



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

## REVISIÓN DE ESTUDIOS DE EFECTO DE SITIO PARA ZONAS URBANAS DE MÉXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A

**DANIEL VEGA ROCHA**



DIRECTOR DE TESIS:

M.en C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO

CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2004



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.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Daniel Vega Rocha

FECHA: 18 de febrero de 2004

FIRMA:

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/083/03

Señor  
DANIEL VEGA ROCHA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el Profesor M.C. JAVIER LERMO SAMANIEGO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"REVISIÓN DE ESTUDIOS DE EFECTO DE SITIO PARA ZONAS URBANAS DE MEXICO"**

- INTRODUCCION
- I EL EFECTO DE SITIO
- II ESTUDIOS DE EFECTO DE SITIO EN MEXICO
- III EFECTO DE SITIO EN LAS CIUDADES DE ACATLAN Y TEHUACAN, PUEBLA . EL CASO DEL TEMBLOR DE TEHUACAN DEL 15 DE JUNIO DE 1999
- IV CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 25 Agosto 2003.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

## DEDICATORIA

*A mi madre,  
por el ejemplo de humildad,  
de amor al prójimo y de gratitud  
que supo sembrar en mi corazón,  
por el apoyo que siempre me ha  
dado a pesar de las circunstancias.*

*A mi abuela,  
por el amor incondicional que  
ha mostrado hacia mis hermanos  
y hacia mí, por el cariño en el que nos  
acogió cuando más lo necesitamos.*

*A mis hermanos,  
por todo lo que vivimos juntos  
durante la infancia, por ayudarnos  
mutuamente y seguir el ejemplo  
que mamá nos ha obsequiado.*

*A Roberto Chacero Urbán,  
por el amor y el cariño que ha  
brindado a mi familia, por su noble  
y dedicada entrega en la lucha por  
salir adelante, por ser un padre  
para mí a pesar de las adversidades.*

*A Marisol de la Cruz Nava,  
por ser como un ángel en mi vida,  
por el apoyo sincero que supo darnos,  
por su incesante carácter de servicio  
y amor a las personas que le rodean.*

*A Francisco,  
por su compañía, ayuda y  
cooperación en nuestra casa,  
por la sinceridad y honestidad  
que ha mostrado hacia nosotros.*

## AGRADECIMIENTOS

Sería imposible mencionar en unas cuantas líneas a todas aquellas personas que contribuyeron en la realización de este trabajo. Aun cuando considero que son escasas las palabras para expresar el enorme agradecimiento que siento hacia ellas, me atrevo a citar sus nombres a manera de un sincero y sencillo homenaje por el valioso apoyo que me brindaron en alguna etapa de mi vida:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de cursar en sus aulas mis estudios de bachillerato y licenciatura, por otorgarme los apoyos económicos necesarios para concluirlos satisfactoriamente.

Al M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego, por sus consejos y recomendaciones que reforzaron mi formación académica.

Al M. en I. José Luis Trigós Suárez, por fomentar uno de los valores más constructivos en la vida del ser humano: el de la humildad, por la excelente formación académica que de él recibí, por su comprensión y confianza.

Al M. en I. Marco Antonio Macías Castillo, por la comprensión y el apoyo que siempre me ha brindado, por ser mi primer tutor en el Instituto de Ingeniería, por su sincera amistad.

Al M. en I. Ricardo Rubén Padilla Velázquez, por la enorme confianza que depositó en mí durante la realización de este trabajo.

Al Ing. Jaime Martínez Martínez, por la formación académica que de él recibí durante mis primeros semestres en la Facultad de Ingeniería.

Al Ing. Pablo García y Colomé, por fomentar una actitud de servicio y amor al prójimo en mi vida, por las ocasiones en las que conté con su valioso apoyo, por sus sabios consejos y recomendaciones.

A Lidia Delgado, por el cariño y la comprensión que ha mostrado hacia los alumnos del PARA, por el enorme trabajo que realiza para dar continuidad al programa de becas, por el apoyo incondicional que supo darme cuando más lo necesité, por su amistad y confianza.

A Juan Orozco Vázquez, por todo lo que hemos emprendido juntos, por su ayuda tan valiosa en los momentos difíciles, por sus sabios consejos de compañero y amigo.

A todos los compañeros que fueron alumnos del PARA, a quienes acudí en su ayuda hace ya casi un año, por su pronta y generosa respuesta.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería: Ing. Marcos Chavacán Ávila e Ing. Isabel Bernal Esquia, por su colaboración en los últimos detalles de este trabajo.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
El concepto de Ciudades Sustentables.....	1
Antecedentes y conceptos generales.....	3
Alcances del presente trabajo.....	5
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>EL EFECTO DE SITIO.....</b>	<b>7</b>
I.1 Definición y características.....	7
I.2 Aspectos del proceso de evaluación.....	13
I.2.1 Información.....	13
I.2.2 Registros sísmicos.....	13
I.2.3 Técnicas de análisis.....	14
I.2.4 Resultados.....	16
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ESTUDIOS DE EFECTO DE SITIO EN MÉXICO.....</b>	<b>17</b>
II.1 Introducción.....	17
II.2 Gráficas y datos estadísticos sobre las características de los estudios.....	20
II.2.1 Instituciones participantes.....	20
II.2.2 Distribución geográfica.....	23
II.2.3 Información utilizada.....	29
II.2.4 Registros obtenidos.....	32
II.2.5 Técnicas aplicadas.....	35
II.2.6 Resultados.....	37
II.3 Conclusiones y comentarios.....	42
II.4 Zonas urbanas más estudiadas en nuestro país.....	43
II.4.1 Ciudad de México.....	43
II.4.2 Ciudad de Guadalajara.....	50
II.4.3 Ciudad de Oaxaca.....	53
II.4.3 Ciudad de Acapulco.....	56
II.4.5 Ciudad de Colima.....	59
II.4.6 Ciudad de Puebla.....	61

**CAPÍTULO III**  
**EFFECTO DE SITIO EN LAS CIUDADES DE ACATLÁN Y TEHUACÁN,**  
**PUEBLA. EL CASO DEL TEMBLOR DE TEHUACÁN DEL 15 DE JUNIO DE**  
**1999**

III.1	Introducción.....	64
III.2	Acatlán de Osorio, Puebla.....	65
III.2.1	Aspectos geológicos.....	65
III.2.2	Distribución de los daños.....	68
III.2.3	Evaluación del efecto de sitio.....	70
III.2.4	Resultados.....	72
III.3	Tehuacán, Puebla.....	77
III.3.1	Aspectos geológicos.....	77
III.3.2	Distribución de los daños.....	80
III.3.3	Evaluación del efecto de sitio.....	86
III.3.4	Resultados.....	90
III.4	Comparación.....	91

<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>92</b>

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>94</b>
--	--	-----------



## INTRODUCCIÓN

### *El concepto de Ciudades Sustentables*

Desde la adopción del capitalismo como el modo de producción primordial en la mayor parte del mundo, el contexto social y económico de numerosos países se ha transformado paulatinamente y se ve influenciado principalmente por dos procesos:

- La globalización, condicionada por la liberación económica, las decisiones políticas de las grandes potencias y las eficientes redes de comunicación instantánea, con lo cual se acentúan las diferencias económicas entre países ricos y pobres.
- Una creciente urbanización, sobre todo en los países del Tercer Mundo, a tal grado que en el medio urbano se produce el mayor porcentaje del producto interno bruto de dichos países; y en muchos casos, en condiciones poco competitivas frente a la globalización. Debido a que este proceso de crecimiento es desmesurado y desordenado, resultan ciudades ineficientes, hostiles y riesgosas.

Si los países en vías de desarrollo no adoptan medidas eficientes para crecer en concordancia con este dinámico escenario internacional, la brecha entre los países ricos y pobres se hará cada vez más grande.

### *Ciudades ineficientes y hostiles*

El rápido crecimiento poblacional de las ciudades del Tercer Mundo ha sobrepasado enormemente, en casi todos los casos, la capacidad de los gobiernos locales y nacionales para proporcionar servicios adecuados, provocando un marcado deterioro de la vida urbana.

La pauperización del campo, incrementada por el bajo precio de los productos agrícolas, los ineficientes y costosos medios de transporte, y por efectos climáticos adversos (como inundaciones o sequías), son factores que influyen en la migración del campo a las ciudades. Estas situaciones, unidas a la falta de un eficiente manejo de los recursos económicos y a la decisión a veces desacertada de las autoridades locales, traen consigo un crecimiento urbano desordenado.

Los principales problemas derivados de este desorden son: carencia de viviendas, infraestructura y servicios urbanos adecuados, degradación del medio ambiente, falta de empleo, así como aumento de la pobreza y sus secuelas de hambre y enfermedades, con la consecuente desarticulación de las familias y de la sociedad en general.

Todas estas circunstancias hacen hostiles a la mayoría de las ciudades importantes del Tercer Mundo, e ineficientes en la producción de bienes y servicios.

### *Ciudades crecientemente riesgosas*

Debido a su expansión urbana, las ciudades de los países en vías de desarrollo están ocupando, cada vez con mayor frecuencia, zonas de peligro alto o muy alto. En tales lugares se construyen viviendas y servicios públicos vulnerables, que ponen en riesgo a sus habitantes. Así, cuando ocurren fenómenos naturales intensos, la vida en la ciudad se ve súbitamente envuelta en una situación de desastre, con numerosas víctimas y cuantiosas pérdidas materiales que provocan grandes penurias a los sobrevivientes.

### *Ciudad Sustentable*

Problemas tan vastos y complejos como estos brevemente descritos, requieren estrategias integrales para hacerles frente, de tal forma pueda mejorarse la calidad de vida de los habitantes. Al respecto, podríamos plantear la siguiente pregunta: ¿cuáles son los atributos de la ciudad en la que deseáramos vivir?

Los atributos de una ciudad sustentable, es la respuesta. Hay que formular planes de desarrollo, implantar y dar mantenimiento adecuado a los servicios de una ciudad, empezando por disminuir la tendencia a ser cada vez más riesgosa, lo cual es humanamente factible de realizar en corto plazo.

Definimos como **ciudad sustentable** aquella que es segura, ordenada, saludable, atractiva (cultural y físicamente), eficiente (en su funcionamiento y desarrollo), sin afectar al medio ambiente y, como consecuencia de todo ello, gobernable. El objetivo final es lograr una ciudad competitiva, capaz de producir bienes y servicios de manera eficiente, que atraiga inversiones para crear nuevos puestos de trabajo, con lo cual sería posible elevar la calidad de vida de sus habitantes de manera efectiva.

Es comprensible que todos estos atributos sólo pueden lograrse concretamente a largo plazo, pero es posible realizar acciones prioritarias en el corto plazo; una de ellas es la de proteger la vida y la salud, lo máspreciado que tenemos como seres humanos. La consecución de dichos atributos debe ser el objetivo primordial de las autoridades locales, regionales y nacionales, y debe servirles de guía para la toma de decisiones y acciones en el corto plazo.

Para guiar la formulación de programas integrales y de proyectos prioritarios, encauzados al objetivo de fomentar el desarrollo de ciudades competitivas, es necesario entender el significado de dichos atributos y de cómo podríamos lograrlos.

*Segura.* Enfocado en las previsiones de los centros urbanos frente a los fenómenos naturales intensos o extremos y sus secuelas.

---

*Ordenada.* Este atributo es contrario a la caótica forma en que crecen numerosas ciudades de países en vías de desarrollo. Sin embargo, la disciplina y el respeto mutuo entre los habitantes no son suficientes para lograr un desarrollo urbano armónico; sobre todo, es necesaria una planeación efectiva, así como su adecuada implantación y mantenimiento.

*Saludable.* La contaminación del aire, el agua y la tierra, hacen del entorno urbano un ambiente agresivo contra la salud del hombre. El requisito es evidente: agua, tierra y aire limpios.

*Atractiva cultural y físicamente.* Para que los ciudadanos vivan cómodamente, eleven su productividad y mejoren su nivel de ingresos, es necesario que el ambiente urbano sea agradable y que la ciudad sea atractiva y brinde posibilidades de gozar una vida cultural rica. Es un atributo que está en el programa de desarrollo urbano de muchos municipios.

*Eficiente en su funcionamiento y desarrollo, sin afectar negativamente al medio ambiente.* El eficiente funcionamiento y desarrollo de una ciudad requiere de un equipo municipal capaz de administrar adecuadamente los recursos, motivado a servir a su comunidad con dedicación, honestidad y transparencia, que tenga claros objetivos de su gestión en el corto, mediano y largo plazos, y que de acuerdo con esto programe e implemente las acciones prioritarias necesarias. Es uno de los atributos clave de una ciudad sostenible para que llegue a ser competitiva.

*Gobernable.* Por el respeto y la consideración mutua que se dispensan ciudadanos y autoridades, el manejo de la ciudad puede realizarse sin mayores dificultades, al crearse condiciones favorables para el progreso, sin enfrentamientos inútiles. El gobierno debe efectuarse democráticamente en función de los intereses de la mayoría de los ciudadanos.

*Competitiva.* Esta característica es consecuencia del desarrollo armónico de todos los atributos antes mencionados.

### *Antecedentes y conceptos generales*

La estrategia para la consecución del primer atributo de una ciudad sostenible, la seguridad, consiste en conciliar los requerimientos del desarrollo urbano con las enseñanzas que nos ha brindado la naturaleza, por medio de estudios de microzonificación.

A lo largo de la historia de nuestro país, en el territorio nacional han ocurrido numerosos desastres naturales ocasionados por distintos fenómenos: huracanes, inundaciones, sismos, sequías, incendios forestales, deslizamientos de tierra, etc. De acuerdo con una recopilación de estadísticas de desastres en México realizada por CENAPRED (2001), los tres primeros fueron los más frecuentes en el siglo pasado (ver figura 1).

Un programa efectivo de mitigación de desastres, para una determinada ciudad, permite minimizar las pérdidas humanas y materiales, de tal forma que el desarrollo económico y social de dicha localidad no sea obstaculizado por la presencia de un fenómeno natural (Kuroiwa, 2002). Para lograr esto, es necesario reducir el riesgo por desastre, es decir, orientar

---

---

el desarrollo urbano de la localidad para brindarle mayor seguridad ante los distintos peligros naturales a los que está expuesta.

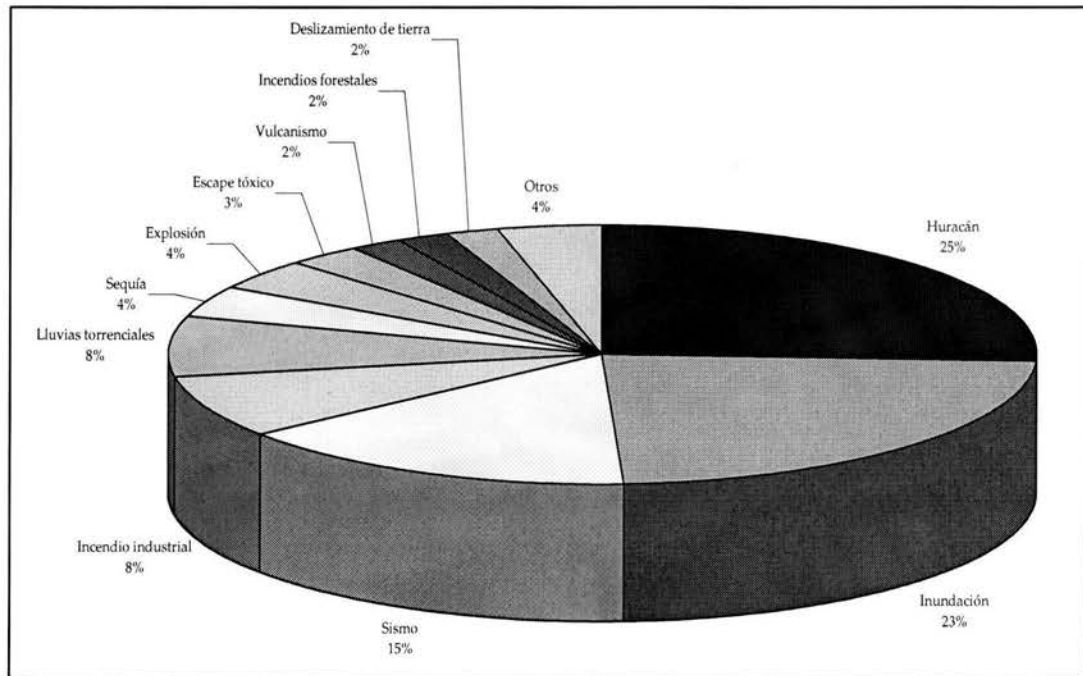


Figura 1. Fenómenos asociados a los desastres más grandes ocurridos en México durante el siglo XX

La microzonificación de una ciudad consiste en definir sus diferentes zonas de peligro, y presentarlas en forma de mapas. Estos mapas de microzonificación deben ser el resultado de investigaciones donde se consideren aquellos fenómenos naturales que influyen directamente en la localidad de interés; estos mapas permiten planificar el uso del suelo, y reducir así el riesgo por desastre natural (Kuroiwa, 2002). Por ejemplo, en un estudio detallado de microzonificación sísmica se debe investigar la influencia de los siguientes peligros (Hays, 1989): sismos, erupciones volcánicas, tsunamis, deslizamientos de tierra, y licuación de suelos arenosos.

En términos generales, el riesgo depende de dos factores: a) el peligro potencial, es decir, la medida en que una zona geográfica determinada está expuesta a los fenómenos naturales, para un cierto intervalo de tiempo, independientemente si en tal zona existen construcciones hechas por el hombre; y b) la vulnerabilidad, es decir, la medida en que las construcciones existentes pueden presentar daños ante los embates de la naturaleza.

En particular, asociado al riesgo sísmico, el peligro sísmico depende principalmente de los siguientes factores (Muñoz, 1989): la magnitud del sismo, la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia epicentral, y las condiciones locales del suelo en la zona estudiada. A este último se le denomina efecto de las condiciones locales, efectos locales, efecto de las condiciones de sitio o también *efecto de sitio*.

### *Alcances del presente trabajo*

El objetivo de este trabajo consiste en hacer una revisión cualitativa de los estudios de efecto de sitio que se han realizado en México para diferentes zonas urbanas del país. Específicamente, revisé los aspectos más importantes del proceso de evaluación del efecto de sitio: información previa, registros usados, técnicas de análisis aplicadas y resultados obtenidos.

Para esto, dividí el proceso en dos partes:

- Realizar una revisión general, para determinar cualitativamente cuáles son las principales características de los estudios de efecto de sitio en México.
- Presentar un estudio sobre el efecto de sitio en las ciudades de Acatlán y Tehuacán, en el Estado de Puebla, para mostrar que la técnica de análisis y el tipo de registros usados son dos aspectos que influyen significativamente en la obtención de resultados confiables.

La revisión general consistió en recopilar y analizar los estudios publicados entre 1987 y 2001, en memorias de congresos, revistas, artículos, boletines, etc., para identificar en cada uno de ellos los siguientes aspectos:

- Tipo de información incluida sobre la zona urbana estudiada.
- Tipo de registros usados para cuantificar el efecto de sitio.
- Tipo de técnicas aplicadas para el análisis de los registros.
- Tipo de resultados obtenidos.

Revisé 45 estudios en total, y capturé electrónicamente, en una base de datos, las características de cada uno para los aspectos mencionados. Adicionalmente, consulté datos del INEGI para elaborar una estadística sobre la cantidad y distribución de las zonas urbanas más pobladas (con más de 50 mil habitantes) en los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, que son las entidades federativas con mayor peligro sísmico del país; a partir de esta base de datos, elaboré tablas y gráficos sobre la distribución de las localidades que han sido estudiadas y las que aún faltan por estudiar en esos Estados. Cabe mencionar que posiblemente haya otros estudios para ciudades del noroeste de México, para la Península de Baja California, pero no aparecen publicados en las obras que consulté; además, en este trabajo sólo consideré las técnicas de análisis que más se han utilizado, aunque existen otras de aplicación reciente como el método f-k o el método SPAC (Aki, 1957; Kasawa, 1996).

En cuanto a la segunda parte, revisé y complementé un estudio previo de Lermo *et al.* (2000) sobre la evaluación del efecto de sitio en las ciudades de Acatlán y Tehuacán, Puebla, para el caso del sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. Retomé los registros de vibración ambiental de dicho trabajo y los utilicé para cuantificar el efecto de sitio en estas ciudades.

Por otro lado, la organización del presente trabajo es la siguiente:

---

---

En el primer capítulo, explico la importancia de evaluar el efecto de sitio como parte de un estudio de microzonificación sísmica, describo sus principales características, los tipos de registros que se usan, los tipos de técnicas de análisis que comúnmente se aplican, así como los tipos de resultados que se obtienen.

En el segundo capítulo, muestro las tablas y los gráficos que obtuve a partir de la base de datos mencionada. Muestro datos relevantes sobre el tipo de: a) información incluida; b) registros usados; c) técnicas de análisis aplicadas; y d) resultados obtenidos.

En el tercer capítulo, presento los resultados de la revisión, corrección y complementación que hice a un estudio previo realizado por Lermo *et al.* (2000), sobre el efecto de sitio en las ciudades de Acatlán de Osorio y Tehuacán, Puebla, para el caso del sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. De esta manera, ejemplifico los aspectos del proceso de evaluación del efecto de sitio para dichas zonas urbanas, y muestro en cuál de las dos es más significativa la influencia de este fenómeno cuando se presenta un movimiento sísmico del suelo. Para la ciudad de Tehuacán, en particular, comparo los resultados que obtuve con los que aparecen en el estudio realizado por Osorio-Carreta *et al.* (1997); en este caso, muestro la importancia de elegir la técnica de análisis adecuada para obtener resultados confiables de la evaluación del efecto de sitio.

Finalmente, en el cuarto capítulo, expongo las conclusiones que obtuve a partir de los resultados de las revisiones descritas, así como ciertas consideraciones que deben tomarse en cuenta al realizar un estudio de efecto de sitio.

## CAPÍTULO I EL EFECTO DE SITIO

### I.1 Definición y características

Las principales variables que influyen en el peligro sísmico son:

- Ubicación del epicentro, dada por sus coordenadas y su profundidad focal, con lo cual queda señalada la ubicación del foco.
- Tamaño o magnitud del sismo.
- Mecanismo de generación y la dirección de propagación de la ruptura.
- Las características del medio a través del cual viajan las ondas sísmicas.
- La distancia epicentral.
- Las características locales del sitio de observación.

Debido a las incertidumbres y a la complejidad que resulta de incluir todos los parámetros en un mismo modelo, sólo se consideran las variables más significativas:

- La *magnitud* del sismo.
- El decaimiento (*atenuación*) de las amplitudes de las ondas sísmicas a medida que aumenta la distancia epicentral, con lo cual quedan incluidas de manera implícita las características del medio a través del cual se propagan las ondas sísmicas.
- Las *características locales del sitio* en observación.

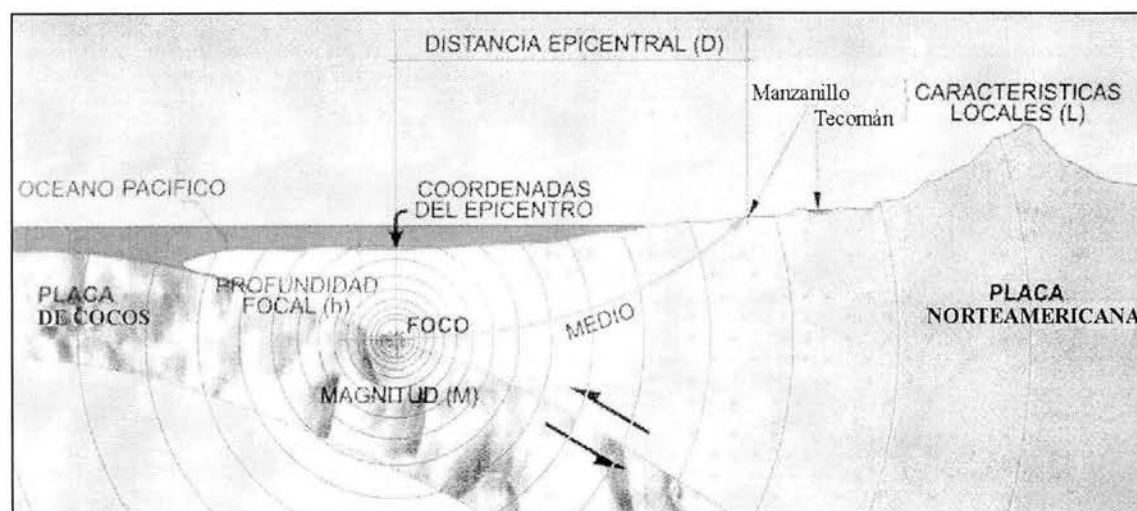


Figura 2. Variables más significativas de las que depende el peligro sísmico (modificado de Kuroiwa, 2002).

A la última variable se le conoce como *efecto de sitio*, y se define como la influencia de las propiedades geotécnicas, geológicas y topográficas de los estratos más superficiales de la corteza terrestre en las características de los movimientos sísmicos esperados para un sitio (Chávez *et al.*, 1987).

De observaciones durante temblores de origen tectónico (Seed and Idriss, 1982) o debidos a explosiones nucleares (Rogers *et al.*, 1984) se ha llegado a la conclusión que las propiedades geotécnicas, geológicas y topográficas de los estratos más superficiales de la corteza terrestre, cuyos espesores son de decenas o centenas de metros, tienen gran influencia en las características de los movimientos sísmicos esperados para un sitio. Estos estratos determinan, en gran medida, la amplitud, contenido de frecuencias y duración del movimiento (Chávez *et al.*, 1987).

El terreno del Valle de México se ha clasificado en tres zonas geotécnicas tomando en cuenta, principalmente, sus propiedades de deformación y resistencia: la zona lacustre, cuyos suelos están formados por depósitos de arcilla sumamente compresibles y con altos contenidos de agua; la zona de transición, compuesta de materiales aluviales areno-limosos intercalados con capas de arcilla; y la zona firme, o zona de lomas, compuesta básicamente por una capa de lavas o tobas volcánicas (Ordaz y Singh, 1991), donde los suelos son poco compresibles y de alta resistencia.

La amplificación de las ondas sísmicas en la zona lacustre del Valle de México es un fenómeno bastante conocido y documentado (Rosenblueth, 1953; Sánchez-Sesma *et al.*, 1988; Singh *et al.*, 1988a, b). Esta amplificación es la causa más importante de los daños que se presentan en esta ciudad por influencia de temblores costeros, cuyas distancias epicentrales son mayores de 350 km. Por esta razón, la instrumentación sísmica en la zona lacustre se ha intensificado en los últimos años, lo cual ha permitido conocer con mayor detalle el comportamiento del terreno ante movimientos sísmicos (ver figura 3).



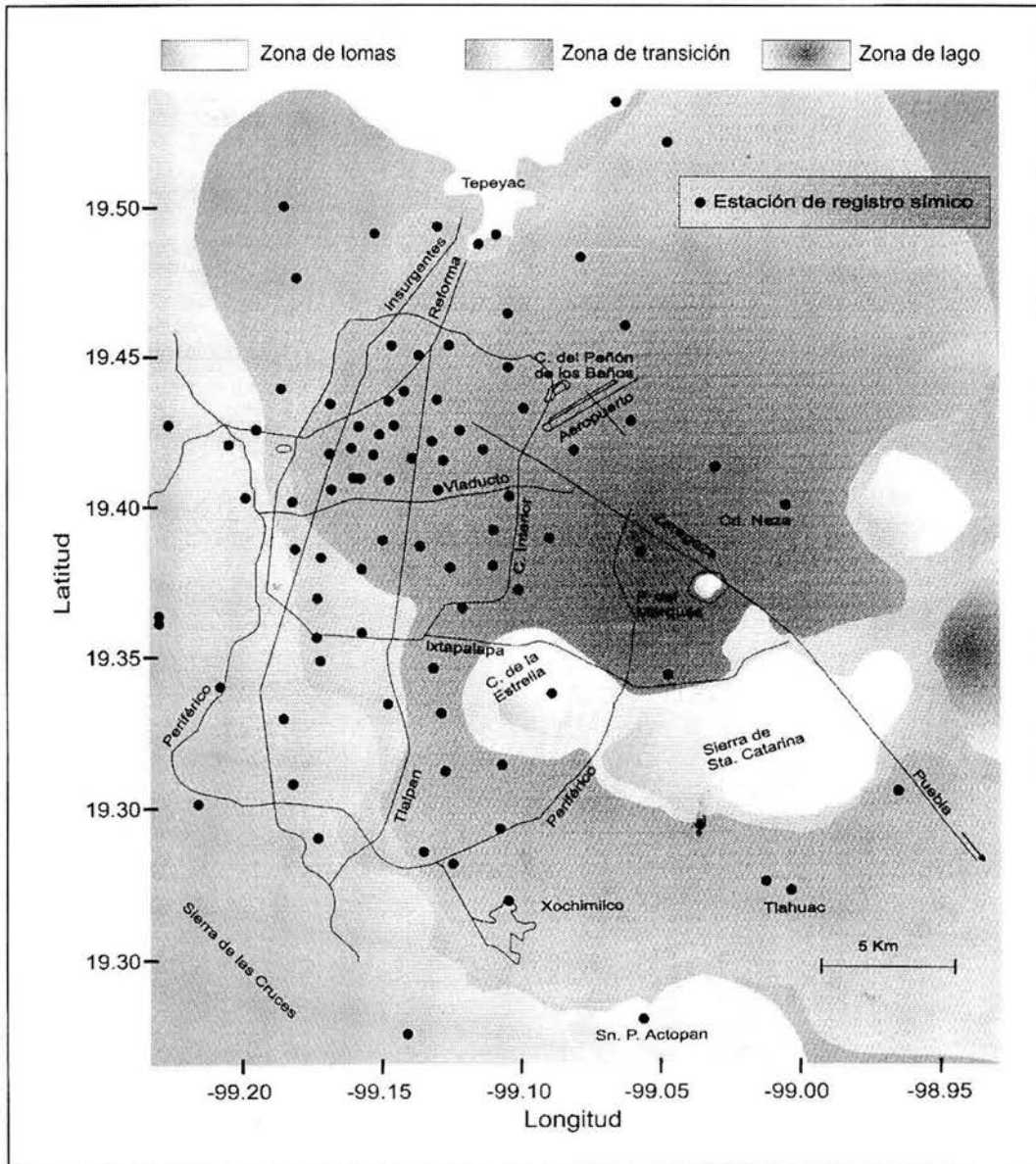


Figura 3. Zonificación geotécnica del Valle de México (tomada de CENAPRED, 2001). Los círculos oscuros representan las estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México.

En cuanto al origen de los temblores en nuestro país, se conoce que el territorio nacional es afectado por la movilidad de cinco placas tectónicas: Norteamericana, de Cocos, del Pacífico, Rivera y del Caribe (ver figura 4). En la franja costera que va desde Jalisco hasta Chiapas, las placas Rivera y de Cocos penetran por debajo de la Norteamericana, fenómeno conocido como de subducción. En la zona norte de la Península de Baja California y a lo largo del Estado de California, en los EUA, existe un desplazamiento horizontal relativo entre la placa del Pacífico y la Norteamericana. Estos dos movimientos, principalmente, generan la mayor cantidad de los sismos que ocurren en México.

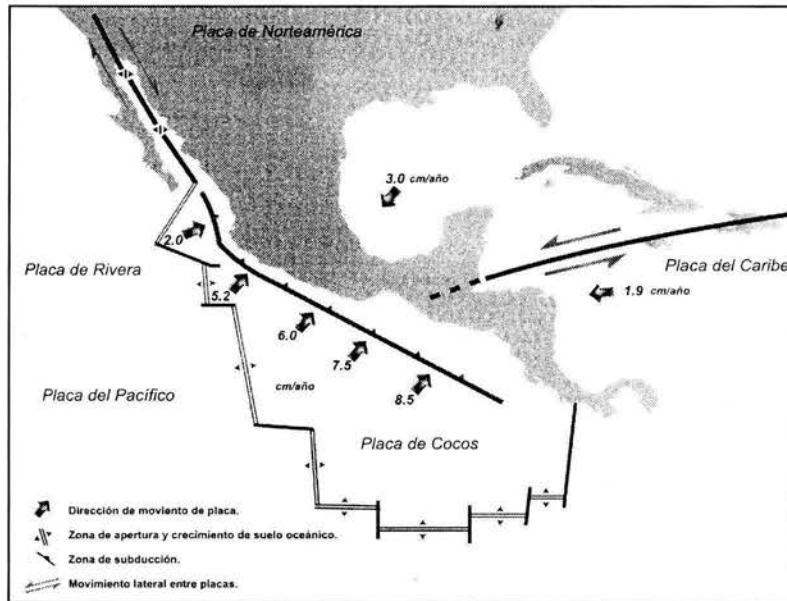


Figura 4. Marco tectónico de la República Mexicana.

En la figura 5 se muestra un mapa de los sismos de magnitud  $M \geq 6.5$  localizados en nuestro país durante el siglo XX, tomado de la página Web del Servicio Sismológico Nacional ([www.ssn.unam.mx](http://www.ssn.unam.mx)); los círculos claros corresponden a sismos superficiales (con profundidades menores a 50 km), y los oscuros representan sismos con profundidades mayores a 50 km.

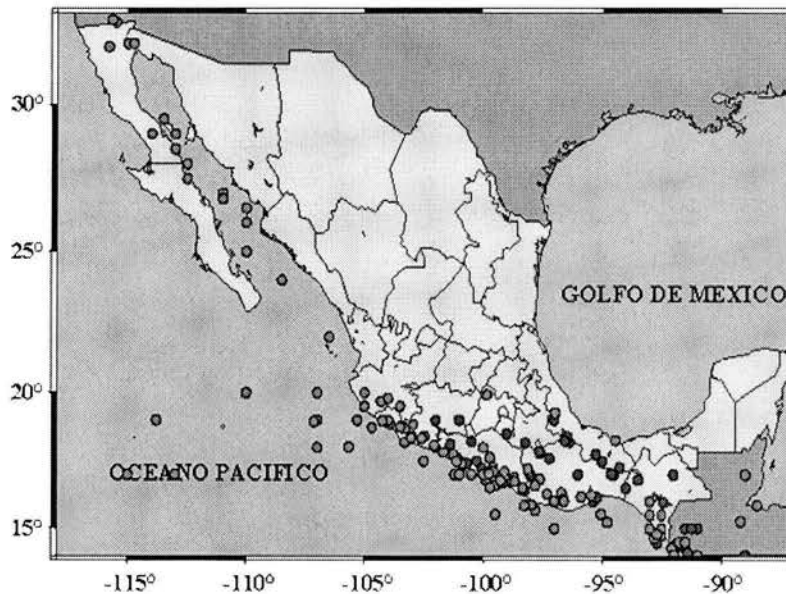


Figura 5. Actividad sísmica en México durante el siglo XX, eventos con magnitud  $M \geq 6.5$  (tomado de la página Web del Servicio Sismológico Nacional).

Como resultado de la superposición de todos los mapas de intensidades de sismos mexicanos, disponibles hasta ahora, contamos con un mapa global de intensidades para la República Mexicana. En él se despliegan las intensidades máximas de 49 sismos de gran magnitud que ocurrieron entre el 7 de abril de 1845 y el 19 de septiembre de 1985 (Figueroa, 1986). En la figura 6 se muestra dicho mapa.

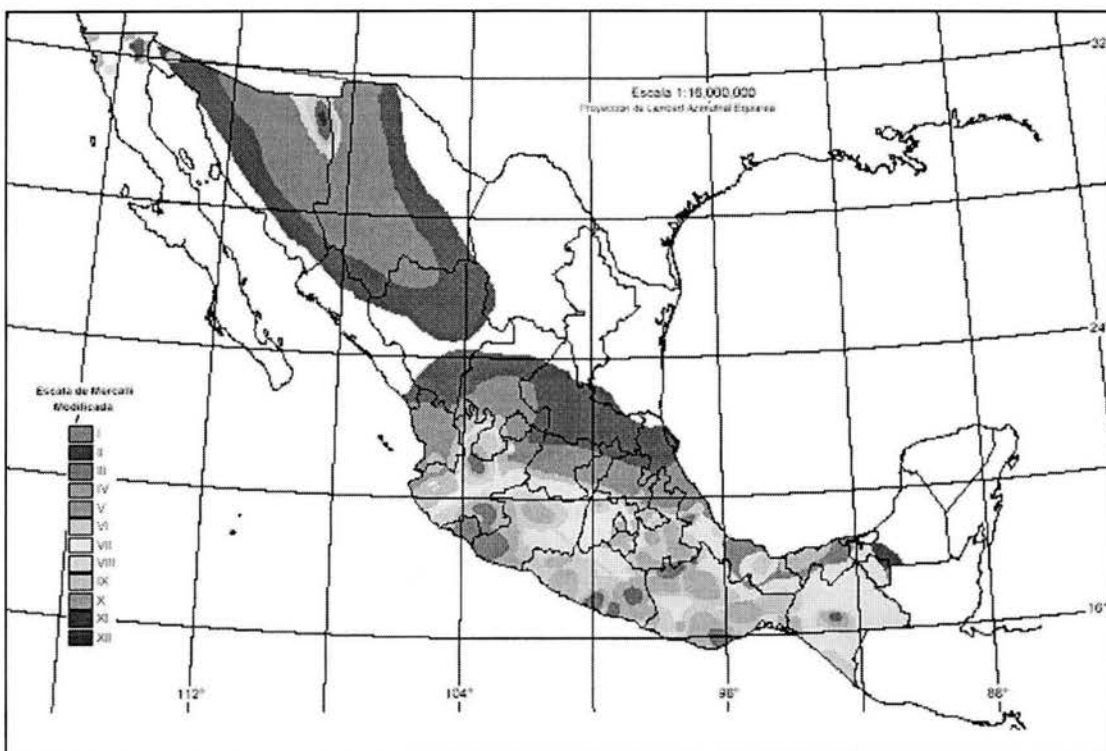


Figura 6. Mapa global de intensidades para la República Mexicana  
(tomado de CENAPRED, 2001).

