

## EVALUACION DE LOS EFECTOS DE SITIO POR SISMOS EN LA CIUDAD DE TLAXCALA, MÉXICO

### ASSESSMENT OF SITE EFFECTS OF EARTHQUAKES IN THE CITY OF TLAXCALA, MEXICO

Isabel BERNAL <sup>1,2</sup>, Javier LERMO <sup>2</sup> & Hernando TAVERA <sup>1</sup>

#### RESUMEN

Históricamente, la República Mexicana ha sido afectada en varias oportunidades con la ocurrencia de grandes sismos que han causado daños de diferente grado en diversas ciudades como las que se encuentran dentro del estado de Tlaxcala. Estas ciudades fueron afectadas por sismos de origen intraplaca y cortical que produjeron intensidades del orden de VIII (MM). El estado de Tlaxcala se ubica dentro de la Franja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y la continua deformación que se produce facilita la ocurrencia de sismos locales que tendrían origen en los importantes sistemas de fallas que cruzan al estado en dirección E-O. Dentro de este contexto, es importante realizar estudios de microzonificación sísmica en las ciudades que se encuentran sometidas a dichos peligros. A fin de evaluar, el comportamiento dinámico del suelo sobre el cual se levanta la ciudad de Tlaxcala (capital del estado de Tlaxcala), se ha realizado una estimación experimental de los efectos de sitio (ES) utilizando la técnica de Nakamura y los registros de microtemores tomados en 69 puntos distribuidos en toda la ciudad de Tlaxcala. Los resultados obtenidos fueron evaluados aplicando el método unidimensional y la distribución de los valores de periodos dominantes ( $T_0$ ), ha permitido realizar la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Tlaxcala y en la cual se ha identificado la presencia de tres microzonas: la microzona I con  $T_0$  entre 0.3 a 0.8s, la microzona II, con  $T_0$  entre 0.1 a 0.3s y la microzona III sin efectos de sitio. De acuerdo a los resultados, la microzona II presentaría mayor vulnerabilidad por la posibilidad de que coincidan los modos de vibrar del suelo con el de las edificaciones.

*Palabras clave:* Zonificación sísmica, efecto de sitio, Tlaxcala, Mexico.

#### ABSTRACT

Historically, the Mexican Republic has been affected in several opportunities by the occurrence of great earthquakes that have caused damages of different degree in diverse cities as those who are inside Tlaxcala state. These cities were affected by earthquakes of intraplate crustal origin that produced intensities of the order of the VIII (MM). Tlaxcala state is located inside the Volcanic Trans-Mexican Band (FVTM) and the continuous deformation facilitates the occurrence of local earthquakes that would have origin in the important fault systems that cross to the state in E-O direction. In this context, it is important to realize studies of seismic microzoning in the cities that are submitted to the above mentioned hazards. In order to evaluate the dynamical response of the soil on which there gets up Tlaxcala city (capital of Tlaxcala state), there has been realized an experimental estimation of the effects of site (ES) using Nakamura's technique and the records of microtremor taken in 69 points distributed in Tlaxcala's city. The obtained results were evaluated applying the unidimensional method. The distribution of values of dominant periods ( $T_0$ ) has allowed to realize the Seismic Microzoning of Tlaxcala city and to identify three microzones: microzone I with  $T_0$

---

<sup>1</sup> CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

ibemal@axil.igp.gob.pe; hjtavera@geo.igp.gob.pe

between 0.3 to 0.8s; microzone the II, with  $T_0$  between 0.1 to 0.3s, and microzone the III without site effects. According to the results, the microzone II would present the highest vulnerability due to the possibility of coincidence between vibrating modes of the soil and that of the buildings.

**Keywords:** *Seismic zonation, site effects, Tlaxcala, Mexico.*

## INTRODUCCION

Siendo los sismos uno de los fenómenos naturales más destructores para el hombre, es importante realizar estudios para evaluar el comportamiento dinámico de los suelos de las diferentes ciudades a fin de construir mapas de microzonificación sísmica, esto como punto de partida para la implementación de reglamentos de construcción en cada ciudad. En la República Mexicana, por su densidad poblacional y construcciones coloniales, la capital del estado de Tlaxcala es una de estas ciudades. Recientemente, esta ciudad fue afectada por varios sismos de origen intraplaca como por ejemplo el de Serdán del 17/05/1973 (7.0 Ms) y Tehuacán del 15/06/1999 (7.0 Mw), todos produjeron importantes daños. Recientemente Bernal (2006) analizó y evaluó las características de la sismicidad local del estado de Tlaxcala y propuso un mapa de zonificación sísmica en el cual identifica la presencia de tres zonas con características diferentes conocidas como de mayor, medio y menor sismicidad. Esta zonificación es coherente con las características geológicas, tectónicas, geomorfológicas e hidrológicas de la región. En la zona de mayor sismicidad se ubican las principales ciudades de este estado como por ejemplo Tlaxcala, Chiautempan, Apizaco, Huamantla. Por lo tanto, es necesario realizar estudios que permitan evaluar la respuesta dinámica del suelo al paso de las ondas sísmicas aplicando metodologías como las que permiten estimar los efectos de sitio.

El efecto de sitio (ES), desde un punto de vista general, se puede explicar como la respuesta que tiene cada lugar ante el paso de las ondas sísmicas, lo que depende de sus condiciones geológicas y topográficas y, en gran medida de las características geológicas de las primeras decenas de metros de la superficie terrestre (Sauter, 1989; Chávez-García et al. 1996; Reinoso, 2000). Una de las técnicas más populares para realizar una estimación de los efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad es el uso de la razón espectral de registros de sismos fuertes (conocida como razón espectral estándar) obtenidos simultáneamente en estaciones ubicadas sobre suelo blando con respecto a una estación de referencia

ubicada en suelo firme (asumiéndola libre de efectos de sitio). Sin embargo, el registro de estos sismos fuertes conlleva a un mayor tiempo de espera para llevar a cabo la evaluación (King y Tucker, 1984; Singh et al., 1988; Lermo y Chávez-García, 1994; Chávez-García et al., 1996).

Para salvar estos problemas, recientemente se ha introducido la técnica de Nakamura (1989) para interpretar registros de microtemores (vibración ambiental) a partir de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (Técnica de Nakamura o REHV). La ventaja más importante de esta técnica es que elimina el requerimiento de una estación de referencia (Kanai y Tanaka, 1954). No obstante, a los cuestionamientos que se han hecho sobre su utilidad (Udwadia y Trifunac, 1973; Finn, 1991; Gutiérrez y Singh, 1992; Lachet y Bard, 1994), las mediciones de microtemores presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo, como por la rapidez con que permiten obtener resultados. Los parámetros obtenidos con el análisis de los registros de los microtemores son: la frecuencia predominante o período dominante ( $T_0$ ) y dependiendo de las condiciones en las cuales se toma los datos, la amplificación relativa ( $A_r$ ) del suelo. En general, la técnica de Nakamura fue evaluada y discutida por Lermo y Chávez-García (1994a,b) a partir de la comparación de los resultados obtenidos de registros de microtemores contra la razón espectral estándar obtenido con registros de sismos, concluyendo que los microtemores, cuando son analizados con REHV permiten la estimación, con buena precisión, del período dominante ( $T_0$ ) en sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 5 Hz, junto con una estimación relativa del nivel de amplificación ( $A_r$ ).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento dinámico del suelo de la ciudad de Tlaxcala (México) ante el paso de las ondas sísmicas a fin de proponer un mapa de microzonificación sísmica. El procedimiento seguido permite identificar los periodos dominantes en 69 registros de microtemores analizados siguiendo la

técnica establecida por Nakamura. Los resultados son correlacionados con los obtenidos a partir de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos para la misma zona de estudio, obteniéndose de esta manera indicadores de los efectos de sitio.

**UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y GEOLOGIA**

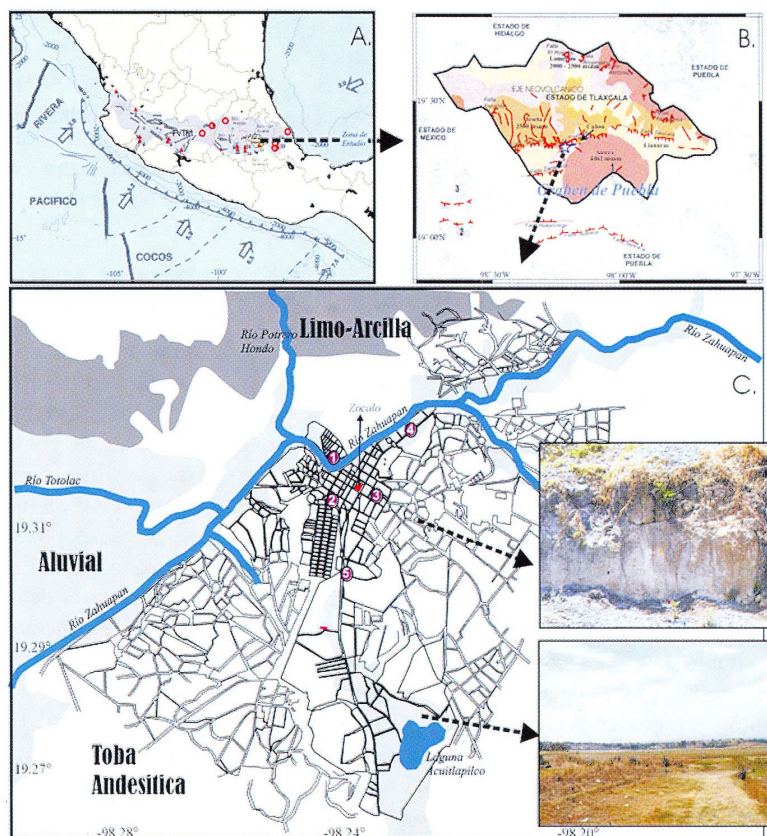
La ciudad de Tlaxcala (México), capital del estado del mismo nombre, se localiza entre las coordenadas geográficas 19°25'-19°35' de latitud Norte y 98°18'-98°28' de longitud Oeste (Figura 1) y colinda al Norte con los municipios de Totolac y Apetatitlán de Antonio Carvajal; al sur con los municipios de Tepeyanco, Tetlatlahuca, San Damián Texóloc, y San Jerónimo Zacualpan; al oriente con los municipios de Chiautempan, La Magdalena Tlaltelulco, y Santa Isabel Xiloxtla y al poniente con los municipios de Nativitas, Panotla y Totolac. De acuerdo con la información del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México), el municipio de Tlaxcala comprende una superficie de 41.61km<sup>2</sup>, lo que representa el 1.02% del total del territorio estatal.

