

01163



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**MICROZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD
DE PUEBLA**

T E S I S

PRESENTADA POR:

GABRIEL JIMENEZ SUAREZ

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

(MEC. DE SUELOS)

DIRIGIDA POR:

DR. EFRAIN OVANDO SHELLEY

CIUDAD UNIVERSITARIA 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MICROZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE PUEBLA

TESIS

PRESENTADA POR:

GABRIEL JIMENEZ SUAREZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

MECANICA DE SUELOS

DIRIGIDA POR :

Dr. EFRAIN OVANDO SHELLEY

CIUDAD UNIVERSITARIA, 1997

INDICE	1
CONTENIDO	3
DEDICATORIA	4
RESUMEN	5
CAPITULO I	
GENERALIDADES	6
1.1 INTRODUCCION	6
1.2 OBJETIVOS	7
1.3 ANTECEDENTES	7
1.4 LA REGION EN ESTUDIO	7
CAPITULO II	
GEOLOGÍA Y SISMICIDAD EN PUEBLA	9
2.1 FISIOGRAFIA	9
2.2 ROCAS DEL VALLE DE PUEBLA	9
2.3 GEOMORFOLOGIA	10
2.4 GEOLOGIA HISTORICA	10
2.5 GEOLOGIA ESTRUCTURAL	10
2.6 SISMICIDAD EN PUEBLA	11
2.7 EFECTOS SISMICOS	11
CAPITULO III	
EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE PUEBLA	16
3.1 ORIGEN DE LA INFORMACION	16
3.2 ZONIFICACION GEOTECNICA	16
3.3 DEPOSITOS EOLICOS DE ORIGEN VOLCANICO	16
3.4 DEPOSITOS DE ORIGEN FLUVIO LACUSTRE	18
3.5 DEPOSITOS DE ORIGEN ALUVIAL	19
3.6 RELLENOS ARTIFICIALES	19
3.7 DEPOSITOS CALCAREOS DE ORIGEN MARINO	20
3.8 DEPOSITOS DE ARCILLA	20
3.9 ZONIFICACION DE ACUERDO AL TIPO DE SUELO	20
CAPITULO IV	
EFFECTOS DE SITIO	45
4.1 INTRODUCCION	45
4.2 OBJETIVOS	45
4.3 CONCEPTOS BASICOS	45
4.4 INFORMACION ACELEROGRAFICA	49
4.5 INFORMACION SISMOGRAFICA	49

4.6 MEDICIONES DE VIBRACION AMBIENTAL	49
4.7 ANALISIS DE ACELEROGRAMAS	50
4.8 ANALISIS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DE SITIO	51
4.9 AMPLIFICACION CON LA TECNICA ESTANDAR	52
4.10 ANALISIS DE LAS RAZONES ESPECTRALES	52
4.11 TECNICA PARA CALCULAR AMPLIFICACION CON UNA SOLA ESTACION	53
4.12 AMPLIFICACION CON LA TECNICA NAKAMURA	54
CAPITULO V	
ANALISIS DE LA RESPUESTA SISMICA	104
5.1 INTRODUCCION	104
5.2 OBJETIVO	104
5.3 CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS DEPOSITOS DE SUELO	104
5.4 DESCRIPCION DEL MODELO UTILIZADO	105
5.5 DATOS REQUERIDOS POR EL MODELO	106
5.6 ESPECTRO DE SITIO	107
CAPITULO VI	
MICROZONIFICACION SISMICA PRELIMINAR DE LA CIUADA DE PUEBLA	114
6.1 ASPECTOS GENERALES	114
6.2 MICROZONIFICACION SISMICA	114
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
AGRADECIMIENTOS	120
REFERENCIAS	121

CONTENIDO

RESUMEN

I GENERALIDADES

II GEOLOGIA Y SISMICIDAD EN EL VALLE DE PUEBLA

III EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE PUEBLA

IV EFECTOS DE SITIO

V ANALISIS DE LA RESPUESTA SISMICA

VI PROPUESTA DE MICROZONIFICACION SISMICA

VII CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

DEDICATORIA

A PATY, HILDA Y GABRIEL

A TODA MI FAMILIA

A MI TIO ALFONSO CARRIZOSA T.

AL ING. RAUL LOPEZ BRETON

RESUMEN

En este trabajo se presenta el procedimiento para proponer la "MICROZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE PUEBLA" con fines de ingeniería civil.

Para ello se describirá brevemente la sismicidad local, la geología general de la región, y se procesa la información obtenida por medio de estudios de mecánica de suelos para actualizar la zonificación geotécnica de la ciudad.

La información ha sido obtenida de la red sísmica de la B.U.A.P., así como de una red temporal de sismógrafos del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y de vibración sísmica ambiental.

Se analiza la influencia de la geología superficial en los acelerogramas y espectros de respuesta de sitio .

Para evaluar los efectos de sitio se aplica la técnica estándar y la reciente técnica Nakamura propuesta originalmente para el estudio de microtemores que utiliza una sola estación.

Para analizar la respuesta sísmica de los depósitos de suelo se utiliza un modelo unidimensional de propagación de ondas de corte, basado en la solución de la ecuación de onda. Dicho modelo conocido como lineal equivalente (Seed e Idriss, 1969), se ha difundido bastante por su sencillez. Está basado en el ajuste de dos parámetros mecánicos: el módulo de rigidez al corte y el amortiguamiento interno para hacerlos compatibles con el nivel de deformaciones.

Por último por medio del procesamiento e interpretación de la información sísmica y su relación con la zonificación geotécnica se propone la microzonificación sísmica preliminar para la ciudad de Puebla.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

Los sismólogos e ingenieros han determinado que las características del movimiento sísmico en un lugar dado dependen de diversos factores. Entre los principales se citan los siguientes:

1. Mecanismo focal.
2. Cantidad de energía liberada.
3. Distancia del foco sísmico al sitio.
4. Estructuras geológicas a través de las que se propagan las ondas sísmicas.
5. Propiedades dinámicas de las rocas y de los depósitos de suelo a través de los que se propagan las ondas en especial los que se encuentran cerca de la superficie.

