

FUNDACION



**PREDICCIÓN DE INTENSIDADES SÍSMICAS PARA EL ÁREA
METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.**

**Eduardo Pérez-Rocha, Luis Vieitez Utesa,
Fernando Flores Cruz y María Zárate Vázquez**

13

CUADERNOS FICA

M E X I C O

1996

FUNDACION



PREDICCIÓN DE INTENSIDADES SÍSMICAS PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.

**Eduardo Pérez-Rocha, Luis Vieitez Utesa,
Fernando Flores Cruz y María Zárate Vázquez**

13

CUADERNOS FICA

M E X I C O

1996



Derechos Reservados 1996
Fundación ICA, A.C.

Viaducto Río Becerra N° 27 - 2° piso
Colonia Nápoles
C.P. 03810 México, D.F.
Tel. 669 39 85, 272 99 91 ext. 4270 - 4271

ISBN 968-7508 14-0
Impreso en México

PRESENTACIÓN

La Fundación Javier Barros Sierra A. C. (FJBS), institución sin objetivos de lucro, de carácter científico y técnico, se constituyó en 1975 por iniciativa de un grupo de mexicanos visionarios preocupados por los futuros de mediano y largo plazo del país. Como semilla catalizadora, el Dr. Emilio Rosenblueth donó el premio Elizondo de Tecnología que recibiera poco antes.

La FJBS se ha guiado siempre por normas de seriedad, rigor y calidad, así como total independencia y libertad intelectuales.

Durante su primera década de vida concentró sus esfuerzos en consolidarse como institución, adquiriendo, generando y difundiendo conocimientos sobre las herramientas y el quehacer de la prospectiva.

En 1980 la FJBS se trasladó a su actual sede (carretera al Ajusco 203, Héroes de Padierna, México, D. F.) donde cuenta con una infraestructura física que le permite cumplir mejor con sus objetivos.

En 1986 amplía sus actividades creando tres nuevos centros de investigación (de estudios prospectivos, de investigación sísmica y de instrumentación y registro sísmico).

El Centro de Investigación Sísmica (CIS) de la Fundación Javier Barros Sierra fue constituido, en 1986, como una asociación civil dedicada a la investigación de los sismos y de sus consecuencias económicas y sociales.

Su objetivo primordial ha sido el desarrollar investigación básica y aplicada en sismología y en ingeniería sísmica, útil para el análisis integral del riesgo sísmico.

Cuenta con un plantel de investigadores en las ramas de geofísica, geología, geotecnia y diseño estructural y con asesores de prestigio internacional en ingeniería sísmica.

En atención a lo sucedido en la ciudad de México como consecuencia de los sismos de septiembre de 1985, su área de interés se ha centrado principalmente en la cuenca del valle de México; si bien últimamente se ha extendido a los estados de Guerrero y México, próximamente se estudiará la sismicidad en otros estados de la República sujetos al riesgo sísmico. Se busca con ello: conocer cómo responde el terreno sujeto a vibraciones sísmicas en diferentes sitios, ciudades y regiones, especialmente las que por esta causa han sufrido más daño; determinar cómo se comportan edificios de distintas configuraciones estructurales ante la acción sísmica y qué elementos estructurales y accesorios incrementan o disminuyen su respuesta; definir las características geológicas y estratigráficas que influyen en la sismicidad local, tanto de la cuenca del Valle de México como de otros valles y cuencas; completar los catálogos de sismos a partir tanto de datos históricos como de información de

instrumentos de registro sísmico; determinar los parámetros que deben ser incorporados en normas técnicas de diseño sísmico y en reglamentos de construcción; establecer metodologías que permitan medir impactos económicos y sociales provocados por los sismos.

En un futuro cercano, y a partir de lo desarrollado en materia de análisis de riesgo sísmico, se extenderá el campo de investigación al estudio de desastres naturales y tecnológicos.

La complejidad y la diversidad son características del mundo moderno y, en especial, de las sociedades que habitan en las grandes zonas metropolitanas. La complejidad y la diversidad pueden ser causa de desorden y dispendio; son, desde luego, fuente de incertidumbre y de riesgo, pero pueden también ofrecer mayores oportunidades de acción y de solución a una sociedad dada en escenarios sujetos a una alta dinámica de cambio. Investigar estas cuestiones en relación con la evolución de las grandes ciudades, o en grandes proyectos de desarrollo, son propósitos del CIS que orientan su desenvolvimiento, en procura de lineamientos y normas enfocadas a logros de bienestar social.

En este año de 1996 se dan ciertas circunstancias afortunadas, de coincidencia entre la Fundación ICA y la Fundación Javier Barros Sierra, que vale la pena aprovechar en favor de los objetivos de ambas instituciones y en beneficio de la ingeniería de nuestro país.

La Fundación ICA se creó a raíz de los sismos de 1985 que provocaron un desastre de proporciones nacionales y de muy graves consecuencias para la ciudad de México. Asimismo se fundaron el Centro de Investigación Sísmica y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra. Este último, en particular, mantiene y opera el mayor número de estaciones de la red acelerográfica de la Ciudad de México en la que están incluidas las estaciones que instaló, mantuvo y operó la Fundación ICA por varios años y que finalmente transfirió al Distrito Federal. El CIS, por su parte, ha analizado los registros de esta red, año con año, lo que ha permitido formar un banco de información y un acervo de conocimientos y experiencias únicos en su género, entre los que destacan los correspondientes a los importantes sismos del 14 de septiembre y 9 de octubre del año pasado y el del 25 de abril de 1989, el más intenso registrado en la ciudad desde 1985 y el de más ricos y abundantes datos; con ellos se han abordado alrededor de 70 proyectos de investigación y de aplicación práctica al diseño estructural y la construcción, así como a la administración del riesgo sísmico, útiles para la planeación, desarrollo, operación y mantenimiento urbano en materia de infraestructura y equipamiento, de inversión inmobiliaria y de seguros y reaseguros del patrimonio público y privado.

En este año también, en mayo, se cumplen 40 años de que Laboratorios ICA, a instancias de su fundador, el Ing. Bernardo Quintana Arriola, derivó en dos instituciones que han resultado y seguirán siendo de gran trascendencia para la ingeniería mexicana: el Instituto de Ingeniería de la UNAM y Solum.

En aquel entonces, los doctores Raúl Marsal y Marcos Mazari, aprovechando el banco de información y el acervo de conocimientos y experiencia que habían formado principalmente en laboratorios ICA, dieron a la luz el libro "El subsuelo de la ciudad de México" que fue la

contribución más notable al Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos, efectuado en la ciudad de México en 1959. Esta obra ha sido desde entonces una de las más mencionadas en la literatura especializada; ha constituido la zonificación geotécnica por excelencia, así como la base científica y técnica que ha hecho posible obras como el Metro y el Drenaje Profundo del Distrito Federal y ha fijado las líneas rectoras de análisis y diseño de cimentaciones y estructuras térreas en México.

El banco de datos y el acervo de conocimientos y experiencia en ingeniería sísmica constituidos a partir de los sismos de 1985, y de los cuales es en buena parte depositario el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, brindan la oportunidad de ampliar aquella obra monumental de Marsal y Mazari al ámbito de la zonificación sísmica. Su aplicación a la respuesta dinámica del Valle de México y a la de estructuras e instalaciones, así como a la de otros valles sedimentarios y obras en ellos alojadas, puede resultar también de una gran importancia y trascendencia. Cualquier estudio sobre la ciudad de México, que tenga que ver con gestión urbana y desarrollo urbano, debería tener en cuenta esta fuente de información.

Por otra parte también, en Acapulco, se dará en este año de 1996 la mayor congregación de especialistas en ingeniería en materia de sismos, en el Onceavo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, materia ésta en la que México ha logrado reconocimiento internacional, como también lo ha logrado en geotecnia particularmente a partir de aquel 1er. Congreso Panamericano.

Circunstancias, coincidencias y ocasiones, todas ellas propicias para que Fundación ICA y Fundación Javier Barros Sierra, a través de su Centro de Investigación Sísmica, concurren a publicar un primer avance de la zonificación sísmica de la ciudad de México y los escenarios posibles de afectación de la misma ante sismos postulados con potencialidad más destructiva, trabajo de investigación, análisis y recomendaciones prácticas, ahora en curso, para beneficio de las obras que existen, o que se emprendan en el futuro, en esta ciudad y en otras semejantes.

PREDICCIÓN DE INTENSIDADES SÍSMICAS PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

L. Eduardo Pérez-Rocha, Luis Vieitez Utesa, Fernando Flores Cruz y María Zárate Vázquez

RESUMEN

Los estudios que aquí se presentan son el resultado de la actividad multidisciplinaria del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra. Se centran en el uso y desarrollo de métodos que permiten, en general, revisar y sugerir criterios de diseño sísmico para estructuras desplantadas en el valle de México. El énfasis se ha puesto en el cálculo de acelerogramas sintéticos, espectros de respuesta y espectros de diseño de sitio que reflejen las características de un temblor especificado, las condiciones dinámicas del terreno de desplante y los efectos de la interacción suelo-estructura. En estas cantidades, comunes en la práctica de la ingeniería, descansan los niveles de seguridad y de riesgo sísmico estipulados en los reglamentos de construcciones modernos.

1. INTRODUCCIÓN

Los daños sin precedentes producidos en la Ciudad de México por el gran sismo de Michoacán ($M=8.1$) el 19 de septiembre de 1985, impulsaron el estudio de la sismología y la ingeniería sísmica en México. Gran parte de los avances, de entonces a la fecha, se han logrado gracias al incremento en la capacidad de observación instrumental y a la interpretación de los registros de movimientos fuertes ocurridos en los últimos años. En 1985, operaban en la ciudad del orden de 10 estaciones acelerométricas. Actualmente, existen más de doscientas.

Se han concentrado esfuerzos por explicar la naturaleza de la respuesta sísmica del valle de México, en particular, las grandes variaciones espaciales del movimiento del terreno y la extraordinaria duración del movimiento observado en sitios de la zona del lago (p ej. Kawase y Aki, 1989). Los trabajos de Chávez-García y Bard (1994), Singh *et al.* (1995) y Sánchez-Sesma y Luzón (1996) son avances recientes en esta búsqueda.

Singh y Ordaz (1993) explican convincentemente la duración del movimiento. A partir de los primeros registros de banda ancha obtenidos en la zona de terreno firme de la Ciudad de México, estos autores proponen que la larga duración es una propiedad intrínseca del campo incidente y que probablemente se debe al multitrayecto que siguen las ondas sísmicas desde la fuente hasta el valle de México. Posiblemente, este fenómeno esté relacionado con las conspicuas amplificaciones regionales señaladas por ellos (Ordaz y Singh, 1992). En efecto, los autores afirman que aún en la zona firme del valle de México

existen amplificaciones en el intervalo de frecuencias cercanos a 0.3 Hz que no se explican con los modelos más simples de fuente y trayecto, o que no tienen correlación con la atenuación sísmica observada en otras regiones.

El interés por reducir los efectos destructivos de los sismos sobre las obras civiles ha guiado los criterios de diseño y normatividad para la construcción de estructuras que ofrezcan mayores niveles de seguridad. Estos criterios se definen, principalmente, a partir de la intensidad de las fuerzas que actúan sobre las estructuras durante los grandes temblores. Además de las propiedades estructurales, las fuerzas sísmicas dependen de las características de la fuente sísmica, del trayecto que sigue el campo ondulatorio en su viaje hasta el sitio de desplante y de las propiedades dinámicas del terreno en este sitio. En particular, a este último concepto se deben las grandes variaciones espaciales que se han observado en los registros de los temblores captados por la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (RACM), instalada a partir de 1986.

En este trabajo se hace uso de formulaciones prácticas que permiten predecir el movimiento del terreno del valle de México durante sismos intensos. Se ha puesto énfasis en modelos empíricos que se apoyan en el tratamiento de registros acelerométricos bajo esquemas teóricos simplificados. Este enfoque predictivo es el más apropiado, ya que permite tomar en cuenta los efectos de fuente, de trayecto y de sitio que se han identificado en los datos obtenidos de varios temblores. Asimismo, se ha planteado una metodología para estimar los *espectros de respuesta de sitio*, es decir, las fuerzas sísmicas que actuarían sobre un conjunto de estructuras, supuesto en un escenario sísmico especificado por el sitio de desplante y por la ocurrencia de un temblor en una región sismogénica determinada (CIS 1991, 1992, 1993, 1994, 1995a).

2. OCURRENCIA DE LOS GRANDES TEMBLORES EN EL TERRITORIO MEXICANO

Los grandes temblores en México (magnitud $M \geq 7.0$) tienen origen a lo largo de la costa del Pacífico, desde Manzanillo hasta Tehuantepec, aproximadamente, debido a la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera bajo la placa de Norteamérica. Los catálogos de los grandes temblores han permitido estimar periodos de recurrencia para algunos segmentos de la zona de subducción. Estos varían entre 20 y 75 años. Es racional idealizar que el proceso de ocurrencia está constituido por periodos de acumulación de energía que culminan con la generación de un temblor cuando se sobrepasa la resistencia de las rocas.

El concepto de *brecha sísmica* surge para designar a un segmento de la zona de subducción en la cual no se ha producido un temblor de importancia en un lapso relativamente grande. Es aceptable asignar altas probabilidades a la ocurrencia de un temblor en un lapso relativamente breve en las brechas sísmicas. Con base en estas consideraciones se han identificado diferentes brechas sísmicas en México (p. ej, Kelleher, *et al*, 1973; Singh, *et al*, 1981). Los grandes temblores recientes (Colima, 1973, 1995; Oaxaca, 1978; Petatlán 1979, 1985; Playa Azul, 1981; Ometepec, 1982, 1995; Michoacán, 1985) han ocurrido en sitios considerados brechas sísmicas.

En la brecha de *Michoacán* se generaron los recientes sismos del 25 de octubre de 1981 ($M=7.3$), 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$) y 30 de abril de 1986 ($M=7.0$). Esta región, en particular, produce pocos sismos pequeños y puede dar lugar a sismos de gran tamaño (como el que se observó en 1985). Al igual que la brecha de Jalisco, esta brecha puede adquirir el potencial sísmico más elevado de la zona de subducción mexicana y los tiempos de recurrencia más largos (~ 70 años). Debido a los grandes daños que ocasionó el temblor del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México, se sugirió que la irradiación de este sismo pudo ser anómalamente energética, al menos para los periodos cercanos a los de resonancia de los sitios del valle con suelos de origen lacustre. Esto fue confirmado por Singh *et al* (1988) a partir del análisis de las aceleraciones registradas en el sismo del 19 y su réplica del 21 de septiembre de 1985 en varios sitios de terreno firme en y cerca de la Ciudad de México. A partir de registros de datos telesísmicos de banda ancha, Singh *et al* (1990) mostraron que el origen de esta anomalía proviene de la fuente del terremoto y que tiene un periodo característico cercano a 2.5 s.

En la brecha de *Petatlán* se originó el sismo que produjo el colapso de la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México en 1979. Se trata de un sismo con $M=7.6$. También en esta región tuvo origen la réplica del gran terremoto de Michoacán de 1985 con $M=7.7$. Al parecer, ambos temblores produjeron intensidades sísmicas similares en el valle de México.

El catálogo de sismos históricos indica que la brecha de *Ometepec* tiene los periodos de recurrencia más cortos de la costa mexicana del Pacífico (de 20 a 30 años; Singh y Suárez, 1988). En 1937 y 1950 ocurrieron grandes terremotos con $M>7.8$. Desde entonces se han producido dos temblores intensos. Uno de ellos con $M=7.4$, ocurrido el 2 de agosto de 1968 y el otro ocurrido el 14 de septiembre de 1995, con $M=7.3$. En particular, el 7 de junio de 1982 se generaron dos temblores con $M=6.9$ y 7.0 en un lapso de 6 horas, conocidos como el "doblete de Ometepec".

Existe consenso general en la comunidad científica de que, actualmente, la región con mayor potencial sísmico en el país es, precisamente, el área cubierta por las brechas de *Guerrero* y *San Marcos* (Singh, *et al*, 1981, 1982; Nishenko y Singh, 1987a,b). En esta región ocurrieron grandes temblores en 1899 ($M=7.9$), 1907 ($M=7.7$), 1908 ($M=7.6, 7.0$), 1909 ($M=6.9$) y 1911 ($M=7.6$). Este último se conoce como el "Temblor de Madero". La intensa actividad sísmica de principios de siglo cesó por 46 años. En la madrugada del 28 de julio de 1957 se generó otro gran temblor. Se contaron numerosos daños materiales y, lamentablemente, la pérdida de decenas de vidas humanas. Hasta entonces, este evento conocido como "Temblor del ángel", había sido el más intenso y destructivo para las estructuras y obras civiles de la Ciudad de México. Los sismos intensos más recientes generados en esta región tuvieron lugar el 11 de mayo de 1962 ($M=7.2$) y el 25 de abril de 1989 ($M=6.9$). En particular, este último es un temblor moderado, pero se considera de gran importancia ya que se registró ampliamente en el valle de México. En resumen, en la zona noroeste de esta región (desde cerca de Petatlán hasta Acapulco) no se han producido grandes temblores en los últimos 80 años, mientras que la porción sureste (desde Acapulco hasta cerca de Ometepec) no ha dado lugar a grandes temblores después del terremoto de 1957.

Se han obtenido relaciones empíricas entre el momento sísmico, que es una medida de la energía liberada durante el proceso de ruptura de un temblor, y el periodo de recurrencia. Para un periodo de 80 años se encontró que la energía acumulada en las brechas de Guerrero y San Marcos sería suficiente para generar 1 ó 2 temblores con $M=8.0$, o bien, de 2 a 4 con $M=7.8$. Asimismo, relaciones empíricas entre el área de ruptura y la magnitud indican que esta brecha (con dimensiones máximas de 230 por 80 Km, estimadas por Singh *et al*, 1985) podría generar un temblor con $M=8.3$.

Singh y Ordaz, (1994) sugieren que los sismos que se generan al oeste de la longitud $99^{\circ}W$ son más energéticos que aquéllos que se generan al este. En particular, los autores señalan que el sismo del 28 de julio de 1957 ($M=7.7$), es más energético de lo que típicamente se observa en sismos con igual magnitud, originados en otras regiones. Ellos sugieren que el desplazamiento sobre el plano de falla al oeste ocurre más lentamente que al este, debido a la segmentación de la placa subducida cerca de $99^{\circ}W$, entre las brechas de San Marcos y Ometepec. Esta hipótesis es congruente con la distribución de hipocentros que delimita la zona de Benioff (Pardo y Suárez, 1994) y con la actividad del vulcanismo cuaternario.