**Aspectos geológicos y geomorfológicos**

Desde el punto de vista geológico, durante el Terciario los agentes de denudación fluvial y fluvio-glaciar iniciaron en el estado de Tlaxcala una actividad tectónica intensa que condujo a la nivelación de un relieve de topografía accidentada. De esta manera, se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares en las faldas de volcanes andesíticos (La Malinche). La ciudad de Tlaxcala se localiza en el extremo NNO de este volcán (Figura 1), donde el 80% de la superficie sobre la cual se levanta la ciudad, está compuesta por rocas ígneas extrusivas y un 20% por rocas sedimentarias y aluviales (Werner, 1993; INEGI, 1996 y 2000; SEGOB y Gob. Edo. Tlax., 2001). Según, SECODUVI (2000), las estructuras geológicas más importantes en Tlaxcala son de origen volcánico.

Desde un punto de vista general, en la ciudad de Tlaxcala afloran tres formaciones constituidas por rocas de diferente litología (Figura 1): 1. La formación inferior compuesta por limos y arcillas, 2. La formación media con tobas andesíticas y 3. La formación superior con rellenos de origen aluvial, lacustre y eólico, así como de corrientes basálticas, arenas y cenizas intercaladas en diversos horizontes.

Figura 1.- Extremo superior, mapa del Territorio Mexicano indicando la localización del estado de Tlaxcala (el área sombreada delimita la Faja Volcánica Transmexicana) y mapa del estado de Tlaxcala en la cual se indica las ciudades y los elementos tectónicos más importantes. La estrella indica la localización de la ciudad de Tlaxcala, capital del estado. Extremo inferior, mapa catastral y geológico de la ciudad de Tlaxcala. De acuerdo a la intensidad del color gris, se distingue la Formación superior (Aluvial), media (Toba Andesítica) e inferior (Limo Arcilla). En el extremo derecho inferior se muestra una imagen de la formación superior y media. Los círculos que encierran un número indican la localización de los pozos (1, ..., 5).



**-La formación inferior**, litológicamente es la más antigua de la entidad, proviene del Terciario inferior y aflora al norte de la ciudad de Tlaxcala dando forma a los grandes cerros. Esta formación se originó al acumularse clastos en un ambiente continental lacustre y que posteriormente fueron cubiertas por andesitas y tobas intermedias del Terciario Superior (Mioceno). En general, la formación está compuesta por limos de color verde y areniscas de color gris claro que presentan un gran intemperismo hasta tomar un color blanco. Su composición es de granos de cuarzo y feldespatos fragmentados de roca y mica detrítica, además de una matriz arcillosa cementada con calcita y hematita que se dispone en estratos gruesos y medianos.

**-La formación media**, está constituida por tobas andesíticas que se distribuyen sobre aproximadamente un 80% del total de la superficie de la ciudad de Tlaxcala. La presencia de esta superficie es debido a que la ciudad está ubicada en las faldas del volcán La Malinche y próxima a los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl. Estas tobas andesíticas se formaron principalmente durante el plioceno (hace 5.2 millones de años), periodo en el cual los edificios volcánicos adquieren su forma definitiva. Material ígneo extrusivo se encuentra en los lomeríos, cerros y barrancas localizadas en los alrededores de la ciudad y presentan como característica rocas de color gris claro o café rojizo propios de rocas piroclásticas escoriáceas con una textura cristalina porfídica, plagioclasas y matriz vítrea sílice altamente intemperizada y sepultada por brechas volcánicas básicas y andesitas del cuaternario. Esta última, constituida por lava que llegó a la superficie y formó lomeríos de diferentes tamaños y geometrías que bordean a la ciudad. En el extremo inferior derecho de la Figura 1, se puede observar una foto de este tipo de roca tomada al NE de la ciudad de Tlaxcala.

**-La formación superior**, se origina por la deposición de material aluvial en las partes bajas de la ciudad de Tlaxcala, todos ellos transportados por agua. Este material está constituido por clastos de diferentes tamaños, desde arena hasta arcillas formadas principalmente por rocas ígneas intrusivas con geometrías redondeadas o subangulares. Desde el punto de vista geológico y como resultado de los diferentes procesos erosivos presentes en las partes altas y bajas se han formado suelos aluviales y lacustres como parte de las grandes llanuras y lagunas presentes en la ciudad de Tlaxcala. En la Figura 1, se puede observar este tipo de formación en los

alrededores de la laguna de Acuitlapilco (foto, en el extremo derecho de la Figura 1).

Geomorfológicamente, la ciudad de Tlaxcala presenta una superficie muy accidentada ya que sobresalen la presencia de innumerables lomeríos de colinas redondeadas y cerros de diferentes tamaños y geometrías (Enciclopedia de los Municipios de México: Tlaxcala, Tlax.). Asimismo, es importante la presencia de llanuras, mesetas, valles y cañadas distribuidas en casi toda el área de la ciudad (INEGI, 1996).

### Aspectos hidrológicos

En la ciudad de Tlaxcala, el principal afluente es el río Zahuapan que cruza de NE a SO a la ciudad (Figura 1), siendo sus principales afluyentes los ríos: Los Negros, Potrero Hondo y el río Totolac. Todos estos ríos, conforme se desplazan hacia el río principal, arrastran diversos volúmenes de sedimentos que son depositados en sus riberas. Cabe indicar que el río Zahuapan, en su largo recorrido atraviesa aproximadamente 6.6 km de longitud en la parte norte del municipio, sobre un cauce natural. Por otra parte en el extremo sur de la ciudad de Tlaxcala se encuentra la laguna de Acuitlapilco, que conforme fue disminuyendo su nivel de agua fue dejando vestigios de lo que antiguamente abarcaba, ya que era considerada como una de las más destacadas fuentes de agua en la región. Esta laguna sufre un deterioro progresivo provocado por el asolvamiento (pérdida de volumen) y por los asentamientos ribereños. Todos estos cambios en la morfología local, generan un fuerte impacto en la flora y la fauna de la región.

### Aspectos geotécnicos

A fin de tener mayor información sobre las características del suelo y de los materiales que constituyen la superficie sobre la cual se levanta la ciudad de Tlaxcala, ha sido necesario recopilar la información geotécnica proveniente de diversos trabajos que consideran cortes estratigráficos, elaborados a partir de excavaciones y perforaciones de diferentes pozos ubicados en diversos puntos de la ciudad. En la Figura 1, se observa la distribución de estos pozos dentro de la ciudad y en la Figura 2, el sondeo de penetración estándar del Pozo 1, tomado del estudio realizado por Navarro (2000) y que presenta un corte litológico detallado hasta los 26 metros de profundidad. De acuerdo a esta información, se ha considerado la existencia de dos estratos, el primero con un espesor de 1.6 metros, constituido de relleno areno limoso de color café claro