Cuando se origina un temblor (Fig. 1.1), desde el foco sísmico se propagan los frentes de ondas sísmicas en todas las direcciones. Los sismólogos han encontrado que las ondas producidas por una ruptura del terreno no se emiten con la misma intensidad en todas las direcciones sino que hay direcciones en que la intensidad es mayor (Espíndola, 1990). Las ondas al propagarse atravesarán varias fronteras y dislocaciones en la estructura geológica; serán reflejadas y refractadas y finalmente arribarán modificadas a la superficie del sitio en estudio. La cantidad de energía que alcance la superficie dependerá de la distancia al foco sísmico y de la capacidad de disipación de energía (amortiguamiento) de las formaciones de roca o suelo a través de las cuales se propagan las ondas sísmicas.

Es un hecho conocido que si una onda sísmica se propaga de un medio más rígido a otro menos rígido los desplazamientos y aceleraciones se amplifican.

Cuando las ondas sísmicas llegan a un valle donde generalmente se encuentran depósitos de suelos las ondas sísmicas se modifican al pasar de la roca base a los diferentes depósitos de material menos rígido. (Fig. 1.2).

Debido a estas causas los movimientos sísmicos registrados en la superficie en distintos depósitos de suelos tienen características diferentes. Si sobre estos depósitos de suelos con diferente comportamiento dinámico se construyen estructuras los efectos causados por el movimiento sísmico en ellas variará significativamente de una zona a otra dentro del mismo valle.

Lo anterior ha quedado demostrado en los registros sísmicos y por la distinta intensidad del daño en estructuras muy cercanas entre sí pero asentadas en distintos tipos de depósito de suelo como en la ciudad de San Francisco, E.U.A. y Caracas, Venezuela.

En la ciudad de México D.F. durante el gran sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, se observaron en algunas zonas los efectos de las condiciones locales del subsuelo, dichos efectos se manifestaron críticamente en daños de diferente intensidad en las estructuras. Durante este sismo los

movimientos del terreno registrados en diferentes partes de la ciudad mostraron grandes diferencias en sus características.

En la literatura técnica (Seed, 1986), se reportan más de treinta y seis sismos en los que se ha establecido una relación entre la severidad de los daños a los edificios, su altura y las condiciones locales del subsuelo.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- a) Presentar la zonificación geotécnica actualizada de la ciudad de Puebla.
- b) Analizar los efectos de sitio.
- c) Analizar por medio de un modelo unidimensional la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en dos de las tres zonas en que se dividió el subsuelo de la ciudad de Puebla.

El objetivo particular de este trabajo es:

Proponer la microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla con fines de Ingeniería Civil

1.3 ANTECEDENTES

El primer trabajo acerca de la zonificación del subsuelo de la ciudad de Puebla data de 1975 y fue realizado por G. Auvinet.

A pesar de la importancia de la ciudad y del acelerado desarrollo de la mancha urbana que implica la construcción de vanadas y modernas obras de ingeniería civil, no existe una zonificación geotécnica actualizada realizada con la formalidad y el método de la mecánica de suelos que con base en esta permita establecer una zonificación sísmica que se tome en cuenta en el reglamento de construcciones de la ciudad para un adecuado uso de suelo y para el diseño dinámico de estructuras.

A la fecha existen dos propuestas de microzonificación sísmica, la presentada por Cruz-García F. y Lemus, (1994) y la presentada por Ruz-Acevedo O. en el (1993).

1.4 LA REGION EN ESTUDIO

La costa Oeste de la República Mexicana se localiza en el cinturón orogénico, una de las zonas de más alta sismicidad a nivel mundial. Por ello gran parte de su territorio sufre los efectos de los temblores que tienen su origen en esta zona, además de los que se producen en la tectónica continental de su territorio.

La ciudad de Puebla capital del estado de mismo nombre se localiza en el altiplano Mexicano a 2152 m.s.n.m. en un valle de pendiente suave con las siguientes coordenadas: 19° 30' 19" 00" Norte y 98° 30' 32" 00" Este-Oeste.

Por su actividad comercial e industrial y el número de habitantes (2.5 millones) la ciudad ocupa el cuarto lugar en importancia económica a nivel nacional.

movimientos del terreno registrados en diferentes partes de la ciudad mostraron grandes diferencias en sus características.

En la literatura técnica (Seed, 1986), se reportan más de treinta y seis sismos en los que se ha establecido una relación entre la severidad de los daños a los edificios, su altura y las condiciones locales del subsuelo.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- a) Presentar la zonificación geotécnica actualizada de la ciudad de Puebla.
- b) Analizar los efectos de sitio.
- c) Analizar por medio de un modelo unidimensional la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en dos de las tres zonas en que se dividió el subsuelo de la ciudad de Puebla.

El objetivo particular de este trabajo es:

Proponer la microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla con fines de Ingeniería Civil.

1.3 ANTECEDENTES

El primer trabajo acerca de la zonificación del subsuelo de la ciudad de Puebla data de 1976 y fue realizado por G. Auvinet.

A pesar de la importancia de la ciudad y del acelerado desarrollo de la mancha urbana que implica la construcción de variadas y modernas obras de ingeniería civil, no existe una zonificación geotécnica actualizada, realizada con la formalidad y el método de la mecánica de suelos, que con base en ella permita establecer una zonificación sísmica, que se tome en cuenta en el reglamento de construcciones de la ciudad para un adecuado uso del suelo y para el diseño dinámico de estructuras.

A la fecha existen dos propuestas de microzonificación sísmica: la presentada por Chávez-García F. y Lermo J. (1994) y la presentada por Ruiz Acevedo C. et al (1993).

1.4 LA REGION EN ESTUDIO

La costa Oeste de la República Mexicana se localiza en el cinturón circumpacífico una de las zonas de más alta sismicidad a nivel mundial. Por ello gran parte de su territorio sufre los efectos de los temblores que tienen su origen en esta zona, además de los que se producen en la corteza continental de su territorio.

La ciudad de Puebla capital del estado del mismo nombre se localiza en el altiplano Mexicano a 2162 m.s.n.m., en un valle de pendiente suave con las siguientes coordenadas: 19° 30' - 19° 00' Norte y 96° 30' - 98° 00' Este-Oeste.

Por su actividad comercial e industrial y el número de habitantes (2.5 millones), la ciudad ocupa el cuarto lugar en importancia económica a nivel nacional.