Otros estudios indican que los grandes temblores de subducción en México se originan cerca de las costas, con profundidades entre 16 y 20 Km (Singh *et al*, 1984; Singh y Mortera, 1990) y que el ancho de la ruptura no excede 80 Km (Singh *et al*, 1995). Además, se ha observado que estos eventos pueden ser generados por varias o una sola ruptura (UNAM, Seismology Group, 1986; Singh, *et al*, 1984; Singh y Mortera, 1990). Además, se sabe que el número de réplicas que se generan después de un gran temblor es anómalamente pequeño (Singh y Suárez, 1988), pero que pueden ser de gran magnitud (p ej. el gran sismo de Jalisco de 1932 con $M=8.3$ dio lugar a una réplica con $M=7.9$; el doblete de Ometepec en 1982 con $M=6.9$ y 7.0 ; y el sismo del 21 de septiembre de 1985, con $M=7.6$, el cual se originó en la región de Petatlán como réplica del gran sismo de Michoacán de 1985). No se sabe qué tan frecuente ocurre, pero se ha observado que una brecha sísmica puede dar lugar a más de un gran temblor en tiempos relativamente cortos. Por ello, después de un gran temblor no puede considerarse que la zona de ruptura esté necesariamente liberada de potencial sísmico para un futuro inmediato.

Con menor frecuencia ocurren grandes temblores bajo el continente, con profundidades mayores a 50 Km. Estos sismos se producen por un mecanismo de fallamiento normal de la litósfera oceánica subducida (Singh *et al*, 1985). En este siglo, los eventos más destructivos que se han originado por este mecanismo son los sismos de Oaxaca con $M=7.8$ (15 de enero de 1931), de Orizaba con $M=7.1$ (28 de agosto de 1973) y de Huajuapán de León con $M=7.0$ (24 de octubre de 1980). Los temblores que ocurren en el interior de la placa continental, como los sismos de Jalapa con $M=6.4$ (3 de enero de 1920) y de Acambay con $M=7.0$ (19 de noviembre de 1912), son menos frecuentes y de menor magnitud, aunque pueden ser destructivos para los asentamientos humanos situados a distancias epicentrales cortas. Considerando estos dos mecanismos de generación de sismos intensos, Rosenblueth y Ordaz (1988) encontraron que la condición más desfavorable para la ciudad de México se tiene ante un sismo con $M=6.5$ originado a 80 Km de profundidad, bajo el valle, o bien, con $M=7.0$ originado en la terminación oriental del graben de Acambay. Para este último, los autores estimaron un periodo de recurrencia de 1500 años. Para la región de

Kobe, en Japón, se habían estimado periodos de recurrencia mayores a 1000 años después de una moderada actividad ocurrida hace 70 años. Sin embargo, el 17 de enero de 1995 ocurrió un temblor moderado ($M=6.7$) que resultó ser muy destructivo en las áreas urbanas cercanas a la región epicentral. En particular, el origen tectónico de este temblor es similar al del temblor de Acambay.

3. ESTIMACIÓN DE MOVIMIENTOS FUERTES PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

Los daños producidos por los grandes sismos han promovido el desarrollo de modelos teóricos y empíricos encaminados a predecir la naturaleza del movimiento del terreno producido por un temblor de magnitud y localización especificadas. También se han redoblado esfuerzos por cuantificar la respuesta dinámica del terreno atribuida a las condiciones locales, en particular, a la presencia de estratos superficiales de suelo blando. El reglamento actual para la construcción de obras civiles en la Ciudad de México contiene espectros de diseño sísmico en los que se estipulan las fuerzas sísmicas que las estructuras deben resistir sin llegar al colapso. Además de considerar un gran sismo de diseño, en este reglamento se reconoce la presencia de diferentes tipos de suelo. En efecto, se fijaron coeficientes sísmicos para cada una de las zonas geotécnicas propuesta por Marsal y Masari (1959). La zonificación geotécnica propuesta por ellos es congruente con la distribución de los daños producidos por los grandes temblores recientes (1957, 1979 y 1985).

3.1 Movimiento del terreno en la zona de lomas

Esteva y Villaverde (1973) obtuvieron relaciones empíricas, llamadas leyes de atenuación, para aceleración y velocidad máximas del terreno a partir de una base de datos mundial que incluía registros de temblores mexicanos. Bufaliza (1984) propuso expresiones similares obtenidas a partir de datos registrados exclusivamente en México. Posteriormente, Singh *et al* (1987) obtuvieron relaciones tomando sólo los datos registrados en la Ciudad Universitaria (CU) de la Ciudad de México.

En vista de que la correlación entre el daño estructural y los valores de aceleración y velocidad máximas del terreno es relativamente baja, se han buscado esquemas que suministren una mejor caracterización del movimiento, en particular, el contenido de frecuencias y la duración. Con ello, es posible calcular mejores estimadores del daño estructural, como las ordenadas del espectro de respuesta. Con este propósito Castro *et al* (1988) construyeron un modelo empírico para predecir amplitudes del espectro de Fourier (EAF) para el sitio CU. Los EAF son una medida cuantitativa de las amplitudes del movimiento en la superficie del terreno. El modelo se basa en la regresión lineal de los datos a partir de una forma funcional que está de acuerdo con modelos teóricos de fuente (McGuire, 1978). Para superar la insuficiencia de datos, Ordaz *et al* (1994) construyeron un modelo de regresión basado en el teorema de Bayes. Este teorema permite incorporar

información previa a los datos, por ejemplo, la que proviene de modelos y estudios teóricos, o bien, de la experiencia en otras regiones. Con ello, las regresiones son más estables y contienen toda la información existente. Esta caracterización del movimiento del terreno por medio de sus espectros de amplitudes de Fourier ha sustituido la estimación de aceleración y velocidad máximas del terreno para definir los espectros de respuesta (Esteve, 1970). En particular, la regresión de las amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en CU preserva los rasgos prominentes debidos a la amplificación regional señalada por Ordaz y Singh (1992). Este fenómeno de amplificación se observó en el intervalo de frecuencias entre 0.2 y 0.7 Hz y se ha concluido que no existe ningún sitio exento de esta amplificación dentro del valle de México (Singh *et al*, 1994).

Existe un método alternativo en el que se emplean los registros de sismos pequeños para simular el movimiento producido por sismos de mayor cuantía. La idea original fue propuesta por Hartzell (1978), quien se apoyó en la hipótesis de que la complejidad observada en los registros estará presente en aquellos producidos por sismos de mayor magnitud originados en la misma región epicentral. En efecto, haciendo uso de este modelo teórico para el escalamiento de la fuente sísmica, Ordaz *et al* (1994) obtuvieron excelentes resultados al simular los registros del sismo del 25 de abril de 1989 ($M=6.9$), a partir de los registros producidos por un sismo pequeño ($M=5.0$) ocurrido en la misma región el 2 de mayo de 1990. La bondad de este modelo de escalamiento radica en preservar los rasgos más significativos del movimiento atribuidos a la fuente sísmica, al trayecto y al sitio de observación. En principio, bastaría observar, en un lapso relativamente corto, la sismicidad de una región determinada para hacer una buena estimación de las características que tendría un gran temblor originado en ella.

En este trabajo se hace uso del modelo teórico de escalamiento para estimar las amplitudes del movimiento del terreno que se tendrían en la Ciudad Universitaria (CU) durante sismos intensos. Afortunadamente se cuenta con una valiosa colección de acelerogramas registrados en este sitio, los cuales corresponden a sismos mexicanos de subducción moderados y grandes, ocurridos desde 1965. Estos se indican en la tabla I. También se indica la fecha de ocurrencia, la magnitud y la distancia más corta entre el área de ruptura y el sitio CU, así como la región sismogénica a la que cada sismo pertenece, de acuerdo con la clasificación de brechas sismogénicas propuestas por Nishenko y Singh (1987a, b). Esta clasificación se ilustra en la figura 1, así como las áreas de ruptura de los sismos estudiados. En la figura 2 se ilustran las aceleraciones registradas en CU producidas por estos sismos.

Los espectros de amplitudes de Fourier de estos registros, ilustrados en la figura 3, indican que son confiables en el intervalo de frecuencias medias (de 0.3 a 3 Hz, aproximadamente). En esta figura, los espectros de los sismos generados en cada zona especificada se indican con líneas gruesas. Estos espectros corresponden a las envolventes de los componentes horizontales NS y EW. También se ilustra la comparación entre los espectros de Fourier de los registros de los sismos de Playa Azul del 25 de octubre de 1981 ($M=7.3$), de San Marcos del 25 de abril de 1989 ($M=6.9$) y de Ometepe del 14 de septiembre de 1995 ($M=7.3$). Se trata de sismos originados en diferentes regiones cuyas distancias epicentrales a CU varían entre 290 y 330 Km. Esta figura permite hacer las siguientes observaciones:

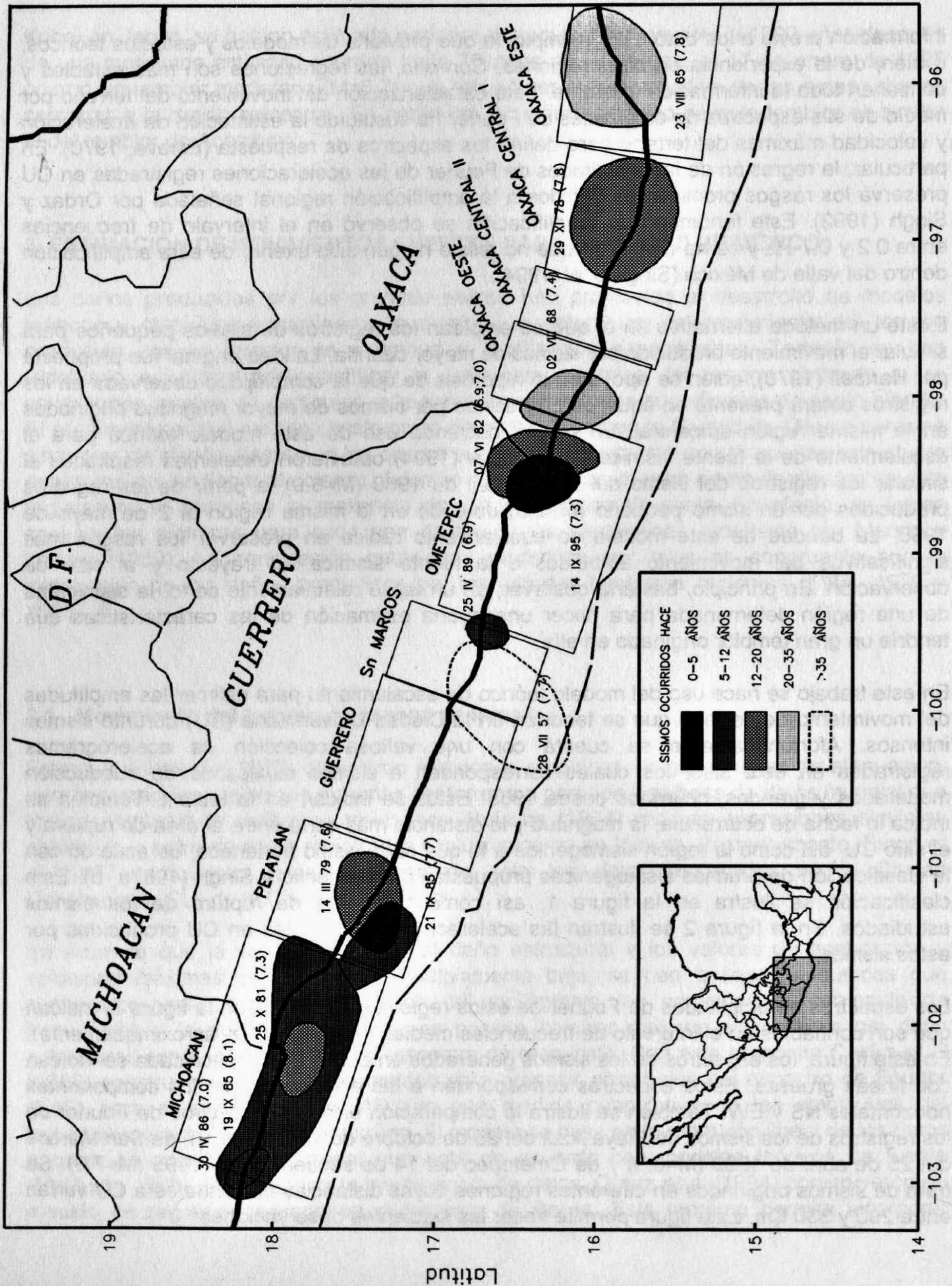


Fig 1 Zonas sismogenicas y areas de ruptura de sismos de subduccion ocurridos desde 1965

Sismo	Fecha	M	R (Km)	Brecha sismogénica
1	23/VIII/65	7.8	466	Oaxaca Este
2	02/VIII/68	7.4	326	Oaxaca Oeste
3	29/XI/78	7.8	414	Oaxaca Central
4	14/III/79	7.6	287	Petatlán
5	25/X/81	7.3	330	Michoacan
6	07/VI/82	6.9	304	Ometepec
7	07/VI/82	7.0	303	Ometepec
8	19/IX/85	8.1	295	Michoacán
9	21/IX/85	7.7	318	Petatlán
10	30/IV/86	7.0	409	Michoacán
11	25/IV/89	6.9	290	San Marcos
12	14/IX/95	7.3	320	Ometepec

Tabla 1 Sismos de subducción con $M \geq 6.9$ registrados en CU desde 1965

- Los dos grandes sismos de la brecha de Petatlán que se han registrado son, prácticamente, del mismo tamaño ($M=7.7$ y 7.6). La diferencia entre sus distancias epicentrales al sitio CU (318 - 287 Km) no es un factor significativo en la atenuación del movimiento sísmico del terreno, ya que las amplitudes de sus espectros de Fourier son muy similares. Se sabe que al aumentar la distancia epicentral se reducen las amplitudes de las altas frecuencias. Sin embargo, del conjunto de sismos estudiados (originados en promedio a 300 Km de CU), los sismos de Petatlán son los más energéticos en estas frecuencias. Al parecer, la corteza terrestre entre la brecha de Petatlán y la Ciudad de México, es muy eficiente para la propagación de ondas de alta frecuencia. Ello podría explicar el colapso de la Universidad Iberoamericana, la cual se encontraba en un sitio de la zona del lago con periodo dominante alrededor de 1.0 s, así como otros daños observados principalmente en la porción de la zona de lago cercana a la zona de transición. En cambio, se observa que para frecuencias menores, las amplitudes son comparables a las que se producen por sismos de menor magnitud originados en las otras brechas sismogénicas señaladas en el estudio. Definitivamente, para periodos entre 2 y 3s, los grandes sismos originados en esta región fueron menos energéticos que el "Temblor del ángel" del 28 de julio de 1957 ($M=7.7$), originado en la región de San Marcos, cuyo poder destructivo quedó dramáticamente demostrado en la Ciudad de México.

- El sismo del 25 de abril de 1989 es el único evento importante de la brecha de San Marcos que se ha observado instrumentalmente en CU. Sus registros son de gran valor. Para la ciudad de México, este sismo produjo mayores intensidades que otros sismos costeros de mayor tamaño. La comparación entre los espectros de este sismo y los de los sismos de Playa Azul del 25 de octubre de 1981 ($M=7.3$) y de Ometepec del 14 de septiembre de 1995 ($M=7.3$) muestra claramente que el sismo de San Marcos, que es el de

menor magnitud, es el más energético para el intervalo de periodos entre 2 y 3s. Esta evidencia, y los grandes daños causados por el sismo del 28 de julio de 1957 (originado frente a las costa de Acapulco), sugieren que de todos los sismos con origen en la costa del Pacífico mexicano, los que ocurren en la región de San Marcos, son los más intensos para las estructuras ubicadas en la zona lacustre de la Ciudad de México.

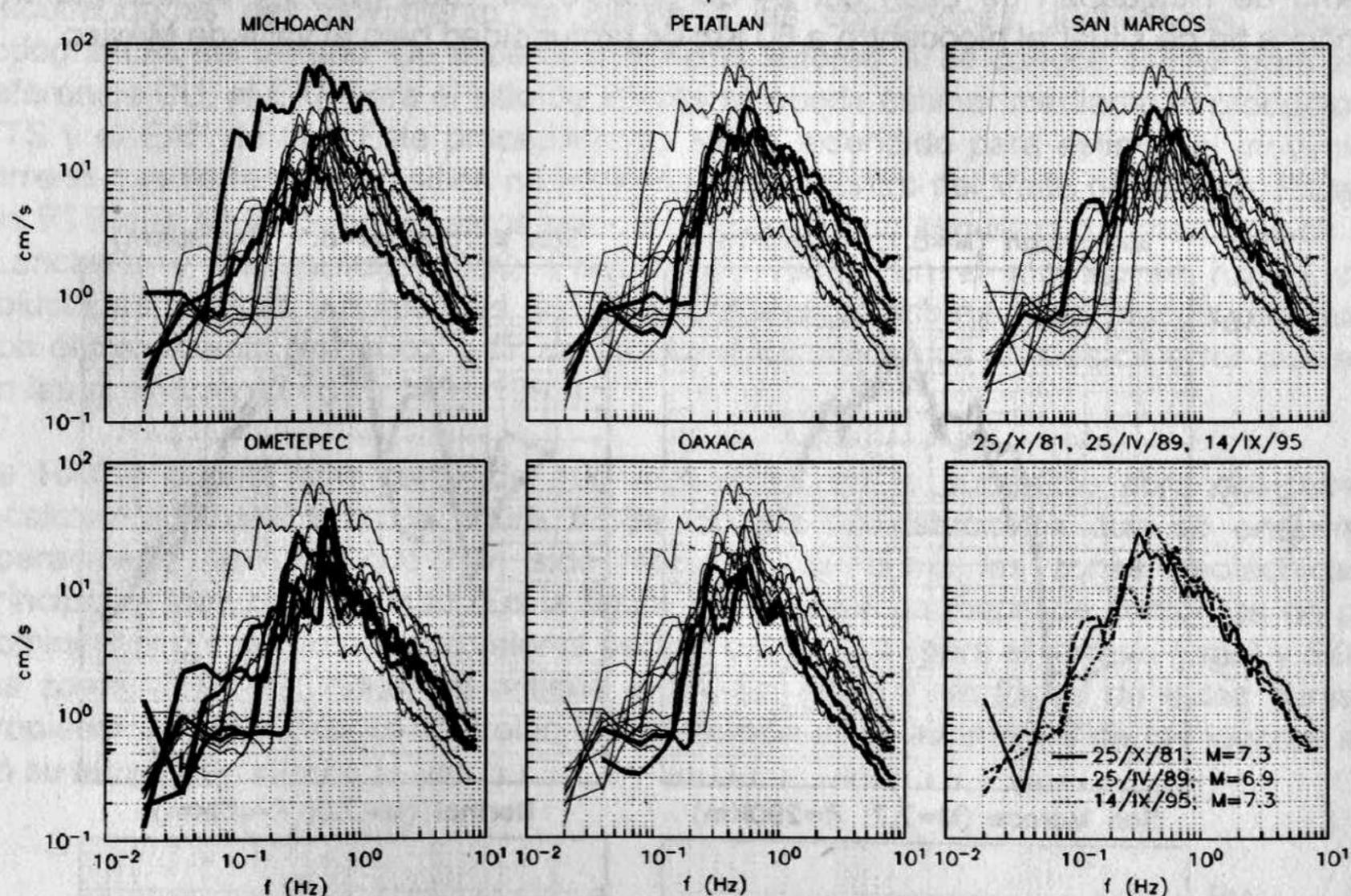


Figura 3. Espectros de Fourier de los Registros de aceleración ilustrados en la figura 2

- La región de Ometepec es la de mayor actividad en este estudio. Desde que se instaló el acelerógrafo de CU en 1964, se han registrado cuatro sismos importantes y numerosos sismos pequeños con $M \leq 5$. Aunque las magnitudes de los sismos importantes varían entre 6.9 y 7.3, la diferencia en estos tamaños no es apreciable en sus espectros de Fourier. En efecto, para frecuencias mayores a 0.4 Hz, los espectros tienen prácticamente el mismo nivel de amplitud. Ello significa que para las estructuras convencionales del valle de México, situadas en sitios con periodo dominante menor a 2.5 s, estos sismos produjeron fuerzas con intensidades similares.

