta (2007), donde para formar una familia, se procede a agrupar cada una de las FTE en función de su forma espectral. Las familias resultantes se muestran en la figura 6.

En este trabajo se considera que la forma espectral de las familias obtenidas describe el comportamiento dinámico del tipo de terreno, en términos de los periodos de vibrar del mismo, por lo que se puede efectuar una clasificación atendiendo a esta propiedad dinámica. Esta forma de clasificar a los terrenos presenta varias ventajas, puesto que uno de los parámetros del diseño sísmico de las construcciones es precisamente el periodo fundamental de la construcción.

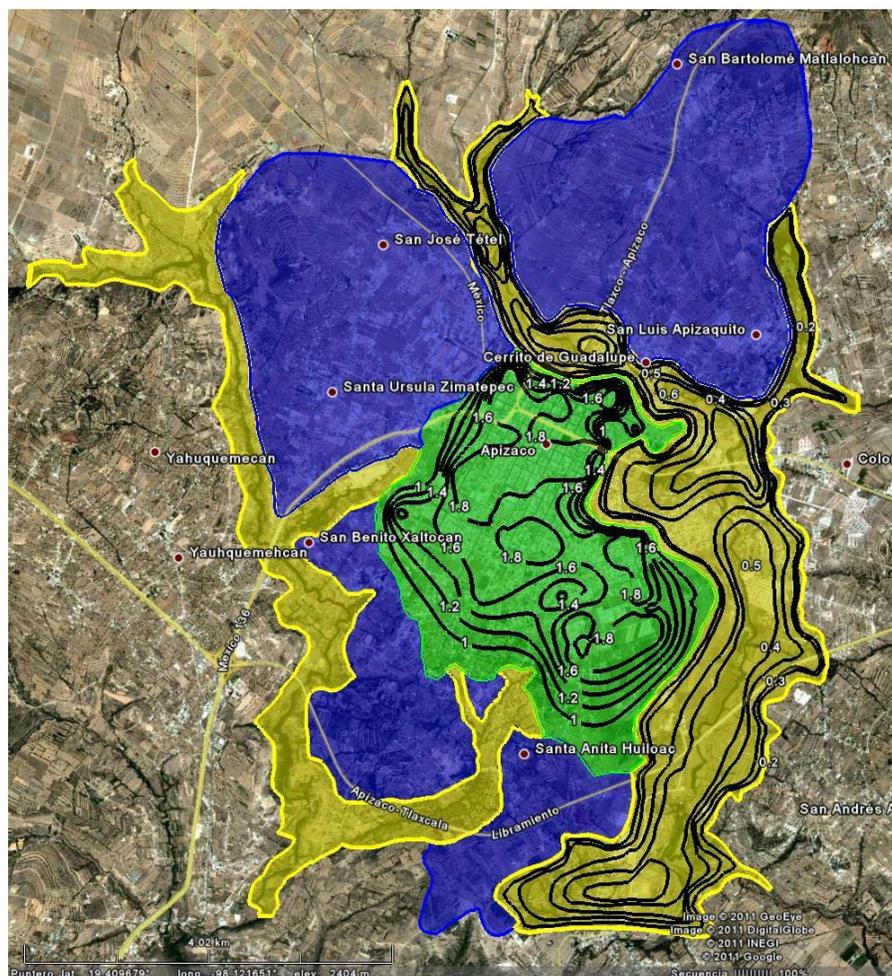


**Figura 6. Familias espectrales obtenidas para la zona urbana de la ciudad de Apizaco, Tlaxcala**

En la zona urbana del Municipio de Apizaco se determinaron 3 microzonas (ver figura 7). **Zona 1 (alta o lomas)**, donde se observó frecuencia predominante en las FTE para el intervalo de 0.3 a 0.4 Hz (3.3 y 2.5 s, respectivamente), por lo tanto se considera que el efecto de sitio en esta zona es regional y que puede corresponder a un efecto observado en faja volcánica transmexicana (FVT). **Zona 2 (intermedia)**, se observan frecuencias predominantes en el ancho de banda entre 0.6 y 1.5 Hz, es decir que en esta zona se tienen periodos dominantes de 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 y 1.6; según la geología esta zona corresponde a tobas muy compactas y lavas basálticas. **Zona 3 (baja)**, que se localiza desde la parte noroeste recorriendo la periferia del municipio hasta la parte sureste, esta zona comprende depósitos de arcillas a lo largo del Río Atenco, donde se tienen frecuencias entre 1.5 hasta 10 Hz, por lo tanto se tienen periodos de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 segundos. La distribución de los periodos de igual valor (isoperiodos) se ilustra también en la figura 7. En lo que sigue se realiza una descripción que correlaciona la información geológica y geomorfológica con los valores de los periodos encontrados para las zonas 2 y 3. **Zona 2**, está constituida principalmente por tobas y subyacentemente por lavas basálticas, se localiza en la parte central del municipio, en esta zona el comportamiento de las curvas está marcada por la geomorfología de la zona, presentando la primer curva en un periodo de 0.1s al pie de los lomeríos y en la parte superior de los depósitos aluviales, las curvas crecen rápidamente hasta 1.6s, sin embargo la parte central de la zona 2