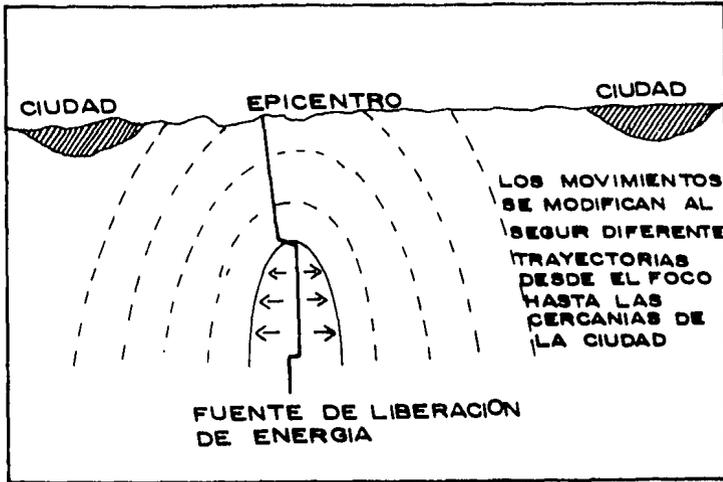


FIG. 1.1 PROPAGACION DE ONDAS SISMICAS DESDE EL FOCO HASTA EL SITIO EN ESTUDIO

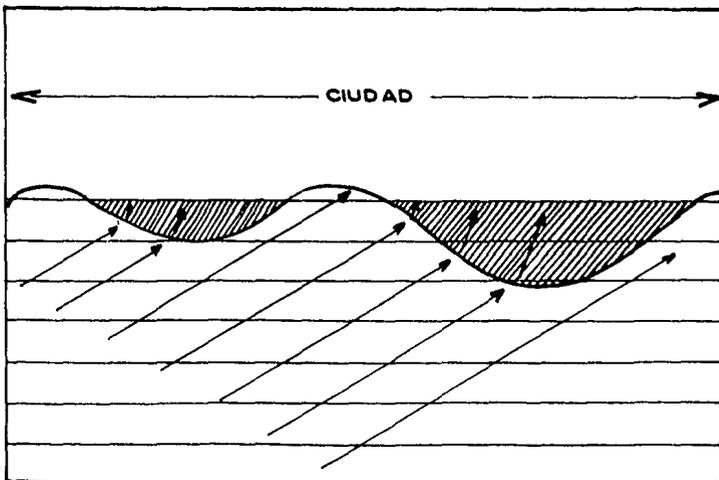


FIG. 1.2 ONDAS SISMICAS APROXIMANDOSE A LA SUPERFICIE DEL TERRENO

CAPITULO II

GEOLOGIA Y SISMICIDAD DEL VALLE DE PUEBLA

2.1 FISIOGRAFIA

El valle de la ciudad de Puebla se ubica cerca de los límites de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico Transmexicano y de la Sierra Madre del Sur.

El Eje Neovolcánico es una franja volcánica que inició su formación en el Cenozoico Superior (38 millones de años) y su actividad continúa hasta nuestros días. El Eje cruza transversalmente la República Mexicana a la altura del paralelo 20 y contiene a las principales alturas del país. Desde un punto de vista químico, el Eje Neovolcánico es considerado por varios autores como una provincia calco-alcalina, caracterizada por la abundancia de rocas clasificadas como andesitas y dacitas (López Ramos, 1979).

El origen del Eje Neovolcánico está relacionado principalmente con la subducción de la placa tectónica de Cocos, debajo de la corteza continental de México, que al nivel de la astenosfera sufre fusión parcial y origina los magmas del eje (Mooser, 1975; Demant, 1978). La velocidad del movimiento relativo entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana sobre la cual yace la mayor parte de la República Mexicana es de aproximadamente 6 cm/año. (Suárez y Jiménez, 1988).

Los principales aparatos volcánicos que se localizan en la cercanía de la región en estudio son estratovolcanes como el Pico de Orizaba (5639 m.s.n.m.), el Popocatepetl (5542 m.s.n.m) que actualmente tiene emisiones de cenizas, gases y actividad sísmica perceptible sólo con aparatos, el Iztaccihuatl (5386 m.s.n.m.) y la Malinche (4461 m.s.n.m.), edificados por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos. El Popocatepetl y el Pico de Orizaba están considerados dentro del grupo de volcanes más activos en el área continental de la República Mexicana (Espíndola, 1990). Dichos volcanes se levantan majestuosamente en medio de las grandes llanuras lacustres de edad pliocénica (12 millones de años) que forman y caracterizan geológicamente los valles de la ciudad de México D.F. y Puebla.

2.2 ROCAS DEL VALLE DE PUEBLA

Los principales tipos de rocas que se encuentran en el valle de la ciudad de Puebla son:

Tipo Malinche:	dacitas, cuarzo-latiandesitas, leuco-latiandesitas.
Los minerales típicos son:	hornblenda y biotita
Tipo Puebla:	rocas básicas como andesitas olivínicas, latiandesitas y andesitas.
Tipo Sierra Río Frio:	alcaliriolitas, riodancitas, dacitas, cuarzo hornblenda, biotita ortaugita.
Los minerales típicos son :	cuarzo, hornblenda y biotita.
Tipo Sierra Nevada:	dacitas, leuco y cuarzo-latiandesitas.
Los minerales típicos son:	olivino y clinaugita

2.3 GEOMORFOLOGIA.

La ciudad de Puebla se asienta en un valle de pendiente suave de Norte a Sur con una diferencia de altura máxima de cien metros entre el extremo Norte y el extremo Sur, distantes aproximadamente 33 km.

Una parte de la ciudad de Puebla se ubica en una zona de lomeríos de pendiente suave de las que sobresalen algunos de mayor altura como son el Cerro de la Paz, los Cerros de Loreto y Guadalupe, el Tepoxúchilt, que son aparatos volcánicos del Terciario-Cuatemario. Otro lomerío de importancia llamado La Calera se ubica al Sureste de la ciudad y está constituido por calizas marinas acumuladas durante el periodo cretácico medio (72 millones de años).