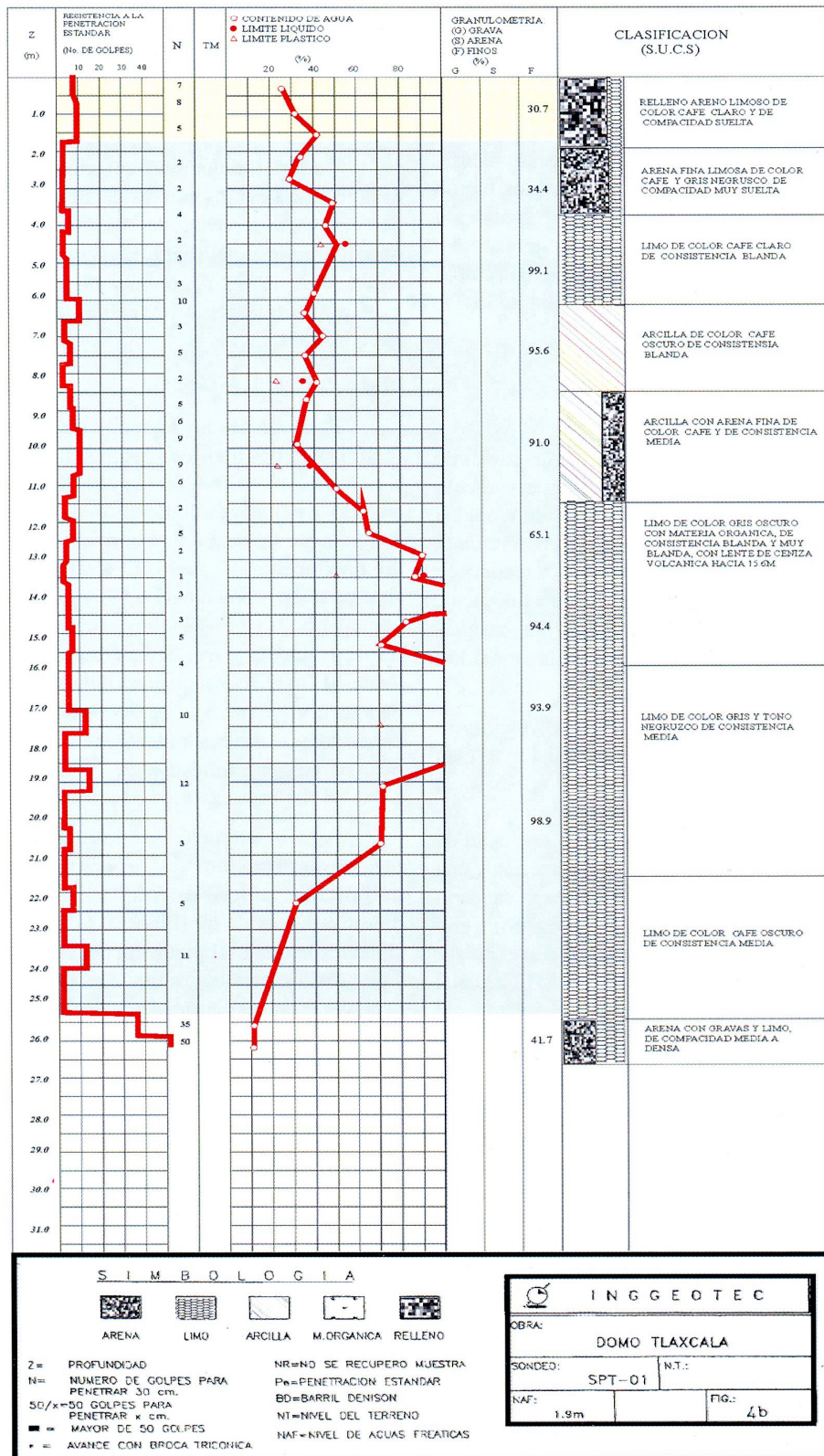


Figura 2.- Sondeo de penetración estándar para el Pozo 1 y su respectivo corte estratigráfico (Navarro, 2000).

y de compacidad suelta, y el segundo de 23.8 metros de espesor compuesta de limo-arcilla de consistencia blanda con lentes de ceniza volcánica. Por debajo de los 23.8 metros de profundidad, se considera como un semi-espacio, el cual estaría compuesto por arena con gravas de limo de compacidad media a densa. La información para los otros cuatro pozos fueron recopilados por Meneses (1996) y corresponden a cortes litológicos simples los que indican aproximadamente la profundidad de arenas con gravas de compacidad media a densa por debajo de los 30 metros que comienzan los limos.

## EFFECTOS DE SITIO

### Delimitación de áreas

A fin de realizar la evaluación de los suelos de la ciudad de Tlaxcala y estimar su comportamiento dinámico, se ha visto por conveniente dividir la ciudad de Tlaxcala en tres áreas, tal como se observa en la Figura 3. Estas áreas son delimitadas teniendo en cuenta los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos antes descritos, además de la distribución de viviendas y la densidad poblacional (INEGI, 2000).

**Área 1**, se localiza sobre la *formación superior* a 2100 metros sobre el nivel del mar. Esta área está constituida por suelo aluvial con espesores de aproximadamente 25 metros, además de considerar al Río Zahuapan que cruza la ciudad de NE a SO. El área 1, esta rodeada por lomeríos y una meseta en su extremo SO. Según el mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala, esta área contiene aproximadamente al 80% de viviendas con el mayor número de edificaciones coloniales (INAH Tlaxcala, 1994) y al zócalo (plaza principal) de la ciudad.

**Área 2**, se localiza sobre los afloramientos de la *formación intermedia* y esta constituida por las tobas andesíticas que dieron origen a la formación de una meseta con una altura de 2300 metros sobre el nivel del mar. La meseta se ubica en dirección SO con respecto al zócalo de la ciudad. Esta área contiene al 6% de la población total de la ciudad de Tlaxcala.

**Área 3**, se localiza sobre la *formación superior* a 2200 metros sobre el nivel del mar y esta constituida por suelos lacustres como parte de la laguna de Acuitlapilco, además de suelos en los cuales resta vestigios de antiguos niveles del volumen de agua de dicha laguna. En general, el área 3 esta rodeada por lomeríos. Y localmente, se encuentra ubicada aproximadamente a 2 km del zócalo de la ciudad y contiene un 10% de las viviendas de la ciudad

de Tlaxcala distribuidas en un área de mayor extensión respecto a las otras.

### Aproximación experimental del efecto de sitio

Como se mencionó anteriormente, en este estudio se estima los efectos de sitio para la ciudad de Tlaxcala a partir del uso de registros de microtemores y aplicando la técnica de Nakamura (Nakamura, 1989). A continuación, se describe de manera práctica como se realizó la aproximación experimental.

#### a) Adquisición de datos

Para obtener los registros de microtemores, se utilizaron dos tipos de sensores: tres sismómetros Kinematics modelos SV-1 (1) y SH-1 (2) con periodo natural de 5 segundos, tanto para registrar la componente vertical (Z) y horizontal (N-S y E-W) del movimiento del suelo. El amortiguamiento del sistema es en promedio de 0.69 y la sensibilidad de 208.30, 159.71 y 155.78 V/m/s para cada componente, respectivamente y tres acelerómetros Kinematics, modelo FBA-23 con una sensibilidad de 2.5 V/m/seg<sup>2</sup> para un acelerómetro de 1g. Estos 6 sensores fueron conectados a un registrador Kinematics K2 de 24 bits con una sensibilidad es de 104857.6 cuentas/V. La señal fue registrada a 100 muestras/seg.

Para la selección de los puntos donde se registró los microtemores, se considera las tres áreas delimitadas anteriormente. El total de puntos muestreados es de 69 (Figura 3) distribuidos de la siguiente manera: 41 puntos se encuentran en el área 1 (P1-P41) sobre suelos aluviales (sedimentos) con la mayor la mayor densidad poblacional; 13 en el área 2 (P57-P69) de regular densidad poblacional y viviendas edificadas sobre tobas andesíticas y 15 en el área 3, de menor densidad poblacional y viviendas edificadas sobre suelos sedimentarios lacustres distribuidas en una área de gran extensión. En la Figura 4, se muestra un ejemplo del registro de microtemores en sus tres componentes obtenidos para el punto P32.

#### b) Estimación de la respuesta dinámica

Siguiendo el procedimiento establecido por Lermo et al (1994a,b) y Chavez-Garcia et al (1996), para la zona de estudio se ha hecho uso de los registros de microtemores para calcular los espectros de Fourier para ventanas de señal de 20 segundos, tanto para los registros en velocidad como aceleración. A partir de estos espectros, se calcula