presenta una extensión mayor que comprende periodos de 1.8 y 2s, distribuidas en la parte norte y en la parte sur. **Zona 3**, comprende los depósitos aluviales del cuaternario, como su nombre lo indica esta unidad está conformada por depósitos de arcillas, arenas y gravas de diferente compactación, por lo tanto, se encontraron periodos de 0.1s en el límite exterior que está en contacto con la zona de tobas, las curvas de isoperiodos tienen una dirección paralela al Río Atenco que viene desde la zona norte de la localidad de San José Tetel, y de la Zona norte de San Luis Apizaquito. Las curvas de isoperiodos tienen un comportamiento ascendente de 0.2, 0.3, 0.4, 0.5s conforme se acercan las curvas al río y en otros casos en mayores concentraciones de sedimentos.

Como resultado de esta etapa se elaboró la primera propuesta de zonificación sísmica de la zona urbana del Municipio de Apizaco. En la figura 7 se presenta el mapa propuesto que incluye las tres microzonas que representan los diferentes tipos de terreno con fines de diseño sísmico. En azul la Zona 1, descrita como “zona de lomas”; en verde la Zona 2, descrita como “zona intermedia”; y en amarillo la Zona 3, descrita como “zona baja”. Los contornos en negro representan las curvas de isoperiodos correspondientes a las Zonas 2 y 3.



**Figura 7. Propuesta de mapa de zonificación sísmica y de isoperiodos para la zona urbana del Municipio de Apizaco, Tlaxcala**

#### Estimación del nivel de intensidad sísmica para un escenario sísmico especificado

Para fines de establecer espectros de diseño sísmico se requiere, para el sitio de interés, contar con la caracterización adecuada de las intensidades sísmicas. En rigor, lo anterior se puede lograr con estudios de peligro sísmico que proporcionan los niveles más probables de las intensidades que se pueden

presentar en el sitio. En tales estudios se deben incluir las diferentes fuentes sismogénicas que afectan al sitio de interés y deben generarse muestras representativas de historias detalladas del movimiento del terreno, con características adecuadas de amplitudes y contenido de frecuencias. Tanto las amplitudes como los contenidos de frecuencias dependen de la fuente sismogénica, de la trayectoria que siguen las ondas sísmicas hasta el sitio y de las propiedades dinámicas del terreno.

### ***Selección del escenario sísmico de interés***

De acuerdo con la fuente en la cual se originan, los sismos que contribuyen significativamente al peligro sísmico en México son, en orden a la frecuencia en que ocurren, a) sismos de subducción o de falla inversa, que ocurren a lo largo de la costa del Pacífico debido a la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera bajo la placa continental de Norteamérica; estos sismos alcanzan profundidades no mayores que los 50 km; b) sismos de falla normal o de intraplaca, los cuales ocurren bajo el continente con profundidades mayores que 50 km y se producen por un mecanismo de falla normal de la litósfera oceánica subducida; c) sismos locales, generados en la placa continental.