Empleando los registros históricos de grandes sismos en México, los catálogos de sismicidad y datos de aceleración del terreno como consecuencia de sismos recientes de gran magnitud, se ha definido la Regionalización Sísmica de México. En la figura 7 se muestra el mapa correspondiente. Podemos distinguir cuatro zonas: la zona A, donde no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y las aceleraciones esperadas del terreno son menores a 0.1 veces la aceleración gravitacional; la zona D, donde han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones esperadas del terreno pueden ser mayores a 0.7 veces la aceleración gravitacional; las zonas B y C, entre las dos anteriores, donde la sismicidad es intermedia y las aceleraciones esperadas no son superiores a 0.7 veces la aceleración gravitacional. El valor estándar de la aceleración gravitacional ( $g$ ) es de  $9.80665 \text{ m/s}^2$ .

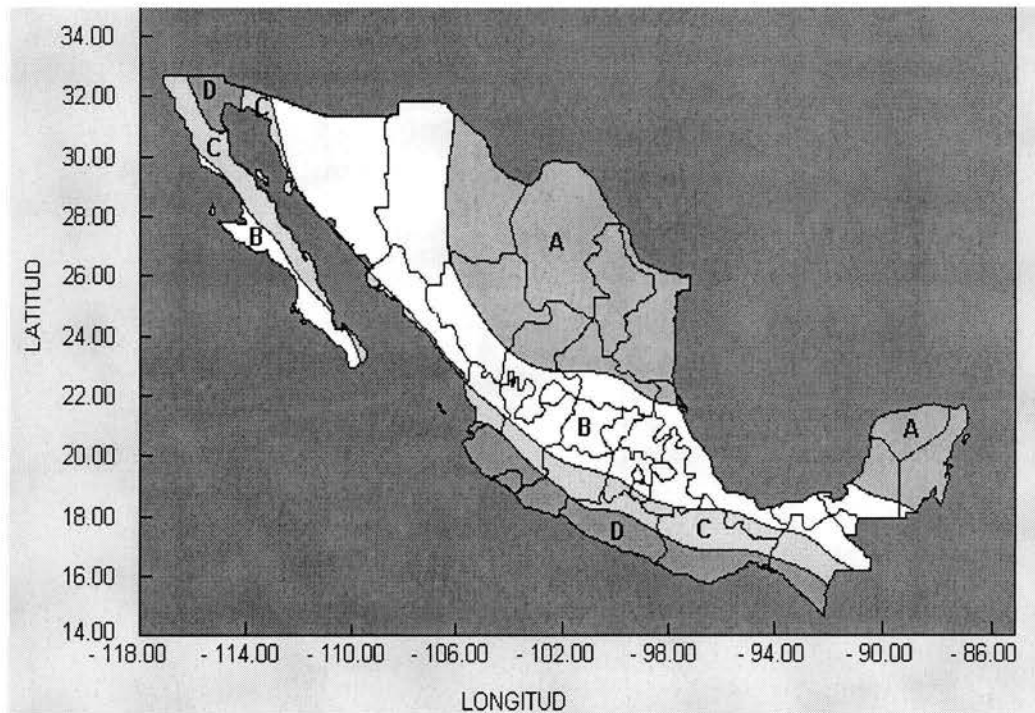


Figura 7. Mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana (tomado del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, 1993).

Si superponemos a la misma escala los mapas de las figuras 5 y 6, nos daremos cuenta que existe una clara correspondencia entre la actividad sísmica y los niveles de intensidad para la zona de subducción y para la zona norte de la Península de Baja California. Por el contrario, en otras zonas no se aprecia una gran actividad sísmica, y sin embargo tienen altos niveles de intensidad; por ejemplo, el sismo de Bavispe, Sonora ( $M_w = 7.2$ ), del 3 de mayo de 1887, ocurrió en una zona donde no hay gran actividad sísmica y, sin embargo, ocasionó daños incluso en el Estado de Durango (CENAPRED, 2001). Cabe resaltar que el mapa de la figura 5 corresponde a sismos ocurridos en México durante el siglo XX, mientras que el mapa de la figura 6 a sismos ocurridos entre el 7 de abril de 1845 y el 19 de septiembre de 1985; aunque se trata de dos intervalos de tiempo diferentes, nos sirven para darnos una idea de las diferencias que existen entre la distribución de intensidades y la actividad sísmica en nuestro país. Las condiciones locales del suelo, es decir, el efecto de sitio, pueden o no influir significativamente en la amplificación de los movimientos sísmicos para un sitio; pero es necesario cuantificar este fenómeno en el sitio de interés, para determinar si es un factor importante en los niveles de intensidad que se alcanzan durante un sismo.

Como el efecto de sitio se manifiesta en los estratos superficiales de la corteza terrestre, para cuantificarlo es necesario determinar la respuesta dinámica de la estratigrafía de suelo en el lugar de interés. En la naturaleza, el subsuelo puede presentarse como un depósito de suelos –con diferentes propiedades índice y mecánicas– cuya base es una formación rocosa (Trueba, 1991). La profundidad de la roca basal podría estar a varias decenas o centenas de metros bajo la superficie del terreno. Cuando ocurre un terremoto, la señal sísmica llega a la formación rocosa basal, se filtra a través del medio estratificado y finalmente se manifiesta en

la superficie libre. Si la amplitud de la señal sísmica en superficie libre es mayor que la correspondiente en la formación rocosa basal, ocurre una amplificación del movimiento respecto a la base rocosa. De esta manera, los parámetros que comúnmente se obtienen para cuantificar el efecto de sitio son: la amplificación relativa y el periodo natural de vibración del suelo.

## I.2 Aspectos del proceso de evaluación

### I.2.1 Información

Generalmente, al evaluar los efectos locales de un sitio, se realiza una investigación preliminar sobre aspectos como:

- Tectónica y sismicidad de la región.
- Geología local.
- Topografía y geomorfología.
- Geotecnia (estudios previos).

A partir de la información disponible, es posible ubicar puntos de interés en el lugar de estudio para registrar movimientos sísmicos del terreno. Además, esta información permite una mejor comprensión de los resultados obtenidos en el estudio realizado.

### I.2.2 Registros sísmicos

Para determinar la amplificación relativa ( $A_r$ ) y el periodo natural de vibración ( $T_0$ ) del suelo, se utilizan los registros de: movimientos sísmicos fuertes, movimientos sísmicos débiles o moderados, y microtemores (vibración ambiental). Los resultados que se obtienen a partir de estos registros, pueden complementarse con los obtenidos a partir de modelos analíticos de propagación de ondas que idealizan la estratigrafía superficial como un medio continuo o uno discreto (Ohtsuki y Yamahara, 1984); para aplicar estos modelos, es necesario contar con información sismológica de la región donde se encuentra el sitio de interés, así como con información geotécnica de la estratigrafía en dicho sitio (Chávez *et al.*, 1987).

#### Movimientos sísmicos fuertes

La información más valiosa sobre efectos de sitio para ser aplicada en microzonación sísmica es el uso directo de registros de movimientos sísmicos fuertes, debido a que incluyen efectos no lineales y amplios contenidos de frecuencias. Una de las limitaciones en el análisis de movimientos sísmicos fuertes es que sólo se aplica para los lugares donde los instrumentos de registro están densamente colocados y donde la sismicidad es elevada. En nuestro país, solamente el Distrito Federal tiene instalados más de 150 acelerógrafos, distribuidos dentro de la zona urbana; ciudades como Guadalajara (Jalisco), Acapulco (Guerrero), Chilpancingo (Guerrero), Puebla (Puebla), Oaxaca (Oaxaca) y Toluca (Edo. de México), tienen entre 5 y 10 acelerógrafos; ciudades como Morelia (Michoacán), Puerto de Veracruz (Veracruz) y Tuxtla Gutiérrez (Chiapas), tienen alrededor de tres acelerógrafos

---

(Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, página Web [www.mexaceldb.unam.mx/db](http://www.mexaceldb.unam.mx/db)). Por esta razón, en muchos casos, los registros de movimientos fuertes no son suficientes para dibujar curvas detalladas de periodos dominantes del suelo.

### Movimientos sísmicos débiles o moderados

Borcherdt (1970), Rogers *et al.* (1984), Chávez-García *et al.* (1995), Lermo y Chávez-García (1993), entre otros, demostraron buena correlación del factor de amplificación para un sitio entre datos de movimientos débiles o moderados y datos de movimientos fuertes. Una parte controvertida de la aplicabilidad de estos registros es la presencia de efectos no lineales durante movimientos sísmicos fuertes del terreno. Sin embargo, aportan información útil para realizar una estimación preliminar del nivel de amplificación del suelo durante un sismo.

### Microtremores (vibración ambiental)

La superficie terrestre vibra constantemente, con amplitudes muy pequeñas del orden de micrómetros que se llaman vibraciones ambientales. Kanai y Tanaka (1961) definen los microtremores como vibraciones del suelo con amplitudes entre  $1 \times 10^{-5}$  y  $1 \times 10^{-4}$  centímetros, con periodos de 0.05, 0.1 a 1.0, 2.0 segundos, generados por el tránsito vehicular, operación de centros fabriles, el viento que hace oscilar árboles, edificios, etc.; como resultado de sus investigaciones con microtremores, concluyeron que el periodo dominante para un movimiento sísmico fuerte o débil está bastante relacionado con el periodo dominante para microtremores. Desde los trabajos de Kanai en la década de los 50, los microtremores se han convertido en una de las herramientas más utilizadas para evaluar el efecto de sitio.

Para algunos sitios de la Ciudad de México donde se tienen registros de movimientos fuertes en la zona lacustre, el periodo asociado al máximo del espectro de Fourier de aceleración es muy parecido al periodo fundamental del suelo (Singh *et al.*, 1988a); el periodo para el cual ocurre la mayor amplificación parece estar relacionado con el periodo del modo fundamental de vibración de la capa de arcilla más somera (Lermo y Chávez-García, 1994a). Los periodos asociados a los máximos espectrales de microtremores ocurren, aproximadamente, para los mismos periodos asociados a los máximos del espectro de Fourier de aceleración de movimientos fuertes (Lermo y Chávez-García, 1994b).

No obstante los cuestionamientos que se han hecho sobre su utilidad (Gutiérrez y Singh, 1991; Lachet y Bard, 1994), las mediciones de microtremores siguen presentando un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de un sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que se obtienen resultados.

### I.2.3 *Técnicas de análisis*

Básicamente, son tres las técnicas utilizadas para el análisis de los registros sísmicos: directamente de la densidad espectral de potencia, el cálculo de la razón o cociente espectral con un sitio de referencia, y el cálculo de la razón o cociente espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro. A las razones o cocientes espectrales también se les conoce como funciones de transferencia, cuya representación gráfica consta de:

---

- En el eje de las ordenadas, la *amplificación relativa* (cociente espectral).
- En el eje de las abscisas, la *frecuencia*. Por lo general, las gráficas se presentan con dominio en la frecuencia.

#### Cociente o razón espectral relativa a un sitio de referencia

Fue introducido por Borchardt (1970). También se le conoce como cociente o razón espectral estándar. Consiste en calcular un cociente de amplitudes espectrales, de la siguiente manera: el numerador corresponde al espectro de amplitudes de Fourier de la señal sísmica registrada en el sitio de interés, y el denominador es el espectro de amplitudes de Fourier de la señal sísmica registrada en un sitio de referencia. Como se pretende determinar la respuesta dinámica de la estratigrafía de suelo en el lugar de interés, lo ideal sería ubicar la estación de referencia en la formación rocosa basal; sin embargo, esto sería poco práctico y muy costoso debido a la considerable profundidad a la cual podría encontrarse. Por esta razón, el sitio que servirá como referencia, en superficie, debe seleccionarse cuidadosamente de manera que sus niveles de amplificación sean los mínimos. Generalmente, se seleccionan terrenos rocosos; la idea es que el registro en roca sea representativo del campo de ondas incidente en la interfase de la formación rocosa basal y el medio estratificado, y evitar así errores de interpretación en los resultados.

Si el valor de dicho cociente es cercano a la unidad, para una determinada frecuencia, se concluye que no hay amplificación significativa del movimiento sísmico del suelo en el sitio de interés respecto a la del sitio de referencia. Si el valor del cociente es mayor o menor que la unidad, para una determinada frecuencia, se concluye que hay una amplificación o una deamplificación -respectivamente- de dicho movimiento.

Como vemos, para utilizar esta técnica es necesario contar con dos registros sísmicos simultáneos: uno en el sitio de interés y el otro en el sitio de referencia. En ocasiones esto no es posible, ya sea por una falla instrumental en alguna de las estaciones, o por la escasa instrumentación sísmica que impide la obtención de registros en los sitios de interés.

#### Cociente o razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical para un mismo sitio

Fue introducido en el contexto de análisis de microtemores por Nakamura (1989). Se le conoce también como técnica de Nakamura, técnica H/V o simplemente REHV, y puede aplicarse incluso a los registros de movimientos sísmicos fuertes o débiles (Lermo y Chávez-García, 1993). Para este cociente, no se requiere una estación de referencia. Consiste en calcular un cociente de amplitudes espectrales, de la siguiente manera: el numerador corresponde a las amplitudes del espectro de Fourier de la componente Norte-Sur o la Este-Oeste del registro obtenido, y el denominador corresponde a las amplitudes del espectro de Fourier de la componente vertical del mismo registro.

Esta técnica, aplicada a registros de microtemores, ofrece una estimación aproximada de la frecuencia natural de vibración del terreno, pero subestima demasiado los valores de amplificación relativa del suelo (Lermo *et al.*, 1987b; Lermo *et al.*, 1994b; Riquer *et al.*, 2003).

Además, sólo nos permite obtener el periodo asociado al primer modo de vibrar de la estratigrafía del sitio, pero no define los periodos para modos superiores (Riquer *et al.*, 2003).

Aunque la técnica H/V aplicada a registros de sismos permite una mejor estimación de la amplificación relativa en comparación con la técnica H/V aplicada a microtemores, también proporciona información sólo del primer modo de vibrar del suelo. La razón espectral estándar aplicada a sismos fuertes y/o débiles es más confiable que estas dos, ya que permite obtener los niveles de amplificación relativa más severos dentro de los eventos registrados, y además permite definir los periodos asociados a modos de vibrar superiores (Lermo y Chávez-García, 1994a).

Lermo y Chávez-García (1994a, b) compararon los resultados que obtuvieron de la técnica REHV aplicada a microtemores con los que obtuvieron de la técnica razón espectral estándar aplicada a registros de temblores. Concluyeron que los microtemores, cuando son analizados con la técnica REHV, permiten una estimación bastante aproximada del periodo dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica, en un intervalo de frecuencias de 0.3 a 10 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación relativa ( $A_r$ ).

#### I.2.4 Resultados

Por lo general, los estudios de efecto de sitio están enfocados a determinar, para las estratigrafías de suelo que subyacen a los puntos de medición, los siguientes parámetros de comportamiento dinámico:

- Periodos dominantes de vibración. Pueden presentarse en mapas de distribución de periodos o en mapas de curvas de isoperiodo.
- Amplificaciones relativas del movimiento. Pueden presentarse en mapas de distribución de amplificaciones relativas o en mapas de curvas de isoamplificación relativa.
- Mapas de microzonificación sísmica. Basados en la configuración de las curvas de isoperiodo.

Y en menor cantidad:

- Perfiles de velocidades de propagación ondas de cortante ( $\beta$ ) a través del medio estratificado.
- Mapas de microzonificación por peligro de: fallas activas, inestabilidad de taludes, inundaciones, agrietamientos.



## CAPÍTULO II ESTUDIOS DE EFECTO DE SITIO EN MÉXICO

### II.1 Introducción

En el presente trabajo, llevé a cabo una revisión de 45 estudios de efecto de sitio, publicados entre 1987 y 2001, realizados para diferentes zonas urbanas de México. Para cada uno de ellos, revisé los siguientes aspectos: a) tipo de información incluida en el estudio; b) tipo de registros usados; c) tipo de técnicas aplicadas en el análisis de los registros; y d) tipo de resultados presentados. Con base en esto elaboré una base de datos, a partir de la cual realicé gráficos sobre las características generales de los estudios revisados.

Adicionalmente, consulté la página Web del INEGI ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)) para investigar cuántas y cuáles son las zonas urbanas más pobladas (localidades con más de 50 mil habitantes) de los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Mostré mayor interés en estas seis entidades federativas por la gran cantidad de sismos que han ocurrido en ellas, tal como apreciamos en el mapa de la figura 5. Con base en estos datos, elaboré tablas y gráficos sobre la cantidad y distribución de dichas localidades en las zonas sísmicas B, C y D de nuestro país.

La tabla 1 contiene una lista de los 45 trabajos revisados, en la que muestro el título y la fecha de publicación de los mismos. Al final de esta obra, aparecen los datos bibliográficos completos para cada uno de ellos.

Tabla 1. Lista de estudios revisados

<i>Número</i>	<i>Título</i>	<i>Fecha</i>
1	Observaciones de microtemblores y su aplicación en la ingeniería sísmica	1987
2	Características dinámicas de las estratigrafías superficiales de un predio localizado en Minatitlán, Veracruz, obtenidas con las técnicas de microtemblores y refracción sísmica	1987
3	Periodos del terreno en la Ciudad de México, derivados de varios sismos suaves	1989
4	Efectos locales observados en Acapulco, Guerrero, durante temblores fuertes	1989
5	Efectos de sitio en Acapulco usando movimientos fuertes y microtemblores	1991
6	Amplificación relativa en la zona urbana de Oaxaca. Contribución a la microzonificación sísmica	1991

Tabla 1. Lista de estudios revisados (Continuación)

<i>Número</i>	<i>Título</i>	<i>Fecha</i>
7	Historia sísmica y amplificación relativa en Acapulco, Guerrero	1991
8	Periodos del suelo del Valle de México medidos en sismos y con vibración ambiental	1991
9	Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa del suelo en la zona urbana de Colima	1991
10	Efectos sísmicos locales en el Valle de México: amplificación en la zona lacustre	1991
11	Zonificación sísmica de la Ciudad de Toluca	1993
12	Zonificación sísmica de la Ciudad de Chilpancingo	1993
13	Zonificación sísmica de la Ciudad de Puebla	1993
14	Curvas de isoperiodo para la Ciudad de Tehuacán, Puebla	1997
15	Mapa de curvas de isoperiodo de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco	1997
16	Propuesta de zonificación sísmica de los municipios de Toluca, Lerma y Metepec, Estado de México	1997
17	Propuesta de zonificación sísmica para la Ciudad de Tehuacán, Puebla	1997
18	Zonificación sísmica de la Ciudad de Tapachula, Chiapas	1997
19	Zonificación sísmica de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	1997
20	Zonificación sísmica del municipio de Tlalnepantla, Estado de México	1997
21	Amplificación medida en el Valle de México durante sismos recientes	1997
22	Zonificación de la Ciudad de Celaya, Guanajuato, por tipos de suelo y periodos naturales de vibrar	1999
23	Zonificación de la Ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, por tipos de suelo y periodos naturales de vibrar	1999
24	Efectos de sitio en la Zona Metropolitana de Guadalajara	1999
25	Zonificación sísmica de la Ciudad de Ometepec, Guerrero	1999
26	Microzonificación sísmica preliminar de la Ciudad de Morelia, Michoacán	1999
27	Zonificación sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara	1999
28	Zonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro.	2001
29	Zonificación sísmica de la ciudad de Celaya, Gto.	2001
30	Zonificación sísmica de la ciudad de Aguascalientes, Ags.	2001
31	Estudio de peligro sísmico en la región Ixtapa-Zihuatanejo	2001
32	Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records	1994
33	Seismic Microzonation of the City of Puebla, Mexico	1995
34	Efectos de sitio en la Ciudad de Jalapa, México. Microzonificación sísmica preliminar	1995
35	Efectos de sitio en el Puerto de Veracruz, México. Microzonificación sísmica preliminar	1995
36	Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca. Resultados con registros de temblores y mediciones de microtemblores	1995

Tabla 1. Lista de estudios revisados (Continuación)

<i>Número</i>	<i>Título</i>	<i>Fecha</i>
37	Faults and fractures in the Valley of Aguascalientes. Preliminary microzonification	1996
38	Microzonación sísmica de las ciudades de Manzanillo y Santiago, Colima	1997
39	Microzonación sísmica de la Ciudad de Colima, Colima	1997
40	Microzonación sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara	1997
41	Microzonación sísmica de Ciudad Guzmán, Jalisco	1997
42	Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings	1999
43	Algunos efectos de sitio observados en la Ciudad de Oaxaca	2000
44	Curvas de isoperiodo para la Ciudad de Oaxaca	2000
45	Observations of strong ground motion at hill sites in Mexico City from recent earthquakes	2001

Los primeros 31 estudios fueron tomados de las Memorias de los últimos siete Congresos Nacionales de Ingeniería Sísmica, organizados por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Los otros 14 son artículos publicados en boletines, revistas, libros, etc., por diferentes autores e instituciones.

A partir de esta lista, en la tabla 2 se presentan las zonas urbanas que han sido estudiadas con estos 45 trabajos.

Tabla 2. Zonas urbanas estudiadas

<i>Número</i>	<i>Zona urbana</i>	<i>Entidad federativa</i>
1	Cd. de México	Distrito Federal
2	Minatitlán	Veracruz
3	Cd. de México	Distrito Federal
4	Acapulco	Guerrero
5	Acapulco	Guerrero
6	Oaxaca	Oaxaca
7	Acapulco	Guerrero
8	Cd. de México	Distrito Federal
9	Colima	Colima
10	Cd. de México	Distrito Federal
11	Toluca	Edo. de México
12	Chilpancingo	Guerrero
13	Puebla	Puebla
14	Tehuacán	Puebla
15	Guadalajara	Jalisco
16	Toluca	Edo. de México
17	Tehuacán	Puebla

Tabla 2. Zonas urbanas estudiadas  
(Continuación)

Número	Zona urbana	Entidad federativa
18	Tapachula	Chiapas
19	Tuxtla Gutiérrez	Chiapas
20	Tlalnepantla	Edo. de México
21	Cd. de México	Distrito Federal
22	Celaya	Guanajuato
23	Santiago	Querétaro
24	Guadalajara	Jalisco
25	Ometepec	Guerrero
26	Morelia	Michoacán
27	Guadalajara	Jalisco
28	Santiago	Querétaro
29	Celaya	Guanajuato
30	Aguascalientes	Aguascalientes
31	Ixtapa-Zihuatanejo	Guerrero
32	Cd. de México	Distrito Federal
33	Puebla	Puebla
34	Jalapa	Veracruz
35	Puerto de Veracruz	Veracruz
36	Oaxaca	Oaxaca
37	Aguascalientes	Aguascalientes
38	Manzanillo	Colima
39	Colima	Colima
40	Guadalajara	Jalisco
41	Cd. Guzmán	Jalisco
42	Cd. de México	Distrito Federal
43	Oaxaca	Oaxaca
44	Oaxaca	Oaxaca
45	Cd. de México	Distrito Federal

## II.2 Gráficas y datos estadísticos sobre las características de los estudios

### II.2.1 Instituciones participantes

Las 22 instituciones que aparecen en la tabla 3, participaron total o parcialmente en la elaboración de los 45 estudios mencionados.

Tabla 3. Instituciones que participaron en la realización de los estudios

<i>Nombre de la institución</i>	<i>Siglas</i>
UNAM, Instituto de Ingeniería	UNAM-II
UNAM, Instituto de Geofísica	UNAM-IG
UNAM, Facultad de Ingeniería	UNAM-FI
Instituto de Tecnología de Tokio	ITT
Fundación ICA, A. C.	FICA
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada	CICESE
Centro Nacional de Prevención de Desastres	CENAPRED
Centro de Investigaciones Sísmicas, Fundación Javier Barros Sierra	FJBS-CIS
Comisión Federal de Electricidad	CFE
Instituto Tecnológico de Oaxaca	ITO
Universidad Autónoma del Estado de México	UAEM
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco	UAM-A
Universidad Autónoma de Guerrero	UAG
Universidad Autónoma de Puebla	UAP
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla	UPAEP
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente	ITESO
Universidad Autónoma de Chiapas	UACH
Universidad Autónoma de Querétaro	UAQ
Universidad Autónoma de Guanajuato	UAGTO
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo	UMSNH
Secretaría de Obras Públicas de Aguascalientes	SOPA
Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería	UV-II

En la tabla 4, aparecen las instituciones que formaron parte del equipo de trabajo en cada uno de los estudios.

Tabla 4. Instituciones participantes en cada estudio

<i>Número</i>	<i>Institución(es)</i>
1	UNAM-II, UNAM-IG
2	UNAM-II, ITT
3	FICA, CICESE
4	UNAM-II
5	CENAPRED, UNAM-IG
6	UNAM-II, FJBS-CIS
7	UNAM-II, CFE
8	FJBS-CIS, UNAM-II
9	UNAM-II
10	FJBS-CIS
11	UAEM, UAM-A

Tabla 4. Instituciones participantes en cada estudio  
(Continuación)

<i>Número</i>	<i>Institución(es)</i>
12	UAG, UAM-A
13	UAP, UAM-A
14	UAM-A, UPAEP
15	UAM-A, ITESO
16	UAEM, UAM-A
17	UPAEP, UAM-A
18	UACH, UAM-A
19	UACH, UAM-A
20	UAM-A
21	CENAPRED
22	UAQ, UNAM-IG, UAGTO, UNAM-II
23	UAQ, UNAM-IG, UNAM-II
24	UNAM-II
25	UAG, UAM-A
26	UNAM-II, UMSNH
27	UAM-A, ITESO
28	UAQ, UNAM-II, UNAM-IG
29	
30	
31	UAM-A, UAG
32	UNAM-II, FJBS-CIS
33	UNAM-II
34	UNAM-II, UV-II
35	UNAM-II, UV-II
36	UNAM-II
37	UNAM-II, UNAM-FI, SOPA
38	UNAM-II
39	
40	
41	
42	UNAM-II
43	UNAM-II
44	CFE, ITO
45	UNAM-II, UNAM-IG

En la tabla 5 y en la figura 8, muestro la participación porcentual de cada institución en la realización de los 45 estudios.

Tabla 5. Participación porcentual de las instituciones

<i>Institución</i>	<i>%</i>
UNAM	43.4
UAM-A	15.7
UAQ	6.0
FJBS-CIS	4.8
UAG	3.6
CENAPRED	2.4
CFE	2.4
ITESO	2.4
UACH	2.4
UAEM	2.4
UPAEP	2.4
UV-II	2.4
Otras	9.6
$\Sigma$	100

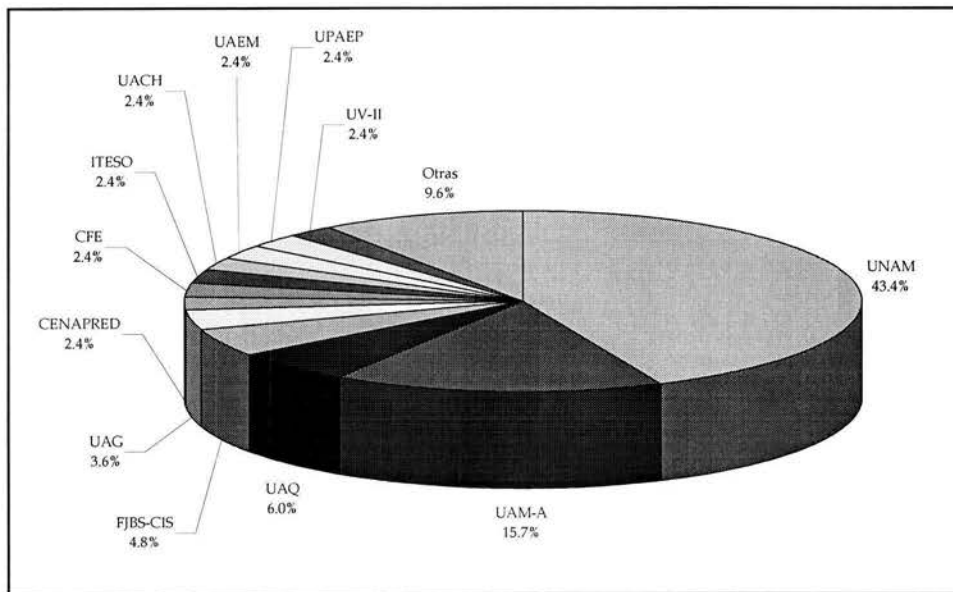


Figura 8. Participación porcentual de instituciones

### II.2.2 Distribución geográfica

De acuerdo con datos del INEGI (2001), existen por lo menos 53 localidades con más de 50 mil habitantes en los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Las tablas 6 y 7 muestran la distribución de dichas poblaciones dentro de las zonas B, C y D del mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana.

Tabla 6. Distribución, por zona sísmica, de las localidades con más de 50 mil habitantes

<i>Estado</i>	<i>Localidad</i>	Zona D	Zona C	Zona B
COLIMA	Cd. de Villa de Álvarez	×		
	Colima	×		
	Manzanillo	×		
	Tecomán	×		
CHIAPAS	Cintalapa		×	
	Comitán		×	
	Ocosingo		×	
	San Cristóbal de las Casas		×	
	Tapachula	×		
	Tonalá	×		
	Tuxtla Gutiérrez		×	
GUERRERO	Acapulco	×		
	Chilpancingo	×		
	Iguala		×	
	Ometepec	×		
	Taxco		×	
	Tecpan	×		
	Teloloapan		×	
	Tlapa	×		
	Zihuatanejo	×		
JALISCO	Ameca	×		
	Arandas			×
	Autlán	×		
	Cd. Guzmán	×		
	Guadalajara		×	
	Lagos de Moreno			×
	Ocotlán			×
	Puerto Vallarta	×		
	San Juan de los Lagos			×
	Tepatitlán			×
	Tlaquepaque		×	
	Tonalá		×	
Zapopan		×		



Tabla 6. Distribución, por zona sísmica, de las localidades con más de 50 mil habitantes  
(Continuación)

<i>Estado</i>	<i>Localidad</i>	<b>Zona D</b>	<b>Zona C</b>	<b>Zona B</b>
MICHOACÁN	Apatzingán	×		
	Cd. Hidalgo			×
	Cd. Lázaro Cárdenas	×		
	Maravatio			×
	Morelia			×
	La Piedad de Cabadas			×
	Puruándiro			×
	Sahuayo		×	
	Uruapan		×	
	Zamora			×
	Zitácuaro			×
OAXACA	Cd. Ixtepec	×		
	Huajuapán de León		×	
	Juchitán	×		
	Oaxaca	×		
	Ocotlán	×		
	Salina Cruz	×		
	San Juan Bautista Tuxtepec		×	
	Santo Domingo Tehuantepec	×		
<i>Total</i>		25	16	12

Tabla 7. Distribución de las 53 localidades por zona sísmica y entidad federativa

<i>Estado</i>	<i>Zona D</i>	<i>Zona C</i>	<i>Zona B</i>	<i>Total</i>
Colima	4	0	0	4
Chiapas	3	5	0	8
Guerrero	6	3	0	9
Jalisco	4	4	5	13
Michoacán	2	2	7	11
Oaxaca	6	2	0	8
<i>Total</i>	25	16	12	<b>53</b>

El gráfico correspondiente se presenta en la figura siguiente.

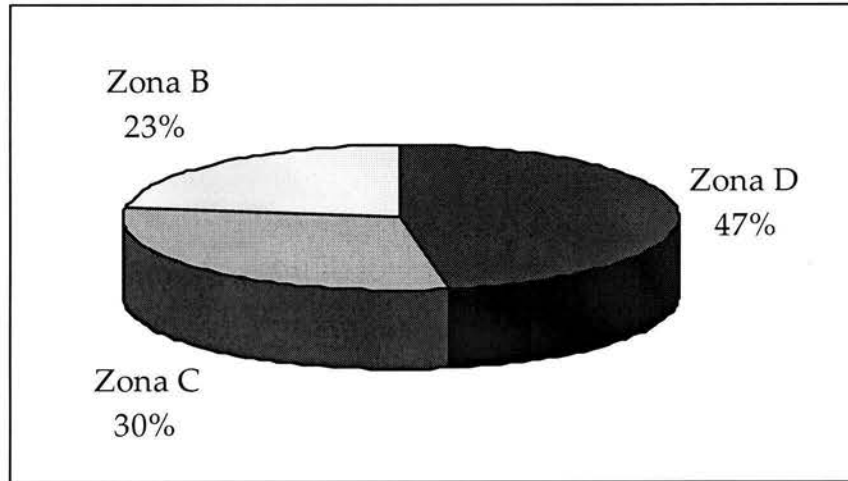


Figura 9. Distribución de las 53 localidades por zona sísmica.

Ahora bien, podríamos preguntarnos: ¿cuántas de estas 53 ciudades cuentan con al menos un estudio de efecto de sitio? Considerando los 45 trabajos revisados, en México son 23 las zonas urbanas estudiadas. En la tabla 8 aparece una lista con el número de estudios que corresponden a cada una de ellas; las celdas sombreadas indican aquellas ciudades localizadas en la región formada por los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

Tabla 8. Número de estudios correspondientes a cada zona urbana

Zona urbana	Entidad federativa	Número de estudios
Cd. de México	Distrito Federal	8
Guadalajara	Jalisco	4
Oaxaca	Oaxaca	4
Acapulco	Guerrero	3
Aguascalientes	Aguascalientes	2
Celaya	Guanajuato	2
Colima	Colima	2
Puebla	Puebla	2
Santiago	Querétaro	2
Tehuacán	Puebla	2
Toluca	Edo. de México	2
Cd. Guzmán	Jalisco	1
Chilpancingo	Guerrero	1
Ixtapa-Zihuatanejo	Guerrero	1
Jalapa	Veracruz	1
Manzanillo	Colima	1
Minatitlán	Veracruz	1

Tabla 8. Número de estudios correspondientes a cada zona urbana  
(Continuación)

Zona urbana	Entidad federativa	Número de estudios
Morelia	Michoacán	1
Ometepec	Guerrero	1
Puerto de Veracruz	Veracruz	1
Tapachula	Chiapas	1
Tlalnepantla	Edo. de México	1
Tuxtla Gutiérrez	Chiapas	1
<i>Total</i>		<b>45</b>

Como vemos, de las 53 ciudades mencionadas sólo 12 cuentan con al menos un estudio de efecto de sitio. En la tabla 9, se presenta la distribución correspondiente.

Tabla 9. Distribución de localidades estudiadas, por zona sísmica y entidad federativa

Entidad federativa	Zona D	Zona C	Zona B	Total
Colima	2	-	-	2
Chiapas	1	1	-	2
Guerrero	4	0	-	4
Jalisco	1	1	0	2
Michoacán	0	0	1	1
Oaxaca	1	0	-	1
<i>Total</i>	9	2	1	<b>12</b>

En la tabla 10 y en la figura 10, aparecen resumidos los resultados de las tablas 7 y 9.

Tabla 10. Distribución de localidades estudiadas por zona sísmica

	Zona D	Zona C	Zona B	Total
Con estudio(s)	9	2	1	12
	36%	12.5%	8%	23%
Sin estudio(s)	16	14	11	41
	64%	87.5%	92%	77%
<i>Total</i>	25	16	12	<b>53</b>
	100%	100%	100%	100%

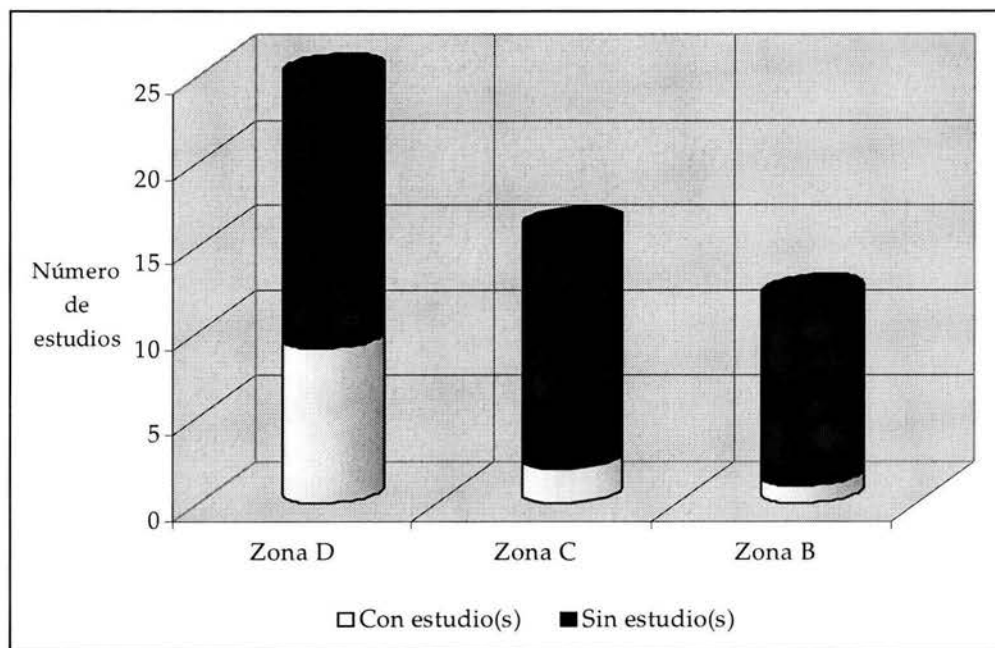


Figura 10. Distribución de localidades estudiadas por zona sísmica

Como podemos ver, cerca de una cuarta parte (el 23%) de las zonas urbanas con más de 50 mil habitantes, ubicadas en la región de mayor peligro sísmico del país (Pacífico Sur Mexicano), es la que cuenta con estudios de efecto de sitio. Las tres cuartas partes restantes (el 77%) aún no han sido estudiadas.

