



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE  
LA CIUDAD DE TLAXCALA, MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

presenta:

Yesenia Isabel Bernal Esquia

Tutor:

M. en C. Javier Lermo Samaniego

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

### ***Dedicatoria***

*A Dios por todo lo que me ha dado.*

*A mi madre Ninfa, por su comprensión,  
cariño y por darme aliento, apoyo, la  
oportunidad de vivir y saberme guiar por  
el camino del bien.*

*A mi padre Carlos por su apoyo recibido  
en todo momento.*

*A mis hermanos Graciela y Omar, por su  
cariño....*

## AGRADECIMIENTOS

Al Director General del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por apoyarme para ser beneficiaria de una beca para realizar mis estudios de maestría en esta universidad.

A la Unidad del Posgrado en Ciencias de la Tierra, entidad que me acogiera en su seno durante estos 3 últimos años.

Al M.C. Javier Lermo Samaniego, asesor de esta tesis, por haberme apoyado y brindado las facilidades necesarias para realizar el presente trabajo de investigación, así como su confianza para participar en los diversos proyectos del Instituto de Ingeniería.

Al Dr. Hernando Tavera por su incondicional apoyo académico, por sus enseñanzas, por sus comentarios durante el desarrollo de mis investigaciones y por su disponibilidad para mis consultas a pesar de sus múltiples ocupaciones, pero sobre todo por su don de gente y calidad humana.

Al Dr. Luis Quintanar, integrante del Comité Tutorial y asesor permanente de la presente investigación. Su apoyo y cualidades personales fueron de gran apoyo durante mis estudios y permanencia en México.

A los integrantes del Comité de Sinodales, Dr. Jorge Aguirre González, Dr. Jaime García Pérez y al Dr. Carlos Valdés González, por sus acertados comentarios al tema de investigación desarrollado. Al M.C. Miguel Rodríguez y al Dr. Armando García-Palomo por la información proporcionada y comentarios.

Al M.C. Julio Cuenca por su constante apoyo y solución pronta de mis requerimientos académicos y por saber ser amigo en los momentos difíciles de cada día, más aún cuando se está lejos de la familia.

A mis compañeros de estudios, Marcos Chavacán, Yanet Antayhua, Daniel Vega y Eduardo Ismael, por su intensa colaboración en los trabajos de campo realizados para el desarrollo del presente estudio. A mis compañeros del Instituto de Ingeniería e Instituto de Geofísica (Hugo, Arturo, Omar, Antonio, Moisés, Benjamín, Ricardo, Hortencia, Angélica, Tair, Laurita...) con quienes compartí muchas experiencias académicas y quienes siempre me recomendaron las mejores fuentes, tanto para mi investigación como para mi vida cotidiana. Os recordare por siempre. Gracias también a Araceli Cháman, Monica Salgado y Teresa Becerril.

A ti, por todo...

Al Instituto Geofísico del Perú, en donde me inicié en el campo de la sismología, por haberme apoyado para poder iniciar mis estudios de maestría en México.

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.

A todos los que contribuyeron a la materialización de mi meta académica, los recordaré con gratitud y llevo orgullosa el mensaje que aprendí en el alma mater de los alumnos “POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”.

## INDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	3
I.1.-Objetivos.....	5
I.2.-Alcances.....	5
I.3.-Desarrollo de la tesis.....	5
CAPÍTULO II. TECTÓNICA Y SISMICIDAD DEL ESTADO DE TLAXCALA.....	7
II.1. Ubicación del área de estudio.....	7
II.2. Tectónica regional y local de la zona de estudio.....	8
II.3. Características de la sismicidad.....	9
II.4. Análisis de la sismicidad cortical en el estado de Tlaxcala (1984-2004)...	17
II.4.1. Base de datos.....	17
II.4.2. Análisis de la sismicidad local.....	27
II.5. Zonificación del estado de Tlaxcala en función de la sismicidad y Tectónica.....	35
CAPÍTULO III. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE TLAXCALA...	38
III.1. Delimitación de áreas .....	38
III.1.1. Zona de estudio.....	38
III.1.2. Aspectos geológicos y geomorfológicos.....	39
III.1.3. Aspectos hidrológicos.....	40
III.1.4. Aspectos geotécnicos.....	41
III.1.5. Distribución de las áreas .....	45
III.2. Aproximación experimental del efecto de sitio.....	47
III.2.1. Adquisición de datos.....	48
III.2.2. Estimación de la respuesta dinámica.....	54
III.2.3. Mapa de isoperiodos .....	58
III.3. Validación del efecto de sitio .....	62
III.3.1. El método SPAC.....	62
III.3.1.1. Trabajo de campo y procesamiento de datos.....	64
III.3.2. Aplicación del método unidimensional.....	70
III.4. Microzonificación sísmica .....	73

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	75
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
<i>ANEXO 1. Recortes de periódicos e informes, donde indican los daños causados por sismos en el estado de Tlaxcala. ....</i>	<i>91</i>
<i>ANEXO 2. Funciones de transferencia empíricas (FTE), obtenidas a partir de registros de microtemores y aplicando la técnica de Nakamura. ...</i>	<i>96</i>

## RESUMEN

Aún cuando el Estado de Tlaxcala carece de una red sísmica local y no tiene ninguna estación sísmica de las redes regionales actuales, se ha recopilado la información sísmica local para el periodo 1984 y 2004. Esta base de datos consta de 45 sismos locales provenientes de las redes sísmicas regionales del Sistema de Información Sismotelemétrica de México (SISMEX), Red Sísmica del Valle de México (RSVM), Servicio Sismológico Nacional (SSN) y la Red Sísmica Temporal del Estado de Puebla (RESEP), y es utilizada para evaluar las características de la sismicidad local del estado de Tlaxcala. La distribución espacial de la sismicidad ha permitido identificar la presencia de importantes fuentes sismogénicas locales asociadas a trazas de fallas y lineamientos que cruzan al estado de Tlaxcala, principalmente en dirección NE-SO y E-O, siendo parte del Graben de Puebla. Estas características sismotectónicas, permitieron realizar una zonificación sísmica, que consta de una zona de mayor (I), media (II) y menor (III) sismicidad. La Zona I, la de mayor sismicidad y por ende de mayor peligrosidad, abarca las ciudades con mayor densidad poblacional como Tlaxcala (capital del estado), Santa Ana Chiautempan, Contla, Apizaco y Huamantla. De acuerdo a los resultados obtenidos, es necesario enfatizar el peligro que representan el extremo norte del Graben de Puebla que abarca la zona central y sur de este estado; lo que hace necesario la instalación de una red sísmica local a fin de detectar microsismicidad que permita definir con mayor precisión la geometría de este graben activo.

Asimismo, se realizó una aproximación experimental de los efectos de sitio para la ciudad de Tlaxcala, para lo cual se evaluó de manera local las características geológicas, hidrológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la ciudad. A partir de estas consideraciones se delimitaron tres áreas con grandes probabilidades de tener efectos de sitio. Estas áreas fueron evaluadas utilizando registros de microtemores en 69 puntos utilizando la técnica de Nakamura. Los resultados obtenidos fueron validados aplicando el método unidimensional (método de Haskell) y así, determinar el comportamiento dinámico para dichas áreas. Se ha logrado identificar las zonas más inestables en donde se estimaron amplificaciones relativas de hasta 4 veces para una banda de frecuencias entre 1 y 5 Hz en la parte central del extremo norte de la ciudad, y entre 3 y 10 Hz en la parte colonial y a lo largo del río Zahuapan. Asimismo, en el extremo sur de esta ciudad cerca de la laguna de Acuitlapilco, el rango de frecuencias es entre 3 y 10 Hz.

La distribución de los periodos dominantes en la ciudad de Tlaxcala, ha permitido realizar su microzonificación sísmica. Se ha identificado la presencia de 3 microzonas: la microzona I con periodos entre 0.3 a 0.8 segundos, la microzona II, con periodos entre 0.1 a 0.3 segundos y la microzona III sin efectos de sitio. De acuerdo a estos resultados, la microzona II presentaría mayor vulnerabilidad por la posibilidad de que coincidan los modos de vibrar del suelo con el de las edificaciones.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La tectónica activa del territorio mexicano y por ende del estado de Tlaxcala, es el resultado del proceso de subducción entre las placas de Cocos y Rivera (oceánicas) bajo la Norteamericana (continental), puesta en evidencia por la compleja morfología de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). Este proceso da origen a la principal fuente sísmogénica presente en México, la misma que produce de manera frecuente sismos con magnitudes  $M > 7.0$  y que muchas veces produjeron en el Estado de Tlaxcala intensidades del orden de V MM (Mercalli Modificada) ubicado aproximadamente a 400 km de distancia desde la línea de costa, tal como ocurrió con el sismo del 19/09/1985 (8.1 Mw). Del mismo modo, existen fuentes sísmogénicas secundarias asociadas a la deformación interna de la placa subducida por debajo del continente y a las deformaciones corticales presentes en la corteza continental.

La historia sísmica regional del estado de Tlaxcala, muestra el registro de múltiples evidencias, de cómo, los sismos han provocado pérdidas materiales y humanas. Regionalmente, uno de los sismos más destructivos es el sismo de Serdán (Puebla) ocurrido el 28 de agosto de 1973 (7.0 Mw) a 120 km del estado de Tlaxcala, causando en éste daños importantes en los muros de las viviendas, edificaciones coloniales e iglesias. Sobre la sismicidad local no se tiene mayor información; sin embargo, se debe tener en cuenta que al ocurrir estos sismos a profundidades muy someras podrían producir localmente grandes daños similares a los provocados por los sismos regionales en las diferentes ciudades de este estado. Por lo tanto se hace necesario tomar medidas preventivas para minimizar dichos daños considerando como primer paso la realización de una zonificación sísmica.

Otra de las herramientas importantes para minimizar los daños producidos por sismos, es realizar estudios de microzonificación sísmica para las diferentes ciudades, permitiendo así contar con parámetros útiles que ayuden en la toma de decisiones para la construcción de viviendas con estructuras más seguras sobre suelos geológicamente más inestables, teniendo como punto final, la elaboración de un actual y completo reglamento de construcción. Cabe indicar que para ninguna de las ciudades del estado de Tlaxcala se ha realizado un estudio de este tipo. La finalidad de la microzonificación sísmica es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos; teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias muy cortas y áreas pequeñas, lo que ha llevado a pensar que el factor esencial para la evaluación del daño en las estructuras son las condiciones del subsuelo local; es decir, efectos de sitio.

Una de las técnicas más populares para realizar una aproximación 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). Con respecto a la estación de referencia, no siempre las zonas rocosas son buenos sitios de referencia por presentar efectos de sitio topográficos (Chávez-García et al., 1996). Por otra parte, esta técnica presenta otro problema en zonas urbanas, que es debido al alto nivel de ruido ambiental provocado principalmente por tráfico vehicular, lo que limita el período de observación a horas en que el ruido disminuye (por ejemplo la madrugada).

Para salvar estos problemas, recientemente se ha introducido la técnica de Nakamura (1989) para interpretar registros de microtremores (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 microtremores 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 microtremores son: la frecuencia predominante o periodo dominante ( $T_0$ ) y la amplificación relativa ( $A_r$ ) del suelo. 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 microtremores contra la razón espectral estándar obtenido con registros de sismos, concluyendo que los microtremores, cuando son analizados con REHV permiten la determinación, con buena precisión, del período dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 5 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación ( $A_r$ ).

Hasta el momento, el estado de Tlaxcala no cuenta con un estudio de zonificación sísmica, por tanto, no se tiene idea de la peligrosidad al cual son sometidas las diferentes regiones de este estado. Tampoco se cuenta con ningún estudio de microzonificación sísmica para ninguna ciudad que componen este estado; por tanto, no se tiene idea de las zonas más vulnerables ante un sismo. En este estudio se pretende realizar un mapa de zonificación sísmica para este estado y además realizar un mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala, ya que esta ciudad es la capital del estado y de acuerdo con datos del XII Censo General de Población y Vivienda, 2000 (INEGI), su población es de 73 230 habitantes, lo que representa el 7.6 por ciento de la población total del estado (962 646 habitantes). Es importante señalar que es la ciudad más grande de la entidad, ocupando el primer lugar en población, superando a las ciudades de Apizaco con 67 675 habitantes, Huamantla con 66 561 habitantes y Chiautempan con 57 512 habitantes. Además esta ciudad, es el centro de economía del estado y en ella se edificaron un gran número de construcciones coloniales. El presente estudio brinda las herramientas necesarias para tomar medidas preventivas las cuales podrían ser mejoradas con mayor información.

## **I.1. Objetivos**

El objetivo central de la presente tesis es realizar una Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala y para su desarrollo se ha considerado los siguientes puntos:

1. Construir una base de datos sísmicos homogéneos y locales, para el estado de Tlaxcala (1984-2004).
2. Utilizando esta base de datos, correlacionar la sismicidad con la tectónica de la región y proponer una zonificación sísmica de este estado.
3. Delimitación de áreas a partir de la geología, hidrogeología, geomorfología, geotecnia y demografía para la ciudad de Tlaxcala.
4. Estimar el comportamiento dinámico de estas áreas aplicando la técnica de Nakamura y validar estos resultados con el método unidimensional.
- 5.- Elaborar el mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala.

## **I. 2. Alcances**

Los alcances de este estudio son:

*Definir* las zonas sismogénicas a partir del estudio de la sismicidad local y de la tectónica activa del Estado de Tlaxcala para elaborar un mapa de zonificación sísmica.

*Presentar* el mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala haciendo uso de registros de microtemores y aplicando la técnica de Nakamura, cuyos resultados son validados con el método unidimensional.

## **I.3. Desarrollo de la Tesis**

Esta tesis consta de 5 capítulos distribuidos de la siguiente manera:

En el capítulo I, se realiza la introducción del tema a desarrollar, los objetivos y alcances que se pretende llegar en el estudio.

En el capítulo II, se evalúa la sismicidad, la tectónica regional y local del estado de Tlaxcala. Se analiza y discute las características de la sismicidad local ocurrida entre los años 1984 y 2004, la misma que proviene de la base datos del catálogo SISMEX y RESEP. A partir de estos resultados se propone un mapa de zonificación sísmica para el estado de Tlaxcala.

En el capítulo III, se realiza la microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala a partir del análisis y evaluación de: a) la geología, geomorfología, hidrogeología y geotecnia local; b) estimación del efecto de sitio a partir de la respuesta dinámica del suelo utilizada para elaborar el mapa de isoperiodos; c) validación del efecto de sitio a partir del método unidimensional.

En el capítulo IV, se realiza la discusión de los resultados obtenidos en este estudio.

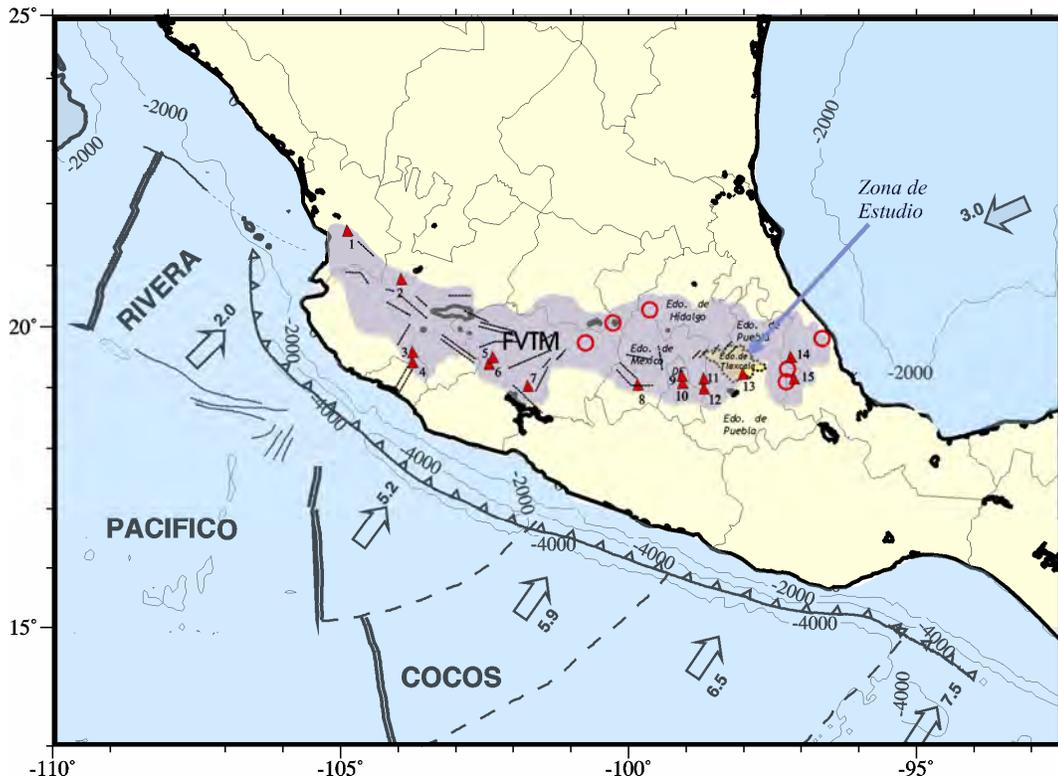
En el capítulo V, se indica las conclusiones que se ha llegado al terminar este estudio.

## CAPÍTULO II

### TECTÓNICA Y SISMICIDAD DEL ESTADO DE TLAXCALA

#### II.1. Ubicación del área de estudio

El estado de Tlaxcala se ubica en la parte central de la República Mexicana entre las coordenadas 19°44'N a 19°05'N y 97°37'O a 98°43'O (Figura 1). Este estado representa el 0.2% de la superficie de la República Mexicana, colindando al Norte con Hidalgo y Puebla; al Este y Sur con Puebla; al Oeste con Puebla, México e Hidalgo (INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2000). La población total es de 962,646 habitantes, encontrándose aproximadamente el 7.6% de ellos en la ciudad de Tlaxcala, capital de este estado.



**Figura 1.** Tectónica regional y ubicación de la zona de estudio delimitada por una línea discontinua. Las flechas indican la dirección de desplazamiento de las placas con su respectiva velocidad (cm./año). La zona sombreada, delimita la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). Los triángulos indican la distribución de los principales volcanes (1. Sanganguey, 2. Tequila, 3. Nevado de Colima, 4. Volcán de Colima, 5. Parícutín, 6. Tancítaro, 7. Jorullo, 8. Nevado de Toluca, 9. Xitle, 10. Ajusco, 11. Iztaccihuatl, 12. Popocatepetl, 13. La Malinche, 14. Cofre de Perote y 15. Pico de Orizaba) y los círculos las calderas. Las líneas delgadas discontinuas corresponden a los principales sistemas de fallas.

## II.2. Tectónica regional y local de la zona de estudio

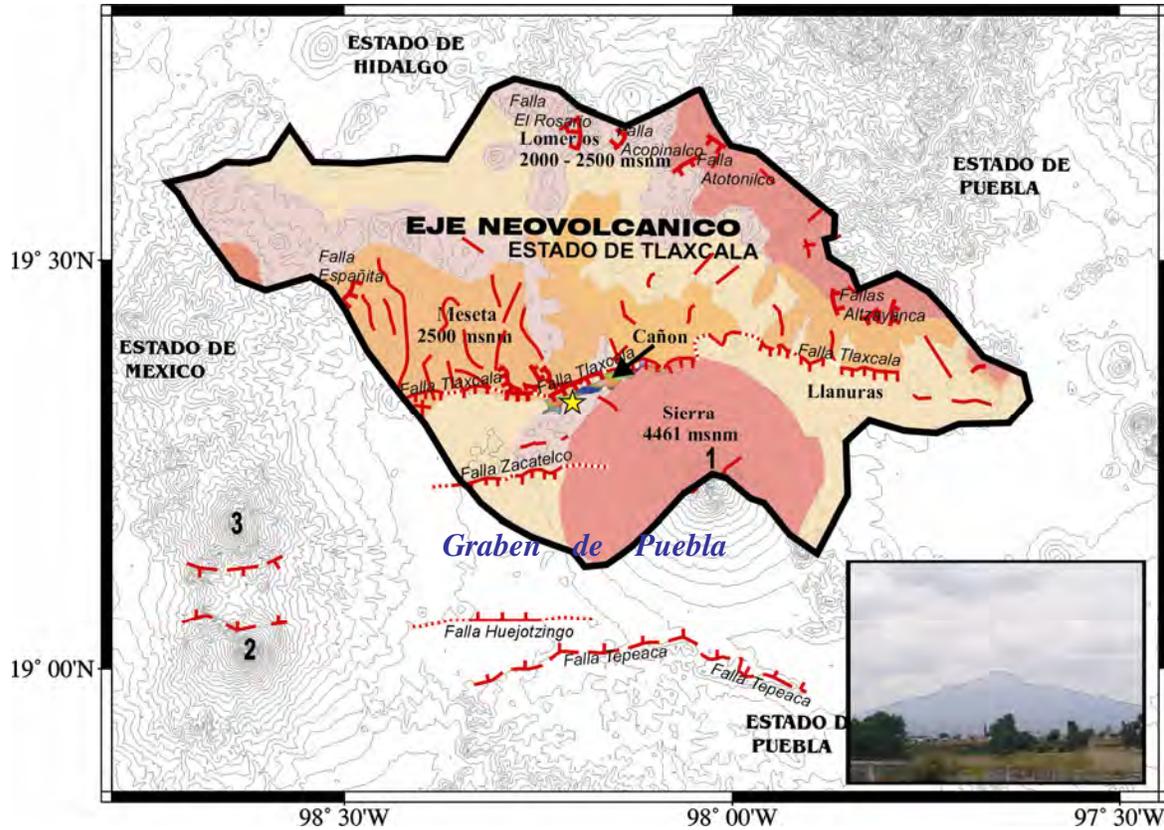
Desde el *punto de vista regional*, el estado de Tlaxcala (ET) es parte de la provincia tectónica de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) que recorre el territorio mexicano de Oeste a Este sobre la latitud de 20°N; como tal, se caracteriza por la presencia de diversos volcanes activos con alturas del orden de 5,000 metros sobre el nivel del mar, tales como los volcanes de Sanganguey, Tequila, Nevado de Colima, Volcán de Colima, Parícutín, Tancítaro, Jorullo, Nevado de Toluca, Xitle, Ajusco, Iztaccihuatl, Popocatepetl, La Malinche, Cofre de Perote y el Pico de Orizaba (Figura 1). De todos estos volcanes, La Malinche se ubica en el extremo sur del estado de Tlaxcala. En general, toda esta región de la FVTM se encontraría en un proceso de emersión evidenciado por la presencia de esfuerzos extensionales (Suter, 1991; García-Palomo, 2002); los mismos, que generan sistemas estructurales complejos que habrían dado lugar a la formación de fosas y pilares que dieron forma a valles escalonados hacia el centro de la FVTM. Muchos de estos valles se encuentran a alturas considerables como los existentes en los estados de Toluca y Tlaxcala con alturas de 2,100 metros sobre el nivel del mar (Mooser y Ramírez, 1988).

A nivel regional, la FVTM ha sido dividida en tres grandes sectores con características volcánicas y estructurales diferentes (García-Palomo, 2002): sector occidental, central y oriental. El primero está caracterizado por la presencia de un punto triple formado por las fosas tectónicas de Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala (Luhr et al. 1985). El sector central está constituido principalmente por vulcanismo de tipo monogenético del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. El sector oriental es caracterizado por la presencia de grandes estratovolcanes como la Sierra Nevada y el volcán La Malinche. El estado de Tlaxcala se ubica en el extremo sur del sector oriental de la FVTM.

Desde el *punto de vista local*, se sabe que hace 35 millones de años aproximadamente la zona de Tlaxcala habría presentado un alto índice de deformación asociada directamente a la presencia de la FVTM, razón por lo cual, en la actualidad el territorio tlaxcalteca es bastante accidentado (Werner, 1993) y en donde sobresale la presencia del volcán La Malinche (4461 metros sobre el nivel del mar), así como de mesetas, lomeríos, llanuras y un cañón (INEGI, 2000), tal como se observa en la Figura 2. Asimismo, en el área de estudio existen importantes plegamientos que se orientan predominantemente en dirección O a E, depresiones, fallas, dislocaciones y otros, que continúan desarrollándose con la consiguiente inestabilidad manifestada con la ocurrencia de sismos de magnitud moderada y pequeña.

Entre los principales sistemas de fallas que existe en el ET, son la Falla Tlaxcala y Zacatelco que se localizan en el centro y sur de este estado, ambas de tipo normal, con buzamientos hacia el sur y orientaciones en dirección E-O, tal como se muestra en el mapa de la Figura 2. En esta figura se observa que la Falla Tlaxcala cruza al ET, delimitando el extremo norte del Graben de Puebla. La falla de Zacatelco sugiere la forma escalonada de este graben, similar a lo que se observa en su extremo sur delimitado por las fallas de Huejotzingo y Tepeaca (estado de Puebla), ambas de tipo normal con buzamiento hacia el norte y orientadas en dirección E-O. Otras fallas menores en longitud son El Rosario, Acopinalco, Atotonilco, Altzayanca y Española, todas con diversas orientaciones y localizadas en mayor número en el extremo Norte de este estado (INEGI, 2000; IEPCT: Instituto Estatal de

Protección Civil de Tlaxcala, 2003; Santoyo et al., 2005 y García-Palomo, comunicación personal). Asimismo, en el estado se observa la presencia de un gran número de lineamientos con diversas orientaciones y longitudes.

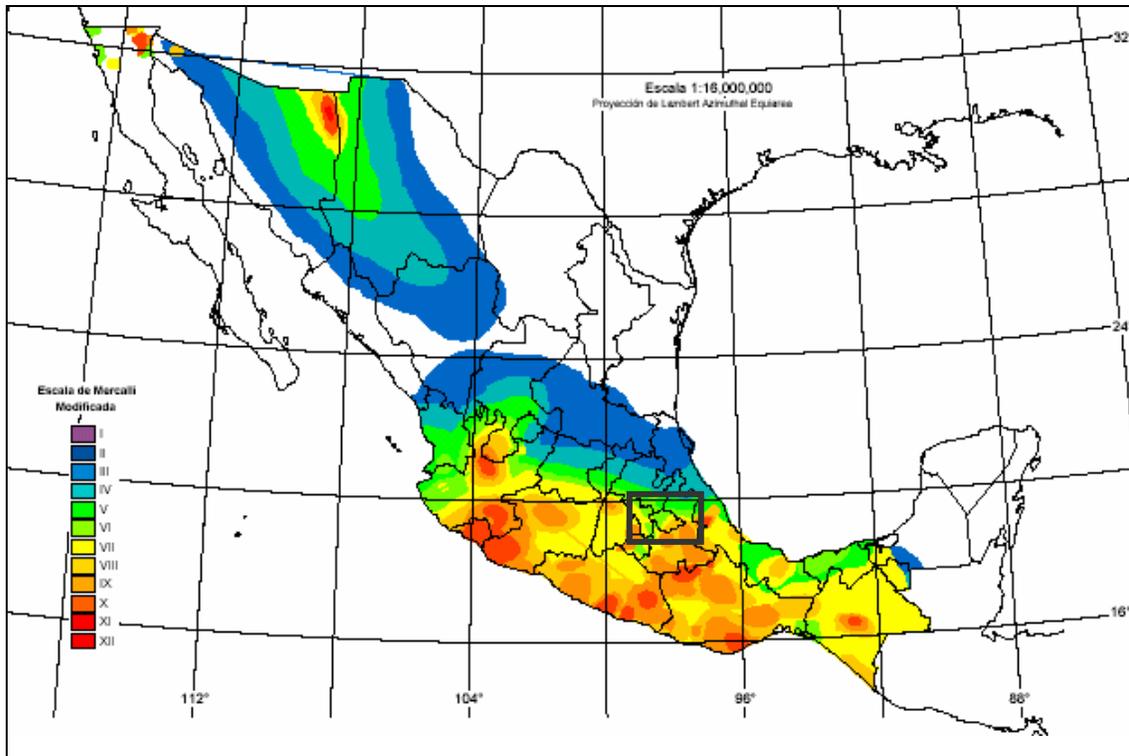


**Figura 2.** Mapa geomorfológico y de tectónica local para el estado de Tlaxcala. La estrella indica la ubicación de la ciudad de Tlaxcala (capital de este estado) y los números 1, 2 y 3 la ubicación de los volcanes La Malinche, Popocatepetl y Iztaccihuatl respectivamente. Las líneas rojas representan a fallas y lineamientos. En el extremo inferior derecho de la figura, se muestra una foto del volcán La Malinche.

### II.3. Características de la sismicidad

La sismicidad que ocurre en la República Mexicana tiene su origen en el proceso de convergencia entre las placas de Cocos y Norteamérica, dando lugar a una importante deformación continental que tuvo como principal resultado la formación de la FVTM e importantes procesos tectónicos de tipo superficial caracterizada por la presencia de fallas de diversas longitudes. Los sismos de mayor magnitud y en mayor número se presentan frente al borde occidental de la placa Norteamericana, muchos de ellos produjeron daños y destrucción en diversas ciudades. Sismos en menor magnitud y número ocurren en el interior del continente, pero al igual que los primeros pueden producir daños y destrucción de diferente grado. A fin de cuantificar la potencialidad de los daños producidos por los grandes sismos

ocurridos en la República Mexicana, Gutiérrez et al., (1991) realizó un trabajo recopilatorio de los mapas de intensidades de 49 grandes sismos ocurridos entre 1845 y 1985 llegando a proponer un mapa de intensidad (MM) para esta República (Figura 3). Según dicha zonificación, el estado de Tlaxcala se encontraría ubicado en una zona (indicado por un recuadro negro) en donde los grandes sismos producen intensidades del orden de VI-VIII MM, lo que sugiere que dicho estado se encuentra en una área de gran vulnerabilidad sísmica, referido a niveles de alta intensidad.

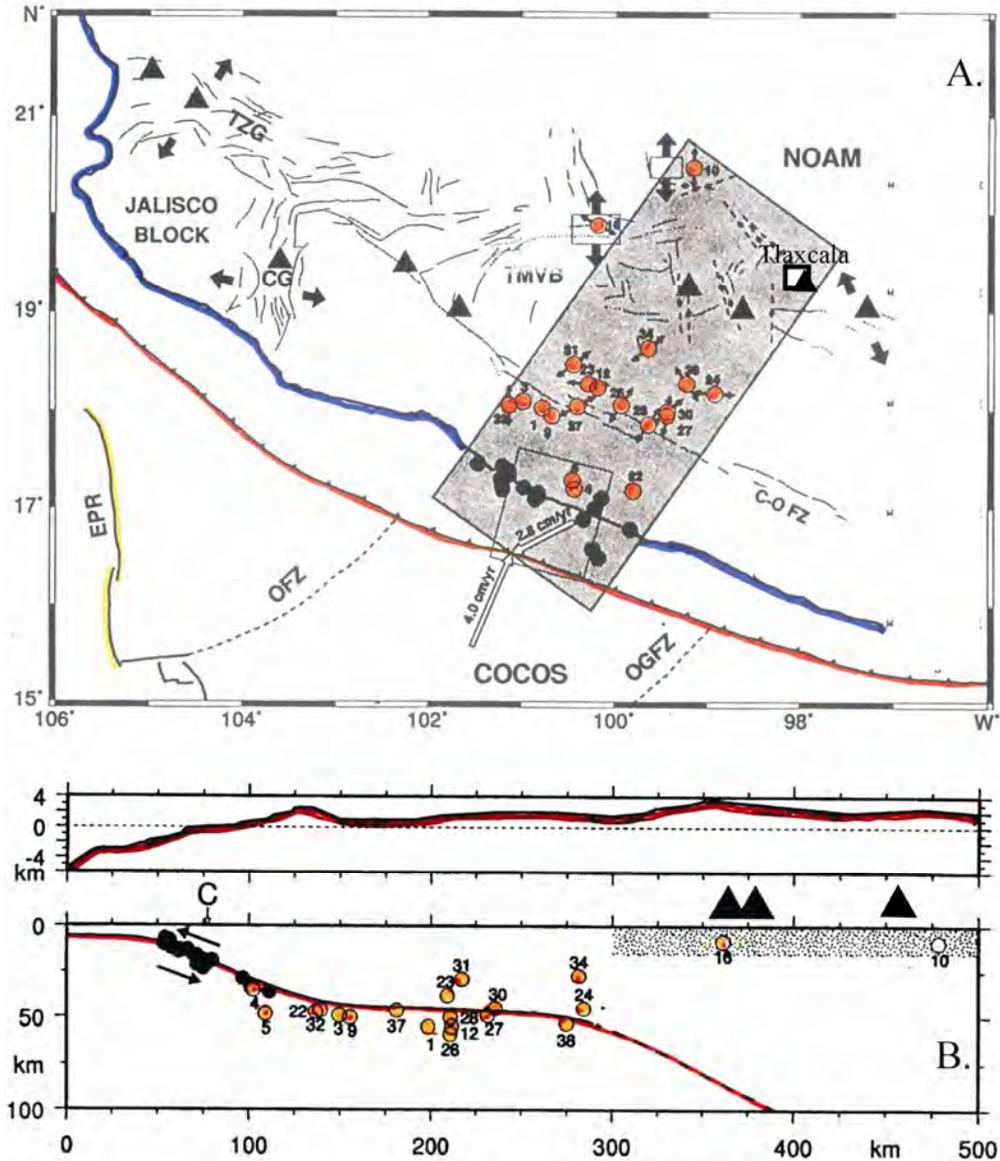


**Figura 3.** Mapa de intensidades para la República Mexicana, propuesto por Gutiérrez (1991). El recuadro encierra al estado de Tlaxcala.

En general, la sismicidad que afecta al estado de Tlaxcala tiene su origen en las siguientes tres fuentes sismogénicas:

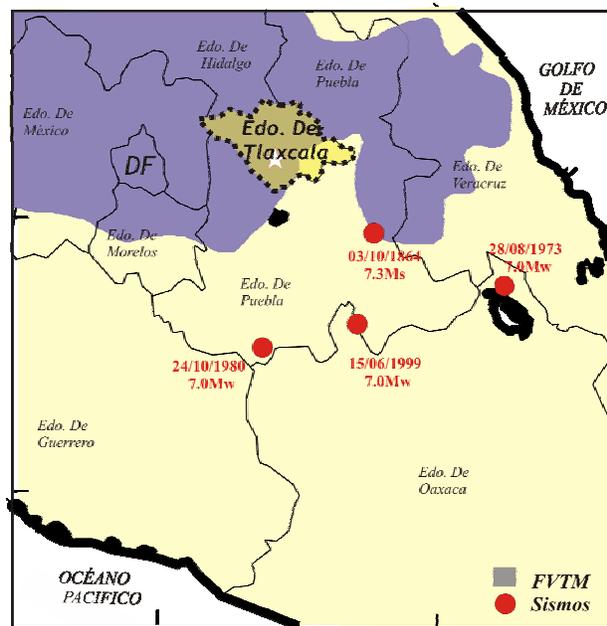
- i) La primera fuente sismogénica, considera a los sismos que se producen como resultado del proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, distribuyéndose entre la fosa y la línea de costa con profundidades que no sobrepasan los 50 km, tal como se muestra en la Figura 4 (tomada de Singh y Pardo, 1993). Esta sismicidad corresponde a la ocurrida entre 1964-1990 ( $m_b > 4.5$ ) (círculos en negro) y se distribuye en superficie paralela a la línea de costa y en profundidad se distribuye siguiendo un alineamiento inclinado con un ángulo aproximado de 30 grados y que permite configurar la forma de la placa de Cocos al inicio del proceso de subducción. En el pasado esta fuente sismogénica, ha dado origen a sismos importantes con magnitudes mayores de 7 grados, que han

producido intensidades del orden de V-VI en el estado de Tlaxcala (Fuente: Servicio Sismológico Nacional, UNAM), tal como ocurrió con el sismo del 19/09/1985 (8.1 Mw). Este sismo ocurrió en la costa de Michoacán a más de 400 km del estado de Tlaxcala; sin embargo, causó alarma entre los pobladores de las diferentes ciudades de este estado, además de daños leves en viviendas y estructuras importantes (IEPCT, comunicación personal). El mecanismo de ruptura de este sismo, indica haberse producido por una deformación de tipo compresional (Singh et al., 1988).