Un criterio racional empleado para la selección del escenario sísmico (evento para el cual se estima el nivel de intensidad sísmica), se basa en determinar dicho escenario a partir de la información obtenida de los catálogos sísmicos instrumentales e históricos disponibles, así como de la información sismo-tectónica de las fuentes sismogénicas que aporten peligro sísmico a la zona de estudio. Esta forma de proceder se utilizó en la determinación de los espectros de diseño sísmico del Distrito Federal después del sismo de 1985 (Rosenblueth et al., 1989).

Desde el punto de vista determinista, para la selección de un escenario sísmico de interés se debe considerar el sismo máximo probable ocurrido en una fuente sismogénica dada, y que se supone que tiene un elevado potencial sísmico sobre el área en estudio. El problema de estimar el sismo máximo probable, en una fuente sismogénica dada, es un tema que queda fuera del alcance de este estudio. Debe adoptarse aquel evento cuya magnitud ha sido la máxima en la fuente y que se cuenta con información instrumental que permite hacer la descripción de la misma. Para este estudio se considera como escenario sísmico al sismo del 15 de junio de 1999 (Mw 7.0) y el cual se considera que el epicentro se localiza en la zona urbana del Municipio de Apizaco. Dado que no se cuenta con el registro en la zona de estudio, se utilizó el registro obtenido en la estación CHFL, ubicada en roca y a aproximadamente 135 km de distancia de la Ciudad de Apizaco; la estación se ubicó a 41 km de la zona epicentral del sismo. Las características y parámetros de este evento se pueden consultar en Singh et al. (1999).

### ***Selección de la medida de intensidad sísmica***

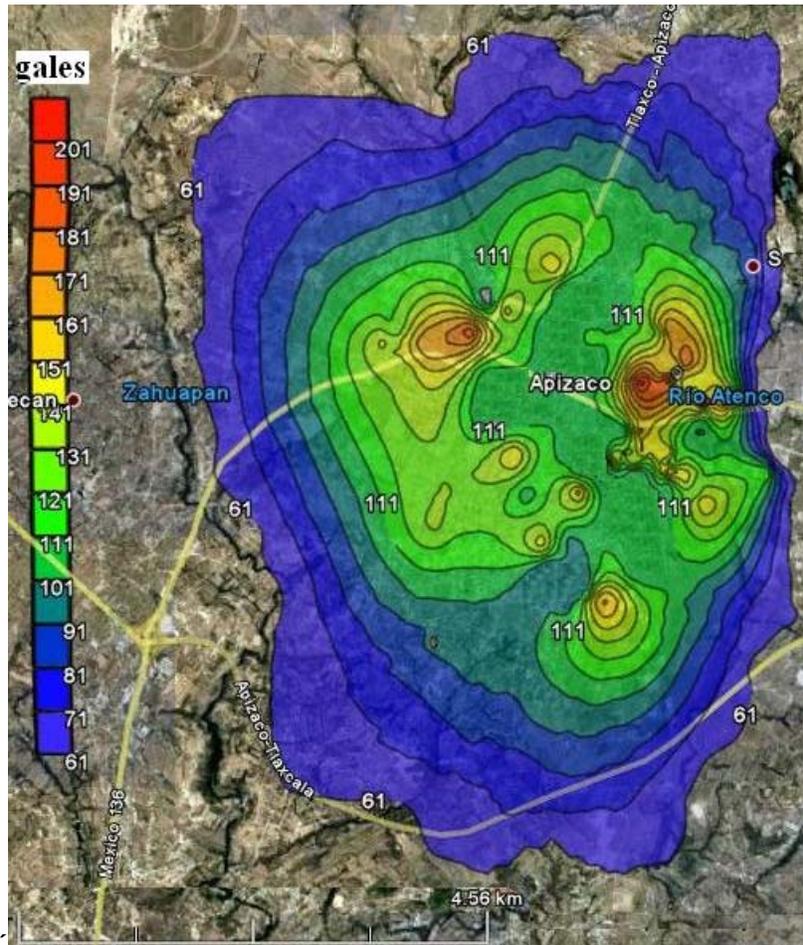
El nivel de intensidad sísmica para el diseño de estructuras depende, además de las expuestas en los párrafos anteriores, de las mismas propiedades de la estructura así como de las condiciones locales del sitio de interés (Ismael, 2010). El problema de establecer cuál es la medida de intensidad sísmica más adecuada para fines de diseño sísmico ha sido motivo de numerosos esfuerzos, ya que se ha identificado que las incertidumbres en la estimación de la demanda sísmica tiene una fuerte correlación con la medida de intensidad que se adopte para tal estimación.