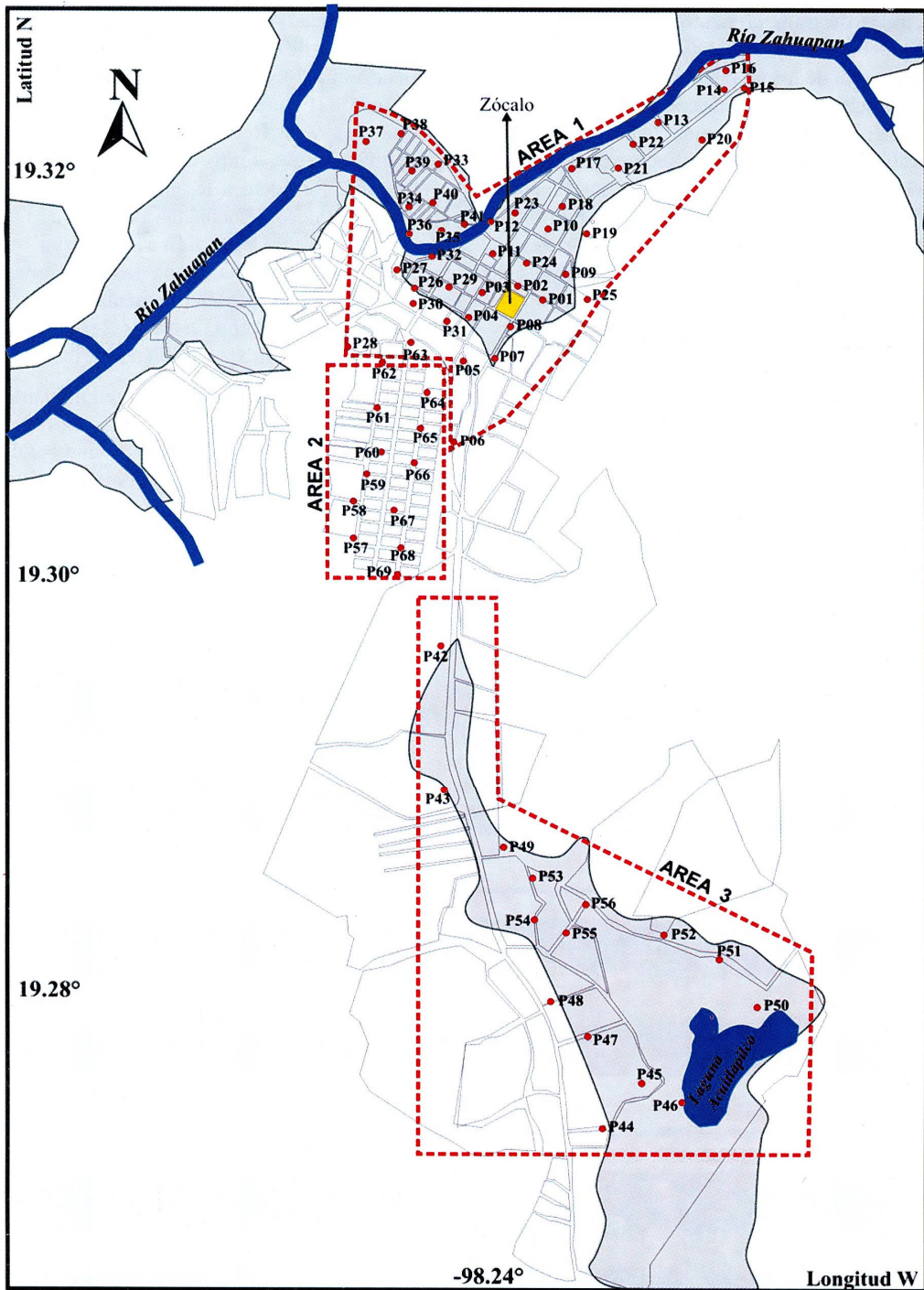


Figura 3.- Mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala y delimitación de las áreas 1, 2 y 3 (líneas discontinuas) definidas a partir de la geología, geomorfología, hidrogeología, geotecnia y la distribución de las viviendas. Los círculos grises con su respectivo número indican los lugares donde se tomaron datos de microtemores (P01-P69)

los cocientes espectrales entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (funciones de transferencia empírica, FTE). Los resultados corresponden a una serie de cuatro gráficos para cada uno de los 69 puntos dentro de una banda de frecuencias comprendida entre 0.1 a 10 Hz y que considera ruido de origen natural (frecuencias  $\gg 1$  Hz) y el causado por el hombre (frecuencias  $\ll 1$  Hz). En la Figura 5 se muestra un ejemplo de las funciones de transferencia y cuyo promedio obtenido por interpolación es indicado con una línea gruesa que será considerado durante el desarrollo del presente estudio.

El análisis de las funciones de transferencia empírica obtenido para cada punto permite visualizar las frecuencias predominantes y la estimación de su máxima amplitud para ambas componentes horizontales. En general, se considera que el rango frecuencial de interés para efectos de realizar la microzonificación de la ciudad de Tlaxcala se encuentra entre 1 y 10 Hz delimitado a partir de las características geológicas, morfológicas y geotécnicas observadas en la zona de estudio.

En la Figura 5 (a y b) se presentan ejemplos de las FTE en velocidad y aceleración obtenidas para el área 1. El punto P32 (Figura 5a), está localizado en el centro de la ciudad y presenta picos de frecuencia que fluctúan entre una banda de 1-3 Hz. El punto P38 (Figura 5b), se localiza en la periferie de esta área y su frecuencia varía entre 3-7 Hz aproximadamente, tanto en velocidad como en aceleración. Respecto a la amplitud relativa (con respecto a la unidad), ésta fluctúa alrededor de 3 veces en ambos puntos. También se observa que a frecuencias menores a 1 Hz, las funciones de transferencia de velocidad presenta curvas más dispersas con respecto a la aceleración esto probablemente debido a la sensibilidad de los sensores.

Para definir la frecuencia predominante, se siguieron tres criterios: (1) considerar un rango de interés entre 1-10 Hz; (2) observar una banda de frecuencias que presenten  $A_r$  de al menos 1.5 veces y (3) seleccionar el pico de frecuencia más representativa y que por lo menos se presente con claridad en dos de las cuatro gráficas (velocidad y aceleración).

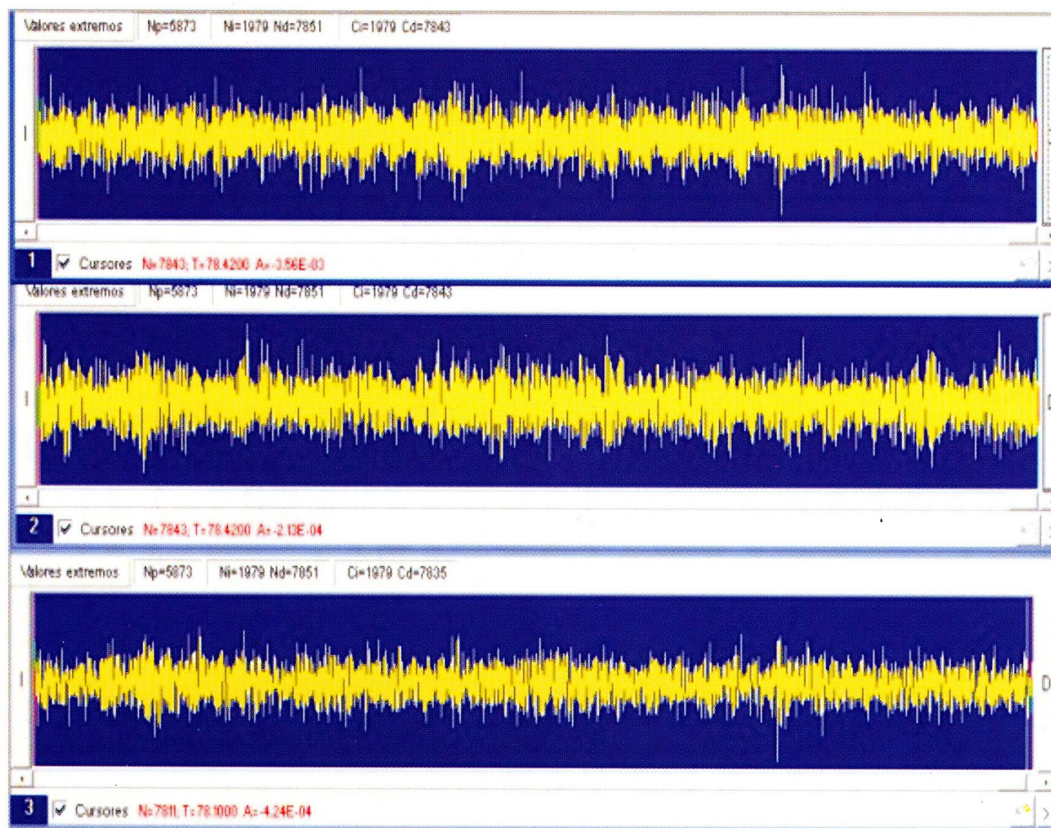


Figura 4.- Ejemplo de una ventana del registro de microtremores (velocidad) en sus tres componentes (1=vertical, 2=NS y 3=EW) obtenidos para el punto P32

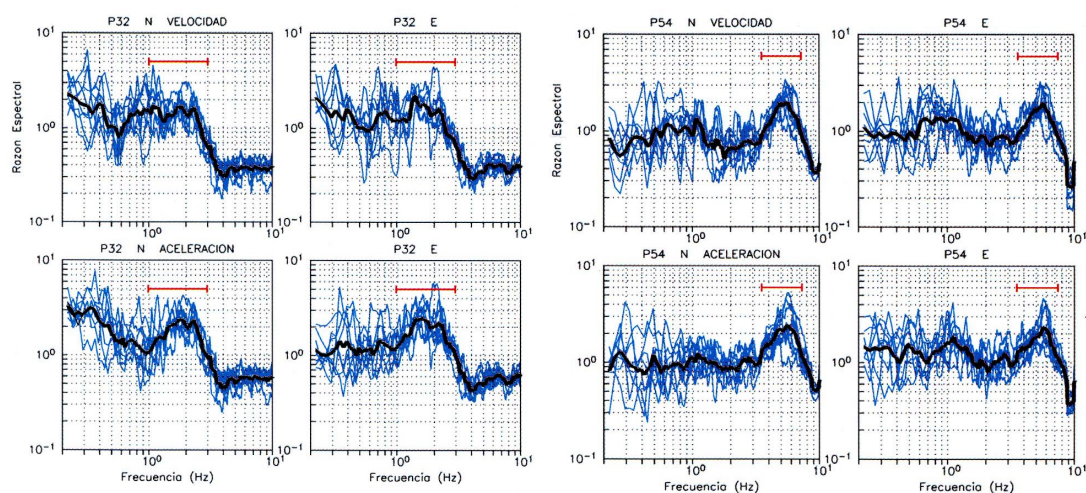


Figura 5.- Ejemplo de funciones de transferencias empíricas (FTE). a) FTE, para el punto 32 localizado en el centro del área 1 y próximo al río Zahuapan. b) FTE para el punto 38 localizado en la periferia del área 1. Las FTE son de velocidad y aceleración

En general, las funciones de transferencia empíricas (FTE) obtenidas con registros de aceleración y velocidad, respecto a la frecuencia, en su mayoría muestran resultados similares, con el predominio de una banda de frecuencias que oscila entre 1 a 7 Hz. Cabe indicar que por efectos de dispersión de estas curvas, en algunos casos los picos predominantes en la FTE de velocidad no son muy claros conforme estos tienden a 1 Hz; mientras que en aceleración se observa mayor estabilidad.