**Figura 4.** A) Distribución de la sismicidad en la región Sur de México para el periodo 1964-1990 ( $m_b > 4.5$ ). Las líneas indican lineamientos y fallas. B) Corte en profundidad según el área sombreada en (A), la línea sobre los sismos sigue la forma de la placa de Cocos debajo del territorio Mexicano. Los triángulos representan a los volcanes. Figura modificada de Singh y Pardo (1993).

- ii) La *segunda fuente sismogénica* considera a los sismos producidos por la deformación interna de la placa subducente u oceánica. En superficie estos sismos se ubican entre la línea de costa y el inicio de la FVTM y ocurren a profundidades del orden de 50-70 km, todos se distribuyen sobre una superficie plana que configura la placa de Cocos (círculos en rojo en la Figura 4). Estos sismos son menos frecuentes en comparación con los que se producen en la primera fuente. En la Figura 5 y Tabla 1, se presenta a los sismos históricos de los cuales se tiene información que causaron grandes daños en el estado de Tlaxcala, tanto en estructuras de viviendas y edificios públicos (*ver* Anexo 1), además de pánico generalizado en la población ya que produjeron intensidades del orden de VI-VIII (MM). Los cuatro sismos de la Tabla 1, presentan sus epicentros al sur del Estado de Tlaxcala a distancias de 90 a 200 km, con magnitudes mayores o iguales a 7.0 Mw y focos a profundidades entre 60 y 80 km. El mecanismo focal de estos sismos indican que obedecen a una deformación de tipo extensional, propios del tipo de deformación que soporta la placa de Cocos a profundidades mayores de 50 km dentro de todo el proceso de subducción (Singh and Wyss, 1976; Yamamoto et al. 1984; Singh et al. 1999; Gutiérrez, 1999).



**Figura 5.** Distribución espacial de los sismos más sobresalientes que causaron grandes daños en el estado de Tlaxcala (adaptado de Singh et al., 1999).

Así por ejemplo, el sismo ocurrido el 3 de octubre de 1864 (7.3 Ms), históricamente el más antiguo para el cual se tiene información confiable, habría afectado a las ciudades y localidades ubicadas en gran parte del trayecto comprendido entre Puebla-Tlaxcala-Veracruz (Fuente: El Monitor Republicano; Quinta Época, Año XXIX), pero no se tiene información detallada de los daños

producidos en la ciudad de Tlaxcala probablemente debido a que en los estados de Puebla y Veracruz existía una mayor densidad poblacional y un mayor número de edificaciones en dicho año. Según las Figuras 5 y 6a, el epicentro del sismo se encontraría ubicado a aproximadamente 60 km en dirección SE de la ciudad de Tlaxcala y en donde las intensidades máximas habrían sido del orden de VIII MM (Figuroa, 1963).

**Tabla 1.** Sismos históricos que afectaron al estado de Tlaxcala

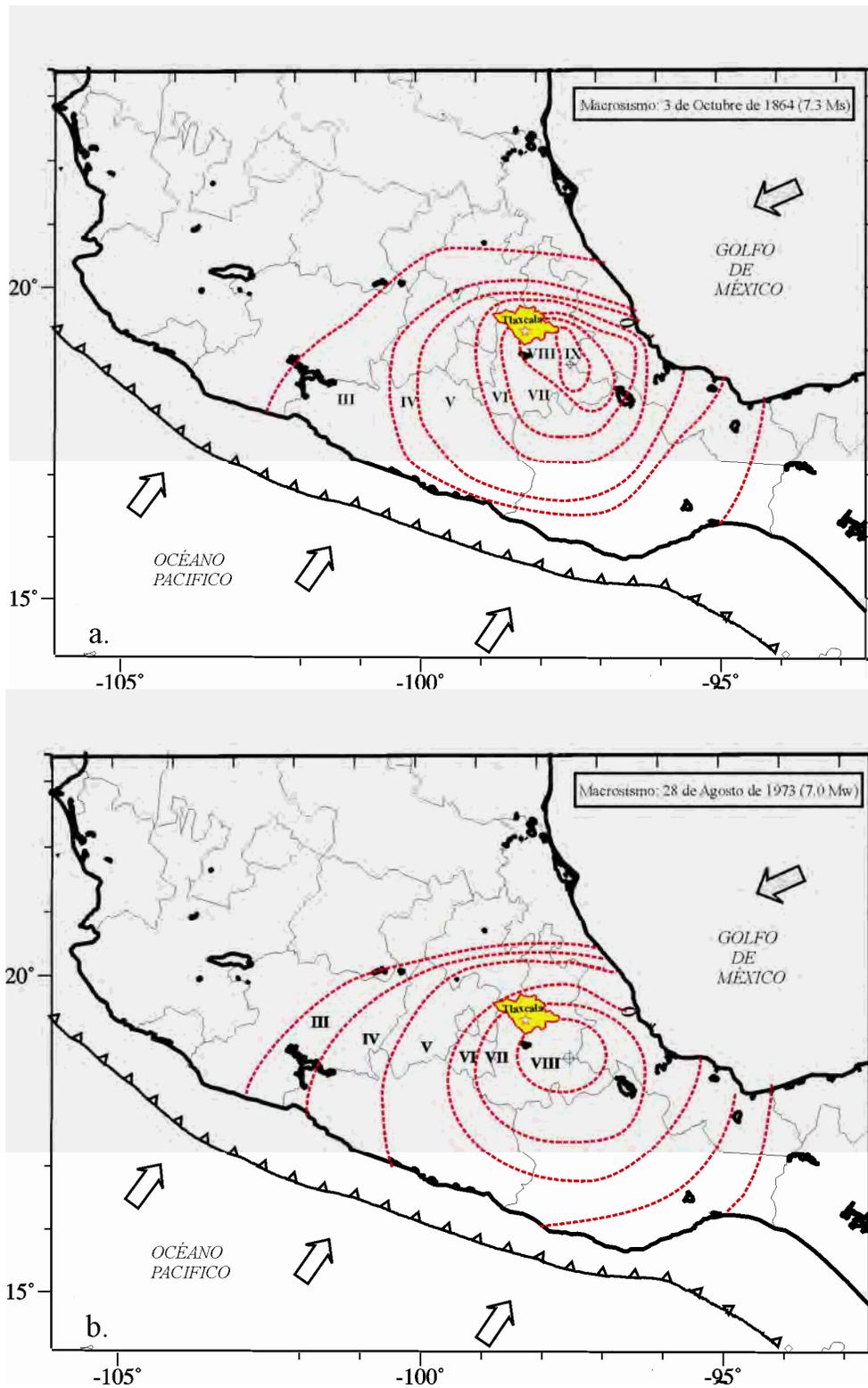
Evento	Fecha Año/mes/día	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Magnitud (M)
1	1864-10-03	18.81°	-97.46°	60.0	7.3Ms
2	1973-08-28	18.30°	-96.53°	82.0	7.0Mw
3	1980-10-24	18.03°	-98.27°	65.0	7.0 Mw
4	1999-06-15	18.15°	-97.52°	60.0	7.0Mw

Los sismos del 28 de agosto de 1973 (7.0 Mw) y 24 de octubre 1980 (7.0 Mw) conocidos como el de Serdán y Huajuapán de León respectivamente, presentaron sus epicentros a distancias aproximadas de 90 y 130 km en dirección SE y SO de la ciudad de Tlaxcala. Según Figuroa (1974), el sismo de Serdán produjo en la ciudad de Tlaxcala daños importantes en los muros de las viviendas, edificaciones coloniales e iglesias. Asimismo, indica que se produjeron derrumbes en la carretera que une Tlaxcala con Apizaco, además de interrumpirse los servicios de energía eléctrica y teléfonos. Según el mapa de intensidades de la Figura 6b (Figuroa, 1974), en un radio de 230 km alrededor del epicentro la intensidad máxima fue de VII-VIII MM y considera a las ciudades de Jalapa, Puebla y Tlaxcala, además de otros poblados ubicados en las cercanías (Anexo 1). El sismo de Huajuapán de León fue sentido en la ciudad de Tlaxcala con una intensidad de VI MM (Figura 6c) y produjo daños en construcciones de adobe (grietas en uno o varios muros), en algunas estructuras coloniales como los portales del zócalo y daños leves en edificios públicos, además de causar pánico en la población (Yamamoto et al. 1984; Gutiérrez, 1999). Una mayor descripción de los daños producidos por ambos sismos en Tlaxcala, se puede encontrar en el Anexo 1.

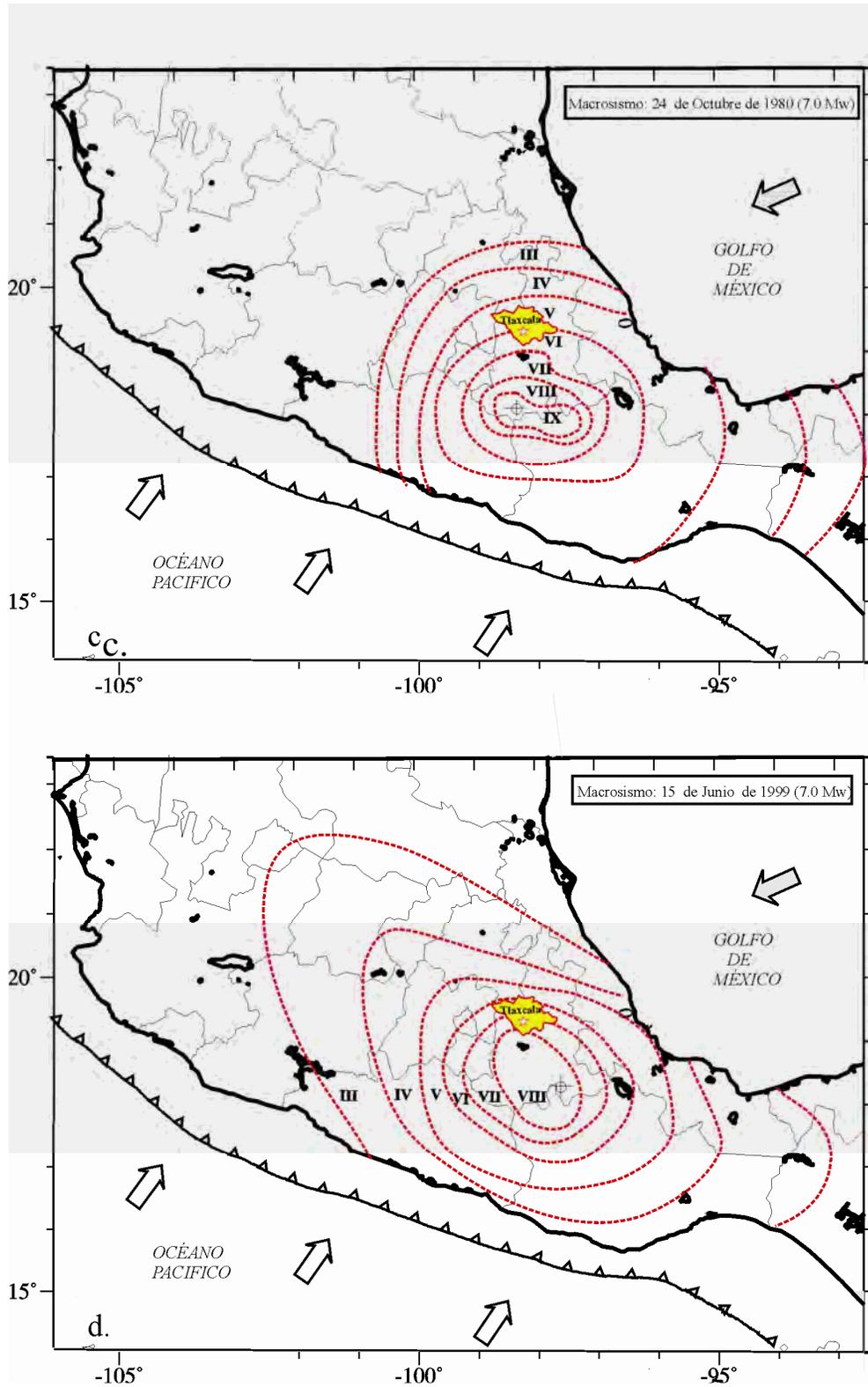
Otro sismo importante y reciente que causó daños en el estado de Tlaxcala fue el de Tehuacán ocurrido el 15 de Junio de 1999 (7.0 Mw), con epicentro a 120 km al Sur del volcán La Malinche (Singh et al., 1999). En la Figura 6d, se presenta su mapa de intensidades y en el se observa que el sismo produjo en el estado de Tlaxcala intensidades de VI-VII MM (Gutiérrez, 1999). Produciendo daños en paredes y muros en algunas edificaciones de Tlaxcala. Los mayores daños se produjeron en la Basílica de Ocotlán y en la parroquia de San José, ambas consideradas como las principales edificaciones de este estado, tanto por su arquitectura como por su historia (IEPCT). Por otro lado, el sismo provocó daños en aproximadamente 20 escuelas distribuidas en todo el estado. También se informó sobre la ocurrencia de desgajamientos importantes de tierra en el volcán La Malinche y en el cerro de Xocchitecatitla. Según Ramírez y Taboada (2000) y el IEPCT (información verbal), el sismo causó licuefacción en las partes altas de la ciudad de Tlaxcala llegándose a observar en los campos de cultivo de maíz la

presencia de volcanes de arena de diversos tamaños. En general, en la ciudad de Tlaxcala se informó de la existencia de 70 personas con lesiones menores. Una mayor descripción de los daños fue dada por el diario “El Sol de Tlaxcala” y puede ser consultado en el Anexo 1.

- iii) La *tercera fuente sismogénica* la constituye los sismos con origen en la deformación cortical propiamente dicha; y en el estado de Tlaxcala es puesta en evidencia con la presencia de importantes fallas de diversas longitudes, tal como se ha mostrado en la Figura 2. En general, los sismos que ocurren en esta fuente son menor en número y magnitudes respecto a sismos generados por otras fuentes, por lo tanto, no alarman a la población Tlaxcalteca. Debido a la existencia de fallas dentro del estado, es posible que ocurra un mayor número de sismos, pero por sus magnitudes pequeñas no son registrados por las estaciones sísmicas regionales (ubicadas fuera del estado de Tlaxcala); por lo tanto, es posible que la sismicidad que se conoce no sea representativa del real potencial sísmico de la región.



**Figura 6.** Mapa de isosistas en la escala de Mercalli Modificada para diversos sismos que causaron daños en diferentes ciudades del estado de Tlaxcala. a. Sismo de 1864 (Figuroa, 1963). b. Sismo de 1973 (Figuroa, 1974).



**Figura 6.** Continuación. c. Sismo de 1980 (Gutiérrez, 1999). d. Sismo de 1999 (Singh et al., 1999).

A continuación se realizará el análisis de la sismicidad asociada a la deformación cortical o sismicidad local presente en el estado de Tlaxcala.

#### **II.4. Análisis de la sismicidad cortical en el estado de Tlaxcala (1984-2004)**

Ante la ausencia de una red sísmica local y a la falta de una base de datos adecuada, a la fecha no ha sido posible estudiar en detalle las características sismotectónicas locales del estado de Tlaxcala; sin embargo, los efectos causados por grandes sismos regionales y la presencia de fallas, muestran la necesidad de evaluar y analizar la sismicidad local de dicho estado. A la falta de esta información, no existe una adecuada zonificación sísmica para el estado de Tlaxcala y por tal razón, en este estudio con la información obtenida de redes sísmicas regionales se organiza y evalúa una base de datos sísmicos de origen local para identificar la presencia de fuentes sismogénicas ubicadas dentro de este estado como un intento de proponer una zonificación sísmica.

##### **II.4.1. Base de datos**

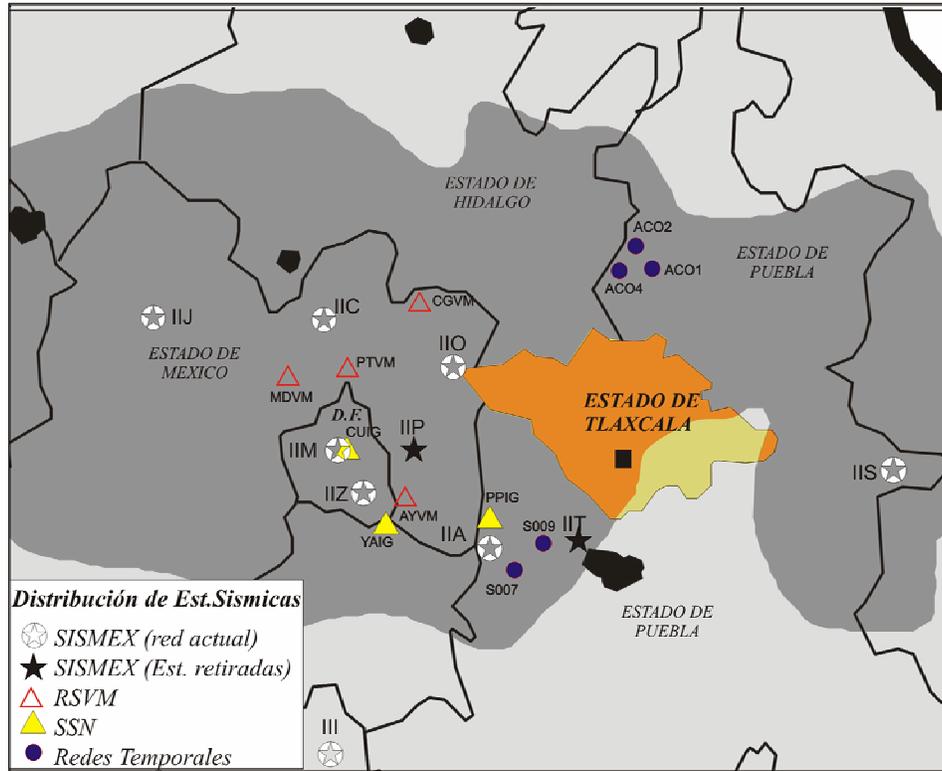
Para realizar cualquier estudio de sismicidad local, es importante contar con una base de datos sísmicos homogénea; es decir, de ser posible obtenida en las mismas condiciones y procedimientos. Para construir una base de datos totalmente local se ha procedido a compilar datos sísmicos para el periodo 1984 y 2004 utilizando la información contenida en los Catálogos del Sistema de Información Sismotelemétrica de México (SISMEX), Servicio Sismológico Nacional (SSN) y de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM).

En la Figura 7 se presenta la ubicación de las estaciones que integran todas las redes sísmicas antes mencionadas. La red sísmica del SSN operó sin interrupción desde 1910 a la fecha, sumándose a esta red la estación de CUIG de banda ancha que operó desde el año 1991 y posteriormente las estaciones PPIG y YAIG (estaciones de banda ancha ubicadas próximas a la zona de estudio). La red del SISMEX operó sin interrupción desde 1973 con diez estaciones de periodo corto hasta 1993, de las cuales IIO, IIT e IIS encierran a la zona de estudio. En 1993 dejaron de funcionar las estaciones IIT e IIP, y de las ocho estaciones restantes se comenzó a recibir señales digitales dando mayor importancia a los sismos locales. La red del RSVM comenzó a operar sin interrupción desde 1996, con estaciones de periodo corto.

En general, en la Figura 7 se observa que el mayor número de estaciones sísmicas se ubican en el extremo oeste del estado Tlaxcala y solamente una estación de la red SISMEX se encuentra operando en su extremo este. Obviamente, la distribución espacial de las estaciones de cada red no permite conocer de manera correcta los parámetros hipocentrales de los sismos locales. Del mismo modo, las estaciones instaladas de manera temporal en los extremos norte y sur del estado de Tlaxcala, permiten mejorar la cobertura azimutal de las redes indicadas, pero durante el periodo que operaron dichas estaciones casi no ocurrieron sismos.

Sin embargo, la red de SISMEX presenta una mejor cobertura azimutal que las otras dos redes mencionadas, motivo por el cual los errores en la localización de los sismos serán menores.

La base de datos sísmicos para el periodo 1984-2004 esta constituida por 62 sismos registrados por la red SISMEX, 48 por la red SSN y 3 por la RSVM debido a que esta última empezó a operar desde el año 1996. Considerando que el mayor número de sismos fue registrado por las redes SISMEX y SSN, se procede a comparar los parámetros hipocentrales obtenidos por ambos catálogos, para lo cual se realiza el análisis de la distribución espacial y en profundidad de un total de 32 sismos registrados simultáneamente por ambas redes.



**Figura 7.** Distribución espacial de las estaciones sismológicas de las redes SISMEX (Sistema de Información Sismotelemétrica de México), RSVM (Red Sísmica del Valle de México) y SSN (Servicio Sismológico Nacional). La zona sombreada delimita la FVTM.

A continuación se realiza el análisis de la distribución espacial y en profundidad de los 32 sismos registrados por las redes regionales SSN y SISMEX. Cabe indicar que los sismos registrados por el SSN durante el periodo 1984 y 1987 fueron localizados utilizando un modelo de velocidad construido a partir de las tablas recorrido-tiempo de Jeffreys y Bullen (1940). Para sismos ocurridos después de este periodo se utilizó un modelo mejorado del anterior y que considera dos capas con espesores de 16 y 33 km a fin de tener mayor control sobre los sismos con hipocentros superficiales (Tabla 2a). La red SISMEX utilizó el modelo de velocidad propuesto por Lermo et al. (2001) para la región central de la FVTM, incluyendo al estado de Tlaxcala (Tabla 2b). Los autores utilizaron 90 eventos sísmicos corticales, a fin de evaluar un total de cuatro modelos de velocidad obtenidos utilizando ondas superficiales y refracción sísmica. A partir de éstos se integró un modelo final el cual ajustó mejor a los datos.

**Tabla 2.** Modelos de velocidad utilizados para el procesamiento de los sismos ocurridos entre 1984-2004. a. Modelo del SSN obtenido a partir de las tablas de Jeffreys y Bullen, b. Modelo de SISMEX propuesto por Lermo et al. (2001).

a.

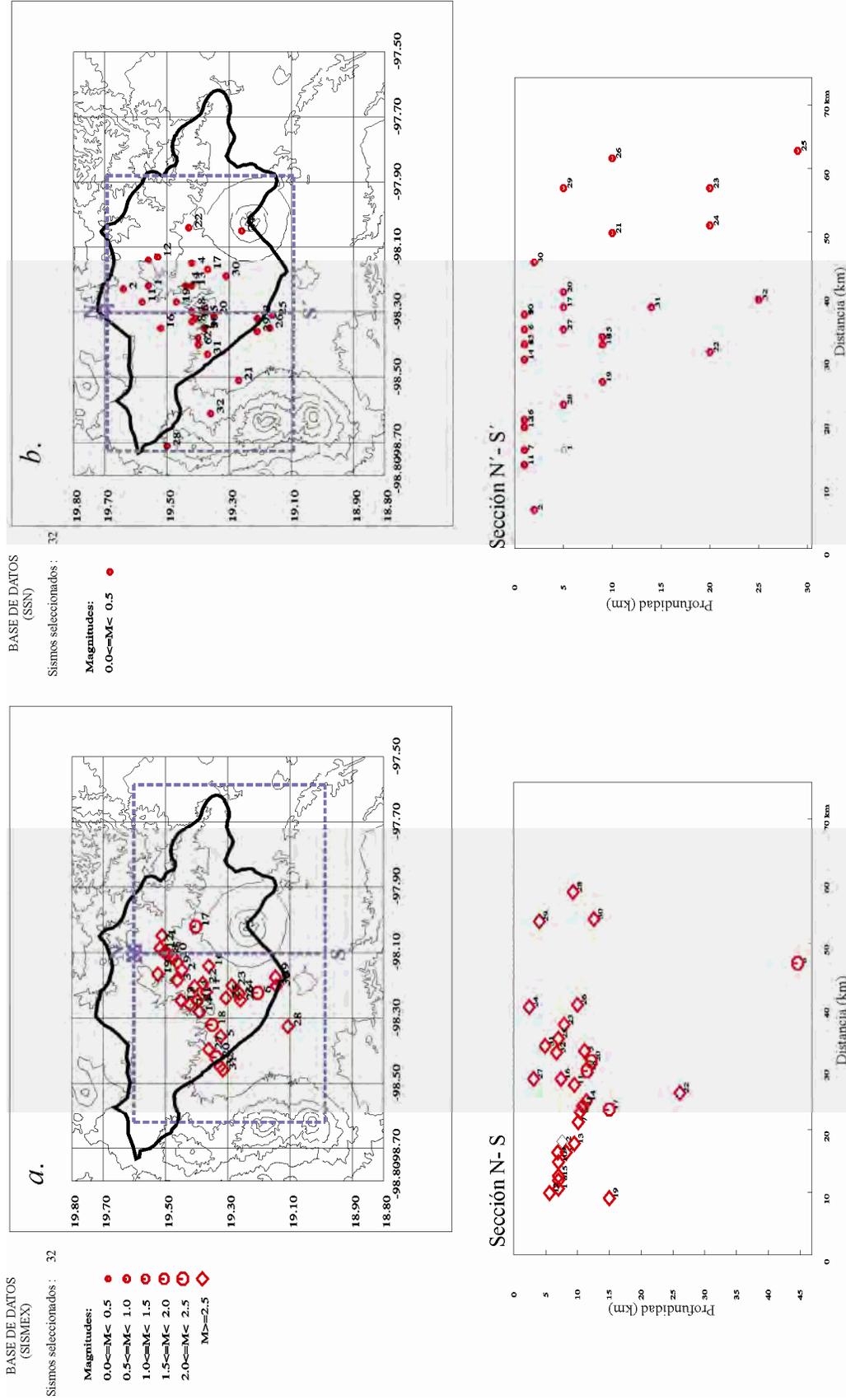
<i>Velocidad, Km/s</i>	<i>Prof. a la interfaz, Km</i>
6.00	0.0
7.76	16.0
7.95	33.0
8.26	100.0
8.58	200.0
8.97	413.0

b.

<i>Velocidad, Km/s</i>	<i>Prof. a la interfaz, Km</i>
2.9	0.0
5.2	1.0
5.8	3.0
6.6	15.0
8.1	45.0

- En la Figura 8a se muestra los sismos registrados por SISMEX y en ella se observa que el total de sismos se encuentra en la parte central del estado de Tlaxcala mostrando el mayor número de sismos, una aparente alineación en dirección NE-SO y en menor número, en dirección N-S. Esta sismicidad se distribuye sobre toda el área en la cual se ha identificado la presencia de fallas, lo cual sugiere que podrían tener su origen en la deformación local puesta en manifiesto por la tectónica y geomorfología local. En una sección vertical orientada en dirección N-S (perpendicular a la orientación de las fallas), los sismos se concentran en un rango de profundidad menor a 15 km, sugiriendo que en su totalidad estarían asociados a deformaciones superficiales.

- En la Figura 8b, se muestra la distribución de los sismos contenidos en el catálogo del SSN y en ella se observa que los 32 sismos se distribuyen de manera dispersa en todo el estado aunque es posible identificar una pequeña concentración de sismos en la parte central, similar a lo observado en la Figura 8a. En general, debido a esta distribución de los sismos, no es posible asociarlos con algún elemento tectónico local. En la sección vertical, se observa que los sismos se distribuyen en profundidad de manera dispersa y sin mostrar tendencia alguna, hasta un rango de profundidad de 35 km. Los aparentes alineamientos de sismos a profundidades de 1 y 5 km, probablemente se debió a la mala resolución obtenida para el parámetro profundidad.



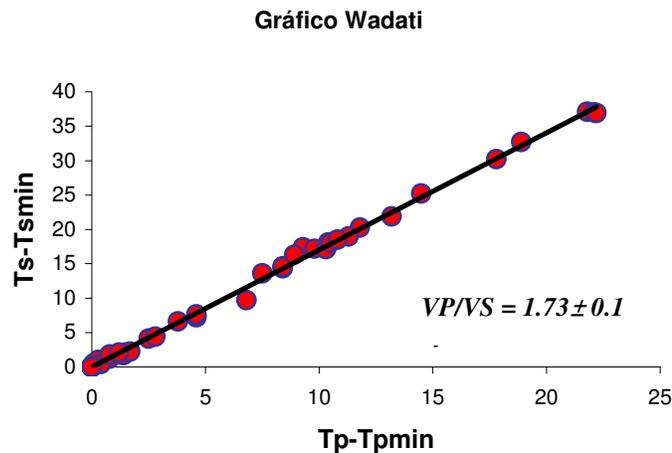
**Figura 8.** Parte superior: Distribución de la sismicidad local del estado de Tlaxcala, periodo 1984-2004 ( $M_d < 3.5$ ); a. Sismos tomados del catálogo de SISMEMEX, b. Sismos tomados de línea discontinua delimita el área de la sección vertical y su orientación. Parte inferior: Sección vertical, donde se muestra la distribución en profundidad de los 32 sismos.

Del análisis realizado, se concluye que la base de datos sísmicos locales del catálogo de SISMEM, permite tener mayor información sobre los posibles patrones de sismicidad presentes en el estado de Tlaxcala ya que los errores en la localización de los sismos serán menores. Esta información es debida a que SISMEM cuenta con una mejor distribución azimutal de estaciones sísmicas alrededor de este estado respecto a las otras redes mencionadas, motivo por el cual se toma como base para este trabajo los datos de SISMEM.

De esta base de datos, se dispone de las lecturas de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas y utilizadas para realizar un re-procesamiento a fin de intentar mejorar la resolución en el cálculo de los parámetros hipocentrales de estos sismos. Adicional a esta información, también se dispone de las formas de onda en formato digital de 9 sismos ocurridos en dicho estado entre 1994 y 2004 (17/05/1994, 05/01/1995, 09/04/1995, 06/09/1996, 23/04/1997, 06/05/1997, 18/06/1997 (2) y del 31/08/2004), para los cuales se procedió a realizar las lecturas de las fases P, S, polaridades y duración del registro del sismo.

Para realizar el re-procesamiento de esta información se ha seguido los siguientes pasos:

- 1) Para el despliegue de las formas de onda, cálculo de los parámetros hipocentrales y manejo de la base de datos se utilizó el paquete SEISAN (Havskov, 1997).
- 2) El modelo de velocidad utilizado es el propuesto por Lermo et al., 2001 (Tabla 2b) para la parte central de la FVTM, incluyendo a la ciudad de Tlaxcala.
- 3) Se hace uso de una razón de velocidades de  $V_p/V_s=1.73$  determinada en este estudio a partir de un ajuste de Wadati y datos extraídos de los sismos cuyas formas de onda están disponibles (Figura 9).



**Figura 9.** Gráfico de Wadati que relaciona los tiempos de llegada de las fases P y S.  $V_p/V_s$ , es la relación de velocidades obtenida del gráfico.

- 4) Para calcular la magnitud  $M_d$  (magnitud de duración) se utilizó la ecuación propuesta por Chavacán y Lermo (2004). Estos autores evaluaron diferentes relaciones de magnitud  $M_d$ , utilizando una base de datos de 22 sismos corticales ocurridos en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano. La diversidad de valores de magnitud obtenidas para estos sismos en relación a sus magnitudes  $M_w$  motivó a los autores generar una nueva relación siguiendo el método propuesto por Lee et al. (1972) brindando mayor estabilidad en los valores de magnitud. Esta relación considera la duración del registro ( $T$ ) y la distancia epicentral ( $D$ ):

$$M_d^* = -1.61947 + 0.00052D + 2.336177 \log_{10}(T)$$

Obtenidos los parámetros hipocentrales para el total de sismos, se procedió a seleccionar los sismos con mayor estabilidad en sus parámetros siguiendo el siguiente criterio:

- a.- Las localizaciones fueron consideradas confiables siempre y cuando contaran como mínimo con 6 lecturas: 3 fases P y 3 fases S.
- b.- Un error cuadrático medio (RMS) final menor o igual a 1.0 s.
- c.- Un error epicentral estimado menor a 3 km.

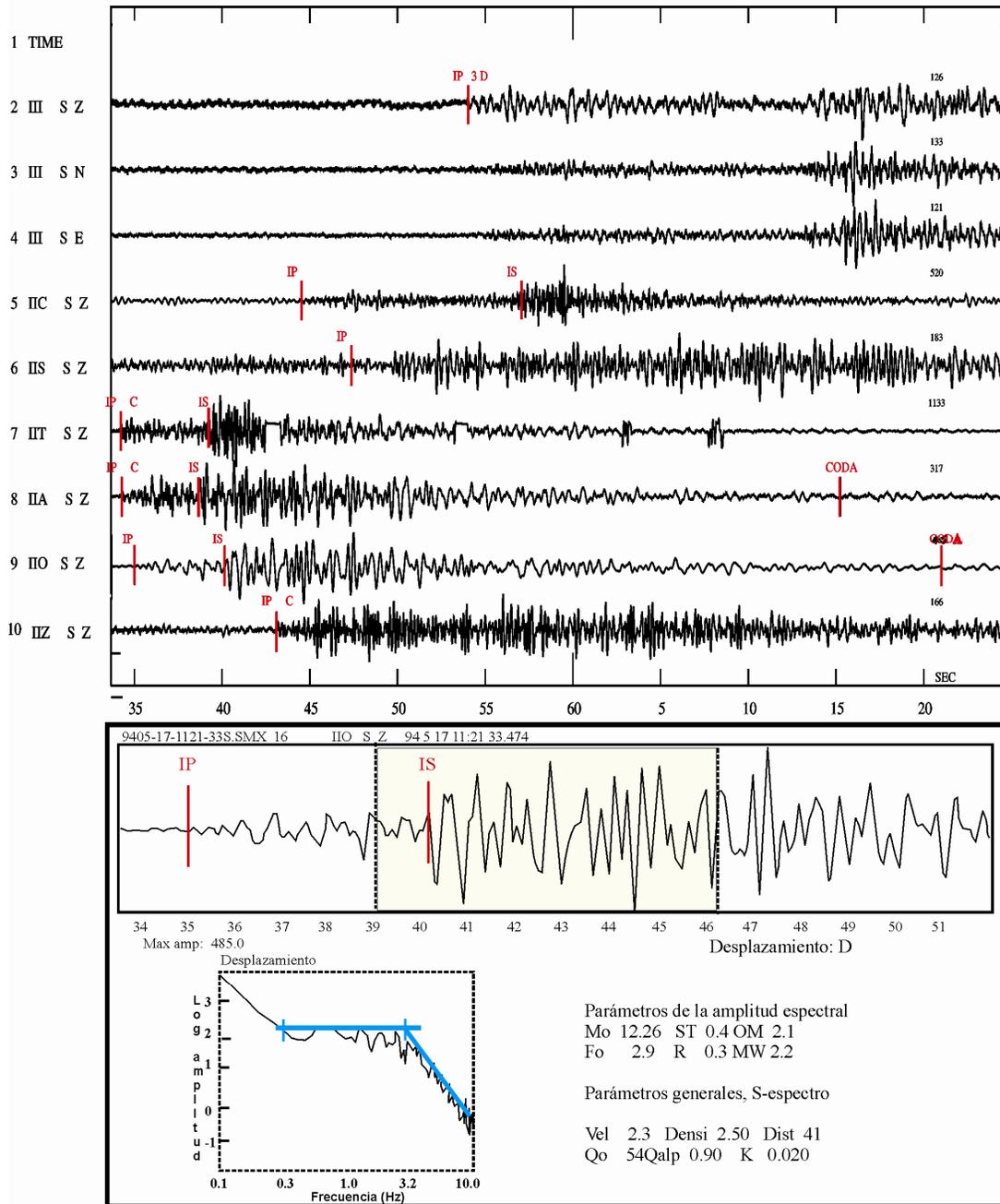
A fin de completar la base de datos, para los 9 sismos que disponen de forma de onda se procedió a calcular su magnitud  $M_w$  a partir de los espectros de amplitud del desplazamiento de ondas P y S, para lo cual se seleccionó ventanas de 7s corregidas por su respuesta instrumental. Obteniéndose parámetros generales como:  $Vel$ = Velocidad (km/seg),  $Dens$ = densidad ( $g/cm^3$ ),  $Dist$ = distancia hypocentral (km),  $Q_0 = Q_0$  para corregir la amplitud espectral ( $Q_0 = Q_0 f^{0.9}$ ) y los parámetros de la amplitud espectral tales como:  $M_0$ = momento logarítmico (Newton\*m),  $ST$ = caída de esfuerzo (bars),  $OM$ = nivel espectral logarítmico (nm-sec),  $R$ = radio de ruptura (km) y  $F_0$ = frecuencia esquina (Hz). En la parte superior de la Figura 10 se muestra como ejemplo uno de los sismos para el cual se dispone de formas de onda en siete estaciones, ocurrido el 17/05/1994 ( $M_w=2.2$ ) y en la parte inferior de esta figura, se muestra el espectro del sismo utilizando su registro en la estación IIO.