En la figura 4 se ilustran los EAF que se tendrían en el sitio CU ante cuatro posibles temblores (con líneas continuas el componente NS y con líneas discontinuas el EW). El

primero de ellos se adoptó como referencia, pues corresponde al gran sismo de Michoacán de 1985. El segundo y el tercero son sismos postulados, originados en la brecha de San Marcos con magnitudes $M=8.1$ y 7.7 . Estos sismos, que por su magnitud serían comparables a los terremotos de 1985 y 1957, respectivamente, se obtuvieron a partir del escalamiento de los registros del sismo del 25 de abril de 1989 ($M=6.9$). También se postuló un sismo con $M=7$ originado en el interior del continente (por el fallamiento normal de la corteza sobre el manto terrestre). Para ello, se tomaron las aceleraciones registradas en CU producidas por el sismo de Huajuapán de León del 24 de octubre de 1980 ($M=7$) y se corrigieron por distancia a fin de situar al hipocentro a 80 Km de profundidad bajo el valle de México.

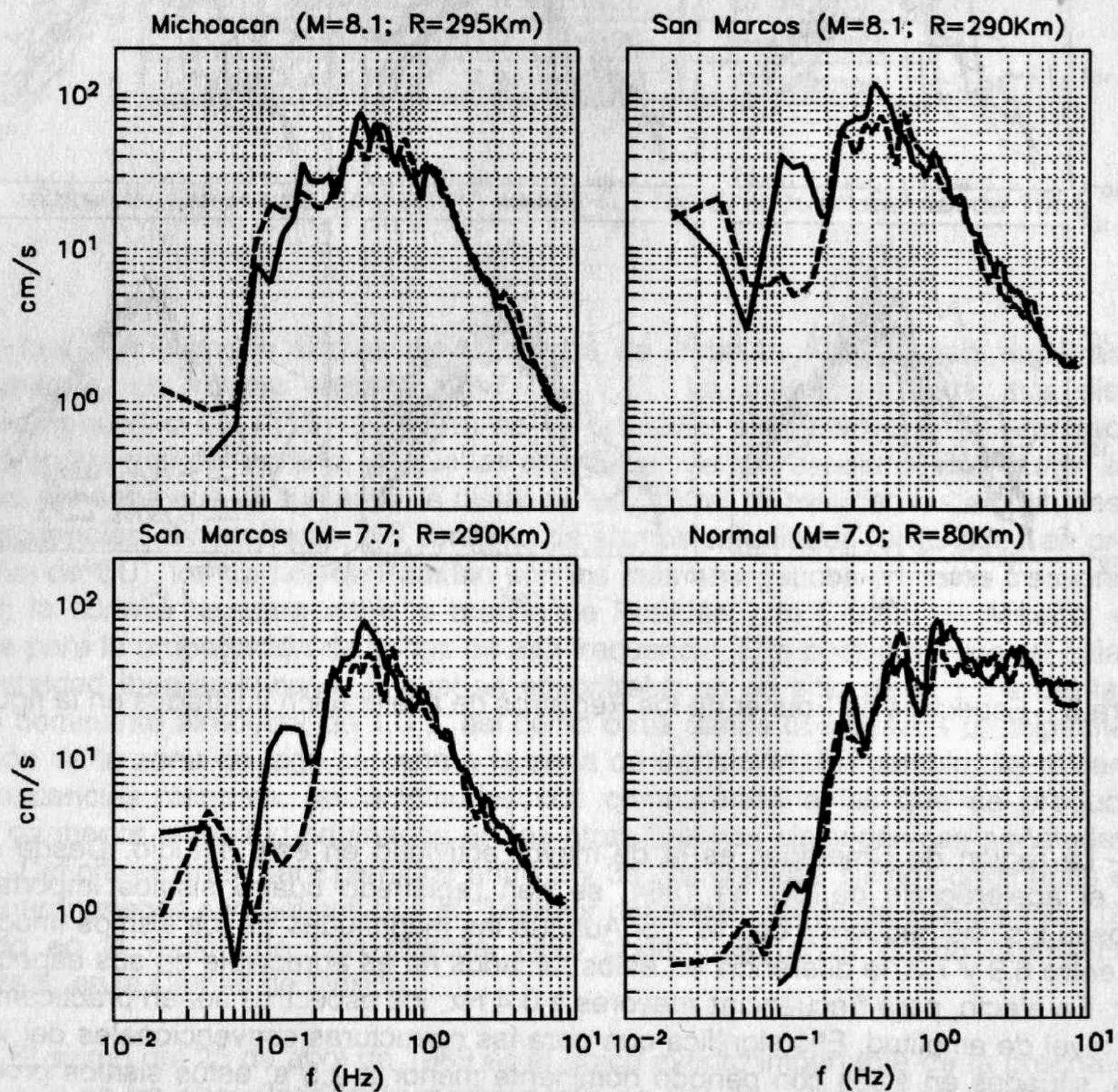


Figura 4. Espectros de Fourier de sismos postulados para el sitio CU

3.2 Movimiento del terreno en las zonas de lago y transición

Ordaz *et al* (1989) propusieron estimar las amplitudes del movimiento del terreno en sitios instrumentados (en las zonas del lago y transición) mediante el uso de *funciones de transferencia de sitio* (FTS). Este enfoque empírico es una forma de tomar en cuenta las amplificaciones relativas del movimiento del terreno observadas en los datos registrados por las estaciones de la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (RACM). En su mayoría, las peculiaridades del movimiento se deben a las condiciones geotécnicas, geológicas y topográficas del terreno. De acuerdo con estos autores, si se conoce el EAF para el sitio de referencia CU, el EAF para el sitio de interés se puede estimar mediante el producto entre la FTS y el EAF de CU. Este procedimiento se ha extendido para estimar el movimiento del terreno que se tendría en sitios no instrumentados dentro del Valle de México. Para estimar las FTS que se tendrían en estos sitios se desarrolló un esquema de interpolación espacial (Lancaster y Salkauskas, 1986; Pelto *et al*, 1988). En el modelo se hacen intervenir soluciones teóricas y numéricas, así como las incertidumbres relacionadas con los datos y con el tratamiento numérico, a fin de reducir y cuantificar los niveles de error que se tienen en las predicciones (CIS, 1991-1995).

La RACM cuenta con cerca de 100 estaciones en la superficie libre del terreno. Su localización aparece en la figura 5. Se indican las estaciones que se encuentran en operación y aquéllas que han sido retiradas, así como las zonas geotécnicas y las principales vías de la ciudad. En la figura 6 se ilustra un mapa de contornos de periodos dominantes del terreno. Estos valores oscilan entre 0.5 s (para el terreno firme) y 5.0 s (para las zonas más profundas del antiguo lago). En general, la forma de estas curvas y las propiedades estructurales controlan la distribución de la intensidad de las fuerzas sísmicas en su mayor parte.

3.3 Intensidad de las fuerzas sísmicas

A diferencia de las amplitudes del movimiento del terreno, las fuerzas sísmicas son una medida cuantitativa de la acción de un temblor sobre una estructura determinada. Usualmente, se calculan los valores para varios tipos de estructura e incluso para la condición en la superficie libre del terreno.

Las estructuras se caracterizan por su parámetro dinámico más significativo: el periodo fundamental. Típicamente, el periodo fundamental de una estructura aumenta con su altura, de forma que las casas y las estructuras pequeñas tienen valores nominales de periodo fundamental menores a 0.5 s. Una estimación robusta del periodo fundamental para edificios convencionales es dividir el número de pisos entre 10. De esta forma, es razonable esperar que en el valle de México la mayoría de las estructuras tengan periodos fundamentales comprendidos entre 0.1 y 5 s.

Se sabe que las condiciones más críticas se presentan cuando el periodo dominante del terreno coincide con el periodo fundamental de la estructura. Por ello, es racional esperar

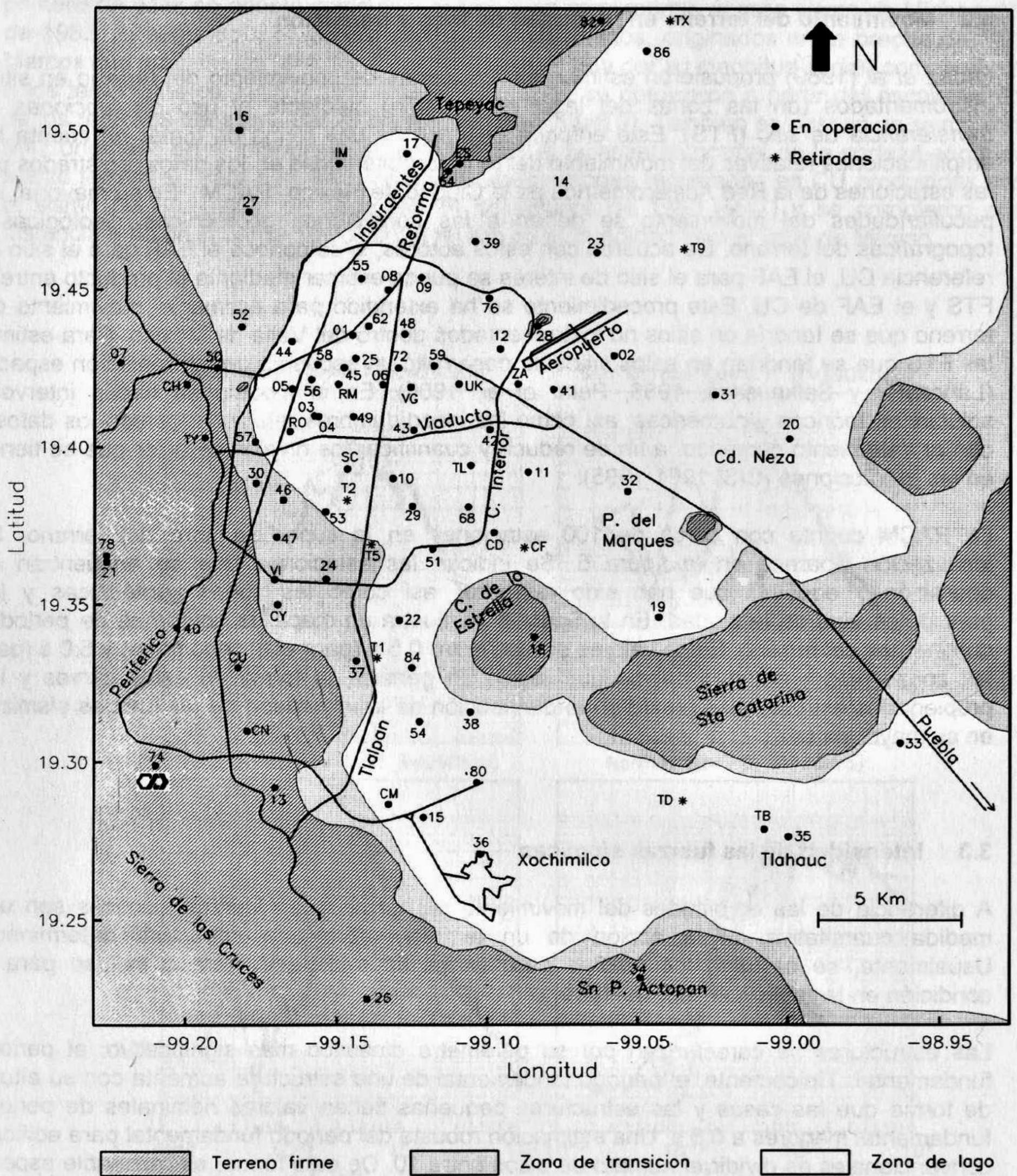


Figura 5. Red Acelereométrica de la Ciudad de México

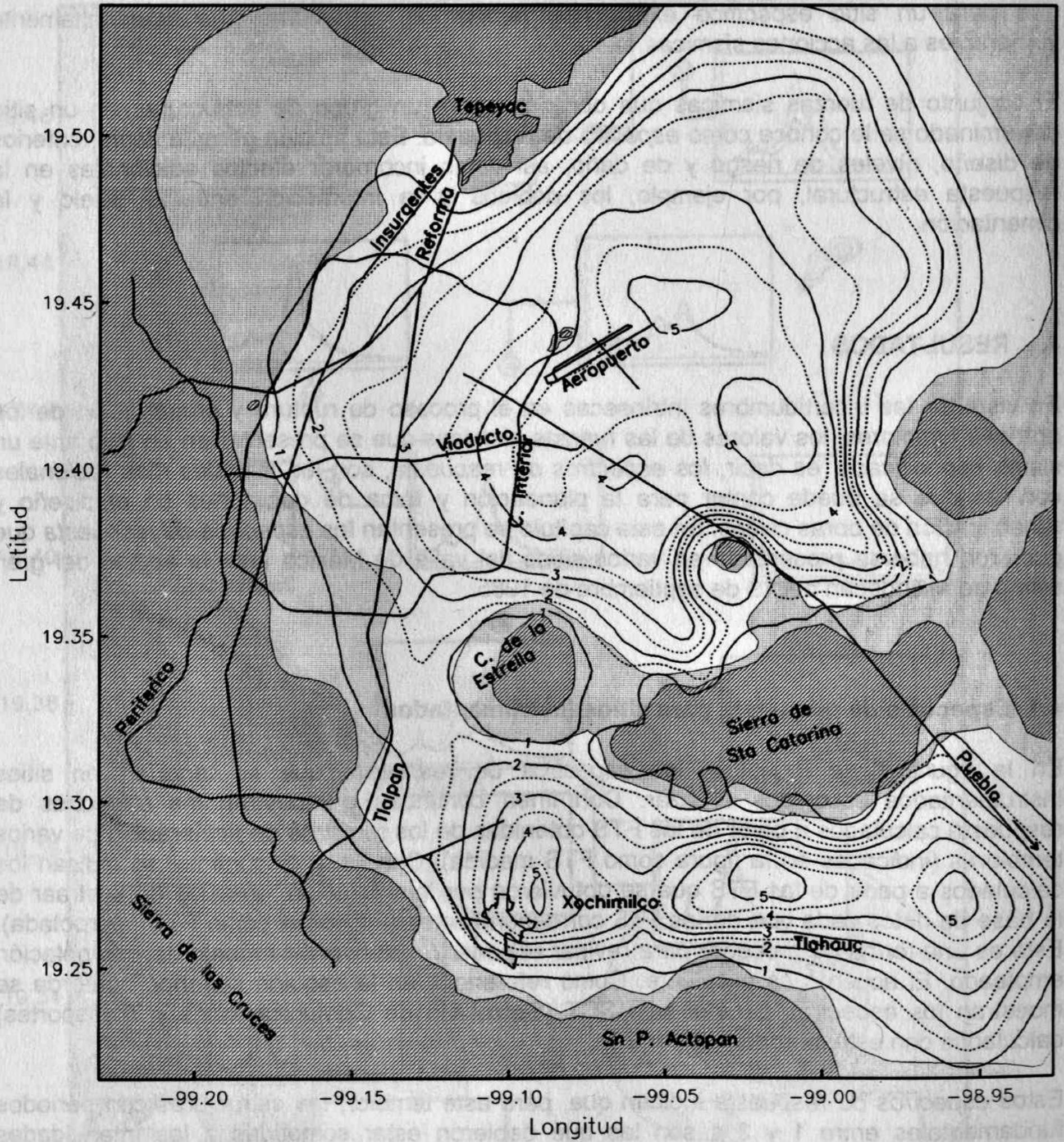


Figura 6. Contornos de los periodos dominantes del terreno. Se indican curvas desde $T_s=1.0s$ hasta $5.0s$ con incrementos de $0.5s$

que para un sitio específico exista una familia de estructuras que sean altamente vulnerables a las acciones sísmicas.

El conjunto de fuerzas sísmicas que obrarían sobre un grupo de estructuras en un sitio determinado se le conoce como *espectro de respuesta*. Esta función permite definir criterios de diseño, niveles de riesgo y de daño, así como incorporar efectos adicionales en la respuesta estructural, por ejemplo, los debidos a la interacción entre el suelo y la cimentación.

4. RESULTADOS

En vista de las incertidumbres intrínsecas en el proceso de ruptura y propagación de los grandes temblores, los valores de las fuerzas sísmicas que se presentarían en sitio ante un sismo especificado, es decir, los *espectros de respuesta*, son las medidas más racionales con las que se puede contar para la planeación y toma de decisiones en el diseño y rehabilitación de obras civiles. En este capítulo se presentan los *espectros de respuesta* que pudieron haberse presentado en varios sitios del valle de México ante la acción del gran sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985.

4.1 Espectros de respuesta para sitios instrumentados

En la figura 7 se muestran los *espectros de respuesta* que se tendrían en sitios instrumentados escogidos al azar. Con línea continua se muestran los espectros de respuesta calculados a partir de las FTS obtenidas de los registros de aceleración de varios temblores (indicadas en la figura como FTS medida). Con línea discontinua se indican los calculados a partir de las FTS que se obtuvieron por interpolación, después de sustraer de la base de datos cada una de las FTS correspondientes (indicadas como FTS interpolada). Esta es una forma de proceder para revisar el poder resolutivo del modelo de interpolación empleado. El acuerdo es excelente. Como referencia, en la esquina superior izquierda se muestran los espectros para el sitio SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) calculados con este método.