De los 45 estudios revisados, 21 corresponden a la región del Pacífico Sur de México, tal como se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 11. Distribución del número de estudios revisados

Entidad federativa	Número de estudios	
	Total	Pacífico Sur Mexicano
Distrito Federal	8	
Guerrero	6	6
Jalisco	5	5
Oaxaca	4	4
Puebla	4	
Colima	3	3
Edo. de México	3	
Veracruz	3	
Aguascalientes	2	
Chiapas	2	2
Guanajuato	2	
Querétaro	2	

Tabla 11. Distribución del número de estudios revisados  
(Continuación)

Entidad federativa	Número de estudios	
	Total	Pacífico Sur Mexicano
Michoacán	1	1
Total	45	21

De esta manera, podemos distinguir dos grupos:

- 45 estudios que pertenecen a 23 zonas urbanas de la República Mexicana.
- 21 estudios que pertenecen 12 ciudades localizadas en la zona de mayor peligro sísmico del país (Pacífico Sur Mexicano).

Para estos dos grupos, en los siguientes subtemas aparecen los gráficos sobre: información incluida, registros usados, técnicas aplicadas y resultados presentados.

En cuanto al tipo de *información incluida*, distinguí: tectónica, sismicidad, geología local, topografía y geomorfología, así como datos de sondeos geotécnicos (realizados antes del estudio).

En cuanto al tipo de *registros usados*, los separé en: sismos fuertes, sismos débiles, microtremores, sondeos geotécnicos (realizados en el sitio) y sondeos geofísicos.

Respecto a las *técnicas aplicadas*, utilicé las siguientes abreviaciones: razón espectral estándar con sismos fuertes (RES-SF), con sismos débiles (RES-SD), y con otro tipo de registros (RES-Otros); razón espectral H/V con sismos fuertes (REHV-SF), con sismos débiles (REHV-SD), y con microtremores (REHV-M); densidad espectral de potencia con sismos fuertes (DEP-SF), con sismos débiles (DEP-SD), y con microtremores (DEP-M); finalmente, teoría unidimensional de propagación de ondas de cortante con datos de sondeos geotécnicos (Teoría1D).

Y respecto al tipo de *resultados presentados*, consideré: perfiles de velocidades de ondas de cortante ( $V_s$ ), valores de periodo dominante del suelo ( $T_0$ ), mapas de curvas de isoperiodo del terreno, valores de amplificación relativa del suelo ( $A_r$ ), mapas de isoamplificación relativa del terreno, y mapas de microzonificación sísmica (MMZ).

### II.2.3 Información utilizada

Para los 45 estudios, la siguiente tabla presenta los datos que capturé sobre el tipo de información incluida en cada uno de ellos. Las celdas sombreadas indican los estudios que corresponden al grupo de los 21 mencionados.

Tabla 12. Tipo de información incluida en los estudios

Número	Geología Regional		Geología Local	Topografía y Geomorfología	Geotecnia
	Tectónica	Sismicidad			
1					5 sondeos
2					x
3					
4	x	x	x	x	x
5	x		x		
6			x		
7	x	x			
8					
9	x	x	x	x	x
10			x	x	
11	x	x	x	x	18 sondeos
12	x	x	x	x	23 sondeos
13	x	x	x	x	107 sondeos
14	x	x	x	x	8 sondeos
15	x	x	x	x	60 sondeos
16	x	x	x	x	9 sondeos
17	x	x	x	x	8 sondeos
18	x	x	x	x	1 sondeo
19	x	x	x	x	10 sondeos
20	x	x	x	x	4 sondeos
21	x	x	x	x	
22	x	x	x	x	cortes litológicos
23	x	x	x	x	cortes litológicos
24			x	x	1 corte litológico
25	x	x	x	x	
26	x	x	x	x	
27	x	x	x	x	60 sondeos
28	x	x	x	x	cortes litológicos
29	x	x	x	x	cortes litológicos
30	x	x	x	x	cortes litológicos
31					
32			x		
33			x		50 sondeos
34	x	x	x	x	15 sondeos
35	x	x	x	x	38 sondeos
36		x	x		
37	x	x	x	x	
38			x	x	
39		x	x	x	
40		x	x		136 sondeos

Tabla 12. Tipo de información incluida en los estudios  
(Continuación)

Número	Geología Regional		Geología Local	Topografía y Geomorfología	Geotecnia
	Tectónica	Sismicidad			
41	x	x		x	
42			x	x	2 perfiles estratigráficos
43		x	x	x	
44	x	x	x	x	
45			x	x	1 perfil estratigráfico

Los gráficos correspondientes aparecen en las figuras 11 y 12.

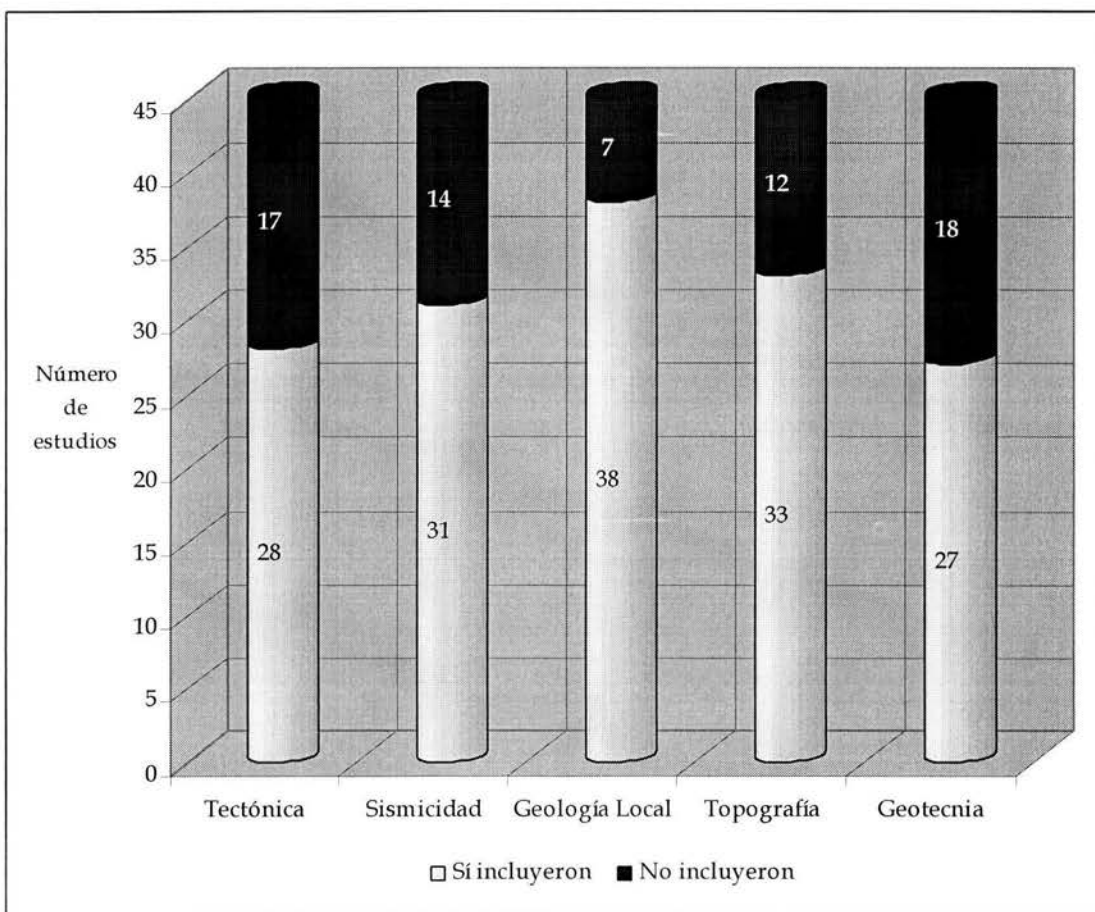


Figura 11. Tipo de información incluida en los 45 estudios

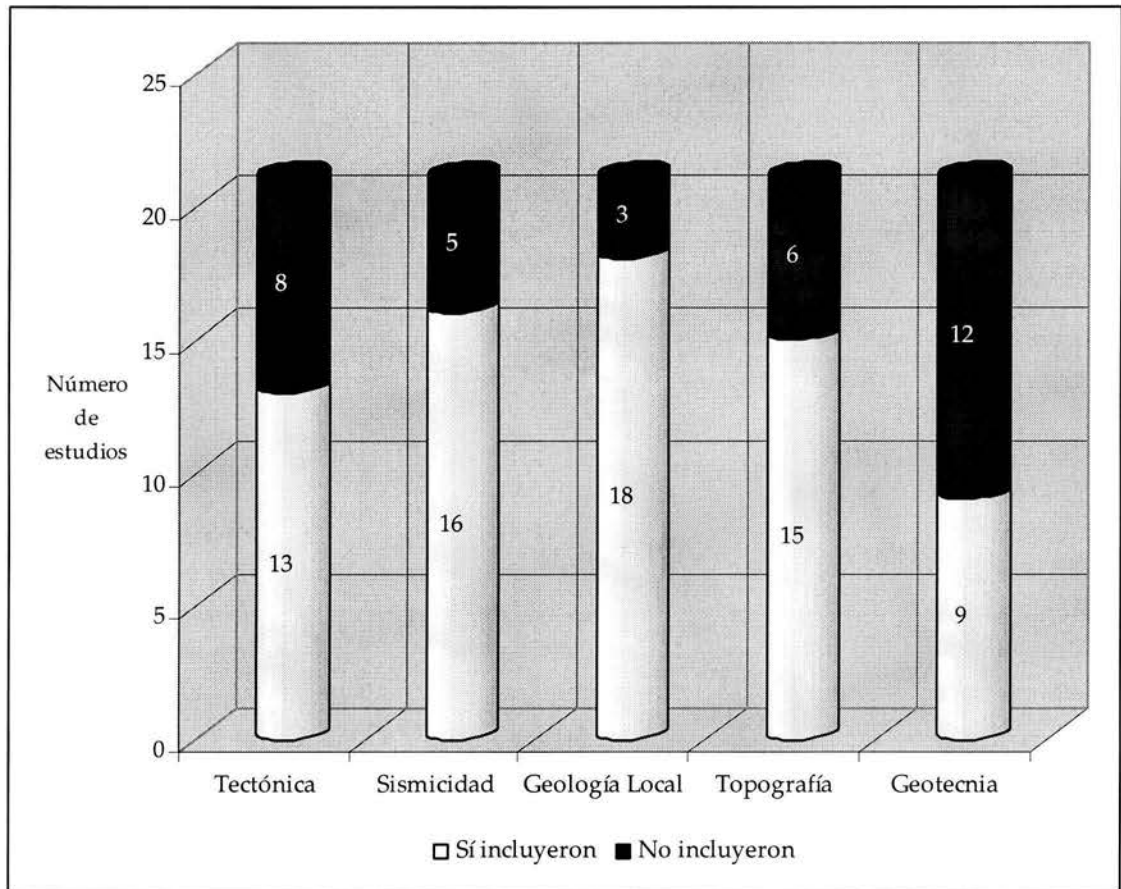


Figura 12. Tipo de información incluida en los 21 estudios.

#### II.2.4 Registros obtenidos

Análogamente al caso anterior, en la siguiente tabla se muestran los datos que capturé en cuanto al tipo de registros obtenidos en los 45 estudios. Las celdas sombreadas indican los estudios que corresponden al grupo de los 21 ya mencionados.

Tabla 13. Tipo de registros usados en los estudios

Número	Movimientos fuertes	Movimientos débiles	Vibración ambiental	Geotécnicos	Geofísicos
1	8 estaciones		99 sitios		
2		1 registro de 1 sismo	7 sitios		Refracción sísmica
3		161 registros, 4 sismos			
4	2 registros, 1 sismo	21 registros, 5 sismos			
5		33 registros, 8 sismos	6 sitios		
6		32 sismos			
7	6 registros, 2 sismos	152 regs., 85 sismos			



Tabla 13. Tipo de registros usados en los estudios  
(Continuación)

Número	Movimientos fuertes	Movimientos débiles	Vibración ambiental	Geotécnicos	Geofísicos
8	25 registros, 3 sismos	399 regs., 10 sismos	decenas de sitios		
9		5 registros, 1 sismo	36 sitios		Refracción sísmica
10	25 registros, 3 sismos	399 regs., 10 sismos			
11			81 sitios		
12			30 sitios		
13			98 sitios		
14			48 sitios		
15			134 sitios		
16			90 sitios		
17			48 sitios		
18			42 sitios		
19			75 sitios		
20			152 sitios		
21	4 sismos	8 sismos			
22					G, M, MT, AMT
23	1 sismo	3 sismos			G, M, MT, AMT
24	13 registros, 1 sismo		11 sitios		
25			25 sitios	3 sondeos profundos	
26			17 sitios		
27	11 registros, 1 sismo		134 sitios		33 estudios
28	1 sismo	3 sismos			G, M, MT, AMT
29					G, M, MT, AMT
30					G, M, MT, AMT
31	2 sismos	31 sismos		4 estudios	2 estudios
32	2 sismos	7 sismos	409 sitios		
33	18 registros, 15 sismos	7 sismos	39 sitios		Refracción sísmica
34			35 sitios		
35			24 sitios		
36		32 sismos	39 sitios		
37		18 sismos			
38		10 sismos	14 sitios		
39	2 sismos	66 sismos	36 sitios		
40	1 sismo, 13 registros				
41			52 sitios		
42	4 sismos	8 sismos			
43	2 sismos	13 sismos			
44	2 sismos	72 sismos	29 sitios		
45	3 sismos	4 sismos			

Los gráficos correspondientes se muestran en las figuras 13 y 14.

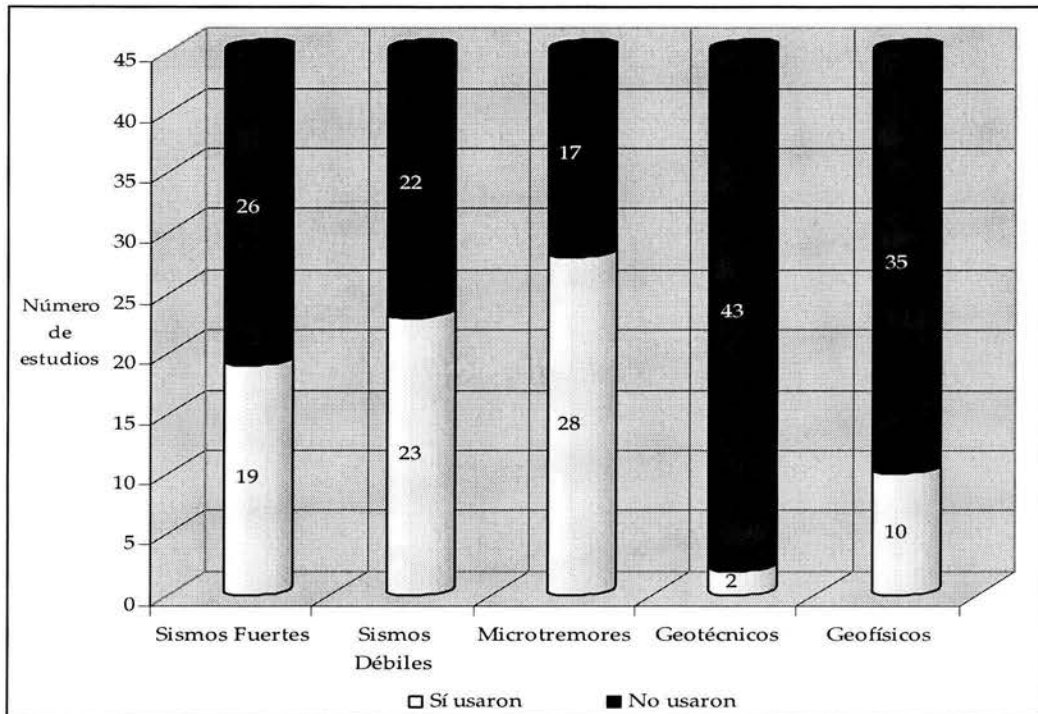


Figura 13. Tipo de registros usados en los 45 estudios.

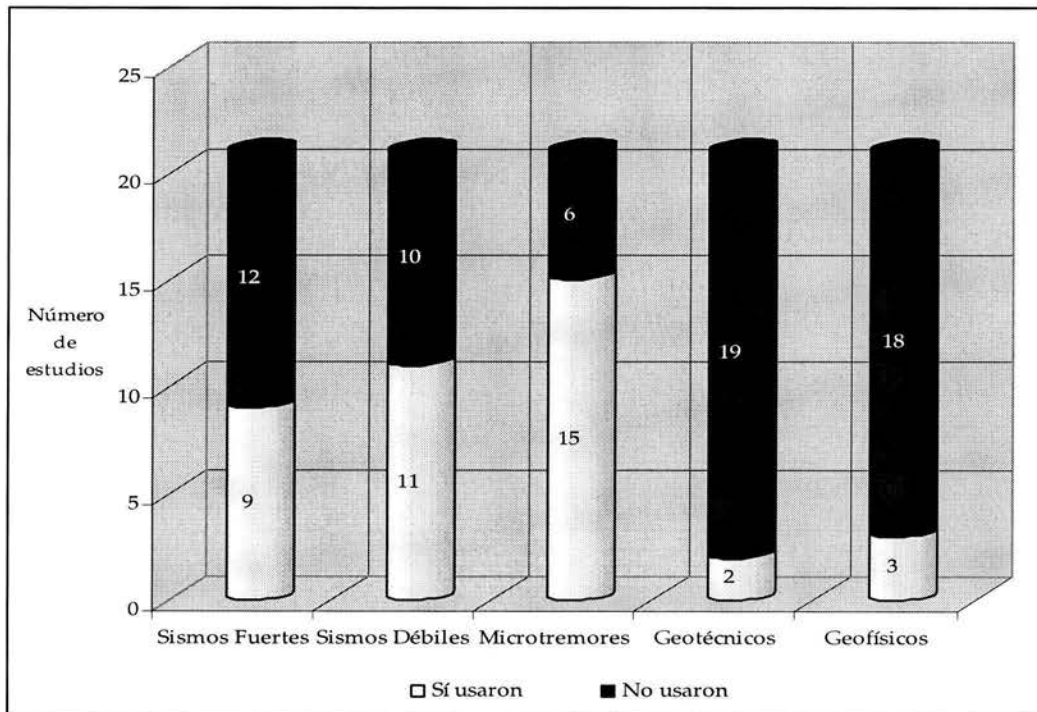


Figura 14. Tipo de registros usados en los 21 estudios.

## II.2.5 Técnicas aplicadas

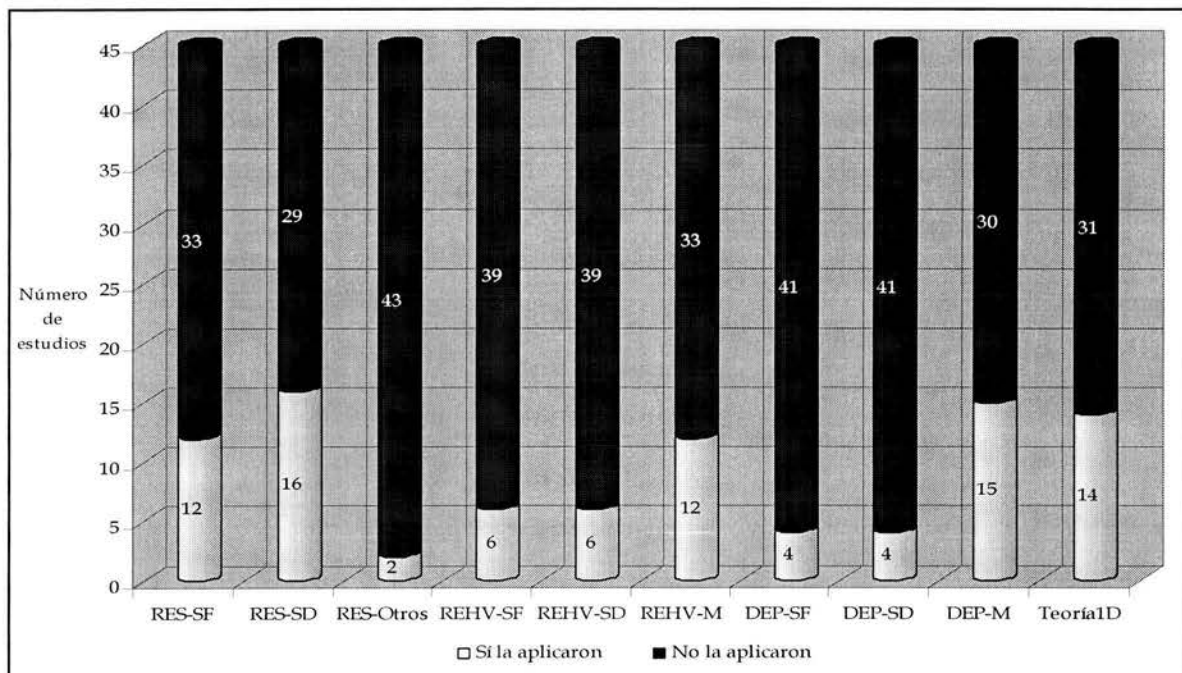


Figura 15. Tipo de técnicas aplicadas en los 45 estudios

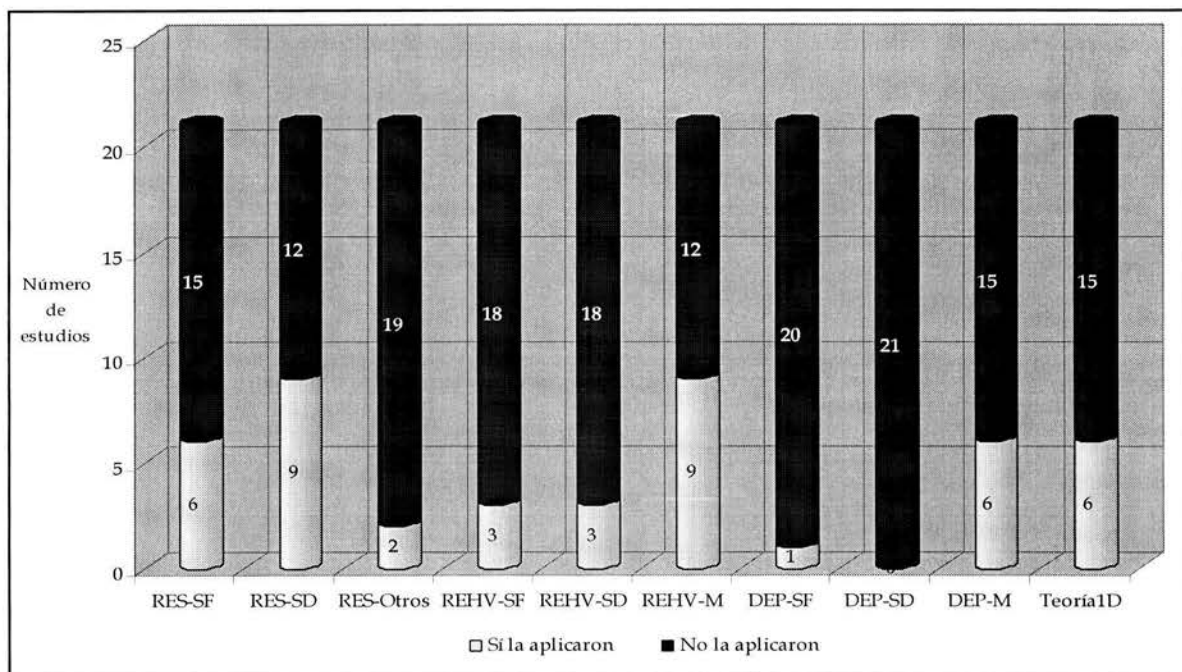


Figura 16. Tipo de técnicas aplicadas en los 21 estudios

Tabla 14. Tipo de técnicas aplicadas en los estudios

Número	Cociente o Razón Espectral Estándar			Cociente o Razón Espectral H/V			Espectro de Potencia de Fourier			Teoría 1D
	Sismos fuertes	Sismos débiles	Otros	Sismos fuertes	Sismos débiles	Microremores	Sismos fuertes	Sismos débiles	Microremores	
1							sismos fuertes		microremores	
2								sismo débil	microremores	
3								sismos débiles		
4	sismo fuerte	sismos débiles								
5		sismos débiles								
6		sismos débiles								
7	sismos fuertes	sismos débiles								
8	sismos fuertes	sismos débiles							microremores	
9		sismo débil							microremores	
10	sismos fuertes	sismos débiles								
11									microremores	18 sondeos profundos
12									microremores	7 sondeos profundos
13									microremores	93 sondeos profundos
14									microremores	8 sondeos profundos
15						microremores				60 sondeos
16									microremores	9 sondeos profundos
17									microremores	8 sondeos profundos
18									microremores	1 sondeo profundo
19									microremores	10 sondeos profundos
20									microremores	4 sondeos profundos
21	sismos fuertes	sismos débiles		sismos fuertes	sismos débiles					
22										
23							sismo fuerte	sismos débiles		
24	sismo fuerte			sismo fuerte		microremores				
25						microremores				3 sondeos profundos
26						microremores				
27	sismo fuerte					microremores				60 s. p., 33 e. g.
28							sismo fuerte	sismos débiles		
29										
30										
31			estudios down-hole				sismos fuertes			
32	sismos fuertes	sismos débiles								
33		sismos débiles		sismos fuertes	sismos débiles	microremores				
34						microremores				
35						microremores				
36		sismos débiles	microremores			microremores				
37										
38		sismos débiles			sismos débiles	microremores				
39		sismos débiles		sismos fuertes	sismos débiles	microremores			microremores	
40	sismo fuerte									
41									microremores	
42	sismos fuertes	sismos débiles		sismos fuertes	sismos débiles					perfiles estratigráficos
43	sismos fuertes	sismos débiles								
44				sismos fuertes	sismos débiles	microremores				
45	sismos fuertes	sismos débiles								perfil estratigráfico

## II.2.6 Resultados

En la tabla 15 describo brevemente los resultados que aparecen en los estudios. En la tabla 16, muestro una síntesis de los tipos de resultados.

Tabla 15. Breve descripción de los resultados que aparecen en los estudios

<i>Número</i>	<i>Resultados</i>
1	* Mapa de curvas de isoperiodo a cada 0.5 segundos.
2	* Periodo natural de vibración de la estratigrafía superficial. * Velocidad de propagación de ondas S ( $\beta$ ) en dos sitios del predio.
3	* Mapa de curvas de isoperiodo del terreno de la Ciudad de México.
4	* Frecuencia dominante en 6 sitios. * Amplificación relativa en los mismos 6 sitios.
5	* Amplificación relativa en 4 sitios. * Frecuencia dominante en los mismos 4 sitios.
6	* Mapa de microzonificación preliminar de la Ciudad de Oaxaca, Oaxaca.
7	* Amplificación relativa en 6 sitios. * Frecuencia dominante en los mismos 6 sitios.
8	* Mapa de curvas de isoperiodo del terreno, a partir de registros de microtemores. * Mapa de curvas de isoperiodo del terreno, a partir de registros de sismos. * Mapa de curvas de isoperiodo del terreno, combinando ambos tipos de registros.
9	* Periodo natural de vibración en 36 sitios de la Ciudad de Colima. * Amplificación relativa en 4 sitios. * Velocidad de propagación de ondas S ( $\beta$ ) en 1 sitio. * Mapa de microzonificación preliminar de la Ciudad de Colima, Colima.
10	* Mapa de cocientes espectrales representativos, a partir de registros de sismos. * Mapas de curvas de isoamplificación relativa, para $T_0 = 2.5, 2.0, 1.5$ y $1.0$ segundos.
11	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.3, 0.4 y 0.5 segundos, a partir de registros de microtemores y sondeos geotécnicos.
12	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.35, 0.40, 0.50 y 0.60 segundos, a partir de registros de microtemores y sondeos geotécnicos. * Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de Chilpancingo, Guerrero.
13	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70 segundos, a partir de registros de microtemores y sondeos geotécnicos. * Mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Puebla, Puebla.
14	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20, 0.30, 0.35 y 0.40 segundos, con registros de microtemores y sondeos geotécnicos.
15	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70 y 0.80 segundos, con registros de microtemores y sondeos geotécnicos.
16	* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20 a 0.60 con incrementos de 0.05 segundos, a partir de registros de microtemores y sondeos geotécnicos. * Mapa de zonificación sísmica para la zona conurbada Toluca-Lerma-Metepec.
17	* Mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Tehuacán, Puebla.

Tabla 15. Breve descripción de los resultados que aparecen en los estudios  
(Continuación)

Número	Resultados
18	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.13 a 0.35 segundos, a partir de registros de microtremores.</li> <li>* Mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Tapachula, Chiapas.</li> </ul>
19	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.15, 0.20 y 0.25 segundos, a partir de registros de microtremores y sondeos geotécnicos.</li> <li>* Mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez.</li> </ul>
20	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 y 0.90 segundos, a partir de registros de microtremores y sondeos geotécnicos.</li> <li>* Mapa de zonificación sísmica para el municipio de Tlalnepantla, Estado de México.</li> </ul>
21	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de distribución de cocientes espectrales promedio para algunos sitios de la Ciudad de México.</li> <li>* Mapas de curvas de isoamplificación relativa, para valores de <math>T_0 = 1.5, 2.5, 3.5, 5.0</math> segundos.</li> </ul>
22	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo.</li> <li>* Mapa de zonificación por tipos de suelo para la Ciudad de Celaya, Guanajuato.</li> </ul>
23	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo.</li> <li>* Mapa de zonificación por tipos de suelo para la Ciudad de Santiago de Querétaro, Qro.</li> </ul>
24	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de distribución de las construcciones por tipo de estructuración, material y edad.</li> <li>* Mapa de curvas de isoprofundidad a la roca basal.</li> </ul>
25	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20, 0.25 y 0.30 segundos, a partir de registros de microtremores y sondeos geotécnicos.</li> <li>* Mapa de zonificación sísmica para la Ciudad de Ometepec, Guerrero.</li> </ul>
26	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa preliminar de microzonificación por peligro de fallas activas.</li> <li>* Mapa preliminar de microzonificación por peligro de inestabilidad de taludes.</li> <li>* Mapa preliminar de microzonificación por peligro de inundaciones.</li> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20 a 1.0 segundos.</li> </ul>
27	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70 y 0.80 segundos, a partir de registros de microtremores, sondeos geotécnicos, sondeos geofísicos y sísmos.</li> <li>* Mapa de zonificación sísmica para la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco.</li> </ul>
28	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo.</li> <li>* Mapa de zonificación para la Ciudad de Santiago de Querétaro, Qro.</li> </ul>
29	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo.</li> <li>* Mapa de zonificación para la Ciudad de Celaya, Guanajuato.</li> </ul>
30	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo.</li> <li>* Mapa de zonificación para la Ciudad de Aguascalientes, Ags.</li> </ul>
31	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de zonificación sísmica para la región Ixtapa-Zihuatanejo.</li> </ul>
32	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de curvas de isoperiodo, integrando datos de sísmos y microtremores.</li> </ul>
33	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mapa de distribución de periodos de vibración del suelo, a partir de registros de microtremores.</li> <li>* Mapa preliminar de microzonación sísmica para la Ciudad de Puebla, Puebla.</li> </ul>

Tabla 15. Breve descripción de los resultados que aparecen en los estudios  
(Continuación)

<i>Número</i>	<i>Resultados</i>
34	* Mapa de distribución de periodos de vibración del suelo. * Mapa de distribución de amplificaciones relativas del movimiento del suelo. * Mapa de microzonación sísmica preliminar para la Ciudad de Jalapa, Veracruz.
35	* Mapa de distribución de periodos de vibración del suelo. * Mapa de distribución de amplificaciones relativas del movimiento del suelo. * Mapa de microzonación sísmica preliminar para el Puerto de Veracruz, Veracruz.
36	* Mapa de curvas de isoperiodo. * Mapa de distribución de periodos dominantes y amplificaciones relativas. * Mapa de microzonación sísmica para la Ciudad de Oaxaca.
37	* Mapa de microzonación preliminar por peligro de fallas y fracturas en el Valle de Aguascalientes, Ags.
38	* Distribución de periodos de vibración del suelo. * Distribución de amplificaciones relativas del movimiento del suelo. * Mapa de microzonación sísmica para la región Manzanillo-Santiago, Colima.
39	* Mapa de curvas de isoperiodo para valores menores a 1.0 segundos. * Mapa de curvas de isoperiodo para valores mayores a 1.0 segundos.
40	* Mapa de microzonación preliminar por profundidades a la roca basal.
41	* Mapa de curvas de isoperiodo.
42	* Mapa de distribución de cocientes espectrales promedio para sitios en la zona lacustre. * Mapas de curvas de isoamplificación relativa, para valores de $T_0 = 1.5, 2.0, 3.0$ y $5.0$ segundos.
43	* Valores de frecuencia dominante. * Valores de amplificación relativa.
44	* Periodo dominante en 6 sitios, a partir de registros de sismos. * Amplificación relativa en los mismos 6 sitios, a partir de los mismos registros. * Valores de periodo dominante a partir de registros de microtemores. * Mapa de curvas de isoperiodo, para valores de $0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$ y $1.2$ segundos.
45	* Valores de amplificación relativa. * Valores de frecuencia dominante.

Tabla 16. Tipo de resultados presentados en los estudios

<i>Número</i>	<i>Velocidad de ondas S</i>	<i>Periodo dominante</i>		<i>Amplificación relativa</i>		<i>Mapa de microzonación</i>
		<i>Valores</i>	<i>Mapa</i>	<i>Valores</i>	<i>Mapa</i>	
1			x			
2	x	x				
3			x			
4		x		x		
5		x		x		
6						x
7		x		x		
8			x			

Tabla 16. Tipo de resultados presentados en los estudios  
(Continuación)

Número	Velocidad de ondas S	Periodo dominante		Amplificación relativa		Mapa de microzonación
		Valores	Mapa	Valores	Mapa	
9	x	x		x		x
10			x		x	
11		x	x			
12		x	x			x
13		x	x			x
14		x	x			
15		x	x			
16		x	x			x
17						x
18		x	x			x
19		x	x			x
20		x	x			x
21					x	
22			x			x
23			x			x
24						
25		x	x			x
26		x	x			x
27			x			x
28			x			x
29			x			x
30			x			x
31						x
32			x			
33			x			x
34			x		x	x
35			x		x	x
36			x		x	x
37						x
38		x		x		x
39			x			
40						x
41			x			
42					x	
43		x		x		
44		x	x	x		
45		x		x		

Los gráficos correspondientes se muestran en las figuras 17 y 18.



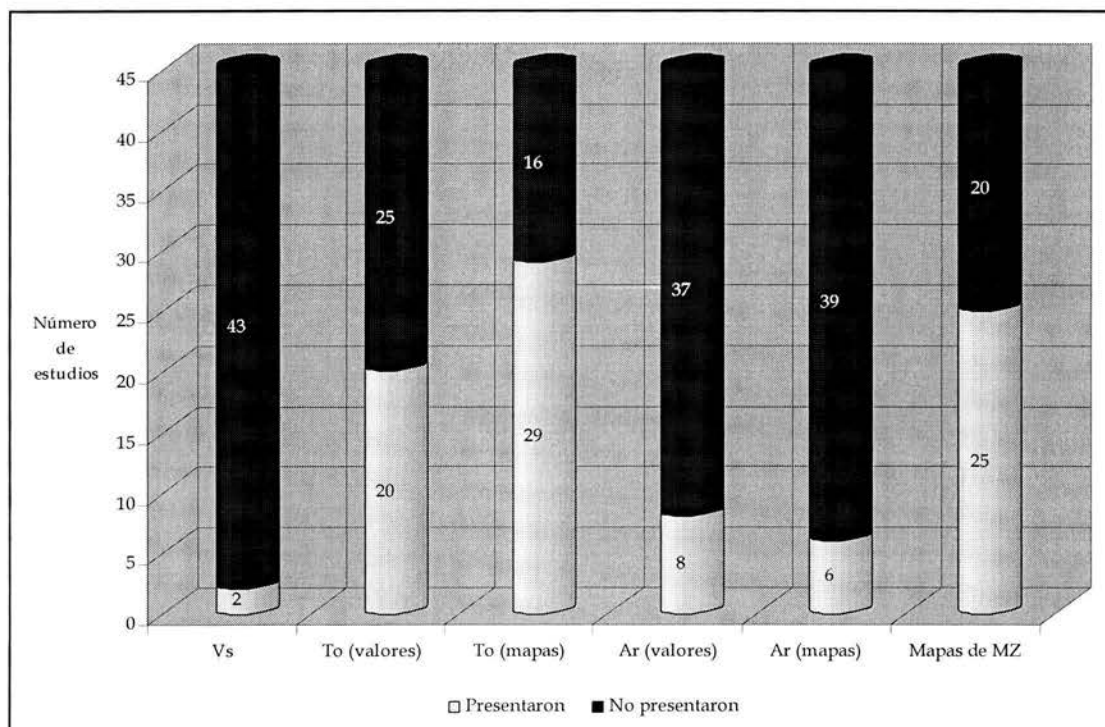


Figura 17. Tipo de resultados presentados en los 45 estudios

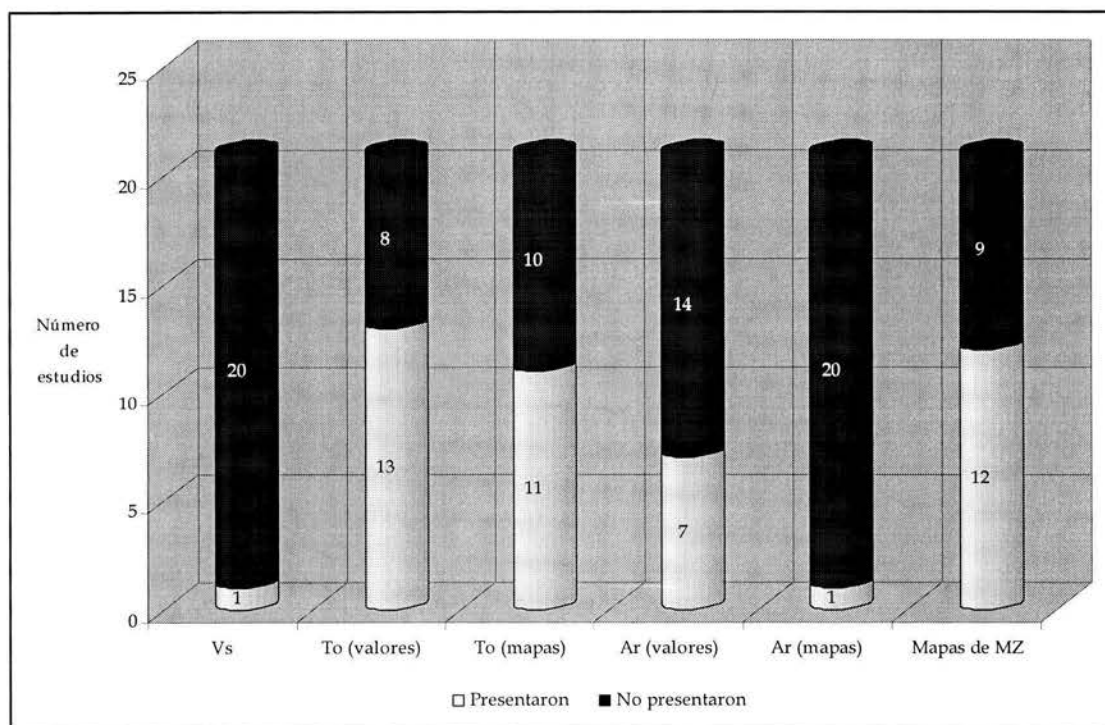


Figura 18. Tipo de resultados presentados en los 21 estudios

### II.3 Conclusiones y comentarios

A partir de las tablas y los gráficos anteriores, obtuve los siguientes datos sobre las características de los estudios de efecto de sitio realizados para la zona D, basándome en el grupo de 21 estudios ya mencionado.