Aún cuando solo se dispone para estos 9 sismos con información de las redes regionales se pudo obtener un error cuadrático medio de 0.5 s, así como errores en longitud y latitud menores a 2 km y una profundidad menor a 5 km. Según el procedimiento de selección de sismos, de un total de 62 sismos del catálogo de SISMEX se seleccionó 33 que cumplían los requerimientos establecidos, haciendo que esta información sea confiable.

405-17-1121-33S.SMX\_16 9405-17-1121-33S.SMX\_16

Tiempo de inicio del registro : 1994 5 17 11:21 33.665

1994 517 1121 27.6 L 19.359 -98.416 4.4 MEX 7 0.2 2.2 CMEX 2.2 WMEX

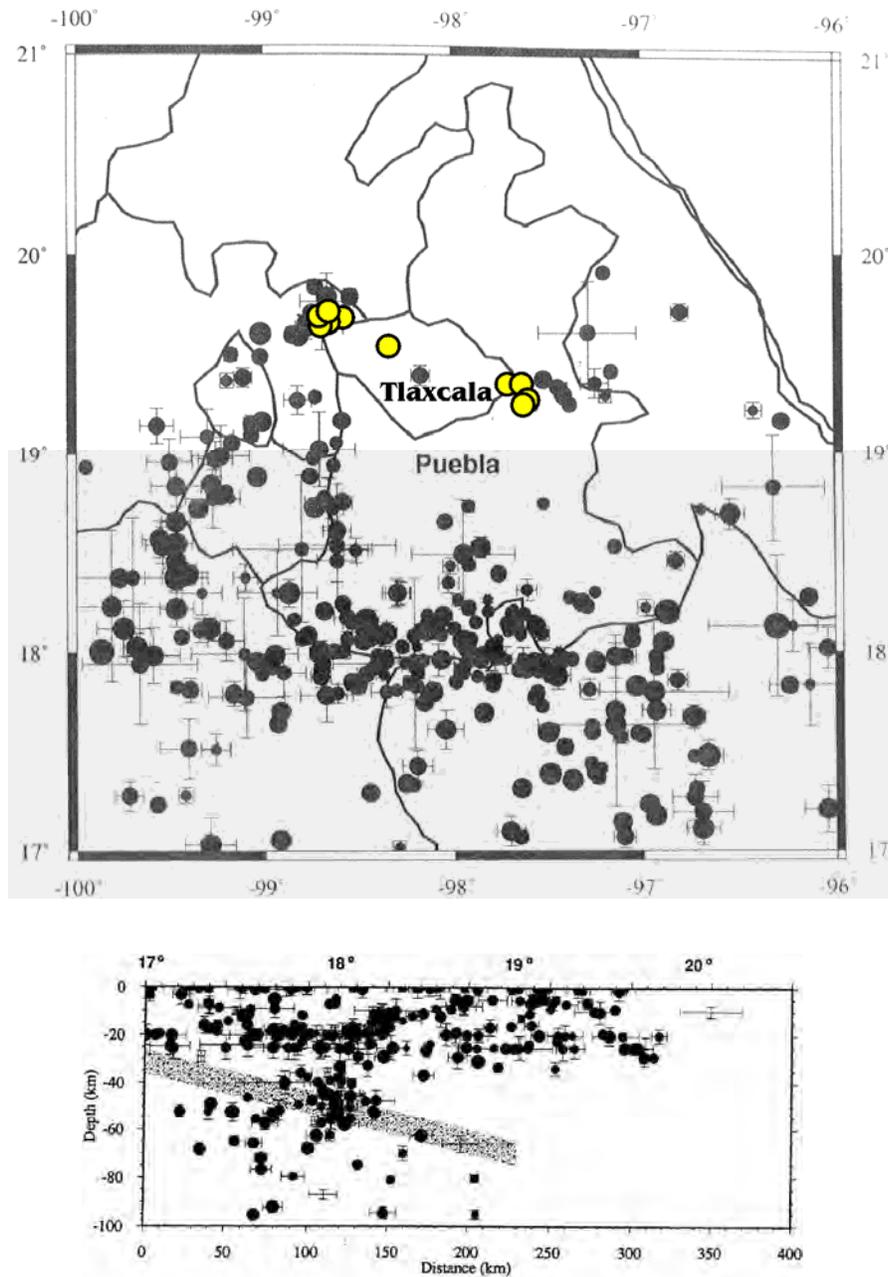


**Figura 10.** En la parte superior, se muestra el registro en 7 estaciones del sismo ocurrido el 17/05/1994 y en la parte inferior, el espectro de desplazamiento de la onda S correspondiente al registro de la estación IIO utilizada para el cálculo de la magnitud Mw. Las barras delimitan la ventana seleccionada para la obtención de este espectro. Mo= momento logarítmico (Newton\*m), ST= caída de esfuerzo (bars), OM= nivel espectral logarítmico (nm-seg), R= radio de ruptura (km) y Fo= frecuencia esquina (Hz).

A los 33 sismos considerados en este estudio se añadió 11 sismos extraídos de la base de datos propuesta por González-Pomposo y Valdés-González (1995). Los sismos corresponden a un estudio de actividad sísmica local que se realizó en el estado de Puebla y sus inmediaciones. La base de datos sísmicos de González-Pomposo y Valdés-González contiene 350 eventos con profundidades menores de 50 km obtenida con la Red Sísmica del Estado de Puebla (RESEP) que operó durante el periodo de enero de 1986 a agosto de 1989. El 69% de los sismos se concentran al sur y centro del estado de Puebla y el resto en fronteras común con los estados de México, Tlaxcala e Hidalgo, tal como se observa en la Figura 11. Los datos sísmicos adicionales a nuestra base de datos se ubican en el límite NO y SE del estado de Tlaxcala (círculos amarillos en la Figura 11). Estos sismos pueden representar una zona de potencial sísmico que afectaría a ciudades aledañas al límite del estado en sus extremos NO y SE. Asimismo, se añadió 1 sismo tomado del catálogo de la RSVM, ocurrido el 03/11/2002; el mismo que ha sido registrado por un total de 8 estaciones sísmicas con un RMS de 1.3s. El mismo que no estuvo contenido en el catálogo de SISMEX. Finalmente, la base de datos a utilizarse en este estudio contiene un total de 45 sismos.

En la Tabla 3, se muestra los parámetros hipocentrales de 45 sismos ocurridos en el estado de Tlaxcala durante un periodo de 21 años (entre 1984 y 2004). De acuerdo a esta base de datos, aproximadamente el 45% de sismos ocurrieron entre los meses de Septiembre y Noviembre de 1984 como parte de un enjambre sísmico ocurrido en dicho estado. Estos sismos presentaron magnitudes  $M_d^*$  que fluctuaron ente 1.6 y 2.8. Es conocido que la ocurrencia de enjambres es inusual y en este caso, no reflejaría la frecuencia normal de estos sismos en el Estado de Tlaxcala; sin embargo, es útil para identificar fuentes sismogénicas importantes que pueden ser recurrentes en el tiempo. De acuerdo a lo discutido, la base de datos disponible permite observar que durante los años de 1985, 1990, 1991, 1992, 1993, 1998, 1999, 2000, 2001 y 2003, en el estado de Tlaxcala no habrían ocurrido sismos o en todo caso, de haberse producido serian de magnitud pequeña por lo cual no fueron registrados por todas las estaciones que integran las redes antes indicadas y por lo tanto; no pudieron ser localizados.

Sin considerar el enjambre sísmico de 1984, únicamente 26 sismos habrían ocurrido en el estado de Tlaxcala durante un periodo de 11 años; es decir, un promedio de 3 sismos por año. Todos los sismos ocurrieron a niveles de profundidad menor e igual a 30 km y solamente los sismos extraídos del catalogo de González-Pomposo y Valdés-González (1995) presentan profundidades mayores, entre 20-37 km.



**Figura 11.** Distribución de la sismicidad local en espacio y profundidad para el estado de Puebla según González-Pomposo y Valdés-González (1995). Los círculos amarillos, indican la localización de los 11 sismos que se adicionaron a la base de datos utilizada en este estudio.

**Tabla 3.** Parámetros hipocentrales del total de sismos utilizados en este estudio (1984-2004)

N°	Fecha	Hora GMT	Latitud	Longitud	Prof.	RMS	Mag.		Fuente
	año/mes/día	hora:min:seg	grados	grados	km	seg	Md*	Mw	
1	1984 / 9 / 25	10 : 3 : 59.8	19.405	-98.021	12.2	0.7	1.9		SISMEX
2	1984 / 9 / 25	10 : 4 : 56.7	19.44	-97.973	17.6	1	1.8		SISMEX
3	1984 / 9 / 26	17 : 5 : 46.5	19.475	-98.108	6	0.7	2.5		SISMEX
4	1984 / 9 / 29	17 : 8 : 6.9	19.48	-98.149	6.7	0.4	2.3		SISMEX
5	1984 / 9 / 29	17 : 35 : 13.9	19.512	-98.091	4.9	0.9	2.4		SISMEX
6	1984 / 9 / 30	0 : 23 : 35.3	19.478	-98.185	7.3	0.1	2.6		SISMEX
7	1984 / 9 / 30	4 : 9 : 56.6	19.468	-98.193	7.7	0.1	2.6		SISMEX
8	1984 / 9 / 30	14 : 51 : 55.2	19.489	-98.081	4.8	1	2.7		SISMEX
9	1984 / 10 / 1	4 : 35 : 1.4	19.153	-98.189	26.6	0.1	1.9		SISMEX
10	1984 / 10 / 2	0 : 20 : 42.3	19.438	-98.159	6.9	0.7	2.4		SISMEX
11	1984 / 10 / 2	3 : 59 : 39.9	19.325	-98.1	13.7	0.1	1.6		SISMEX
12	1984 / 10 / 2	15 : 16 : 54	19.464	-98.2	7.7	0.1	2.8		SISMEX
13	1984 / 10 / 2	16 : 40 : 20.5	19.476	-98.171	7	0.3	2.8		SISMEX
14	1984 / 10 / 2	19 : 44 : 21.3	19.479	-98.208	0.7	1	2.1		SISMEX
15	1984 / 10 / 2	20 : 10 : 57.3	19.46	-98.165	7	0.9	2.1		SISMEX
16	1984 / 10 / 2	22 : 1 : 56	19.473	-98.133	6.8	0.3	2.1		SISMEX
17	1984 / 10 / 3	1 : 11 : 18.4	19.517	-98.105	5.4	0.8	2.6		SISMEX
18	1984 / 10 / 3	1 : 19 : 34.4	19.488	-98.183	7.4	0.6	2.2		SISMEX
19	1984 / 11 / 6	1 : 55 : 57.8	19.408	-98.266	5.7	0.4	2.0		SISMEX
20	1986 / 3 / 20	10 : 12 : 34	19.34	-97.61	20	1.7	3.4		RESEP
21	1986 / 5 / 8	18 : 44 : 30.2	19.668	-98.667	30	1.9	4.0		RESEP
22	1986 / 5 / 11	12 : 27 : 26.2	19.657	-98.65	29	2	4.1		RESEP
23	1986 / 8 / 30	19 : 23 : 46.6	19.68	-98.571	37	0.4	4.0		RESEP
24	1986 / 8 / 30	22 : 34 : 23.5	19.691	-98.613	37	0.5	3.4		RESEP
25	1986 / 9 / 1	3 : 40 : 33.5	19.636	-98.687	37	1.9	3.4		RESEP
26	1987 / 2 / 18	1 : 26 : 37	19.24	-97.62	24	0.7	3.1		RESEP
27	1987 / 4 / 18	8 : 30 : 42	19.53	-98.33	37	0.7	3.1		RESEP
28	1987 / 8 / 16	9 : 3 : 54	19.39	-98.17	32	1	3.1		RESEP
29	1988 / 2 / 1	7 : 44 : 56	19.25	-97.58	28	1.6	2.0		RESEP
30	1988 / 7 / 25	4 : 31 : 7.5	19.386	-98.167	24	0.9	2.7		SISMEX
31	1988 / 12 / 29	5 : 24 : 33.6	19.32	-98.204	3.1	0.4	2.1		SISMEX
32	1988 / 12 / 29	5 : 25 : 15.8	19.266	-98.256	4.7	0.3	3.0		SISMEX
33	1988 / 12 / 29	5 : 49 : 33.7	19.318	-98.208	3	0.3	2.3		SISMEX
34	1989 / 7 / 8	6 : 27 : 45	19.33	-97.69	32	1.2	3.0		RESEP
35	1989 / 8 / 5	23 : 42 : 16.1	19.269	-98.216	8.5	0.3	3.0		SISMEX
36	1994 / 5 / 17	11 : 21 : 27.6	19.359	-98.416	4.4	0.1	2.2	2.2	SISMEX
37	1995 / 1 / 5	20 : 15 : 49.9	19.362	-98.445	8.6	0.2	2.1	2.1	SISMEX
38	1995 / 4 / 9	15 : 55 : 39.1	19.36	-98.418	10	0.1	2.2	2.2	SISMEX
39	1996 / 9 / 6	6 : 55 : 0	19.148	-98.319	6.6	0.3	3.0	3.0	SISMEX
40	1997 / 4 / 23	12 : 46 : 23.3	19.155	-98.17	4.2	0.1	2.4	2.3	SISMEX
41	1997 / 5 / 6	8 : 0 : 5.9	19.146	-98.184	3.1	0.3	2.7	2.7	SISMEX
42	1997 / 6 / 18	21 : 12 : 2.2	19.327	-98.429	4.4	0.1	2.3	2.3	SISMEX
43	1997 / 6 / 18	21 : 15 : 6.2	19.336	-98.422	5.8	0.1	2.4	2.4	SISMEX
44	2002 / 11 / 3	21 : 35 : 0.4	19.273	-98.219	1	1.3	3.5		RSVM
45	2004 / 8 / 31	7 : 54 : 5.3	19.232	-97.681	5.2	0.5	2.9	3.0	SISMEX

SISMEX: Sistema de Información Sismotelemétrica de México, RESEP: Red Sísmica del Estado de Puebla y RSVM: Red Sísmica del Valle de México.

A continuación se realiza el análisis espacial y en profundidad de los sismos contenidos en la base de datos.

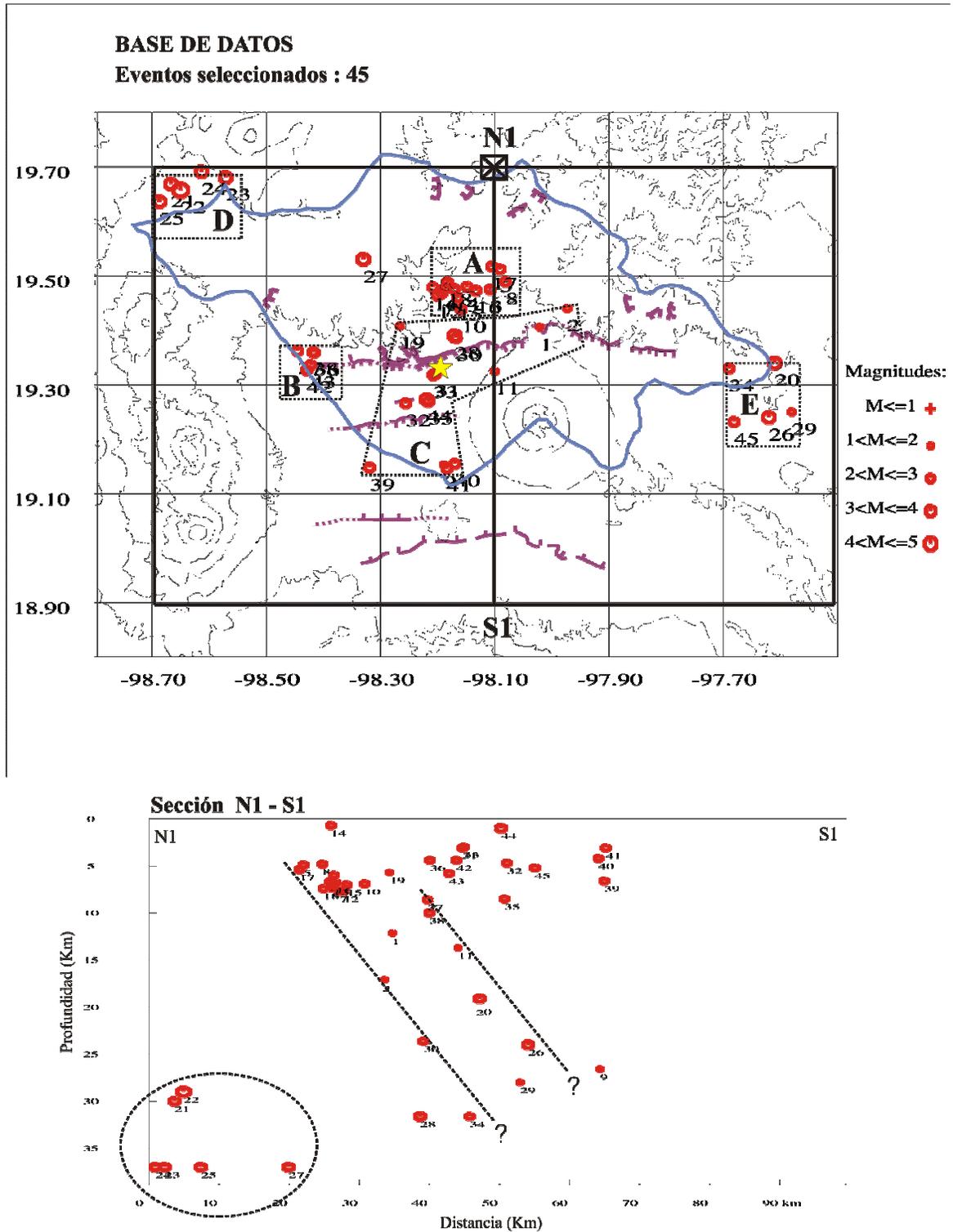
#### ***II.4.2. Análisis de la sismicidad local***

En la Figura 12, se presenta la distribución en espacio y en profundidad de los sismos contenidos en la base de datos a utilizarse en este estudio. En la parte superior de esta figura se observa que espacialmente los sismos se distribuyen de manera irregular en todo el estado de Tlaxcala; sin embargo, es posible identificar hasta 5 grupos de sismos: dos en la parte central del estado (A y C), uno en el extremo NO (D) y Oeste del estado (B), y otro en el extremo SE (E). En la parte inferior de la Figura 12 se muestra la sección vertical N1-S1 de sismicidad según la dirección N-S a aproximadamente 90° de la orientación de los principales sistemas de fallas observados en esta zona y en ella se observa que los sismos se distribuyen de manera dispersa hasta niveles de profundidad de 40 km. En general, en función de la profundidad es posible identificar la presencia de dos agrupamientos de sismos, estando el primero con menor número de sismos localizado en el extremo izquierdo de la sección a niveles de profundidad entre 28 y 40 km (delimitado por un círculo de línea discontinua), asociados probablemente a la deformación interna de la placa, y el segundo con el mayor número de sismos, los cuales se distribuyen a distancias mayores a 20 km respecto al extremo N1 de la sección, concentrándose en mayor número a profundidades menores a 10 km, todos asociados probablemente al Graben de Puebla. De modo general en este segundo agrupamiento se observa que conforme los sismos tienden hacia el extremo S1 de la sección aumentan en profundidad, siguiendo un posible lineamiento con un ángulo de aproximadamente 45° (indicado con dos líneas discontinuas) sugiriendo el aparente buzamiento de 45° hacia el Sur del extremo norte del Graben de Puebla.

A fin de complementar el análisis de la sismicidad, se procede a agrupar temporalmente a los sismos en dos periodos: el primero considera a los sismos ocurridos únicamente durante el año 1984 y el segundo, a los sismos ocurridos entre los años 1985 y 2004 (catálogo SISMEEX), los mismos que fueron separados por que para el primer periodo se disponía de un mínimo de datos para su localización; por tanto, los errores en profundidad para estos sismos son relativamente grandes a diferencia de los sismos ocurridos dentro del segundo periodo, ya que para este se dispone de un mayor número de datos.

Durante el año 1984 se registraron 19 sismos y de estos, 14 conforman el grupo A y los 5 restantes se distribuyen de manera dispersa en la región central del estado de Tlaxcala. En el extremo superior de la Figura 13 se muestra la distribución espacial de estos sismos, todos con magnitudes  $M_d \leq 2.8$  y tal como se indicó anteriormente, el error en profundidad obtenidos para estos sismos es relativamente grande, lo cual no permite proponer tendencias en profundidad.

Por otro lado, entre los años 1985 y 2004, en el área de estudio ocurrieron 14 sismos que integraron los grupos B, C y E. Para el cálculo de los parámetros hipocentrales de estos sismos se disponía de un mayor número de datos; por lo tanto, es posible evaluar sus elipses de error, tanto en superficie como en profundidad. En general, la base de datos disponibles considera



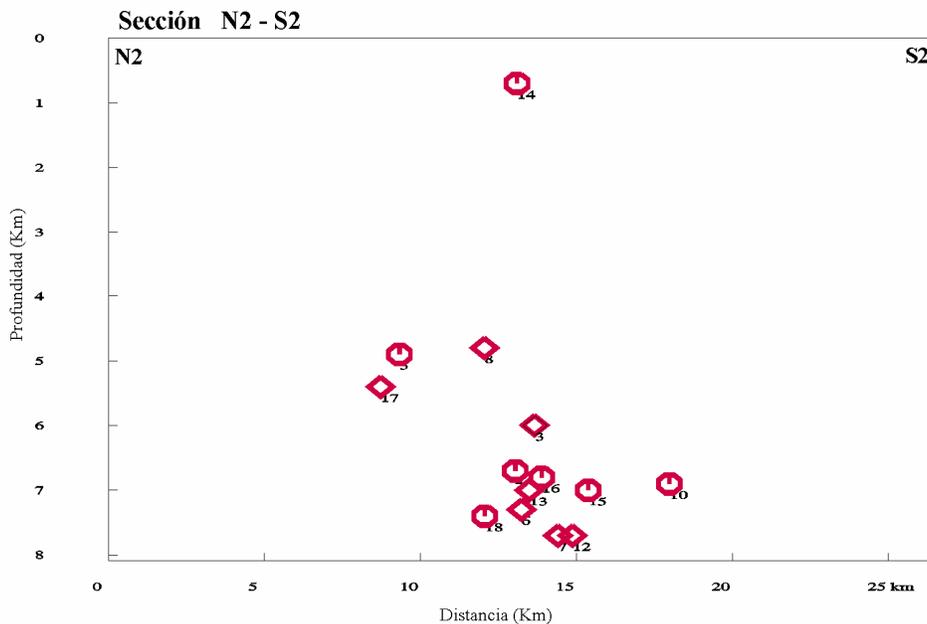
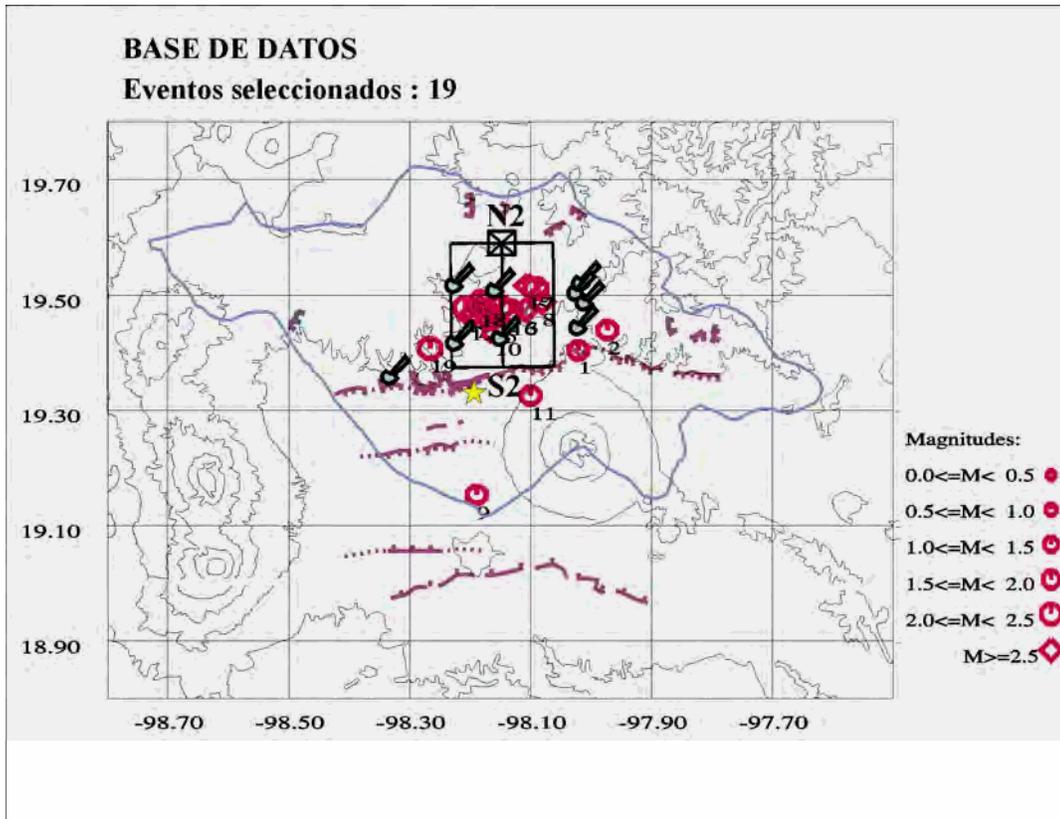
**Figura 12.** Parte superior: Distribución espacial de la sismicidad local presente en el estado de Tlaxcala. Los recuadros de líneas discontinuas indican los diferentes grupos de esta sismicidad (A-E). La estrella indica la ubicación de la capital de este estado y las líneas moradas la ubicación de las fallas geológicas. En la Parte inferior: Sección N1 - S1, se muestra la distribución en profundidad de los 45 sismos.

para cada sismo, además de los tiempos de llegada de las fases P y S, la polaridad del primer impulso de la onda P; por lo tanto, para los sismos de los grupos A, B, C y E fue posible elaborar mecanismos focales simples (implica considerar datos de polaridades de un solo sismo) y compuestos (implica considerar datos de polaridades de varios sismos) a fin de identificar las características de la fuente que les dio origen. Los sismos que integran el grupo D provienen de la base de datos de la RESEP y al no disponerse de lecturas de fases P y S, no fue posible realizar el reprocesamiento de sus parámetros hipocentrales y por ahora, solo es posible considerar su distribución espacial (Figura 12).

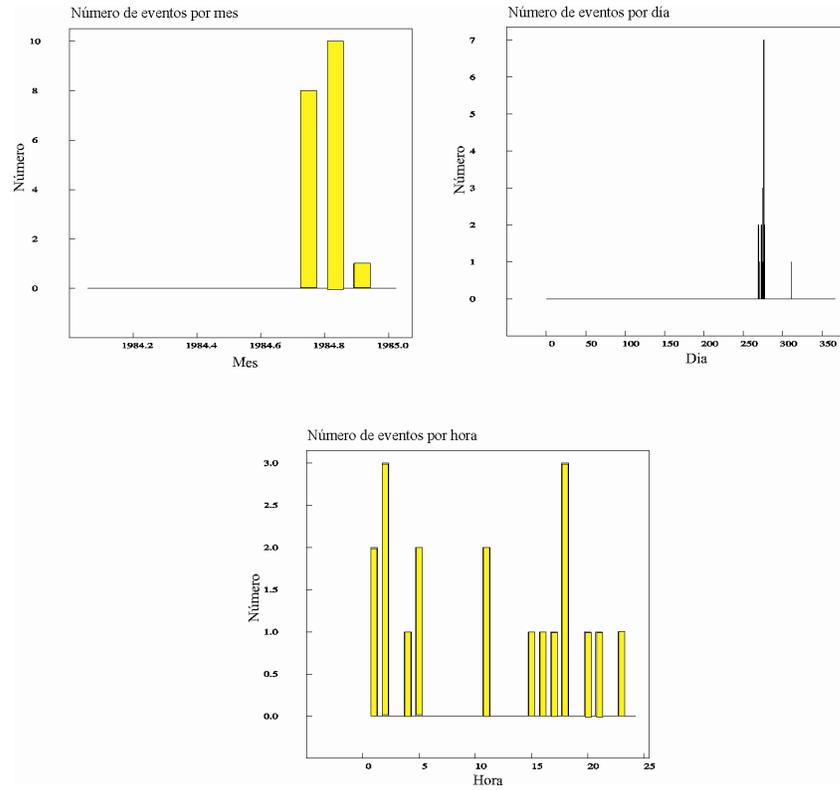
**Grupo A:** Este grupo considera el mayor número de sismos ocurridos en 1984 y se ubican a aproximadamente 14 km en dirección Norte de la ciudad de Tlaxcala cubriendo un área de 12x16 Km<sup>2</sup> (Figuras 12 y 13). Según la sección vertical N2-S2, los sismos alcanzan profundidades menores a 8 km y muestran un aparente incremento de sismos en dirección sur. Estos sismos tendrían su origen en la posible deformación superficial presente en el área como resultado de la presencia de la Falla Tlaxcala. Todos estos sismos ocurrieron entre septiembre-diciembre de 1984; por lo tanto, sugieren la ocurrencia de un enjambre sísmico (conjunto de sismos ocurridos en un periodo de tiempo muy breve, porque tienen el mismo origen), también llamado “cluster”. En general, el total de los sismos asociados al enjambre sísmico se localizan dentro del Grupo A y presentan magnitudes muy pequeñas ( $M_d^* < 2.8$ ).

Esta sismicidad principalmente se localizan en un área donde existe un gran número de canteras y zonas mineras; por lo cual, es posible confundirlos con explosiones. A fin de evaluar su origen en la Figura 13, se presenta la distribución de los sismos y de las canteras o zonas mineras presentes en el estado de Tlaxcala (información tomada del Consejo de Recursos Minerales, 1999). En dicha figura se observa que las canteras se distribuyen alrededor y dentro del agrupamiento de sismos; por tanto, en los histogramas de la Figura 14, muestran la frecuencia de sismos por mes, día y hora correspondientes al enjambre sísmico y en ellos se puede observar que no ocurrieron sismos entre enero y agosto de 1984, y solo 8 a 10 sismos en septiembre y octubre. En los otros gráficos se observa que el mayor número de sismos ocurrió el 2 de octubre de 1984 (7 sismos), en horas aleatorias sin observarse un patrón pre-establecido. En las canteras o zonas mineras, las explosiones generalmente se realizan en horas específicas, por tanto se descarta que los registros correspondan a explosiones. Por otro lado, de acuerdo a la profundidad estimada para los sismos, sería imposible realizar explosiones a niveles mayores de un 1 km de profundidad.

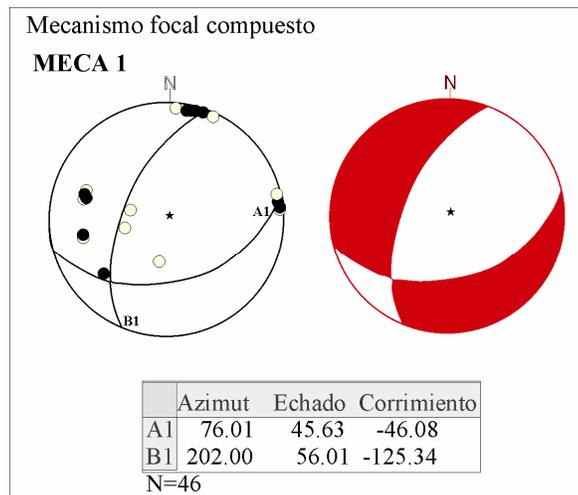
Utilizando la polaridad de la fase P para el total de los sismos se procedió a elaborar un mecanismo focal compuesto con 46 lecturas de polaridad. El mecanismo obtenido se presenta en la Figura 15 y corresponde a un mecanismo de tipo normal con una pequeña componente de desgarre senestral y planos nodales A1 y B1 orientados en dirección NE-SO, buzando ambos con ángulos de 45° y 56° en dirección NO y SE respectivamente. El plano nodal A1 es considerado como el plano de falla más adecuado teniendo en cuenta los sistemas de falla predominantes en la zona, el mismo que tiene un azimut de 76° con un corrimiento de -46.1°. Estos resultados sugieren que toda la zona en la cual se ha producido el enjambre sísmico se encuentra sometida a procesos de deformación netamente extensivos, lo cual es coherente con las hipótesis propuestas en diversos estudios geológicos realizados en el sector oriental de la FVTM, dentro del cual se ubica el estado de Tlaxcala (Suter, 1991; García-Palomo, 2002; García-Palomo et al., 2002).



**Figura 13.** Parte superior: Distribución espacial de la sismicidad ocurrida en 1984 (SISMEX), el recuadro indica el área de la sección N2-S2, conteniendo los sismos del Grupo A. Las palas indican la localización de canteras o zonas mineras (Consejo de Recursos Minerales, 1999). La estrella indica la ubicación de la capital de este estado y las líneas moradas indican fallas. Parte inferior: Sección vertical N2 - S2, muestra la distribución en profundidad de los sismos del Grupo A.



**Figura 14.** Histogramas que muestran la frecuencia de sismos por mes, día y hora correspondientes al enjambre sísmico ocurrido en 1984 en el estado de Tlaxcala.



**Figura 15.** Mecanismo focal compuesto para el Grupo A, con sus respectivos parámetros focales. Los planos nodales están indicados como A1 y B1. N, indica el número de polaridades utilizadas. Las compresiones son indicadas por círculos negros y las dilataciones por círculos amarillos.