Estos *espectros de respuesta* indican que, para este temblor, las estructuras con periodos fundamentales entre 1 y 3 s son las que debieron estar sometidas a las intensidades mayores y, en efecto, los daños mayores se presentaron en los sitios donde los periodos dominantes del terreno coinciden con estos valores de periodo estructural. Nótese que se identifican sitios en donde se esperarían intensidades sensiblemente mayores a las que se presentaron en el sitio SCT en 1985. Téngase presente que, las intensidades observadas en SCT sirvieron de base para fijar, en las Normas Técnicas de Emergencia (1986) y en las Normas Técnicas Complementarias del reglamento actual de construcciones (RCDF, 1987, 1995), el coeficiente sísmico de diseño para la zona de lago ($c=0.4 g$; con $g =$ aceleración de la gravedad $= 9.81 \text{ m/s}^2$).

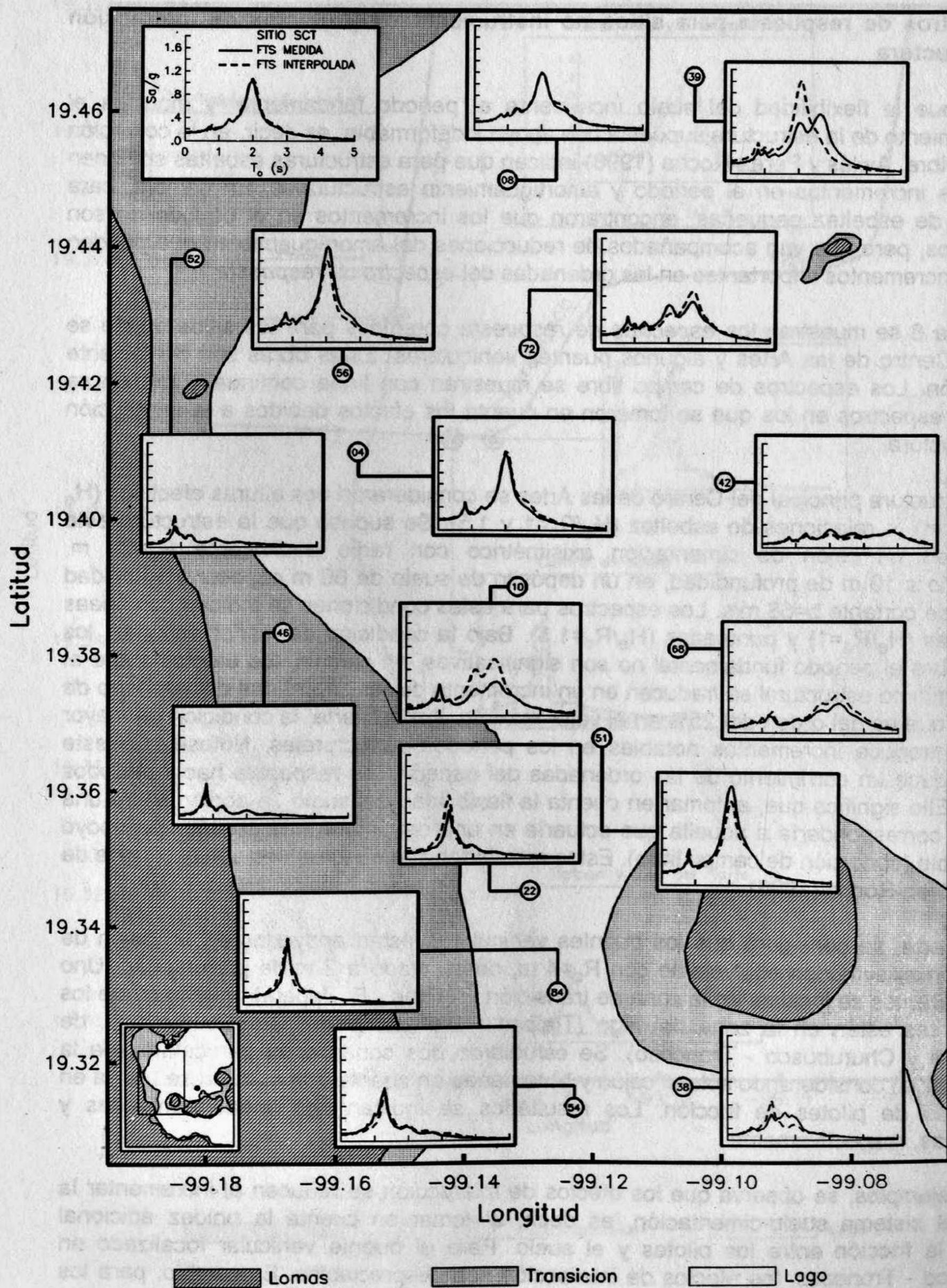


Figura 7. Espectros de respuesta para varios sitios instrumentados de la Ciudad.

puentes localizados en Tlalpan - E. Zapata, Tlalpan - Div. del Norte y Churubusco - C. de Miramontes, el no tomar en cuenta la presencia de los pilotes produce importantes corrimientos en los periodos estructurales. En efecto, para periodos estructurales cercanos a 0.6 s, los cuales coinciden con los periodos fundamentales típicos de estas estructuras en la dirección transversal y en la condición de apoyo indeformable, el corrimiento de los periodos estructurales se traduce en incrementos en las ordenadas espectrales del 25% con respecto a la condición dada por la presencia de los pilotes. El tomar en cuenta la presencia del conjunto de pilotes de fricción se acerca más a la idealización del apoyo indeformable que se suministra con los espectros de campo libre (líneas continuas).

4.3 Espectros de respuesta para las estaciones del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México

En las figuras 9-16 se muestran los *espectros de respuesta* de campo libre que se tendrían para las estaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Para las estaciones elevadas de las líneas 4 y 9, también se presentan espectros en los que se consideran dos condiciones de interacción suelo-estructura. Se supuso que la cimentación es un cajón con $R_c=7$ m que sostiene una estructura de 7 m de altura efectiva. Al igual que en el ejemplo de los puentes vehiculares de la sección 4.2, la cimentación se idealizó apoyada directamente sobre el terreno y apoyada sobre un conjunto de pilotes de fricción. En particular, la línea 7 (El Rosario - Barranca del Muerto) no se estudió porque está localizada a decenas de metros de profundidad en las zonas de transición y de terreno firme. Ante estas condiciones, es razonable esperar que las ordenadas espectrales de respuesta sean menores que las que, típicamente, se esperarían para la superficie libre en la zona de terreno firme del valle de México.

En este estudio preliminar se encontró que existen varias estaciones en las que podrían esperarse ordenadas espectrales mayores que las que se obtuvieron a partir de las aceleraciones registradas en el sitio SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (el valor espectral máximo fue $S_{a_{max}} = 1$ g para el periodo estructural $T_e = 2$ s). En la tabla 2 se consignan los resultados más relevantes.

También pueden identificarse algunas estaciones en donde se presentan grandes ordenadas espectrales para periodos estructurales entre 0.9 y 1.3 s. Este hecho es de gran importancia, ya que en la ciudad de México es mayor el número de estructuras con periodos fundamentales en este intervalo que aquellas con periodos iguales o mayores a 2 s. En particular para las estaciones Ermita y Potrero se tiene $S_{a_{max}} = 1.0$ g, mientras que para las estaciones Etiopía, Basílica y La Villa se tienen ordenadas máximas alrededor de $S_a = 0.8$ g. Finalmente, se observó que los efectos de interacción suelo-estructura en las estaciones elevadas no es muy significativo, aunque podrían presentarse incrementos en el periodo estructural superiores al 20 % (por ejemplo en las estaciones Bondonjito y Consulado).

Después de estos resultados generales, se habrá de profundizar y detallar este estudio a fin de determinar cuáles serían los coeficientes óptimos para el diseño sísmico de esta magna

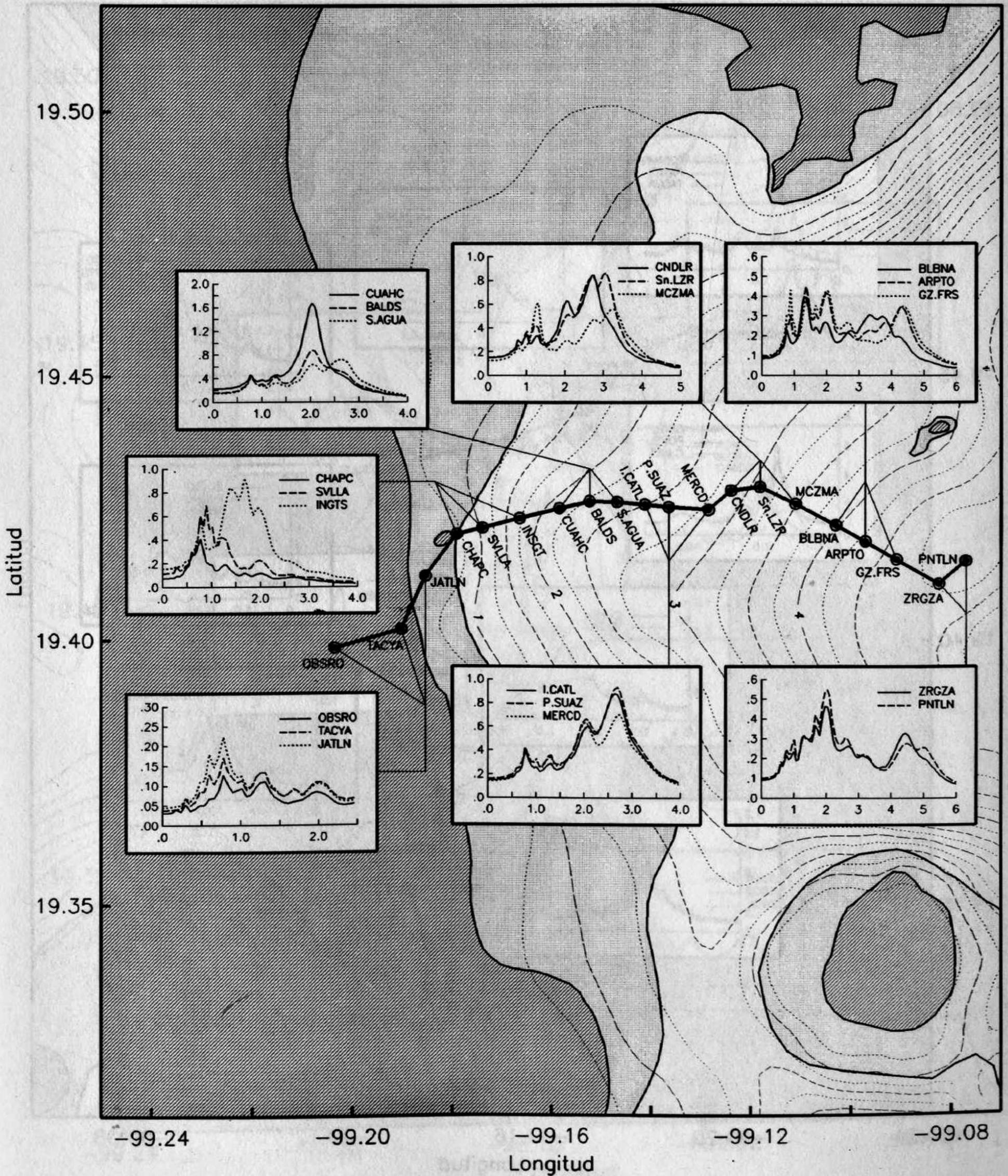


Figura 9. Espectros de respuesta para las estaciones de la Línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México. Se indican algunas curvas de isoperiodos dominantes del terreno como referencia adicional.

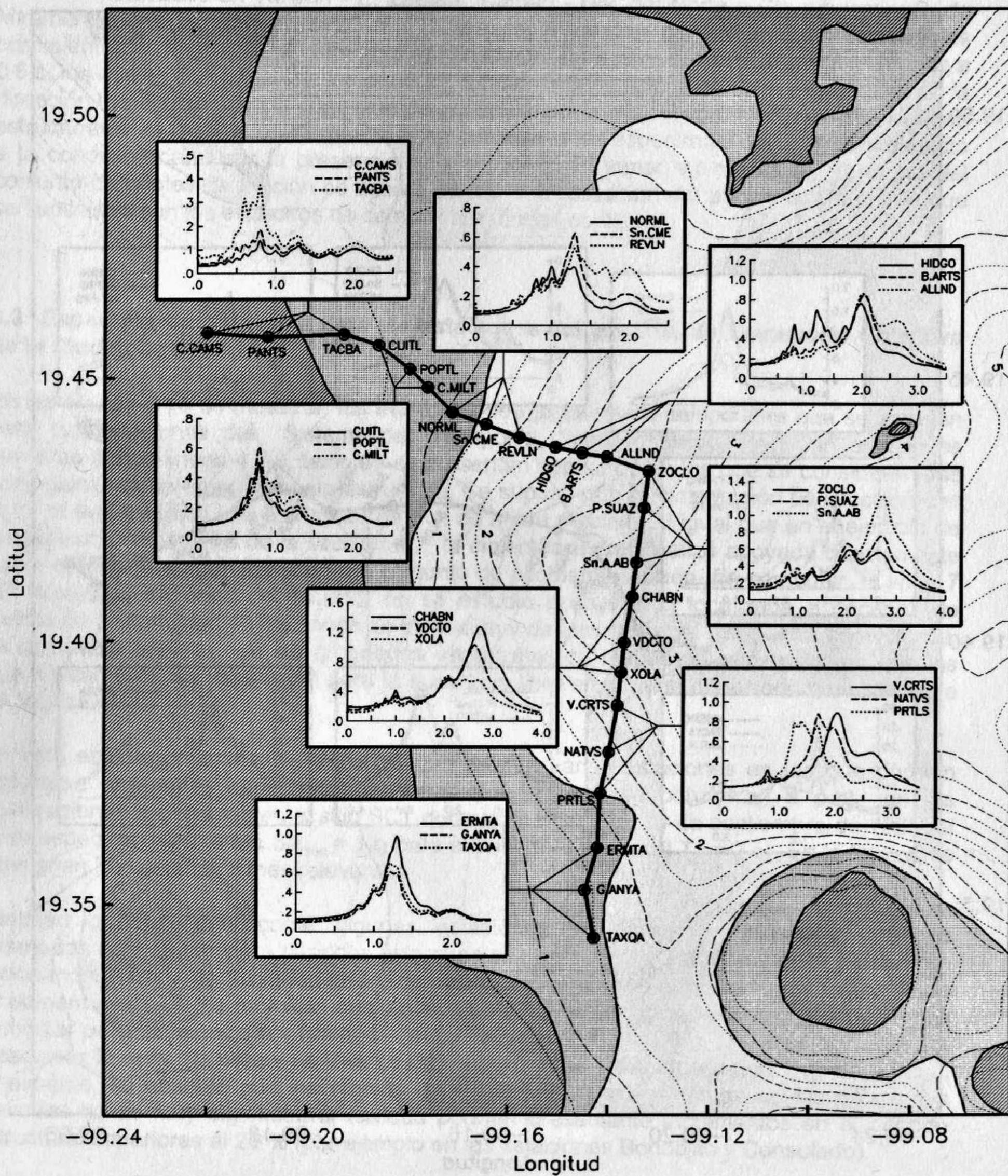


Figura 10. Igual que la figura 9, pero para la Línea 2.

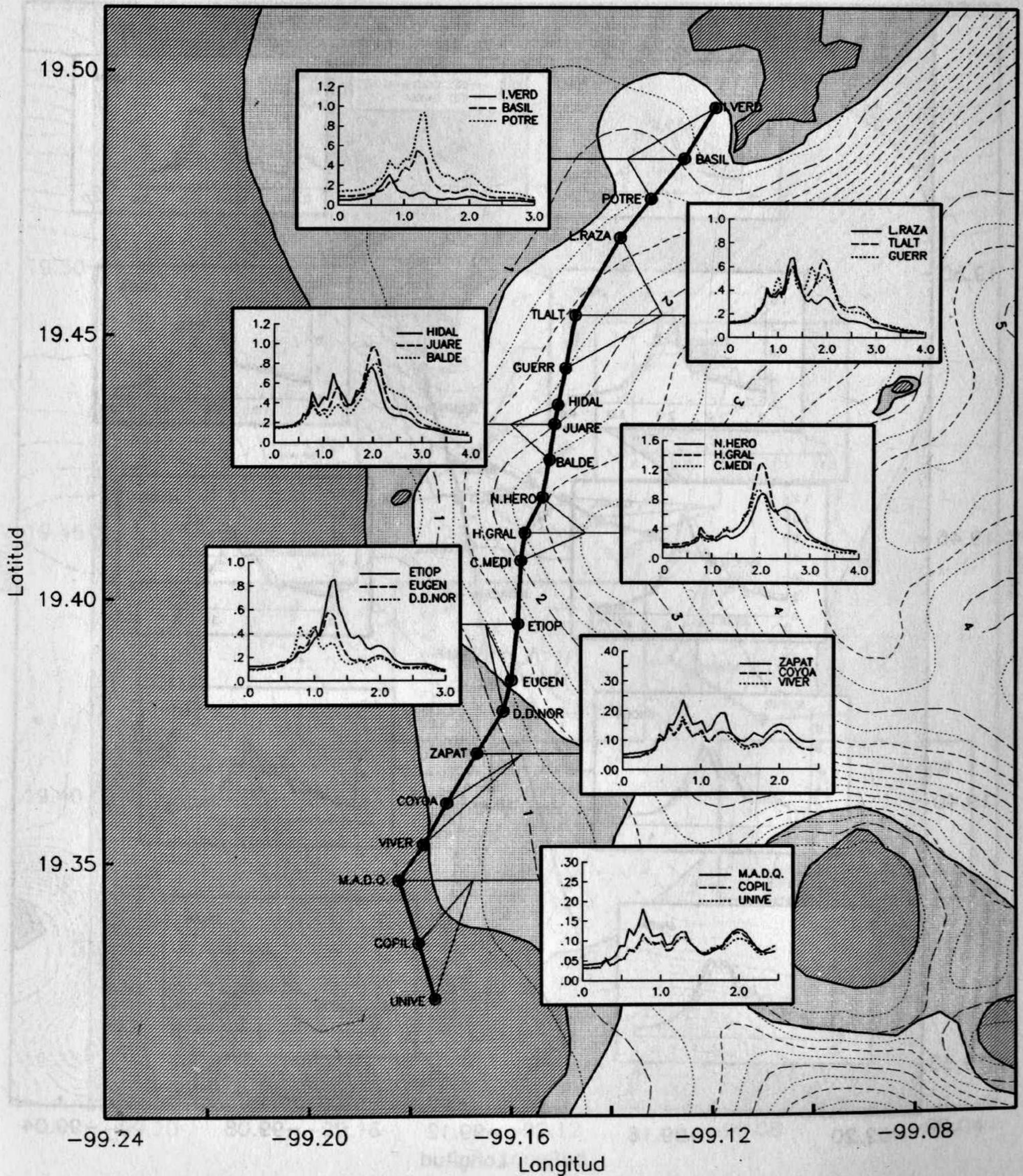


Figura 11. Igual que la figura 9, pero para la Línea 3.