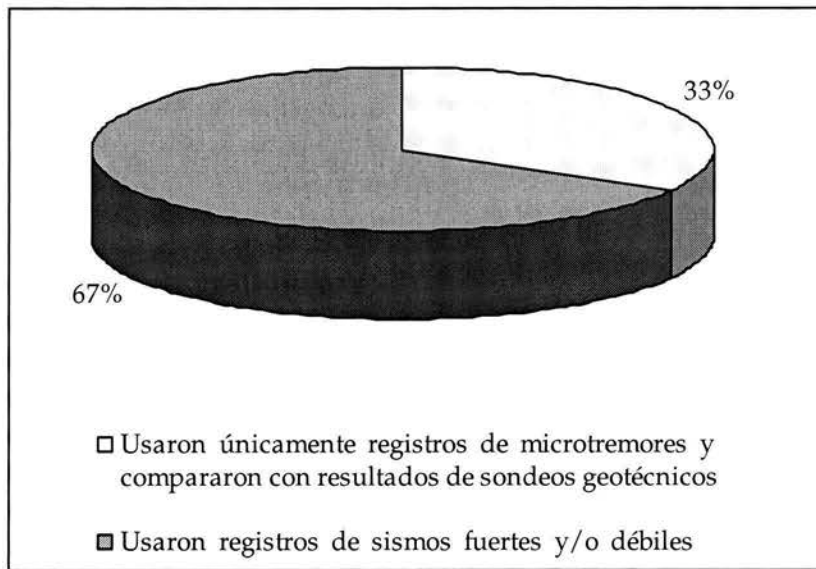


Figura 19. Datos relevantes sobre el tipo de registros usados en los 21 estudios

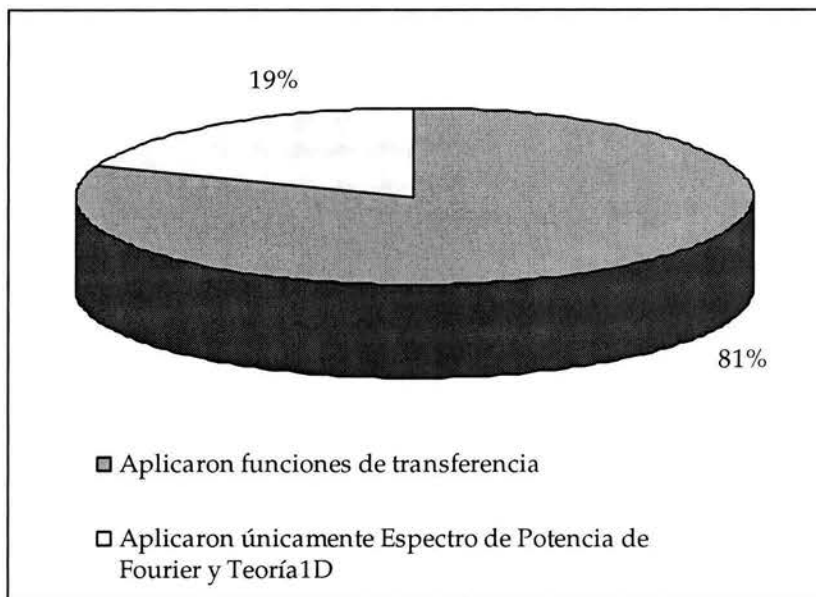


Figura 20. Datos relevantes sobre el tipo de técnicas aplicadas en los 21 estudios

Con base en los resultados que hasta aquí he presentado, propongo las siguientes conclusiones para este capítulo:

1) Casi la mitad (aproximadamente un 47%) de las zonas urbanas (con más de 50 mil habitantes) ubicadas en los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, se localizan en la zona de mayor sismicidad del país (zona D).

2) Los estudios de efectos de sitio son escasos para las ciudades de la zona D con más de 50 mil habitantes, pues alrededor de un 36% de estas son las que cuentan con al menos un estudio de ese tipo.

3) El tipo de información que más se utiliza en los estudios es el de geología local, sismicidad y topografía.

4) Una tercera parte (aproximadamente el 33%) de los estudios realizados para la zona D, sólo usaron registros de microtemores para estimar el efecto de sitio, y compararon sus resultados con los que obtuvieron a partir de sondeos geotécnicos.

5) Alrededor de una quinta parte (aproximadamente un 19%) de los estudios realizados para la zona D, aplicaron sólo Espectro de Potencia de Fourier y compararon sus resultados con los que obtuvieron a partir de un modelo unidimensional de propagación de ondas.

6) La mayor parte de los estudios de efecto de sitio están enfocados, principalmente, en obtener valores del periodo dominante del suelo y en presentar un mapa de microzonificación para la zona urbana estudiada.

## II.4 Zonas urbanas más estudiadas en nuestro país

### II.4.1 Ciudad de México

A raíz de los dramáticos daños y sucesos ocurridos en la Ciudad de México durante los sismos de septiembre de 1985, se remarcó la importancia del efecto de sitio en la amplificación del movimiento del suelo en zonas de terreno blando, que incluso pueden estar a cientos de kilómetros de distancia del epicentro de un sismo de gran magnitud. Trabajos de investigación realizados con microtemores, como los de Kanai y Tanaka (1954), Kanai y Tanaka (1961), Kobayashi *et al.* (1986), entre otros, motivaron la medición y el uso de vibración ambiental en México para obtener periodos dominantes del suelo.

Con estos antecedentes, Lermo *et al.* (1987b) presentaron el primer mapa de curvas de isoperiodo de la Ciudad de México (ver figura 21), realizado con registros del sismo del 19 de septiembre de 1985 en ocho estaciones y registros de microtemores en 99 puntos. Después, con el aumento del número de estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México, fue posible incrementar el número de registros de sismos; de esta manera, Otero *et al.* (1989) analizaron registros del sismo del 25 de abril de 1989 y obtuvieron así un mapa de curvas de isoperiodo con dichos registros (ver figura 22).

---

---

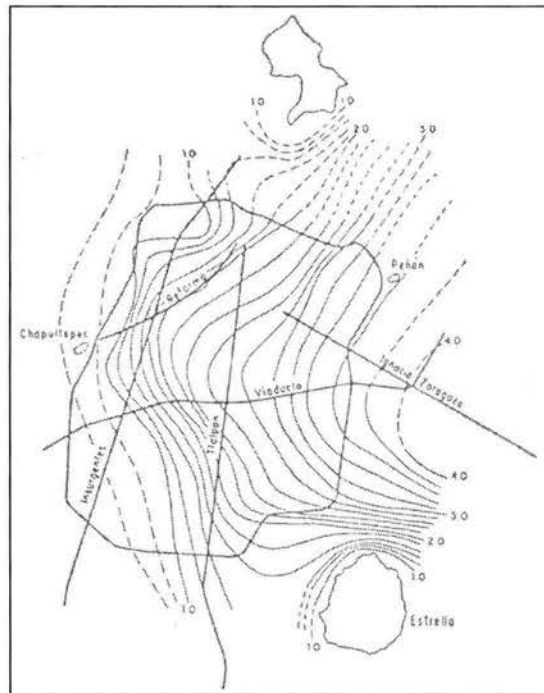


Figura 21. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de México, datos de sismos fuertes y microtremores (Lermo *et al.*, 1987b)

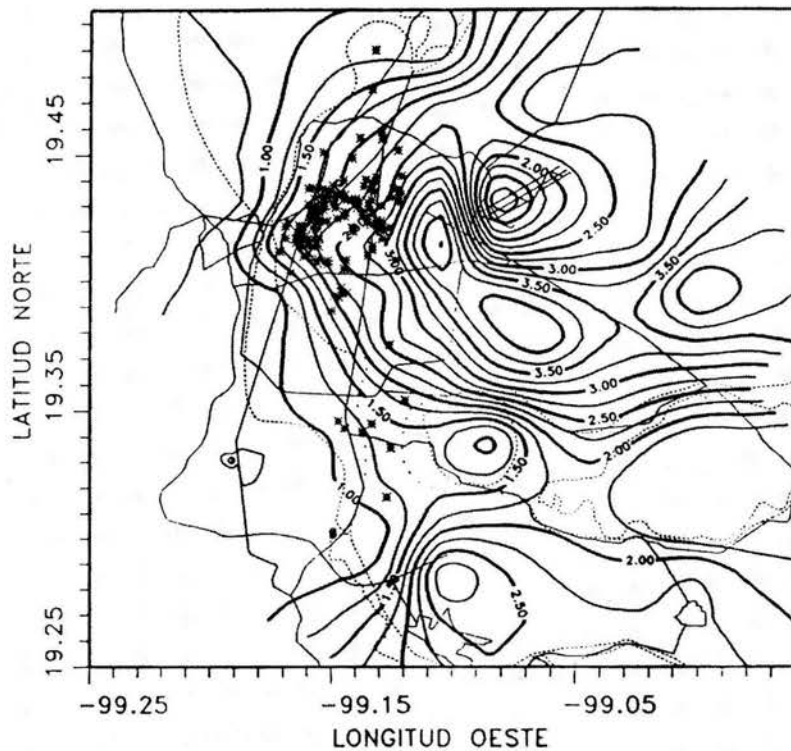


Figura 22. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de México, datos del sismo del 25 de abril de 1989 (Otero *et al.*, 1989).

El mapa de Lermo *et al.* (1987b) abarca la zona centro de la Ciudad de México, pero no incluye toda la zona lacustre. Utilizando registros de sismos fuertes, sismos débiles y microtremores, Reinoso y Lermo (1991) realizaron un nuevo mapa de curvas de isoperiodo que abarca también la cuenca Chalco-Xochimilco y gran parte del antiguo lago de Texcoco (ver figura 23).

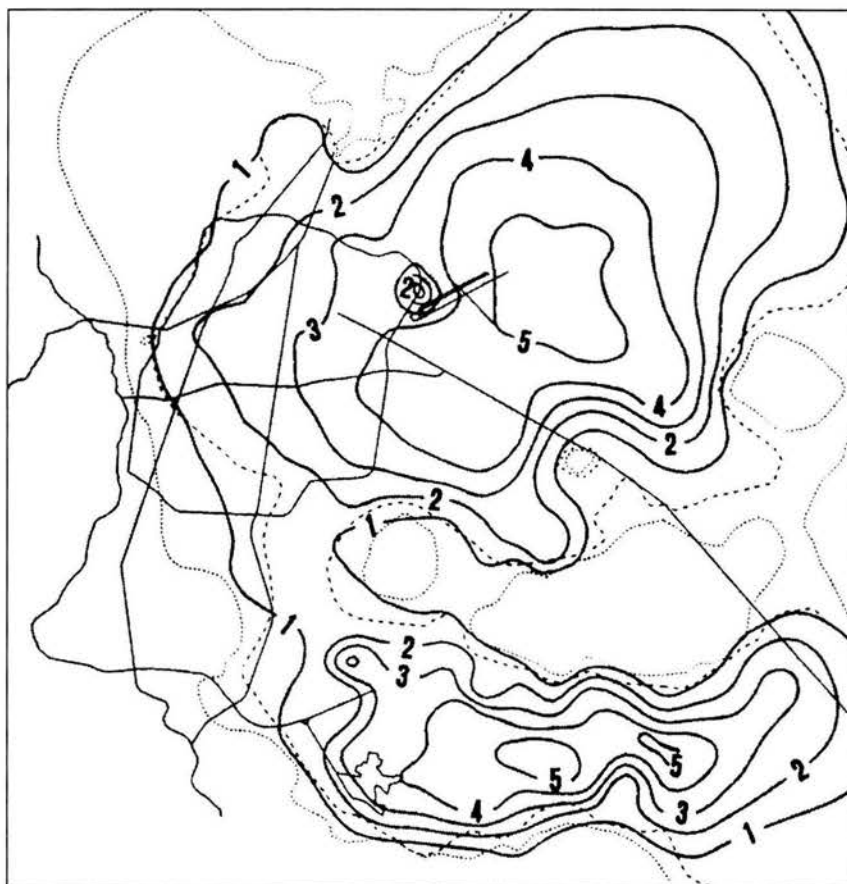


Figura 23. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de México, datos de sismos y microtremores (Reinoso y Lermo, 1991).

Posteriormente, Lermo y Chávez-García (1994) analizaron los registros de 9 sismos de subducción ocurridos en nuestro país entre 1985 y 1990, captados por la Red Acelerográfica de la Ciudad de México. Recopilaron, además, registros de microtremores obtenidos por diferentes grupos de investigación entre 1985 y 1992. Con dichos registros, realizaron una base de datos de periodos dominantes, la cual contiene 81 puntos de medición de sismos y 409 puntos de medición de vibración ambiental. A partir de esta base de datos, elaboraron un nuevo mapa de curvas de isoperiodo (ver figura 24), el cual define con mayor detalle el paleocanal formado entre el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina (ver figura 5); a partir de entonces, se consideró que esta región pertenece a la Zona III (zona lacustre) y no a la Zona II (zona de transición).

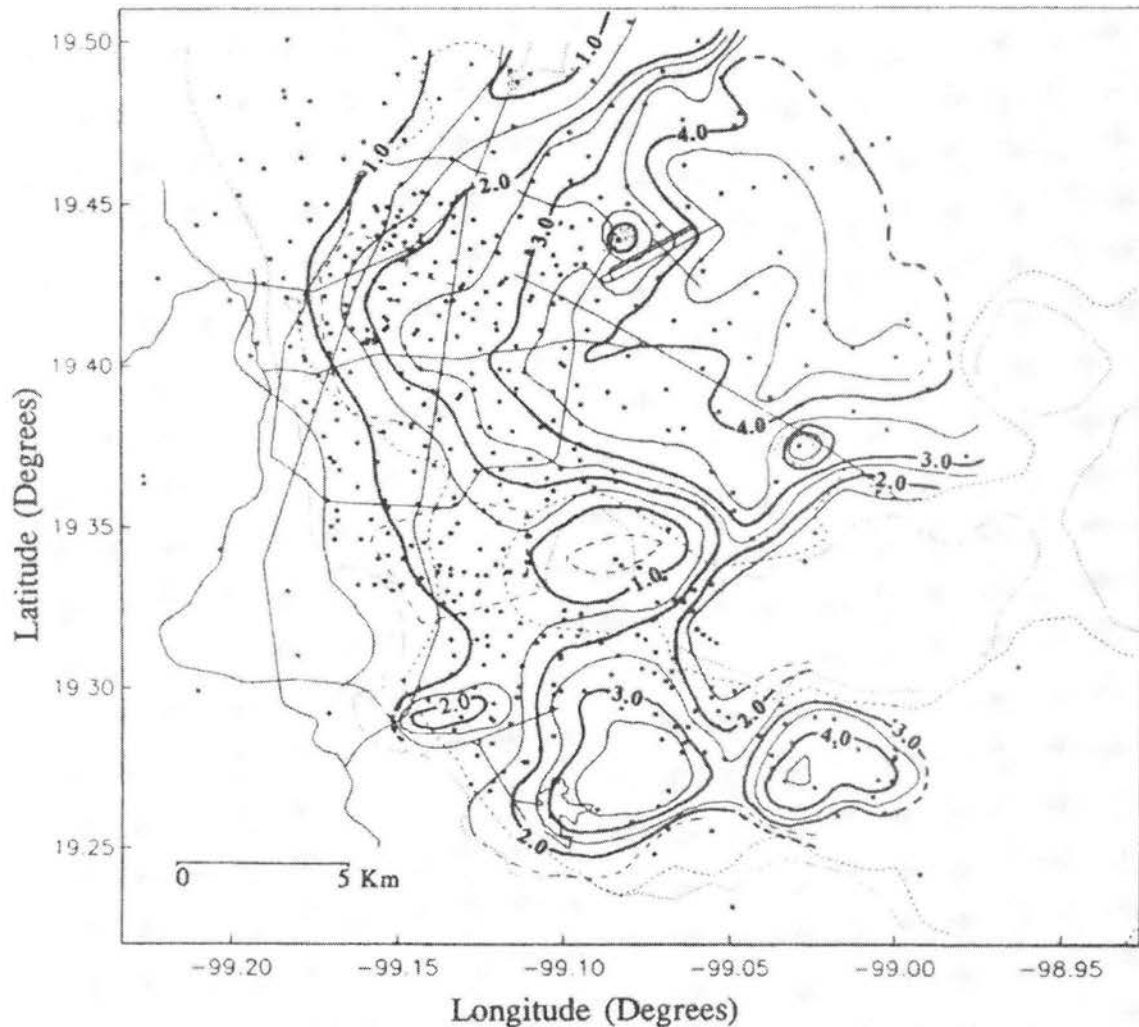


Figura 24. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de México, datos de sismos y microtremores (Lermo y Chávez-García, 1994).

Más tarde, Reinoso y Ordaz (1997) utilizaron registros captados por la Red Acelerográfica de la Ciudad de México durante varios sismos ocurridos entre 1985 y 1995. Presentaron un mapa de cocientes espectrales (ver figura 25) obtenidos en sitios de la zona lacustre con respecto a sitios de referencia en la zona de lomas. Discutieron la importancia de seleccionar un adecuado movimiento de referencia, y concluyeron que la mejor opción corresponde al espectro promedio de Fourier de los sitios en la zona de lomas al suroeste de la ciudad. A partir de dichos cocientes espectrales, realizaron mapas con zonas de isoamplificación relativa para distintos valores de periodo dominante (ver figura 26). En los mapas de la figura 26, se aprecia que los valores máximos de amplificación (más de 70 veces) corresponden a sitios con  $T_0 \approx 5$  segundos; los valores de amplificación mayores a 10 veces correspondientes a las curvas para  $T_0 = 1.5$  segundos y  $T_0 = 2.5$  segundos coinciden con las zonas de daños durante sismos; según Reinoso y Ordaz (1997), esto es una evidencia de que esas zonas seguirán siendo vulnerables durante eventos futuros.



Figura 25. Mapa de cocientes espectrales representativos para la Ciudad de México, datos de sismos (Reinoso y Ordaz, 1997).

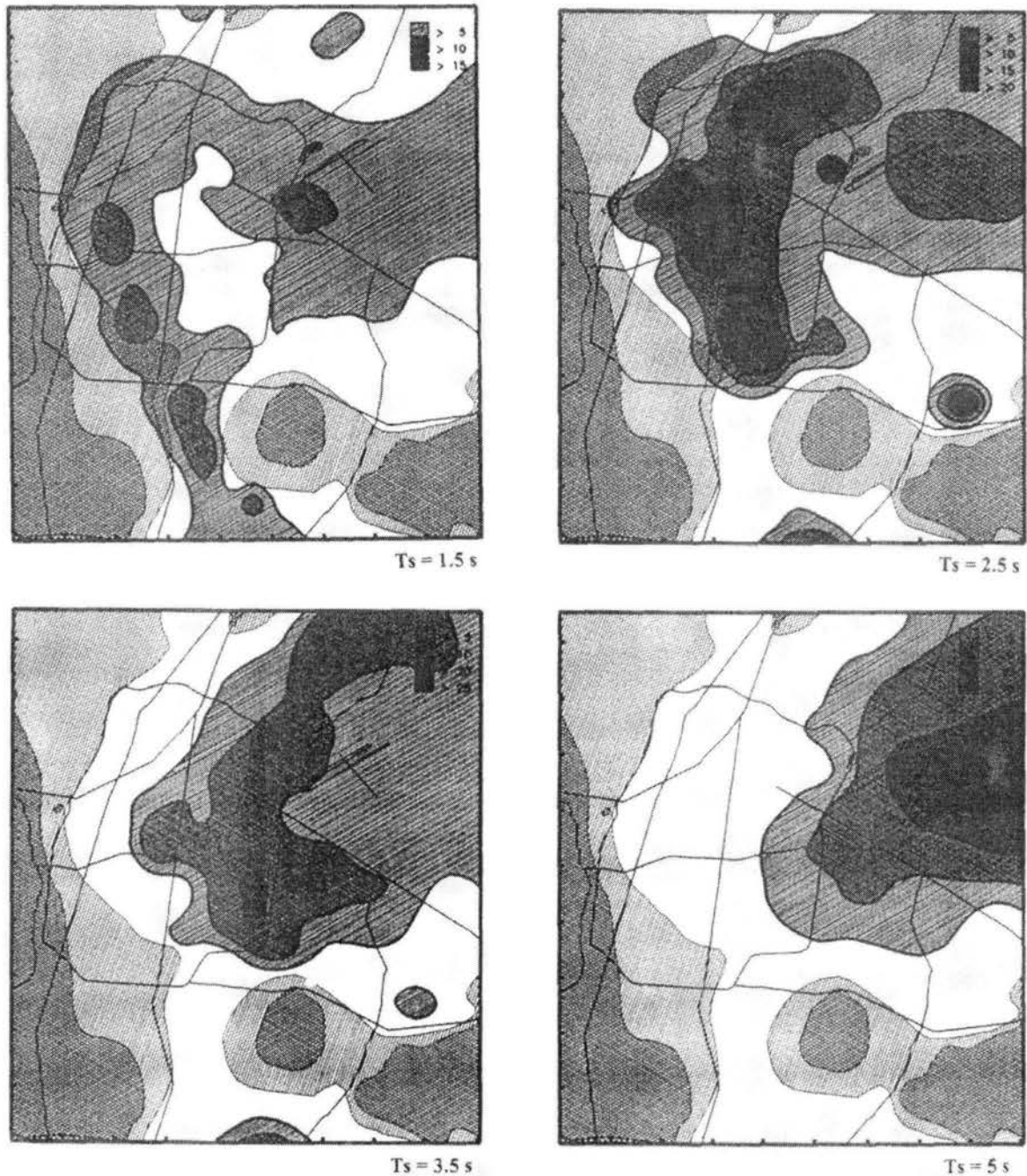


Figura 26. Mapas de curvas de isoamplificación relativa para la Ciudad de México, datos de sismos (Reinoso y Ordaz, 1997).

Finalmente, como resultado de los diferentes mapas de curvas de isoperíodo que varios investigadores (además de los citados anteriormente) han realizado y modificado para la Ciudad de México, se ha presentado un nuevo mapa de zonificación sísmica en el que la Zona III (zona lacustre) está dividida en tres subzonas (ver figura 27). El nuevo Reglamento



de Construcciones para el Distrito Federal, que entró en vigor a partir del 16 de febrero de 2004, incluye dicho mapa.

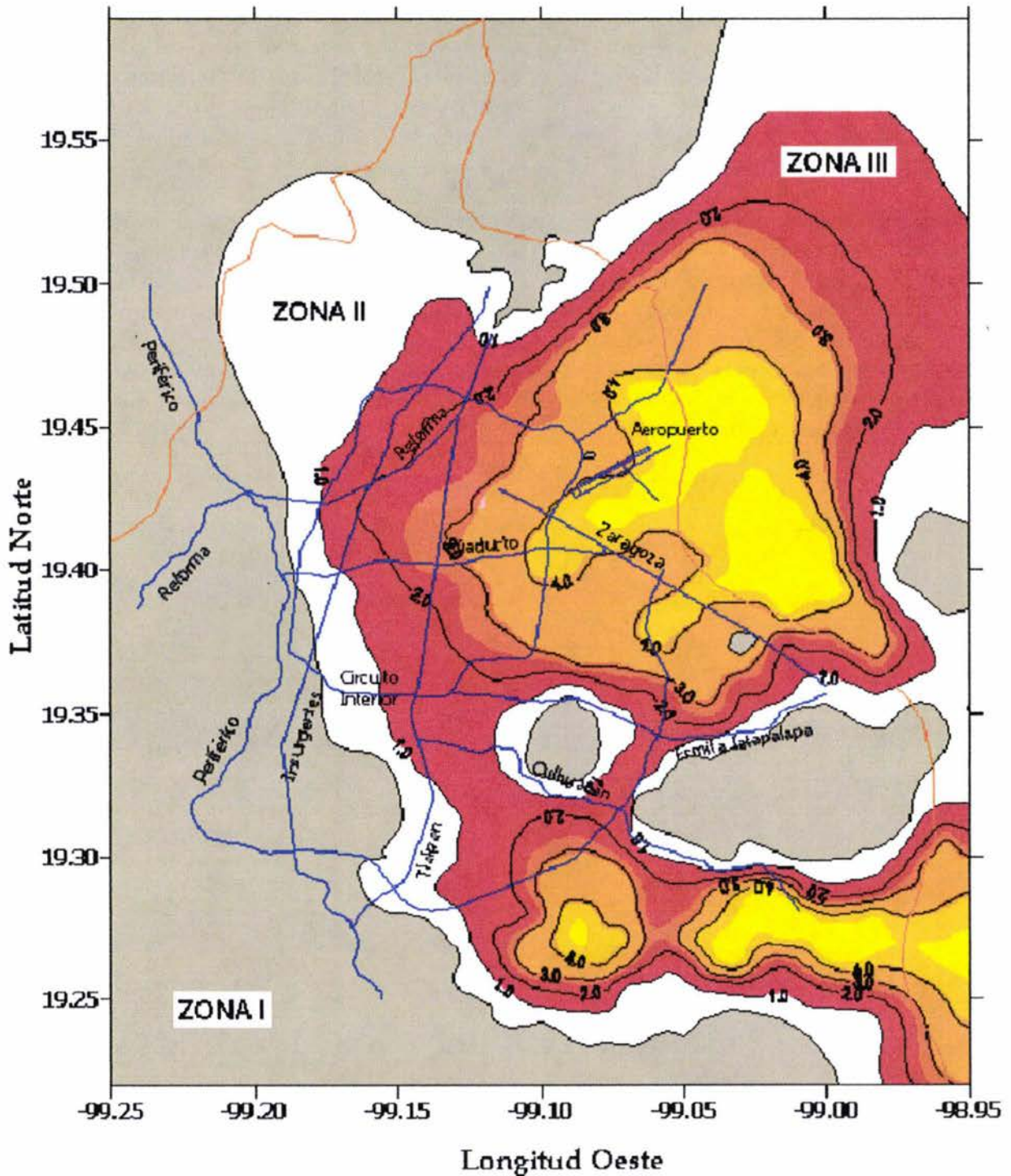


Figura 27. Mapa reciente de zonificación sísmica de la Ciudad de México (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1993).

## II.4.2 Ciudad de Guadalajara

Otra zona urbana de gran importancia en nuestro país es la Ciudad de Guadalajara, Jalisco. Ramírez-Centeno *et al.* (1997) realizaron uno de los primeros estudios de efecto de sitio para esta ciudad; efectuaron mediciones de vibración ambiental en 134 puntos, obtuvieron información de sondeos geotécnicos en 60 sitios y corroboraron sus resultados con los periodos dominantes observados en 11 estaciones acelerométricas que registraron el sismo ocurrido el 9 de octubre de 1995 en las costas de Colima y Jalisco. Con estos datos (ver figura 28), trazaron un mapa de curvas de isoperiodo para la Zona Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara (ver figura 29).

Posteriormente, Ramírez-Centeno *et al.* (1999) retomaron la mayoría de los registros de vibración ambiental y los datos de los 60 sondeos geotécnicos pertenecientes al estudio anterior; además, obtuvieron datos de 33 estudios geofísicos. Corroboraron también sus resultados con los periodos dominantes observados en 11 estaciones de la Red Acelerométrica del Área Metropolitana de Guadalajara que registraron el sismo del 9 de octubre de 1995. Con estos datos (ver figura 30), trazaron un nuevo mapa de curvas de isoperiodo (ver figura 31) y propusieron un mapa de microzonación sísmica para la Ciudad de Guadalajara (ver figura 32).

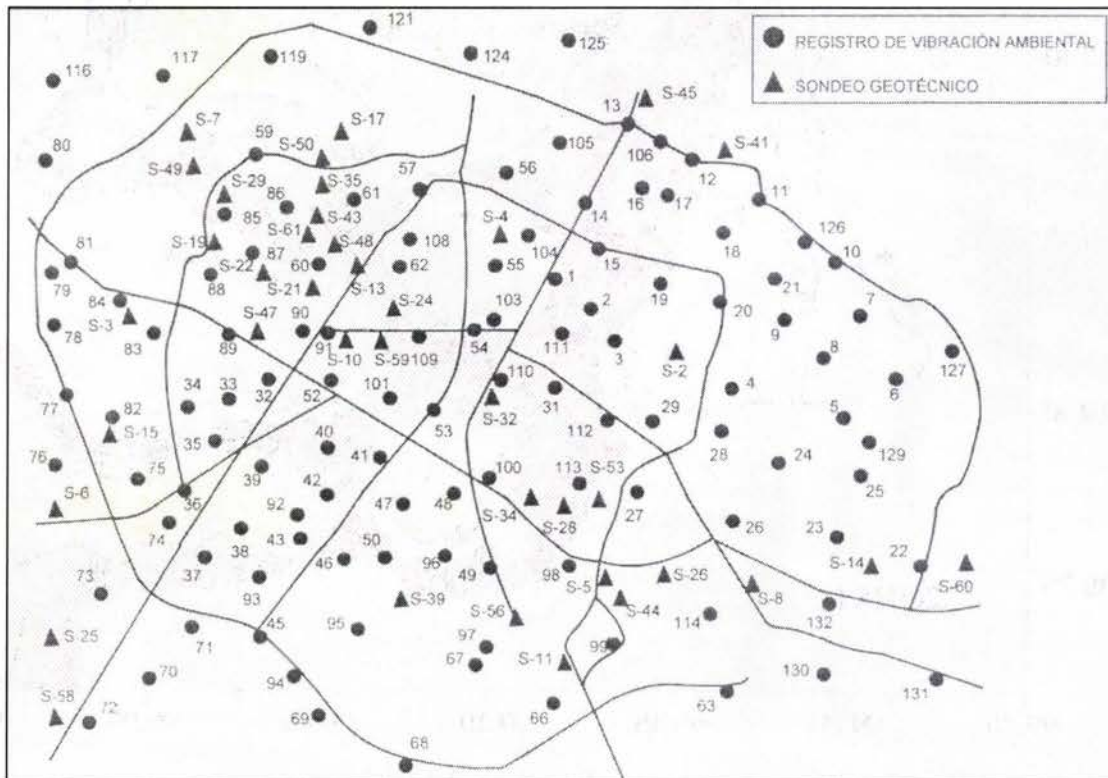


Figura 28. Ubicación de sitios de registro de vibración ambiental y de sondeos geotécnicos en la Zona Metropolitana de Guadalajara (Ramírez-Centeno *et al.*, 1997).

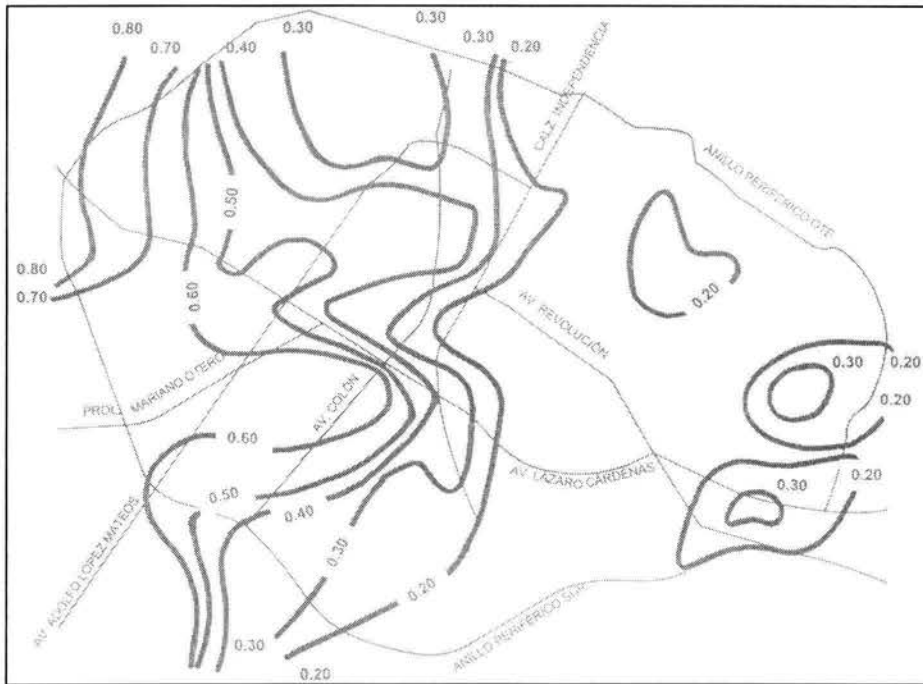


Figura 29. Mapa de curvas de isoperiodo para la Zona Metropolitana de Guadalajara (Ramírez-Centeno *et al.*, 1997).

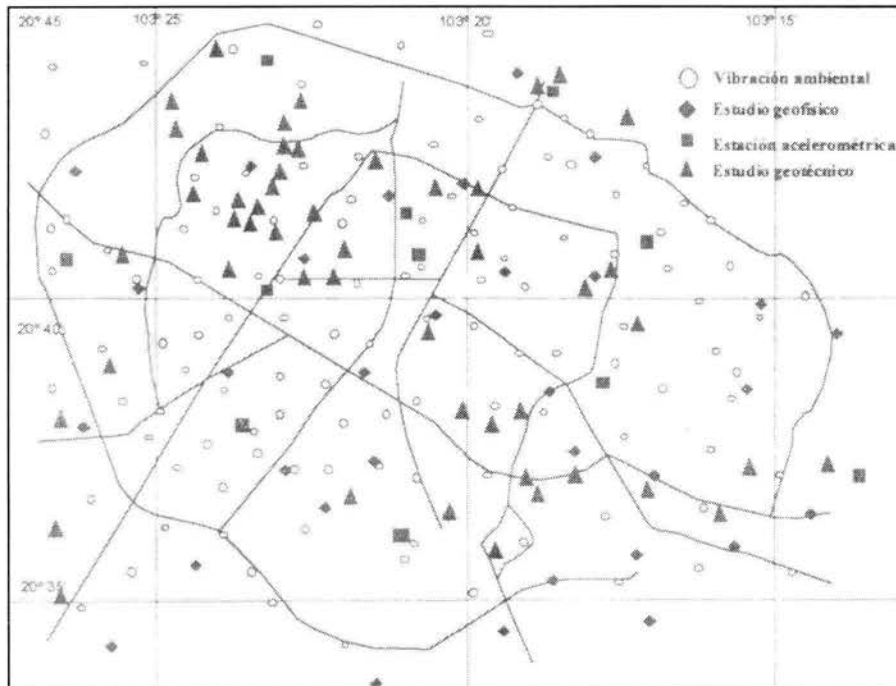


Figura 30. Ubicación de estudios de vibración ambiental, geotécnicos, geofísicos y de movimientos fuertes en la Zona Metropolitana de Guadalajara (Ramírez-Centeno *et al.*, 1999).

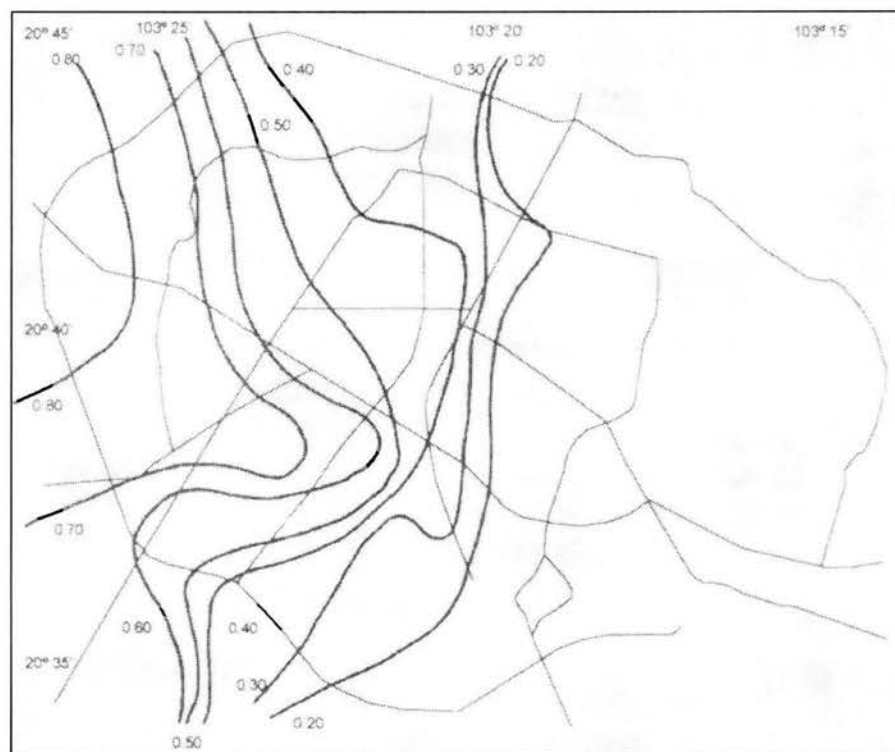


Figura 31. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de Guadalajara (Ramírez-Centeno *et al.*, 1999).