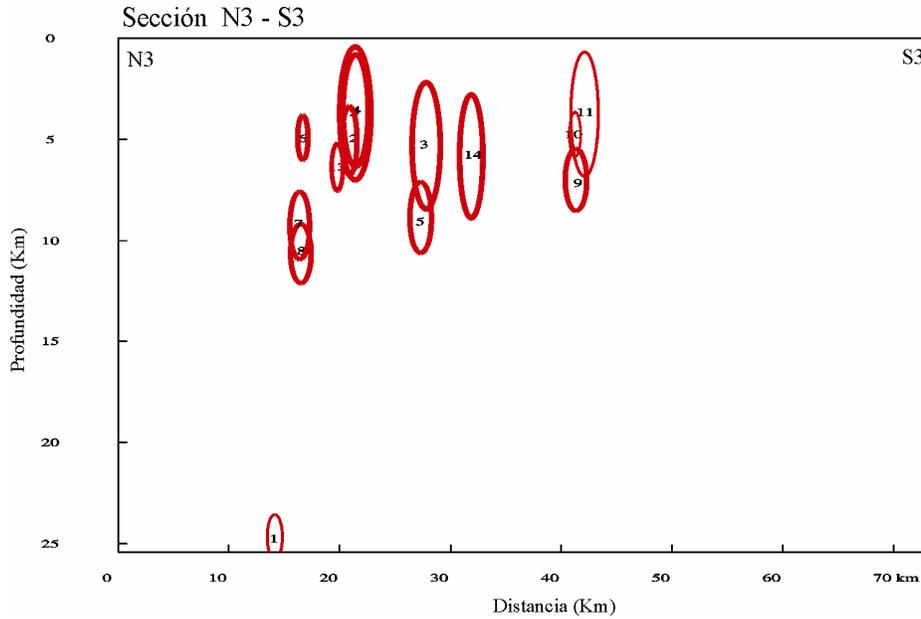
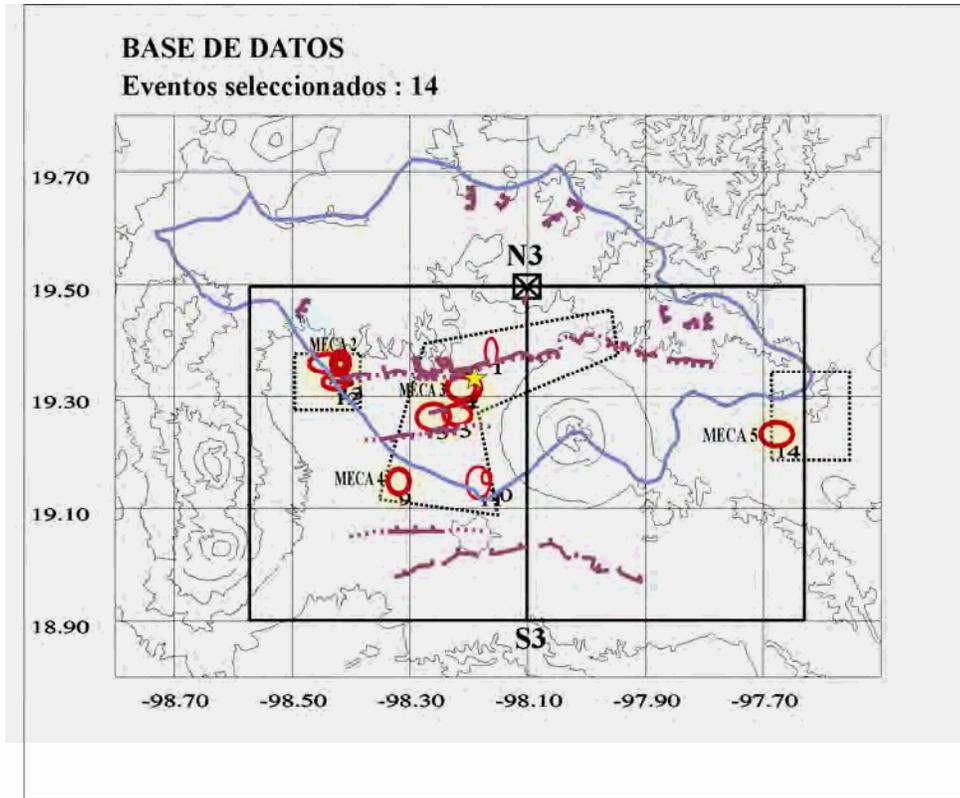
**Grupo B:** Este grupo se ubica en el extremo Oeste del estado y considera un menor número de sismos que podrían tener su origen en un extremo de la Falla Tlaxcala, ver Figura 16. Según la sección vertical N3-S3, los sismos alcanzan una profundidad máxima de 10 km y aunque se agrupan entre 5 y 10 km no muestran ninguna tendencia.

Para este Grupo B, se elaboró un mecanismo focal compuesto para el cual se consideró 30 datos de polaridades y su solución se muestra en la Figura 17 (MECA 2). El mecanismo corresponde a una falla normal con una pequeña componente de desgarre senestral y planos nodales A2 y B2 orientados en dirección NE-SO con buzamiento en dirección NO y SE con ángulos del orden de  $52^\circ$  y  $86^\circ$  respectivamente. Considerando el plano nodal B2 como el plano de falla más adecuado para la zona cuyo azimut es de  $80^\circ$  con un corrimiento de  $-42.2^\circ$ .

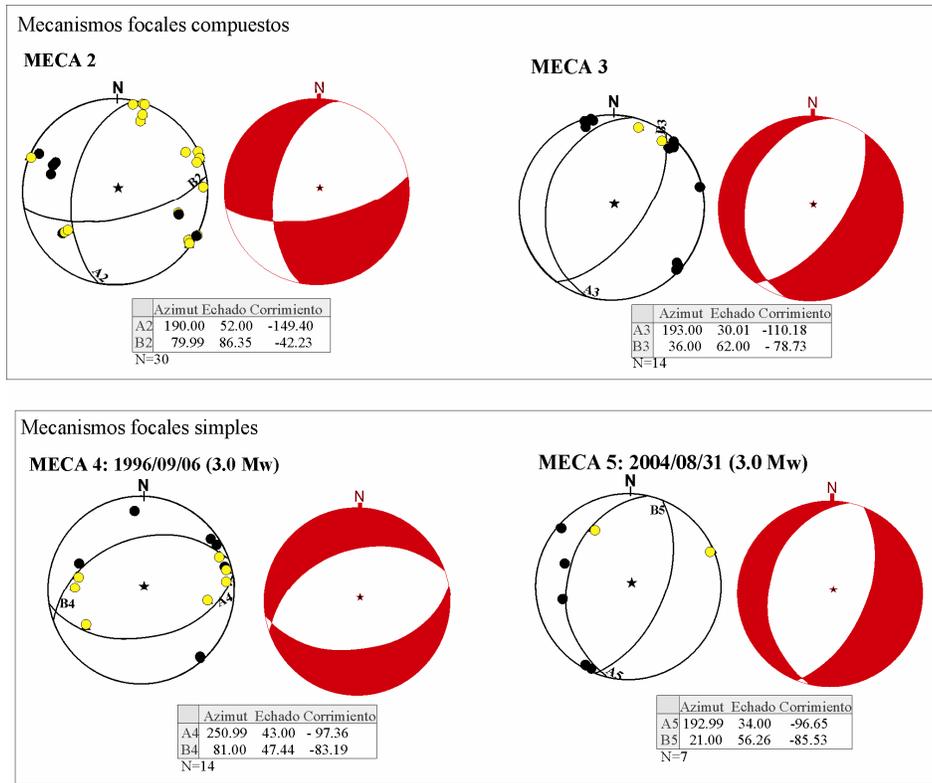
**Grupo C:** Este grupo considera a todos los sismos que se distribuyen de manera irregular en el extremo occidental del volcán La Malinche (Figura 16). De estos sismos, el mayor número se distribuye entre los sistemas de fallas normales de Tlaxcala y Zacatelco. En profundidad según la sección N3-S3, los sismos llegan hasta 15 km y no muestran ninguna tendencia. De manera aislada uno de los sismos ocurrió a 25 km. En la Figura 16, se observa que estos sismos, a diferencia del Grupo A y B, se distribuyen de manera más dispersa.

Al igual que para los grupos anteriores, para estos sismos fue posible elaborar mecanismos focales compuestos y simples (Figura 17). Los mecanismos tienen códigos MECA 3 y MECA 4 respectivamente, a fin de identificar su grupo o sismo para el cual fueron elaborados. MECA 3 corresponde a un mecanismo compuesto para lo cual se utilizaron 14 datos de polaridad y la solución corresponde a un mecanismo de falla normal con planos nodales A3 y B3 orientados en dirección NNE-SSO y buzamientos del orden de  $30^\circ$  en dirección ONO y de  $62^\circ$  en dirección ESE respectivamente. Considerando a este último plano nodal (B3) como el plano de falla más adecuado con azimut de  $36^\circ$  con un corrimiento de  $-78.7^\circ$ . MECA 4 corresponde a un mecanismo simple utilizando 14 datos y la solución obtenida corresponde a una falla normal con planos nodales A4 y B4 orientados en dirección E-O y buzando ambos en dirección N y S con ángulos del orden de  $43^\circ$  y  $47^\circ$  respectivamente. El plano nodal B4 es considerado como el plano de falla cuyo azimut es de  $81^\circ$  con un corrimiento de  $-83^\circ$ .

**Grupo D:** Este grupo de sismos se ubica en el extremo Norte del estado de Tlaxcala (Figura 12) y los sismos se distribuyen con una aparente alineación en dirección NE-SO y profundidades del orden 40 km. Estos sismos no guardan relación con algún elemento tectónico local; por lo tanto, no se podría asegurar su origen, y en profundidad se distribuye entre 28 y 40 km (delimitado por un círculo de línea discontinua) sin mostrar ninguna tendencia. Cabe indicar que estos sismos podrían estar asociados al sistema de fallas de la región de Apan ubicada al NO del estado de Tlaxcala (García-Palomo, 2002). Para este grupo no se elaboró ningún mecanismo focal debido a que no se cuenta con la información necesaria.



**Figura 16.** Distribución de la sismicidad local del Grupo B, C y E (SISMEX) ocurrida entre 1985-2004 en el área de estudio con sus respectivas elipses de error. Los números permiten identificar a los sismos en superficie y profundidad. Parte superior: Distribución espacial de estos sismos, el recuadro indica el área de la sección N3-S3 y las elipses de líneas gruesas indican los sismos utilizados en el cálculo de mecanismos focales simples y compuestos. Parte inferior: Sección N3-S3, muestra la distribución en profundidad de los sismos.



**Figura 17.** Mecanismos focales compuesto y simples, con sus respectivos parámetros focales para cada plano nodal indicados como A y B. N, indica el número de polaridades utilizadas, las compresiones son indicados por círculos negros y las dilataciones por amarillos.

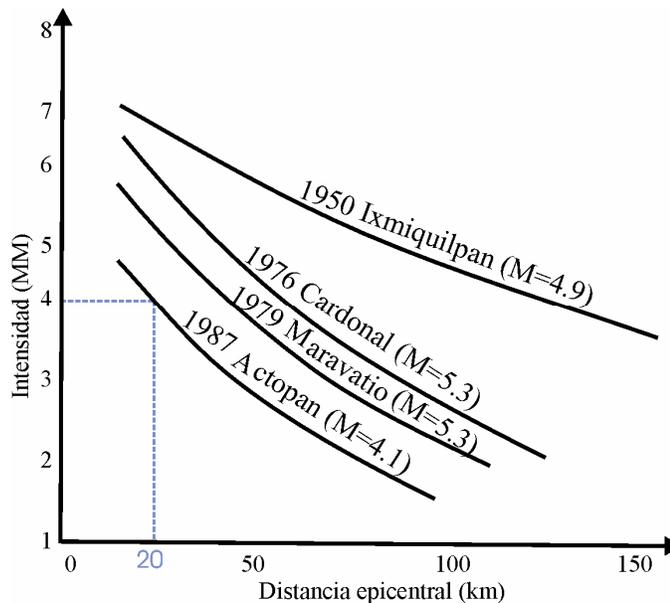
**Grupo E:** Los sismos de este grupo se localizan de manera dispersa en el extremo E del estado de Tlaxcala (Figura 12); asociados al Graben de Puebla; aunque no se cuenta con trazas visibles de fallas en superficie. Según la Figura 16, para este grupo solo cuenta con información de un sismo, para el cual se elaboró un mecanismo focal simple denominado MECA 5 utilizando 7 datos. La solución obtenida corresponde a una falla normal con orientación similar a MECA 3, aunque se debe considerar que debido al uso de pocos datos de polaridad, la orientación de los planos nodales A5 y B5 en dirección NNE-SSO tienen mayor incertidumbre, especialmente en el plano de inclinación; por lo tanto, no es factible asociarlo a algún extremo del Graben de Puebla.

Los resultados obtenidos a partir de los mecanismos focales sugieren que en la región central y sur del estado de Tlaxcala, los procesos de deformación cortical son debidos a la presencia de esfuerzos de extensión con ejes principales orientados en dirección NO-SE y N-S, coherentes con los resultados obtenidos por Luhr et al. (1985), Suter (1991), Mooser y Ramírez (1998), García-Palomo (2002) y Santoyo et al. (2005) a partir de estudios de geología y tectónica. Asimismo, estos resultados pondrían en evidencia que la región centro y sur del estado de Tlaxcala esta dominada por el Graben de Puebla cuyo rumbo es E-O. Estos

resultados son concordantes con la existencia de una gran cuenca intra-arco y el volcán La Malinche.

## II.5. Zonificación del estado de Tlaxcala en función de la sismicidad y tectónica

A fin de sustentar la zonificación del estado de Tlaxcala es necesario analizar los daños causados por grandes sismos ocurridos en el pasado dentro de la FVTM. Estudios realizados por Suter et al. (1996) y Quintanar et al. (2004) sobre la ocurrencia de los sismos de Ixmiquilpan (11/03/1950,  $M=4.9$ ), Cardonal (25/03/1976,  $M=5.3$ ), Maravatío (22/02/1979,  $M=5.3$ ) y Actopan (27/01/1987,  $M=4.1$ ) todos con profundidades menores a 15 km y magnitudes entre 4 y 5 asociados a deformación netamente superficial, muestran que existen una importante atenuación de la intensidad en función de la distancia. En la Figura 18, se presenta los resultados obtenidos por Suter et al. (1996) y a partir del cual se puede deducir que para sismos de magnitudes del orden de 5.3, su intensidad se atenuaría rápidamente pasando de 7 MM a 4 MM en tan solo de 60 km de distancia. Si se considera la intensidad 4 como la mínima que pudiera afectar a los edificios y si se supone la ocurrencia de un sismo de similar magnitud con epicentro en la Falla Tlaxcala su radio de daños estaría concentrado en dirección sur hasta la Falla Zacatelco, y al norte hasta la latitud de la Falla Española en donde las intensidades serían de 5 a 4 MM.



**Figura 18.** Gráfica de la atenuación de la intensidad con la distancia epicentral de sismos ocurridos dentro de la FVTM, próximos a la zona de estudio (tomada de Suter et al. 1996). La línea discontinua indica la distancia para la cual se produciría una intensidad de 4 MM aproximadamente, para un sismo de magnitud 4.0.

De acuerdo a las consideraciones antes mencionadas como son las características tectónicas presentes en el estado de Tlaxcala asociados al Graben de Puebla cuya deformación es puesta en evidencia por la ocurrencia de sismos con mecanismos focales de tipo extensional y con base a los 45 sismos locales registrados por una red regional (cuya distribución azimutal de las estaciones a sido discutida anteriormente), podemos zonificar de manera preliminar el Estado de Tlaxcala en tres zonas que denominaremos como: Zona I de mayor sismicidad, Zona II de sismicidad media y Zona III de menor sismicidad tal como se observa en la Figura 19.

**La Zona I** de mayor sismicidad, se ubica en la región centro y sur del estado, estando asociada a la presencia de importantes sistemas de fallas activas, como la Falla Tlaxcala y Zacatelco con orientaciones E-O, que conforman el extremo norte del Graben de Puebla. Esta zona esta delimitada al sur por el volcán La Malinche y se extiende a 20 km hacia el norte de la Falla Tlaxcala, la cual comprende la principal fuente sismogénica de este estado. En esta zona se ubican por su densidad poblacional las ciudades más importantes tales como: Tlaxcala (capital del estado), Chiautempan, Huamantla y Apizaco.

**La Zona II** de sismicidad media, se localiza en el extremo NO del estado y abarcaría una área pequeña en donde ocurren sismos con magnitudes relativamente pequeñas a profundidades del orden de 30 km. En esta zona no ha sido posible identificar algún elemento tectónico superficial. En esta zona se localiza la ciudad de Calpulalpan.

**La Zona III** de menor sismicidad, considera el área en la cual hasta la fecha no se han reportado sismos (excepto uno), del mismo modo las fallas de pequeña longitud presentes probablemente son rasgos de una tectónica pasada (inactiva).

La disponibilidad de mayor información sísmica ayudaría a definir con mayor precisión las fuentes sismogénicas presentes en este estado; por lo tanto, es necesario instalar una red sísmica local que permita cuantificar mejor la importante deformación que se produce en todo el estado o en todo caso, instalar un mayor número de estaciones que mejore la cobertura azimutal de las redes regionales a fin de registrar esta sismicidad cortical y así, logran mayor control sobre los parámetros hipocentrales de los sismos que puedan ocurrir. Asimismo, es importante ampliar y mejorar los estudios geofísicos por considerar que el estado de Tlaxcala se encuentra en continua actividad tectónica.

El mapa de Zonificación Sísmica (Figura 19) propuesto para el estado de Tlaxcala es preliminar en razón que la información utilizada de 45 sismos (en un periodo de 21 años) no es del todo representativa del real potencial sísmico del mismo. Sin embargo, el mapa propuesto puede ser considerado como referencia para identificar a las ciudades que se localizan en la zona de mayor sismicidad, por ejemplo Tlaxcala, Apizaco, Chiautempan y Huamantla, para las cuales es necesario realizar estudios más detallados a fin de determinar su verdadero riesgo y tomar medidas más estrictas en construcciones futuras a diferencia de las otras dos zonas. En tal sentido a continuación se realiza un estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala capital de este estado.

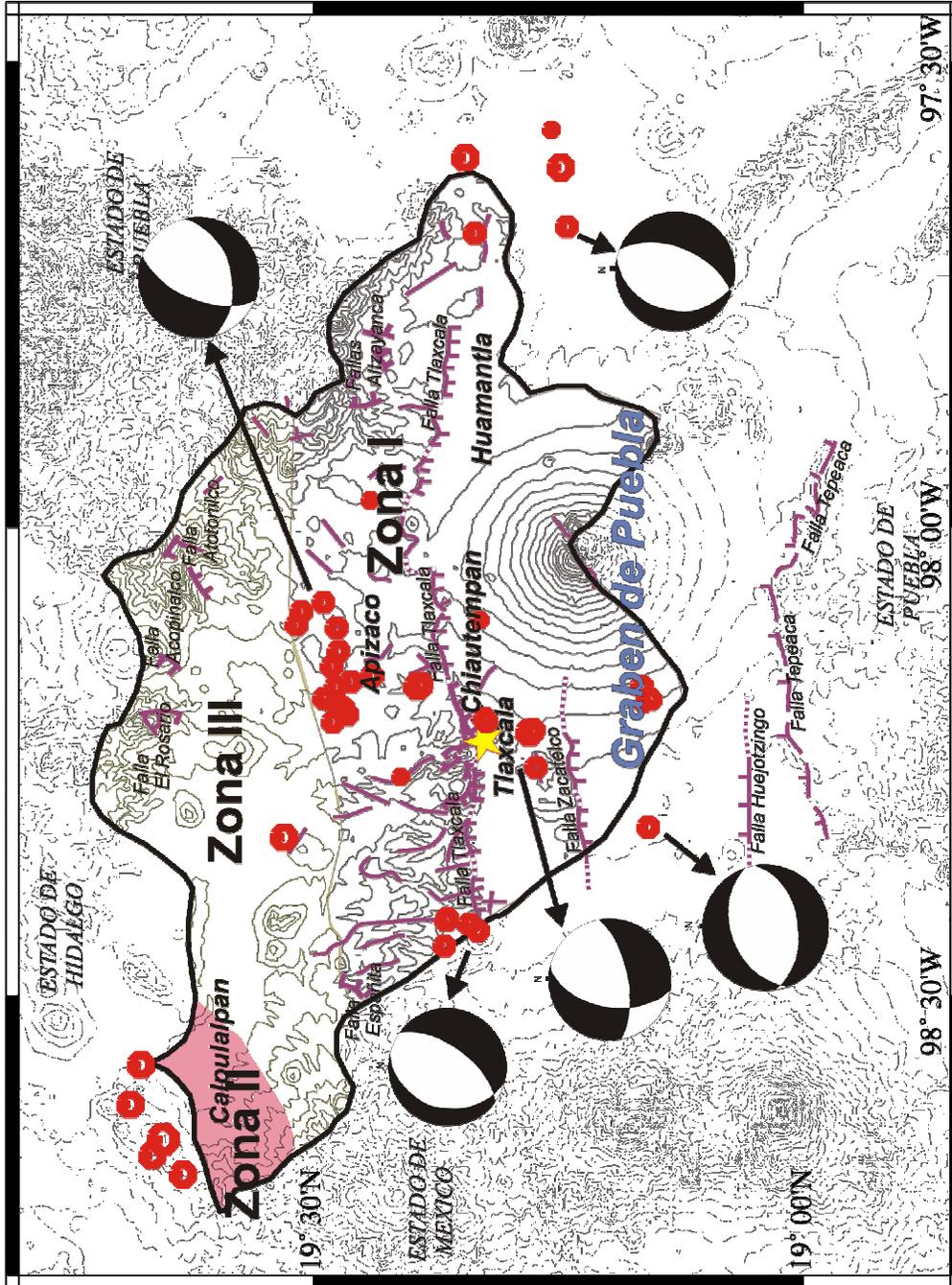


Figura 19. Mapa de Zonificación Sísmica para el Estado de Tlaxcala en función de la distribución de los sismos (círculos) y las características sismotectónicas locales (líneas continuas). La estrella indica la ubicación de la capital del estado. Las flechas indican los mecanismos focales simples y compuestos.

### CAPÍTULO III

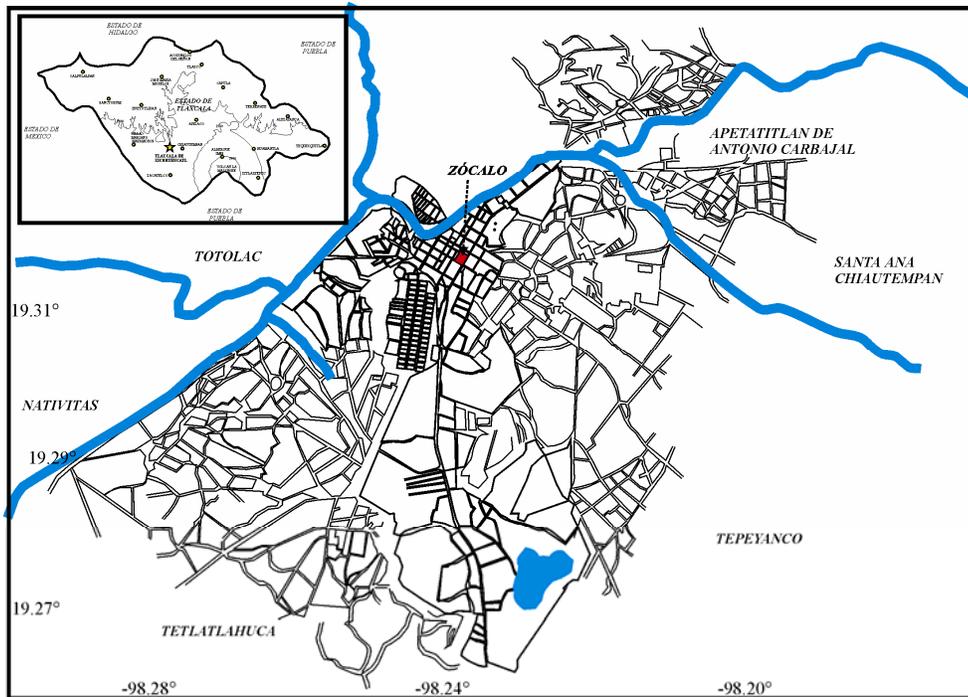
## MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE TLAXCALA

### III.1. Delimitación de áreas

#### III.1.1. Zona de estudio

La ciudad de Tlaxcala, capital del estado del mismo nombre, se localiza entre las coordenadas geográficas  $19^{\circ}25' - 19^{\circ}35'$  de latitud Norte y  $98^{\circ}18' - 98^{\circ}28'$  de longitud Oeste (Figura 20). La ciudad colinda al Norte con los municipios de Totolac y Apetatitlán de Antonio Carbajal; 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 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el municipio de Tlaxcala comprende una superficie de 41.61 kilómetros cuadrados, lo que representa el 1.02 por ciento del total del territorio estatal, el cual asciende a 4,060.923 kilómetros cuadrados.



**Figura 20.** Mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala. El recuadro relleno indica la ubicación del zócalo de la ciudad. En el extremo superior izquierdo se muestra la ubicación de las

principales ciudades del estado de Tlaxcala y con una estrella la ubicación de la ciudad capital del estado (zona de estudio).

### **III.1.2. Aspectos geológicos y geomorfológicos**

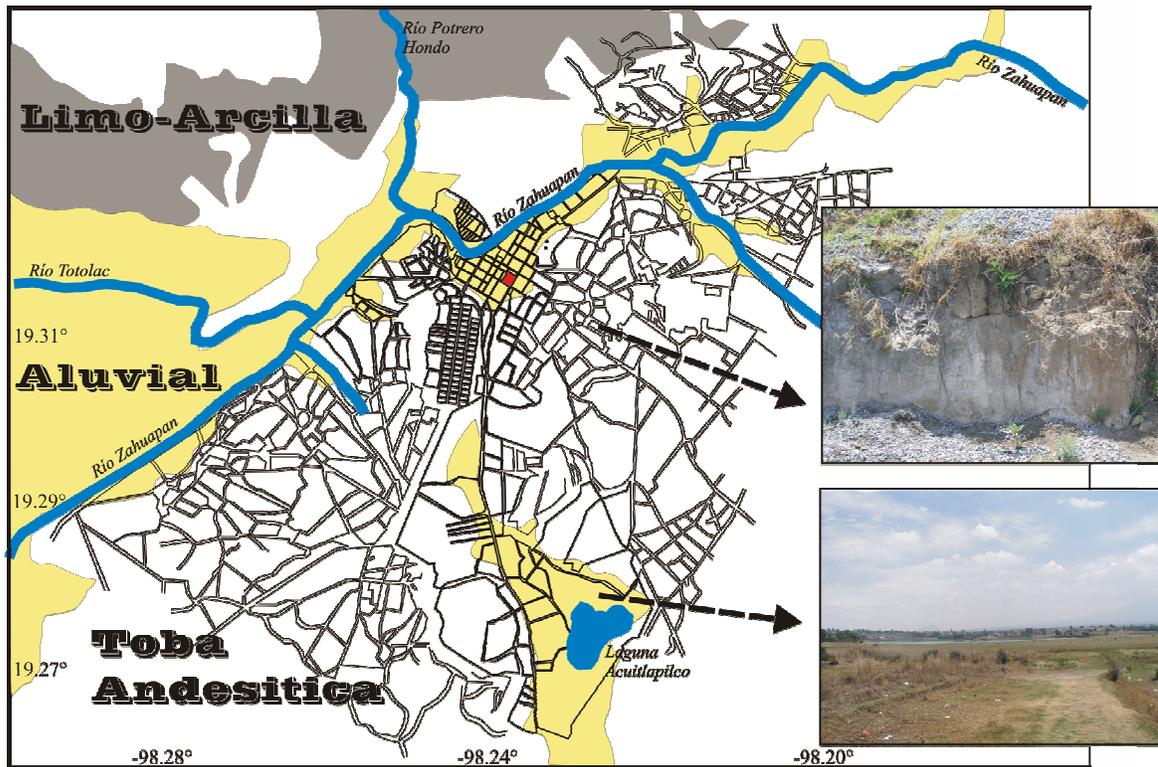
Desde el punto de vista geológico, durante el Terciario los agentes de denudación fluvial y fluvio-glaciario iniciaron en el estado de Tlaxcala una actividad tectónica intensa que condujo a la nivelación de un relieve de topografía accidentada. De esta manera, se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares en las faldas de volcanes andesíticos como La Malinche. La ciudad de Tlaxcala se localiza en el extremo NNO de este volcán, 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 (SEGOB y Gob. Edo. Tlax., 2001; INEGI, 1996 y 2000; Werner, 1993). Así mismo, SECODUVI (2000) indica que las estructuras geológicas más importantes de Tlaxcala son de origen volcánico.

Según la Figura 21 y desde un punto de vista general, en la ciudad de Tlaxcala afloran tres formaciones constituidas por rocas de diferente litología: 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.

**-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. 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 Iztaccíhuatl. 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 sílica 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 derecho de la Figura 21, 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 21, se puede observar este tipo de formación en los alrededores de la laguna de Acuitlapilco (foto, en el extremo derecho de la Figura 21).



**Figura 21.** Mapa geológico de la ciudad de Tlaxcala. De acuerdo a la intensidad del color, se distingue la Formación superior (Aluvial), media (Toba Andesítica) e inferior (Limo Arcilla). En el extremo derecho se muestra una foto de la formación superior y media.

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).

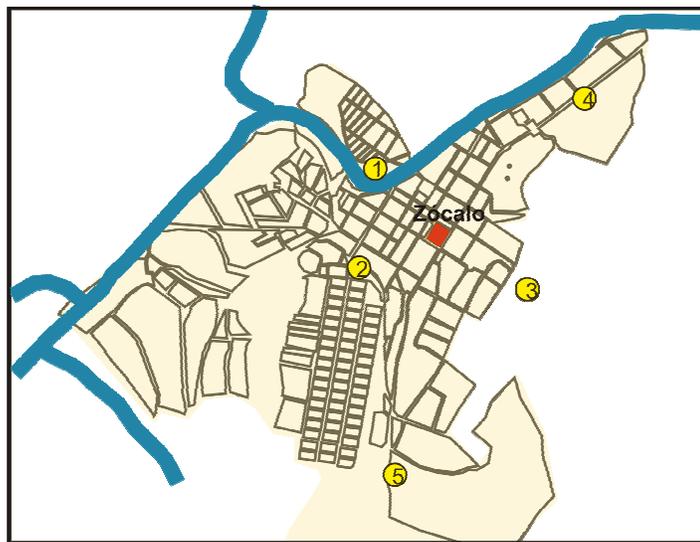
### III.1.3. Aspectos hidrológicos

En el área de la ciudad de Tlaxcala, el principal afluente es el río Zahuapan que cruza de NE a SO a la ciudad (Figura 21), 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 (perdida 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.

#### **III.1.4. 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 22, se observa la distribución de estos pozos en planta y en las Figuras 23 y 24, los cortes estratigráficos obtenidos para cada pozo. El sondeo de penetración estándar del Pozo 1, fue tomado del estudio realizado por Navarro (2000) y los cortes litológicos de los pozos 2, 3, 4 y 5 de Meneses (1996).



**Figura 22.** Mapa con la distribución de los pozos cuya información geotécnica proviene de diferentes trabajos.

En la Figura 22, se observa que el pozo 1 se ubica en el extremo Norte del zócalo de la ciudad y próximo al río Zahuapan. Este pozo tuvo una profundidad de 26 metros como se observa en la Figura 23 y fue utilizado para determinar la secuencia estratigráfica de la zona

aplicando la técnica de penetración estándar (SPT), siendo así posible medir la resistencia de los suelos, a partir del número de golpes. A continuación se describe la información resaltante:

-La litología del **Pozo 1** es mostrada en la Figura 23 y ella indica que superficialmente existen rellenos dispuestos en formas de montículos con alturas del orden de 2 metros que subyacen en forma discordante sobre suelos limosos o arcillosos de consistencia media, así como gravas gruesas con arenas de compacidad media a densa. A profundidades de 25.4 metros se detectó la presencia de una arena con gravas y limo de compacidad densa (mas de 40 golpes).

Los 4 pozos tomados de Meneses (1996) se ubican en diferentes puntos de la ciudad, tal como se observa en la Figura 22 y son mostrados en la Figura 24. Estos pozos fueron perforados por instituciones de Tlaxcala tales como S.C.T, CAPAN y SECODUVI. La información extraída de cada pozo se describe a continuación:

-**El Pozo 2**, fue perforado en la Calle 1ro de Mayo (Blvd., Leonardo Gómez) a pocos metros del zócalo de la ciudad. Este pozo tuvo una profundidad de 24.80 metros y según su corte litológico presenta las siguientes características: hasta una profundidad de 4.8 m se ha identificado la existencia de arena arcillosa de color café y entre los 4.8 a 14.30 metros arena limosa poco consolidada. A mayor profundidad aparece arena arcillosa.

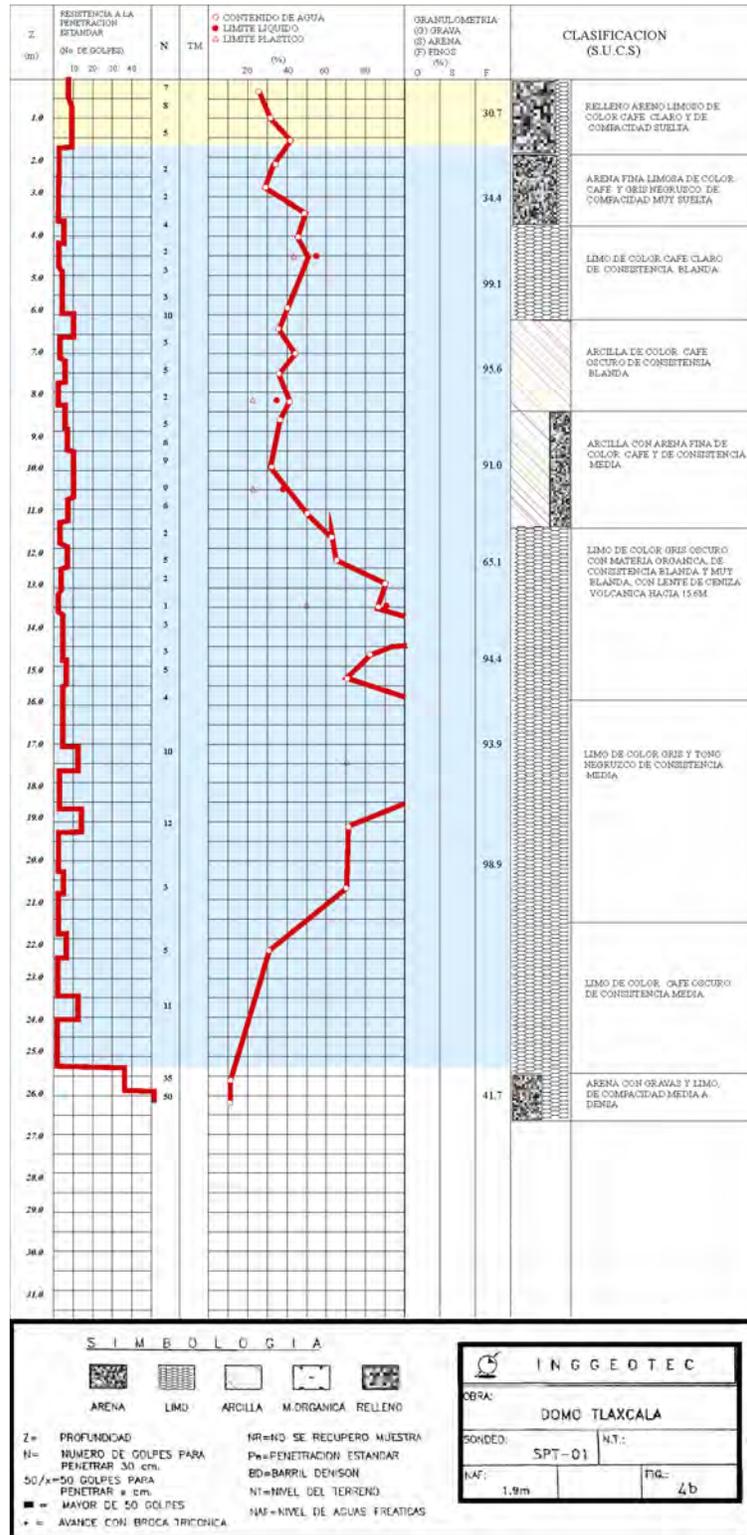
-**El Pozo 3**, fue perforado en el Fraccionamiento “El Sabinal” (Tlaxcala) a menos de un kilómetro en dirección SE del zócalo de la ciudad. Dicho pozo alcanzó una profundidad de 180 metros y según su corte litológico presenta las siguientes características: hasta los 70 metros de profundidad existirían tobas alteradas, y a mayores profundidades, la existencia de arena media con la presencia de gravas.