### MAPA DE ISOPERIODOS

Los valores de frecuencias predominantes obtenidas para los 69 puntos evaluados, consideran los valores promedio de las FTE calculada para cada componente horizontal. En la Tabla 1 se indica los puntos y el valor correspondiente a su periodo dominante ( $T_0$ ) y amplitud relativa ( $A_r$ ). En la Figura 6, se presenta el mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala y en ella la distribución de los periodos dominantes ( $T_0$ ) y las curvas de isoperiodos obtenidas para las áreas 1 y 3 (interpolación de los valores de  $T_0$ ). Para el área 2 no se identificó una frecuencia predominante en los puntos de observación; por lo tanto, se le considera como puntos sin efecto de sitio. Para el área 1, se ha trazado con líneas continuas las curvas de isoperiodo para 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 segundos; mientras que, para el área 3, las curvas corresponden a periodos de 0.1, 0.3 y 0.5 segundos. Respecto a las amplitudes relativas ( $A_r$ ) son de al menos 6 veces en algunos puntos.

De acuerdo a la distribución de las curvas de isoperiodo, en el área 1 se observa periodos dominantes más altos en el centro de la ciudad (0.8 s) y conforme se extiende hacia los lomeríos ubicados al rededores de la ciudad, los periodos dominantes disminuyen rápidamente hasta llegar a 0.2 seg. Asimismo, se observa que en dirección este, las isocurvas presentan un alargamiento paralelo al río Zahuapan, concordante con la geometría de la formación superior (suelos aluviales). Para el área 3, la concentración de estas curvas se localiza en el extremo sur de la ciudad (zona del lago Acuitlapilco). Aquí las curvas se distribuyen de forma irregular, sobre suelos lacustres ubicados en el extremo sur con valores que fluctúan entre 0.1 a 0.5 segundos. Las isocurvas de periodos más alto se encuentran en el extremo sureste del lago y conforme tiende hacia el norte, un alargamiento en dirección oeste y este, y en donde los valores de periodos disminuyen rápidamente coincidiendo geológicamente con el cambio de formación.

En conclusión, la distribución de curvas de isoperiodo delimita tres áreas importantes, siendo estas coherentes con las áreas definidas en el inciso anterior a partir de argumentos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y tectónicos. A fin de validar los resultados obtenidos, a partir de la aplicación de la técnica de Nakamura, se procede a aplicar el método experimental SPAC (método de autocorrelación espacial) y teórico unidimensional.

**Tabla 1**  
**Valores de las funciones de transferencia empíricas obtenidas para los 69 puntos de observación en la ciudad de Tlaxcala. Obs=punto de observación; F=frecuencia predominante; To=periodo dominante y Ar=amplitud relativa (los guiones «↔» indican que no se observo periodos dominantes)**

Obs.	F (Hz)	To (seg)	Ar (veces)	Obs.	F (Hz)	To (seg)	Ar (veces)
P1	1.80	0.56	3.0	P36	2.70	0.37	1.7
P2	1.80	0.56	2.8	P37	1.90	0.53	2.2
P3	1.50	0.67	2.0	P38	5.10	0.20	2.9
P4	4.50	0.22	2.5	P39	3.20	0.31	2.0
P5	2.30	0.43	1.8	P40	1.20	0.83	2.0
P6	1.20	0.83	2.0	P41	1.30	0.77	2.0
P7	4.00	0.25	1.8	P42	6.10	0.16	1.9
P8	4.30	0.23	1.5	P43	7.30	0.14	4.0
P9	2.90	0.34	1.9	P44	9.30	0.11	2.0
P10	3.00	0.33	2.0	P45	3.80	0.26	1.9
P11	1.70	0.59	2.0	P46	3.60	0.28	6.0
P12	1.30	0.77	2.0	P47	-	-	-
P13	3.20	0.31	2.1	P48	8.60	0.12	1.6
P14	2.40	0.42	2.0	P49	7.40	0.14	2.0
P15	5.50	0.18	1.8	P50	2.10	0.48	1.9
P16	5.40	0.19	2.5	P51	2.10	0.48	1.7
P17	2.20	0.45	2.2	P52	-	-	-
P18	2.00	0.50	2.0	P53	9.20	0.11	2.0
P19	3.40	0.29	1.5	P54	5.50	0.18	2.2
P20	2.30	0.43	2.0	P55	5.40	0.19	2.0
P21	1.90	0.53	3.0	P56	-	-	-
P22	3.20	0.31	1.7	P57	-	-	-
P23	1.20	0.83	3.0	P58	2.60	0.38	1.6
P24	1.20	0.83	2.1	P59	-	-	-
P25	3.20	0.31	2.0	P60	-	-	-
P26	4.00	0.25	2.0	P61	1.5	0.66	1.9
P27	-	-	-	P62	-	-	-
P28	8.50	0.12	1.9	P63	-	-	-
P29	1.80	0.56	2.0	P64	-	-	-
P30	5.20	0.19	1.5	P65	3.1	0.33	3.0
P31	3.20	0.31	1.7	P66	-	-	-
P32	1.70	0.59	3.0	P67	-	-	-
P33	4.80	0.21	2.0	P68	-	-	-
P34	1.60	0.63	2.1	P69	-	-	-
P35	3.00	0.33	3.0				

## VALIDACIÓN DEL EFECTO DE SITIO

A continuación, se procede a validar los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura para la ciudad de Tlaxcala aplicando el método teórico unidimensional (Método de Haskell). Este método está basado en un modelo matemático simplificado y sus resultados dependen en gran medida de la información conocida sobre las características dinámicas del suelo, como son la velocidad de las ondas cortantes, la densidad y espesor de las capas.

La idea es calcular la respuesta teórica de una superficie conocida ante la incidencia vertical de ondas SH representadas por una función de transferencia teórica (FTT). En este estudio las características geotécnicas del suelo de Tlaxcala fueron tomadas del estudio del sondeo de penetración estándar y cortes litológicos descritos anteriormente (Punto P32). Para obtener las características dinámicas del suelo se aplica el método experimental SPAC (método de autocorrelación espacial).

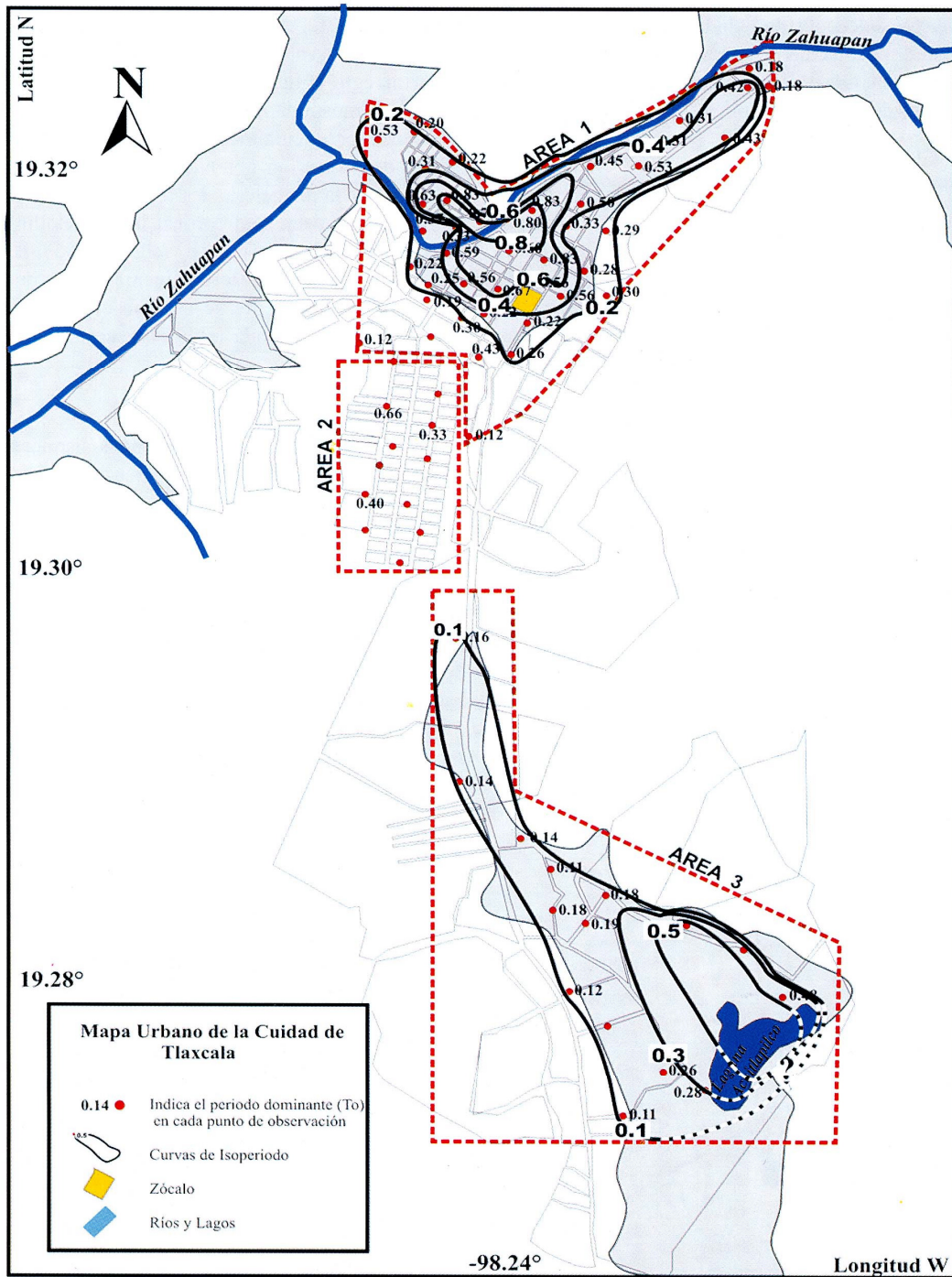


Figura 6.- Mapa de distribución de periodos dominantes y curvas de isoperiodos para la ciudad de Tlaxcala. Las líneas discontinuas delimitan las áreas indicadas en la Figura 3