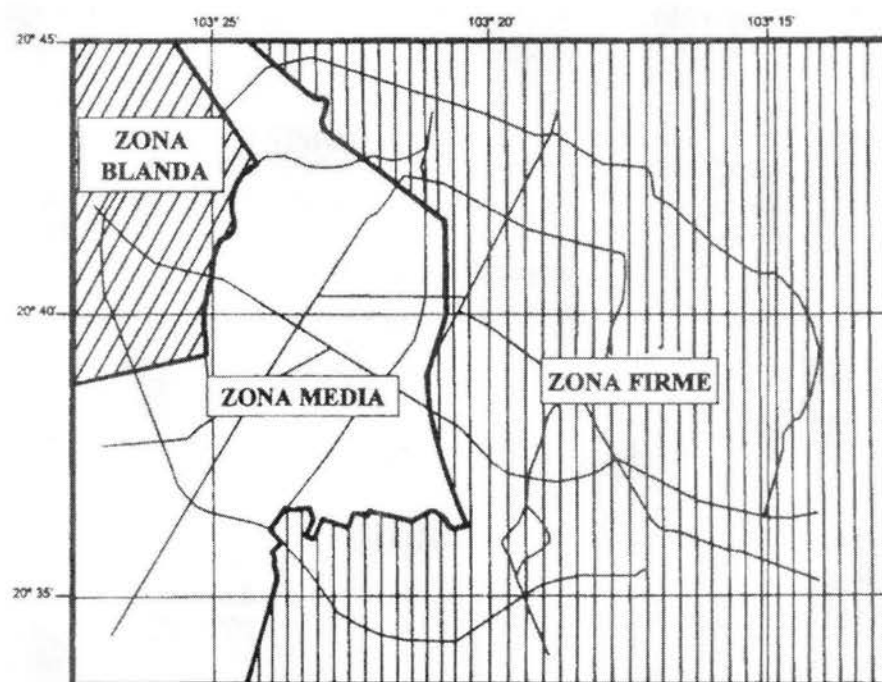


Figura 32. Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de Guadalajara (Ramírez-Centeno *et al.*, 1999).

### II.4.3 Ciudad de Oaxaca

Para la Ciudad de Oaxaca, Oaxaca, Lermo *et al.* (1991a) realizaron una zonificación preliminar de la zona urbana (ver figura 33) tomando como base información de geología superficial, el Plan Director Regional de Desarrollo Urbano y la distribución detallada de daños reportados para el sismo del 15 de enero de 1931 ( $M_s=7.8$ ). Lermo *et al.* (1991a) dividieron la Ciudad de Oaxaca en siete zonas preliminares (microzonas), en las cuales el grado de peligrosidad aumenta de la zona I a la zona VII.

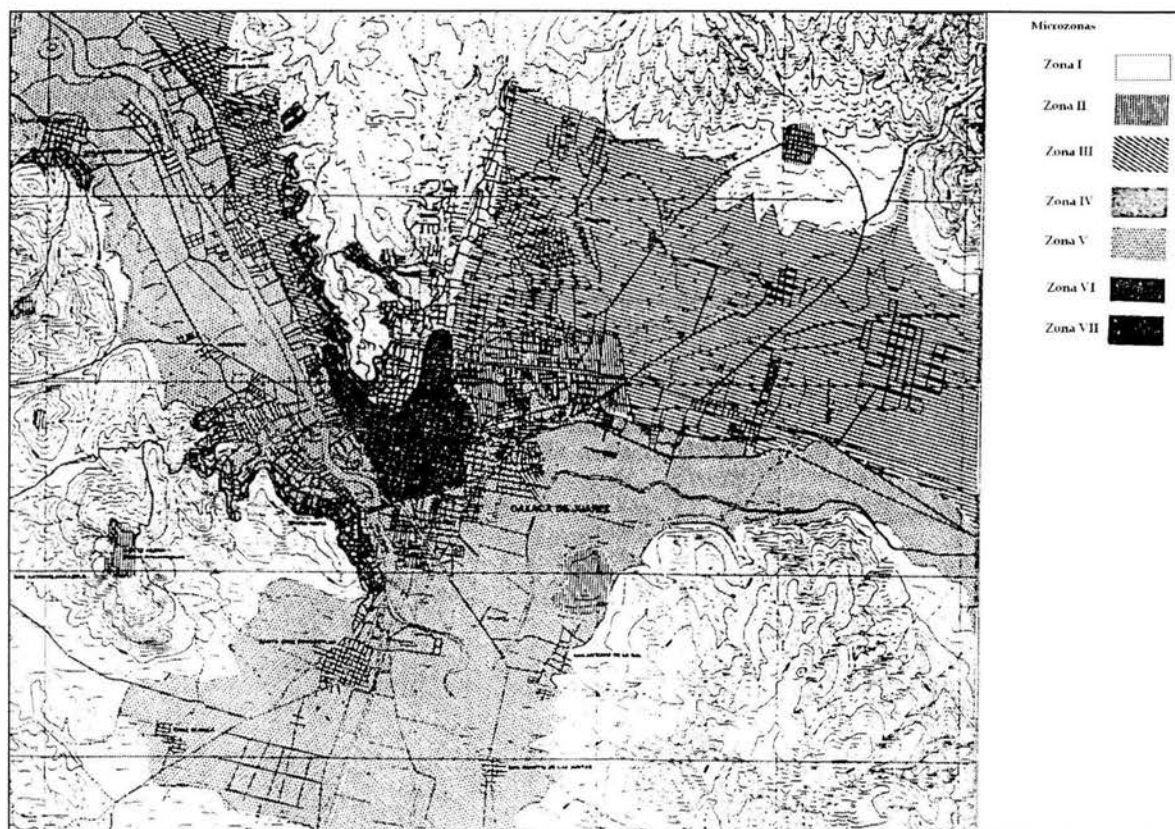


Figura 33. Mapa de microzonificación sísmica preliminar de la Ciudad de Oaxaca (Lermo *et al.*, 1991a).

Más tarde, Lermo y Chávez-García (1995) instalaron una red temporal de sismógrafos digitales, durante los meses de julio y agosto de 1991. Con esta red, registraron 32 sismos en al menos 2 estaciones; esta información la completaron con mediciones de vibración ambiental. Sus resultados les permitieron definir curvas de isoperiodo en la zona urbana de Oaxaca (ver figura 34), valores de isoamplificación relativa en algunos sitios (ver figura 34) y un mapa de microzonación sísmica para la Ciudad de Oaxaca (ver figura 35); además, identificaron una zona con pendientes mayores a  $15^\circ$  (ver figura 35) y la incluyeron dentro de dicho mapa.

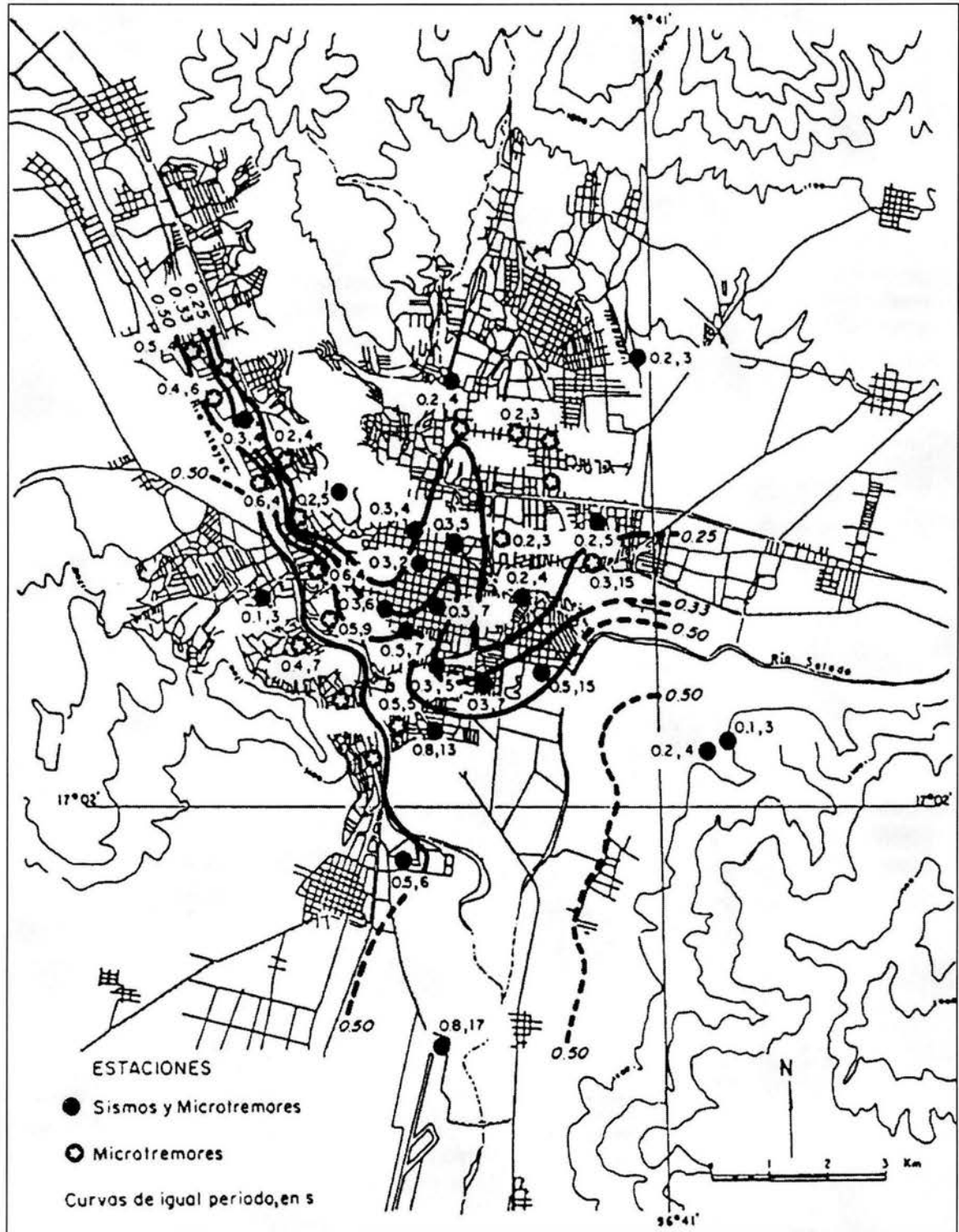


Figura 34. Mapa de curvas de isoperiodo para la Ciudad de Oaxaca (Lermo y Chávez-García, 1995).

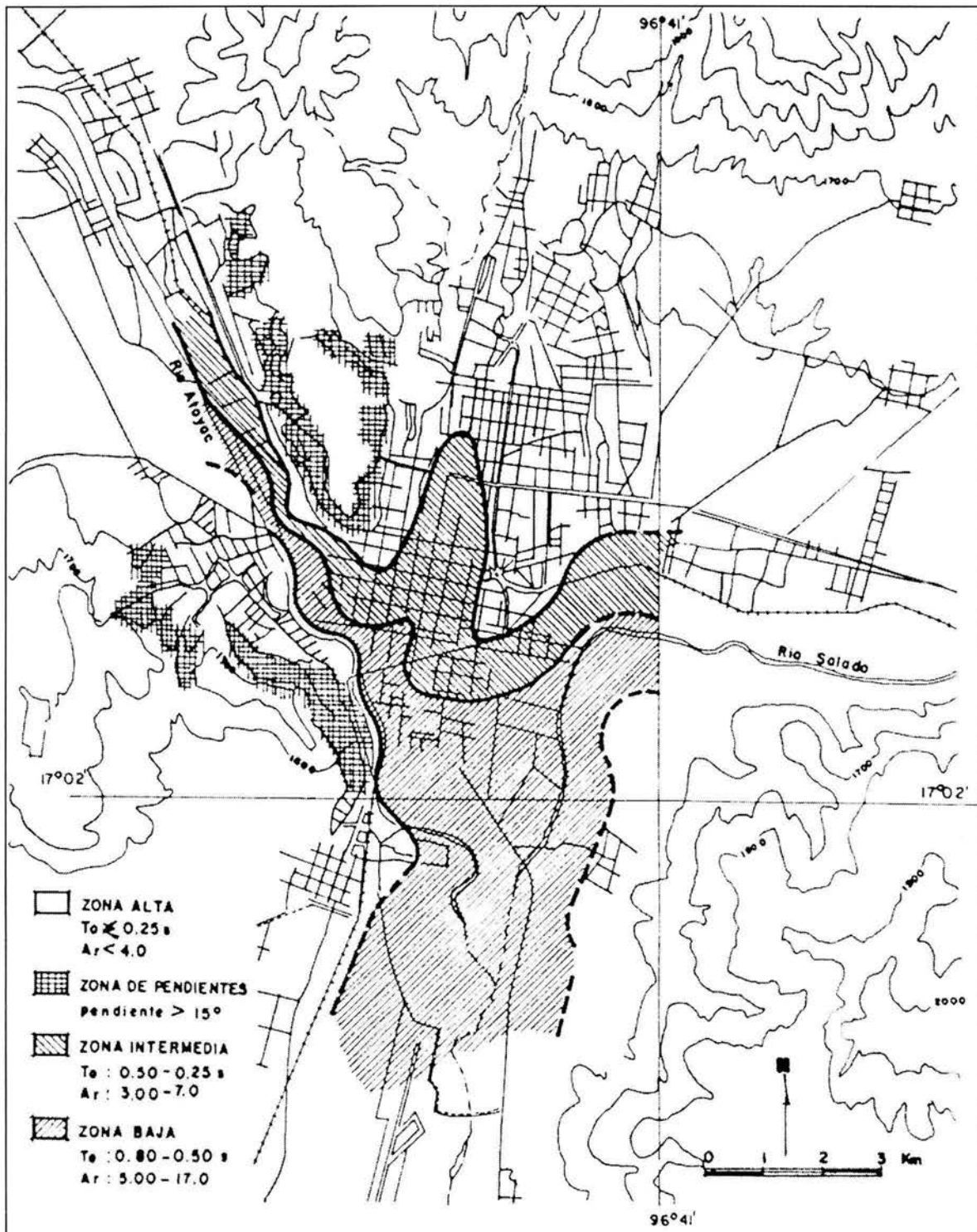


Figura 35. Mapa de microzonificación sísmica de la Ciudad de Oaxaca (Lermo y Chávez-García, 1995).

#### II.4.4 Ciudad de Acapulco

Uno de los primeros estudios de efecto de sitio para el Puerto de Acapulco, Guerrero, fue realizado por Mena *et al.* (1989). Estos investigadores calcularon funciones de transferencia empíricas (ver figura 37) para estimar la amplificación relativa con respecto a un sitio localizado sobre granito fracturado (estación ACAP, ver figura 36). Los registros que emplearon corresponden a los acelerogramas obtenidos en 6 estaciones acelerográficas (ACAC, ACAD, ACAR, ACAS, ACAZ, VNTA, ver figura 36) para los sismos de: marzo 19 de 1978 ( $M_s=6.4$ ), marzo 14 de 1979 ( $M_s=7.6$ ), marzo 9 de 1989 ( $M_c=4.4$ ), marzo 13 de 1989 ( $M_c=4.3$ ), abril 25 de 1989 ( $M_s=6.8$ ) y mayo 2 de 1989 ( $M_c=5.2$ ).

Posteriormente, Gutiérrez y Singh (1992) utilizaron registros de sismos y calcularon funciones de transferencia empíricas en 4 sitios de la Ciudad de Acapulco; sin embargo, estos investigadores comprobaron que la estación de referencia considerada en el estudio de Mena *et al.* (1989) para el cálculo de cocientes espectrales estándar (la estación ACAP) no es la más adecuada, pues presenta efecto de sitio debido a la topografía del terreno donde se encuentra. Por esta razón, Gutiérrez y Singh (1992) sugirieron que la mejor estación para el cálculo de cocientes espectrales es la estación VNTA ubicada sobre afloramientos de rocas metamórficas, y así calcularon funciones de transferencia empíricas (ver figura 38).

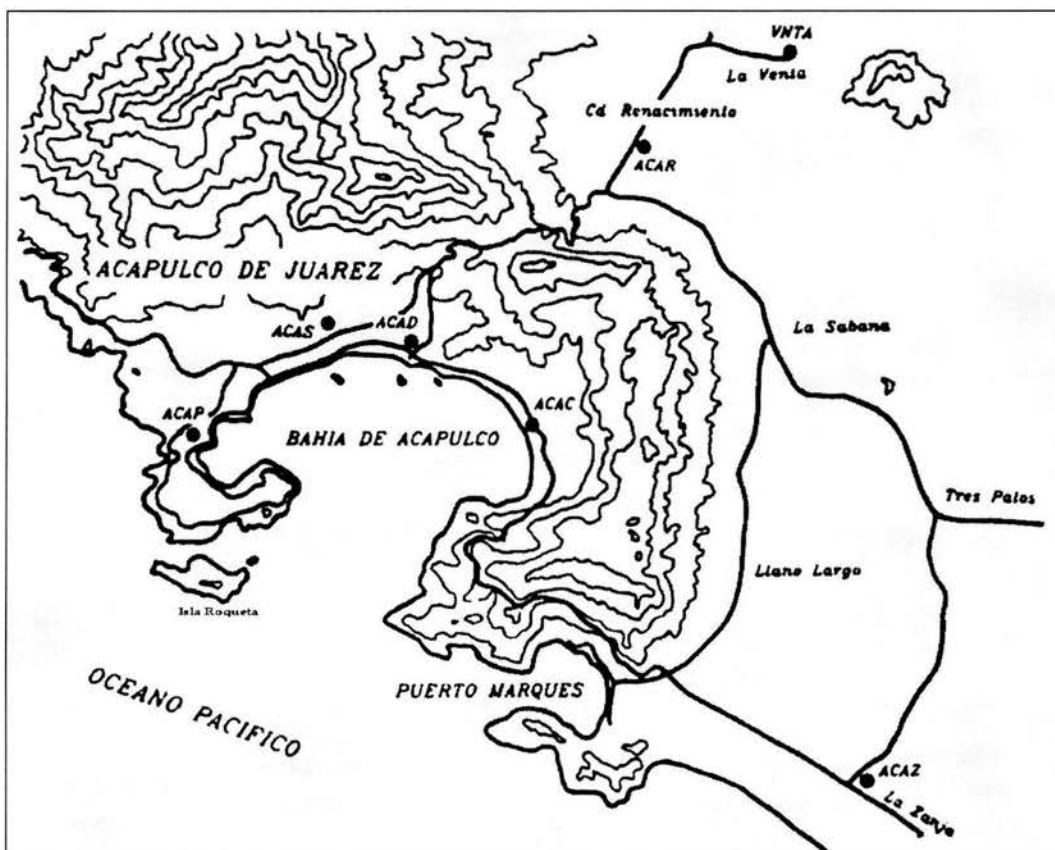


Figura 36. Localización de estaciones acelerográficas en la Ciudad de Acapulco (Mena *et al.*, 1989).



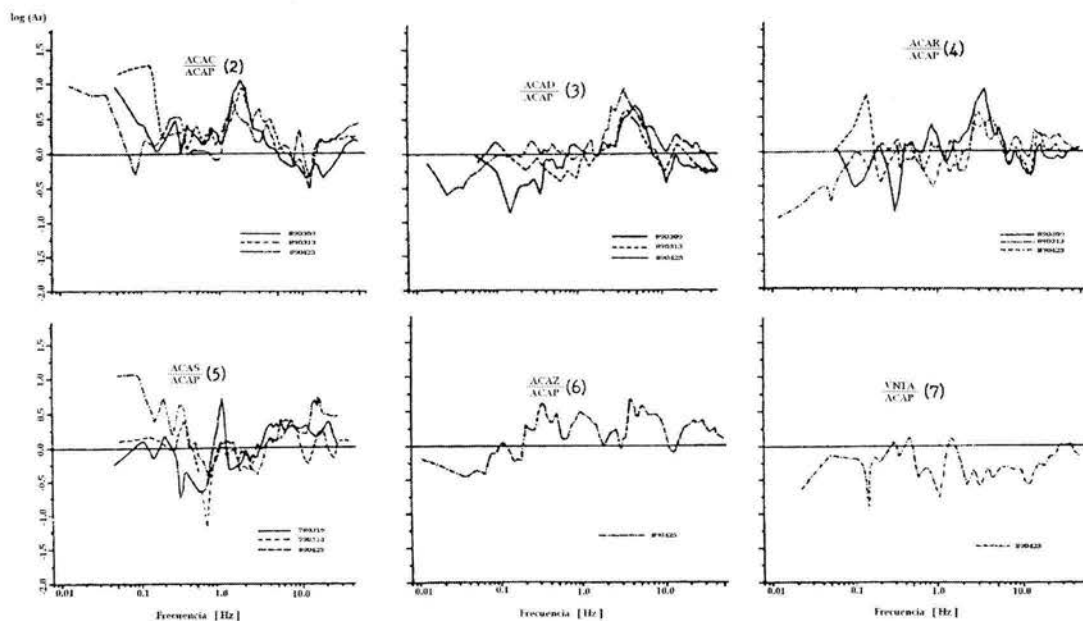


Figura 37. Funciones de transferencia empíricas en 6 sitios de la Ciudad de Acapulco, datos de sismos (Mena *et al.*, 1989).

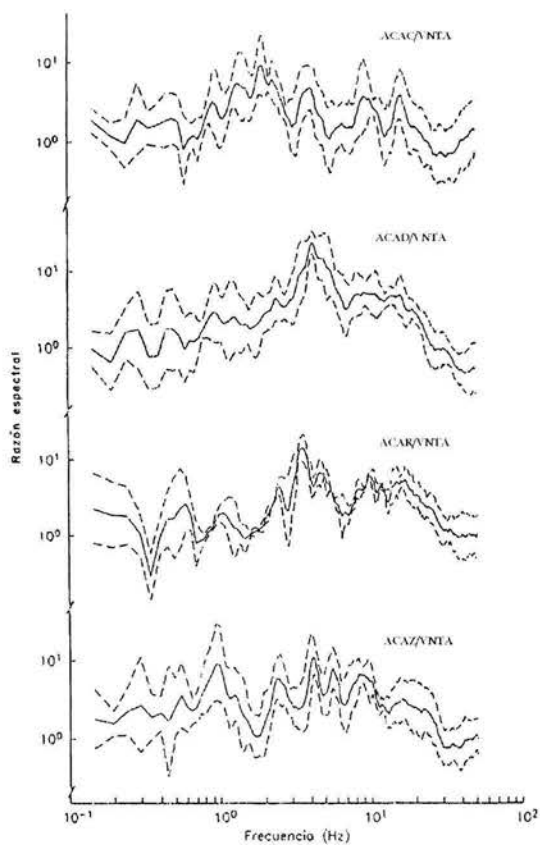


Figura 38. Funciones de transferencia empíricas en 4 sitios de la Ciudad de Acapulco, más menos una desviación estándar, datos de sismos (Gutiérrez y Singh, 1992).

Gutiérrez *et al.* (1989) efectuaron registros de vibración ambiental en varios puntos del puerto de Acapulco, a partir de los cuales obtuvieron un mapa de curvas de isoperiodo (ver figura 39). Con base en este, realizaron el mapa de microzonificación sísmica del puerto de Acapulco (ver figura 40) que aparece en el Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero.

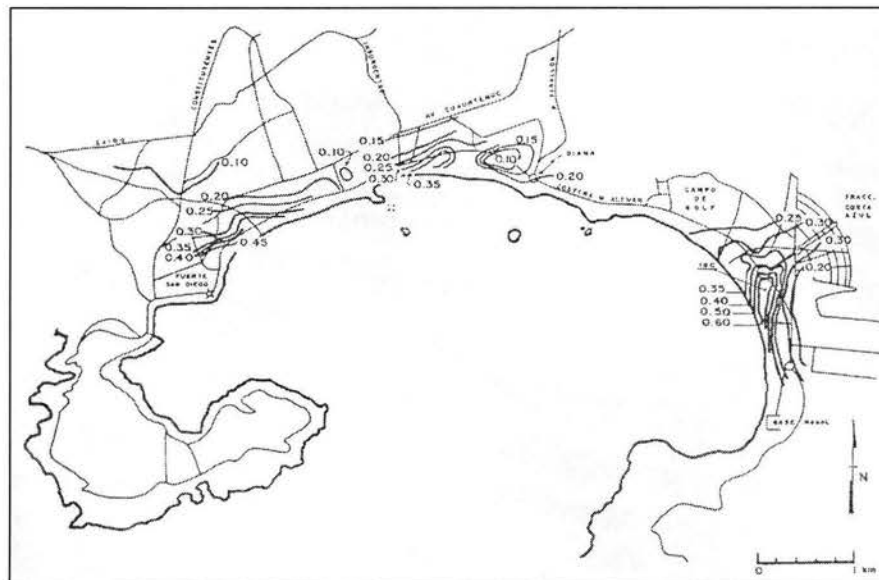


Figura 39. Mapa de curvas de isoperiodo para el Puerto de Acapulco (Gutiérrez *et al.*, 1989).

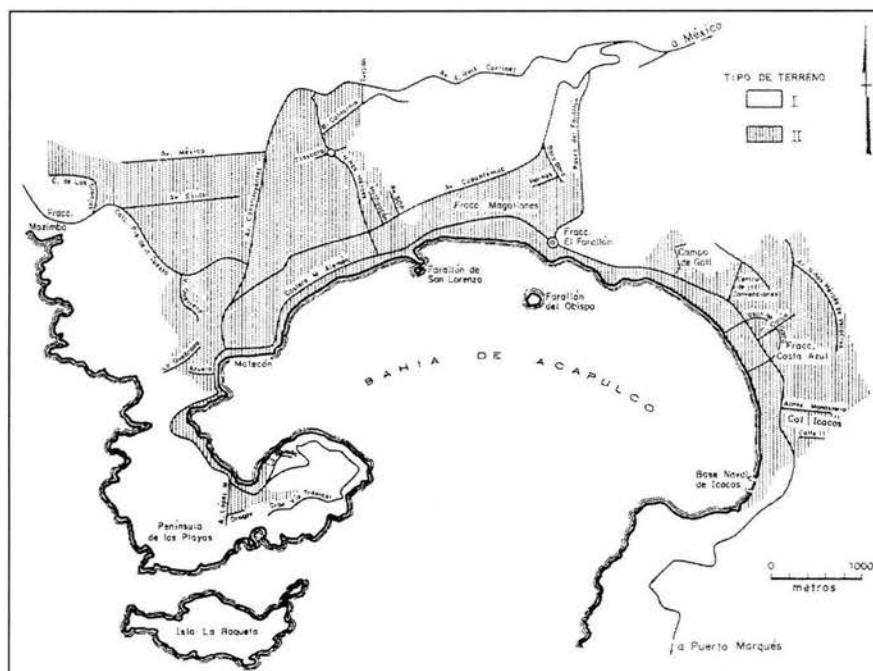


Figura 40. Mapa de zonificación sísmica del Puerto de Acapulco (Gutiérrez *et al.*, 1989).

#### II.4.5 Ciudad de Colima

En la Ciudad de Colima, Colima, Lermo *et al.* (1991b) instalaron una red de sismógrafos digitales durante 10 días en el mes de marzo, con la que pudieron registrar un temblor tectónico de  $M_c=3.5$  en cuatro sitios dentro de la zona urbana y uno fuera de ésta en suelo firme. Estimaron periodos dominantes en 36 sitios a partir de registros de microtemblores. Además, realizaron un estudio de refracción sísmica en el Parque Regional Metropolitano. Tomando en cuenta la geología local, la amplificación relativa y la distribución espacial de los periodos dominantes, dividieron la ciudad en cuatro microzonas preliminares; la geología existente muestra la siguiente distribución: brecha volcánica ácida (Bva) en la zona I, arenisca-conglomerado (ar-cg) en la zona II, conglomerado (cg) en la zona III, y depósitos aluviales (al) en la zona IV. En el mapa de microzonación sísmica preliminar (ver figura 41), el grado de peligrosidad aumenta de la zona I a la zona IV.

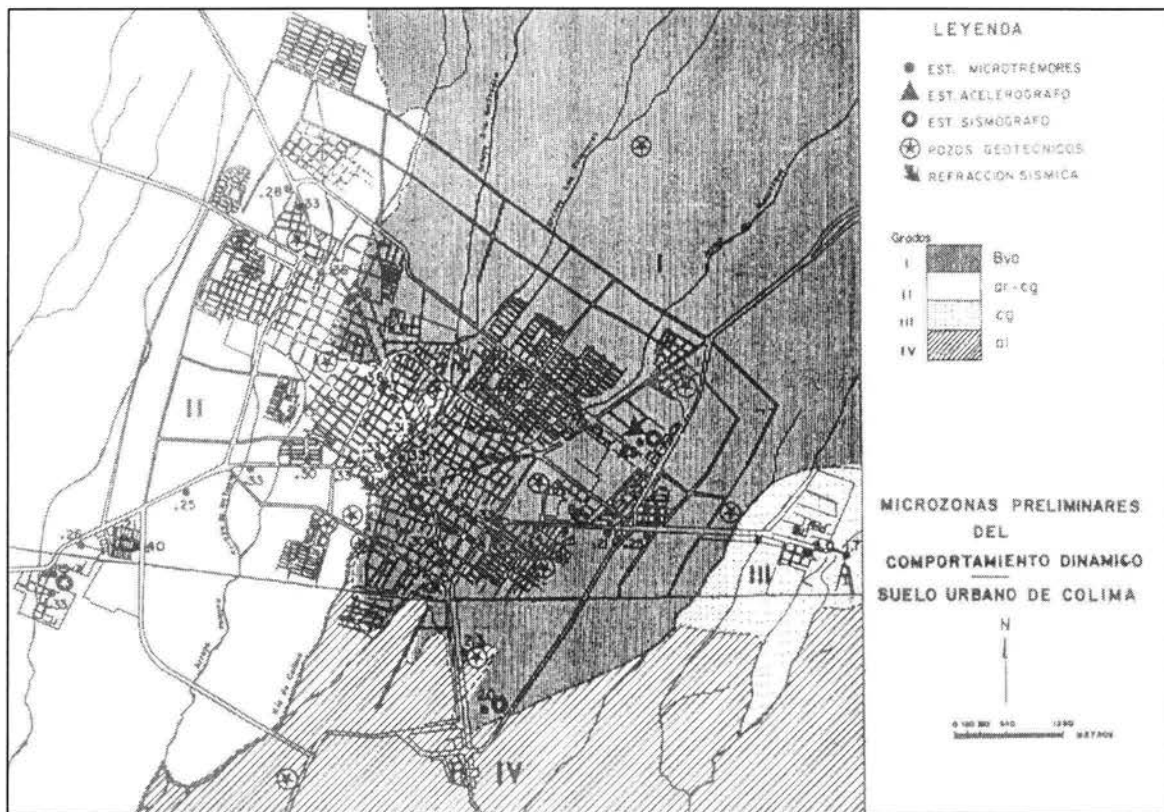


Figura 41. Mapa de microzonificación sísmica preliminar de la Ciudad de Colima (Lermo *et al.*, 1991b).

Gutiérrez *et al.* (1996), con el objeto de verificar y completar los resultados de Lermo *et al.* (1991b), instalaron una red sísmica temporal y registraron un total de 65 temblores regionales y locales en seis sitios dentro de la zona urbana y en uno fuera de ésta como estación de referencia. También midieron microtemblores tanto en la zona urbana como a lo largo de un perfil de 24 km entre el Cerro La Cumbre y el poblado de Zacualpan pasando por la zona urbana de Colima. Tomando en cuenta los registros de movimientos fuertes, temblores

regionales, temblores locales y microtemblores, así como la geología, datos geotécnicos y la geomorfología de la zona, Lermo (1997) propuso dos mapas de curvas de isoperiodo para la Ciudad de Colima (ver figuras 42 y 43). El primer mapa (ver figura 42) presenta curvas de isoperiodo con valores menores a 1.0 segundos, que reflejan el efecto de sitio provocado por las primeras capas de sedimentos que afloran en la ciudad. El segundo mapa (ver figura 43) presenta curvas de isoperiodo con valores mayores a 1.0 segundos, que reflejan el efecto de sitio provocado por el paquete sedimentario total del valle de Colima.

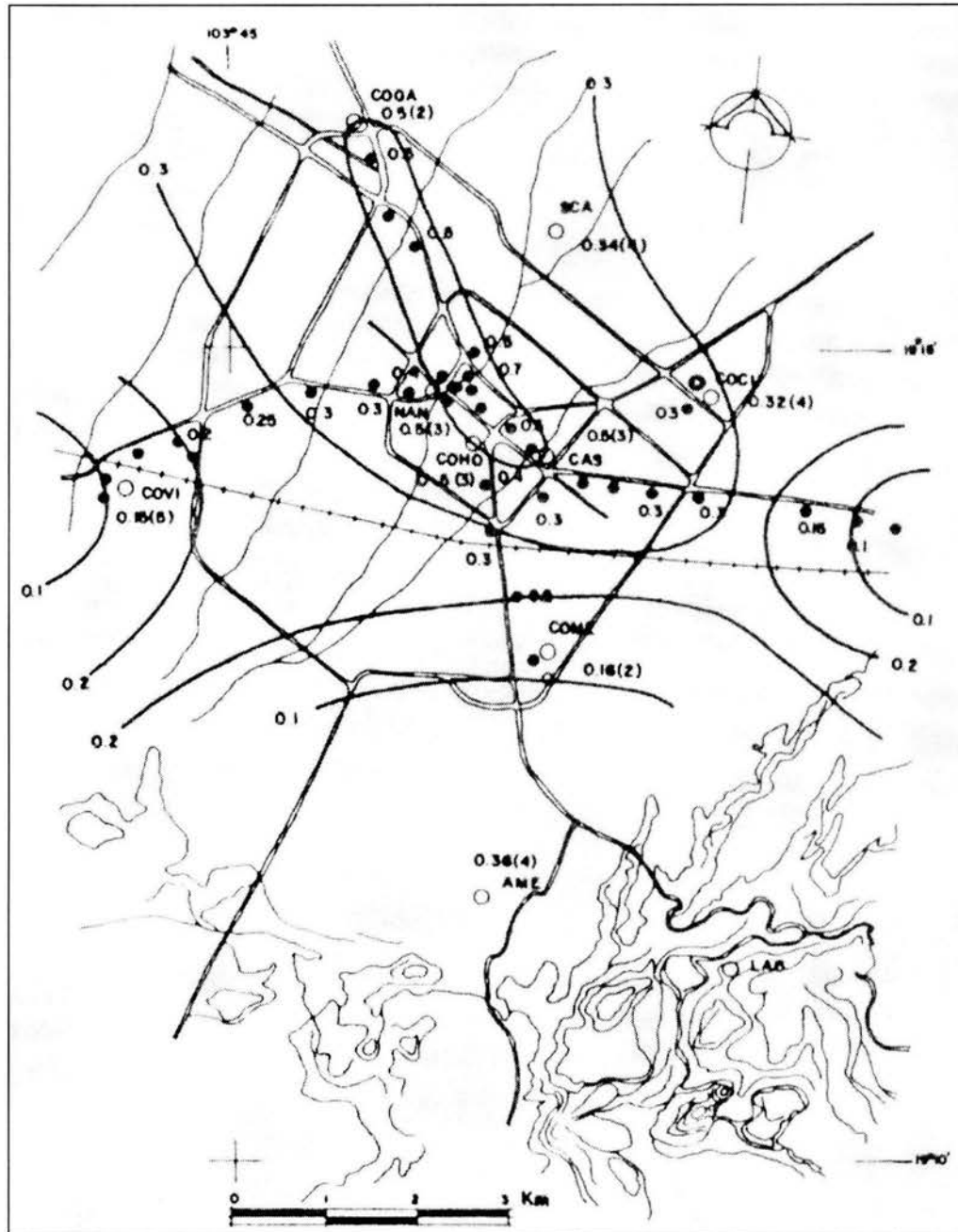


Figura 42. Mapa de curvas de isoperiodo menores a 1.0 segundos para la Ciudad de Colima (Lermo, 1997).