Existen tres ríos perennes, Atoyac, Alseseca y San Francisco (actualmente entubado) que han influido en la geomorfología de la región. Escurren de Norte a Sur con pendientes suaves y su cauce se desarrolla en gran parte de la ciudad.

En la Fig 2.1 se presenta una vista general del valle de Puebla y los elementos más importantes que influyeron en la conformación del valle y que actualmente siguen contribuyendo en el modelado de su geomorfología.

En la ciudad de Puebla la temperatura media anual es de 17.10 °C y la precipitación media anual es de 822.9 mm/año.

2.4 GEOLOGIA HISTORICA

Los procesos geológicos más importantes del área se inician en el periodo cretácico con la formación de extensos y profundos depósitos de material calcáreo (CaCO_3), de origen marino que a fines de este periodo fueron sujetos a movimientos orogénicos que levantaron la zona dando lugar a una llanura marina. En la época del pleistoceno, en una parte del valle de la ciudad de Puebla (actual zona urbana) existió un cuerpo de agua dulce permanente (lago); posteriormente, se presentó un cambio en el relieve de la cuenca de drenaje y además se presentaron erupciones volcánicas que posiblemente contribuyeron a obstaculizar las fuentes de alimentación del lago y a su posterior desecación.

Los eventos geológicos más recientes e importantes son dos: El primero ha consistido en el transporte hacia la superficie de sedimentos calcáreos por aguas termales sulfurosas dando origen a la formación de una roca clasificada como travertino. El segundo es la formación de depósitos aluviales y erosión del valle a lo largo de los ríos Atoyac, Alseseca y San Francisco.

2.5 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Mooser (1972) y otros investigadores han estudiado la tectónica de la región definiendo las fallas y fracturas que se indican en la Fig. 2.2. Una falla es un plano de discontinuidad en una masa de roca en la cual ha habido desplazamiento de una parte con respecto a la otra; una fractura es un plano de discontinuidad en el cual no ha habido desplazamiento.

La ciudad de Puebla se ubica entre las fallas Zacamboxo y Clarión ambas con dirección Este-Oeste, esta última tiene su origen en el Océano Pacífico. La falla Zacamboxo pasa al Norte de la ciudad a una distancia aproximada de 40 km. La falla Clarión pasa al Sur de la ciudad a una distancia aproximada de 25 km.

En el área urbana se define una falla denominada Malinche y se infieren otras dos. La falla Malinche es una falla profunda y tiene dirección Sur-Oeste a Norte-Este y una longitud aproximada de 300 km la prolongación de esta falla al Norte-Este debajo del valle de Puebla es inferida ya que apunta al centro del cono volcánico de la Malinche.

Con respecto a las fallas inferidas: la primera va del cerro de la Paz al cerro de Guadalupe, la dirección de este plano de discontinuidad es Este-Oeste y coincide con un eje que se inicia en las cercanías del Nevado de Toluca y pasa por el Popocatepetl, Pico de Orizaba y otros pequeños conos volcánicos. Por lo anterior es posible que esta línea, que presenta la misma dirección que el Eje Neovolcánico, corresponda a una falla profunda (Auvinet, 1976). La segunda falla tiene una dirección aproximada de Norte a Sur y pasa por los conocidos manantiales de agua sulfurosa Agua Azul y Rancho Colorado. Es posible que esta línea corresponda a un plano de discontinuidad a través del cual se infiltran aguas termales sulfurosas, las cuales llevan principalmente minerales calcáreos en solución y suspensión.

2.6 SISMICIDAD EN PUEBLA

La ciudad de Puebla se localiza de acuerdo a la regionalización sísmica de la República Mexicana (Esteva, 1970), en la zona I Fig. 2.3. La región está bajo la influencia sísmica del Eje Neovolcánico Transmexicano y de la zona de subducción de la placa tectónica de Cocos con la placa tectónica Norteamericana en el Océano Pacífico Mexicano. Debido a la influencia del Eje Neovolcánico puede verse sujeta a sismos superficiales de intraplaca de magnitud pequeña pero con epicentros muy cerca de la ciudad. Un catálogo de estos eventos fue presentado por Singh et al (1984). Además se encuentra en las cercanías de las fallas Zacamboxo, Clarión y otras de menor longitud e importancia que pueden contribuir a la sismicidad local. A la fecha existe poca información sobre la actividad de estas fallas.

La falla Zacamboxo es una estructura geológica inferida con dirección Este-Oeste a lo largo de la cual se han ubicado epicentros de temblores debidos a sismicidad de intraplaca, motivo por el cual Figueroa (1974) pensaba en la existencia de una falla geológica que originaba dichos temblores (Lermo, 1992).

A partir del año 1523 se tienen descripciones de temblores que se han sentido en la región con diverso grado de intensidad, siendo a partir del año 1905 cuando la localización de sus epicentros fue instrumental (Figueroa, 1974).

A la fecha no existe información estadística suficiente sobre las características de los temblores que afectan a la ciudad para determinar desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas con el fin de construir espectros de diseño sísmico para las diferentes zonas en que se dividió el subsuelo de la ciudad.

2.7 EFECTOS SISMICOS

Los daños ocasionados por temblores a los edificios de la ciudad de Puebla, se registran descriptivamente a partir del año 1611 (Figueroa, 1974).

Los sismos registrados instrumentalmente y que han causado daños son:

El macrosismo del 28 de agosto de 1973 llamado de Ciudad Serdán con una magnitud $m_b = 6.8$ (Chávez-García, 1994). El foco se localizó aproximadamente a 84 Km de profundidad debido a

sismicidad de intraplaca, la distancia epicentral a la ciudad de Puebla es de aproximadamente 90 Km. Los daños reportados más significativos en estructuras fueron: derrumbe total de la iglesia del Perpetuo Socorro (la construcción podía catalogarse como moderna y se desconoce la causa específica de la falla) ubicada en la avenida 29 Poniente entre Av. 16 de Septiembre y calle 3 Sur y una construcción de dos pisos bastante dañada en avenida 34 Poniente 518; también se desconoce la causa principal de la falla y la de un número no determinado de edificios localizados en el centro histórico de la ciudad catalogados por la UNESCO como patrimonio cultural de la humanidad, construidos durante la época colonial y que presentaron grietas y daños menores.