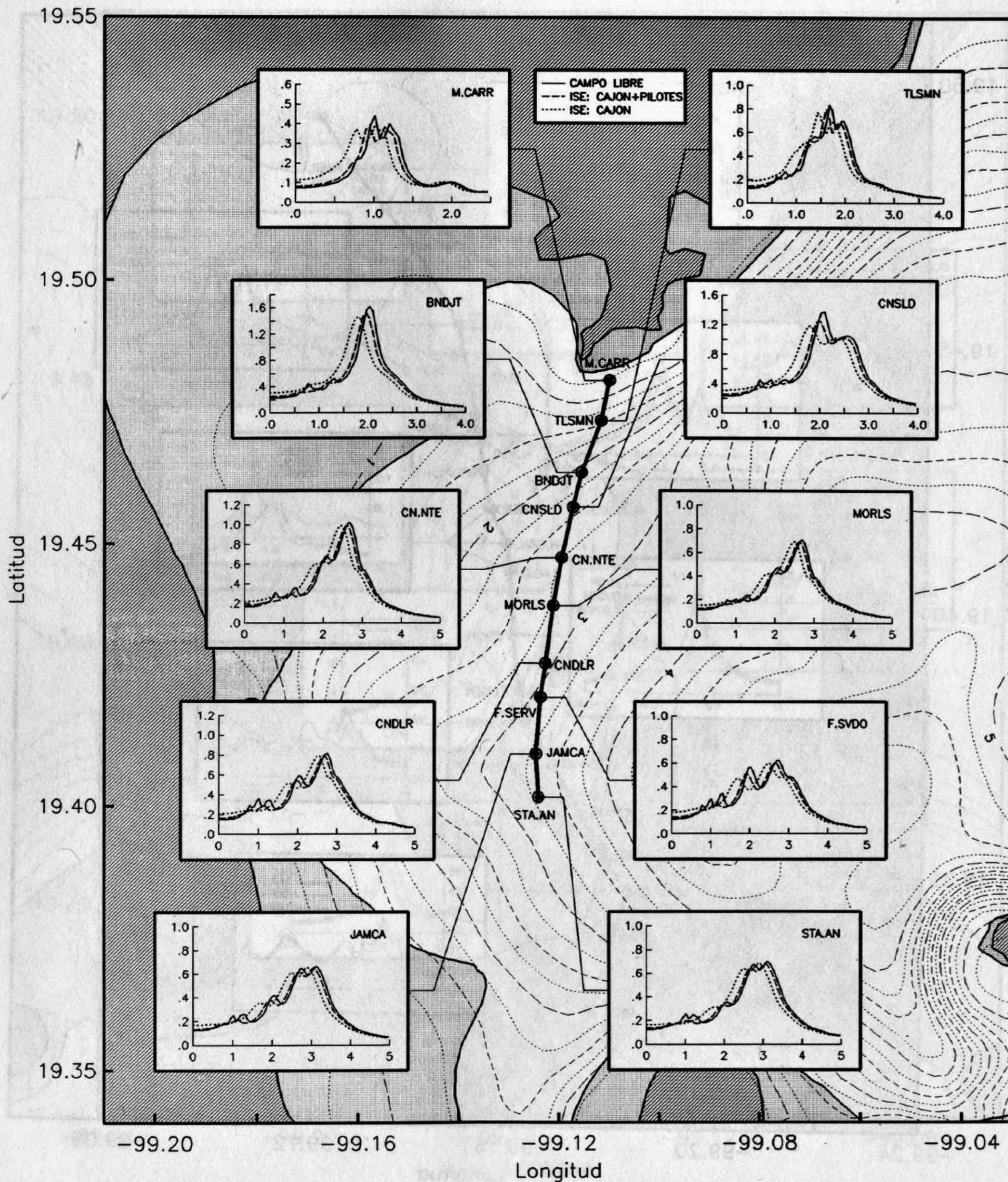


Figura 12. Igual que la figura 9, pero para la Línea 4. En adición se indican los espectros de respuesta para dos condiciones de interacción suelo-estructura.

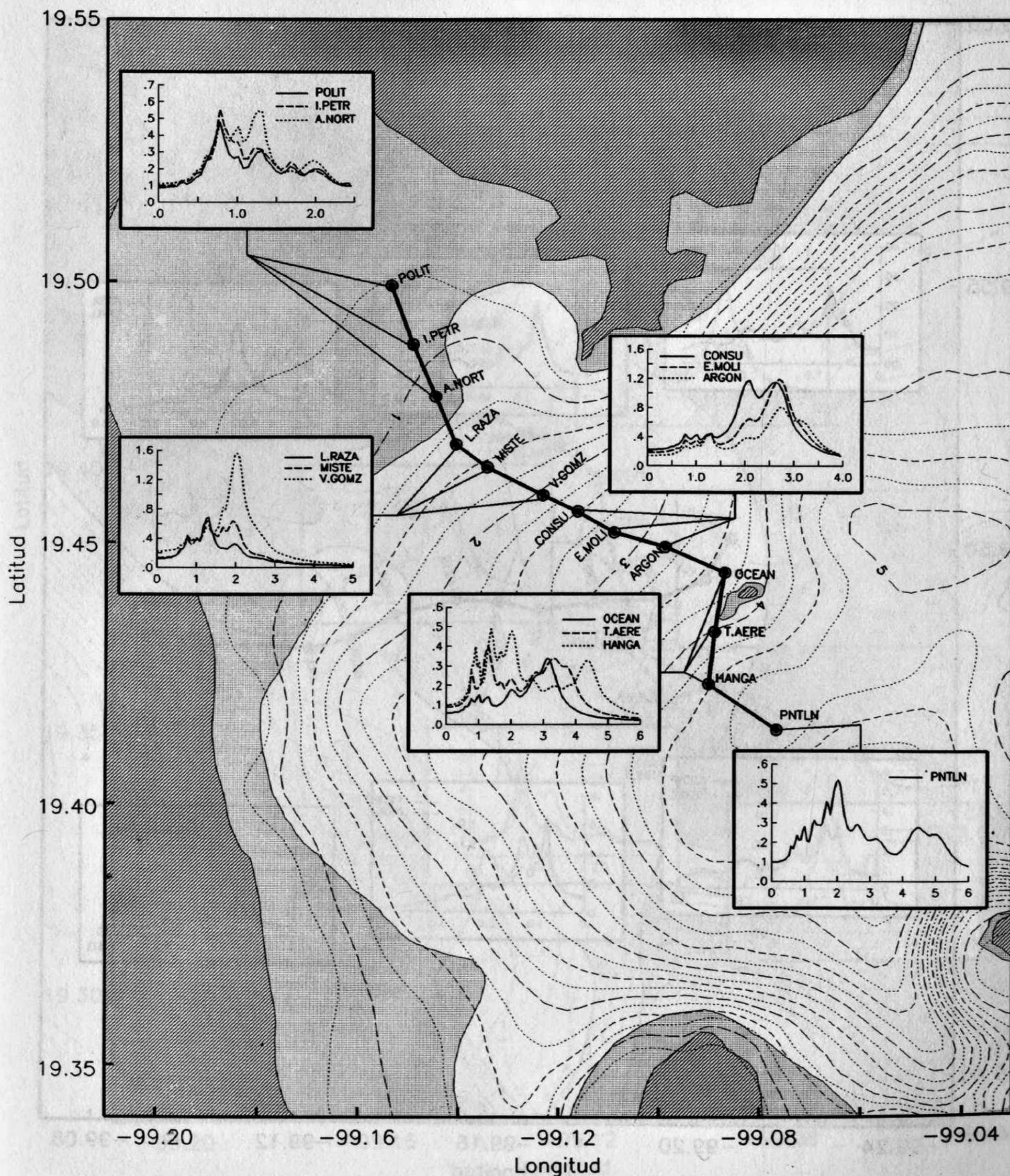


Figura 13. Igual que la figura 9, pero para la Línea 5.

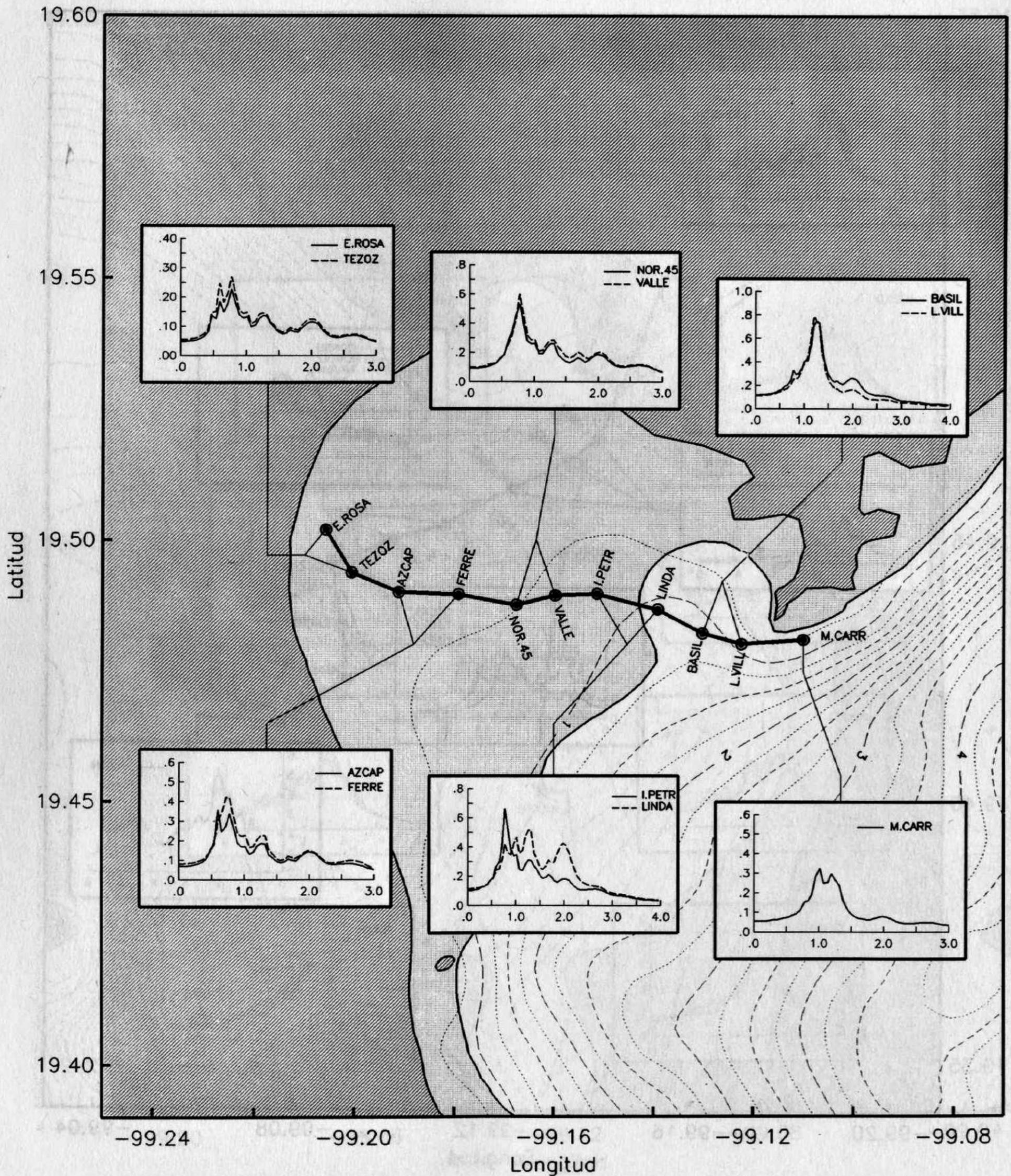


Figura 14. Igual que la figura 9, pero para la Línea 6.

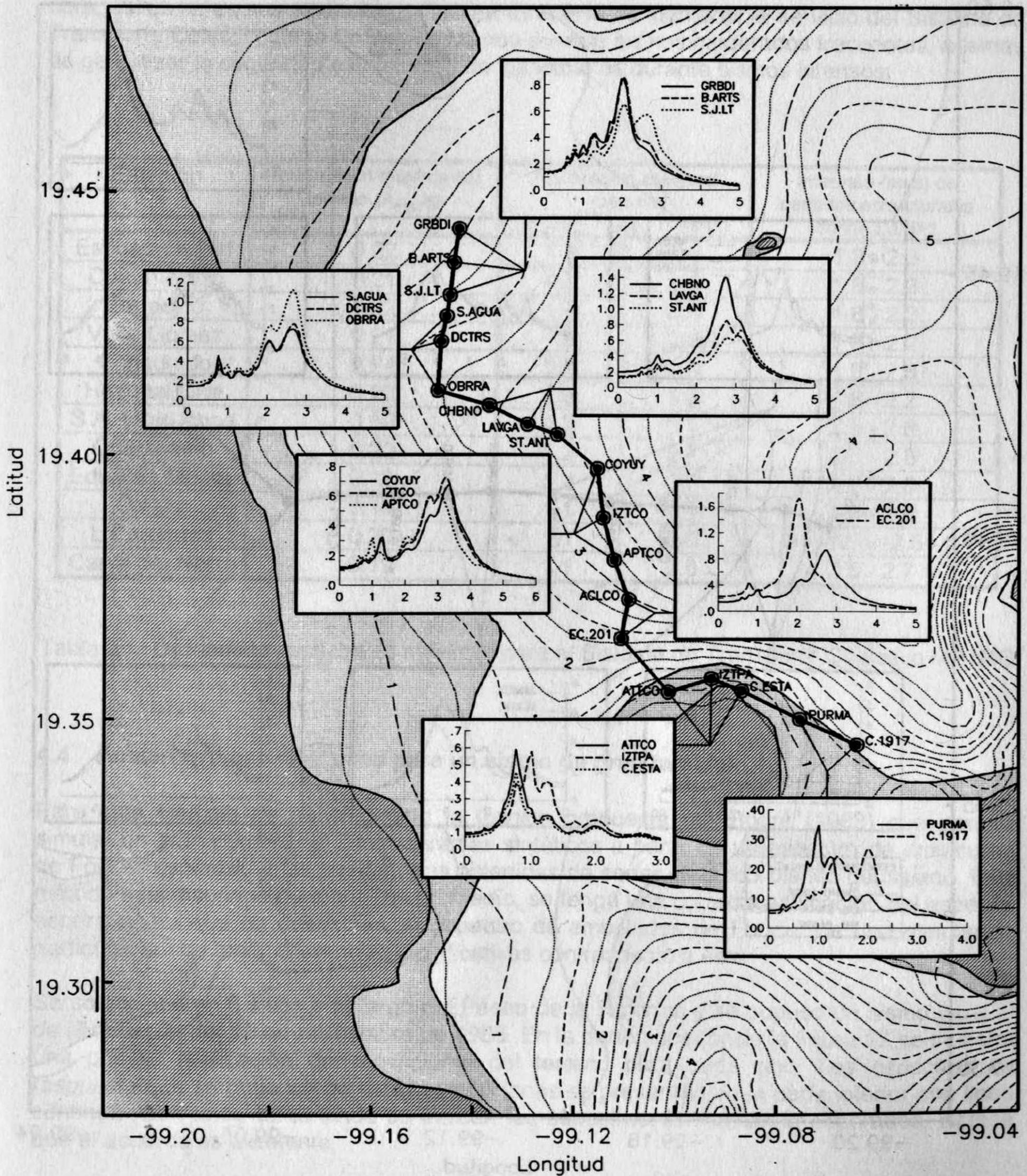


Figura 15. Igual que la figura 9, pero para la Línea 8.

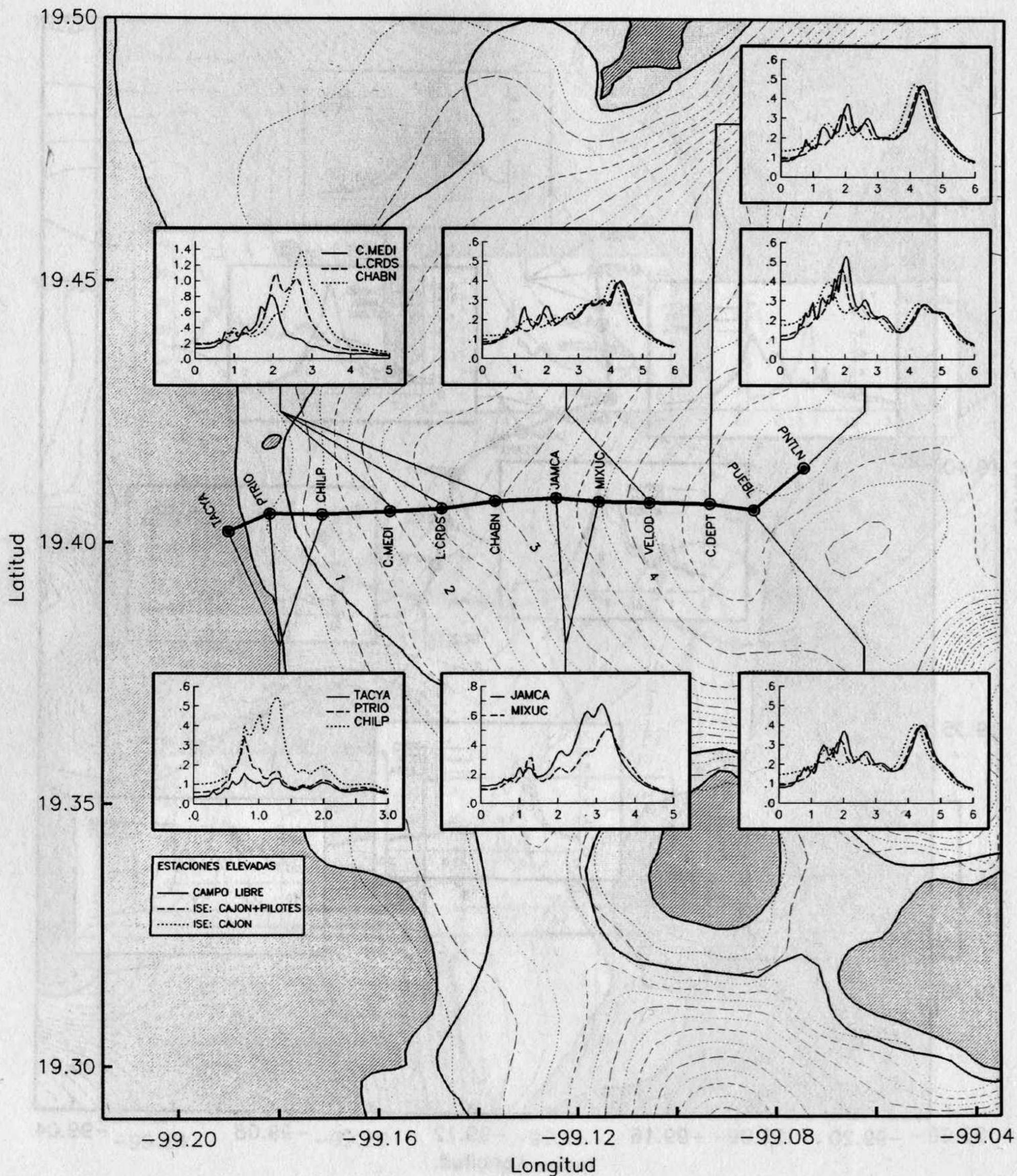


Figura 16. Igual que la figura 9, pero para la Línea 9. Para las estaciones Velódromo, Ciudad Deportiva, Puebla y Pantitlán, se consideraron dos condiciones de interacción suelo-estructura.

obra, así como de sus extensiones futuras. El interés es mantener el servicio del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México durante sismos moderados frecuentes, además de garantizar la seguridad estructural y de los usuarios durante sismos intensos.