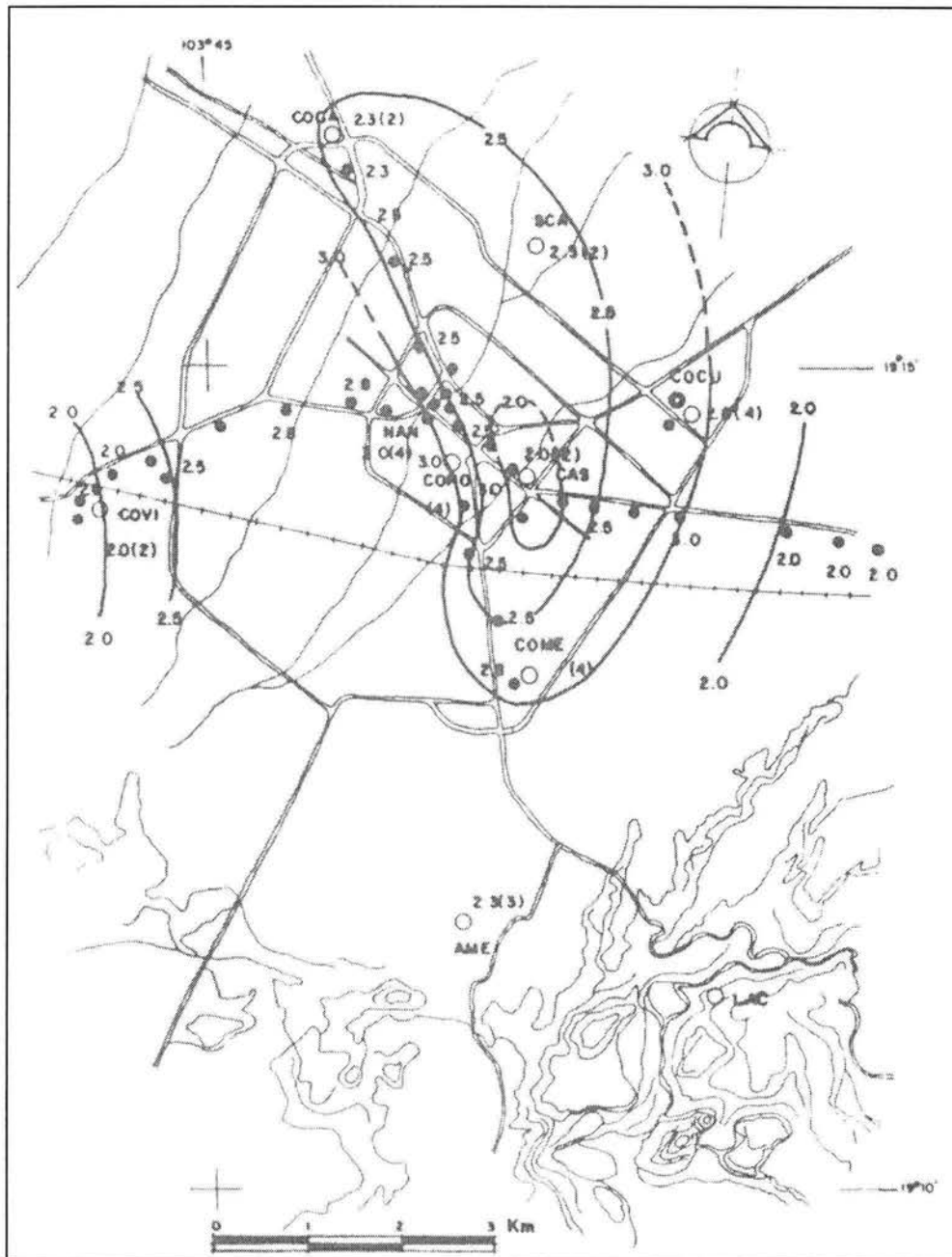


Figura 43. Mapa de curvas de isoperiodo mayores a 1.0 segundos para la Ciudad de Colima (Lermo, 1997).

#### II.4.6 Ciudad de Puebla

Chávez-García *et al.* (1995) recopilaron información sobre la respuesta sísmica de la Ciudad de Puebla, que incluye: geología superficial e hidrología, datos de sondeos profundos, información de daños ocasionados por dos sismos destructivos, así como los registros de

movimientos fuertes de cuatro estaciones que han operado en la zona urbana. Además, obtuvieron datos de tres experimentos: medición de vibración ambiental en 39 puntos dentro de la zona urbana, instalación y operación de una red temporal de sismógrafos digitales, y realización de un estudio de refracción de pequeña escala. Aunque presentaron un mapa de distribución de periodos dominantes (ver figura 44), no trazaron curvas de isoperiodo porque consideraron que aún deben realizarse más estudios para dibujar curvas de isoperiodo mejor definidas.

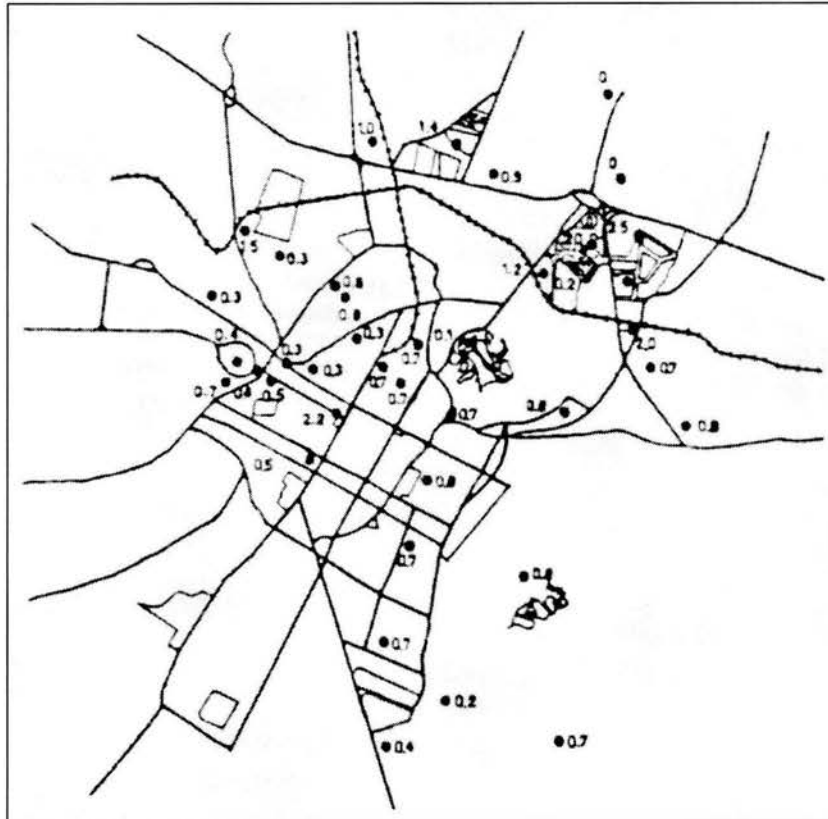


Figura 44. Mapa de distribución de periodos de vibración del suelo para la Ciudad de Puebla (Chávez-García *et al.*, 1995).

Considerando el mapa de microzonificación sísmica de la Ciudad de Puebla realizado por Ruiz *et al.* (1993), la Universidad Autónoma de Puebla (1999) propuso un nuevo mapa de microzonificación sísmica (ver figura 45) para ser incluido en el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla. Ruiz *et al.* (1993) realizaron mediciones de vibración ambiental en 98 puntos y obtuvieron datos geotécnicos de 18 sitios.

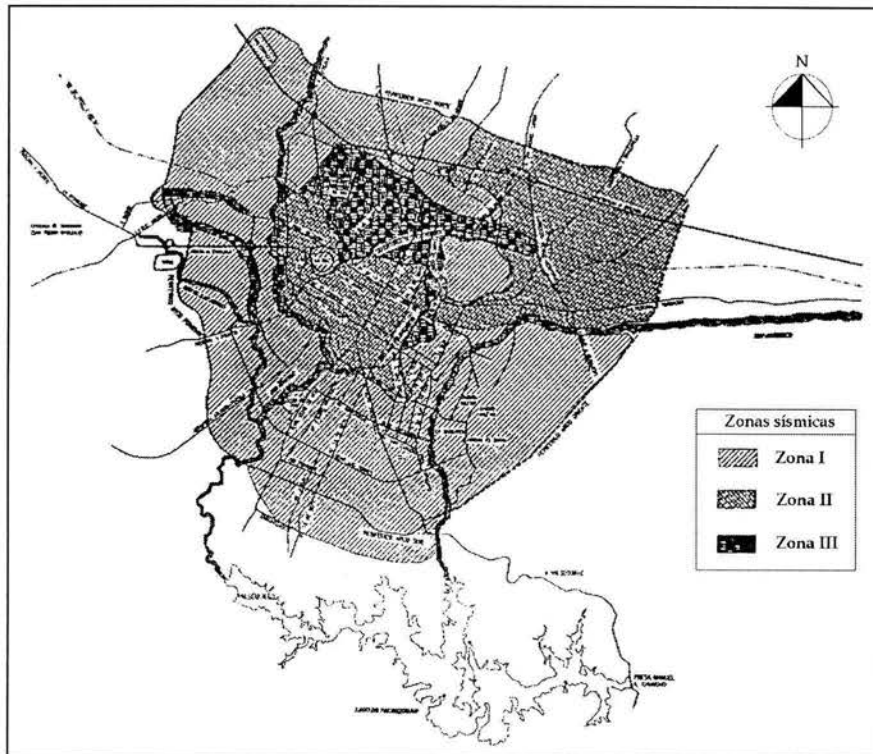


Figura 45. Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de Puebla (Universidad Autónoma de Puebla, agosto de 1999).

Con este breve panorama de la evaluación del efecto de sitio en las ciudades de México, Guadalajara, Oaxaca, Acapulco, Colima y Puebla, podemos darnos cuenta que son pocas las zonas urbanas que cuentan con estudios completos y detallados. Como consecuencia, los mapas de microzonificación sísmica que han sido incorporados en Reglamentos de Construcción también son escasos.

Los resultados que diferentes investigadores e instituciones han obtenido para la Ciudad de México, sobre la evaluación del efecto de sitio, nos muestran que un mapa de curvas de isoperíodo se completa y se detalla con acciones como aumentar la cantidad de sitios estudiados, obtener datos y registros de distintos tipos (geotécnicos, geofísicos, de vibración ambiental, de sismos), así como elegir y aplicar las técnicas de análisis más adecuadas según el tipo de información disponible; de esta manera, cada estudio puede ser retomado para completar estudios posteriores y contribuir así a la realización de mapas de microzonificación sísmica que puedan ser incluidos en Reglamentos de Construcción. Para lograr esto, es recomendable un esfuerzo sistemático y coordinado entre autoridades (federales, estatales y municipales), profesionistas (geólogos, geofísicos, ingenieros, etc.), instituciones de educación e investigación, así como asociaciones y colegios de profesionistas, por medio del cual podamos identificar y evaluar las ciudades más pobladas en las zonas C y D de tal forma que sean estudiadas las más desfavorables mediante trabajos de investigación sobre efecto de sitio y microzonificación.

### CAPÍTULO III

## EFFECTO DE SITIO EN LAS CIUDADES DE ACATLÁN Y TEHUACÁN, PUEBLA. EL CASO DEL TEMBLOR DE TEHUACÁN DEL 15 DE JUNIO DE 1999

### III.1 Introducción

El 15 de junio de 1999 a las 15:41:06 horas (hora local) ocurrió un temblor de magnitud  $M_w=7.0$ , con epicentro ubicado a 20 km aproximadamente al suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla. La localización epicentral preliminar, reportada por el Sistema de Información Sismotelemétrica del Valle de México (SISMEX), es: latitud  $18.3^\circ\text{N}$ , longitud  $97.6^\circ\text{W}$ , profundidad de 40 km. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), las coordenadas focales son: latitud  $18.20^\circ\text{N}$ , longitud  $97.47^\circ\text{W}$ , profundidad de 92 km. Una estimación del mecanismo focal, basada en los primeros arribos de ondas P de las estaciones de SISMEX, muestra un mecanismo de falla normal.

En la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, ubicada a 55 km al suroeste de dicho epicentro, ocurrió un sismo fuerte ( $M_w=7.0$ ) el 24 de octubre de 1980. Este sismo causó gran destrucción en Huajuapán de León y en la región de la Mixteca Alta; la estimación oficial de víctimas fue de 300 aproximadamente. El mecanismo determinado fue de falla normal, con una profundidad hipocentral de 72 km. A juzgar por las similitudes del sismo de Huajuapán de León con el de Tehuacán, Aguirre *et al.* (1999) asocian este último a un evento de profundidad intermedia en la placa de Cocos subducida bajo la de Norteamérica.

Los daños más relevantes en el Estado de Puebla durante el sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999 se concentraron en hospitales, escuelas, viviendas y monumentos históricos. La intensidad del daño en los tres primeros tipos de construcción fue moderada (Ramírez *et al.*, 1999; Singh *et al.*, 1999). Sin embargo, se registraron colapsos de viviendas en las ciudades de Puebla, San Mateo Ozolco, Acatlán de Osorio y Tehuacán. En estas dos últimas, las viviendas más afectadas fueron las casas de adobe y mampostería simple.

Muchos de los daños en las construcciones históricas y en las viviendas de adobe y mampostería simple, fueron ocasionados por las deficiencias estructurales y el deterioro de dichas edificaciones. Sin embargo, el efecto de sitio en zonas de terreno blando también pudo intervenir de manera importante en la aparición de tales daños.

En la figura 46 se muestra un mapa de isosistas (curvas de igual intensidad) de la región cercana al epicentro del sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999.



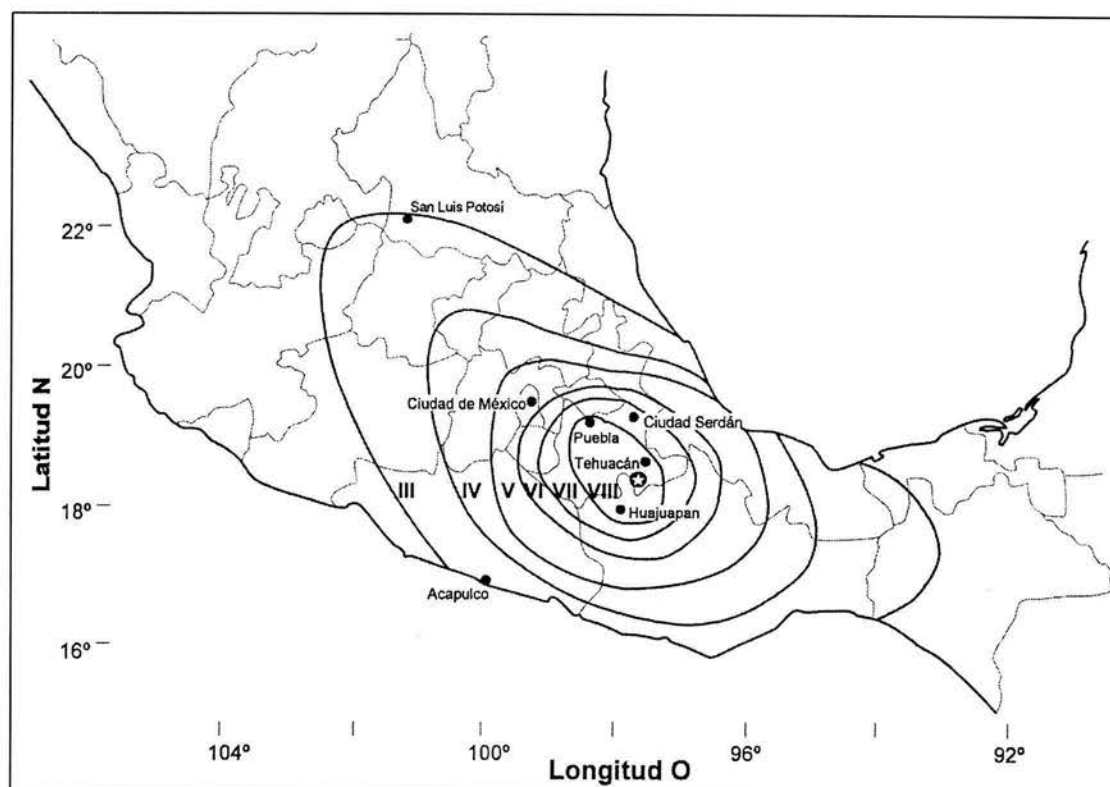


Figura 46. Mapa de isosistas correspondientes al sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999 (realizado por Gutiérrez, 1999).

En este capítulo, presento los resultados de la revisión, corrección y complementación que hice a un estudio previo realizado por Lermo *et al.* (2000), sobre el efecto de sitio en las ciudades de Acatlán de Osorio y Tehuacán, Puebla, para el caso del sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. De esta manera, ejemplifico los aspectos del proceso de evaluación del efecto de sitio para dichas zonas urbanas, y muestro en cuál de las dos es más significativa la influencia de este fenómeno cuando se presenta un movimiento sísmico del suelo. Para la ciudad de Tehuacán, en particular, comparo los resultados que obtuve con los que aparecen en el estudio realizado por Osorio-Carreta *et al.* (1997); en este caso, muestro la importancia de elegir la técnica de análisis adecuada para obtener resultados confiables de la evaluación del efecto de sitio.

### III.2 Acatlán de Osorio, Puebla

#### III.2.1 Aspectos geológicos

La ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla, se localiza a menos de 100 km hacia el sur de la ciudad de Puebla; está asentada sobre las rocas metamórficas del complejo Acatlán (Ortega *et al.*, 1999). Sobre estas rocas existen depósitos arenosos de origen aluvial, que forman la parte

superficial de la zona, donde está asentada gran parte de la población de Acatlán. Estos depósitos están representados por estratos delgados (claros y oscuros) de arenas, arenas limosas, gravas y conglomerados, que son producto de terrazas aluviales del río Tizac que fluye al Este de la población. La figura 47 presenta el límite aproximado de estos depósitos aluviales sobre las rocas metamórficas; particularmente, la fotografía 1 es una toma cercana de dicho límite en la zona norte de la población. En la fotografía 2, aparece una toma de los estratos arenosos en la zona centro de la ciudad.

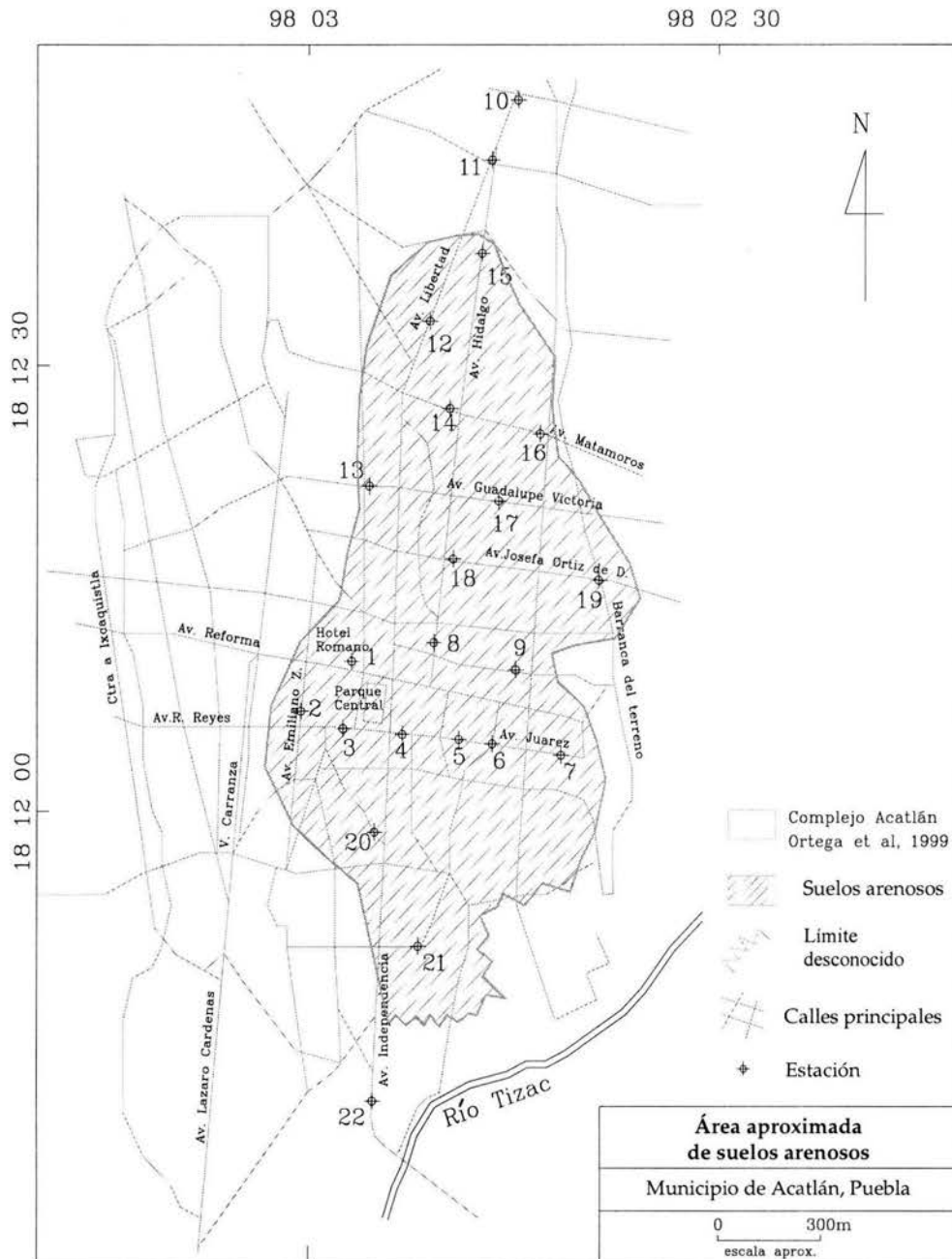
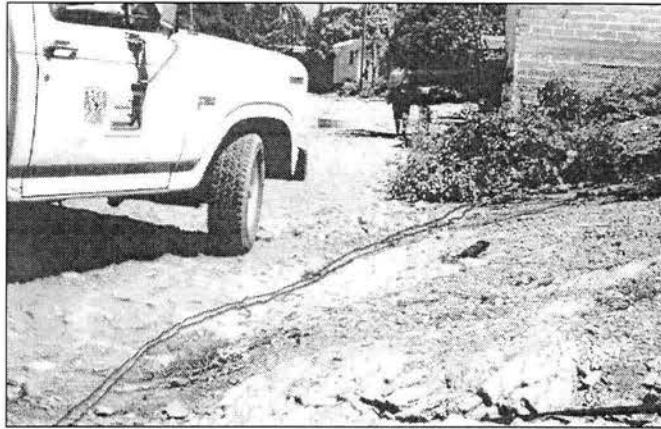


Figura 47. Mapa geológico de la ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla, donde se muestra el límite aproximado de la zona arenosa (Ortega *et al.*, 1999, modificado).



Fotografía 1. Contacto discordante (línea doble continua) entre la roca metamórfica (derecha) y los depósitos arenosos (izquierda), tomada por Lermo *et al.* (2000) en la estación 15 (ver figura 47).



Fotografía 2. Características litológicas del depósito arenoso, representado por estratos horizontales (claros y oscuros) de arena fina y arenas limosas (tomada por Lermo *et al.*, 2000, al NE de la estación 20, sobre la Av. Independencia).

No es la primera vez que se reportan daños en Acatlán ocasionados por sismos y se reconoce el efecto de sitio en esta ciudad. Prince (1980) y Muriá *et al.* (1981) reportaron daños y efectos locales a causa del sismo del 24 de octubre de 1980 ( $M_w=7.0$ ). Estos autores mencionan que los daños en viviendas de adobe se concentraron en la zona de rellenos de la parte baja de la ciudad.

---

### III.2.2 Distribución de los daños

Los daños en la ciudad de Acatlán durante el sismo del 15 de junio de 1999 se concentraron principalmente en viviendas de adobe y mampostería simple, ubicadas en la zona de depósitos arenosos. En la figura 48, Lermo *et al.* (2000) han marcado con líneas gruesas las zonas donde hubo mayor daño; para esto, se basaron en una estadística realizada por la Presidencia Municipal, la cual reportó aproximadamente 400 casas dañadas.

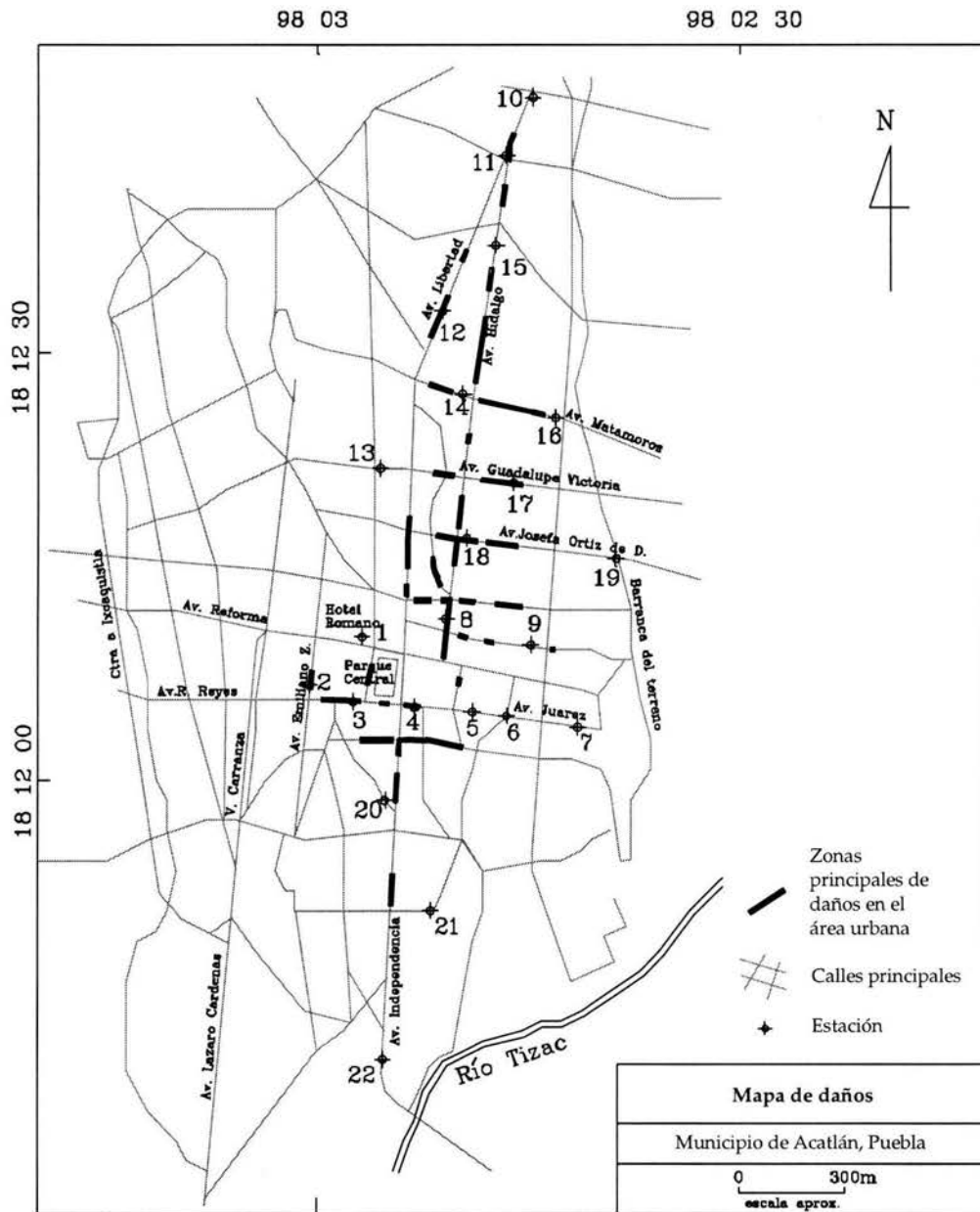


Figura 48. Mapa de daños (información de la Presidencia Municipal) y ubicación de los 22 sitios donde Lermo *et al.* (2000) realizaron mediciones de vibración ambiental.

En la ciudad de Acatlán, la mayoría de las viviendas de adobe se caracterizan por una estructura de un solo nivel y sin subdivisiones interiores (fotografía 3). Los muros perimetrales tienen más de tres metros de altura, y carecen de los elementos estructurales necesarios para darles confinamiento y continuidad; en la mayoría de los casos, los muros están expuestos a la intemperie sin recubrimiento alguno que los proteja. El sistema de techo consiste en una estructura de madera sobre la cual se colocan pesadas tejas de arcilla o láminas de asbesto. Algunas de las viviendas más recientes son de tabique o tabicón, confinado con dalas y castillos de concreto. Las construcciones de dos niveles, en general, son de tabique o híbridas de adobe en el primer nivel y de tabique en el segundo (fotografía 4).



Fotografía 3. Diferencia entre los daños de una vivienda de mampostería bien confinada (izquierda) y otras dos de mampostería sin liga entre muros ortogonales (derecha). Nótese los daños ocasionados por el choque de muros adyacentes (tomada por Lermo *et al.*, 2000).



Fotografía 4. Daño en vivienda edificada con adobe y mampostería simple, cercana a la estación 5 (ver figura 48).

La ausencia de liga entre muros ortogonales provocó un comportamiento indeseable en las paredes de las casas de adobe (cabe mencionar que la rigidez y la resistencia de los muros, ante fuerzas perpendiculares a su plano, son menores en comparación con las que se tienen ante fuerzas cuya dirección es igual a la de dicho plano). Este movimiento de los muros, en direcciones distintas a la de su plano, ocasionó que el sistema de techo perdiera el apoyo vertical, dando lugar al desplome de techo y muros. Esta forma típica de falla, observada en varias de las construcciones dañadas, se distingue además por la aparición de grietas verticales en las esquinas de las casas (ver fotografía 3).

Por otro lado, el modo fundamental de vibración se relaciona con la deformación en flexión de los muros largos (Oscar Hernández *et al.*, 1981); las vibraciones ocasionadas por el movimiento del suelo durante un sismo, inducen momentos flexionantes en las esquinas superiores de los muros, los cuales se agrietan paulatinamente de arriba hacia abajo, por lo que el muro frontal comienza a vibrar como un voladizo, ocurriendo el volteo cuando la sección agrietada es suficiente para que la resultante de las fuerzas se localice fuera del plano del muro.

Además de estos dos conceptos, otro factor que debemos tomar en cuenta es el deterioro de las estructuras, originado por el intemperismo y agravado por la falta de mantenimiento de las viviendas. Cabe mencionar que las resistencias a compresión y a tensión del adobe disminuyen casi linealmente con la humedad, hasta ser prácticamente nulas para contenidos de agua del 12% (Oscar Hernández *et al.*, 1981).

Aun cuando estas condiciones estuvieron presentes en varias casas de adobe de la ciudad de Acatlán, también hubo casas de adobe que no colapsaron ni sufrieron daños. Al superponer los mapas de las figuras 47 y 48, observamos que los daños se concentraron principalmente en la zona de depósitos blandos. Por esta razón, es necesario investigar si el efecto de sitio fue un factor importante en la aparición de tales daños.

Finalmente, en esta misma zona de depósitos blandos se reportaron pocos daños en las viviendas construidas con mampostería adecuadamente confinada; sin embargo, hubo algunas casas de tabique o tabicón que mostraron agrietamientos diagonales en algunos de sus muros. En general, las estructuras desplantadas en la zona de terreno firme tuvieron un comportamiento dinámico satisfactorio.

### III.2.3 Evaluación del efecto de sitio

Con objeto de estimar el comportamiento dinámico de estos suelos arenosos, Lermo *et al.* (2000) registraron vibración ambiental en 22 sitios (ver figuras 47 y 48). Ellos ubicaron estos puntos tanto en zonas donde hubo daños estructurales como en aquellas donde los daños fueron menores.

El uso de microtemores (vibración ambiental) para estimar la respuesta de un sitio fue introducido en Japón en la década de los 50 (Kanai *et al.*, 1954). No obstante los cuestionamientos que se han hecho sobre su utilidad (Udwadia y Trifunac, 1973; Finn, 1991; Gutiérrez y Singh, 1992; Lachet y Bard, 1994), las mediciones de microtemores presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de un sitio, tanto por su sencillez de

---

operación y bajo costo como por la rapidez con que permite obtener resultados. Una de las técnicas para estimar el efecto de sitio usando registros de microtemores es la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (REHV), propuesta originalmente por Nakamura (1989).

Lermo *et al.* (2000) obtuvieron registros de vibración ambiental con un sismógrafo digital Sprengnether DR-100 acoplado a tres sismómetros marca Kinematics de 5 segundos de periodo natural. Retomando dichos registros, apliqué la técnica REHV para obtener las funciones de transferencia empíricas (FTE) de los 22 sitios indicados anteriormente. En la figura 49 muestro algunas de las FTE que calculé con el programa de cómputo DEGTRA (Ordaz y Montoya, 2002), para dos direcciones horizontales de movimiento (NS y EW), correspondientes a los puntos P15, P16 y P17; podemos ver semejanzas entre estas dos componentes horizontales para cada uno de estos sitios, así como máximos espectrales alrededor de los 6 Hz (P15), 10 Hz (P16) y 6 Hz (P17).

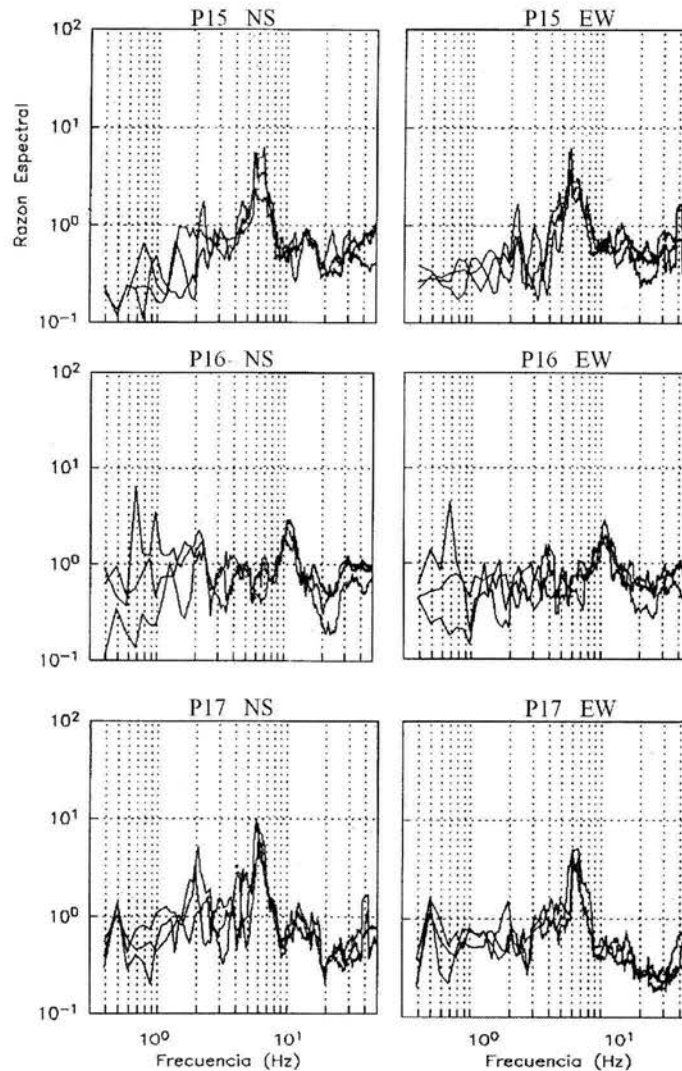


Figura 49. Funciones de transferencia empíricas para las componentes horizontales NS y EW, correspondientes a los sitios P15, P16 y P17.

### III.2.4 Resultados

A partir de estas funciones de transferencia empírica, calculé una REHV promedio por cada pareja de componentes horizontales NS y EW. De esta manera, con cada REHV promedio, determiné tanto el periodo dominante ( $T_0$ ) como la amplificación relativa ( $A_r$ ) del suelo, para cada uno de los 22 sitios de medición considerados en el estudio previo de Lermo *et al.* (2000). En la tabla 17 presento estas parejas de valores.

Tabla 17. Periodos dominantes y amplificaciones relativas en los puntos de medición de Lermo *et al.* (2000).

Sitio	Ubicación	$T_0$ [seg]	$A_r$ [veces]
1	Hotel Romano sobre Av. Reforma	0.11	3
2	Av. Emiliano Zapata - Av. Ricardo Reyes	0.14	5
3	Av. Ricardo Reyes - Av. Xicoténcatl	0.05	1
4	Av. Juárez - Gómez Farias	0.15	3
5	Av. Juárez - S. Degollado	0.18	3
6	Av. Juárez - B. Juárez	0.13	4
7	Av. Juárez - Rutilio Chávez	0.16	2
8	Av. Hidalgo - Av. Morelos	0.18	2
9	Av. Morelos - Ignacio Zaragoza	0.08	2
10	Av. Libertad - 5 de mayo	0.09	2
11	Av. Libertad - 16 de septiembre	0.12	2
12	Av. Libertad entre Temazcal y P. Suárez	0.18	4
13	Av. Guadalupe - Av. Libertad	0.11	3
14	Av. Matamoros - Av. Hidalgo	0.18	2
15	Av. Hidalgo - B. de Temascal	0.16	3
16	Av. Matamoros - V. Guerrero	0.10	2
17	Av. Guadalupe - Hidalgo y V. Guerrero	0.17	5
18	Av. Josefa Ortiz de D. - Av. Hidalgo	0.19	5
19	Av. Josefa Ortiz de D. - B. del Terrero	0.10	3
20	Epigmenio M. - Independencia	0.15	2
21	Ignacio Ramírez - B. Juárez	0.23	3
22	Independencia (100 m antes del río)	0.30	1

A partir de estos valores, elaboré los siguientes mapas:

- Un mapa de curvas de isoperiodo. En este caso, interpolé linealmente entre dos valores de periodo dominante para calcular valores intermedios. De esta manera, utilizando los 22 datos de  $T_0$ , determiné curvas de igual periodo dominante (curvas de isoperiodo) para valores de 0.10, 0.15 y 0.20 segundos.
- Un mapa de curvas de isoamplificación relativa. Análogamente al anterior, en este caso utilicé los 22 datos de  $A_r$  para determinar curvas de igual amplificación relativa para valores de 2, 3 y 4 veces.



El mapa de la figura 50 corresponde al de curvas de isoperiodo para la ciudad de Acatlán, en el cual podemos distinguir tres zonas de periodo dominante del suelo: de 0.10 a 0.15, de 0.15 a 0.20, y de 0.20 a 0.30 segundos. Esta última zona, que muestra una variación de 0.2 a 0.3 segundos aproximadamente, se localiza al centro de la ciudad (entre las avenidas Josefa Ortiz de Domínguez e Hidalgo) y probablemente nos indica una zona donde es mayor el espesor de los suelos sedimentarios.