Los resultados teóricos obtenidos del método unidimensional serán comparados con los resultados empíricos obtenidos con la técnica de Nakamura, únicamente para el punto de observación (P32). Este punto fue seleccionado debido a que se cuenta con un estudio geotécnico en detalle (Navarro, 2000); y por presentar uno de los valores de periodo dominante mas altos de los observados en esta ciudad ( $T_0=0.6s$ ).

a) Método SPAC

El método SPAC (método de autocorrelación espacial) considera el procedimiento original desarrollado por Aki (1957) y que fuera implementado por Ferrazzini y Aki (1991) para determinar las propiedades físicas del suelo a partir de las principales características de las ondas producidas por la vibración ambiental o microtremores (contienen principalmente ondas Rayleigh). En general, el método SPAC utiliza un arreglo instrumental de tipo circular o semicircular (Figura 7a) a fin de obtener una función de correlación promediada azimutalmente para eliminar el ángulo desconocido entre la estación central y la orientación de las estaciones equidistantes (Lazcano y Rodríguez, 1999; Saccorotti et al., 1999; Okada, 2003; Flores-Estrella y Aguirre-González, 2003).

En general, el principio básico del método SPAC es considerar la propiedad de que la «función de correlación entre los registros del ruido entre estaciones equidistantes y promediadas espacialmente, para el caso de la componente vertical, tiene la forma de una función de Bessel de orden cero de primera clase», a partir de la cual se obtiene la curva de dispersión.

En este estudio se considera arreglos circulares de estaciones sísmicas cuyos radios son de 9, 21 y 45 metros con respecto de la estación central. Para cada uno de estos arreglos se obtiene su curva de correlación. A fin de llegar a mayor profundidad, a partir de la curva de correlación obtenida para el tercer arreglo (Figura 7b) se obtuvo la curva de dispersión mostrada en la Figura 8. De esta curva obtenida experimentalmente se aproxima otra curva teórica de dispersión obtenida con la ayuda de un algoritmo de la paquetería de Herrman (2002), para un modelo de velocidad cortical inicial (Bollinger, 1980; Singh et al., 1995; Lay e Wallace, 1995) al cual se le ha fijado los espesores obtenidos del sondeo geotécnico. Finalmente se obtiene el modelo de velocidad mostrado en la Tabla 2 que corresponde al mejor ajuste.

b) Método unidimensional

Ante la incidencia de las ondas sísmicas en una estratificación, el método unidimensional resuelve una serie de ecuaciones que satisfacen las condiciones de frontera en las interfaces y permite conocer el movimiento ocasionado por el paso de la onda SH en cualquier punto de esta estratificación. Este método asume que el comportamiento del suelo es lineal para cualquier nivel de excitación en el cual los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito; por lo tanto, no se incluye efectos de irregularidad lateral al descansar los estratos sobre un semi-espacio homogéneo (Thomson, 1950 y Haskell, 1962). El método de Thomson-Haskell (método de Haskell) considera el cálculo de las

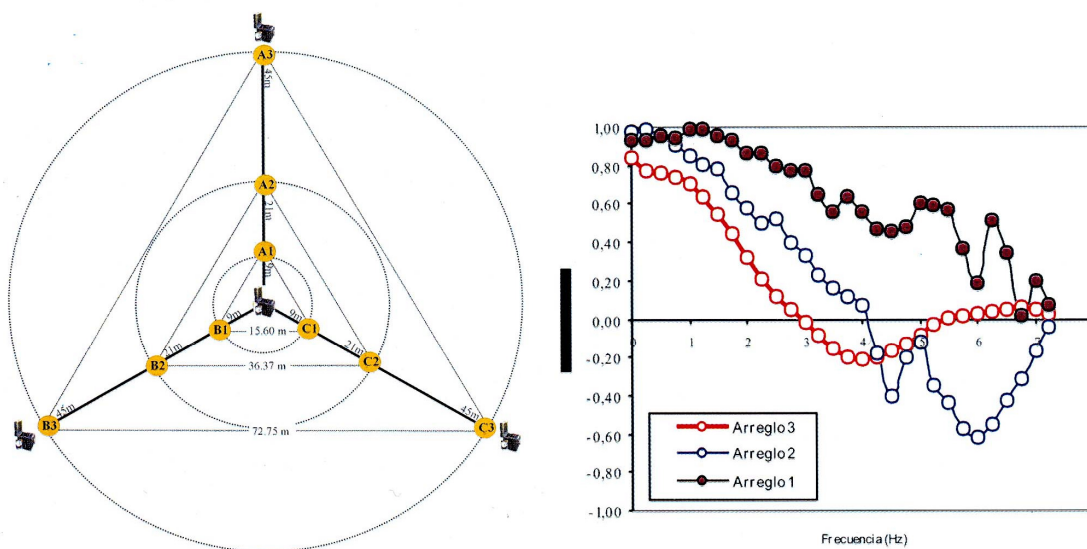


Figura 7.- a). Disposición del arreglo de estaciones utilizadas para el método experimental SPAC. Para el primer arreglo el radio es de 9 metros, para el segundo y tercero de 21 y 45 metros con respecto a la estación central «O». b). Funciones de correlación promediadas azimutalmente para los tres arreglos

funciones de transferencia teóricas en medios estratificados ante la incidencia de ondas SH en la base de los estratos (Sánchez-Sesma, 1985).

Al aplicar el método unidimensional utilizando los datos de la Tabla 2, se obtiene la función de transferencia teórica (FTT) mostrada en la Figura 9, la misma que sobrepuesta en los gráficos de FTE obtenidas con la técnica de Nakamura para el punto P32, se observa que coinciden en su primer modo, siendo la frecuencia predominante de 1.7 Hz, lo cual valida los obtenidos con la técnica de Nakamura.

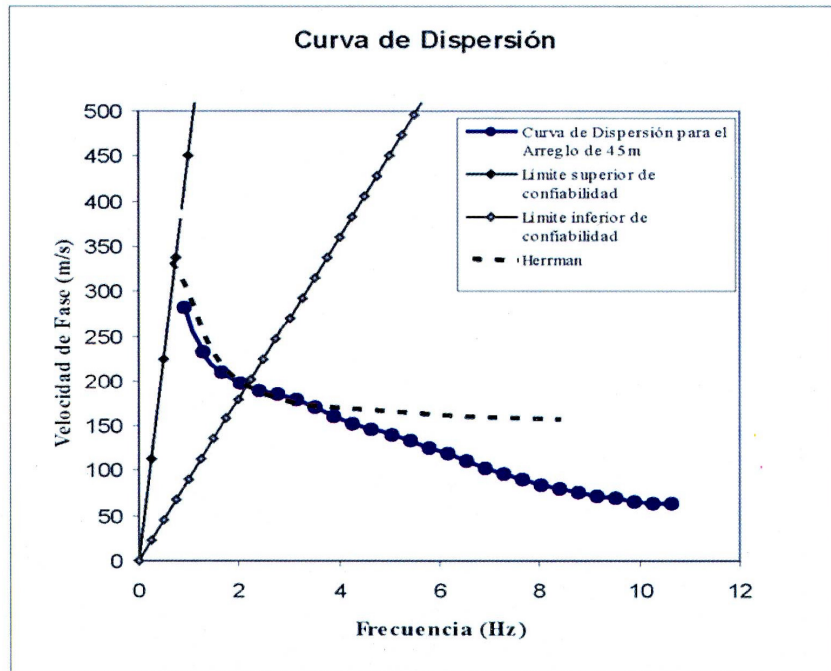
A partir de estos resultados se procedió a realizar una interpolación del modelo de velocidad

para los puntos P08, localizado en las proximidades del zócalo de la ciudad de Tlaxcala y P14, localizado en el extremo NE de la ciudad (puntos localizados en los extremos de esta zona urbana). En ambos casos, se varió los espesores de los estratos ya que conforme tienden a los lomeríos, ellos disminuyen (Figura 9). Las FTT obtenida con este modelo, coincide en cuanto a la frecuencia predominante en su primer modo con las FTE obtenidas para estos puntos, en cuanto a la Ar hay una diferencia de aproximadamente 1.3 veces mayor. Resultados que validan los datos de To obtenidos con la técnica de Nakamura y el uso de registros de microtemores.