Tembor del 24 de octubre de 1980. Este evento se debe a sismicidad de intraplaca. Los daños registrados fueron caída de cornisas adornos de fachadas derrumbe de una pared con saldo de un muerto, y diversas construcciones predominantemente construidas en la época colonial dañadas con fisuras y grietas.

El gran temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 con una magnitud $M_s = 8.1$. El epicentro se ubicó a 16 Km de profundidad en las costas del Estado de Michoacán en el Pacífico Mexicano. Los daños reportados fueron mínimos, grietas en el Hospital San Alejandro, en el Centro Escolar "Niños Héroes de Chapultepec" y en algunos edificios localizados sobre suelo blando.

Es importante comentar que existen zonas en que es reciente la expansión urbana del año 1989 a la fecha y que no se tienen registros de su respuesta sísmica ante temblores grandes, por lo cual no se deben descartar como potencialmente peligrosas.

La distribución de los daños registrados a consecuencia de los anteriores sismos no tiene lugar preferentemente en alguna zona geotécnica de la ciudad.

De acuerdo a la zonificación sísmica del estado de Puebla propuesta por Figueroa (1974), se observa que la sismicidad se concentra al sur del estado y se vuelve más difusa hacia el Norte.

Se puede concluir que los sismos que más daños han causado a la fecha son los del 28 de agosto de 1973 y del 24 de octubre de 1980 que se clasifican como sismos de intraplaca.

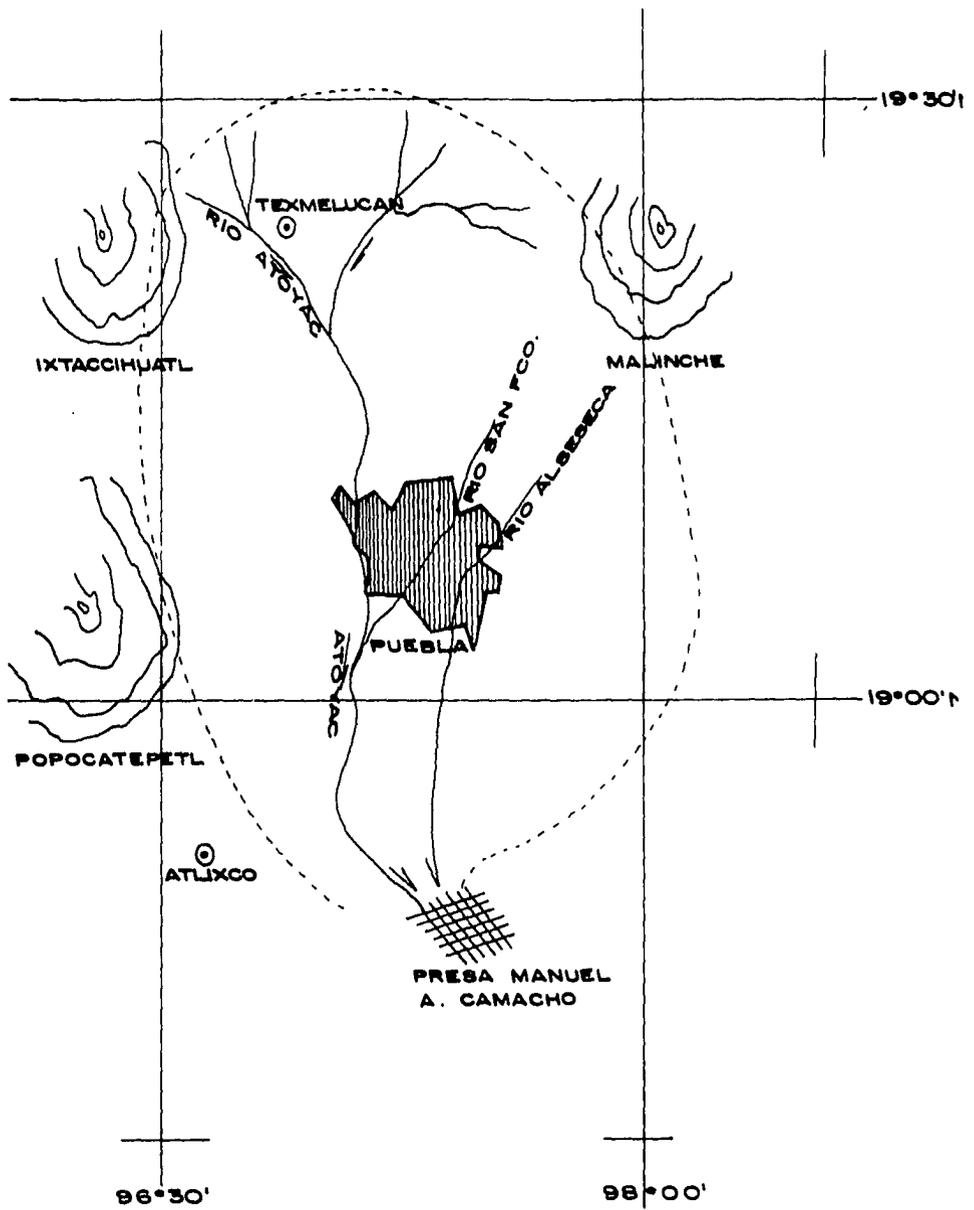


FIG. 2.1 CONFORMACION DEL VALLE DE PUEBLA

Edad relativa de las fallas

- a) Activas hasta el Mioceno inferior
- b) Mioceno - Plioceno
- c) Plioceno Cuaternario