-**El Pozo 4**, se perforó en Industrias Club del Estado de Tlaxcala y a aproximadamente 1.8 km en dirección NE con respecto al zócalo de la ciudad. Este pozo tuvo una profundidad de 150 metros y según su corte litológico presenta las siguientes características: hasta una profundidad de 30 metros se identifica la presencia de arcilla arenosa. A mayores profundidades existirían intercalaciones de arena fina y gruesa con arcilla compacta.

-**El Pozo 5**, se ubicó en la Colina II (SECODUVI) Tlaxcala a aproximadamente 1.5 km en dirección Sur con respecto al zócalo de la ciudad. El pozo tuvo una profundidad de 180 metros y según su corte litológico presenta las siguientes características: hasta una profundidad de 165 metros estaría constituida por arcilla compacta de consistencia media a alta y por debajo de la misma fue posible identificar arenas gruesas.

De acuerdo a la descripción realizada para los 4 cortes litológicos, se puede concluir que los pozos 2 y 4 presentan estratos superiores con espesores menores e iguales a 30 metros y con características similares a los primeros 25 metros del pozo 1 (limo-arcilla de consistencia blanda). Con respecto a los pozos 3 y 5, se observa que no hay presencia de estratos aluviales y tan solo siguen una litología compuesta por tobas andesíticas en su estrato más superficial con espesores de 70 y 165 m respectivamente.

### POZO 1



**Figura 23.** El sondeo de penetración estándar del Pozo 1 y su respectivo corte estratigráfico (Navarro, 2000).

**POZO 2**

Corte litológico en Calle 1º de mayo  
Blvd. Leonardo Gómez  
(Información proporcionada por S.C.T., Tlaxcala)

Profundidad en metros	Estratigrafía	Clasificación
4.80		Arena arcillosa café
10.80		Limo arenoso gris frime y blando
14.30		Arena limosa gris de suelta a poca compacta
17.50		Arcilla arenoso gris blanda
24.30		Arena arcillosa

**POZO 3**

Corte litológico del pozo ubicado en el Fraccionamiento "El Sabinal", Tlaxcala.  
(Información proporcionada por SECODUVI, Tlaxcala)

Profundidad en metros	Estratigrafía	Clasificación
70.00		Toba alterada
120.00		Arena media
180.00		Arena con gravas

**POZO 4**

Corte litológico ubicado en Industrias Club del Estado de Tlaxcala.  
(Información aportada por CAPAM, Tlaxcala)

Profundidad en metros	Estratigrafía	Clasificación
30.00		Arcilla arenosa
38.00		Arena fina
53.00		Arcilla compacta
60.00		Arena gruesa
72.00		Arcilla compacta
87.00		Arena gruesa con arcilla
102.00		Arcilla compacta
106.00		Arena arcillo
135.00		Arcilla compacta
150.00		Arenas finas

**POZO 5**

Corte litológico del pozo "La Colina II", SECODUVI, Tlaxcala.  
(Información de SECODUVI, Tlaxcala)

Profundidad en metros	Estratigrafía	Clasificación
165.00		Toba y Arcilla compacta
180.00		Arenas gruesas

**Figura 24.** Cortes litológicos de los pozos 2, 3, 4 y 5 (tomados de Meneses 1996).

En resumen, el estudio geotécnico más completo con el que se cuenta para la zona en estudio es el realizado por Navarro (2000). Este pozo 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 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 esta compuesto por arena con gravas de limo de compacidad media a densa.

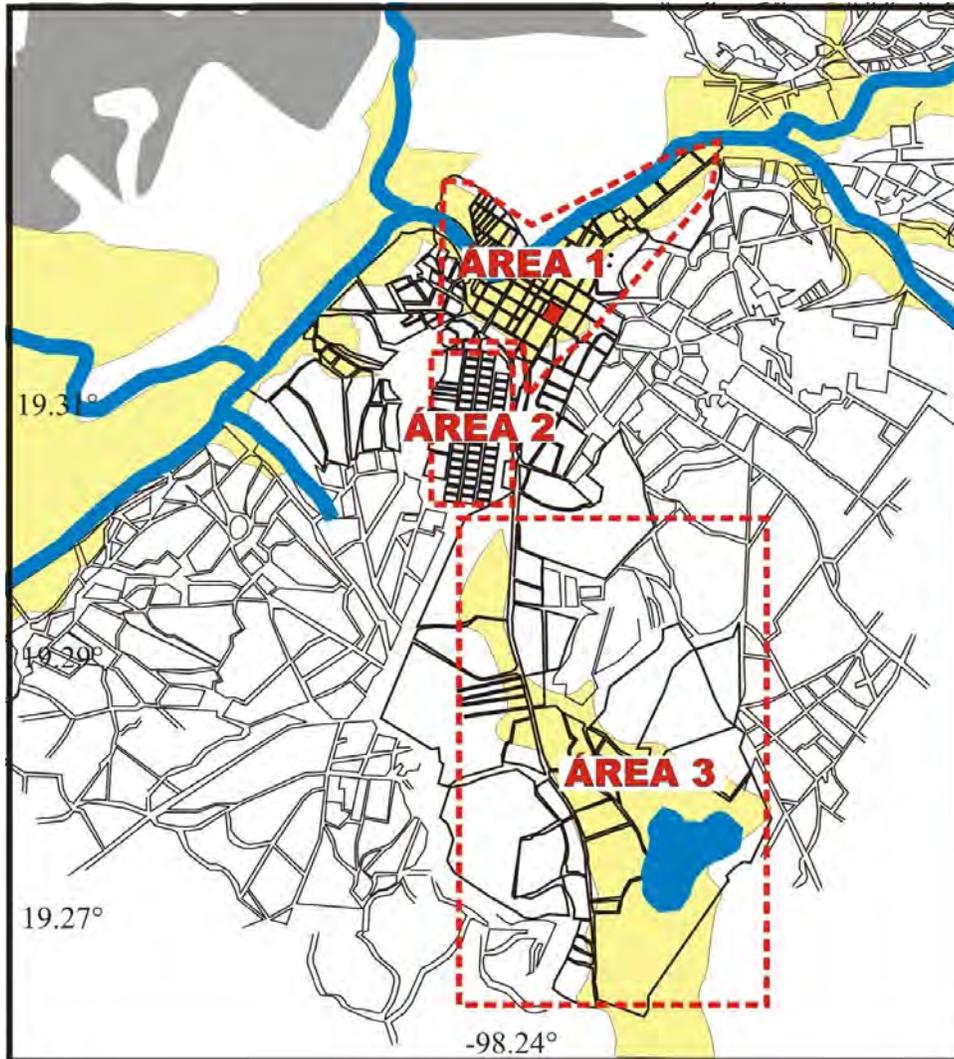
### **III.1.5. Distribución de las áreas**

A fin de realizar la evaluación de los suelos de la ciudad de Tlaxcala y estimar el comportamiento dinámico de estos, en los incisos siguientes de este trabajo se dividirá la ciudad en tres áreas, tal como se observa en la Figura 25. Estas áreas son delimitadas teniendo en cuenta los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos antes descritos. Además se considera la distribución de viviendas y la densidad poblacional (INEGI 2000).

**El área 1**, se localizaría 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 por ende la mayor densidad poblacional.

**El área 2**, se localiza sobre los afloramientos de la *formación media* constituida por 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 las viviendas y a una regular densidad poblacional del total de la ciudad de Tlaxcala (en función del área que abarca).

**El área 3**, se localiza sobre la *formación superior* a 2200 metros sobre el nivel del mar. Esta formación 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. 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 con una menor densidad poblacional respecto a las otras.



**Figura 25.** Mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala y la delimitación con recuadros de líneas discontinuas las áreas 1, 2 y 3 definidas a partir de la geología, geomorfología, hidrogeología, geotécnica y la distribución de las viviendas. El recuadro rojo indica la ubicación del zócalo de la ciudad.

### **III.2. Aproximación experimental del efecto de sitio**

El efecto de sitio, 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 primeras decenas de metros de la superficie terrestre (Sauter, 1989; Chávez-García et al., 1996; Reinoso, 2000). Cualquier medio al ser afectado por una onda puede causar la amplificación o de-amplificación de la misma, de acuerdo a la variación de las propiedades físicas del suelo y que en general, se encuentra en las capas estratigráficas de diferente composición geológica y geometría (Riquer et al., 2003; Leyva, 2004).

Una manera muy simplificada de explicar el efecto de sitio es idealizando las condiciones geológicas de un sitio como una capa plana sobre un semi-espacio (es decir un modelo unidimensional), el efecto del mismo está definido por dos parámetros: una frecuencia fundamental de resonancia y sus múltiplos; y un valor de amplificación con respecto al movimiento sísmico en roca (Lermo y Chávez-García, 1994a,b; Flores-Estrella, 2001).

La práctica ha demostrado que para determinar cuantitativamente los parámetros de la respuesta sísmica de cada unidad geológica y así evaluar el efecto de sitio, es necesario contar con datos de registros de movimientos fuertes y movimientos débiles, a falta de estos registros frecuentemente se utiliza registros de microtemblores (Kanai y Tanaka, 1954). Se denomina microtemblores al registro del ruido ambiental en un determinado punto de interés. La idea es que de acuerdo a la constitución del suelo, la amplitud y contenido frecuencial del ruido son diferentes y expresan de manera indirecta la posible constitución del suelo. La fuente de los microtemblores está ligada a actividades humanas; por lo tanto, reflejarían el ciclo del quehacer humano. En su conjunto, el espectro de ruido tendrá picos asociados a diferentes frecuencias. Tradicionalmente, se distingue entre el ruido de origen natural (frecuencias menores a 1 Hz) conocido como “microtemblores”, del ruido causado por el hombre (frecuencias mayores a 1 Hz) al que se le conoce como “microtemblores” (Okada, 2003). En su conjunto, el espectro de dicha señal tendrá picos asociados a diferentes frecuencias características del medio en el cual las ondas se propagaron, denominados microtemblores o vibración ambiental.

En este estudio se determinaron los efectos de sitio para la ciudad de Tlaxcala utilizando registros de microtemblores y aplicando la técnica de Nakamura (Nakamura, 1989). En efecto, Nakamura propone como hipótesis de base, que los microtemblores se deben principalmente a la excitación de ondas Rayleigh y que el efecto de fuente puede estimarse con el cociente entre las componentes verticales del movimiento en la superficie y en la base de la estratificación. Además, se considera la hipótesis de que el cociente entre el movimiento horizontal y vertical en la base de la estratificación es unitario. Una aproximación del efecto de sitio sobre la componente horizontal es el cociente espectral entre las componentes horizontales y la vertical en la superficie. Si se acepta esta hipótesis, el procedimiento permite compensar, al menos de manera parcial el efecto de la fuente y soluciona uno de los mayores problemas para la aplicación de microtemblores (Finn, 1991). En efecto, la poca información

acerca de la fuente que excita los microtemores ha sido señalada como uno de los mayores obstáculos a la interpretación de los registros (Aki, 1988; Lermo y Chávez-García, 1995). Cabe indicar que esta técnica ha sido utilizada en diversos estudios por diversos autores obteniendo resultados aceptables, basándonos en el trabajo realizado por Lermo y Chávez-García (1994 a,b), quienes comparan resultados obtenidos con microtemores aplicando la técnica de Nakamura contra los obtenidos con registros de sismos aplicando el método Estándar (considera una estación en suelo firme), llegaron a la conclusión que cuando los microtemores son analizados utilizando la técnica de Nakamura, muestran con buena resolución el periodo dominante ( $T_0$ ) en los sedimentos sujetos a una amplificación dinámica con intervalos de frecuencias entre 0.3-10 Hz, además de una estimación del nivel de amplificación ( $A_r$ ).

### ***III.2.1. Adquisición de datos***

A fin de obtener los registros de microtemores, durante el trabajo de campo se utilizaron dos tipos de sensores:

- 3 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.

- 3 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 son conectados a un registrador Kinematics K2 de 24 bits cuya sensibilidad es de 104857.6 cuentas/V. La señal fue registrada a 100 muestras por segundo.

Para la selección de los puntos donde se registrará los microtemores, se consideraron las 3 áreas delimitadas en el inciso III.1. El área 1 contiene la mayor densidad poblacional y viviendas edificadas sobre suelos sedimentarios fluviales; área 2, de regular densidad poblacional (en función del área que abarca) y viviendas edificadas sobre tobas andesíticas en un área pequeña y el área 3, de menor densidad poblacional, y viviendas edificadas sobre suelos sedimentarios lacustre distribuidas en una área de gran extensión.

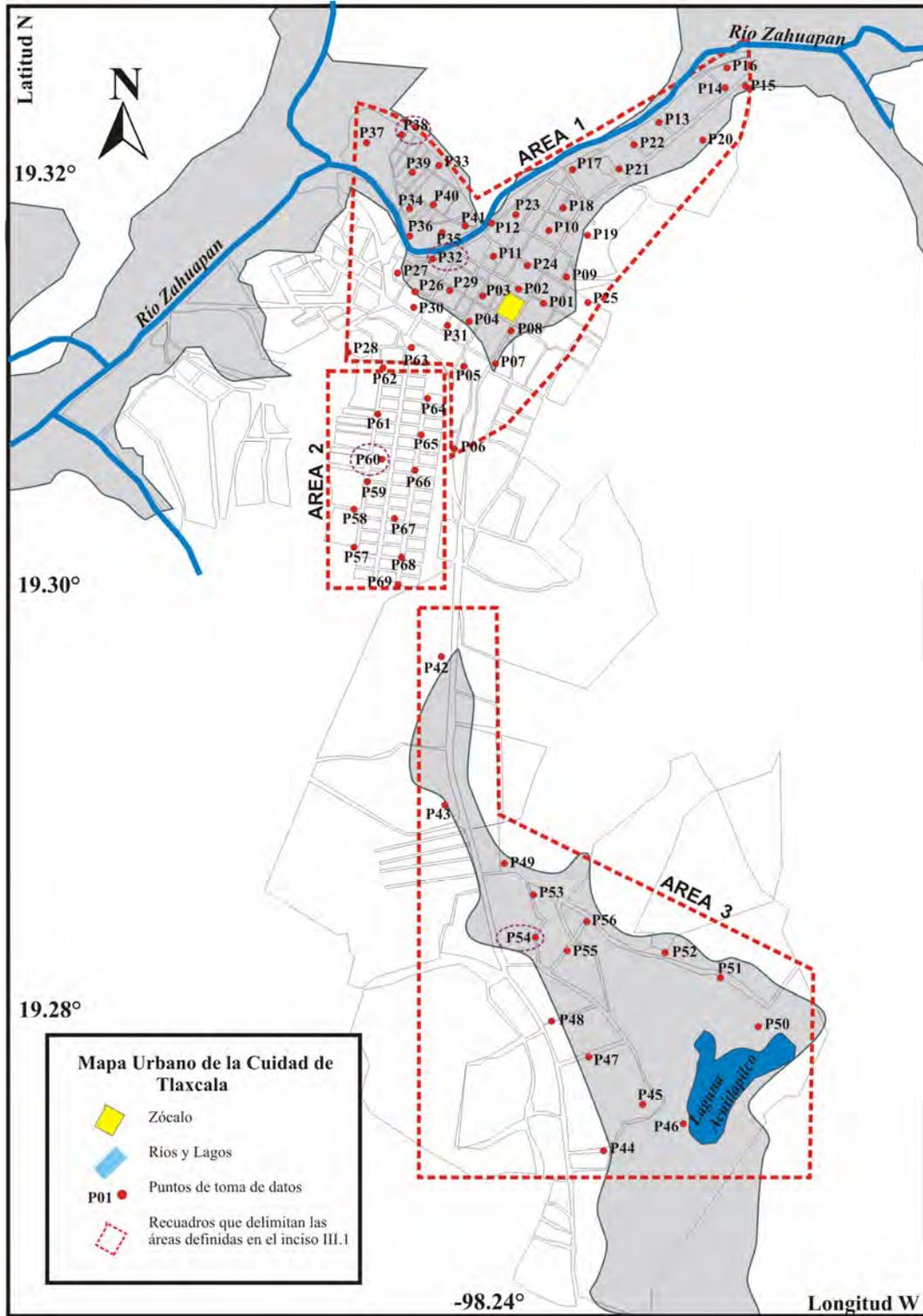
De acuerdo a esta distribución, el trabajo se realizó de la siguiente manera:

- 1.-Los puntos de toma de datos fueron seleccionados con anterioridad siguiendo el mapa catastral de Tlaxcala y las áreas identificadas anteriormente, con la finalidad de decidir la densificación de los puntos a considerar para la adquisición de información. De acuerdo a la Figura 26, del total de puntos, 41 se encuentran en el área 1 (P1-P41) sobre suelos aluviales (sedimentarios), 13 en la área 2 (P57-P69) sobre tobas andesíticas y 15 puntos en el área 3 (P42-P56) sobre suelos lacustre (sedimentarios). El mayor número de puntos se distribuye sobre el área 1, ya que ahí se concentra el mayor número de viviendas, edificaciones colonias y el zócalo de la ciudad.

2.- Durante tres días, en los 69 puntos seleccionados se procedió a registrar dos muestras de señal de microtemores con ventanas de tiempo de 2 minutos. En general, los sensores fueron separados aproximadamente medio metro entre ellos y luego se orientaron y nivelaron, tal como se puede observar en la Figura 27. Posteriormente, al momento de registrar, se evitó el paso de peatones cercanos a la zona de registro (en algunas ocasiones se tuvo que realizar más de una vez la toma de datos, para evitar picos en los registros, por el paso de autos en el centro de la ciudad). En cada punto se anotó la hora del registro, su ubicación y sus coordenadas geográficas (GPS). Esta información se encuentra en la Tabla 4.

3.-Las señales fueron registradas por los sismómetros y acelerómetros, y posteriormente transferidas a una PC. Una vez cambiados su formato a ASCII, fueron visualizados y analizados con el algoritmo DEGTRA 2000 (Ordáz y Montoya, 2000), tal como se observa en las Figuras 28 y 29. En las figuras antes indicadas, cada ventana considera 120 segundos de señal y de ellas se procede a seleccionar ventanas de aproximadamente 20 segundos a fin de considerar señales con amplitudes promedio como característica de cada punto de registro de datos tal como se observa en la Figura 28.

4.-Para los diferentes puntos se consideraron 5 ventanas de señal (dependiendo del registro), para cada una se hizo la corrección por línea base, para luego cuantificar el espectro de Fourier suavizado con una ventana cuadrada de 1/3 de octava de ancho para cada componente y ventana. En la Figura 28, se presenta un ejemplo de una ventana seleccionada de estos registros de microtemores en sus tres componentes con su respectivo Espectro de Fourier. Posteriormente, se procedió a calcular los cocientes espectrales ó funciones de transferencia y cuyo ejemplo se muestra en la Figura 29.



**Figura 26.** Mapa catastral de ciudad de Tlaxcala con la distribución de los 69 puntos, donde se tomaron datos. Las elipses de líneas discontinuas encierran a los puntos que se consideraran como representativas de la zona.



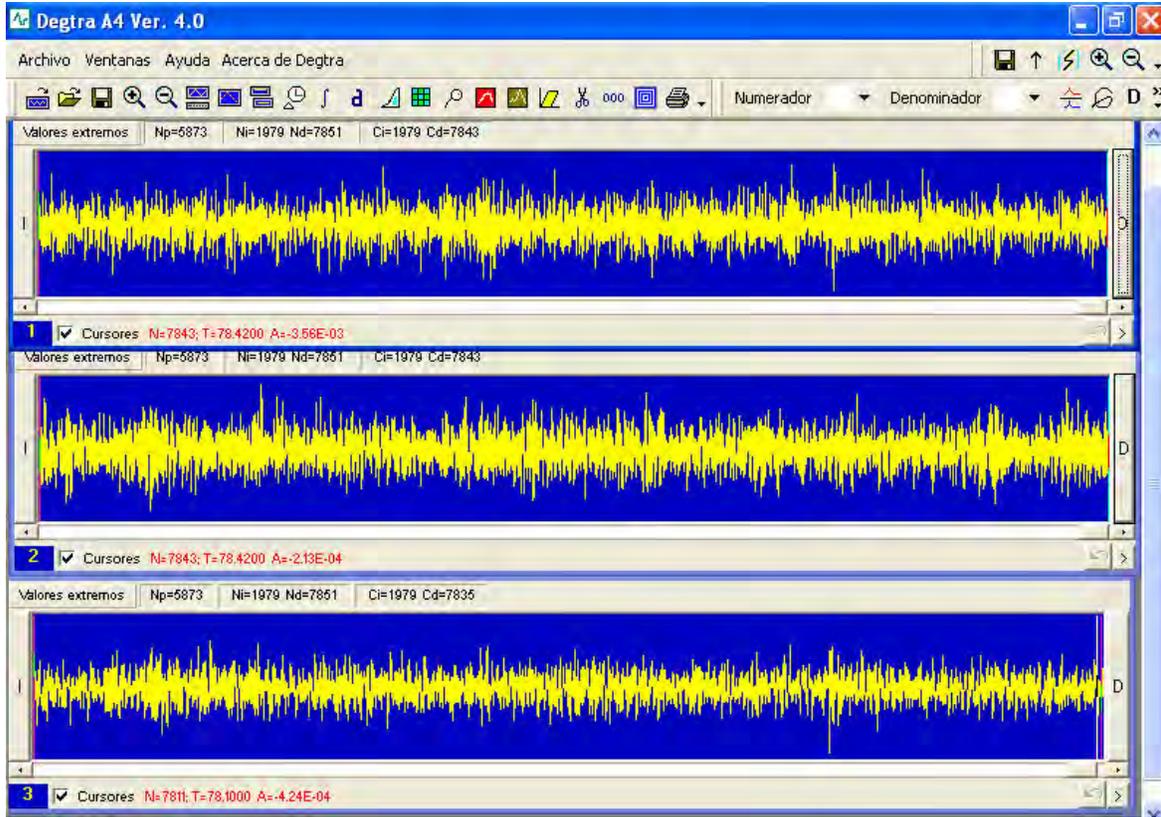
**Figura 27.** *Imágenes correspondientes al trabajo de campo realizado para la obtención de los registros de microtemores. A) muestra la disposición de los equipos, B) y C) toma de datos en el área 1, en la periferie y el zócalo de la ciudad. D) Toma de datos en el área 2 y E) Toma de datos en el área 3, próximo a la laguna de Acuitlapilco.*

**Tabla 4.** *Información de cada punto donde se tomó datos*

Puntos	Hora	Archivo	Ubicación	Comentarios	GPS
<b>Día 02/04/04</b>					
P1	11:40	IP002	Av. Lardizabal	Dirección de Telecomunicaciones	19°18.979' 98°14.170' 2251msnm
P2	12:16	IR001	Av. Lardizabal	Dirección de Telecomunicaciones	19°19.038' 98°14.255' 2251msnm
P3	12:28 12:31	IS001 IS002	Av. 20 de Noviembre		19°19.015' 98°14.363' 2210msnm
P4	12:41 12:45	IT001 IT002	Privada Hidalgo		19°18.925' 98°14.399' 2260msnm
P5	12:55 12:57	IU001 IU002	Porfirio Díaz		19°18.810' 98°14.425' 2282msnm
P6	1:10 1:15	IV001 IV002	Av. Tepeticpac		19°18.541' 98°14.454' 2296msnm
P7	1:39 1:40	IW001 IW002	Av. Independencia		19°18.807' 98°14.330' 2271msnm
P8	1:54 1:56	IX001 IX002	Av. Independencia		19°18.919' 98°14.269' 2222msnm
P9	2:08 2:10	IY001 IY002	Calle Tlahuicole	Jardín San Nicolás (parque)	19°19.070' 98°14.098' 2251msnm
P10	2:20 2:22	IZ001 IZ002	Calle Zitlalpopocal		19°19.232' 98°14.130' 2249msnm
P11	2:40 2:42	JA001 JA002	Pasaje Juan Cuamatzi		19°19.138' 98°14.332' 2242msnm
P12	2:52 2:55	JB001 JB002	Blvd. Emilio Sánchez		19°19.257' 98°14.319' 2252msnm
P13	3:11 3:14	JC001 JC002	Bodega Olverá		19°19.465' 98°13.929' 2252msnm
P14	3:23 3:26	JD001 JD002	Calle del Bosque		19°19.521' 98°13.747' 2258msnm
P15	3:36 3:38	JE001 JE002	Av. Juárez #137		19°19.656' 98°13.530' 2251msnm
P16	3:50 3:52	JF001 JF002	Blva. Emilio Sánchez		19°19.723' 98°13.535' 2263msnm
P17	4:04 4:06	JG001 JG002	Calle Justo Cierra (Lira y Ortega)	Hospital IZTA (4 niveles)	19°19.410' 98°14.065' 2265msnm
P18	4:16 4:18	JH001 JH002	Colegio de Bachillerato de Tlaxcala		19°19.283' 98°14.107' 2245msnm
P19	4:31	JI001	Av. Alfonso de Escalona (oval)	Se lleno tarjeta	19°19.168' 98°14.049' 2283msnm
P20	5:47 5:51	JJ001 JJ002 JJ003 JJ004	Privada Guillermo Valle		19°19.506' 98°13.602' 2249msnm
P21	6:10 6:12	JK001 JK002		Atrás del Hospital	19°13.389' 98°14.026' 2248msnm
P22	6:29 6:31	JL001 JL002	Guillermo Valle	Of. Sedesol	19°19.470' 98°13.859' 2235msnm
P23	6:43 6:45	JM001 JM002	Mercado Central	Parada de buses	19°19.310' 98°14.224' 2242msnm
P24	6:59 7:01	JN001 JN002	Guríde Alcocer		19°19.107' 98°14.200' 2242msnm
P25	7:14 7:17	JO001 JO002	Guride Alcocer	Of. Sedesol	19°19.017' 98°14.049' 2244msnm
P26	7:34 7:36	JP001 JP002	Av. Hidalgo		19°19.023' 98°14.566' 2258msnm
P27	7:45 7:47	JQ001 JQ002	Jardín de la Corregidora		19°19.093' 98°14.654' 2258msnm
<b>Día 03/04/04</b>					
P28	8:20 8:22	JS001 JS002	Terminal de Autobuses	Hotel Mesón del Rey	19°18.864' 98°14.830' 2254msnm
P29	8:37 8:39	JT001 JT002	Muñoz Camargo		19°19.038' 98°14.464' 2236msnm
P30	8:56 8:58	JU001 JU002	Escalinatas Mariano Sánchez	Calle privada	19°18.966' 98°14.579' 2253msnm

P31	9:08 9:10	JV001 JV002	Av. Allende	Parte alta	19°18.932' 98°14.477' 2238msnm
P32	9:25 9:27	JW001 JW002	Primero de Mayo		19°19.132' 98°14.507' 2236msnm
P33	9:46 9:48	JX001 JX002	Calle Buganvilla		19°19.417' 98°14.503' 2240msnm
P34	10:01 10:03	JY001 JY002	Emilio Sánchez Piedra		19°19.273' 98°14.610' 2239msnm
P35	10:19 10:21	JZ001 JZ002	Escuela Normal Urbana Federal Emilio Sánchez Piedra		19°19.203' 98°14.459' 2242msnm
P36	10:38 10:39	KA001 KA002	Av Leonardo Gómez Blanco		19°19.188' 98°14.604' 2246msnm
P37	10:53 10:54	KB001 KB002	Centro Expositor de Tlaxcala		19°19.496' 98°14.759' 2244msnm
P38	11:03 11:06	KC001 KC002	Bulevar de los Deportes	Puerta: centro expositor de Tlax.	19°19.520' 98°14.620' 2241msnm
P39	11:15 11:17	KD001 KD002	Calle Artesanías		19°19.406' 98°14.589' 2240msnm
P40	11:29 11:31	KE001 KE002	Av. Cárdenas con Zahuapan		19°19.284' 98°14.517' 2252msnm
P41	11:40 11:42	KF001 KF002			19°19.225' 98°14.431' 2245msnm
P42	12:03 12:04	KG001 KG002	Post-Grado (UAT)	Salida a Puebla	19°17.907' 98°14.511' 2305msnm
P43	12:16 12:18	KH001 KH002	Calle Insurgentes		19°17.430' 98°14.484' 2301msnm
P44	12:31 12:33	KI001 KI002	Lago Acuitlapilco	Punto A, del Lago	19°16.359' 98°13.979' 2291msnm
P45	12:48 12:49	KK001 KK002		Punto B, del Lago	19°16.502' 98°13.789' 2293msnm
P46	1:02 1:04	KL001 KL002	Lago Acuitlapilco	Punto D, del Lago (pto. más cerca)	19°16.471' 98°13.737' 2295msnm
P47	No se registro				19°16.666' 98°14.005' 2308msnm
P48	1:39 1:41	KN001 KN002	Calle Paraíso		19°17.078' 98°14.039' 2300msnm
P49	1:57 1:59	KO001 KO002	Porfirio Díaz	Frente a Cometra	19°17.246' 98°14.311' 2307msnm
P50	2:14 2:16	KP001 KP002	Lago Acuitlapilco	Hotel Acuitlapilco	19°16.704' 98°13.477' 2298msnm
P51	2:26 2:28	KQ001 KQ002			19°16.873' 98°13.523' 2306msnm
P52	2:41 2:43	KR001 KR002	Emilio Sánchez Piedra		19°16.972' 98°13.789' 2307msnm
P53	2:53 2:55	KS001 KS002	Privada de Zaragoza N°5		19°17.179' 98°14.228' 2301msnm
P54	3:06 3:08	KT001 KT002	Privada Zaragoza		19°17.023' 98°14.201' 2300msnm
P55	3:23 3:24	KU001 KU002			19°16.980' 98°14.112' 2301msnm
P56	3:34 3:36	KV001 KV002			19°17.078' 98°14.039' 2300msnm
<b>Día 04/04/04</b>					
P57	03:59 04:01	MG001 MG002	Esquina de la Av. Universidad C8 (Calle 8)		19°18.172' 98°14.757' 2337msnm
P58	04:16	MH001	Sobre La Calle 8		19°18.300' 98°14.764' 2324msnm
P59	04:28	MI001	Entre La Calle 8 y La Calle 25		19°18.407' 98°14.730' 2330msnm
P60	04:38	MJ001	Entre La Calle 8 y La Calle 19		19°18.515' 98°14.687' 2322msnm
P61	04:49	MK001	Calle 8		19°18.640' 98°14.727' 2295msnm
P62	04:57	ML001	Calle 8		19°18.799' 98°14.704' 2294msnm
P63	05:08	MM01	Calle 8	Escuela Primaria Urbana Federal (frente estatua)	19°19.070' 98°14.098' 2251msnm
P64	05:18	MN001	Entre La Calle 4 y Calle 9		19°18.710' 98°14.554' 2286msnm
P65	05:27	MO001	Calle 4, antes de llegar a la Calle 15		19°18.608' 98°14.563' 2305msnm
P66	05:37	MP001	Calle 4, antes de llegar a la Calle 21		19°18.492' 98°14.573' 2303msnm
P67	05:49	MQ001	Calle 29, cerca a la Calle 4		19°18.331' 98°14.608' 2309msnm
P68	06:00	MR001	Calle 4, cerca de Calle 4		19°18.198' 98°14.599' 2315msnm
P69	06:12	MS001	Helipuerto		19°18.007' 98°14.875'

					2326msnm
--	--	--	--	--	----------



**Figura 28.** Ejemplo de una ventana seleccionada de los registros de microtemores (velocidad) en sus tres componentes (1, 2 y 3).

### III.2.2. Estimación de la respuesta dinámica

Para la estimación de la respuesta dinámica se utilizaron registros de microtemores y se aplicó la técnica de Nakamura; es decir, la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro. El principio básico de esta técnica, considera que únicamente las componentes horizontales del registro de microtemores son afectados por la estructura local (Lermo y Chávez-García, 1994 a,b; Lachet and Bard, 1994). Usando los registros de microtemores se calculan los espectros de Fourier (ventana de 20 segundos), tanto para los registros en velocidad como en aceleración considerando sus tres componentes. A partir de estos espectros, se calcula los cocientes espectrales, también conocidos como funciones de transferencia empírica, para las dos componentes horizontales y como resultado se obtiene cuatro gráficos para cada uno de los 69 puntos, considerando en estos gráficos una banda de 0.1 a 10 Hz a fin de observar el ruido de origen natural (frecuencias menores a 1Hz) y el ruido causado por el hombre (frecuencias mayores a 1 Hz). Finalmente, para cada gráfico

se obtiene el promedio de estas funciones de transferencia a partir de una interpolación splin3 (algoritmo en Fortran), tal como se muestra en los ejemplos de la Figura 29.

Para identificar la frecuencia predominante, se procede a analizar las funciones de transferencia empírica a fin de visualizar las frecuencias asociadas a la máxima amplitud en ambas componentes horizontales. En general, se considera que el rango frecuencial de interés para efectos de realizar una microzonificación para 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, así como amplificaciones relativas mayores a 1.5 veces.