Estación	Aceleración máxima del terreno ($A_{m\acute{a}x}/g$)	Aceleración espectral máxima		Intervalo (en s) de periodos estructurales donde $S_a/g > 1$
		$A_{m\acute{a}x}/g$	en T_e (s)	
Escuadrón 201	0.22	1.7	2.0	1.8 - 2.3
Cuauhtémoc	0.21	1.7	2.0	1.8 - 2.3
Bondojoito	0.22	1.6	2.0	1.8 - 2.2
Valle Gómez	0.21	1.6	2.0	1.8 - 2.2
Consulado	0.24	1.4	2.0	1.8 - 2.8
Hospital Gral	0.20	1.3	2.0	1.8 - 2.2
S Antonio Abad	0.19	1.2	2.7	2.5 - 2.8
Chabacano	0.20	1.2	2.7	2.5 - 2.8
Eduardo Molina	0.19	1.2	2.7	2.5 - 2.8
Obrera	0.19	1.1	2.7	2.6 - 2.8
L Cárdenas	0.20	1.1	2.0	1.9 - 2.2 y 2.5 - 2.7
Canal del Norte	0.19	1.1	2.6	2.5 - 2.7

Tabla 2. Ordenadas espectrales máximas para el Sistema de Transporte Colectivo METRO

4.4 Acelerogramas sintéticos para un sismo de gran tamaño

Para este ejemplo se ha empleado la técnica propuesta por Boore (1983) que permite simular un gran número de acelerogramas sintéticos a partir de un espectro de amplitudes de Fourier esperado y fases aleatorias obtenidas de series de ruido blanco gaussiano. Este método está diseñado para que, en promedio, se tenga una correcta estimación del espectro esperado, aunque en ocasiones, el espectro de amplitudes de Fourier de una simulación particular puede tener diferencias significativas con respecto a éste.

Se seleccionaron 6 sitios a lo largo del Paseo de la Reforma y se supuso un sismo igual al de Michoacán del 19 de septiembre de 1985. En la parte superior de la figura 17 se muestra una posible realización del movimiento del terreno para cada sitio. Los *espectros de respuesta* que se obtienen de estas simulaciones se presentan en la parte inferior con línea continua. Con línea discontinua se indican los espectros de respuesta esperados. Nótese que el acuerdo es excelente.

Con estos resultados se ilustra el poder predictivo del procedimiento desarrollado para estimar series de tiempo en sitios con coordenadas arbitrarias. En particular, las series de tiempo de aceleraciones son de gran utilidad para el análisis dinámico de estructuras con

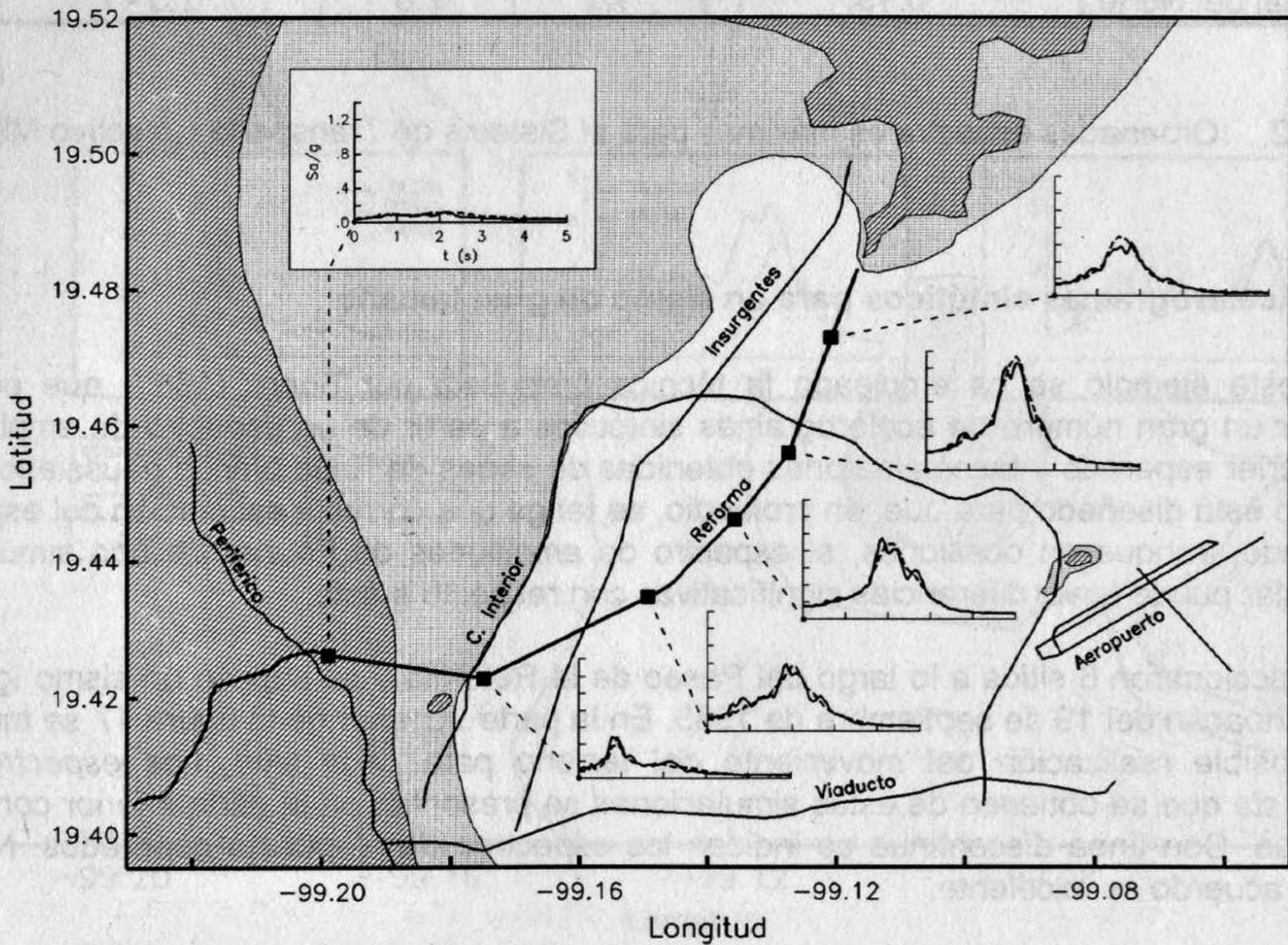
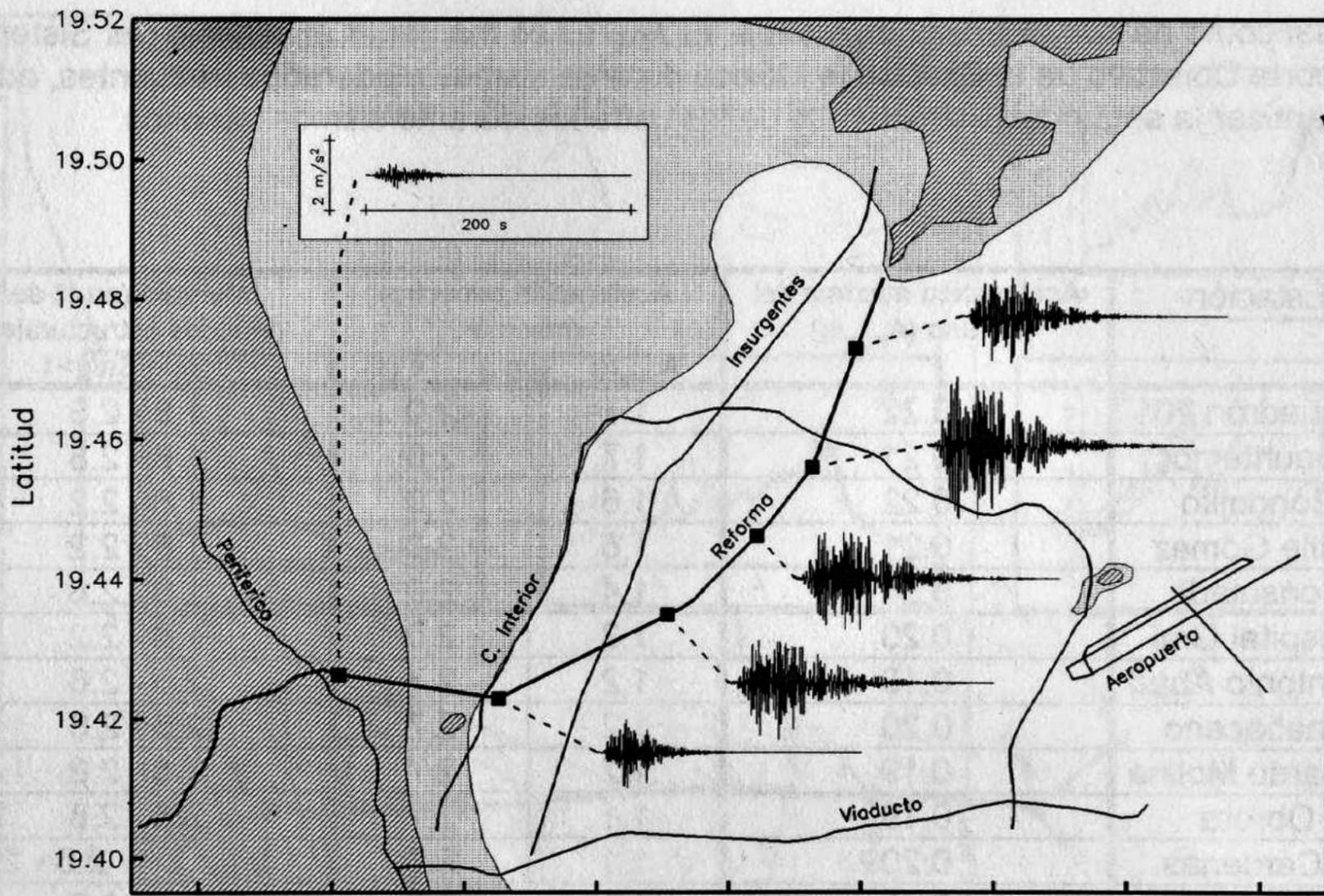


Figura 17. Acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta para varios sitios localizados sobre Paseo de la Reforma.

comportamiento inelástico. Este tipo de análisis está estipulado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTCDS, 1995).

5. ESPECTROS DE DISEÑO DE SITIO

Para la construcción de los espectros de diseño de sitio se ha propuesto un procedimiento congruente con los niveles de riesgo estipulados en las NTCDS (1995). Como el interés es obtener espectros de diseño en los que sólo se tomen en cuenta los efectos de sitio se consideraron los siguientes aspectos:

- Poner énfasis en los factores de comportamiento sísmico más comunes en la práctica del diseño estructural (por ejemplo $Q=1.5$, 2.0 y 4.0)

- No tomar en cuenta la incertidumbre en el periodo fundamental para definir el coeficiente sísmico de diseño, pero garantizar que todos los periodos estructurales estén protegidos adecuadamente. Para ello debe revisarse el producto entre los espectros de respuesta inelásticos y el factor Q' evaluado para $Q=\mu$ (ductilidad estructural), de acuerdo con la siguiente expresión (NTCDS, 1995)

$$Q' = 1 + (Q - 1)(T / T_a) \text{ si } T \leq T_a$$

$$Q' = \mu \text{ si } T \geq T_a; \text{ donde } T_a = 0.64 * T_s \text{ y } T_s \text{ es el periodo dominante del terreno}$$

- Las incertidumbres en la determinación de los periodos estructurales deben tomarse en cuenta al hacer uso de estos espectros para los análisis estructurales. Este punto se cubrirá seleccionando la ordenada espectral más desfavorable en el intervalo de incertidumbres del periodo en estudio. El intervalo de incertidumbre mínimo debe cubrir la desviación estándar estadística que se tiene en la determinación de las ordenadas espectrales inelásticas. Para ello se propone hacer uso de una familia de acelerogramas sintéticos correspondientes a posibles realizaciones de un sismo postulado. En términos generales, se encontró que estas incertidumbres son del orden del 10% (CIS, 1996).

Tomando en cuenta estas indicaciones, se construyó un espectro de diseño para una estructura instrumentada. Esta estructura se localiza sobre la Av. Reforma, a pocas decenas de metros de la frontera entre las zonas de lago y de transición, de acuerdo con la zonificación geotécnica oficial. Con los registros de algunos temblores se construyeron las FTS de acuerdo con los lineamientos descritos en la sección 3.2. Se postuló como sismo de diseño el temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985. El espectro de diseño para este sitio se ilustra en la figura 18 con línea gruesa continua. Con el trazo más fino se indican los espectros de respuesta inelásticos multiplicados por el factor $Q'=1.5$ (línea continua), 2 (línea discontinua) y 4 (línea punteada). Estos espectros son los promedios de los espectros inelásticos obtenidos de una familia de acelerogramas sintéticos simulados,

tomando en cuenta las propiedades dinámicas del terreno y las características del sismo de diseño. Con línea media punteada se indica el espectro de respuesta elástico promedio.

Si se protegen los periodos estructurales cercanos al periodo dominante del terreno ($T_s=1.2$ s), la meseta espectral alcanza un valor 12% por encima del coeficiente sísmico que se estipula en el reglamento para la zona del lago. Al hacer uso de estos espectros en el análisis estructural convencional, el ancho de la meseta espectral debe incrementarse para tomar en cuenta las incertidumbres en la determinación de los periodos estructurales, ya que estas no se tomaron en cuenta para definir el coeficiente sísmico de diseño. Nótese que estas incertidumbres son independientes de aquellas relacionadas con el cálculo de las ordenadas espectrales inelásticas. Por ello, la incertidumbre neta que debe considerarse para el empleo de espectros de diseño así contruidos, se determinará mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres debidas a: a) la determinación del periodo fundamental estructural y b) el cálculo de las ordenadas espectrales inelásticas.

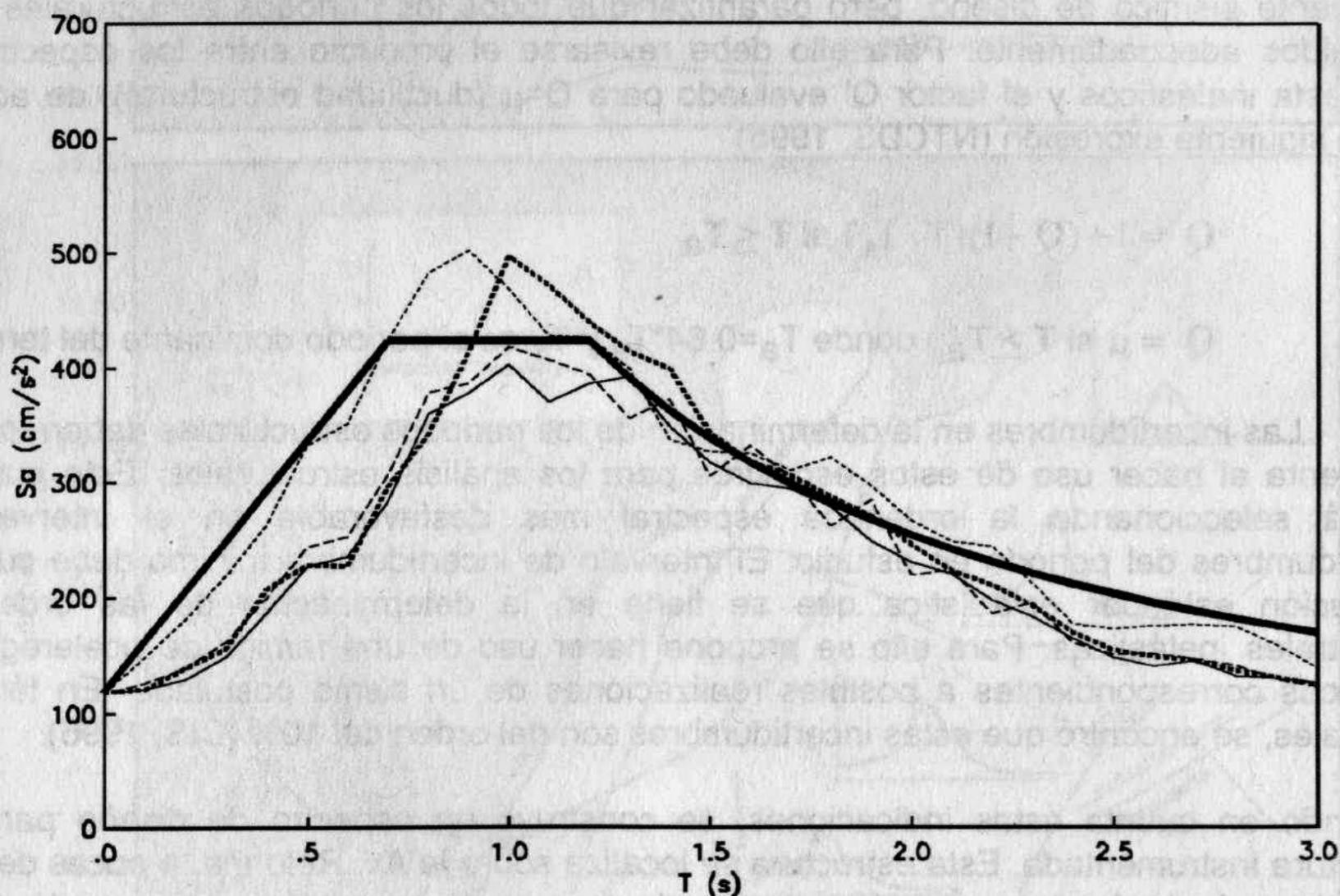


Figura 18. Espectro de diseño (línea gruesa continua) para el sitio en estudio. Con el trazo más fino se indican los espectros de respuesta inelásticos multiplicados por el factor $Q'=1.5$ (línea continua), 2 (línea discontinua) y 4 (línea punteada). Con línea media punteada se indica el espectro de respuesta elástico promedio.