**Tabla 2**  
**Modelo de velocidad obtenido con el método SPAC. a y b indican velocidad de ondas P y S, r la densidad del medio y Qp, Qs los valores de coda-Q para las ondas P y S**

Espesor (m)	$\alpha$ (km/s)	$\beta$ (km/s)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	Qp	Qs
1.6	0.1384	0.080	2.0	100.	50.
23.6	0.3287	0.190	2.2	100.	50.
Semi-espacio	0.7785	0.450	2.3	200.	100.

*Figura 8.-  
 Curva de dispersión  
 obtenida para el  
 arreglo 3 (45  
 mts) en  
 comparación  
 con la curva de  
 dispersión  
 teórica  
 correspondiente  
 al mejor ajuste*



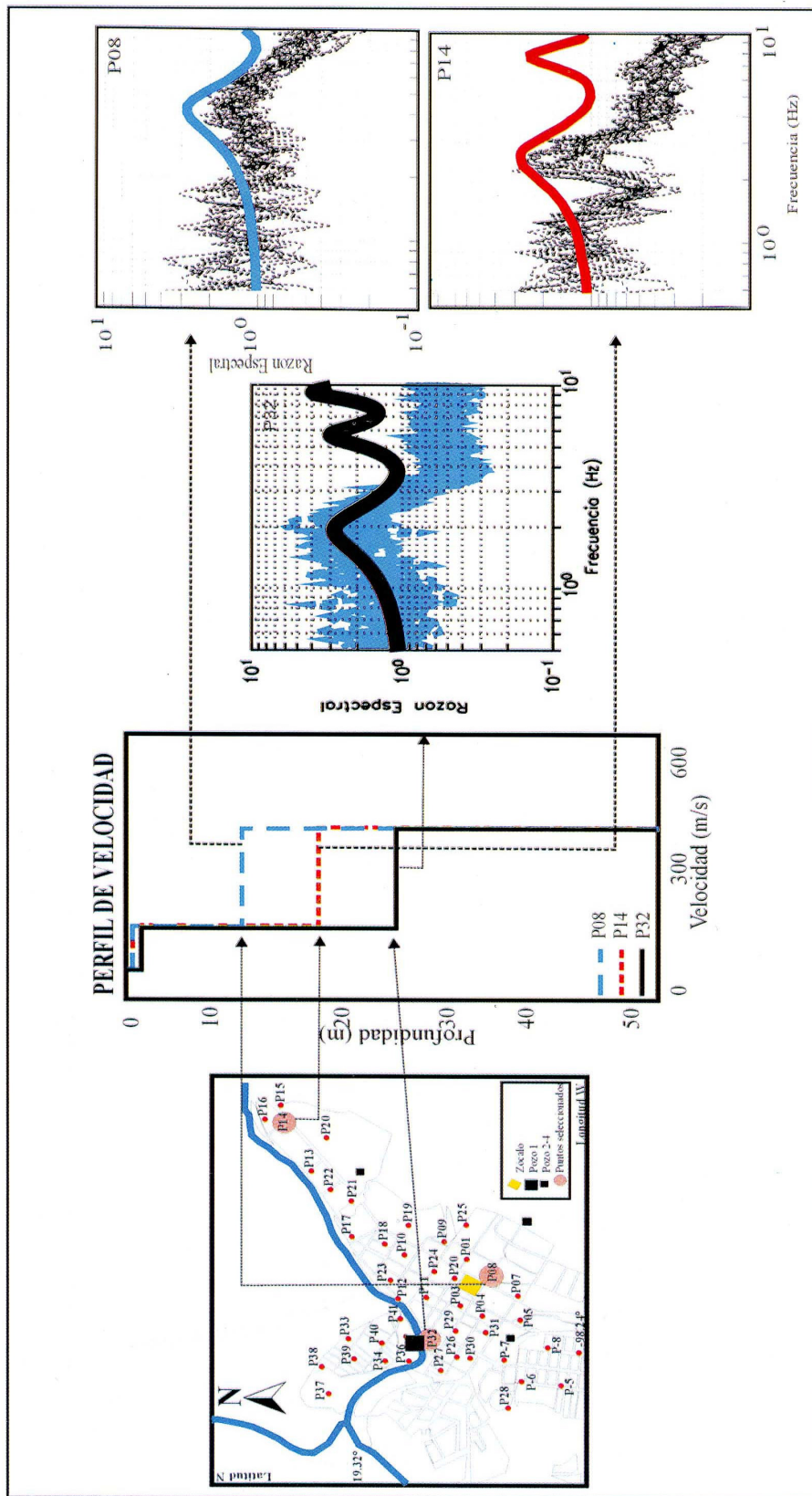


Figura 9.- Mapa con la localización de los puntos P08, P14 y P32 para los cuales se propuso un perfil velocidad. En el extremo derecho, se presenta la comparación de las funciones de transferencias empíricas obtenidas para los puntos P32, P08 y P14 con la técnica de Nakamura (líneas discontinuas) y la función de transferencia teórica obtenida con el método unidimensional (líneas continuas)

## MICROZONIFICACION SISMICA

La integración de la información geología, geomorfología, hidrología, geotécnica y tectónica y la estimación de los efectos de sitio son utilizados para proponer el mapa de microzonificación sísmica para la zona urbana de la ciudad de Tlaxcala. El mapa se presenta en la Figura 10 y en ella, se identifica que se ha delimitado a la ciudad de Tlaxcala en 3 microzonas:

*MICROZONA I:* Los periodos dominantes en esta zona oscilan entre 0.3 y 0.8 segundos con amplificaciones de al menos 3 veces. La zona comprende al centro de la ciudad de Tlaxcala (borde del río Zahuapan). En esta zona, la composición del suelo se caracteriza por la presencia de depósitos fluviales con mayores espesores. Asimismo, comprende la parte sur de esta ciudad, próximo a la laguna de Acuitlapilco, en donde destaca la presencia de depósitos lacustres.

*MICROZONA II:* En esta zona los periodos dominantes oscilan entre 0.2-0.3 segundos con valores de amplificación de al menos 3 veces. Esta zona abarca dos áreas, la primera considera la parte colonial de la ciudad de Tlaxcala bordeando a la microzona I y la segunda área de mayor expansión urbana en dirección sur hasta la laguna Acuitlapilco. Geológicamente, el suelo de estas áreas esta constituido por sedimentos aluviales y lacustres de menor espesor debido a que tienden hacia los lomeríos.

*MICROZONA III:* Es esta zona no ha sido posible identificar periodos dominantes debido probablemente a que está constituida por suelos mas compactos con la presencia de tobas andesíticas. Esta microzona se encuentra bordeando a la microzona II.

## CONCLUSIONES

El desarrollo del presente estudio ha permitido evaluar los efectos de sitio de la ciudad de Tlaxcala y proponer un mapa de microzonificación sísmica para la misma, siendo las principales conclusiones las siguientes:

La estimación del efecto de sitio utilizando registros de microtemores y aplicando la técnica de Nakamura ha puesto en evidencia que en la ciudad de Tlaxcala existen 2 áreas en las cuales las curvas de isoperiodos alcanzan valores entre 0.2 y 0.8 segundos, y entre 0.1 y 0.5 segundos con amplificaciones relativas de al menos 4 veces.

Con el método unidimensional se validaron los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura para tres puntos de observación. En estos puntos, las frecuencias predominantes estimadas a partir de las funciones de transferencias empíricas (Nakamura) y teóricas (unidimensional) son similares, lo cual indica que los resultados obtenidos en este estudio son válidos.

A partir del análisis de los efectos de sitio se ha propuesto un mapa de microzonificación sísmica, para Tlaxcala y en la cual se identifica la presencia de tres microzonas. La microzona I con periodos dominantes de 0.5 a 0.8 segundos y valores de amplificación relativa de al menos 3 veces. La microzona II con periodos dominantes de 0.1 a 0.5 segundos y valores de amplificación relativa de al menos 4 veces y la microzona III en donde no ha sido posible identificar periodos dominantes. El mapa de microzonificación sísmica propuesto representa un conocimiento primario para considerar un reordenamiento de la ciudad y guía para la futura expansión urbanística de la misma. Asimismo, constituye punto de partida para futuros estudios de sismicidad e ingeniería que pudiera realizarse con mayor detalle en el estado de Tlaxcala.

Según Muria y Gonzáles (1993), para edificaciones de 2 niveles el periodo fundamental de vibración es de 0.2 segundos y considerando que en la Microzona II prevalecen este tipo de edificaciones, resultaría ser de mayor peligrosidad por la posibilidad de que coincidan los modos de vibrar del suelo con el de las viviendas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los Drs. J. Aguirre, J. García, C. Valdez, L. Quintanar y D. Huaco por sus acertados comentarios al presente tema de investigación, los mismos que han permitido mejorar considerablemente los resultados obtenidos. Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el financiamiento otorgado para el desarrollo de este estudio. Al Ayuntamiento Constitucional de Tlaxcala, Tlax., al Instituto Estatal de Protección Civil de Tlaxcala y a la Directora de la Escuela Normal Urbana Federal Emilio Sánchez Piedra, por otorgarnos la información y las facilidades necesarias para realizar la investigación. Se agradece también a los ingenieros Yanet Antayhua, Daniel Vega, Marco Chavacan, Edgar Méndez y Eduardo Ismael, por el apoyo en los trabajos de campo.