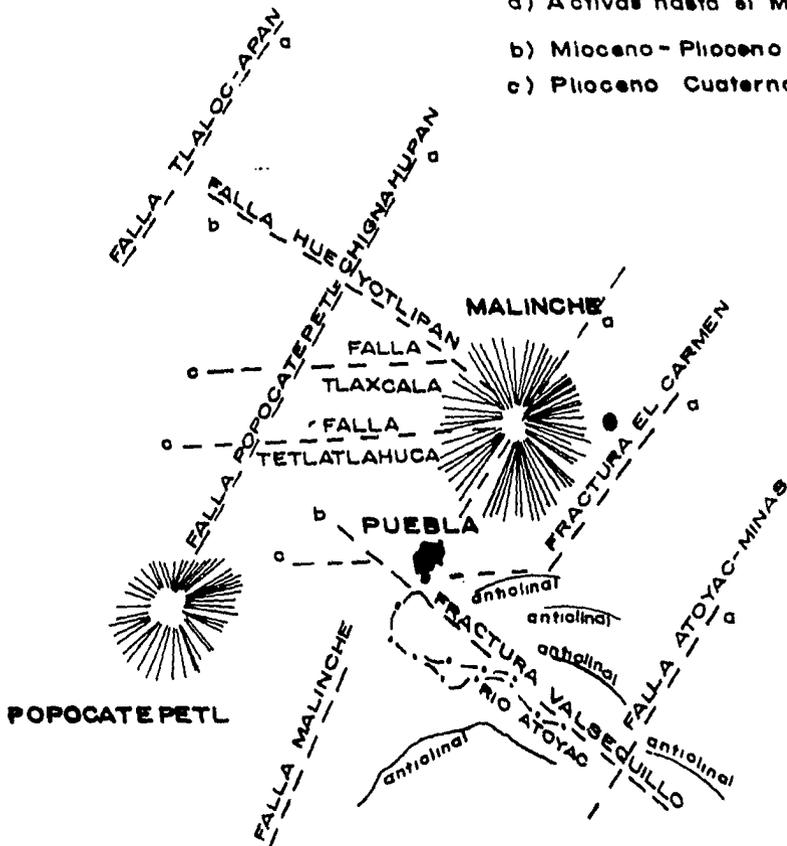


Fig. 2.2 Tectónica del valle de la ciudad de Puebla

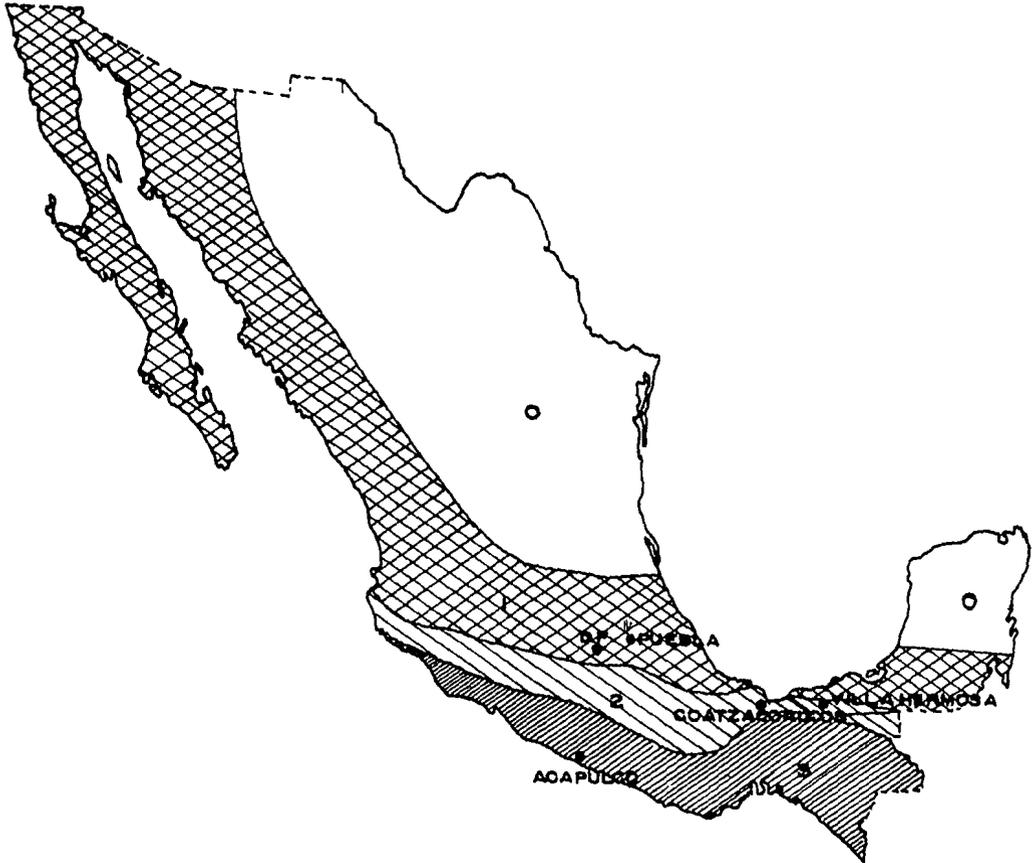


Fig. 2.3 Regionalización sísmica de México, (Esteva, 1970)

CAPITULO III

EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE PUEBLA

Se presenta el estudio geotécnico del subsuelo de la ciudad de Puebla, se describe la estratigrafía y las propiedades índice y mecánicas de los depósitos de suelo de cada una de las zonas en que se dividió la ciudad para actualizar la zonificación geotécnica.

3.1 ORIGEN DE LA INFORMACION

Para desarrollar este capítulo se procesó la información de 60 estudios de mecánica de suelos, de alcances muy diversos y los perfiles estratigráficos de aproximadamente 10 pozos profundos, cinco estudios geofísicos de resistividad eléctrica, realizados por instituciones públicas y compañías privadas, además de los 50 estudios presentados por Auvinet, (1976).

3.2 ZONIFICACION GEOTECNICA

Los estudios de mecánica de suelos analizados reportan perfiles estratigráficos que varían en su secuencia y extensión de un sitio a otro. La zonificación propuesta se estableció a partir de un análisis para correlacionar, inferir, simplificar y en algunos casos extremos ignorar propiedades índice y mecánicas del subsuelo que no aparecen en otro sondeo incluso dentro de un mismo predio. Para ordenar el análisis de la información se tomó como base el origen, el agente de transporte geológico, la composición mineralógica, la edad estimada, y las propiedades índice y mecánicas estáticas medias del subsuelo.