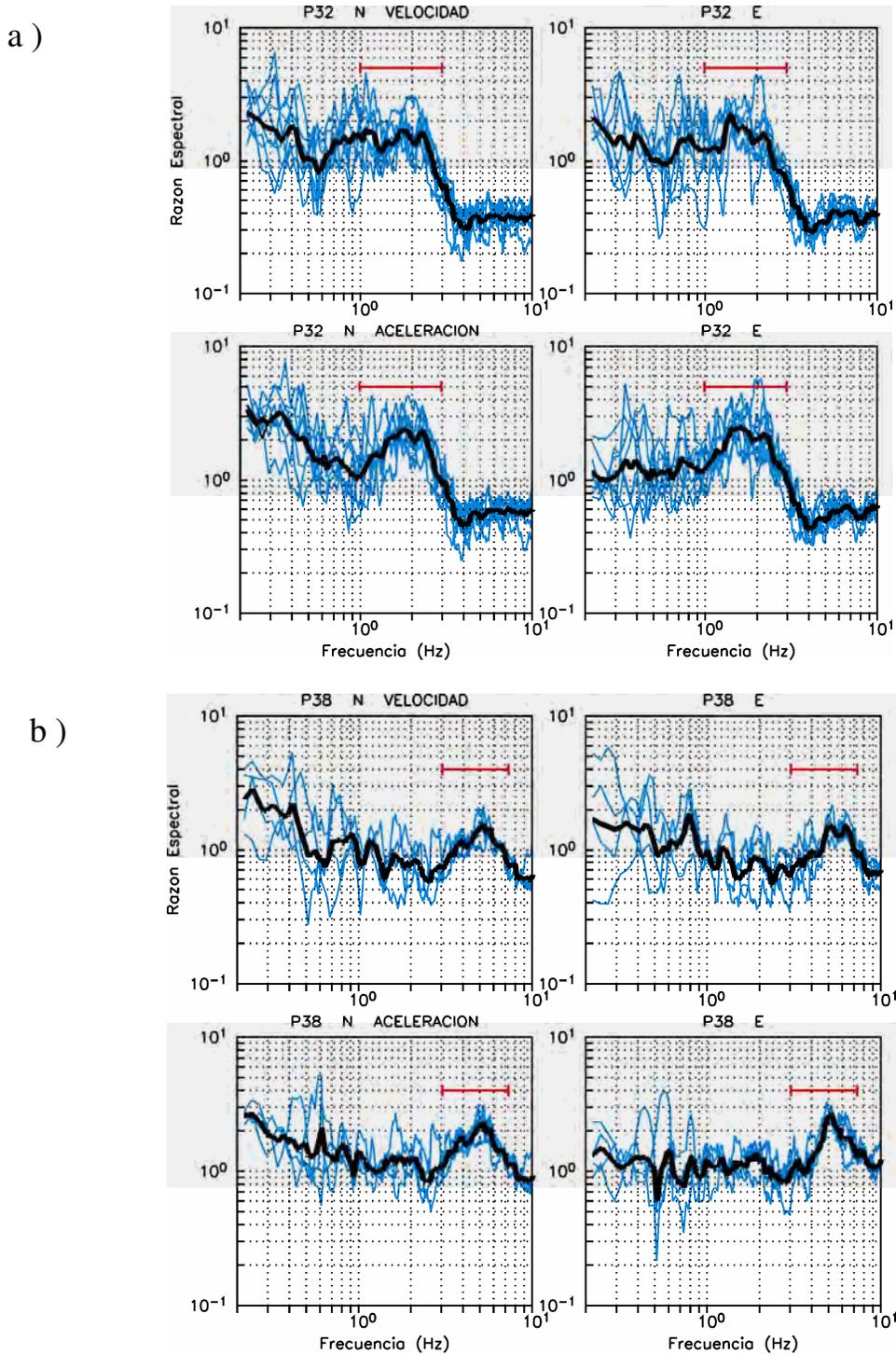
En la Figura 29 (a, b, c y d) se presentan ejemplos de las funciones de transferencia empíricas (FTE) en velocidad y aceleración para las diferentes áreas definidas en este estudio: P32 y P38 para el área 1, P60 para el área 2 y P54 para el área 3.

-En las Figuras 29a y 29b se muestra las funciones de transferencias obtenidas para el área 1, las mismas que presentan los picos de frecuencia predominantes para P32 (Figura 29a) y P38 (Figura 29b). El punto P32, 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, se localiza en la periferia de esta área y su frecuencia varía entre 3-7 Hz aproximadamente, tanto en velocidad como en aceleración. Respecto a la amplitud relativa, ésta fluctúa alrededor de 3 veces en ambos puntos. También se observa que a frecuencias menores a 1 Hz, las curvas se presentan más dispersas en las funciones de transferencia de velocidad que en aceleración probablemente debido a la sensibilidad de los sensores.

-La Figura 29c, muestra las funciones de transferencia obtenidas para el área 3 (P54) en el cual se observa con claridad que el pico predominante se registra en una banda de frecuencia de 3.5 a 7 Hz y respecto a la amplificación relativa, es de al menos 2 veces. Aquí también se observa que a frecuencias menores a 1 Hz, las curvas son más dispersas en velocidad que en aceleración.

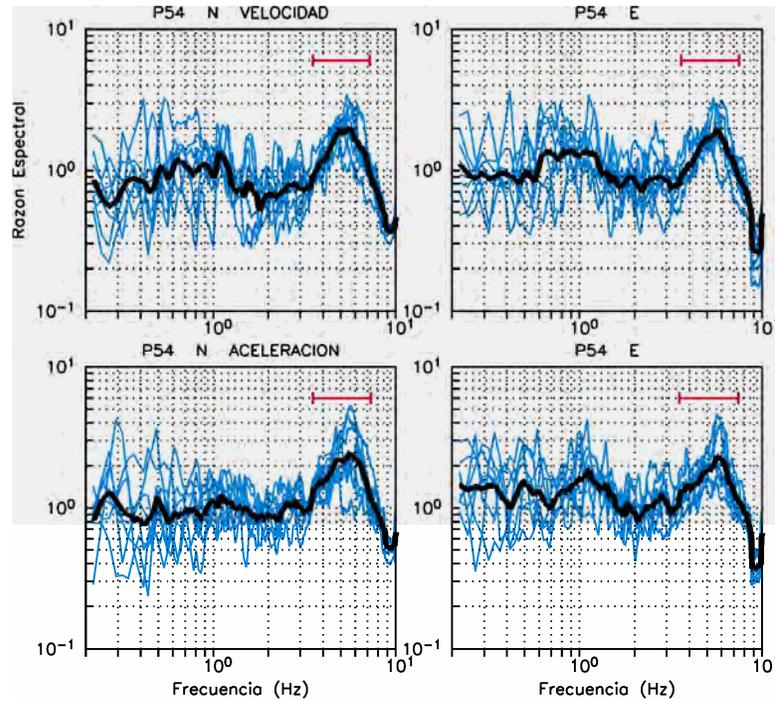
-En la Figura 29d, se muestra las funciones de transferencia obtenidas para el área 2 (P60) y en ella se observa que no existe un pico preferencial para la banda de frecuencia entre 1 y 10 Hz; sin embargo, al igual que en el área 1, por debajo de 1 Hz se observa mayor dispersión en las curvas de las funciones de transferencia en velocidad.

Las funciones de transferencia empíricas para los 69 puntos considerados en este estudio son presentados en el Anexo 2. Así mismo, cabe recalcar que se consideraron tres criterios para la selección de la frecuencia predominante: el primero, en cuanto a la frecuencia se considera un rango de interés que como anteriormente se mencionó fluctúa entre 1-10 Hz, el segundo es observar una banda de frecuencias que presenten amplificaciones relativas de al menos 1.5 veces y por último, se selecciona el pico de frecuencia más representativo y que por lo menos se presente con claridad en dos de las cuatro gráficas.

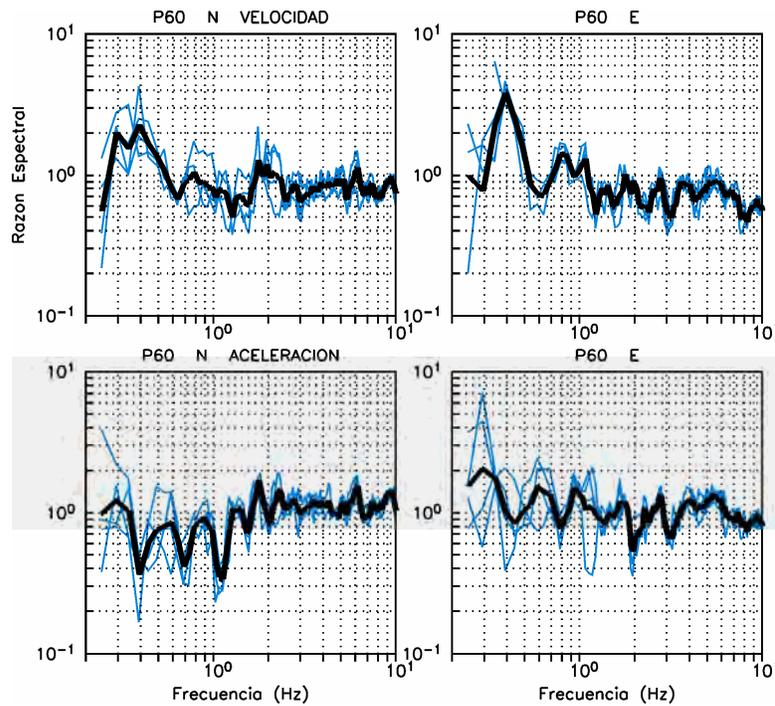


**Figura 29.** Ejemplo de gráficas de las funciones de transferencias empíricas (FTE) obtenidas en diferentes puntos de la ciudad. a) FTE, para el punto 32 localizado en el centro del área 1 próximo al río Zahuapan. b) FTE para el punto 38 localizado en la periferia del área 1. La línea negra gruesa indica el promedio de estas funciones. Las FTE corresponden a velocidad y aceleración.

c)



d)



**Figura 29.** ...Continuación. c) FTE para el punto 54 localizado en el área 3 próximo a la laguna de Acuitlapilco. d) FTE, para el punto 60 localizado en el área 2. La línea negra indica el promedio de estas funciones. 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, además se observa 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 de frecuencia en la FTE de velocidad no son muy claros conforme estos tienden a 1 Hz. En los FTE de registros en aceleración se observa mayor estabilidad. En cuanto a la amplitud, se observa variaciones al ser comparadas unas FTE contra otras, lo cual probablemente se deba a la sensibilidad de los instrumentos. Estas diferencias en la amplitud no serán discutidas ya que se encuentran fuera de sus objetivos del presente estudio.

### ***III.2.3. Mapa de isoperiodos***

El total de los valores de frecuencias predominantes obtenidas del análisis de las funciones de transferencia empíricas para cada punto corresponden a los valores promedio para cada componente horizontal. Estos valores son presentados en la Tabla 5, con su correspondiente periodo dominante ( $T_0$ ) y amplitud relativa ( $A_r$ ) estimados para la mayoría de los 69 puntos. En la Figura 30, se presenta el mapa catastral de la ciudad de Tlaxcala, la distribución de los periodos dominantes ( $T_0$ ) y las curvas de isoperiodos obtenidas para el área 1 y 3, a partir de la interpolación de los valores de  $T_0$ . Para el área 2 no se identificó una frecuencia predominante en los puntos de observación excepto en 3 de ellos; por lo tanto, se les considera como puntos sin efecto de sitio. En el extremo norte del mapa (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, en el extremo sur (área 3), las curvas correspondientes a periodos de 0.1, 0.3 y 0.5 segundos. En la Figura 31, se presenta la distribución de las amplitudes relativas ( $A_r$ ) estimadas para la mayoría de los 69 puntos, la misma que en algunos casos es de 4 y 6 veces.

*Las curvas de isoperiodo se concentran en dos zonas:*

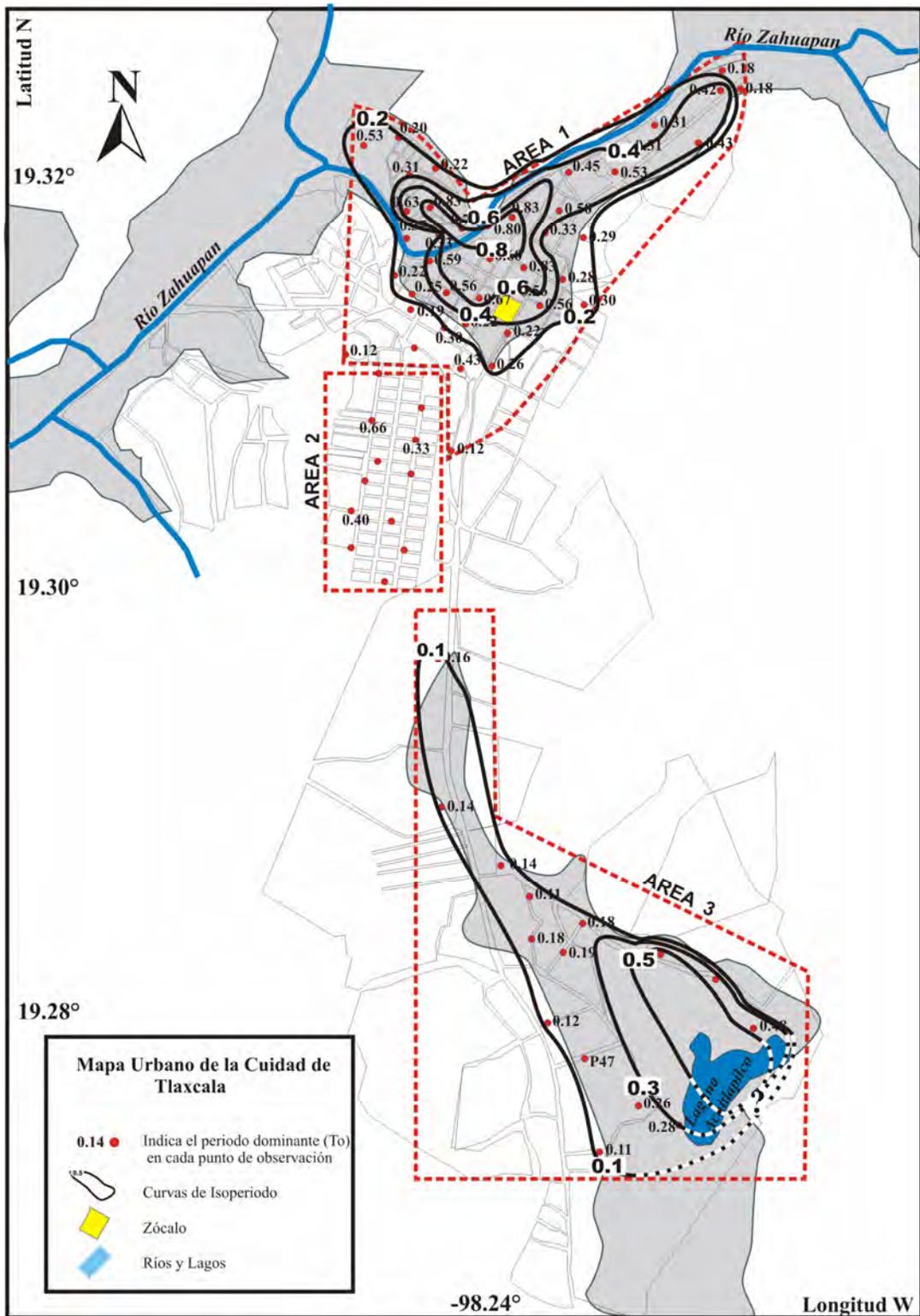
La primera zona se localiza en el extremo norte de la zona en estudio y se encuentra dentro del área 1. Esta zona se caracteriza por presentar periodos dominantes más altos en el centro de la ciudad (0.8 s) y conforme se extiende hacia los lomeríos ubicados al norte, sur y oeste de la ciudad, los periodos 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. Esta distribución de las curvas de igual periodo tiene concordancia con la geometría de la formación superior (suelos aluviales). Respecto a la distribución de las amplitudes relativas ( $A_r$ ), estas varían de 1.5 a 3.0 veces, predominando las  $A_r$  de al menos 2.0 veces.

La segunda concentración de estas curvas se localiza en el extremo sur de la ciudad y dentro del área 3 (zona del lago Acuitlapilco). Aquí las curvas se distribuyen de forma irregular, sobre suelos lacustres al 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, estas isocurvas presentan un alargamiento en dirección oeste y este, los valores de periodos disminuyen rápidamente coincidiendo geológicamente con el cambio de formación. Según la Figura 31, las amplitudes relativas fluctúan entre 1.6 y 2.2, y de manera puntual en el extremo norte es de al menos 4.0 veces y próximo a la laguna de Acuitlapilco de 6.0 veces.

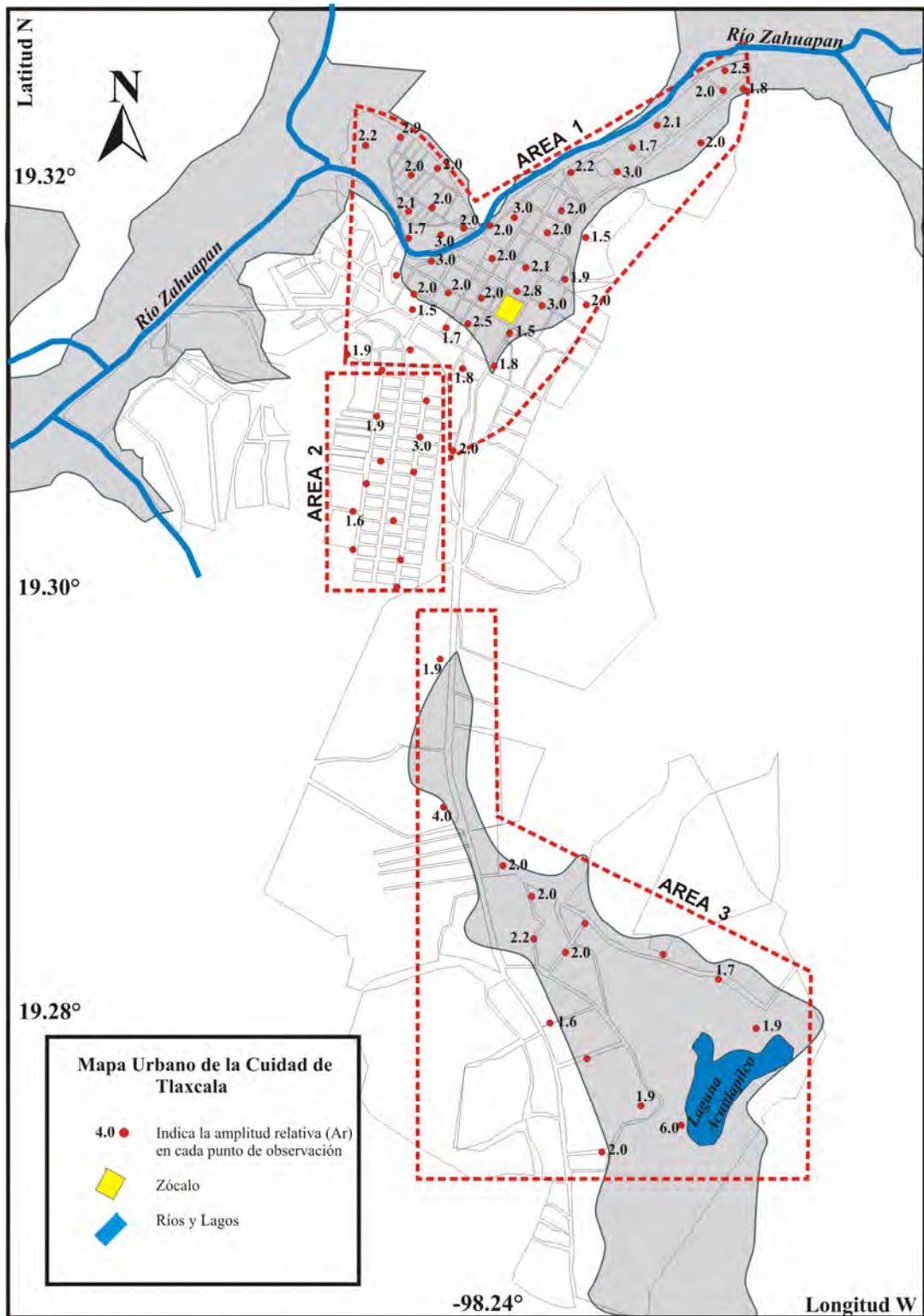
Para el área 2 (ubicada sobre una meseta), no se trazaron curvas de isoperiodo debido a que en la mayoría de los puntos no se observaron frecuencias predominantes, excepto de manera puntual en tres de ellos (P58, P61 y P65). Estos resultados sugieren que la zona es estable y coincidiría con la formación media conformada por tobas andesíticas.

**Tabla 5.** Valores de las funciones de transferencia empíricas obtenidas para la mayoría de los 69 puntos de observación en el estado 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	Obs.	F (Hz)	To (seg)	Ar
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				



**Figura 30.** Mapa con la distribución de periodos dominantes ( $T_0$ ) para los puntos de observación y sus curvas de isoperiodos para la ciudad de Tlaxcala. Las líneas discontinuas delimitan las áreas definidas en el inciso III.1.



**Figura 31.** Mapa con la distribución de las amplitudes relativas ( $A_r$ ) para los puntos de observación. Las líneas discontinuas delimitan las áreas definidas en el inciso III.1.

La microzonificación de la ciudad de Tlaxcala a partir de los valores de periodos dominantes, ha permitido identificar áreas críticas ubicadas principalmente en el centro de la ciudad. La distribución de curvas de isoperiodo delimita tres áreas importantes, siendo estas coherentes con las áreas definidas en el inciso III.1 a partir de argumentos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y tectónicos.

A fin de validar los resultados obtenidos en este capítulo, a partir de la aplicación de la técnica de Nakamura, se procede a aplicar el método SPAC (experimental) y un algoritmo de la paquetería de Herrman (teórico).

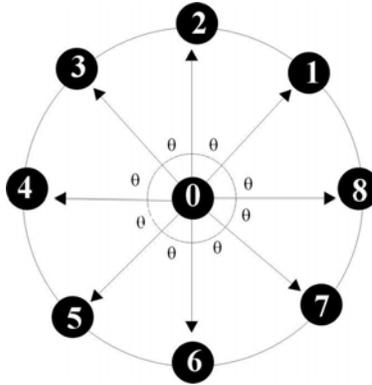
### **III.3. Validación del efecto de sitio**

En este inciso se procede a validar los resultados obtenidos en el inciso III.2 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 físicas y geotécnicas del suelo, como por ejemplo la velocidad de las ondas, 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 representada 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 en el inciso III.1. Y para obtener las características físicas del suelo se aplica el método experimental SPAC (método de autocorrelación espacial) y el algoritmo teórico de Herrman (2002). Esta información será utilizada para la aplicación del método teórico unidimensional.

Los resultados teóricos obtenidos del método unidimensional son comparados con los resultados empíricos obtenidos con la técnica de Nakamura, únicamente para el punto P32. Este punto fue seleccionado por dos razones: la primera es que para dicho punto se cuenta con un estudio geotécnico en detalle; y la segunda, por presentar un valor de periodo dominante muy representativo al ser el más alto de los observados en esta ciudad ( $T_0=0.6s$ ,  $A_r=3$  veces).

#### ***III.3.1. El método SPAC***

El método SPAC (Spatial Autocorrelation Method) 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 microtemores (contienen principalmente ondas Rayleigh). Este método ha sido utilizado por diferentes autores (Ferrazzini y Aki, 1991; Lazcano y Rodríguez, 1999; Saccorotti et al. 1999; Okada, 2003; Flores-Estrella y Aguirre-González, 2003 y Flores-Estrella, 2004) para conocer la estructura del suelo a partir de las curvas de dispersión y las velocidades de fase de las ondas Rayleigh para diferentes rangos de frecuencias. En general, el método SPAC utiliza un arreglo instrumental de tipo circular o semicircular (Figura 32) 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).



**Figura 32.** Ejemplo de un arreglo circular de estaciones para la aplicación del método SPAC

El método supone que los registros de microtemores obtenidos con un arreglo de estaciones equidistantes y sincronizadas, son estacionarios en tiempo y espacio. Por tanto, desde un punto de vista hipotético la función de correlación en espacio para una distancia  $r$  puede expresarse como:

$$\Phi(r, \varphi) = \langle u(x, y, t) \cdot u(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, t) \rangle \quad (1)$$

donde:  $\langle \rangle$  representa el promedio sobre el tiempo

- $u$       señal
- $r$       distancia entre las dos estaciones
- $\varphi$      acimut
- $t$       tiempo

Aki (1957) demostró que en el caso de una onda escalar con velocidad de fase  $c(w)$ , la función de autocorrelación promediada acimutalmente  $\phi(r)$  del campo de onda está relacionado con el espectro de potencia temporal  $\Phi$ . Para definir los coeficientes de autocorrelación normalizados con el coeficiente de los registros de microtemores a una distancia  $r$  y para  $r=0$ , se tiene:

$$\rho(r, \varphi, w_0) = \frac{\phi(r, \varphi, w_0)}{\phi(0, \varphi, w_0)} \quad (2)$$

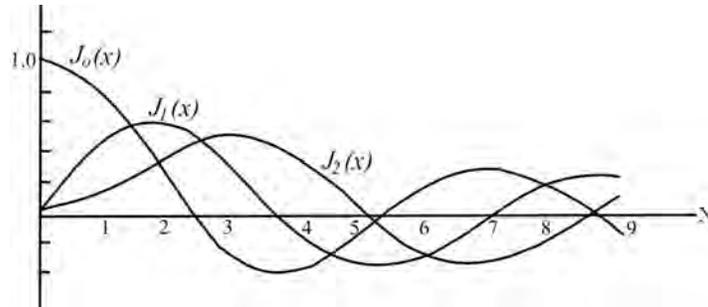
y para la componente vertical, Aki (1957) demuestra que el promedio acimutal puede escribirse como:

$$\rho(r) = J_0\left(\frac{w}{c(w)} r\right) \quad (3)$$

Esta ecuación muestra la relación funcional entre los coeficientes de correlación  $\rho(r)$  promediados acimutalmente para una distancia ( $r$ ) fija y para varios rangos de frecuencias ( $w$ )

y la función de Bessel  $J_0(\cdot)$  cuyo argumento depende de la frecuencia ( $w$ ), velocidad de fase  $c(w)$  y la de distancia ( $r$ ) fija.

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 promediada espacialmente, para el caso de la componente vertical tiene la forma de una función de Bessel de orden cero de primera clase (Figura 33)”, a partir de la cual se obtiene la curva de dispersión.



**Figura 33.** Función de Bessel de orden cero ( $J_0(X)$ ), primer ( $J_1(X)$ ) y segundo ( $J_2(X)$ ) respectivamente.

Para la aplicación de este método, es necesario considerar que los microtremores contengan frecuencias dentro de un intervalo de 0.01 a 30 Hz y en ella, parte de la energía se transmite en forma de ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación pueden ser estimados y medidos con arreglos instrumentales. Esta característica permite obtener información sobre los parámetros elásticos del suelo dependiendo de la distancia entre estaciones. Las características del medio pueden llegar a diferentes profundidades, ya que básicamente depende de la impedancia acústica.

### III.3.1.1. Trabajo de campo y procesamiento de datos

El trabajo de campo se realizó siguiendo procedimientos de otros trabajos realizados para diferentes regiones como por ejemplo de Ferrazzini y Aki (1991) para el Volcán de Hawaii; Lazcano y Rodríguez (1999) para el valle de Parkway (Nueva Zelanda); Saccorotti et al. (1999) para Deception Island, zona volcánicamente activa (northwest of the Antarctic Peninsula); Flores-Estrella y Aguirre-González (2003) y Flores-Estrella (2004) para el Distrito Federal (México) y otros. Para obtener los registros de microtremores, se utilizó una red de 4 sismógrafos de banda ancha (Figura 34) de tres canales (Z, NS y EW) constituidos por sensores Guralp modelo CMG-40T con periodo natural de 30.8 segundos y registradores Reftek 72A-08 de 24 bits con una sensibilidad de 524388 ctas/V.

La instalación de los equipos sísmicos utilizados para registrar microtremores se muestra en la Figura 34 y en ella se observa que los sensores fueron ubicados sobre losetas y dentro de excavaciones de aproximadamente 50 cm de profundidad. Posteriormente, se realiza

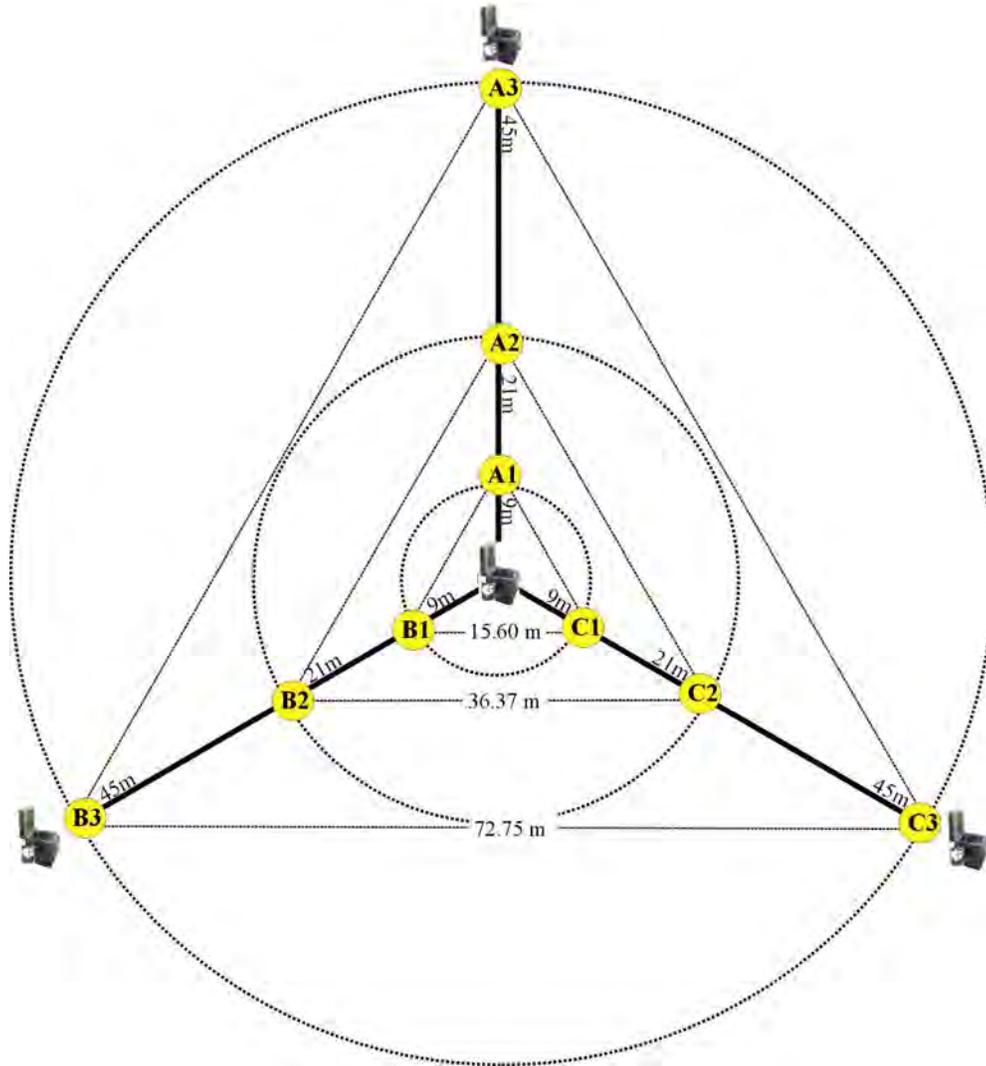
el nivelado y orientación del sensor hacia la estación central. Finalmente, el sensor es enterrado a fin de aislarlo de los efectos ambientales.



**Figura 34.** *Equipo sísmico utilizado en los arreglos sísmicos para la aplicación del método SPAC.*

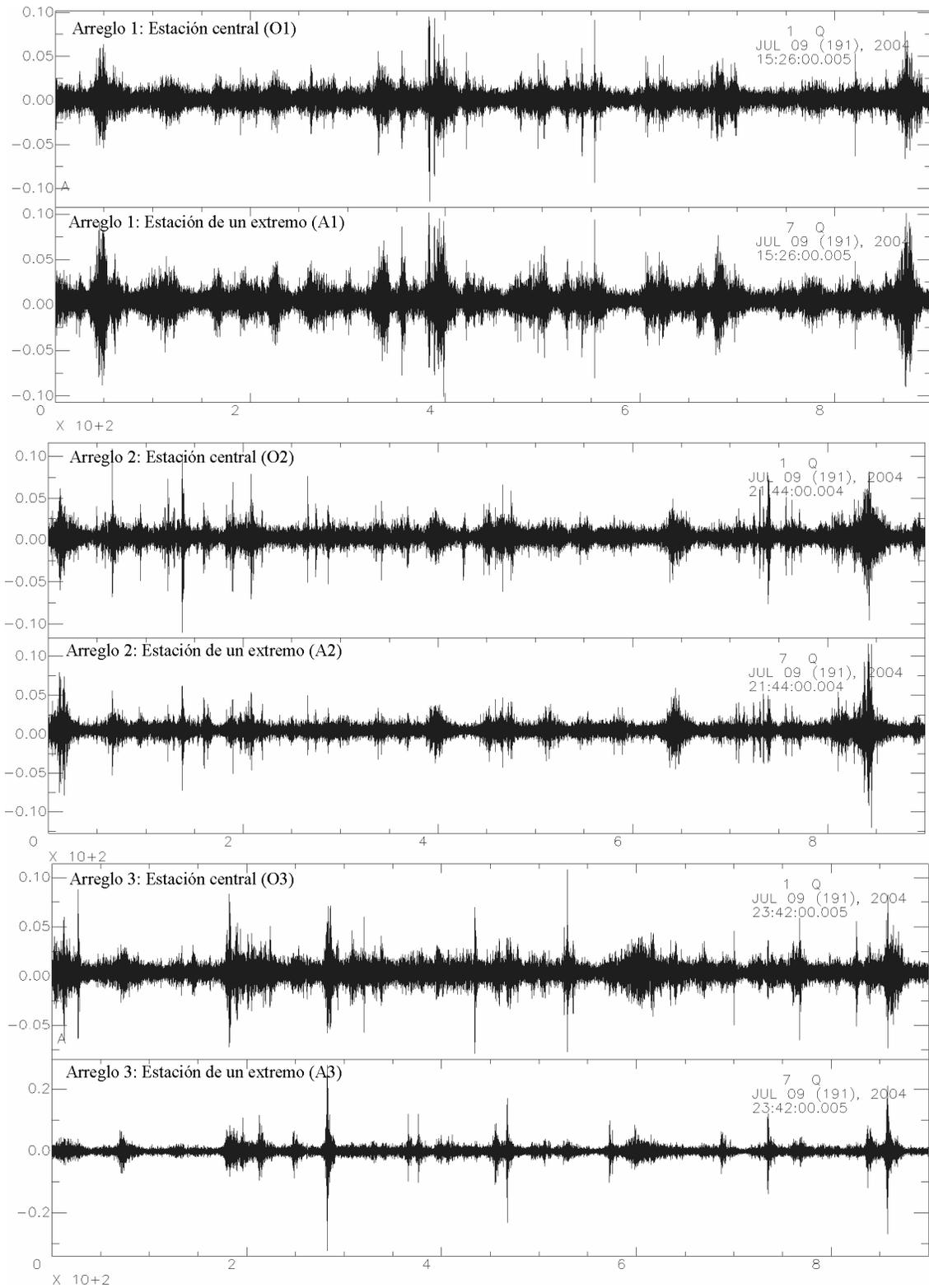
En la Figura 35 se muestra la geometría de los 3 arreglos utilizados en este estudio. El primero a 9 metros (arreglo 1), el segundo a 21 metros (arreglo 2) y el tercero a 45 metros (arreglo 3) de radio respecto a la estación central. La disposición de los instrumentos permite observar que para el primer arreglo (9 metros), la estación A1 se encuentra en el extremo norte de la estación central O, y B1, C1 ubicados en el extremo SO y SE de la estación central. En cada estación se registraron simultáneamente señales durante un periodo de tiempo de 240 minutos dividido en archivos de 10 minutos a 100 muestras por segundo.

En el caso del primer arreglo, el ángulo formado entre las estaciones A1-O1-B1, B1-O1-C1 y C1-O1-A1 es de  $120^\circ$ ; por lo tanto, las distancias entre las estaciones A1-B1, B1-C1 y C1-A1 es de 15.60 metros, y estas respecto a la estación central es de 9 metros, demostrándose así la equidistancia entre las estaciones, condición primordial para la aplicación de este método. La distribución de las estaciones es la misma para el segundo y tercer arreglo, pero los radios incrementan a 21 y 45 metros respecto a la estación central.