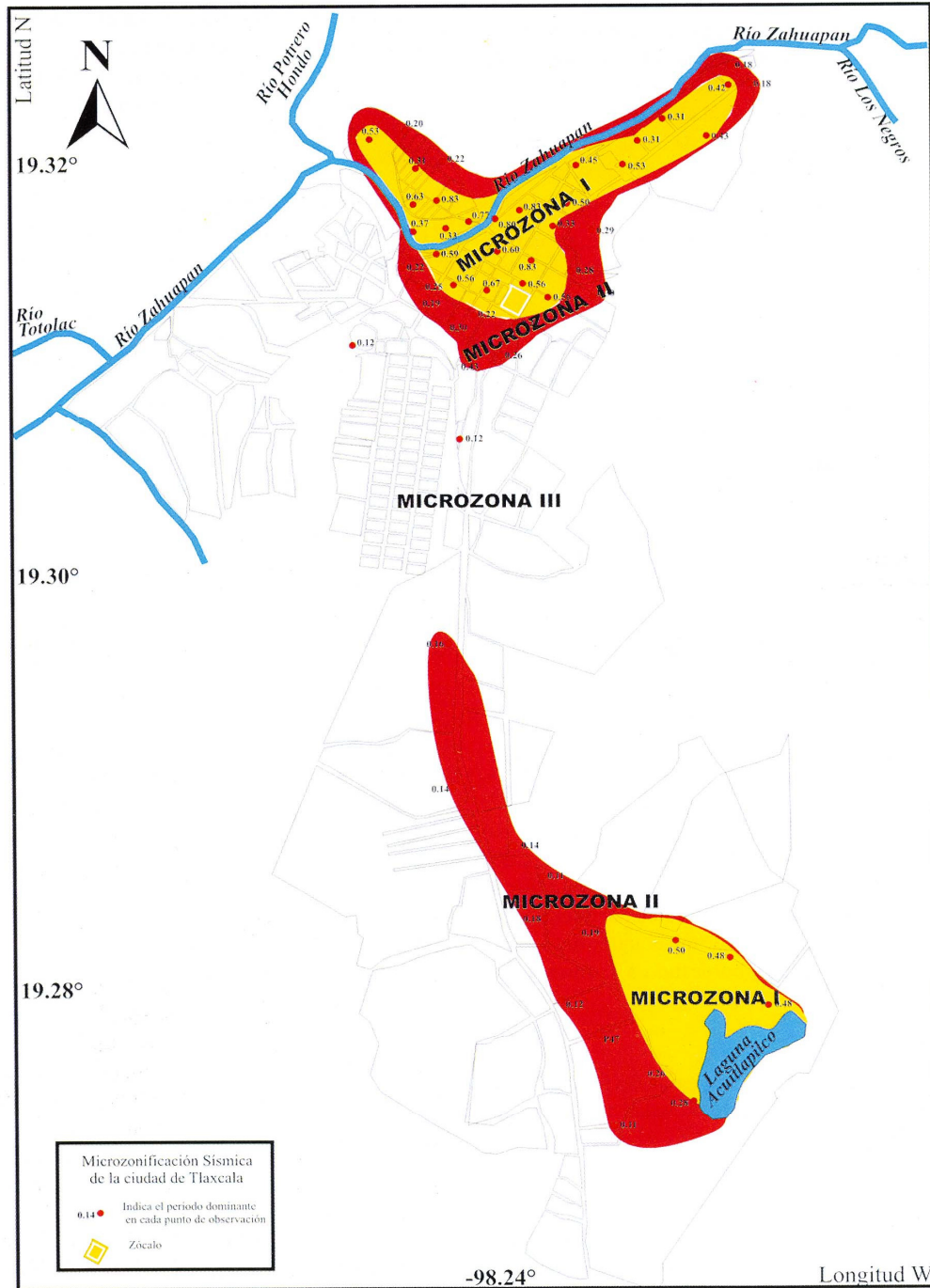


Figura 10.- Mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala a partir de los valores de periodos dominantes

## BIBLIOGRAFIA

- AKI K. (1957).- «Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors». *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 25, 415-457 pp.
- BERNAL I. (2006).- *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México*. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM. Pág. 130.
- BOLLINGER G. (1980).- «Blast vibration analysis», Southern Illinois University Press, 132 pp.
- CHAVÉZ-GARCÍA J., L. R. SÁNCHEZ & D. HATZFELD (1996).- «Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory», *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 1559-1573.
- FERRAZZINI V. & K. AKI (1991).- «Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array», *Journal of Geophysical Research* Vol. 96; N°B4; pag. 6199-6209.
- FINN W.D.L. (1991).- «Geotechnical engineering aspects of microzonation», *Proc. Fourth Int. Conf. On Seismic Zonation, Stanford, California*, I, 199-259 pp.
- FLORES-ESTRELLA H. & J. AGUIRRE-GONZÁLEZ (2003).- «SPAC: An alternative method to estimate site effects in México City». *Geofísica Internacional*, Vol. 42, No 2, pp.227-237.
- FLORES-ESTRELLA H. (2004).-, «Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidad en el Valle de México». Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM. Pág. 236.
- GUTIERREZ C. & S.K. SINGH (1992).- «A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico. Comparison of results from strong motion and microtremor data», *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- HASKELL N.A (1962).- «Crustal reflection of plane P and SV waves», *J. Geophysics Res.*, 67, 4751-67.
- HERRMAN R. D. (2002).- «An overview of synthetic seismogram computations». *Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University*.
- INAH TLAXCALA (1994).- «Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles, Estado de Tlaxcala», tomo II, INAH-SEDESOL, Gobierno del Estado de Tlaxcala, México.
- INEGI (1996).- Carta Geológica y Topográfica del Estado de Tlaxcala, México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- INEGI (2000).- Tlaxcala, XII Censo general de población y viviendas 2000; Tabulados básicos. Tomo IV.
- KING J. L. & B. TUCKER (1984).- «Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled valley». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74 , 137- 151 pp.
- KANAI K. & T. TANAKA (1954).- «Measurement of the microtremor», *Bull Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, Vol. 32, pp. 199-209.
- LACHET C. & P. Y. BARD (1994).- «Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique», *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.
- LAY T. & T. C. WALLACE (1995).- «Modern Global Seismology». Academic Press, E.U.A., 521 pp.
- LAZCANO J. & M. RODRÍGUEZ (1999).- «Estructura somera de la velocidad de propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas. Parte 1: Estimación de coeficientes de correlación», *Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM*; Pág. 35.
- LERMO J. & F.J. CHÁVEZ-GARCÍA (1994a).- «Are microtremors useful in site response evaluation?», *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- LERMO J. & F.J. CHÁVEZ-GARCÍA (1994b).- «Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records», *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- MENESES F. (1996).- «Proyecto de la instalación de la red de acelerógrafos de la ciudad de Tlaxcala (RACT)». Tesis profesional. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 76 pp.
- MURIA D. & A. GONZÁLEZ (1993).- «Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México», *6tas jornadas Chilenas de sismología e ingeniería antisísmica*, Santiago, Chile, 1, pp.585-594.
- 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.
- NAVARRO J. (2000).- Estudio de mecánica de suelos de superficie en el zoológico de Tlaxcala, Tlax. para el diseño de la cimentación del auditorio de usos múltiples. Empresa privada.
- OKADA H. (2003).- «The Microtremor Survey Method», *Geophysical monograph series*, No 12, *Society of exploration geophysicists*, 135 pp.
- REINOSO E. (2000).- «Estudios para la Microzonificación». *Memorias del VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica y II reunión sobre la Enseñanza de la Ingeniería Sísmica en México*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.
- SÁNCHEZ-SESMA F. (1985).- «Análisis de riesgo sísmico en Laguna Verde, Ver. Parte I. Determinación de espectros de respuesta específicos», Comisión Federal de Electricidad, 38 pp.
- SAUTER F. (1989).- «Introducción a la sismología», *Fundamentos de Ingeniería Sísmica I*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 271pp.
- SACCOROTTI G., J. ALMENDROS, E. CARMONA, J. IBÁÑEZ & E. DEL PEZZO (1999).- «Seismic arrays at Deception Island 1998-99 survey-1<sup>st</sup> phase», project ANT98-111 under the Spanish Antarctic Research Program, 16 pp.
- SECODUVI (2000).- «Problemáticas y prácticas de la descentralización». Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- SEGOB y Gob. Edo. Tlax. (2001), «Los Municipios de Tlaxcala». Colec-

- ción Enciclopedia de los Municipios de México. Secretaría de Gobernación-Gobierno del Estado de Tlaxcala.
- SINGH S.K., E. MENA & R. CASTRO (1988).- «Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacán earthquake and ground-motion data», *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 451-477 pp.
- SINGH S.K., R. QUASS, M. ORDÁZ, F. MOOSER, D. ALMORA, M. TORRES & R. VASQUEZ (1995).- «Is there a truly «hard» rock site in the Valley of Mexico?». *Geophysical Research Letters*, 22, 481-484 pp.
- THOMSON N.A. (1950).- «Transmission of elastic waves through a stratified solid medium», *J. Appl Phys*, 21, 89-93 pp.
- UDWADIA F.E. & M.D. TRIFUNAC (1973).- «Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California», *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1227-1253 pp.
- WERNER G. (1993).- «Los suelos en el Estado de Tlaxcala», Altiplano Central Mexicano. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.