3.3 DEPOSITOS EOLICOS DE ORIGEN VOLCANICO

- a) **ORIGEN.** Las cenizas y arenas que fueron expulsadas durante la actividad eruptiva de los volcanes la Malinche, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Pico de Orizaba y la cercanía de éstos al valle de Puebla, fueron la causa principal de la formación de depósitos de suelo de origen volcánico, muy extensos y profundos (60 m) en la mayor parte del área que actualmente ocupa la ciudad de Puebla. Este material constituye la matriz dominante dentro de la cual se localizan otras formaciones estratigráficas. En casi todos los estudios de mecánica de suelos realizados en la ciudad a diferentes profundidades y con distinto espesor, se registra la presencia de materiales de este tipo.
- b) **LOCALIZACION.** Los depósitos de suelos de origen volcánico se encuentran en los cuatro puntos cardinales de la ciudad de Puebla rodeando lo que fue un cuerpo de agua dulce (lago) y además estratificados con otros materiales donde se ubicó el lecho del lago.
- c) **ESTRATIGRAFIA.** Estos suelos fueron depositados principalmente en un medio seco, Figs. 3.1 a 3.4. Se presentan en distintas sucesiones estratigráficas; superficialmente algunas veces se encuentran arenas finas sin cohesión. El espesor de los estratos es de 0.8 a 2 m y aparecen en ellos grava andesítica, arena, grava pumítica y piedra pómez. Algunos sondeos reportan la presencia de boleos a una profundidad de 3 m. La profundidad media de estos depósitos es de 50-60 m.

Principalmente en el Norte de la ciudad (zona industrial), en algunas áreas pequeñas en medio de depósitos de suelos de origen volcánico se encuentran estratos de arcilla plástica café de compresibilidad baja a media a una profundidad variable de 2 a 10 m con un espesor promedio de 4 m, Fig. 3.5

En esta área de depósitos eólicos de origen volcánico en la parte media de la ciudad se encuentran ubicados dos conos volcánicos cineríticos distantes entre si aproximadamente 8 km denominados "Cerro de la Paz" y "Cerro de Loreto y Guadalupe". El Cerro de la Paz, ubicado en el lado Oeste de la ciudad, tiene una pendiente de 26 % y su base tiene un área aproximada de 45250 m². Superficialmente en algunas partes del cono se encuentra una capa de limo arenoso-arcilloso de espesor variable teniendo un máximo de 4 m, su color es amarillo, su consistencia es compacta y está fuertemente cementado (toba andesítica). Subyaciendo a esta capa de suelo se encuentra una masa de productos piroclásticos de color rojo (tezonfle) con espesor indefinido, Fig. 3.6. En varios estudios al pie del cerro se registra la presencia de estratos de roca ígnea como basalto y andesita, interestratificada con caliza y travertino.

El "Cerro de Loreto y Guadalupe" se encuentra en el Noroeste de la ciudad. Es un cono cinerítico con una pendiente de 28 % y su estratigrafía está constituida por una capa superficial de suelo vegetal; subyaciendo se encuentra un estrato de limo-arcillo-arenoso de color amarillo oscuro con partículas de gravilla cuyo espesor es superior a 8 m, Fig. 3.7. En la parte Oeste y Este del cono existen afloramientos de basalto fragmentado.

- d) NIVEL DEL AGUA SUBTERRANEA. Existe una gran diferencia en la profundidad del nivel de aguas freáticas de la parte Norte de la ciudad con respecto a la parte Sur, en la parte Norte sólo en dos sondeos se registró la presencia del nivel de aguas freáticas. En el Sur, cerca de Ciudad Universitaria, se localiza un área extensa donde existe una cantidad no determinada de pozos superficiales para uso doméstico en los cuales el nivel de aguas freáticas está entre 5-15 m todo el año (Colonias Universidades, Tres Cruces, Los Gavilanes).
- e) PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS. Los materiales de origen volcánico se han clasificado de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S. como areno-limosos o limo-arenosos, los menos abundantes son arcillo-limo-arenosos, su color varía de café claro a café oscuro; en campo se identifican cuando están cementados, como tobas andesíticas o tobas basálticas; en el lenguaje común se les denomina tepetates o lahares. Muchas veces se presentan con láminas de espuma volcánica (piedra pómez) de diferente tamaño. La granulometría de las arenas es predominantemente fina. El contenido de agua natural de estos suelos es del 10 al 25 %, su límite líquido varía de 20 a 35 %, su límite plástico de 15 a 25 %.

Las propiedades mecánicas de los materiales de origen volcánico depositados en un medio seco son función de su compacidad relativa, contenido de arcilla y cementante natural. Su resistencia media en la prueba de penetración estándar es de 15 golpes de 0 a 2 m a más de 50 golpes a 8 m de profundidad. Su resistencia a la compresión sin confinar es de 2 a 5 kg/cm², de 1 a 8 m de profundidad. las arenas volcánicas sin cohesión tienen un ángulo de fricción interna mayor a 30°.

3.4 DEPOSITOS DE ORIGEN FLUVIO LACUSTRE

- a) **ORIGEN.** En una gran parte del área donde se asienta actualmente la ciudad de Puebla existió un lago en el período pliocénico; las corrientes de agua subterráneas y superficiales que alimentaban este cuerpo de agua transportaban y depositaban sedimentos de composición mineralógica calcárea producto del derrumbamiento de rocas calizas más antiguas pertenecientes al período cretácico originadas en un ambiente marino. Estos sedimentos en grandes cantidades dieron origen a estratos de caliza de origen lacustre. La ubicación y extensión aproximada de este lago se determinó con base en los estudios que registraron rocas calcáreas y depósitos de sedimentos de origen fluvio-lacustre además de la columna estratigráfica de los pozos de agua potable que existen en esta zona, Fig. 3.8.
- b) **LOCALIZACION.** Estos depósitos se localizan en casi todo el centro de la ciudad, en el Norte hasta colindar con la autopista México-Puebla, sus fronteras naturales son: al Oeste parte del río Atoyac, al Este el río de San Francisco al Sur nuevamente con un segmento del río Atoyac. En algunos lugares los sondeos sólo registran la presencia de fragmentos de caliza o travertino empacada en materiales de origen volcánico, la ubicación de estos estudios nos marca los límites probables de la zona lacustre.
- c) **ESTRATIGRAFIA.** La secuencia estratigráfica de estos depósitos es muy heterogénea. Hay lugares en los que se encuentran estratos superficiales extensos de caliza con un espesor medio de 8 m. Subyaciendo se encuentra un estrato de toba andesítica de espesor indefinido pero superior a 6 m, Fig. 3.9. En otros lugares, Figs. 3.10 a 3.14, se encuentran estratos de caliza interestratificados con turba, materiales arcillo-limosos de origen fluvio-lacustre, depósitos eólicos de origen volcánico y depósitos termales (travertino) sin que pueda definirse una sucesión estratigráfica típica. El espesor máximo aproximado de los depósitos fluvio-lacustres compresibles es de 16 m, presentándose esta profundidad en la zona de la Col. San Alejandro. Bajo estos depósitos la roca base se ha clasificado como caliza perteneciente a la formación Maltrata y se encuentra a una profundidad de 45-60 m (Cruz, 1990).
- d) **PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS.** Los materiales arcillo-limosos, areno-arcillosos de origen fluvio lacustre que se encuentran abajo del nivel de aguas freáticas constituyen estratos de baja resistencia al esfuerzo cortante, y alta compresibilidad; su resistencia a la compresión sin confinar varía de 0.56 a 0.70 kg/cm²; su ángulo de fricción interna mínimo fue de 14°. En la prueba de penetración estándar resisten de 0 (peso propio) a 10 golpes; en muchas ocasiones constituyen la matriz envolvente de fragmentos de roca carbonatada. Se clasifican generalmente como CL, CH, OH, y muchas veces como turba (Pt). Los contenidos de agua natural de estos suelos casi siempre son mayores de 50 %.