En este trabajo se adoptan las siguientes medidas de intensidad sísmica: a) el valor de la aceleración máxima del terreno; y b) la ordenada máxima del espectro lineal de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento del 5% del su valor crítico. Otra medida puede ser el valor de la ordenada espectral asociada con diferentes valores del periodo de vibrar de las construcciones.

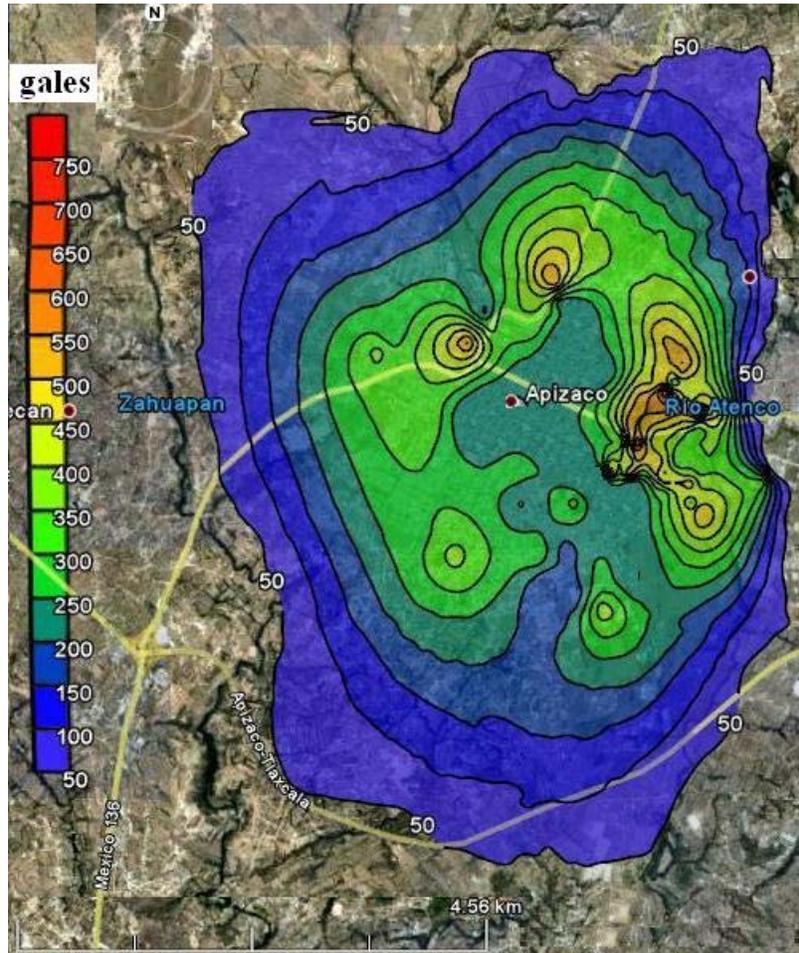
### ***Cálculo de las intensidades sísmicas de interés***

La estimación de la intensidad sísmica en las zonas de interés se efectuó realizando el cálculo de las historias de aceleración en la superficie en cada punto donde se contaba con la FTE correspondiente. El procedimiento se basó en realizar la convolución (de funciones discretas) entre la señal incidente (sismo en roca) y la función de transferencia empírica. De la historia detallada de aceleración, se pudo llevar a cabo el cálculo de los espectros de respuesta de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento del 5% de su valor crítico. El valor de la aceleración máxima del terreno se obtuvo del valor de la ordenada del espectro de pseudoaceleraciones para el periodo estructural igual a cero.

En la figura 8 se presenta el mapa que muestra la distribución de las aceleraciones máximas del terreno, estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 (Mw 7.0). De la figura se observa que la máxima aceleración del terreno es del orden de 200 gales esta se encuentra distribuida principalmente en la Zona 3 (zona baja). En la figura 9 se presenta el mapa de ordenadas espectrales máximas de pseudoaceleración. Cabe mencionar que la ordenada espectral máxima se ubicó alrededor de 0.15 s del periodo estructural. Lo valores estimados de las ordenadas máximas oscilan en un intervalo de 100 a 750 gales, y es en la zona baja donde se distribuyen los máximos.