En particular, los registros de la azotea de esta estructura permitieron estimar que el periodo estructural fundamental es cercano a 2 s. Si se acepta una incertidumbre del 10% en esta determinación, y del 10% en el cálculo de las ordenadas espectrales, se tendría una incertidumbre neta del 15%. Para este valor, el intervalo de periodos estructurales que debe protegerse satisfactoriamente es $1.7 \leq T_e \leq 2.3$. De acuerdo con esto, la meseta espectral debe fijarse en $S_a/g=0.31$.

En conclusión, el haber instrumentado esta estructura ha sido una decisión excelente. El análisis de los registros de aceleración que se obtuvieron en un lapso de dos años, permitió sentar las bases para considerar una reducción racional del coeficiente sísmico reglamentario sin menoscabar la seguridad estructural. Por otro lado, el análisis de las aceleraciones registradas en el sótano del edificio, permitieron identificar substanciales reducciones del movimiento para las altas frecuencias. En principio, estas reducciones se reflejarían principalmente en la respuesta dinámica de los modos superiores estructurales. Este efecto reductivo, que se debe a la interacción cinemática entre el suelo y la cimentación, no se tomó en cuenta, ya que no existen evidencias experimentales suficientes o modelos teóricos que permitan sustentar estas reducciones en las normas del diseño estructural. No obstante, sus implicaciones en la práctica de la construcción se traducirían en criterios de diseño más realistas y racionales. Por ello, se han iniciado estudios detallados que permitan, en breve plazo, incorporar estos efectos en el reglamento para la construcción de obras civiles en el valle de México.

6. ESCENARIOS DE ALTO RIESGO SÍSMICO PARA EL VALLE DE MÉXICO

Para inferir los niveles de intensidad y de daño en estructuras del valle de México se calcularon las distribuciones de las aceleraciones máximas del terreno (figura 19) y de las fuerzas sísmicas asociadas a los periodos estructurales $T_e = 0.3 \pm 0.1$ s (figura 20), 1.0 ± 0.3 s (figura 21) y 2 ± 0.5 s (figura 22). Estas distribuciones se ilustran en mapas que corresponden a una gran porción del valle de México. Para estos cálculos se consideraron los sismos especificados en la figura 4. Las observaciones más relevantes son las siguientes:

- Las aceleraciones máximas del terreno se presentan ante un sismo originado en la brecha de San Marcos con $M=8.1$. Estas alcanzan valores superiores a 0.35 g en las zonas de la ciudad donde los periodos dominantes del terreno están alrededor de 2.5 s. Recuérdese que en el sismo del 19 de septiembre de 1985, la aceleración máxima registrada en el sitio SCT fue 0.17g, es decir, la mitad.

- Para periodos estructurales cercanos a 0.3 s, las intensidades sísmicas máximas se presentan para el sismo postulado de fallamiento normal. Estas intensidades alcanzan valores superiores a 0.5 g en algunas porciones del valle, donde los periodos dominantes del terreno oscilan alrededor de 1.0 s. Una tendencia similar se observa para periodos estructurales cercanos a 1.0 s. En este caso, las intensidades sísmicas superan el valor 1.0g.

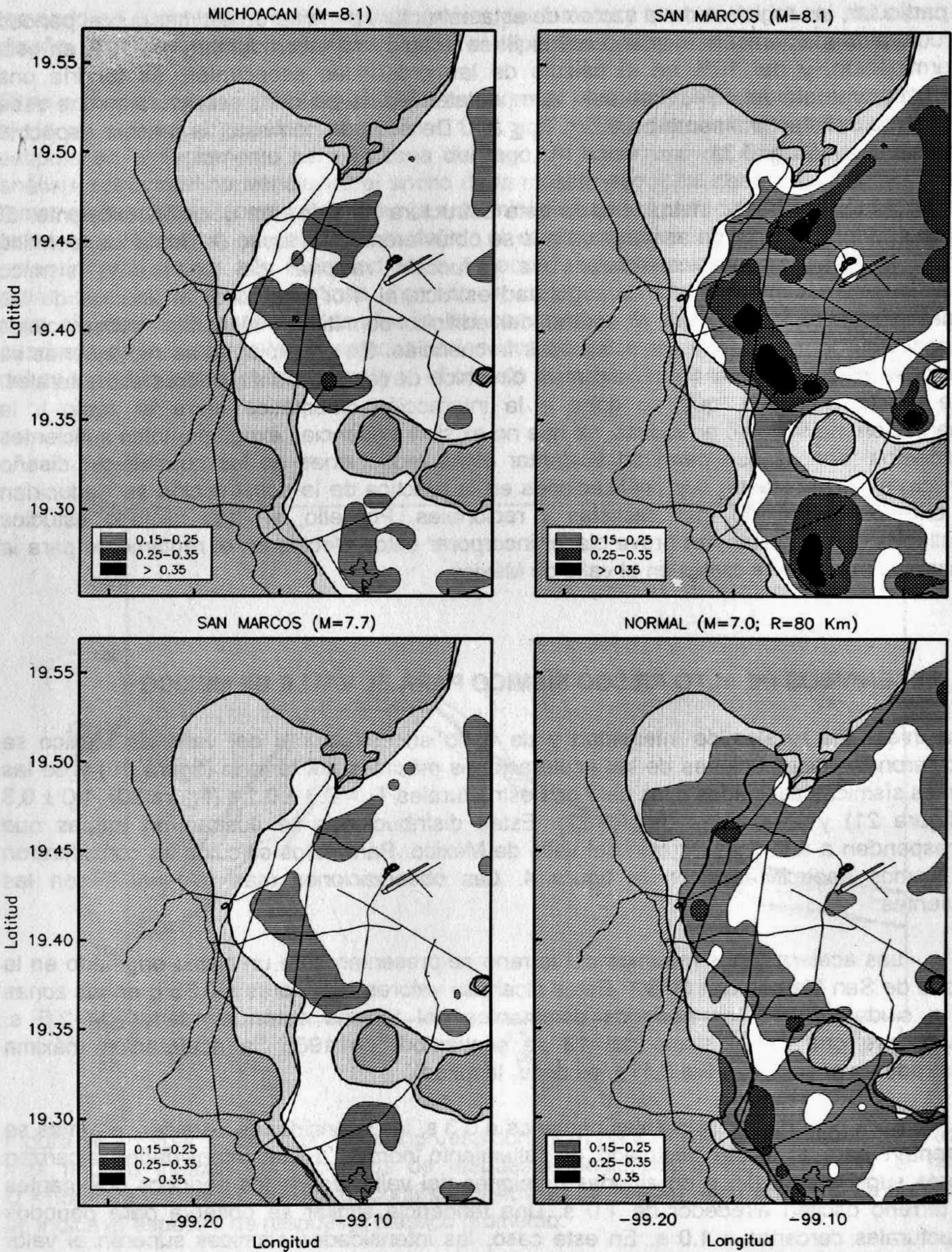


Figura 19. Distribución de aceleraciones máximas del terreno (S_a/g) en el valle de México, correspondientes a posibles sismos intensos originados en las costa del Pacífico Mexicano y en el interior del continente.

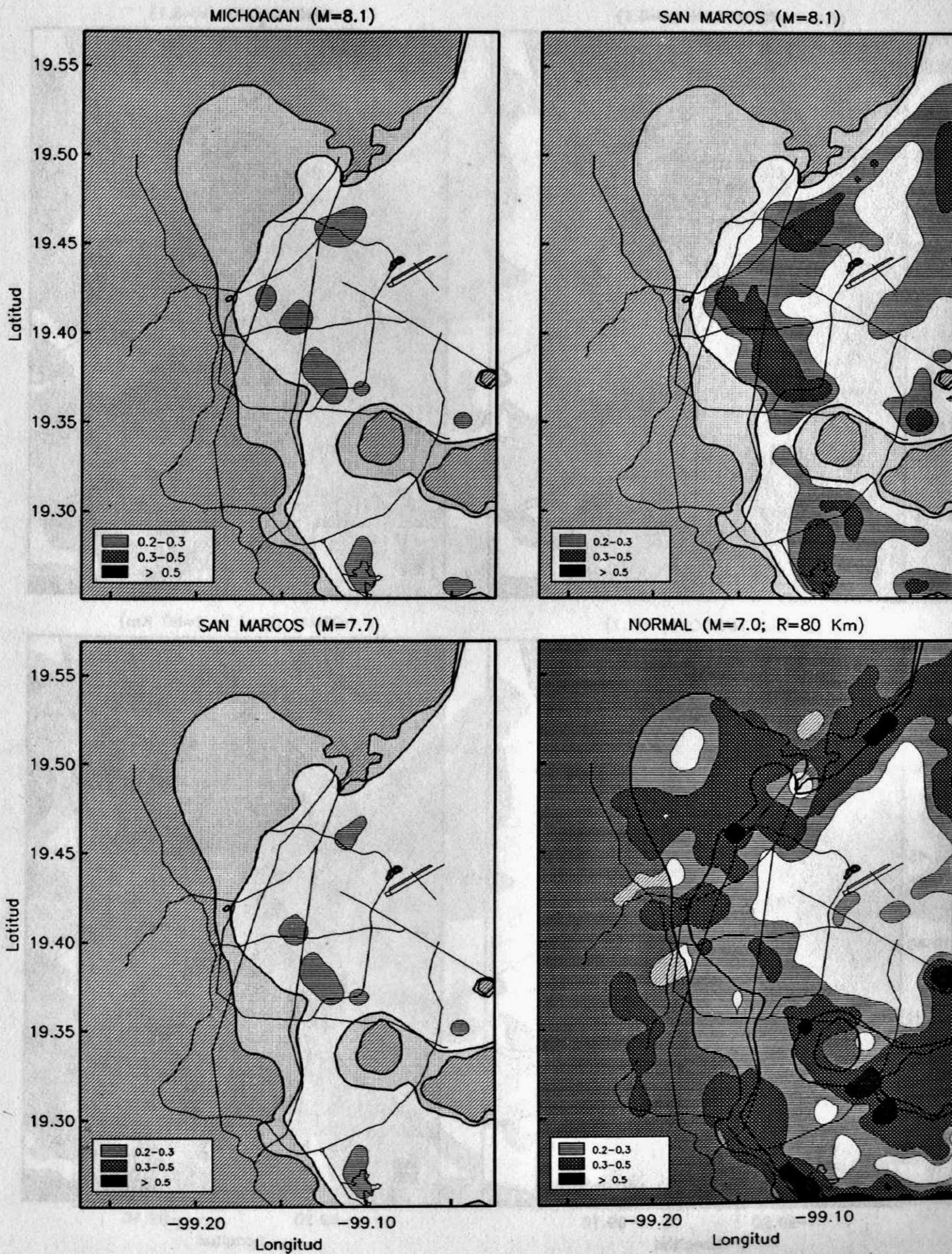


Figura 20. Distribución de aceleraciones espectrales (S_a/g) para periodos estructurales $T_e = 0.3 \pm 0.1$ s en el valle de México, correspondientes a posibles sismos intensos originados en las costa del Pacífico Mexicano y en el interior del continente.

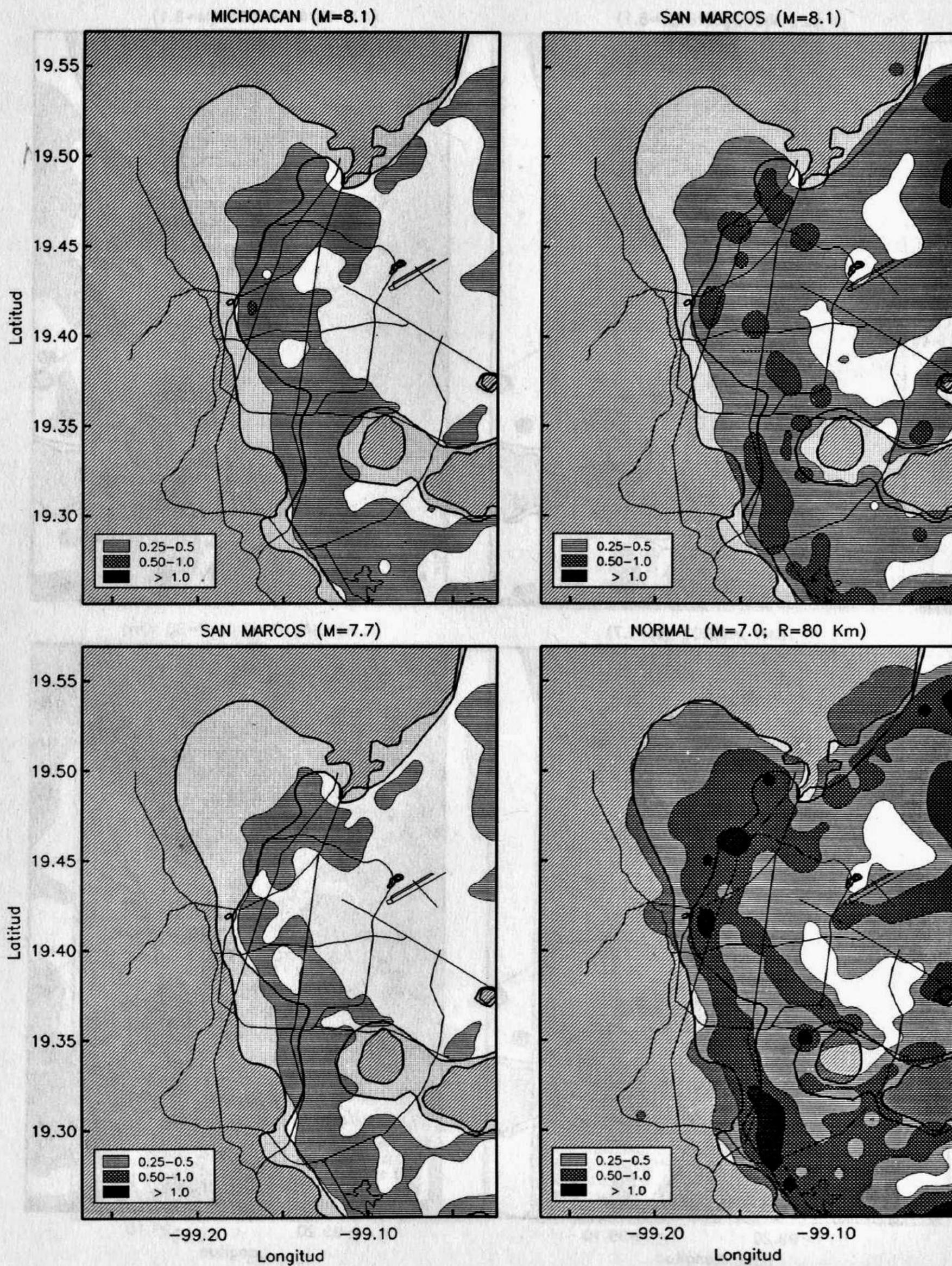


Figura 21. Igual que la figura 20 pero para $T_e = 1.0 \pm 0.3$ s

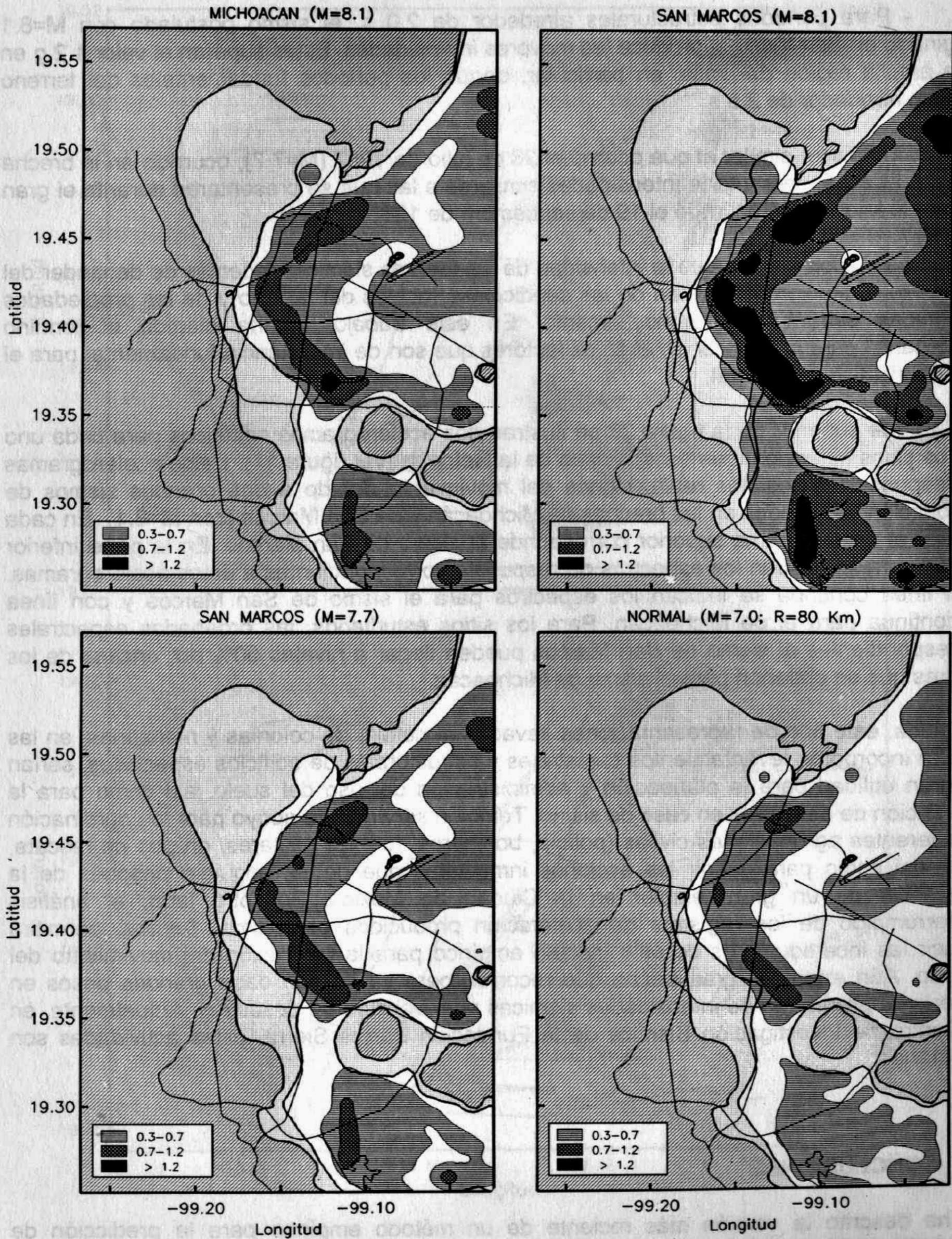


Figura 22. Igual que la figura 20 pero para $T_e = 2.0 \pm 0.5$ s

- Para periodos estructurales alrededor de 2.0 s, el sismo postulado con $M=8.1$ originado en San Marcos, produce las mayores intensidades. Estas superan el valor 1.2 g en una amplia región del valle, en particular, donde los periodos fundamentales del terreno oscilan alrededor de 2.5 s.