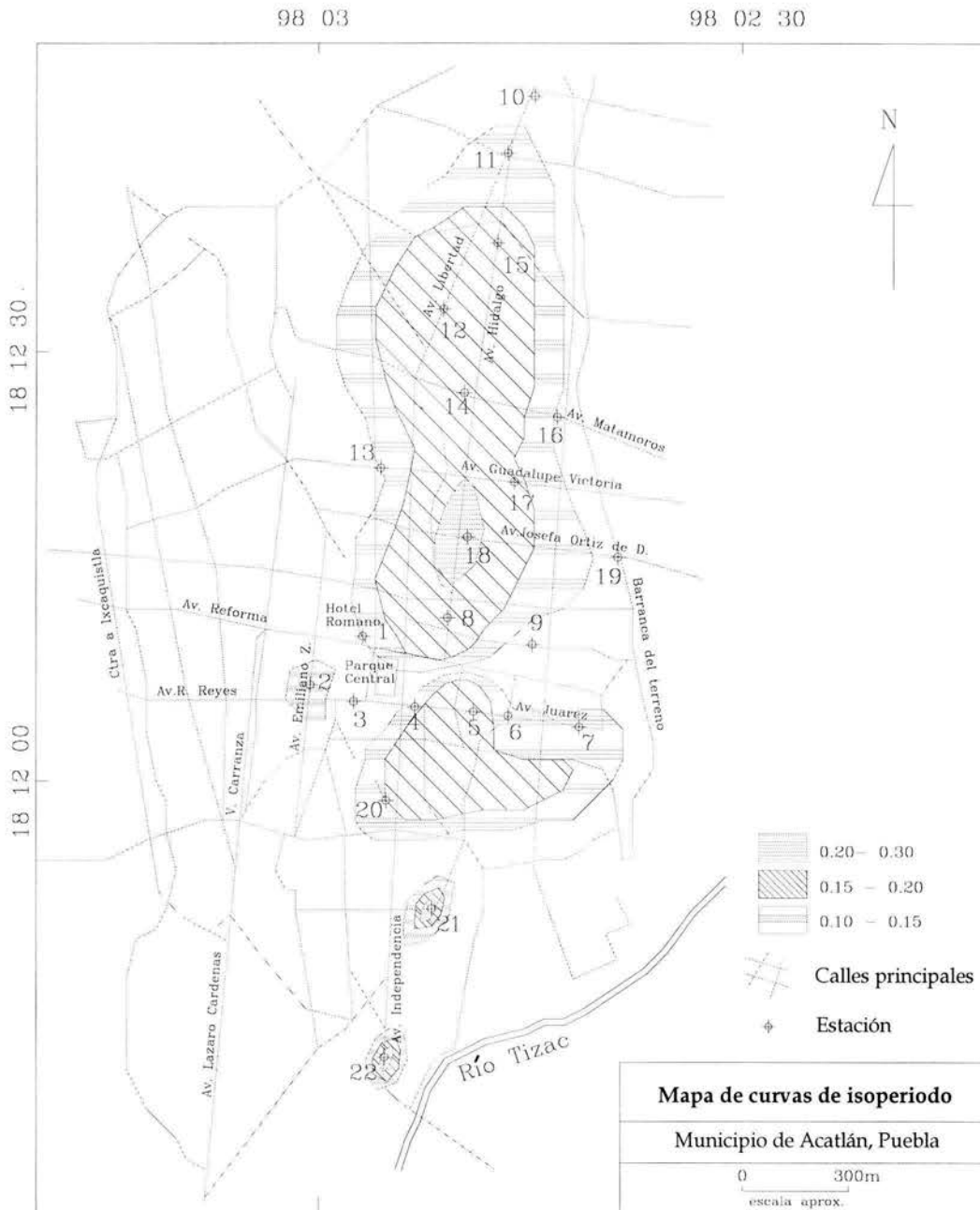


Figura 50. Mapa con zonas de igual periodo dominante del suelo para la ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla.

Aun cuando los valores de amplificación relativa ( $A_r$ ) estimados a partir de registros de microtemores presentan una menor confiabilidad que sus respectivos valores de periodo dominante (Bard *et al.*, 1997), esta información permite diferenciar los sitios que presentan una amplificación considerable cuando son dinámicamente excitados por sismos moderados o grandes. El mapa de la figura 51 corresponde al de curvas de isoamplificación relativa para la ciudad de Acatlán, en el cual podemos observar una configuración parecida a la anterior: la primera zona ( $T_0$ : 0.10–0.15 s) presenta valores de  $A_r$  de 2 a 3 veces; la segunda zona ( $T_0$ : 0.15–0.20 s), de 3 a 4 veces; y la tercera zona ( $T_0$ : 0.20–0.30 s), valores mayores de 4 veces.

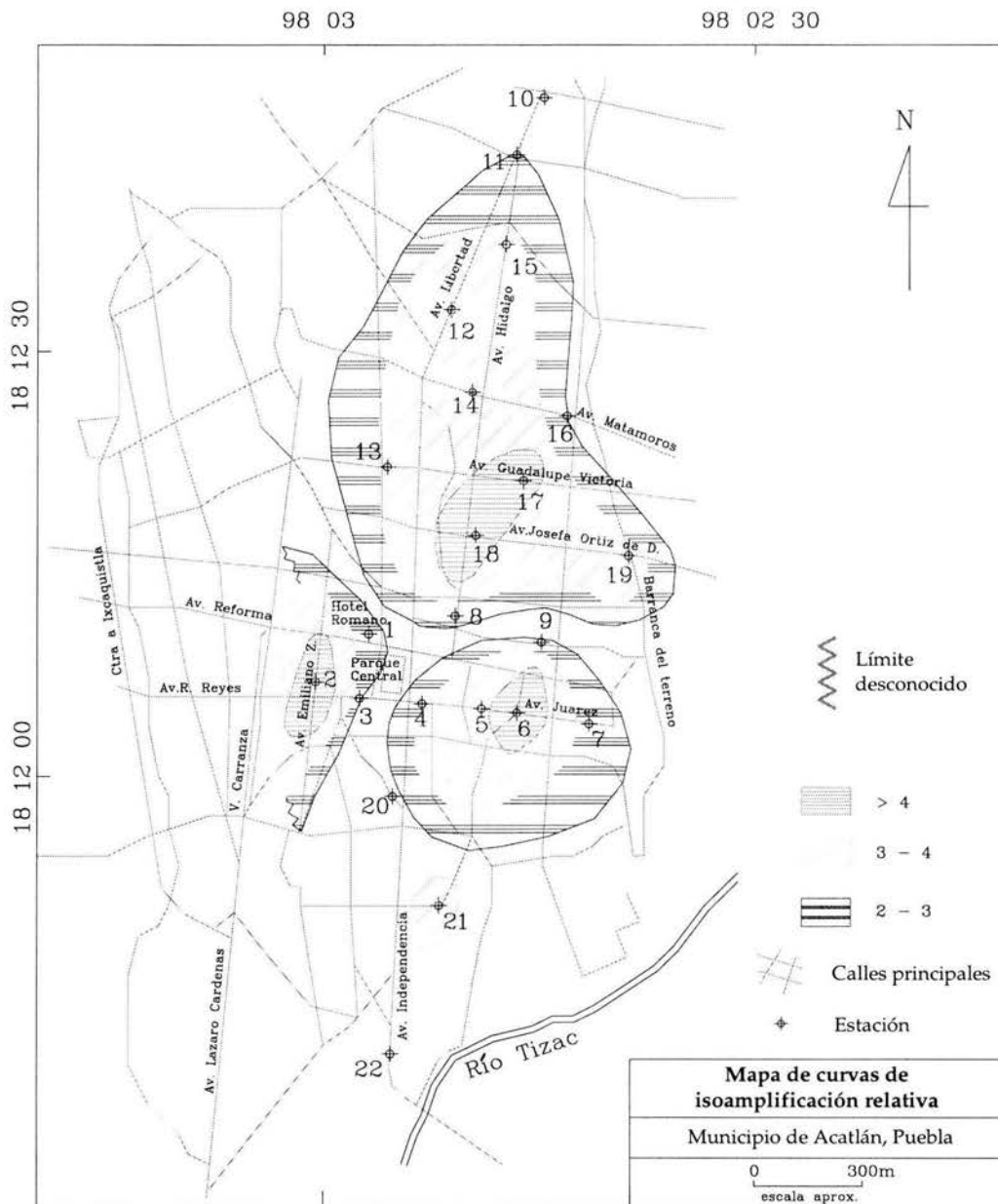


Figura 51. Mapa con zonas de igual amplificación relativa del suelo para la ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla.

Para determinar el efecto de las condiciones locales en los movimientos sísmicos esperados en un sitio específico, contamos además con modelos analíticos que idealizan la estratigrafía superficial como un medio continuo o discreto. El modelo que comúnmente se utiliza para tomar en cuenta el efecto de las condiciones locales en un sitio de interés es el de Propagación Unidimensional de Ondas. Las hipótesis más relevantes de dicho modelo (Chávez *et al.*, 1987) son las siguientes:

- La estratigrafía del sitio está formada por capas horizontales de espesor finito –con propiedades dinámicas diferentes– y longitud infinita, que se apoyan sobre una base rígida elástica.
- Las ondas sísmicas que llegan a la superficie de la estratigrafía consisten en ondas S (ondas de cortante) que se propagan en dirección vertical y que producen un movimiento horizontal de las partículas de suelo de la estratigrafía.
- El comportamiento no lineal de los suelos de las estratigrafías debido al paso de las ondas sísmicas se incluye mediante un criterio de linealización equivalente.
- El amortiguamiento del suelo se debe a la radiación, así como a la histéresis de los materiales.
- La excitación sísmica se aplica en la base rígida (formación rocosa basal), y se representa por acelerogramas registrados en roca o en suelo firme durante temblores con magnitudes y distancias fuente-sitio de interés.
- El análisis de la respuesta se efectúa en el dominio de la frecuencia y con él se obtiene el espectro de respuesta esperado en la superficie de la estratigrafía.

Para estimar los espectros de respuesta de las estratigrafías del sitio de interés con el modelo teórico de propagación unidimensional de ondas, se requiere conocer los siguientes datos (Trueba, 1991) para cada estrato:

- *espesor*,  $h$ .
- *densidad de masa*,  $\rho$ . El peso volumétrico ( $\gamma = \rho g$ ) del suelo deberá ser determinado en laboratorio en aquellos casos en que la extracción de muestras sea posible; de lo contrario,  $\gamma$  puede ser estimado con valores típicos según los suelos que conforman la estratigrafía en el sitio.
- *velocidad de las ondas S* a través del estrato,  $\beta$ . Los métodos geofísicos de prospección sísmica permiten considerar aproximadamente la influencia de las condiciones geométricas y mecánicas de frontera sobre las propiedades del suelo, en comparación con los métodos de laboratorio realizados sobre un volumen extremadamente pequeño de material y donde se simplifican de manera relativamente importante las condiciones de frontera mecánicas (Trueba, 1991). Los métodos que pueden ser utilizados son los siguientes: pozos cruzados (cross-hole), sonda inferior (down-hole), sonda superior (up-hole) y sonda suspendida (suspended logging); aunque en el presente trabajo no es necesaria una descripción detallada de estos métodos, cabe resaltar que los tres primeros tienen la ventaja de que la velocidad de propagación medida corresponde al volumen global de material, mientras que el método de la sonda suspendida tiene solamente una penetración horizontal limitada.

También existen técnicas experimentales de laboratorio que pueden utilizarse para determinar el valor de  $\beta$  dentro de ciertos rangos de deformación (ver figura 52).

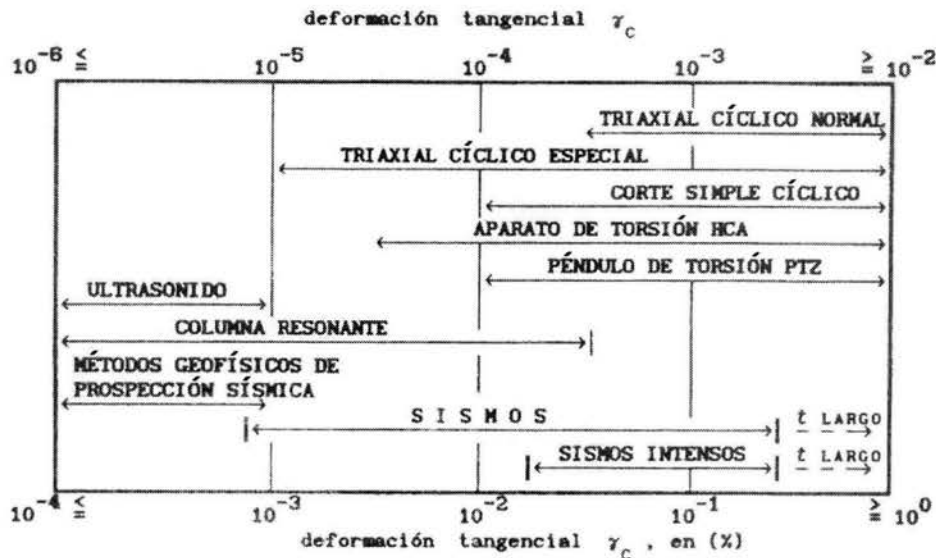


Figura 52. Relación entre los rangos de deformación posibles con diferentes aparatos y el nivel de deformación que pueden inducir los sismos (modificado de Trueba, 1991).

- *amortiguamiento*,  $\xi$ . El amortiguamiento no es una variable físicamente accesible. Para el rango de frecuencias entre 0.1 Hz y 20 Hz, el amortiguamiento interno no se ve influenciado por la frecuencia de la excitación, por lo cual se le asocia exclusivamente con un proceso de disipación de energía. Tradicionalmente, se le relaciona con el área bajo la curva del ciclo esfuerzo-deformación o con el decremento logarítmico (Avilés y Trueba, 1991).

Ahora bien, para verificar si los periodos dominantes de la ciudad de Acatlán están relacionados con la presencia de estratos de suelos sedimentarios con diferentes espesores, consideré un modelo unidimensional de propagación de ondas y utilicé el método de Haskell (Haskell, 1964) para calcular la respuesta teórica en superficie. En la tabla 18 muestro una estratigrafía teórica propuesta para el sitio P18. Los valores de  $\rho$  y  $\beta$  fueron estimados a partir de valores típicos publicados por Bollinger (1980); los valores de  $\xi$  fueron estimados a partir de valores típicos publicados por Trueba (1991); los valores de  $h$  son propuestos.

Tabla 18. Perfil cortical propuesto para el sitio P18.

Capa	$h$ [ m ]	$\rho$ [ ton/m <sup>3</sup> ]	$\beta$ [ m/s ]	$\xi$ [ 1 ]
1	10	1.1	230	0.02
2	80	1.3	700	0.02
Roca basal	$\infty$	2.3	1080	0.01

A partir de estos datos, calculé una función de transferencia teórica para el sitio P18. En la figura 53, comparo esta función de transferencia teórica (FTT) con la correspondiente función de transferencia empírica (FTE) para el mismo sitio.

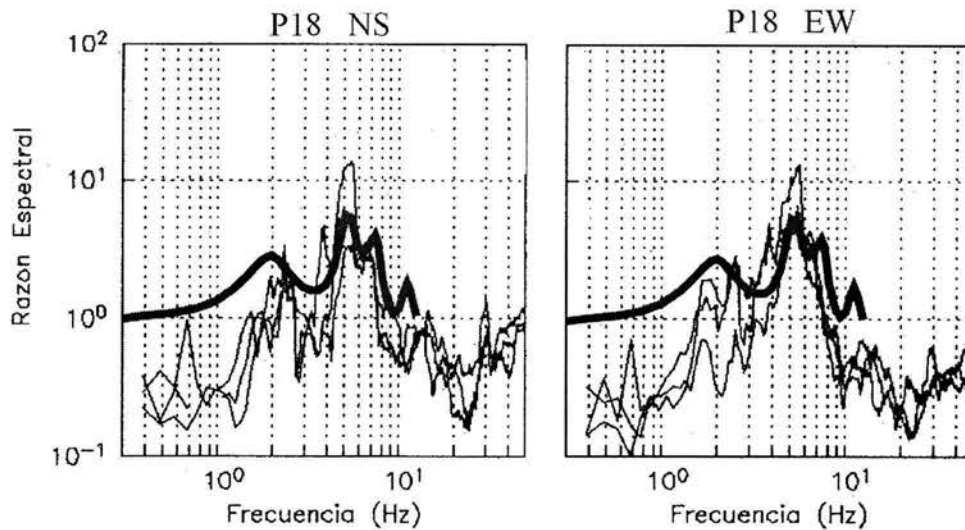


Figura 53. Funciones de transferencia en el sitio P18 para las componentes horizontales NS y EW. Líneas continuas delgadas, funciones de transferencia empíricas REHV; línea continua gruesa, función de transferencia teórica (modelo unidimensional) calculada con el método de Haskell.

Podemos observar que, para una frecuencia entre 5 Hz y 6 Hz, la máxima amplificación relativa calculada con la función de transferencia teórica (FTT) concuerda con la correspondiente a la función de transferencia empírica (FTE). De esta manera, verifiqué la presencia del efecto de sitio hacia altas frecuencias con un modelo unidimensional de propagación de ondas.

### III.3 Tehuacán, Puebla

#### III.3.1 Aspectos geológicos

Una primera estimación del efecto de sitio para la ciudad de Tehuacán, Puebla, fue realizada por Ramírez-Centeno *et al.* (1997) y Osorio-Carrera *et al.* (1997), quienes muestran un mapa geológico local (figura 54) y proponen un mapa de zonificación sísmica para la ciudad de Tehuacán (figura 55), respectivamente.

El mapa geológico muestra que este valle pertenece a la formación geológica "Tehuacán", la cual consiste en una capa de depósitos aluviales, cuya profundidad puede variar desde 0 hasta 15 metros; está constituida principalmente por limos, estratos de arena, grava y conglomerados con una considerable cantidad de finos. El nivel de aguas freáticas se encuentra aproximadamente a 7 metros de profundidad. Subyaciendo estos depósitos, se

encuentran horizontes de calizas con travertino de estructura cavernosa, cuyos espesores rebasan los 100 metros y están caracterizadas por su alta porosidad y por definir formaciones acuíferas.

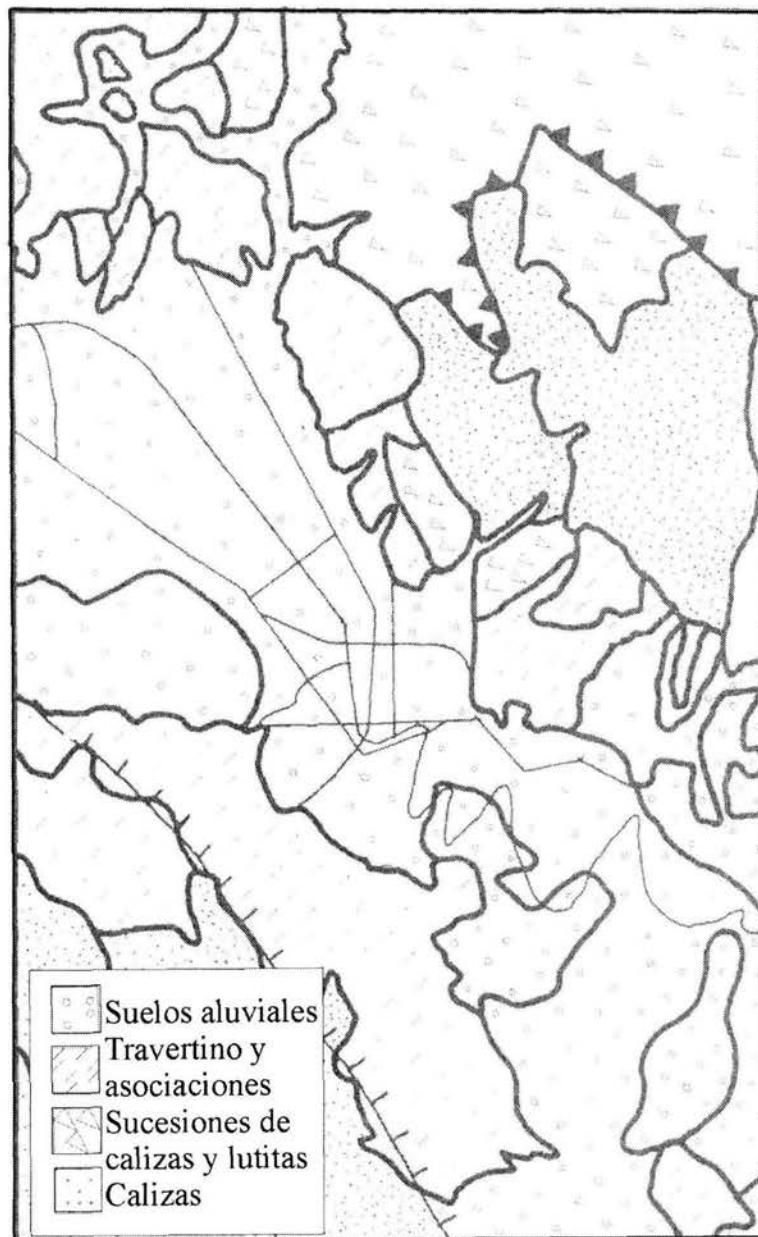


Figura 54. Mapa geológico de la ciudad de Tehuacán, Puebla (Ramírez *et al.*, 1997, modificado).

El mapa de zonificación sísmica distingue una zona de terreno firme (zona A) con periodos dominantes menores que 0.3 segundos, y otra de terreno intermedio (zona B) con periodos dominantes mayores de 0.3 segundos. El trabajo de Osorio-Carrera *et al.* (1997) fue desarrollado con base en estudios geotécnicos y en el análisis de registros de vibración ambiental en 48 sitios.

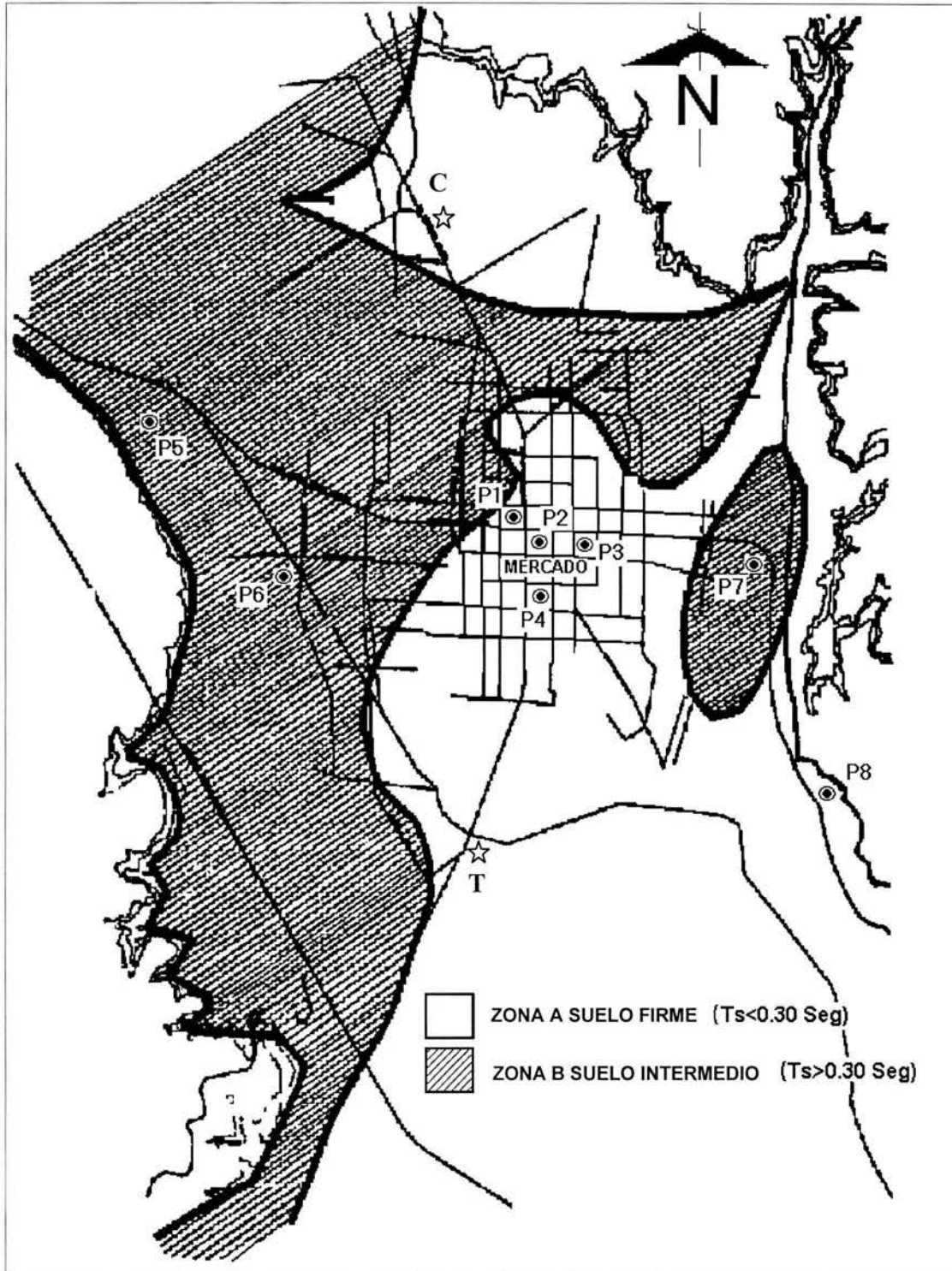


Figura 55. Mapa de zonificación sísmica de la ciudad de Tehuacán, Puebla (Osorio-Carrera *et al.*, 1997, modificado). Los puntos P1 al P8 representan los sitios de medición del estudio de Lermo *et al.*, 2000; los puntos C y T representan dos sitios de medición del estudio de Abeki *et al.*, 2001.

### III.3.2 Distribución de los daños

El mapa de la distribución de daños en la ciudad de Tehuacán, ocasionados por el sismo del 15 de junio de 1999, fue desarrollado por la Secretaría de Obras Públicas y Desarrollo Urbano del Municipio de Tehuacán, Puebla, quien ha marcado con tonalidades de gris las afectaciones por colonias. Así, en la figura 56 podemos observar que el centro de la ciudad y las colonias Nicolás Bravo, Aquiles Serdán, Guadalupe Hidalgo, Francisco Sarabia, Ignacio Zaragoza y Morelos, Flores Magón y Cuauhtémoc, Barrio de la Pedrera, La Purísima y Benito Juárez, y Emiliano Zapata y La Paz fueron las más afectadas por el sismo. En estos lugares, la mayoría de los daños se concentraron en casas y comercios de adobe, como podemos ver en las fotografías 5 y 6.

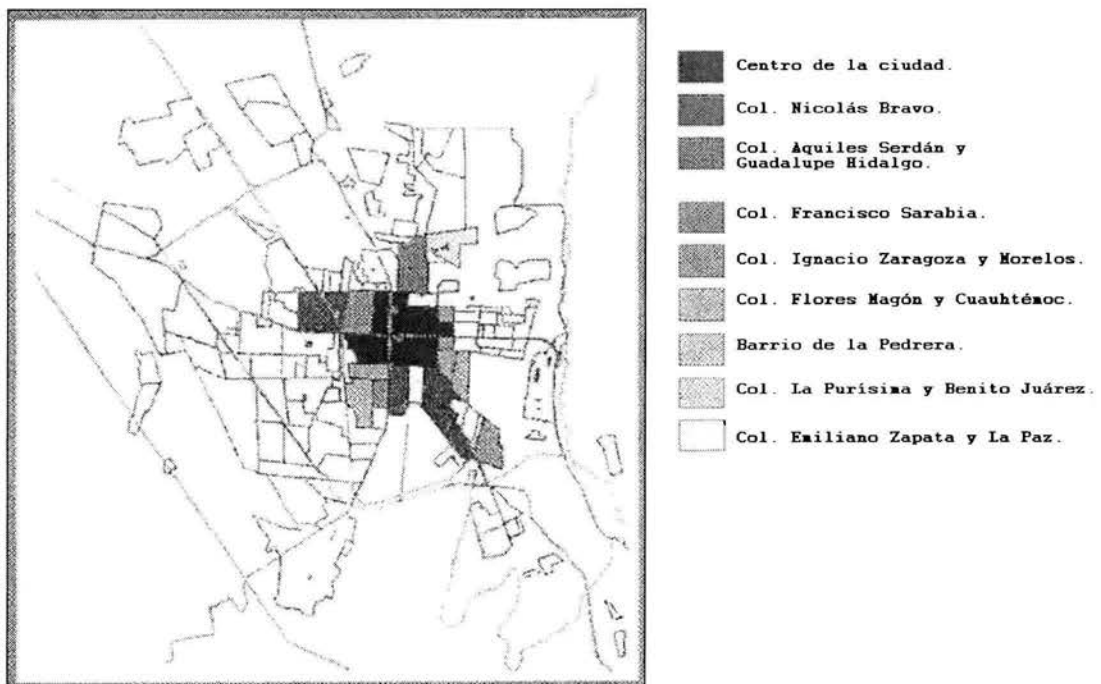
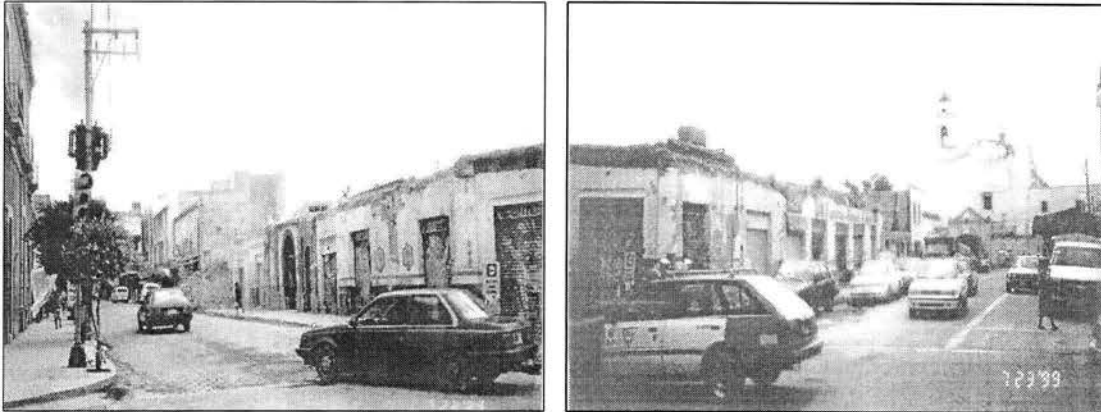


Figura 56. Distribución de los daños en la ciudad de Tehuacán, Puebla, desarrollada por la Secretaría de Obras Públicas y Desarrollo Urbano del Municipio de Tehuacán (tomada de Abeki *et al.*, 2001).

Las características estructurales de estas construcciones son muy parecidas a las que ya he descrito para las casas de adobe de la ciudad de Acatlán: edificaciones de un solo nivel y sin subdivisiones interiores, muros perimetrales de gran altura, y ausencia de elementos que puedan proporcionarles confinamiento y continuidad. En muchos casos, el sistema de techo consiste en un terrado, es decir, en un techo formado por vigas de madera sobre las cuales se colocan tablas de madera que, a su vez, soportan un relleno de tierra cuyo espesor es de 30 cm a 50 cm. Los daños que se observaron en este tipo de viviendas (fotografías 5, 6, 7 y 8), pudieron originarse por la falta de liga entre muros ortogonales, lo cual permite el agrietamiento y la disgregación del adobe en la parte superior de los muros, especialmente en las esquinas. Como consecuencia de la vibración de los muros, el sistema de techo fue



afectado y también mostró agrietamientos importantes. Aunque varias casas y comercios de adobe cuentan con recubrimiento de mortero en los muros, la intemperie y la falta de mantenimiento han producido un notable deterioro del mismo, propiciando el desgaste de los propios muros y en consecuencia el daño.



Fotografías 5 (izquierda) y 6 (derecha). Daños en viviendas de adobe, en el área del mercado del centro de la ciudad. Nótense los daños en los techos de estas viviendas (fotografías de Lermo *et al.*, 2000).



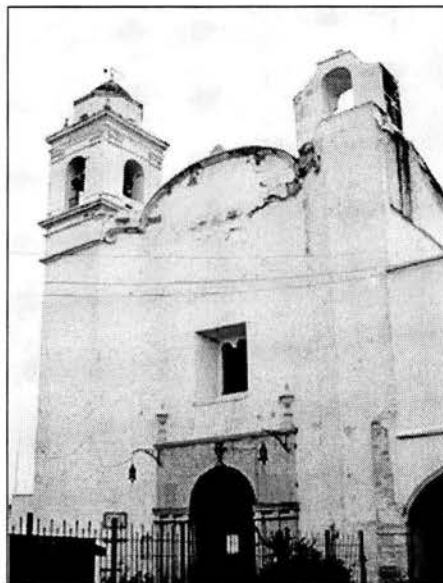
Fotografías 7 (izquierda) y 8 (derecha). Daños en el Hotel Madrid, ubicado en la esquina de las calles 1 Oriente (fotografía 7) y 3 Sur (fotografía 8). Nótense la caída parcial del segundo nivel (sobre la calle 1 Oriente) y el desprendimiento del acabado (sobre la calle 3 Sur) de la fachada principal (fotografías de Alcocer *et al.*, 2002).

Otros sectores dañados por el sismo del 15 de junio de 1999, fueron las construcciones históricas, como la Iglesia del Calvario (fotografía 9), la Iglesia de San Francisco (fotografía 10), la Iglesia del Carmen, la Catedral de Tehuacán (fotografías 11 y 12) y el ex Convento de la Inmaculada Concepción, edificadas entre los siglos XVI y XIX, cuyos muros y contrafuertes tienen aproximadamente un metro de espesor y están construidas de mampostería de piedra natural (sin refuerzo). Los daños observados en estas estructuras correspondieron a fuerzas sísmicas en la dirección transversal del cuerpo de la iglesia, es decir, generalmente en la dirección Norte-Sur. Fueron comunes los daños en el nivel superior de los campanarios,

agrietamiento entre las torres y los muros adyacentes, agrietamiento longitudinal en la parte inferior de los techos abovedados y de los arcos, y agrietamiento en el cúpula mayor de la iglesia (Ramírez *et al.*, 1999, y Alcocer *et al.*, 2002).



Fotografía 9. Daños en la Iglesia del Calvario, ubicada en la avenida 3 Sur. Nótense grietas en la fachada (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



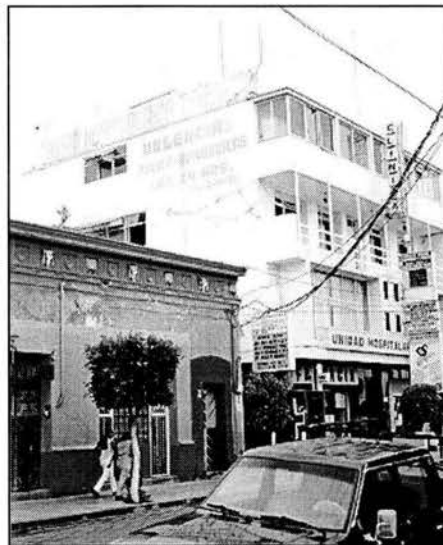
Fotografía 10. Daños en la Iglesia de San Francisco, ubicada en la calle 1 Oriente. Nótense agrietamientos en la parte inferior del cuerpo del campanario, y desprendimiento del acabado en la parte superior de la fachada (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



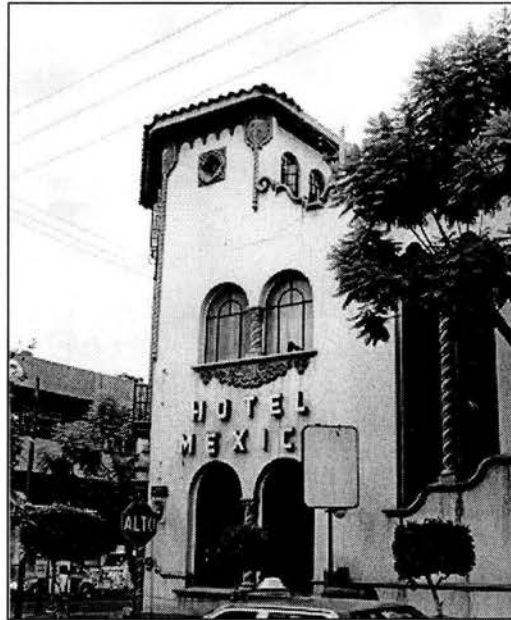
Fotografías 11 (izquierda) y 12 (derecha). Catedral de Tehuacán (fotografía 11), ubicada en la parte sur del Zócalo. Nótese los agrietamientos (fotografía 12) en la cúpula y en el lado poniente de los muros (fotografías de Alcocer *et al.*, 2002).

Los daños observados en estas edificaciones históricas se produjeron debido al grave deterioro que ya presentaban, ocasionado por la edad de las construcciones (cientos de años), el intemperismo y la falta de mantenimiento. Sin embargo, muchos de estos daños probablemente también se deban al efecto de sitio, el cual será tratado en el siguiente subtema.

Finalmente, respecto a las estructuras de dos o más niveles construidas con mampostería de ladrillo y elementos de concreto reforzado, se observaron daños en muros (Unidad Hospitalaria de Tehuacán), daños en los apéndices (Hotel México, Cine y Sanatorio Reforma, Edificio Reforma y Edificio Reforma 113) así como daños por golpeteo lateral (Cine y Sanatorio Reforma).



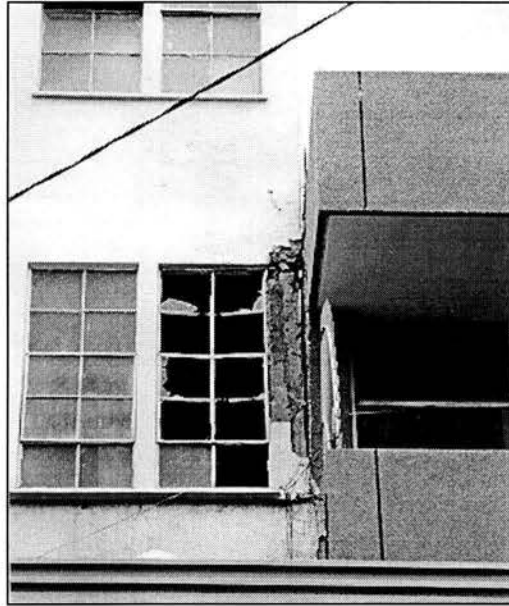
Fotografía 13. Unidad Hospitalaria de Tehuacán, ubicada en la calle de Reforma Norte. Nótese el agrietamiento en los muros del tercer entrespacio (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



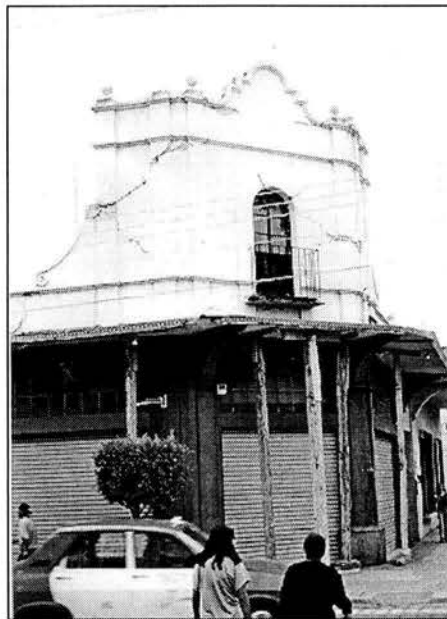
Fotografía 14. Hotel México, ubicado en la esquina de las calles Reforma e Independencia. Obsérvese grieta horizontal en el tercer entrepiso (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



Fotografía 15. Vista del Cine Reforma, ubicado en el centro de la ciudad. Obsérvese daños en el apéndice (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



Fotografía 16. Vista del Sanatorio Reforma, ubicado en el centro de la ciudad. Obsérvense daños en el tercer entrecapiso producidos por golpeteo con la estructura vecina (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



Fotografía 17. Edificio Reforma, ubicado en la esquina de las calles Reforma y 2 Oriente. Nótese los agrietamientos en el apéndice (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).