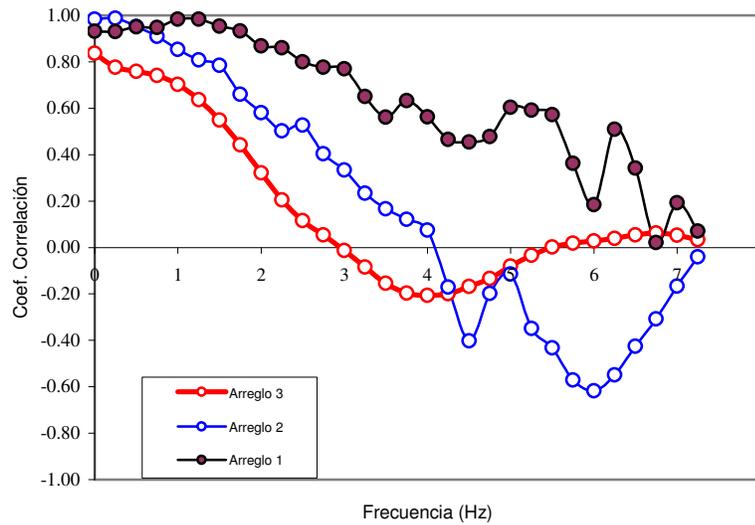
**Figura 35.** Disposición de los arreglos de estaciones utilizados en este estudio. Para el primer arreglo el radio es de 9 metros, para el segundo y tercero de 21 y 45 metros con respecto a la estación central "O".

A fin de visualizar y procesar los registros de microtemores se procedió a uniformizar el formato de los registros a formato SAC (Seismic Analysis Code). Para cada arreglo se seleccionaron ventanas de registro de 60 segundos sincronizados en las cuatro estaciones. En la Figura 36, se muestran ejemplos de registros correspondientes a la estación central y las estaciones A1, A2 y A3 ubicadas en el extremo norte de los arreglos 1, 2 y 3.



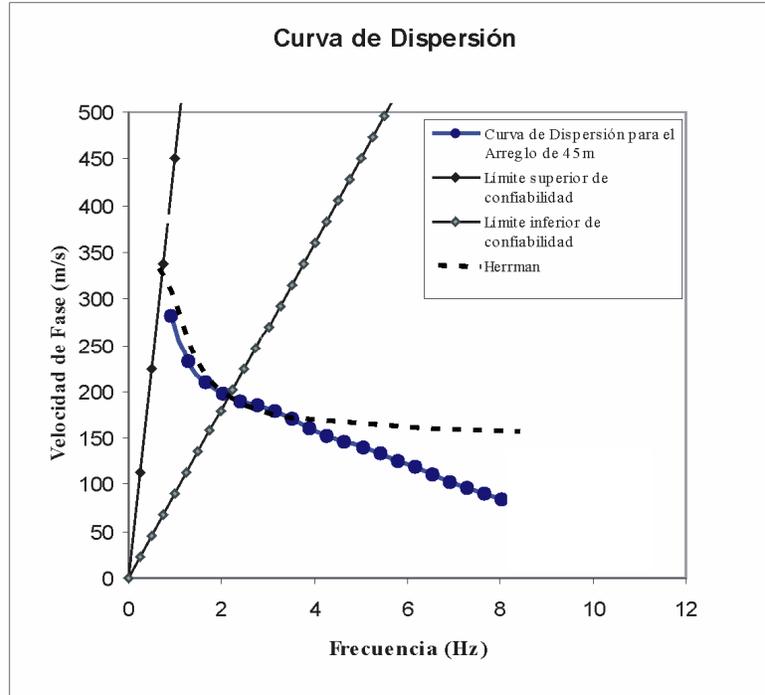
**Figura 36.** Ejemplo de registros sincronizados correspondientes a la estación central en comparación con los localizados a 9, 21 y 45 metros en dirección norte de cada arreglo.

Posteriormente, se procedió a filtrar la señal inicialmente en un ancho de banda entre 0.03 a 1.0 Hz (filtro Butterworth de cuatro polos), y a partir de éste, el rango se fue incrementando cada 0.25 Hz hasta 8 Hz. Para cada rango de frecuencia se calculó el coeficiente de correlación a fin de obtener la función de correlación para las direcciones OA, OB y OC, las cuales finalmente son promediadas para obtener una única función de correlación. Este procedimiento se hace para cada uno de los arreglos. En la Figura 37, se presentan las funciones de correlación promediadas azimutalmente  $\rho(r, w_0)$  para los tres arreglos.



**Figura 37.** Gráfica de funciones de correlación promediadas azimutalmente para los tres arreglos.

A partir de la curva de correlación obtenida para el tercer arreglo a fin de llegar a mayor profundidad, se obtuvo la curva de dispersión mostrada en la Figura 38, la cual será comparada con una curva de dispersión teórica, a fin de obtener el modelo de velocidad o estructura del suelo para la zona de estudio. Para generar la curva de dispersión teórica se hace uso del algoritmo de Herrman (2002). Esta curva debe ser iterativamente comparada con la calculada a partir de los coeficientes de correlación hasta lograr obtener la mayor aproximación posible entre ellas.



**Figura 38.** Curva de dispersión obtenida para el arreglo 3 (45 mts) en comparación con la curva de dispersión teórica correspondiente al mejor ajuste.

Para tener la curva de dispersión teórica se consideró un modelo de velocidad inicial extrapolado a partir de la información extraída del estudio geotécnico realizado por Navarro (2000) y descrito en el inciso III.1. En general, el corte litológico del sondeo geotécnico (Pozo 1) es detallado hasta los 26 metros de profundidad y considera la existencia de tres estratos, el primero con un espesor de 1.6 metros constituido de relleno areno limoso de color café claro y de compacidad suelta, y el segundo de 23.6 metros de espesor compuesto de limo-arcilla de consistencia blanda con lentes de ceniza volcánica. Por debajo de los 23.6 metros de profundidad, se presenta la tercera capa considerada como un semi-espacio compuesto por arena con gravas de limo de compacidad densa. Esta información permitió fijar los espesores de las capas a las cuales se les consideró velocidades de ondas  $\alpha$  que variaban entre 0.23 y 0.43 km/seg y velocidades  $\beta$  entre 0.03 y 0.04 km/seg, todos tomados de Bollinger (1980). Asimismo, para el cálculo de la curva de dispersión teórica es necesario conocer la densidad en cada capa, los cuales corresponden a los indicados por Bollinger (1980) y los valores de  $Q_s$  se obtuvieron de Singh et al (1995), y según Lay y Wallace (1995), los valores de  $Q_p$  se pueden obtener con la relación  $Q_p = 2.25Q_s$ .

Los resultados obtenidos en los cálculos iniciales permitieron observar que la curva de dispersión teórica no se ajustaba a la calculada, por lo que se procedió a variar las velocidades de las ondas  $\alpha$  con incrementos de 0.01km/seg.; mientras que, para la onda  $\beta$  se consideró la relación de velocidades ( $\alpha = 1.73 \beta$ ). Finalmente, la curva teórica que mejor ajusta fue obtenida con los datos de la Tabla 6 y es indicada con línea discontinua en la Figura 38. Esta solución corresponde a la mejor aproximación entre ambas curvas, la misma que se encuentra dentro del intervalo delimitado por las dos rectas que representan los abanicos de confiabilidad para

arreglos instrumentales de 45 metros. Los límites superior e inferior del abanico de confiabilidad están dados por las siguientes relaciones  $l_s=r*10*f$  y  $l_i=r*2*f$ , donde  $r$  es la distancia entre instrumentos y  $f$  es la frecuencia (Flores-Estrella, 2004).

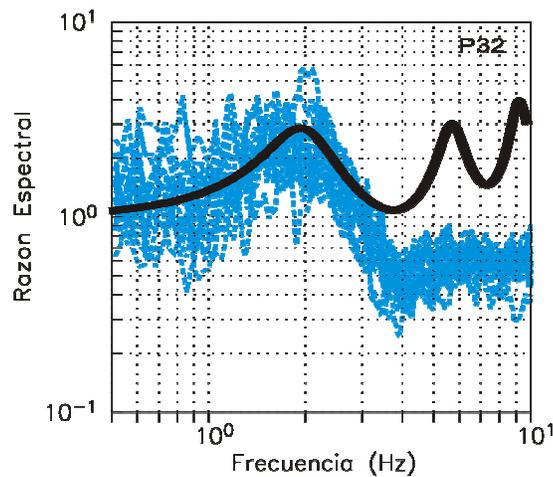
**Tabla 6.** Modelo de Velocidad obtenido con el método SPAC

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.

### III.3.2. Aplicación del método unidimensional

Ante la incidencia de las ondas sísmicas en una estratificación o estrato, 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 este estrato. 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 funciones de transferencia teóricas en medios estratificados ante la incidencia de ondas SH en la base de los estratos (Sánchez-Sesma, 1985).

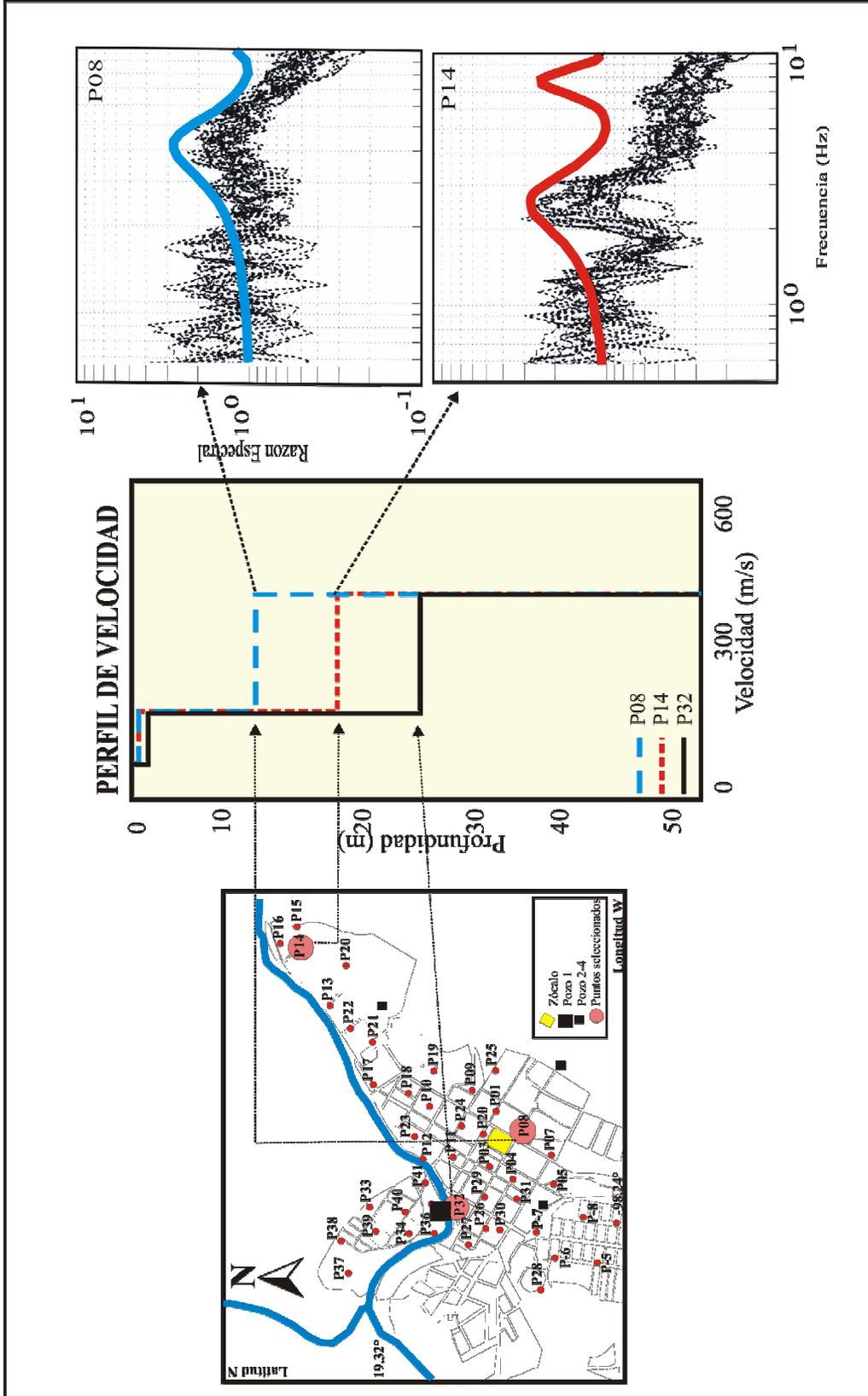
Al aplicar el método unidimensional utilizando los datos de la Tabla 6, se obtiene la función de transferencia teórica mostrada en la Figura 39, la misma que sobrepuesta en los gráficos de funciones de transferencia empíricas obtenidas con la técnica de Nakamura para el punto P32, se observa que coinciden en su primer modo, siendo la frecuencia predominante de 1.7 Hz, además una amplitud relativa de al menos 3 veces. Estos resultados validan los obtenidos con la técnica de Nakamura.



**Figura 39.** Funciones de transferencia empíricas obtenidas con la técnica de Nakamura para el punto P32 (líneas discontinuas) y función de transferencia teórica (línea continua).

A partir de estos resultados se realiza 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. Según la Figura 40, en el punto P08, la primera capa tendría un espesor de 0.8 metros y la segunda de 14 metros, por debajo de la cual se considera un semiespacio. Esta distribución es coherente con el corte litológico del pozo 2 visto en el inciso III.1. La función de transferencia teórica obtenida con este modelo, coincide en cuanto a la frecuencia predominante en su primer modo, con las funciones de transferencia empíricas obtenidas para este punto. En cuanto a su amplificación, ella es 1.3 veces más grande que la observada en la función de transferencia empírica. Para el punto P14, se varió el espesor de la segunda capa a 18 metros y con ello se obtiene una función de transferencia teórica coherente en cuanto a la frecuencia dominante con la función de transferencia empírica y en cuanto a la amplificación, ella es de 1.3 veces mayor.

Estos resultados indican que la frecuencia predominante, tanto en las funciones de transferencia empíricas y teóricas para los tres puntos de observación, son los mismos, lo cual valida los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura haciendo uso de registros de microtemores. Respecto a amplificación relativa existe cierta incertidumbre, ya que para el punto P32 el rango de amplificación en ambas funciones de transferencia son similares y para los puntos P08 y P14, estas subestiman la función de transferencia empírica con respecto a las teóricas. A fin de estimar con mayor exactitud este último parámetro, es necesario contar con una mayor información para extender este estudio. Cabe indicar que en este estudio se evaluó un solo punto de observación (P32) para el cual se disponía de información geotécnica detallada y a partir de los resultados obtenidos, se procedió a extrapolar para los puntos P08 y P14, ambos ubicados al sur y nor-este del punto P32.



**Figura 40.** En su extremo izquierdo se presenta el mapa con la localización de los 3 puntos (P08, P14 y P32) seleccionados para los cuales se determinó su perfil de velocidad como se indica en la figura. En el extremo derecho, se presenta la comparación de las funciones de transferencias empíricas obtenidas con la técnica de Nakamura (líneas discontinuas) con la función de transferencia teórica obtenida con el método unidimensional (líneas continuas) para los puntos P08 y P14.

### III.4. Microzonificación sísmica

En este apartado se procede a integrar toda la información y resultados obtenidos en este estudio a fin de proponer un mapa de microzonificación para la zona urbana de la ciudad de Tlaxcala; es decir, análisis y resultados de la sismicidad local, estimación de los efectos de sitio (geología, geomorfología, hidrología, geotécnica y tectónica) y curvas de isoperiodo. El mapa de microzonificación se presenta en la Figura 41 y en ella, se identifica que se ha delimitado a la ciudad de Tlaxcala en 3 microzonas en función de la respuesta dinámica de los suelos:

*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 el centro de la ciudad de Tlaxcala al borde del río Zahuapan, siendo la composición de su suelo caracterizada por la presencia de depósitos fluviales con mayores espesores. Esta zona se encuentra cerca de la falla Tlaxcala.

*MICROZONA II:* En esta zona los periodos dominantes oscilan entre 0.1-0.3 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, toma en cuenta el área de mayor expansión urbana en dirección sur hasta la laguna Acuitlapilco. Geológicamente, el suelo de estas áreas está constituido por sedimentos aluviales y lacustres de menor espesor debido a que tienden hacia los lomeríos.

*MICROZONA III:* En esta zona no ha sido posible identificar periodos dominantes debido probablemente a que están constituidos por suelos más compactos en donde sobresalen las tobas andesíticas. Esta microzona se encuentra bordeando a la microzona II.

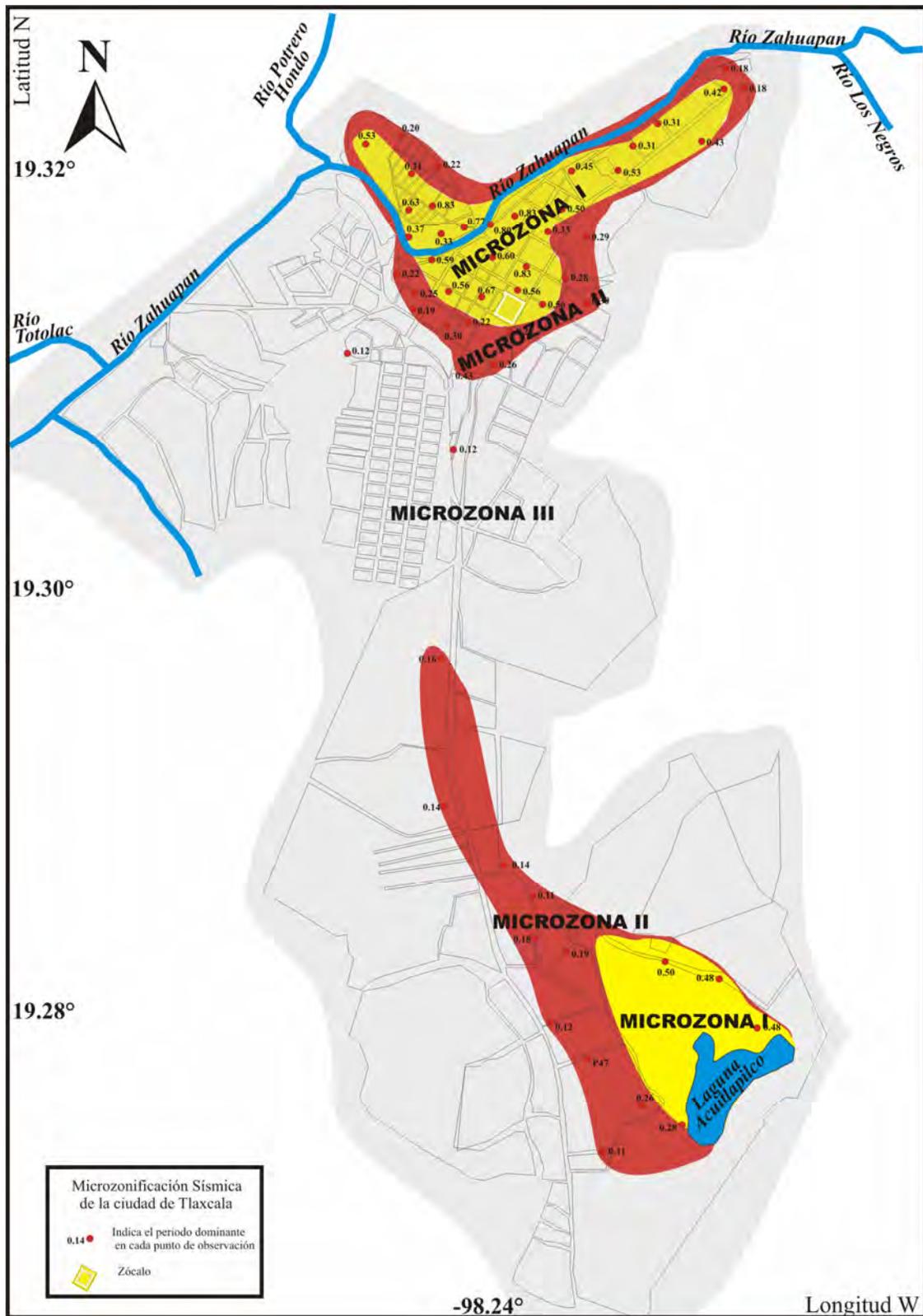


Figura 41. Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala

## **CAPÍTULO IV**

### **DISCUSIÓN Y RESULTADOS**

Dentro del contexto sismotectónico de México, la FVTM se define como una unidad tectónicamente activa que afecta principalmente a todas las ciudades y localidades que se distribuyen en dicha franja. El estado de Tlaxcala es parte de la FVTM y la presencia de elementos tectónicos como el volcán La Malinche, gran número de depresiones, lomeríos y fallamientos activos, son la causa de la ocurrencia de sismos corticales que evidencian el desarrollo de diversos procesos de deformación.

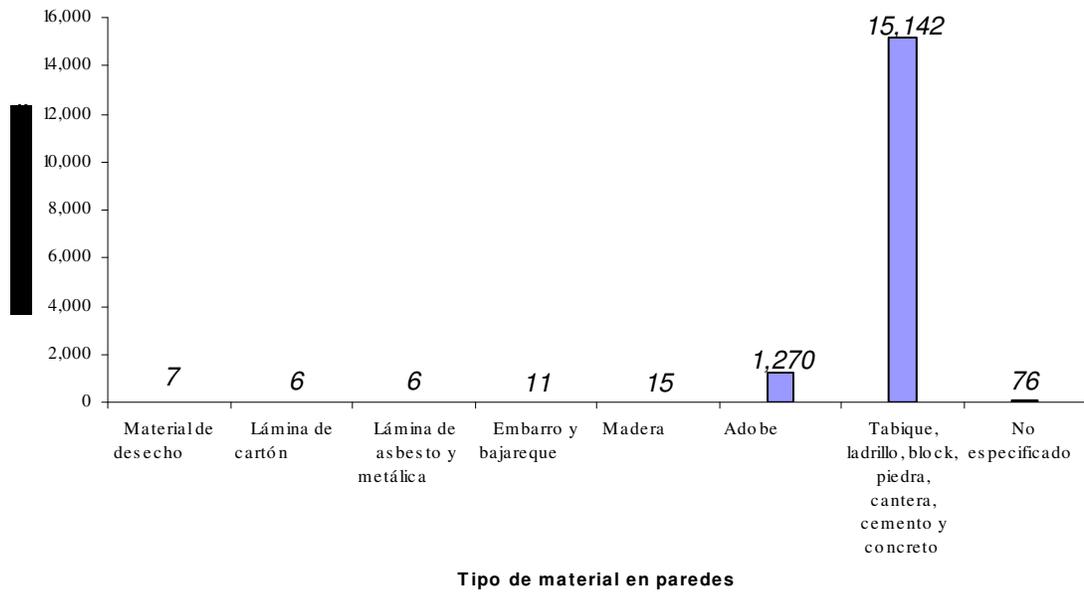
Desde un punto de vista regional, la tectónica activa de esta región es el resultado del proceso de subducción entre las placas de Cocos y Rivera (oceánicas) bajo la Norteamericana (continental), dando origen a la principal fuente sismogénica presente en México, la misma que produce de manera frecuente sismos con magnitudes  $M > 7.0$  y que muchas veces produjeron pánico y alarma en el Estado de Tlaxcala debido a que alcanzaron intensidades del orden de V MM (Tlaxcala se ubica a 400 km de distancia desde la línea de costa), tal como ocurrió con el sismo del 19/09/1985 (8.1 Mw). Del mismo modo, la deformación interna de la placa subducida es considerada como una segunda fuente sismogénica importante ya que produce sismos con magnitudes  $M \geq 7.0$  que muchas veces provocaron pérdidas materiales y humanas en el estado de Tlaxcala en donde alcanzaron intensidades del orden de VII-VIII MM (Tlaxcala se ubica a una distancia menor a 200 km), tal como ocurrió con los sismos del 03/10/1864 (7.3 Ms), 28/08/1973 (7.0 Mw), 24/10/1980 (7.0 Mw) y 15/06/1999 (7.0 Mw). La sismicidad asociada a la deformación cortical, es considerada como una tercera fuente sismogénica debido a que produce en el estado de Tlaxcala sismos locales con magnitudes  $M < 4.0$ , de los cuales no se tiene información sobre los daños que pudieron haber causado históricamente; sin embargo, se debe tener en cuenta que al ocurrir estos sismos a profundidades muy someras podrían producir localmente daños similares a los provocados por los sismos que ocurren en las otras fuentes. De acuerdo a lo discutido, se hace necesario tomar medidas preventivas para minimizar los daños considerando como primer paso la realización de una zonificación sísmica del estado de Tlaxcala.

En función de la distribución local de los elementos tectónicos y principalmente de la distribución espacial de los sismos, se ha propuesto un Mapa de Zonificación Sísmica para el estado de Tlaxcala, en el cual, se ha identificado tres zonas de potencial sísmico. En la zona considerada de mayor sismicidad, se ubican las ciudades de Tlaxcala, Apizaco, Chiautempan y Huamantla, siendo todas importantes desde el punto de vista poblacional y político. A fin de evaluar la respuesta sísmica de estas ciudades ante la ocurrencia de sismos de intraplaca y corticales, es recomendable realizar estudios de microzonificación en cada una de ellas, en razón de que a la fecha no se dispone de dicha información. Como punto de partida, se ha procedido a realizar el estudio de microzonificación de la ciudad de Tlaxcala por ser la capital del estado y por concentrarse aquí una gran densidad poblacional, además de ser el centro de la economía del estado y tener un gran número de construcciones coloniales.

Para realizar la microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, ha sido necesario evaluar la geología local, así como de la hidrogeología, geomorfología y el análisis de la respuesta dinámica del suelo al paso de las ondas sísmicas. Geológicamente, el centro y el extremo sur de la ciudad se encuentra sobre suelos medianamente compactados, todos compuestos por gravas, limos, areniscas y arcillas; mientras que, en los alrededores los suelos están compuestos por tobas andesíticas. Desde el punto de vista hidrogeológico, la parte central de la ciudad se levanta sobre las riberas del río Zahuapan generando gran acumulación de material sedimentario. Geomorfológicamente, la ciudad se encuentra a 2,100 metros sobre el nivel del mar dentro de una cuenca reconocida como parte del Graben de Puebla y en cuyos extremos, los lomeríos alcanzan alturas del orden de 2,400 metros sobre el nivel del mar. Estas características permiten considerar que la ciudad de Tlaxcala se encuentra ubicada en una zona que esta propensa a la ocurrencia de diversos peligros naturales.

Para complementar estas apreciaciones, se realizó una estimación de la respuesta dinámicas de los suelos a la ocurrencia de sismos. Este estudio considera la aplicación de la técnica de Nakamura con registros de microtemores para aproximar el efecto de sitio, el cual nos ha permitido observar en el extremo norte de la ciudad la presencia de periodos dominantes del orden de 0.2 a 0.8 segundos y en el extremo sur, periodos de 0.1 a 0.5 segundos con amplificaciones relativas de al menos 4 veces. Estos resultados adicionados a la información geológica, hidrológica y geomorfológica y geotécnica, constituyen la información necesaria para proponer un mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala. La información más importante a extraerse del mapa de microzonificación son los valores de periodos dominantes, ya que ellos pueden ser asociados con las características dinámicas de las edificaciones construidas sobre el suelo de la ciudad.

De acuerdo a las características de las construcciones en la ciudad de Tlaxcala (calidad del material, antigüedad y número de niveles de las edificaciones), es factible asociarlos a los periodos dominantes del suelo y hacer una estimación sobre los posibles daños a producirse (Muria et al. 1993). Según la información tomada del INEGI (2000), en la ciudad de Tlaxcala prevalecen dos tipos de viviendas (Figura 42), el primer tipo contiene un 91% de viviendas construidas de tabique, ladrillos, block, piedra, cantera, cemento y concreto (15,142) y el segundo tipo contiene un 7% de las viviendas de adobe (1,270). La mayoría de las edificaciones en la ciudad de Tlaxcala es de 1 y 2 niveles, concentrándose la mayoría en el centro histórico. En la Figura 43, se muestra una edificación típica de esta ciudad, que corresponde al Ayuntamiento de la ciudad. Asimismo, cabe indicar que existen unas pocas edificaciones con más de tres niveles, como es el caso del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y uno de los hoteles localizados en la periferia de la ciudad (Figura 44).



**Figura 42.** Cuadro estadístico del número de viviendas y los tipos de materiales en sus paredes.



**Figura 43.** Foto de una típica edificación construida en esta ciudad que corresponde al Ayuntamiento de esta ciudad.



**Figura 44.** Fotos de las pocas edificaciones con más de dos niveles

Como bien se sabe, las ondas sísmicas pueden ser amplificadas a través de estratos de suelos blandos y la respuesta de las edificaciones puede incrementarse considerablemente si su periodo natural de vibración coincide o se aproxima con el periodo dominante del suelo, (Sánchez-Sesma et al., 1985; Singh et al., 1988; Sauter, 1989) causando daños de diversos grados en las viviendas.

A continuación se evalúa los modos de traslación de una edificación típica de la ciudad que corresponde al Ayuntamiento de la misma, localizada en el centro histórico de la ciudad a fin de estimar el periodo dominante de la estructura. El procedimiento consiste en determinar los periodos fundamentales de vibración de la estructura a partir de registros de vibración ambiental. La idea es calcular funciones de transferencia empíricas del sistema estructural, relacionando el movimiento en la azotea (o en el nivel de interés) respecto al movimiento en la base (a nivel de terreno). El procedimiento de obtención de registros y análisis de los datos es semejante al que se realizó para puntos de medición en el terreno, pero en este caso se considera solo las componentes horizontales.

Para determinar los periodos de traslación por piso, el numerador de la función de transferencia es el espectro de Fourier de la señal registrada en su centro de masa, mientras que el denominador es el espectro de Fourier de la señal registrada en la base de la estructura.

**-La adquisición de los registros**, consistió en tres sismómetros Kinematics modelo SV-1 y SH-2, conectados a un registrador digital marca Kinematics modelo Altus, con los cuales se obtuvo registros de vibración ambiental en la azotea y a nivel del terreno, para lo cual se ubicaron aproximadamente los siguientes puntos de medición: P1, a nivel del terreno, P2 y P3 en el centro de masa de la azotea, para este caso se consideraron dos centros de masa debido a la complejidad de la estructura ubicando estos puntos en los centros geométricos de los cuerpos principales. En la Figura 45, se muestra el croquis del ayuntamiento y la ubicación de los puntos de registro, en la Tabla 7 se indica la manera en que fueron asignadas las componentes del movimiento.

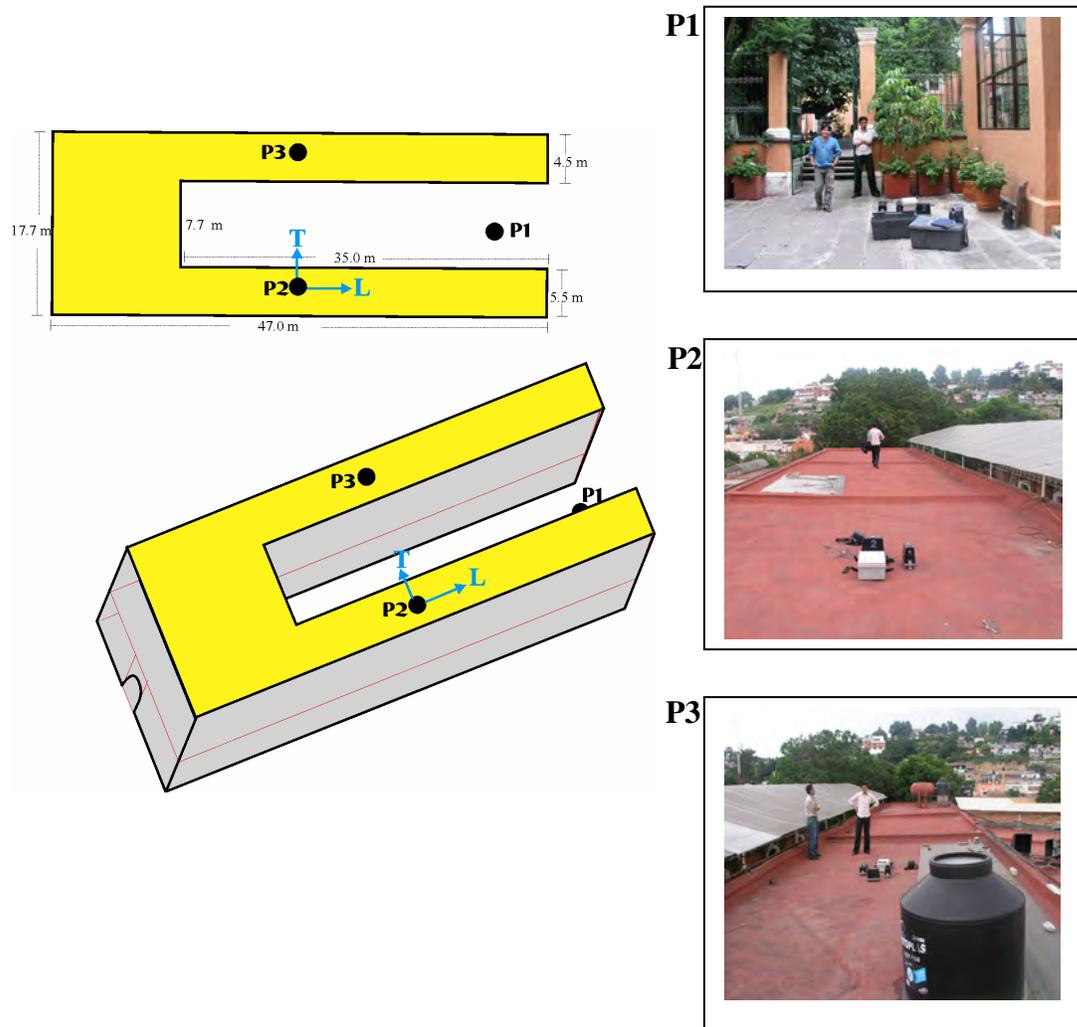
En cada punto se realizaron dos registros, cada uno con un muestreo de 0.01 segundos y duración aproximada de 90 segundos. Los datos se graban en formato binario, y posteriormente se transmiten a formato DEGTRA, 2000 para su análisis.