**Figura 8. Propuesta del mapa de aceleraciones máximas del terreno, estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 (Mw7.0), considerando que el epicentro se localiza en la zona urbana del Municipio de Apizaco, Tlaxcala**



**Figura 9. Propuesta del mapa de ordenadas espectrales máximas de pseudoaceleración, estimadas para el sismo del 15 de junio de 1999 ( $M_w 7.0$ ), considerando que el epicentro se localiza en la zona urbana del Municipio de Apizaco, Tlaxcala**

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los estudios experimentales para la estimación de intensidades sísmicas en la zona urbana de la ciudad de Apizaco, Tlaxcala. Las estimaciones se realizaron para el temblor ocurrido el 15 de junio de 1999 ( $M_w 7.0$ ), el cual es considerado como un sismo de intraplaca de falla normal. Se consideró que el cociente HVNR es un estimador adecuado de los factores de amplificación del sitio, por lo que se efectuó la validación de dicha hipótesis. Para cada punto de interés se calcularon los acelerogramas sintéticos y sus correspondientes espectros de respuesta. Los resultados obtenidos se presentan por medio de los siguientes mapas:

- 1) Propuesta del primer mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Apizaco, el cual contempla tres tipos de terreno, con las correspondientes curvas de isoperiodos, para fines de diseño sísmico de las construcciones.
- 2) Mapas de intensidades sísmicas, estimadas para el escenario sísmico de interés y para dos medidas de intensidad sísmica, el valor de la aceleración máxima del terreno y la ordenada máxima del espectro lineal de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento del 5% del su valor crítico.

Del análisis de los resultados obtenidos para la validación de la metodología propuesta, se observa una buena aproximación para la mayoría de los puntos, sin embargo en algunos casos tal aproximación no es satisfactoria. De lo anterior surge la necesidad de continuar con la instrumentación sísmica de esta ciudad para contar con más sismos instrumentales y poder llevar a cabo más estudios que permitan mejorar las estimaciones aquí presentadas.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Estatal de Protección Civil del Estado de Tlaxcala, por el patrocinio para la realización de este proyecto. A las autoridades y personal de Protección Civil del Municipio de Apizaco, al Instituto Tecnológico de Apizaco (directivos y profesores) por el apoyo brindado en las campañas de registro sísmico y de microtemores. A los integrantes de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica-Delegación Tlaxcala, por las facilidades y apoyo que han brindado en varias de las actividades de este proyecto. A todos los ciudadanos del Municipio de Apizaco, por disponibilidad para la instalación de estaciones temporales. A la MC Isabel Bernal por sus aportaciones realizadas en los trabajos previos hechos en Tlaxcala.

### REFERENCIAS

- Bernal I. (2006), "**Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México**", Tesis de Maestría, *Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM*.
- Ismael E. (2010), "**Diseño sísmico basado en desempeño y confiabilidad de sistemas marco-muro**", Tesis de Doctorado, *Programa de Doctorado en Ingeniería de la UNAM*.
- Lermo J. (2011), Comunicación personal.
- 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 microtemores 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.*
- Mooser F., Montiel A. y Zuñiga A. (1996), "**Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla**" *Subdirección de Construcción, Comisión Federal de Electricidad, México D.F.*
- Nakamura Y. (1989), "**A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface**", *QR of RTRI*, 30, No.1,25-33 pp.
- 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, No. 1, pp 273-291.
- Sánchez-Sesma F.J., Rodríguez M., Urritan-Viveros U., Luzón F., Campillo M., García-Jerez A., Suarez M., Santoyo M.A., Rodríguez-Castellanos A. (2011), "**A theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered medium**", *Geophysical Journal International*. Publicado en Abril de 2011.
- Singh S.K., Ordaz M., Pacheco J.F., Quas R., Alcántara L., Alcocer S., Gutiérrez C., Meli R., and Ovando E. (1999), "**A preliminary report on the Tehuacán, México earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0)**", *Seismological Research Letters*. Vol. 70 N°5.