Fotografía 18. Edificio Reforma 113. Obsérvese grieta en los dos apéndices construidos sobre el segundo nivel (fotografía de Alcocer *et al.*, 2002).

### III.3.3 Evaluación del efecto de sitio

El método de análisis utilizado por Ramírez-Centeno *et al.* (1997) para estimar los periodos dominantes a partir de los registros de vibración ambiental, consistió en determinar la frecuencia máxima directamente de la densidad espectral de potencia. Sin embargo, con este método se presentan errores de interpretación, ya que en los espectros de amplitud de estos registros se observan varios máximos y no se puede distinguir con claridad el periodo dominante; además, no ofrecen una estimación preliminar de la amplificación relativa del suelo (Lermo y Chávez-García, 1994a, b).

Lermo *et al.* (2000) obtuvieron nuevos registros de vibración ambiental en ocho sitios de la zona urbana, cuya ubicación muestro en la figura 55 con círculos oscuros (puntos P1 al P8). Con el fin de verificar algunos resultados de Ramírez-Centeno *et al.* (1997), retomé los registros de microtremores de Lermo *et al.* (2000) para analizarlos; sin embargo, en este caso apliqué la técnica de Nakamura (REHV) para obtener las funciones de transferencia empíricas (FTE) de esos ocho sitios. La técnica de Nakamura ofrece una mejor evaluación del periodo dominante de un sitio y permite una estimación preliminar del nivel de amplificación, en comparación con la técnica de la densidad espectral de potencia (Lermo y Chávez-García, 1994a, b).

De esta manera, aun cuando sólo consideré ocho puntos para cuantificar el efecto de sitio en la ciudad de Tehuacán, Puebla, la interpretación es más adecuada en cuanto a la técnica de análisis aplicada y permite obtener resultados más confiables (Lachet y Bard, 1994) que los obtenidos por Ramírez-Centeno *et al.* (1997).

En la figuras 57 y 58 muestro algunas de las FTE que calculé con el programa DEGTRA (Ordaz y Montoya, 2002), para dos direcciones horizontales de movimiento (NS y EW), correspondientes a los puntos P1 al P8.

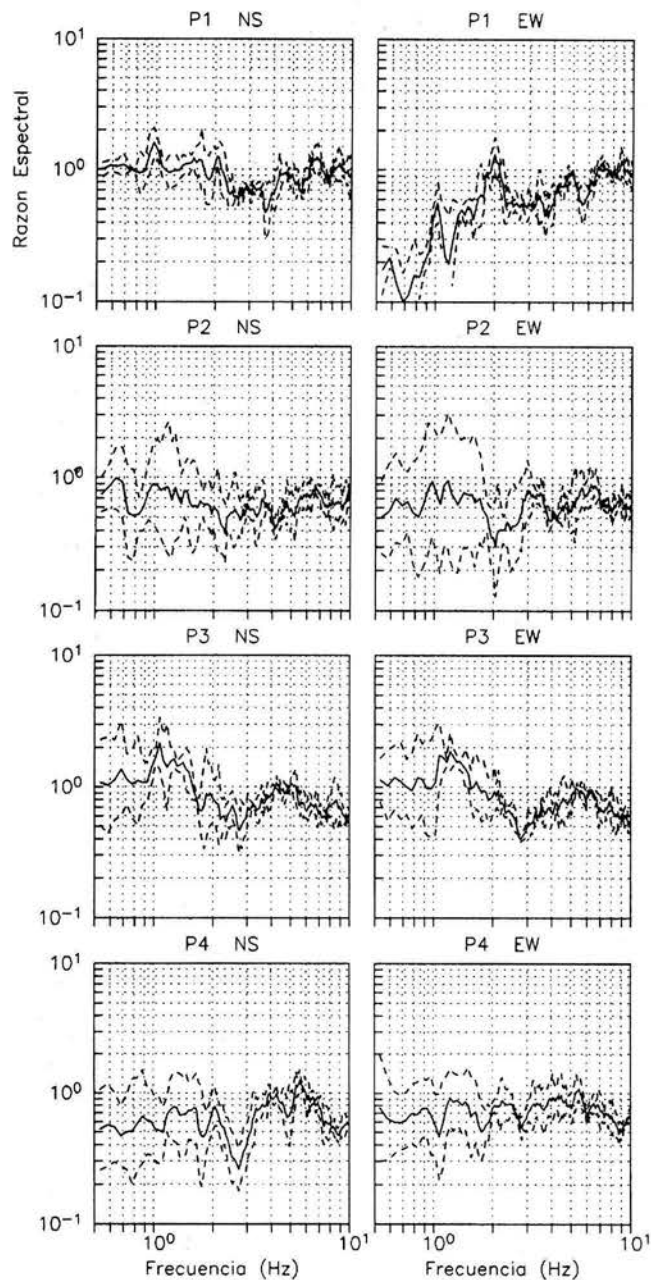


Figura 57. Funciones de transferencia empíricas para las componentes horizontales NS y EW calculadas para los primeros cuatro sitios. Línea continua, REHV promedio; líneas discontinuas, valores correspondientes a la media más o menos una desviación estándar.

En la figura anterior, podemos observar que las REHV para los sitios P1, P2, P3 y P4, no presentan un valor máximo espectral claramente definido en frecuencias mayores a 3 Hz. Además, para dicho rango de frecuencias mayores a 3 Hz (periodos menores a 0.33 segundos), la amplificación relativa es aproximadamente igual a la unidad; en otras palabras, para periodos menores a 0.33 segundos la amplificación del movimiento sísmico en estos sitios es prácticamente nula. Sin embargo, en el sitio P3 observamos un máximo espectral (con valor de 2 veces de amplificación relativa) para frecuencias cercanas a 1 Hz.

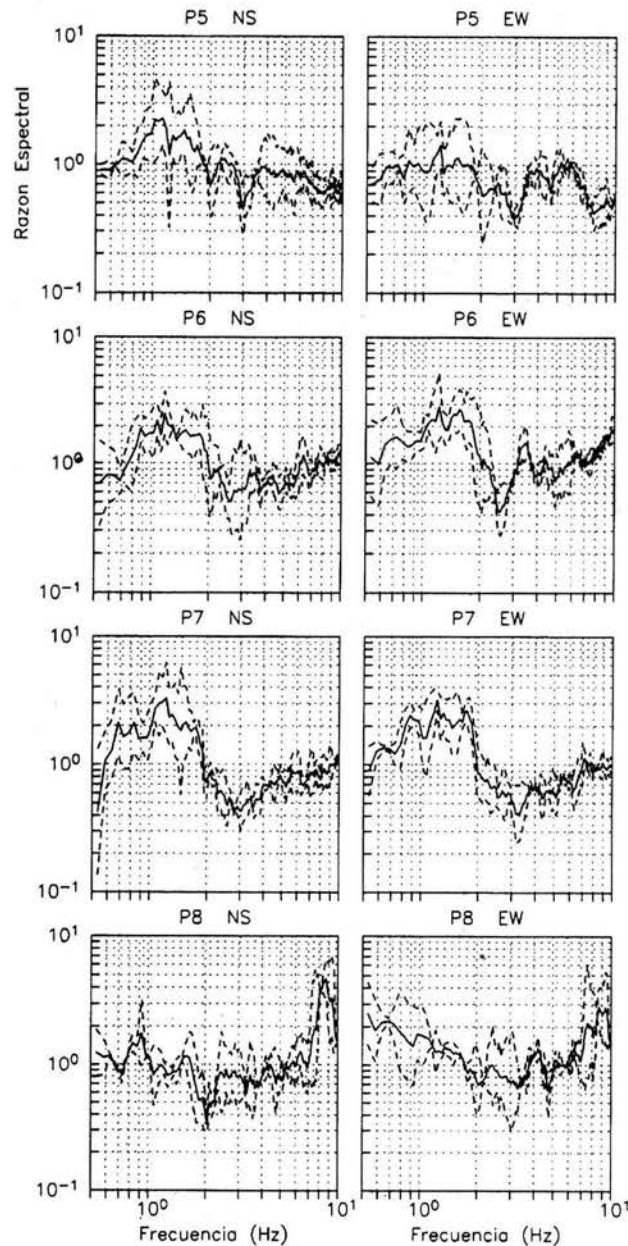


Figura 58. Funciones de transferencia empíricas para las componentes horizontales NS y EW calculadas para los cuatro últimos sitios. Línea continua, REHV promediado; líneas discontinuas, valores correspondientes a la media más o menos una desviación estándar.



En la figura anterior, podemos observar que los puntos P5, P6 y P7 presentan un máximo espectral entre frecuencias de 1 y 2 Hz (entre periodos de 0.5 y 1.0 segundos), con valores de amplificación relativa de hasta 3 veces. Sin embargo, el punto P8 es el único (de los ocho analizados) que sí presenta un máximo espectral en frecuencias mayores a 3 Hz; para este caso, el máximo se encuentra alrededor de 8.5 Hz (0.12 segundos), con una amplificación relativa promedio de 3 veces; probablemente, en la zona cercana al punto P8 se encuentran depósitos de suelos blandos de poca profundidad transportados por el río, el cual sigue su cauce muy cerca de dicho punto.

El hecho de que siete de los ocho sitios analizados no presenten un máximo espectral en frecuencias mayores a 3 Hz (periodos menores a 0.33 segundos), podemos concluir que estos suelos no afectaron a las casas y comercios de adobe de uno o dos pisos dañados en Tehuacán por el sismo del 15 de junio de 1999 (Oscar Hernández *et al.*, 1981). Por el contrario, los máximos espectrales entre 1 y 2 Hz (entre 0.5 y 1.0 segundos), observados en la mayoría de estos sitios, sí pudieron afectar a las estructuras históricas y a los edificios con más de 3 niveles (en especial a estructuras que mostraron daños en los apéndices). En cuanto a las estructuras históricas, Ovando *et al.* (2001) realizaron mediciones de vibración ambiental en el templo jesuita "La Compañía" (construido en el siglo XVIII), ubicado en la ciudad de Puebla, y encontraron periodos dominantes alrededor de 0.5 segundos para las torres principales de este templo. Los edificios entre 3 y 6 niveles también pueden tener periodos dominantes cercanos a 0.5 segundos (González, 1989).

Recientemente, Abeki *et al.* (2001) realizaron mediciones de vibración ambiental en 55 sitios dentro de la zona urbana de la ciudad de Tehuacán, y obtuvieron valores de periodo dominante del suelo semejantes a los obtenidos en el presente trabajo. En la figura 55 aparecen (marcados con estrellas) dos sitios reportados en el trabajo de Abeki *et al.* (2001): el Hotel Casa Cantarranas (punto C) y el Instituto Tecnológico de Tehuacán (punto T). Podemos ver que ambos puntos se localizan en la zona de terreno firme (zona A), para la cual Osorio-Carrera *et al.* (1997) proponen que los periodos dominantes del suelo son menores de 0.3 segundos. En la figura 59, muestro las funciones de transferencia empírica REHV que Abeki *et al.* (2001) calcularon para los sitios C y T; de acuerdo con estas gráficas, los periodos dominantes del suelo tienen valores entre 0.7 y 0.8 segundos, respectivamente.

Análogamente al procedimiento descrito para calcular la función de transferencia teórica en el caso de la ciudad de Acatlán, ahora calculé la respuesta teórica para el sitio T (Instituto Tecnológico de Tehuacán). En la tabla 19 muestro una estratigrafía teórica propuesta para este sitio. Los valores de  $\rho$  fueron estimados a partir de valores típicos publicados por Bollinger (1980); los valores de  $\beta$  son parte de los resultados de estudios de refracción sísmica somera realizados por Abeki *et al.* (2003) en la zona urbana de Tehuacán; los valores de  $\xi$  fueron estimados a partir de valores típicos publicados por Trueba (1991); los valores de  $h$  son propuestos.

En la figura 59 comparo la función de transferencia teórica (FTT) con las funciones de transferencia empírica (FTE) de Abeki *et al.* (2001). Podemos observar que, para periodos cercanos a 0.7 segundos, la máxima amplificación relativa calculada en el presente trabajo (con un modelo teórico) es parecida a las máximas amplificaciones relativas de las REHV de Abeki *et al.* (2001).

---

Tabla 19. Perfil cortical propuesto para el sitio T.

Capa	h [ m ]	$\rho$ [ ton/m <sup>3</sup> ]	$\beta$ [ m/s ]	$\xi$ [ 1 ]
1	2	1.1	480	0.02
2	115	1.2	600	0.02
3	350	1.9	1100	0.02
Roca basal	$\infty$	2.3	1250	0.01

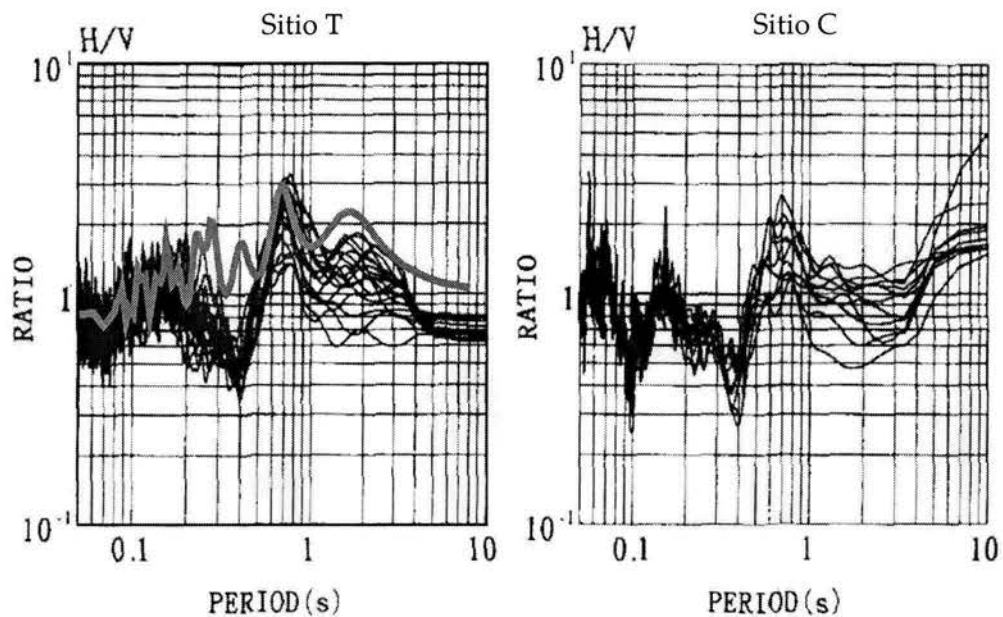


Figura 59. Funciones de transferencia correspondientes al sitio T (izquierda) y al sitio C (derecha). Líneas continuas delgadas, funciones de transferencia empíricas REHV calculadas por Abeki *et al.* (2001); línea continua gruesa, función de transferencia teórica (modelo unidimensional de propagación de ondas) calculada en el presente trabajo para el sitio T.

Con toda esta información, comprobé que en la zona sísmica A, definida por Osorio-Carrera *et al.* (1997) como zona de terreno firme con  $T_s < 0.3$  segundos, existen periodos dominantes de vibración del suelo con valores mayores a 0.3 segundos.

### III.3.4 Resultados

Las funciones de transferencia empíricas (REHV) obtenidas por Lermo *et al.* (2000) y por Abeki *et al.* (2001) para la ciudad de Tehuacán, muestran que el mapa de microzonificación sísmica propuesto por Osorio-Carrera *et al.* (1997) debe ser corregido en cuanto a la técnica de análisis que aplicaron para interpretar los registros de microtremores.

### III.4 Comparación

La mayoría de los sitios analizados para la ciudad de Acatlán presentan amplificaciones relativas entre 2 y 4 veces. La presencia de suelos sedimentarios en la mayor parte de la ciudad, depositados sobre rocas metamórficas, hace de la ciudad una zona donde influye significativamente el efecto de sitio durante movimientos sísmicos.

Siete de los ocho sitios analizados para la ciudad de Tehuacán no presentan un máximo espectral en frecuencias mayores a 3 Hz (periodos menores a 0.33 segundos); por esta razón, podemos asumir que el efecto de sitio no fue un factor significativo en los daños que presentaron las casas y comercios de adobe, de uno o dos niveles, durante el sismo del 15 de junio de 1999; los daños en estas estructuras se debieron, principalmente, a sus deficiencias estructurales y al deterioro de los materiales de construcción. Por el contrario, los máximos espectrales entre 1 y 2 Hz (entre 0.5 y 1.0 segundos), observados en la mayoría de estos sitios, sí pudieron afectar a las estructuras históricas y a los edificios de 3 o más de niveles.

En la ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla, los daños observados en las casas de adobe y mampostería simple edificadas en la zona de terreno blando, se produjeron principalmente por la influencia de los siguientes factores: las deficiencias estructurales en las viviendas, el deterioro de los materiales de construcción, y el efecto de sitio que se manifestó notablemente en dicha zona.

En la ciudad de Tehuacán, Puebla, los daños observados en casas y comercios de adobe, se produjeron principalmente por el deterioro que ya presentaban, ocasionado por la edad de las construcciones, el intemperismo y la falta de mantenimiento. Sin embargo, los máximos espectrales entre 0.5 y 1.0 segundos (observados en la mayoría de los sitios) probablemente sí afectaron a las estructuras históricas y a los edificios con más de 3 niveles.

## CAPÍTULO IV CONCLUSIONES

A partir de los resultados que obtuve en las dos partes del proceso de investigación, mencionadas al principio, propongo las siguientes conclusiones generales:

- ❖ Casi la mitad (aproximadamente un 47%) de las zonas urbanas ubicadas en los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, se localizan en la zona de mayor sismicidad del país (zona D).
- ❖ Los estudios de efectos de sitio son escasos para las ciudades de la zona D con más de 50 mil habitantes, pues alrededor de un 36% de estas son las que cuentan con al menos un estudio de ese tipo.
- ❖ El tipo de información que más se utiliza en los estudios es el de geología local, sismicidad y topografía.
- ❖ Una tercera parte (aproximadamente el 33%) de los estudios realizados para la zona D, sólo usaron registros de *microtremores* para estimar el efecto de sitio, y compararon sus resultados con los que obtuvieron a partir de *sondeos geotécnicos*.
- ❖ Alrededor de una quinta parte (aproximadamente un 19%) de los estudios realizados para la zona D, aplicaron sólo *Espectro de Potencia de Fourier* y compararon sus resultados con los que obtuvieron a partir de un *modelo unidimensional de propagación de ondas*.
- ❖ La mayor parte de los estudios de efecto de sitio están enfocados, principalmente, en obtener valores de *periodo dominante del suelo* y en presentar un *mapa de microzonificación* para la zona urbana estudiada.
- ❖ En la ciudad de Acatlán de Osorio, Puebla, los daños observados en las casas de adobe y mampostería simple edificadas en la zona de terreno blando, se produjeron principalmente por la influencia de los siguientes factores: las deficiencias estructurales en las viviendas, el deterioro de los materiales de construcción, y los efectos de sitio que se manifestaron notablemente en dicha zona.
- ❖ En la ciudad de Tehuacán, Puebla, los daños observados en casas y comercios de adobe, se produjeron principalmente por el deterioro que ya presentaban, ocasionado por la edad de las construcciones, el intemperismo y la falta de mantenimiento. Sin embargo, los máximos espectrales entre 0.5 y 1.0 segundos (observados en la mayoría de los sitios) probablemente sí afectaron a las estructuras históricas y a los edificios con más de 3 niveles.

- ❖ El efecto de sitio estimado directamente del Espectro de Potencia de Fourier, usando registros de microtemores, puede presentar problemas de interpretación.
- ❖ La técnica de Nakamura (*REHV* aplicada a *microtemores*) ofrece una estimación preliminar de la frecuencia dominante de un sitio, pero no de la amplificación relativa.
- ❖ Los resultados que diferentes investigadores e instituciones han obtenido para la Ciudad de México, sobre la evaluación del efecto de sitio, nos muestran que un mapa de curvas de isoperiodo se completa y se detalla con acciones como aumentar la cantidad de sitios estudiados, obtener datos y registros de distintos tipos (geotécnicos, geofísicos, de vibración ambiental, de sismos), así como elegir y aplicar las técnicas de análisis más adecuadas según el tipo de información disponible; de esta manera, cada estudio puede ser retomado para completar estudios posteriores y contribuir así a la realización de mapas de microzonificación sísmica que puedan ser incluidos en Reglamentos de Construcción.
- ❖ Es recomendable un esfuerzo sistemático y coordinado entre autoridades (federales, estatales y municipales), profesionistas (geólogos, geofísicos, ingenieros, etc.), instituciones de educación e investigación, así como asociaciones y colegios de profesionistas, por medio del cual podamos identificar y evaluar las ciudades más pobladas en las zonas C y D de tal manera que sean estudiadas las más desfavorables mediante trabajos de investigación sobre efecto de sitio y microzonificación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Sobre los estudios revisados

Alcántara, L y E Andrade (1991), "Historia sísmica y amplificación relativa en Acapulco, Guerrero", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Alcántara, L, E Ovando, M Romo y D Almora (2000), "Algunos efectos de sitio observados en la ciudad de Oaxaca", *XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Alonso, G, R Cruz, F Santos, M Ramírez-Centeno, M Ruiz-Sandoval y J Iglesias (1997), "Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Arroyo, M, J Arzate, R Ríos, E Rojas, C Arnold, J Lermo, J L Urrutia y J Pacheco (1999a), "Zonificación de la ciudad de Celaya, Guanajuato, por tipos de suelo y periodos naturales de vibrar", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Arroyo, M, J M Bustillos, J Arzate, J Lermo, R Ríos, E Rojas, J L Urrutia y J Pacheco (1999b), "Zonificación de la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, por tipos de suelo y periodos naturales de vibrar", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Arroyo, M, R Ríos, J M Bustillos, J Lermo, J Arzate, E Rojas y O Frías (2001), "Zonificación sísmica de las ciudades de Santiago de Querétaro, Qro., Celaya, Gto., y Aguascalientes, Ags.", *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.

Chávez, M (1999), "Efectos de sitio en la Zona Metropolitana de Guadalajara", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Chávez-García, F J, J Cuenca, J Lermo, and H Mijares (1995), "Seismic microzonation of the City of Puebla, México", *Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Volume II, St. Louis, Missouri, USA, pp. 545-548.

Cruz, R, M Ramírez, J Rodríguez, A Albores, F Nájera, J García y F Rivero (1997), "Zonificación sísmica de la ciudad de Tapachula, Chiapas", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Gama, A, A Soto, M López, M Jara, M Ramírez, A Gómez-Bernal, H Juárez, J J Guerrero y J Iglesias (1993), "Zonificación sísmica de la ciudad de Chilpancingo", *X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco.

Gama, A y M Ramírez-Centeno (1999), "Zonificación sísmica de la ciudad de Ometepe, Guerrero", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Gómez, A y A Gama (2001), "Estudio de peligro sísmico en la región Ixtapa-Zihuatanejo", *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.

Gutiérrez, C y S K Singh (1991), "Efectos de sitio en Acapulco usando movimientos fuertes y microtremores", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Lermo, J (1997), *El Macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995*, Capítulo 3 "Microzonación", A Tena-Colunga (editor), publicado por la Universidad de Colima/Gobierno del Estado de Colima/SMIS, Colima, Col., México, pp. 45-84.

Lermo, J y F J Chávez-García (1994a), "Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13**, pp. 413-423

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*, **50**, pp. 1-13.

Lermo, J, F Chávez-García, J Urbieta y H Mijares (1991a), "Amplificación relativa en la zona urbana de Oaxaca - Contribución a la microzonificación sísmica", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Lermo, J, J Díaz de León, E Nava y M A Macías (1991b), "Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa del suelo en la zona urbana de Colima", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Lermo, J, G Torres, J Almanza, A Vargas, J Hernández y J Cruz (1995a), "Efectos de sitio en el puerto de Veracruz, México - microzonificación sísmica preliminar", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Lermo, J, J Cruz, J Hernández, A Vargas, J Almanza y G Torres (1995b), "Efectos de sitio en la ciudad de Jalapa, México - microzonificación sísmica preliminar", Instituto de Ingeniería, UNAM.

---

Lermo, J, J Nieto-Obregón y M Zermeño (1996), "Faults and fractures in the valley of Aguascalientes – preliminary microzonification", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Lermo, J, M Chávez y Y Yamazaki (1987a), "Características dinámicas de las estratigrafías superficiales de un predio localizado en Minatitlán, Veracruz, obtenidas con las técnicas de microtemblores y refracción sísmica", *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Querétaro, Qro.

Lermo, J, M Rodríguez y S K Singh (1987b), "Observaciones de microtemblores y su aplicación en la ingeniería sísmica", *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Querétaro, Qro.

Lermo, J, V H Garduño, E Arreygue-Rocha, I Isadre-Alcántara y G Rodríguez-Torres (1999), "Microzonificación sísmica preliminar de la ciudad de Morelia, Michoacán", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Mena, E, L Alcántara y M A Macías (1989), "Efectos locales observados en Acapulco, Guerrero, durante temblores fuertes", *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Guerrero.

Montalvo-Arrieta, J C, E Reinoso-Angulo y F J Sánchez-Sesma (2001), "Observations of strong ground motion at hill sites in México City from recent earthquakes", *Geofísica Internacional*, Vol. 41, No. 1

Osorio-Carrera, E, S García-Isidro, M Ramírez-Centeno, G López-Arciga y C Ruiz-Acevedo (1997), "Propuesta de zonificación sísmica para la ciudad de Tehuacán, Puebla", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Otero, J A, J Prince y A Reyes (1989), "Periodos del terreno en la Ciudad de México, derivados de varios sismos suaves", *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Guerrero.

Pérez, M, M Cruz, A Uribe y H Bravo (2000), "Curvas de isoperiodo para la ciudad de Oaxaca", Comisión Federal de Electricidad.

Ramírez, H, J L Carmona, M Flores, R Vera, J Galván, M Ramírez, M Ruiz-Sandoval, J Aguilar, A Fernández, J Carballo y J Iglesias (1993), "Zonificación sísmica de la ciudad de Toluca", *X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco.

Ramírez-Centeno, M, E Osorio, S García, J García, F Rivero y M Ruiz-Sandoval (1997a), "Curvas de isoperiodo para la ciudad de Tehuacán, Puebla", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Ramírez-Centeno, M, M Ruiz-Sandoval, H Félix, S Castellanos y J Iglesias (1997b), "Zonificación sísmica del municipio de Tlalnepantla, Estado de México", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

---



Ramírez-Centeno, M, R Martín, F Calvillo, O Suárez, A Ramos, G López, F Rivero y M Ruiz Sandoval (1997c), "Mapa de curvas de isoperiodo de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Ramírez-Centeno, M y R Martín (1999), "Zonificación sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Reinoso, E (1991), "Efectos sísmicos locales en el valle de México: amplificación en la zona lacustre", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Reinoso, E y J Lermo (1991), "Periodos del suelo del valle de México medidos en sismos y con vibración ambiental", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Reinoso, E y M Ordaz (1997), "Amplificación medida en el valle de México durante sismos recientes", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

Reinoso, E y M Ordaz (1999), "Spectral ratios for México City from free-field recordings", *Earthquake Spectra* 4, Volume 15, No 2.

Ruiz, C, J Juárez, M Ramírez, M Ruiz-Sandoval, J Aguilar, J Carballo, J J Guerrero, H Juárez y J Iglesias (1993), "Zonificación sísmica de la ciudad de Puebla", *X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco.

Vera, R, M Ramírez-Centeno, H Ramírez, M Ruiz-Sandoval, E Mendoza, J García, F Rivera y J Iglesias (1997), "Propuesta de zonificación sísmica de los municipios de Toluca, Lerma y Metepec, estado de México", *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Veracruz.

### Sobre otras fuentes consultadas

Abeki, N, K Masaki, I Balderas (2001), "Geological characteristics of surface layer estimated by microtremor observation in Tehuacan City, México", *The Journal of Technological Researches*, The College of Engineering, Kanto Gakuin University, **44**, 79-85.

Aguirre, J, J Lermo, H Mijares, M Ordaz, L Alcántara, D Almora, M A Macías, B Nájera, M Ortega, R Quaas, J Pacheco, S K Singh, G González Pomposo, E Reinoso (1999), "Reporte preliminar del Temblor de Tehuacán, Puebla, del 15 de junio de 1999 (M=6.7). Aspectos sismológicos y de movimientos fuertes", *Coordinación de Ingeniería Sismológica*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 8 pp.

---

Aki, K (1957), "Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **35**, pp. 415-456.

Alcocer, S, G Aguilar, L Flores, R Durán, O López-Bátiz, M Pacheco, C Uribe y M Mendoza (1999), "El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999", CENAPRED, México, D. F., 159 pp.

Avilés, J y V Trueba (1991), "Criterios de caracterización de sitio con fines de microzonificación sísmica: Manual de Diseño por Sismo de la CFE", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.

Bard, P Y, A M Duval, B Lebrun, C Lachet, J Riepl, and D Hatzfeld (1997), "Reliability of the H/V technique for site effects measurement: an experimental assessment", *Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Istanbul.

Bollinger, G A (1980), "Blast vibration analysis", Southern Illinois University Press, USA, 131 pp.

Borcherdt, R D (1970), "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **60**, pp. 29-61.

CENAPRED (2001), *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*, Secretaría de Gobernación, México.

Chávez, M, R Vega y G Jiménez (1987), "Espectros de respuesta de sitio correspondientes a temblores generados en fuentes sísmicas con diferentes características", *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Querétaro, Qro.

Figueroa, J (1986), "Isosistas de grandes temblores ocurridos en la República Mexicana", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 1-57.

Finn, W D L (1991), "Geotechnical engineering aspects of microzonation", *Fourth Conference on Seismic Zonation*, Stanford, California, I, pp. 199-259.

Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal (1993), *Reformas al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal con fecha de publicación del 2 de agosto de 1993*, México, Distrito Federal.

González, R (1989), "Cinemática del movimiento de edificios de la ciudad de México", *Tesis de Maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, 93 pp.

Gutiérrez, C (1999), "Mapa de intensidades sísmicas del evento 15 de junio de 1999, Mw=7.0, Tehuacán, Puebla", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán.

Gutiérrez, C and S K Singh (1992), "A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, pp. 42-63.

---

Gutiérrez, C, J Lermo, E Nava, S K Singh, R Coyoli, M Rodríguez y H Mijares (1989), "Registro de temblores pequeños y medición de microtremores en Acapulco para microzonificación de la ciudad", *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Guerrero.

Gutiérrez, C, K Masaki, J Lermo y J Cuenca (1996), "Relative amplification and dominant periods map for seismic motion in Colima city, Mexico", *11<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.

Haskell, N A (1964), "Radiation patterns of surface waves from point source in a multi-layered medium", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **54**, pp. 377-393.

Hays, W (1989), *Física de la tierra - movimientos fuertes del suelo y riesgo de terremotos*, Capítulo "Aspectos fundamentales de la geología y la sismología para la microzonación sísmica", Universidad Complutense de Madrid, España.

Hernández, O, R Meli, M Padilla y E Valencia (1981), "Refuerzo de la vivienda económica en zonas sísmicas. Estudios experimentales", *Serie del Instituto de Ingeniería, UNAM*, México, **441**, 86 pp.

INEGI (2001), *Tabulados Básicos Nacionales y por Entidad Federativa. Base de Datos y Tabulados de la Muestra Censal, XII Censo General de Población y Vivienda, 2000*, México.

Juárez, H, A Gómez, A Terán, E Sordo, E Arellano, M Corona, T Perea, D Hernández, G Rangel, G Arzate, H Ramírez y M Jara (1999), "Intensidades y daño asociados al sismo del 15 de junio de 1999", *Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia, Michoacán.

Kanai, K and T Tanaka (1954), "Measurement of the microtremor", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **32**, pp. 199-209.

Kanai, K, and T Tanaka (1961), "On microtremors. VIII", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **39**, pp. 97-114.

Kasawa, T (1996), "Estimation of velocity structures beneath Mexico City using microtremors array data", *11<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.

Kobayashi, H, K Seo and S Midorikawa (1986), "Report on seismic microzoning studies of the Mexico earthquake of september 19, 1985. Part 2. Estimated strong ground motions in the Mexico City due to the Michoacan, Mexico, earthquake of september 19, 1985 based on characteristics of microtremor", Instituto Tecnológico de Tokio, Japón.

Kuroiwa, J (2002), *Reducción de desastres - viviendo en armonía con la naturaleza*, Quebecor World, Perú S.A., Lima, Perú.

Lachet, C and P Y Bard (1994), "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", *J. Phys. Earth.*, **42**, pp. 377-397.

---

Lermo, J y F J Chávez-García (1993), "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, pp. 1574-1594.

Lermo, J y F J Chávez-García (1994a), "Are microtremors useful in site response evaluation?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, pp. 1350-1364.

Lermo, J and F J Chávez-García (1994b), "Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13**, pp. 413-423.

Lermo, J y A Hurtado (2000), "El temblor de Tehuacán del 15 de junio de 1999 (Mw=7.0). Efectos de sitio en las ciudades de Acatlán de Osorio, Puebla, y Tehuacán, Puebla", *Reporte Interno del Instituto de Ingeniería*, UNAM, México, 29 pp.

Muñoz, D (1989), *Física de la tierra – movimientos fuertes del suelo y riesgo de terremotos*, Capítulo "Conceptos básicos de riesgo sísmico", Universidad Complutense de Madrid, España.

Muriá, D, O Hernández y E Mena (1981), "Reporte de daños observados en la región epicentral del sismo de Huajuapán de León, octubre 24, de 1980", *Reporte Interno del Instituto de Ingeniería*, UNAM, Proyecto 0769, México, 33 pp.

Nakamura, Y (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface", *QR of RTRI*, **30**, pp. 25-33.

Ohtsuki, A y H Yamahara (1984), "Effect of topography and subsurface unhomogeneity on seismic SV waves and Rayleigh waves", *8th World Conference of Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA*.

Ordaz, M, y D Montoya (2002), Programa DEGTRA, versión 3.2.4., Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Ordaz, M, y S K Singh (1991), "¿Es la amplificación de las ondas sísmicas en la zona del lago del D. F. la única causa de los grandes movimientos del terreno durante temblores?", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Colima.

Ortega-Gutiérrez, F, M Elías-Herrera, M Reyes-Salas, C Macías-Romo y R López (1999), "Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections", *Geology*, **27**, pp. 719-722.

Ovando-Shelley, E, M Ordaz, S K Singh and J Lermo (2001), "Estimation of seismic hazard to rehabilitate the temple of La Compañía in Puebla, México", *International Congress "More than two thousand year in the history of architecture: Safeguarding the structures of our cultural heritage"*, UNESCO and ICOMOS, Israel.

Prince, J (1980), "Datos básicos del sismo del 24 de octubre de 1980 cerca de Huajuapán de León, Oaxaca", *Reporte Interno del Instituto de Ingeniería*, UNAM, Proyecto 0769, México, 88 pp.

---

Ramírez, J (Team Leader), S Pujol, J Miller, S Alcocer, G Aguilar, R Durán, R Quaas, M Ordaz, J Lermo, and S K Singh (1999), "The Tehuacán, México, Earthquake of June 15, 1999", *EERI Special Earthquake Report*, pp. 1-8.

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*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, Gto.

Rogers, A M, et al. (1984), "Geographic variation in ground shaking as a function of changes in near-surface properties and geologic structure near Los Angeles, California", *8th World Conference of Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA.

Rosenblueth, E (1953), *Teoría del diseño sísmico sobre mantos blandos*, Ediciones ICA, Serie B, No. 14, pp. 3-12.

Sánchez-Sesma, F J, S Chávez-Pérez, M Suárez, M A Bravo y L E Pérez-Rocha (1988), "On the seismic response of the valley of Mexico", *Earthquake Spectra* 4, 3, pp. 569-589.

Seed, H B and I M Idriss (1982), "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes", EERI, USA.

Singh, S K, E Mena y R Castro (1988a), "Some aspects of the source characteristics and the ground motion amplifications in and near Mexico City from the acceleration data of the September 19th, 1985, Michoacan, Mexico earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, pp. 451-477.

Singh, S K, J Lermo, T Domínguez, M ordaz, J M Espinoza, E Mena y R Quass (1988b), "A study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site (CU)", *Earthquake Spectra* 4, pp. 653-673.

Singh, S K, M Ordaz, J Pacheco, R Quaas, L Alcántara, S Alcocer, C Gutiérrez, R Meli, E Ovando and UNAM-CENAPRED Seismology Group (1999), "A preliminary report on the Tehuacán, México Earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0)", *Seism. Res. Lett.*, 70, pp. 489-504.

Trueba, V (1991), "Determinación de las propiedades mecánicas del subsuelo con fines de microzonificación sísmica", *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Colima.

Udwadia, F E and M D Trifunac (1973), "Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63, pp. 1227-1253.

Universidad Autónoma de Puebla (1999), *Anteproyecto de normas técnicas para diseño por sismo. Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla*, Puebla, México.