- Un sismo similar al que ocurrió el 28 de julio de 1957 ($M=7.7$), ocurrido en la brecha de San Marcos, presentaría intensidades similares a las que se presentaron durante el gran sismo de Michoacán ocurrido el 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$).

Estos resultados indican que la intensidad de las fuerzas sísmicas, además de depender del sismo de excitación, dependen de las condiciones locales del terreno y de las propiedades dinámicas estructurales, principalmente. En este trabajo, se ha elegido el término "escenario" para incorporar en él estos factores que son de importancia fundamental para el diseño sísmico estructural.

En la parte superior de la figura 23 se ilustran dos acelerogramas sintéticos para cada uno de los sitios seleccionados sobre Paseo de la Reforma (ver figura 17). Estos acelerogramas corresponden a posibles realizaciones del movimiento debido a dos grandes sismos de subducción, originados en las brechas de Michoacán y de San Marcos (con $M=8.1$). En cada pareja, el acelerograma superior corresponde al sismo de San Marcos. En la parte inferior de la figura se ilustran los espectros de respuesta correspondientes a estos acelerogramas. Con línea continua se indican los espectros para el sismo de San Marcos y con línea discontinua para el de Michoacán. Para los sitios estudiados, las ordenadas espectrales correspondientes al sismo de San Marcos pueden llegar a niveles 50% por encima de los valores que se obtienen para el sismo de Michoacán.

Sin duda, este tipo de representaciones llevadas al detalle de colonias y manzanas, en las que se incorporen levantamientos catastrales y estructurales de edificios específicos, serían de gran utilidad para la planeación y administración del uso del suelo, así como para la prevención de desastres en caso de sismo. También servirían de apoyo para la coordinación de diferentes agrupaciones civiles (policía, bomberos, fuerzas militares, grupos de rescate, etc.), así como para definir las acciones inmediatas que deben seguirse después de la ocurrencia de un gran temblor en la Ciudad de México. Por otro lado, el análisis ininterrumpido de los registros de aceleración producidos por sismos futuros, permitirá reducir las incertidumbres de este modelo empírico para la predicción del movimiento del terreno. Aún existe un gran trecho que recorrer, pero ya se han dado grandes pasos en materia de predicción de intensidades sísmicas y prevención de desastres. Actualmente, en el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Barros Sierra, estas actividades son prioritarias.

7. CONCLUSIONES

Se ha descrito la versión más reciente de un método empírico para la predicción de *espectros de respuesta*, elásticos e inelásticos, para sitios con coordenadas conocidas

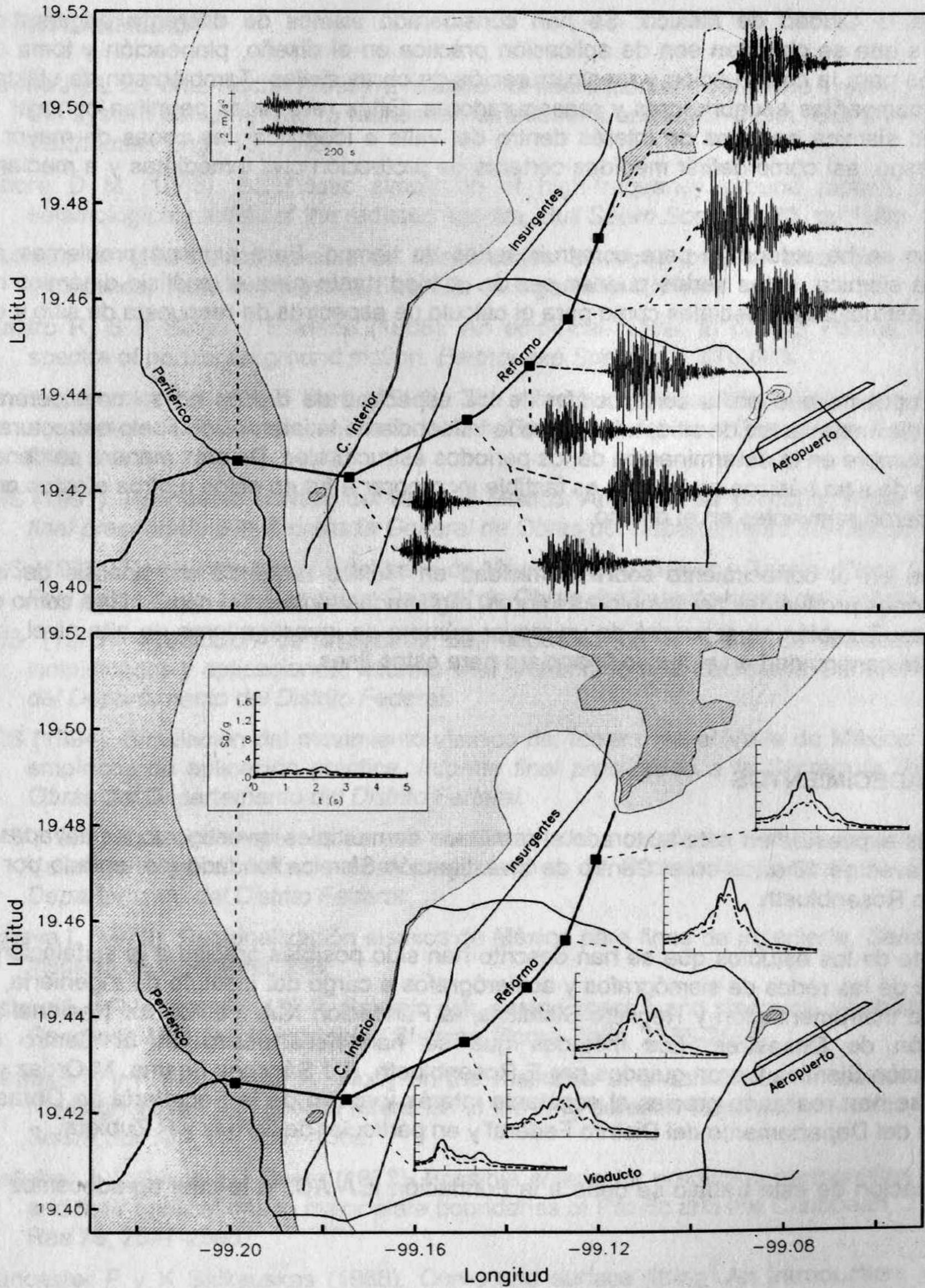


Figura 23. Parte superior: Acelerogramas sintéticos para dos sismos de subducción (M=8.1), generados en las brechas de San Marcos (arriba) y de Michoacán (abajo).

dentro de la Ciudad de México. Se han considerado sismos de diferente origen. Los resultados que se obtienen son de aplicación práctica en el diseño, planeación y toma de decisiones para la construcción y reestructuración de obras civiles. También son de utilidad para las compañías aseguradoras y reaseguradoras. Estos resultados permiten conocer la intensidad sísmica en sitios de interés dentro del valle e identificar las zonas de mayor o menor riesgo, así como definir medidas certeras de protección civil inmediatas y a mediano plazo.

El método se ha extendido para construir series de tiempo. Para algunos problemas de ingeniería sísmica, estas series pueden ser de utilidad, tanto para el análisis dinámico no lineal de estructuras especiales como para el cálculo de espectros de respuesta de sitio y de diseño.

Se ha propuesto que en la construcción de los espectros de diseño no se consideraran efectos adicionales a los de sitio, tales como la influencia de la interacción suelo-estructura y la incertidumbre en la determinación de los periodos estructurales. De esta manera se tienen espectros de sitio básicos en los que es factible incorporar a futuro estos u otros efectos que se consideren relevantes en el diseño.

El avance en el conocimiento sobre sismicidad en México requerirá del análisis de las aceleraciones producidas por temblores futuros, registradas tanto en el campo libre como en estructuras. También se requerirá de un mayor número de investigadores de alto nivel, así como de la continuidad en el apoyo financiero para estos fines.

8. AGRADECIMIENTOS

Los temas expuestos en este texto son el resultado de múltiples investigaciones llevadas a cabo a través de 10 años en el Centro de Investigación Sísmica fundado y orientado por el Dr. Emilio Rosenblueth.

Gran parte de los estudios que se han descrito han sido posibles gracias a la instalación y eficiencia de las redes de sismógrafos y acelerógrafos a cargo del Instituto de Ingeniería, el Centro de Instrumentación y Registro Sísmicos, la Fundación ICA y el Centro Nacional de Prevención de Desastres. Los métodos que se han desarrollado en el Centro de Investigación Sísmica fueron guiados por E Rosenblueth, F J Sánchez-Sesma, M Ordaz y J Avilés y se han realizado gracias al constante interés y apoyo de la Secretaría de Obras y Servicios del Departamento del Distrito Federal y en particular de D Ruiz y R Zubieta.

La publicación de este trabajo se debe a la Fundación ICA AC., a la cual agradecemos su apoyo.

9. REFERENCIAS

- Avilés J y L E Pérez-Rocha (1996). Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth. *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, **15**, 11-27.
- Boore D M (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull Seism Soc Am.*, **73**, pp 1865-1894.
- Bufaliza M (1984). Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos mexicanos, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería UNAM.
- Castro R, S K Singh y E Mena (1988). An empirical model to predict Fourier amplitude spectra of horizontal ground motion, *Earthquake Spectra*, **4**, 675-686.
- Chávez-García F J y P Y Bard (1994). Site effects in Mexico City eight years after the september 1985 Michoacan earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Eng* **13**, 229-248..
- CIS (1991). Respuesta sísmica del valle de México: Aplicaciones y Teoría. Parte I. *Informe final presentado a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
- CIS (1992). Respuesta sísmica del valle de México: Aplicaciones y Teoría. Parte II. *Informe final presentado a la Secretaria General de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
- CIS (1993). Predicción de espectros de respuesta en el Valle de México: métodos simplificados y aplicaciones. *Informe final presentado a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
- CIS (1994). Simulación del movimiento sísmico del terreno en el Valle de México: métodos empíricos de aplicación práctica. *Informe final presentado a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
- CIS (1995). Criterios empíricos para la simulación del movimiento sísmico del terreno en el Valle de México. *Informe final presentado a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
- Esteva L (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. *Serie Azul del Instituto de Ingeniería*, 246.
- Esteva L y R Villaverde (1974). Seismic risk, design spectra and structural reliability, *Mem V Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, Roma, Italia, 2586-2597.
- Kawase H y K Aki (1989). A study on the response of a soft basin for incident S, P and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City. *Bull Seism Soc Am*, **79**, 1361-1382.
- Kelleher J, L Sykes y J Oliver (1973). Possible criteria for predicting earthquakes locations and their applications to major plate boundaries of Pacific and the Caribbean, *J Geophys Res* **78**, 2547-2585.
- Lancaster P y K Salkauskas (1986). Curve and surface fitting. An introduction. Academy Press, Londres.

- Marsal, R J y M Mazari (1959). "El subsuelo de la Ciudad de México". Publicado por la UNAM en segunda edición 1969.
- McGuire R K (1978). A simple model for estimating Fourier amplitude spectra of horizontal ground acceleration, *Bull Seism Soc Am*, **68**, 803-822.
- Nishenko S P y S K Singh (1987a). The Acapulco-Ometepec, Mexico earthquakes of 1907-1982: Evidence for a variable recurrence history. *Bull Seism Soc Am*, **77**, 1359-1367.
- Nishenko S P y S K Singh (1987b). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bull Seism Soc Am*, **77**, 2095-2114.
- Ordaz M, E Reinoso, S K Singh, E Vera y J M Jara (1989). Espectros de respuesta en diversos sitios del Valle ante temblores postulados en la brecha de Guerrero, *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, México, A187-A198.
- Ordaz M y S K Singh (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City, *Bull Seism Soc Am*, **82**, 24-43.
- Ordaz M, J Arboleda y S K Singh (1993). Un nuevo método para simular acelerogramas usando registros de sismos pequeños como funciones de Green empíricas. *Mem X Congr Nal de Ing Sísmica*, Pto Vallarta, Jalisco, México.
- Ordaz M, S K Singh y A Arciniega (1994). Bayesian Attenuation regressions: an application to México City, *Geophys J Int*, **177**, 335-344.
- Pardo M y G Suarez (1995). Steep of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico, *GJ J Geophys Res*, sometido.
- Pelto C R, T A Elkins y H A Boyd (1988). Automatic contouring of irregularly spaced data, *Geophysics*, **33**, 424-430.
- Rosenblueth E, M Ordaz, F J Sánchez-Sesma y S K Singh (1989). Design Spectra for Mexico's Federal District. *Earthquake Spectra*, **5**.
- Sánchez-Sesma F J y F Luzón (1996). Can horizontal P waves be trapped and resonate in a shallow sedimentary basin?. *Geophys. Jour. Int.* **124**, 209-214.
- Singh S K, L Astiz y J Havskov (1981). Seismic gaps and recurrence period of large earthquake along the Mexican subduction zone: a reexamination, *Bull Seism Soc Am*, **71**, 827-843.
- Singh S K, J M Espindola, J Yamamoto y J Havskov (1982). Seismic potential of Acapulco-San Marcos region along the Mexican Subduction zone, *Geophys. Res. Lett.* **9**, 633-636.
- Singh S K, T Dominguez, R Castro y M Rodriguez (1984). P waveforms of large shallow earthquakes along the Mexican subduction zone, *Bull Seism. Soc Am*, **74**, 2135-2156.
- Singh S K, G Suarez y T Dominguez (1985). The Oaxaca Mexico earthquake of 1931: Lithospheric normal faulting in subducted Cocos plate, *Nature*, **317**, 56-58.

- Singh S K, E Mena, R Castro y C Carmona (1987). Empirical Prediction of ground motion in Mexico City from coastal earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **78**, 230-242.
- Singh S K y G Suarez (1988). Regional variations in the number of aftershocks ($m_b > 5.0$) of large subduction zone earthquakes ($M_w > 7.0$), *Bull Seism Soc Am*, **78**, 230-242.
- Singh S K, E Mena y R Castro (1988). Some aspects of the source characteristics and the ground motion amplification in and near Mexico City from the acceleration data of the September, 1985, Michoacan, Mexico earthquakes, *Bull Seism Soc Am* **78**, 451-477.
- Singh S K y F Mortera (1990). Source-Time functions of large Mexican subduction earthquakes, morphology of the Benioff zone and the extent of the Guerrero Gap, *J Geophys Res*, **96**, 21487-21502.
- Singh S K, A Mori, E Mena, F Kruger y R Kind (1990). Evidence for anomalous body-wave radiation between 0.3 and 0.7 Hz from the 1985 september 19 Michoacan, Mexico earthquake, *Geophys J Int*, **101**, 37-48.
- Singh S K y M Ordaz (1993). On the origin of long coda observed in the Valley of Mexico. *Bull Seism Soc Am*, **83**, 1298-1306.
- Singh S K y M Ordaz (1994). Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual. *Cuadernos de Investigación*, **18**, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Singh S K, R Quaas, M Ordaz, F Mooser, D Almora, M Torres y R Vázquez (1995). Is there truly a "hard" rock site in the Valley of Mexico?, *Geophys Res Lett*. **22**, 481-484.
- UNAM Seismology Group (1986). The september 1985 earthquakes: aftershocks distribution and history of rupture, *Geophys Res Lett*, **13**, 573-576.

FUNDACIÓN ICA es una Asociación Civil constituida conforme a las leyes mexicanas el 26 de octubre de 1986, como se hace constar en la escritura pública 21,127 pasada ante la fe del Notario número 33 del Distrito Federal, inscrita en el Registro Público de la Propiedad en la sección de Personas Morales Civiles bajo folio 12,847. A fin de adecuar a las disposiciones legales vigentes los estatutos sociales fueron modificados el 17 de octubre de 1994, como se hace constar en la escritura pública número 52,025 pasada ante la fe del Licenciado Jorge A. Domínguez Martínez, Notario Público número 140 del Distrito Federal.

Es asimismo, una institución científica y tecnológica inscrita en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 95/213 del 19 de julio de 1995.

Esta edición de "Predicción de intensidades sísmicas para el área metropolitana del Valle de México" se terminó en junio de 1996, se imprimieron 1,600 ejemplares. La edición estuvo al cuidado de Fernando O. Luna R.

Consejo Directivo de Fundación ICA.

Presidente.

Ing. Bernardo Quintana Isaac

Vicepresidentes.

Dr. José Sarukhán Kérmez

Dr. Guillermo Soberón Acevedo

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Ing. Raúl López Roldán

Director Ejecutivo.

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los Programas Operativos.

Comité de Becas.

Ing. José Manuel Covarrubias Solís

Dr. Francisco Yeomans Reyna

Ing. Miguel Ángel Parra Mena

Comité de Premios.

Dr. Luis Esteva Maraboto

M.I. Mario Ignacio Gómez Mejía

Ing. Gregorio Farias Longoria

Comité de Publicaciones.

Ing. José Iber Rojas

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

Ing. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Comité de Investigación.

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