**Tabla 7.** Asignación de las componentes del movimiento. Ayuntamiento de la ciudad de Tlaxcala.

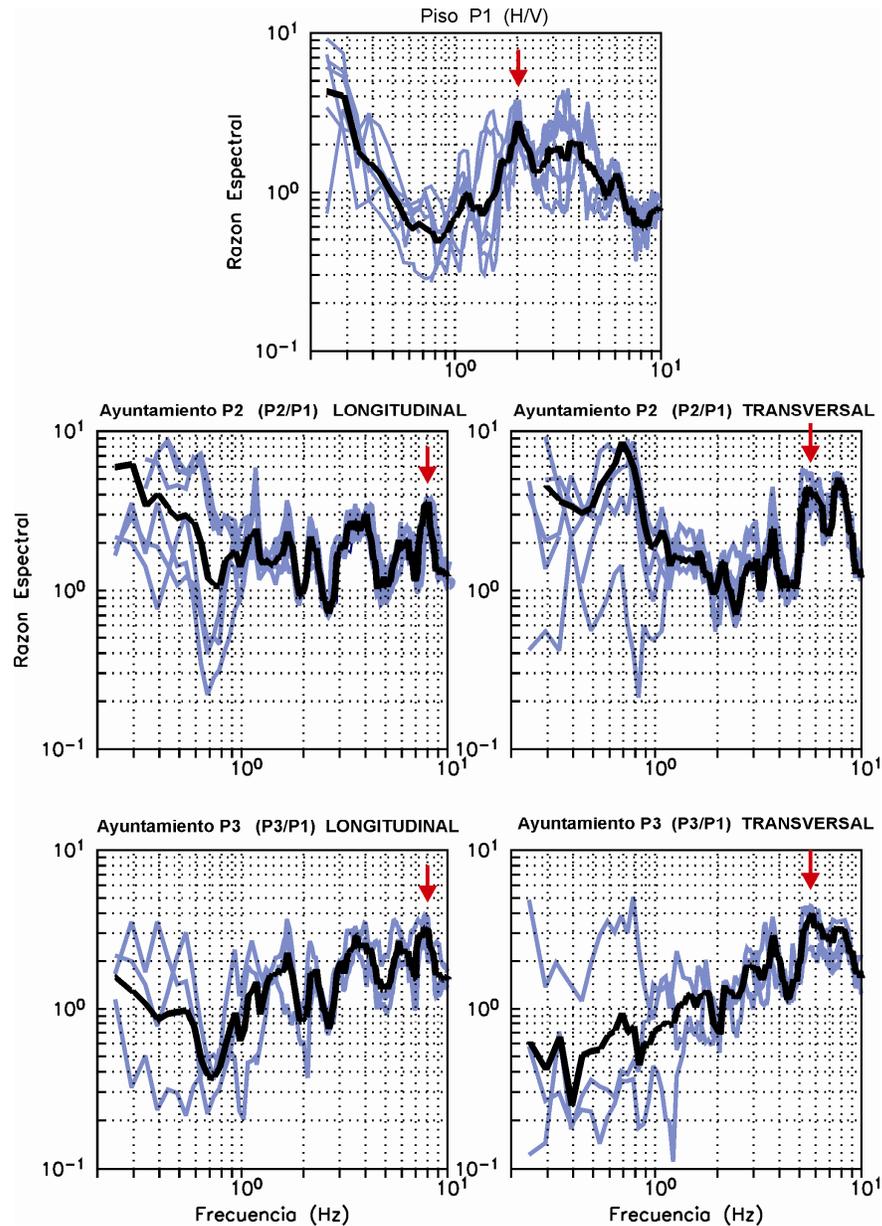
Canal	Componente	Eje de la estructura
1	Norte-Sur	Longitudinal (L)
2	Vertical	-
3	Este-Oeste	Transversal (T)

**-El procesamiento de datos**, con los registros obtenidos en el ayuntamiento, se seleccionaron ventanas de 30 segundos aproximadamente, para las cuales se calcularon los espectros de Fourier y las funciones de transferencia empíricas correspondientes. Las funciones de transferencia calculados (líneas continuas claras), junto con su promedio espectral respectivo (líneas continuas oscuras), se muestran en la Figura 46.

Las funciones de transferencia empíricas, obtenidas para el suelo (punto P1) fueron obtenidas con la técnica de Nakamura (H/V) y las obtenidas en la estructura fueron obtenidas a partir de los cocientes espectrales entre las componentes horizontales y transversales tomadas tanto en el suelo como en la estructura. Según la Figura 46, los resultados para estimar el efecto de sitio en el suelo se dio en una banda de frecuencias que fluctúa entre 1.7 a 4 Hz sobresaliendo la frecuencia de 2 Hz (0.5 segundos). Y en la estructura tanto en las componentes longitudinal y transversal de los puntos P2 y P3, son mostrados en la Tabla 8, donde se observa que para la primera componente la frecuencia predominante fluctúa entre 7.8 a 8.0 Hz (0.13 segundos) y para la segunda entre 5.7 a 6.0 Hz (0.17 segundos). Estos resultados muestran que el periodo fundamental del suelo no coincide con el de la estructura.



**Figura 45.** En el extremo izquierdo se muestra el croquis en planta de la azotea del ayuntamiento y una vista tridimensional de la misma con la ubicación de los puntos donde se tomaron registros de vibración ambiental. En el extremo derecho se presenta fotos de la toma de datos. L = indica la orientación de la componente longitudinal y T = de la componente transversal.



**Figura 46.** Funciones de transferencia empíricas (FTE), para el punto P1 (H/V, cociente entre las componentes horizontales y la vertical). Y para las componentes longitudinales y transversales para los puntos P2 y p3. Las líneas claras corresponden a las FTE para diferentes ventanas y la oscura al promedio de estas funciones. Las flechas indican las frecuencias predominantes.

**Tabla 8.** Frecuencias predominantes tanto en dirección longitudinal y transversal de los registros en velocidad para el punto P2 y P3.

<b>Punto</b>	<b>Longitudinal</b>	<b>Transversal</b>
<b>P2</b>	7.8-8.0Hz (0.13s)	5.7-5.9Hz (0.17s)
<b>P3</b>	7.8-8.0Hz (0.13s)	5.8-6.0 Hz (0.17s)

Según el mapa de microzonificación sísmica esta estructura se localiza en la microzona I, donde los periodos fundamentales del suelo varían entre 0.3-0.8 segundos, quedando fuera de este rango el periodo de la estructura que fluctúa entre 0.13-0.17 segundos; por lo tanto, se puede asumir que las edificaciones de dos niveles como es el caso del ayuntamiento no presentarían doble amplificación (se considera doble amplificación cuando coincide el periodo fundamental de la estructura con el del suelo) de su respuesta por efecto de resonancia dinámica. Sin embargo, las edificaciones con estas mismas características que se localicen en la microzona II, cuyos periodos varían entre 0.1-0.3 segundos podrían no tener la misma suerte.

Finalmente y de acuerdo a lo observado en el campo, en la microzona I existen muy pocas edificaciones con niveles mayores a 3; por lo tanto, de ocurrir un sismo y de responder el suelo con periodos entre 0.3 y 0.8 segundos, probablemente registrarían daños menores. Sin embargo, el área de mayor vulnerabilidad se encuentra dentro de la microzona II y en ella se debería poner especial atención principalmente porque existe un gran número de edificaciones de 1 y 2 niveles con problemas de mantenimiento y antigüedad. De ocurrir un sismo y el suelo responder con periodos dominantes menores a 0.3 segundos, las edificaciones podrían entrar en resonancia y sufrir una doble amplificación.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES**

El desarrollo del presente estudio ha permitido proponer un mapa de zonificación sísmica para el estado de Tlaxcala y otro de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala (capital del estado), a partir de las cuales se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1.- Históricamente, el estado de Tlaxcala ha soportado daños considerables producidos por la ocurrencia de sismos de gran magnitud asociados a la deformación interna de la placa de Cocos a profundidades del orden de 60 y 80 km, y distancias epicentrales entre 90 y 200 km del estado de Tlaxcala. Estos sismos podrían ocurrir nuevamente provocando daños probablemente mayores en estas ciudades debido al incremento poblacional y la expansión urbana de las mismas.

2.- Para conocer el potencial sísmico del Estado de Tlaxcala se ha construido una base de datos de sismos locales contenidos en catálogos cuya información proviene de diversas redes sísmicas para el periodo de 1984-2004 (SISMEX, SSN, RSVM y RESEP). Esta base de datos considera 45 sismos que corresponden a un periodo de 11 años (1984, 1986-1989, 1994-1997, 2002 y 2004) y para el resto de años no se contó con esta información. Estos sismos presentan rangos de magnitudes  $M_d^*$  que fluctúan entre 1.8 y 4.1, todos con profundidades focales menores a 37 km.

3.- La distribución espacial de los sismos contenidos en la base de datos, ha permitido identificar la presencia de 5 agrupamientos de sismos, de los cuales 4 se localizan en la región centro y sur de este estado. En profundidad, se consideran 2 agrupamientos, el primero concentra un menor número de sismos a profundidades entre 28 y 40 km, probablemente asociados al sistema de fallas de Apan y el segundo concentra el mayor número de sismos a profundidades menores a 30 km, los cuales se distribuyen siguiendo un alineamiento con un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  en dirección sur, estos sismos probablemente estén asociados al extremo norte del Graben de Puebla.

4.- Los resultados obtenidos a partir de los mecanismos focales simples y compuestos sugieren que en la región centro y sur del estado de Tlaxcala los procesos de deformación local es debido a la presencia de esfuerzo de extensión con ejes principales orientados en dirección NO-SE a N-S, lo cual confirmaría que estas regiones están dominados por el graben de Puebla, el mismo que esta orientado en dirección E-O.

5.- La sismicidad cortical analizada, en el estado de Tlaxcala se puede correlacionar con la presencia de fallas activas de gran longitud como son la falla Tlaxcala y Zacatelco ubicadas en el centro y sur del estado. Estas fallas delimitan uno de los extremos del Graben de Puebla. La falla de Zacatelco sugiere la presencia escalonada del graben, similar a lo que se observa en el extremo sur del graben delimitado por las fallas de Huejotzingo y Tepeaca.

6.- El mapa de zonificación sísmica propuesto para el estado de Tlaxcala permite identificar la existencia de tres zonas conocidas como de mayor, medio y menor potencial sísmico. Estas zonas han sido delimitadas en función de distribución espacial de la sismicidad local o cortical y de las características tectónicas de la región.

7.- 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.

8.- Con el método SPAC se obtuvo un modelo de velocidad para la zona en la cual se identificó uno de los periodos dominantes más altos (0.6 segundos), estando dicha zona ubicada cerca del río Zahuapan. Este modelo esta compuesto de tres capas. La primera capa tiene un espesor de 1.6 metros, la segunda de 23.6 metros y la tercera considera al semi-espacio que comienza a los 25.2 metros de profundidad.

9.- Con el método unidimensional se validaron los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura en tres puntos de observación, donde la frecuencia predominante tanto en funciones de transferencias empíricas (Nakamura) y teóricas (unidimensional) coinciden.

10.- Se ha propuesto un mapa de microzonificación sísmica, la cual divide a la ciudad de Tlaxcala en tres microzonas. La microzona I con periodos dominantes de 0.3 a 0.8 segundos y valores de amplificación de al menos 3 veces. La microzona II con periodos dominantes de 0.1 a 0.3 segundos y valores de amplificación de al menos 4 veces. En la microzona III no ha sido posible identificar periodos dominantes

11.- Se ha identificado que la Microzona II, es la de mayor peligrosidad por la posibilidad de que coincidan los modos de vibrar del suelo con el de las viviendas, siendo afectadas por el efecto de resonancia.

12.- El mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Tlaxcala, 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 y su ciudad capital.

13.- Es importante considerar el realizar estudios de microzonificación en las otras ciudades que se ubican dentro del estado de Tlaxcala, tales como Chiautempan, Apizaco y Huamantla.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1957), "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors". *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokio Univ.*, 25, 415-457 pp.
- Aki, K. (1988), "Local site effects on ground motion", *Earthquake Engineering and Soil Dynamics. II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, J. L. Von Thun (editor), Am. Soc. Civil Eng./Geotechnical Special Publication, 20, 103-155 pp.
- Bazán E. y R. Meli (2003), "Diseño sísmico de edificios", Editorial Limusa, SA de CV, Sexta Reimpresión, ISBN 968-18-5349-0, México.
- Bollinger, G. (1980). "Blast vibration analysis", Southern Illinois University Press, 132 pp.
- Chavéz-García, J., L. R. Sánchez y D. Hatzfeld (1996), "Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory", *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 1559-1573.
- Chavacán, M. y J. Lermo (2003), "Sismicidad reciente al sur de la cuenca de México (sierra del Chichinautzin)", *Memorias Técnicas del XIV Congreso Nacional de Ingeniería sísmica*, SMIS, León-Guanajuato, México, 19-23 noviembre, I.234-248.
- Chavacán, M., J Lermo y L Quintanar (2004), "Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano", *I Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica*. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. ISBN 959-11-0451
- Ferrazzini. V. y 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.
- Figuroa, J. (1963), "Isosistas de macrosismos Mexicanos", *Revista de Ingeniería*, N°1, Vol. XXXIII, México D. F.
- Figuroa, J (1974) "Sismicidad en Puebla, macrosismo del 28 de agosto de 1973", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 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. (2001), "Métodos alternos para la estimación del efecto de sitio mediante el uso de arreglos de microtremores". Tesis de Licenciatura, UNAM. Pág. 81.

- Flores-Estrella, H. y 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.
- García-Palomo, A. (2002), "Vulcanismo y geología estructural de la región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México". Tesis de doctorado en Ciencias, UNAM Pág. 181.
- García-Palomo, A., J L Macías, J Tolson, G Valdez y J C Mora (2002), "Volcanic stratigraphy and Geological evolution of the Apan Region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt", *Geofísica Internacional* 41, 133-150 pp.
- González-Pomposo, G J y C Valdés-González (1995), "Seismicity of the state of Puebla, México 1986-1989", *Geofísica Internacional*, 34, 221-232 pp.
- Gutiérrez, C., S. Miller, R. Tapia y C. Montoya (1991), "Diagnostico de peligro sísmico para la República Mexicana y evaluación de intensidades para sismos históricos". Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres (RG/02/91).
- Gutierrez, C. y 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.
- 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.
- Haskell, N.A (1962), "Crustal reflection of plane P and SV waves", *J. Geophysics Res*, 67, 4751-67.
- Havskov, J. y M. Macias, (1982), "A coda-length magnitude scale for some Mexican stations", *Revista de la Unión Mexicana.*, Vol.22, Núm.3.
- Havskov, J. (1997), "The SEISAN earthquake analysis software for the IBM PC and SUN, version 6.0", *Report Intern of Institute of Solid Herat Physics*, University of Bergen, Allegaten 41, 5007 Bergen, Noruega.
- Herrman, R. D. (2002), "An overview of synthetic seismogram computation". *Department of Earth and Atmospheric Sciences*, Saint Louis University.
- IEPCT (2003), Instituto Estatal de Protección Civil de Tlaxcala. Informe Interno.
- IEPCT (2005), Instituto Estatal de Protección Civil de Tlaxcala. comunicación personal

- 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.
- Jeffreys, H. y K.E. Bullen (1940), “Seismological Tables”; reprinted by the British Association for the Advancement of Science, London (England).
- King, J. L. y B. Tucker (1984), “Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled valley”. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74 , 137- 151 pp.
- Kanai, K. y T. Tanaka, (1954), “Measurement of the microtremor”, *Bull Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, Vol. 32, pp. 199-209.
- Lachet, C. y 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. y T. C. Wallace (1995). “Modern Global Seismology”. Academic Press, E.U.A., 521 pp.
- Lazcano J. y 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.
- Lee, W. H. K., Bennet, R.E. y Meagher, L. (1972), “A method for estimating magnitude of local earthquake from signal duration”, U.S.G.S. Open file report.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a), “Are microtremors useful in site response evaluation?”, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y 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.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1995), “Efectos de sitio en la ciudad de Oaxaca, resultados con registros de temblores y mediciones de microtremores”. *Revista de Ingeniería Sísmica.* No 50, 1-13 pp.
- Lermo, J., G. Torres, J. Almanza, A. Vargas, J. Cruz, J. Hernández (1995), “Efectos de sitio en la ciudad de Jalapa, México. Microzonificación sísmica preliminar”, *Memoria del XX Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería*, 109-114, Veracruz. VER., México.

- Lermo, J., J. Soto, A. Huidobro, J. Cuenca, H. Mijares, C. Meza y J. Flores (1997), “Análisis preliminar de la sismicidad en la cuenca de México y zonas aledañas”, *Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 1, Veracruz, Ver., México, 205-215 pp.
- Lermo, J, J Havskov y J Soto (2001), “Sistema de Información Sismotelemétrica de México (SISMEX). Veintisiete años de servicio”, *Memorias XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Leyva, R. (2004), “Obtención de las curvas de isoperiodo de la zona conurbana Veracruz-Boca del Río”. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana.
- Lienert, B.R. y J. Havskov (1995), “HYPOCENTER 3.2. A computer program for locating earthquakes locally, regionally and globally”, *Seismological Research Letters*, 66, 26-36.
- Luhr A, J Nelson, F., Allan y ISE Carmichael, (1985), “Active rifting in southwestern México: manifestation of an incipient eastward spreading-ridge jump”, *Geology* 13, 54-57 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.
- Mooser, F. y H M T Ramírez (1988), “Faja Volcánica Transmexicana: Tectónica, Vulcanotectónica y Sismicidad”, *En Resúmenes IX Conv. Geol. Nac., México*.
- Muria, D y 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.
- Ordáz, M y C. Montoya (2000), “DEGTRA 2000 Ver. 2.0.2”, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pardo, M. y G. Suárez (1995), “Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern México: Seismic and tectonic implication”, *Journal of Geophysical Research* 100, 12357-12373 pp.

- Quintanar, L., M. Rodríguez-González y O. Campos-Enríquez (2004), “A shallow crustal earthquake doublet from the Trans-Mexican Volcanic Belt (Central México)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 845-855.
- Ramírez, A. y V.M. Taboada (2000), “Casos históricos de licuación en México”, *XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, 1, Oaxaca, Oax., México, 353-357.
- 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.
- Riquer, G. F. Williams, J. Lermo, G. Torres y R. Leyva (2003), “Microzonificación sísmica en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río”, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Guanajuato-León, Gto.
- Rodríguez, M y J.C. Aristizábal (1998), “Evaluación de la capacidad destructiva de terremotos”, *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, número 609, pp. 123.
- 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 y 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.
- Santoyo, E., E. Ovando, F Mooser y E León (2005), “Síntesis, geotecnia de la cuenca del Valle de México”, 20 años TGC, 171 pp.
- SECODUVI (2000), “Problemáticas y practicas de la descentralización”. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- SEGOB y Gob. 2do. Tlax. (2001), “Los Municipios de Tlaxcala”. Colección Enciclopedia de los Municipios de México. Secretaría de Gobernación-Gobierno del Estado de Tlaxcala.
- Singh, S.K. y M. Wyss (1976), “Source parameters of the Orizaba earthquake of August 28, 1973”, *Geofis. Int.* 16, 165-184 pp.
- Singh, S.K., E. Mena and 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. y Pardo, M. (1993), "Geometry of the Benioff zone and state of stress in the overriding plate in Central Mexico. *Geophysical Research Letters*, 20, 1483-1486 pp.
- Singh, S.K, R. Quass, M. Ordáz, F. Mooser, D. Almora, M.Torres y R. Vasquez (1995), "Is there a truly "hard" rock site in the Valley of Mexico?". *Geophysical Research Letters*, 22, 481-484 pp.
- Singh, S.K., M. Ordáz, J.F. Pacheco, R. Quaas, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Meli, and E. Ovando (1999), "A preliminary report on the Tehuacán, México earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0)", *Seismological Research Letters*. Vol. 70 N°5.
- Suárez, G. y S.K. Singh (1986), "Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt-Discussion", *Tectonophysics*, 127, 155-160 pp.
- Suter, C. M. (1991), "State of stress and active deformation in México and Central América", in *Slemmons, D.B., et al., Eds., Neotectonics of North América: Geological Society of America, decade of North America geology, decade Map volumen 1*, pp. 401-421.
- Suter, M., M. Carrillo-Martínez y O. Quintero-Legorreta (1996), "Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico", *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 86, No. 6, pp. 1952-1963.
- Thomson, N.A. (1950), "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium", *J. Appl Phys*, 21, 89-93 pp.
- Udwadia, F.E. y M.D. Trifunac (1973), "Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1227-1253 pp.
- Vega, D. y J. Lermo (2003), "Revisión de estudios de efectos de sitio para zonas urbanas de México", *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León*, Gto.INEGI (1999).
- Werner, G. (1993), "Los suelos en el Estado de Tlaxcala", *Altiplano Central Mexicano*. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México
- Yamamoto, J., Z. Jiménez y R. Mota (1984), "El temblor de Huajuapán de León, Oaxaca, México, del 24 de octubre de 1980, *Geofís. Int.* 23, 83-110 pp.

<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/tlaxcala/>

Consejo de Recursos Minerales, 1999.

**ANEXO 1.**

*Recortes de periódicos e informes, donde indican los daños causados por sismos en el estado de Tlaxcala.*

“Sismo de Serdán, ocurrido el 29 de agosto de 1973”

500 mil Personas sin Hogar por las Inundaciones

Lea Ud. ESTO Gran Diario Fotográfico



El Sol de Tlaxcala

ANUNCIARSE en los Diarios de la Organización GARCIA VALSECA

NUM. 6,511 \* JOSE GARCIA VALSECA, Presidente y Director General \* Tlaxcala de X., miércoles 29 de agosto de 1973 \* Fundado el 30 de Julio de 1955 \* SALVADOR BORRERO E., AÑO XIX Director-Gerente Regional

Estela de Luto y Desolación

Coordinación de Auxilios a Todas las Regiones Afectadas

Brigadas de Médicos y Enfermeras Movilización de Recursos Humanos y Materiales



Centenares de Muertos, Miles de Heridos y Gran Destrucción

Poblaciones de Puebla y Veracruz Fueron Borradas por el Terremoto

MEXICO, 28 de agosto (COPV).—Las víctimas del temblor sentido la madrugada de hoy eran hasta esta noche (las 11) 824 muertas y más de 3 mil heridos, aparte las pérdidas materiales que ahora es difícil cuantificar, pero que ascienden a centenares de millones de pesos.

Causó Pánico el Temblor en la Metrópoli Interrupciones de Luz Eléctrica

MEXICO, 28 de agosto (COPV).—Solo daños materiales y pánico en la gente causó el temblor que la mañana de ayer se sintió en esta capital.

Antes de iniciar su gira, el funcionario dispuso la intervención de brigadas médicas compuestas por médicos y enfermeras.

MEXICO, 28 de agosto (UPI).—Un severo temblor, cuyo epicentro se localizó en la cadena montañosa central de México, esta madrugada causó grandes daños a miles de edificios y destruyó centros de horas de comunicación. El lugar más castigado fue Orizaba, cuya población es de 30 mil habitantes.

2 MINUTOS DE PANICO VIVIO AYER TLAXCALA

El Sol de Tlaxcala logo and publication information including name, address, and contact details.

No Hubo Víctimas; Iglesias Dañadas; Temor por Huamantlecos; Salen Viveres

1.53 horas. Martes 28. Millares de personas de una amplia faja de los Estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala y México—en orden de intensidad—, tuvieron un despertar de pánico, cuando la Tierra se convulsión en un movimiento trepador que hizo un brusco cambio y oscilamiento.

Ciudad Serdán y Quecholac las Zonas más Afectadas

INFORMACION DEL ESTADO DE PUEBLA. Quinientos cuarenta y un muertos, un número incalculable de heridos y cuantiosos daños materiales en construcciones privadas y en más de un centenar de templos católicos, produjo el temblor registrado ayer a las 3.50 de la mañana.

405 Muertos y 1,000 Heridos en Cd. Serdán

Por HECTOR A. MARTINEZ SPOTA. CIUDAD SERDÁN, Pue., agosto 28.—En esta, la región más severamente castigada por el sismo ocurrido a las 3.50 de la madrugada de este día, el número de muertos, a las 11 horas, según datos proporcionados por las autoridades, se elevaba a 405 y los heridos sumaban ya más de 1,000, la tercera parte de los cuales habían sido trasladados a la capital del Estado, para recibir atención médica.

Las Iglesias Acapararon los Daños Quedó Cerrada la Catedral

La Torre de la Iglesia de Ixtenco por Desplomarse

SAN JUAN IXTENCO, Tlax.—La iglesia de esta población resumió los mayores daños del sismo y su torre principal, de cuarenta metros de altura, está por desplomarse.

Heridos de Ciudad Serdán son Atendidos en Huamantla

HUAMANTLA, Tlax., 28 de agosto.—Tres ambulancias de la Cruz Roja de esta ciudad y una del Centro de Salud que dirige el doctor Alfonso Goya, salieron a Ciudad Serdán para prestar auxilio a los heridos que con motivo del temblor de esta madrugada resultaron lesionados siendo trasladados al Centro de Salud hasta el momento de redactar esta nota: Aurora Montiel Hernández de serdán.

Despertar de Pánico Ayer en Apizaco

La Ciudad no Lamentó Daños ni se Reportaron Víctimas Personales

APIZACO, Tlax., 28 de agosto.—Tres movimientos telúricos ocasionaron el sismo más fuerte, se sintieron en un lapso de pocos minutos que despertaron a mucha gente.

Impresiones del Temblor en Xalostoc

Los sismógrafos debieron haber registrado el terremoto en el quinto...



Determinarán el Grado de los Daños

La Dirección de Obras Públicas del Estado y en auxilio de las autoridades o responsables se ordenó ayer cerrar al culto la Iglesia Catedral de esta capital hasta en tanto los peritos sismológicos del estudio el grado de los daños causados por el temblor de ayer a la cúpula central y a un parante del monumento sin concluir.

Los Templos en Huamantla Fueron los que más Daños Sufrieron en el Sismo

HUAMANTLA, Tlax., 28 de agosto.—El temblor de esta madrugada que causara daños incalculables en la región de Puebla y Veracruz causó daños y destrucción en esta ciudad.

San Marcos Contla se Quedó sin Agua Potable

San Marcos Contla se quedó sin agua potable por el temblor que destruyó la tubería principal de agua.

# "Sismo de Serdán, ocurrido el 29 de agosto de 1973"

pagina 4



ESTA ES LA cúpula principal de la Catedral de San José y que fue afectada con el temblor que se registró en las primeras horas de ayer, como se puede apreciar, tiene una cuadratura de consideración y otras tres de menor consecuencia.

## También Quedó Cerrado al Culto el Templo Católico de Acxotla del Río



COMO SE PUEDE Apreciar, el templo de la población de Acxotla del Río, su torre se encuentra totalmente desplomada y a punto de venirse abajo, independientemente de las cuadraturas que sufrió por el temblor registrado en la madrugada de ayer.

Por los daños que sufrió el templo católico de Acxotla del Río que se encuentra totalmente destruido...



DIFERENTES ASPECTOS de las cuadraturas que sufrió la torre de la iglesia de la población de Acxotla del Río, dichas grietas se apredan en sus cuatro costados, lo que ha hecho que los vecinos soliciten la demolición de la torre para evitar consecuencias graves...



EL PROFESOR PEDRO Zapata, aparece observando el temblor sufrido en la azotea del Palacio de Gobierno y explicó que el movimiento hizo saltar la aguja, impidiendo el registro del sismo ocurrido la madrugada de ayer.

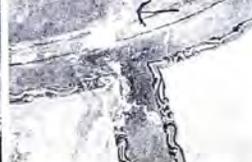
# Los Daños Materiales en Tlaxcala



CASAS HUMILDÉS fueron las que no resistieron el fuerte temblor en Huamantla y sufrieron derrumbes como el de la gráfica en sus bordes.



LOS TEMPLOS de la ciudad de Huamantla sufrieron fuertes cuadraturas en sus naves y cúpulas representando serio peligro para quienes por casualidad están constantemente visitándolos.



EN LOS ACERCAMIENTOS con la cámara de EL SOL DE TLAXCALA en el terreno de San Francisco, se puede apreciar la cantidad de cuadraturas resultadas ocasionadas por el temblor registrado en las primeras horas de ayer, así como la abstracción de grietas que ya habían sido restañadas a base de inspecciones de cemento.



LA BALAUSTRADA de esta casa de Huamantla se derrumbó con el temblor de ayer en la calle de Galeana y Reforma.



HUAMANTLA presentó varios derrumbes por torres, debido a la hora, no causaron víctimas.



BARDAS como la de la gráfica, en Huamantla se vieron abajo por el temblor de hoy, sin que necesariamente se hayan registrado desgracias personales. (Fotos de Rogelio Barrera).

## En Chiautempán fue sólo el Susto General

CHIAUTEMPÁN, Tlax., 29 de agosto.—El día de hoy por la madrugada fue sacudida esta región de este municipio, al registrarse fuertes movimientos telúricos, que al decir de algunos observadores tuvo una duración de más de un minuto, sin que esto ocasionara en su mayoría heridos hechos que lamentar, más que un pequeño saqueo que hizo desaparecer a todo mundo, que a esta hora se encontraba descomulgando y, en algunos casos, se sabe la gente se lanzó temerosa a la calle y hubo momentos de pánico y terror.

El sismo se registró aproximadamente a las 2 horas con 30 minutos y debido a la duración del temblor, el ruido del que se sabe abarrotó varios Estados, incluyendo el nuestro, en muchos casos causó pánico y desorden, sobre todo el temor de que se visitaran los cerros.

## Destrucción opr el Sismo en Tlaxcala

Sólo palcos entre la población tlaxcalteca y ciudades de menor cuantía causados a construcción nuevas y a remodelación de las que el resultado del temblor de tierra registrado la madrugada de ayer.

En todos los poblados de esta Entidad se sintió el sismo, según reportes llegados a esta capital, pero en todos ellos no se habló de pérdidas de vidas humanas.

En lo que corresponde a esta capital, se reportaron daños a la Catedral y al campanario del ex-Convento de San Francisco, así como al templo del mismo poblado de Acxotla del Río, cuya torre del campanario sufrió graves cuadraturas y registro alguna inclinación.

La Catedral en especial sufrió cuadraturas en el campanario, pero de mayor peligro en la cúpula central, ya que hubo desplome de materiales en cuatro partes.

La torre del campanario del ex-Convento de San Francisco, las cuadraturas que se habían registrado en años anteriores, con el sismo de ayer volvieron a abrirse.

Por otra parte se reportó, que el Palacio Municipal de esta capital también sufrió algunos daños en sus muros y lo mismo ocurrió con el edificio cívico, donde se sitúan dependencias del Gobierno del Estado.

El pánico entre la población fue momentáneo debido a que cuando se registró el sismo cesó la actividad sísmica y se vio obligado a salir de sus hogares a las 10:00 horas.



DE NUEVA CUENTA la torre del ex-convento de San Francisco de esta ciudad, entre más cuadraturas haciendo que se resienta su estructura, consecuencia del temblor que se registró ayer en la madrugada, desde ayer una cuadratura de trabajadores dependientes del Instituto de Antropología e Historia y Conservación de Monumentos Coloniales, se han dado a la tarea de efectuar reparaciones de emergencia.



EL TECHO de la iglesia de la Cruz en Huamantla, se caía al templo de La Cruz abajo por el temblor, por la calle de bier de esta madrugada en Huamantla.



LA CITARILLA de la escuela Montoliva se desplomó sobre la calle de Alienda en Huamantla.



MATERIALEMENTE desmoronada una de las bardas en la plaza de Toros, La Taurina, en Huamantla.

“Sismo de Tehuacán, ocurrido el 15 de junio de 1999”

**harmon holl**  
VICIO DE CARTE 10 VERA  
7 de junio Intensivo  
2 de junio Sabatinas  
Tel: 46-27-865 Tlax  
41-73-964 Apizaco

# El Sol de Tlaxcala

Sección A

**CHEVROLET 2500**  
LA FUERZA DEL PODER

---

Organización Editorial Mexicana

Mario Vázquez Rada  
Presidente y Director General

Tlaxcala X. Méxicos 16 de Junio de 1999

Serafín Salazar Arcecano  
Director General

http://www.com.com.mx/INTERNET

AÑO XLIV  
15798

Precio \$ 3.00

---

**Terremoto Entre los Tlaxcaltecas Provocó el Temblor de 6.7 Grados**

## Iglesias, las más Afectadas

**Templos**  
manecen acordos hasta que sean revisados por AH y SECODUVI. Pendidas las clases algunas de las aulas de la entidad

El sismo provocó el colapso de la estructura y derrumbos en las bóvedas y varias bóvedas en el templo de San Mateo, ubicado en la zona de San Mateo. En la ciudad de Tehuacán, fueron afectados los edificios de la zona de San Mateo. El sismo se registró ayer a las 15 horas en la zona de San Mateo en la zona de San Mateo, en la zona de San Mateo.



SERIOS daños sufrieron las torres de Ocotlán, fisuras severas se aprecian en los campanarios.



EN Nañivilas una casa resistió los efectos del movimiento sísmico.



LA Catedral de San José resultó afectada con cuarteaduras en su cúpula y tuvo que ser resguardada por elementos policíacos y el Ejército.



LA gente abandonó los edificios de la Unidad Habitacional "Felipe Barillo Xicoténcatl", donde se sintió con intensidad el sismo.

### El '85 no se Olvida...

¿Qué puedes hacer contra la naturaleza? pregunta increíble. Rocio, quien con lágrimas en los ojos, en pleno ocaso de la fealdad del mundo, aludada su auto para ponerse "en un lugar más seguro". Y la plaza de la Constitución es el sitio ideal.

¡Este temblor! ¡Esta tembloridad!

**AFECTACIONES DEL SISMO DE JUNIO DE 1999.**

**EL SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999, CON EPICENTRO EN LA COSTA DE OAXACA, CON MAGNITUD DE 6.8 ° RESULTANDO AFECTADO EL ESTADO DE TLAXCALA CON:**

71	IGLESIAS AFECTADAS
68	INMUEBLES PARTICULARES
29	EDIFICIOS PUBLICOS
184	INSTITUCIONES EDUCATIVAS

*Fuente: IEPCT*

**ASI MISMO SE ORIGINARON DERRUMBES DE LA CIMA DE LA MONTAÑA DE LA MALINTZ!.**

## “Sismo de Tehuacán, ocurrido el 15 de junio de 1999”

El reporte final de daños que sucedieron a consecuencia del sismo registrado el pasado martes 15 de junio señala que éstos fueron mínimos en Tlaxcala, en comparación con otras entidades del centro de la República como Puebla. Aún así, el patrimonio histórico fue el que más resintió los efectos del movimiento telúrico de 6.8 grados en la escala de Richter, que tuvo como epicentro las costas de Oaxaca. Ahora tocan las labores de reparación, para lo que las autoridades destinarán 3 millones de pesos; sin embargo, no se han cuantificado los daños en viviendas y se presentaron desgajamientos importantes en La Malinche.

### Patrimonio histórico y La Malinche, los más dañados por el temblor en Tlaxcala

□ Víctor Hernández Tamayo □

De acuerdo con el recuento, se detectaron cuarteaduras y desprendimientos en 18 iglesias ubicadas en diferentes municipios de Tlaxcala, principalmente en la Basílica de Ocofán y la parroquia de San José, las cuales se encuentran en la ciudad capital y son consideradas como dos de los principales atractivos turísticos del estado, tanto por su arquitectura como por su historia. Asimismo, el sismo provocó daños en alrededor de 20 escuelas del estado, de las

cuales tres de ellas se vieron en la necesidad de suspender las labores escolares de manera temporal. Entre ellas, la primaria Mariano Matamoros, de Ixtaquixtla, fue la que presentó más fisuras en sus paredes por el movimiento telúrico.

En Tlaxcala no se presentaron decesos a consecuencia del temblor, aunque se registraron 70 personas con lesiones debido a golpes, crisis nerviosas y quemaduras, principalmente. También se presentaron des-

gajamientos importantes de tierra en la montaña La Malinche, a la altura de la Cañada, lo que provocó que manantiales de agua quedaran bloqueados. En un cerro de Xochitcatilla, el desprendimiento de un cerro ocasionó el cierre parcial de una carretera.

Las autoridades estatales anunciaron que destinarán 3 millones de pesos para la reparación de los inmuebles públicos que resultaron dañados, aunque un número indetermina-

do de viviendas resultaron con cuarteaduras, principalmente en el municipio de Nativitas, pero el recuento de bienes e inmuebles de particulares que registran cuarteaduras aún no se conoce. No hubo graves daños materiales en la entidad, pero el temblor del martes 15 de junio, provocó sustos, crisis nerviosas y rememoró el terremoto del 19 septiembre de 1985 en la ciudad de México, pero sobre todo evidenció la falta de una cultura de protección civil en Tlaxcala.



#### RESUMEN TOTAL DE DAÑOS

INSTITUCIONES EDUCATIVAS	3'805,000.00
IGLESIAS	1'168,800.00
EDIFICIOS PUBLICOS	555,000.00
BIENES INMUEBLES PARTICULARES	345,000.00
PILARES DE HUAMANTLA	170,000.00
TOTAL	6'043,800.00

Fuente: IEPCT

**ANEXO 2.**

*Funciones de transferencia empíricas (FTE), obtenidas a partir de registros de microtemores y aplicando la técnica de Nakamura.*