Las propiedades mecánicas de la caliza y travertino presentan una amplia variación; dependiendo de su grado de pureza e intemperización, la resistencia a la compresión sin confinar varía de 99 a 400 kg/cm². En algunos lugares la roca se encuentra sana y en otros fragmentada y empacada dentro de materiales arcillosos. Los travertinos son resistentes, algo porosos, contienen un poco de arena y son de color amarillo claro.

La resistencia al esfuerzo cortante de los materiales de origen volcánico depositados en un medio lacustre es menor a la resistencia al corte de los materiales depositados en un medio seco. En la

prueba de penetración estándar resisten un número de golpes menor que los materiales eólicos de origen volcánico depositados en un medio seco.

- e) **NIVEL DEL AGUA SUBTERRANEA.** El nivel de aguas freáticas no presenta grandes variaciones y se localiza a una profundidad de 2 a 4 m. A lo largo y ancho de estos depósitos se localizan manantiales permanentes de aguas termales sulfurosas. En algunos lugares se ha registrado artesianismo. Todos los pozos profundos que se han perforado en ésta zona producen aguas termales sulfurosas, y el nivel dinámico del agua en los pozos ubicados en la zona se encuentra a una profundidad de 45 a 60 m.

3.5 DEPOSITOS DE ORIGEN ALUVIAL

- a) **ORIGEN.** En el Norte del valle de la ciudad de Puebla existen varios arroyos y ríos efímeros, siendo el más importante el río Xonaca. Estos arroyos y ríos estacionales únicamente se alimentan por precipitación pluvial (actualmente a consecuencia de la urbanización tienden a desaparecer). Su contribución a la geología superficial es la formación de depósitos aluviales. También existen tres ríos perennes que fluyen de Norte a Sur, el importante río Atoyac, el río Alseseca y el río San Francisco. Estos ríos han construido terrazas aluviales en algunos segmentos de su cauce hasta de 100 m de extensión en ambos márgenes considerando como punto de referencia el eje del actual cauce; además, en otros segmentos constituidos por tobas volcánicas han excavado barrancas con taludes verticales.
- b) **ESTRATIGRAFIA.** Los materiales que constituyen los estratos son muy variables en origen y composición pues se encuentran desde arcillas orgánicas e inorgánicas, arena, limo, arena pumítica hasta gravas y cantos rodados, Figs. 3.15 y 3.16, La sucesión estratigráfica de los depósitos aluviales a lo largo del cauce de los ríos es muy irregular y no puede establecerse un perfil representativo. El espesor medio de los depósitos de suelo de origen aluvial es de 15 m.
- c) **PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS.** El contenido natural de agua de estos suelos es de 20 a 80 %. Esta variabilidad tan grande resulta de su heterogeneidad. Los suelos cohesivos son de consistencia blanda, su resistencia a la compresión sin confinar es de 0.1 a 0.9 kg/cm². En los suelos aluviales, generalmente, el número medio de golpes que resisten en la prueba de penetración estándar es de 12. Un número de golpes alto puede no ser representativo del estrato debido a la presencia de gravas y boleos.
- d) **NIVEL DEL AGUA SUBTERRANEA.** El nivel de aguas freáticas en los estudios realizados en predios localizados en la rivera de los ríos de San Francisco y Alseseca se ha registrado a una profundidad media de 5 m.

3.6 RELLENOS ARTIFICIALES.

Los rellenos artificiales, por lo general, se localizan en las riveras de los ríos San Francisco, Alseseca y en algunas partes del centro histórico de la ciudad. Se sabe que también hay rellenos al pie del cerro de la Paz en el lado Oriente. Se componen de material de demolición, excavación y basura. Su espesor es de 2 a 6 m; su extensión horizontal es muy irregular, y en ocasiones, los rellenos más antiguos en las riveras de los ríos están interestratificados con estratos de arena fina fluvial.

3.7 DEPOSITOS CALCAREOS DE ORIGEN MARINO.

- a) **ORIGEN.** Se deben a la sedimentación de materiales calcáreos en un ambiente marino durante el período cretáceo; a fines de este período el subsuelo marino fue objeto de un movimiento orogénico que provocó su emersión y puso fin a la última inmersión del continente Norteamericano (Mattheus, 1968). Estos depósitos calcáreos de origen marino forman parte de la sierra de Tepeaca la cual ha estado sujeta a un proceso de metamorfismo regional. La roca caliza de esta zona es muy distinta en origen, edad y propiedades mecánicas a la caliza lacustre que se encuentra en gran parte del subsuelo de la ciudad.
- b) **LOCALIZACION.** Los depósitos calcáreos de origen marino se localizan al Este y Sureste de la ciudad formando una loma que colinda con un cono volcánico del terciario llamado cerro del Tepoxúchilt (actual zona militar y fraccionamiento residencial la Calera).
- c) **ESTRATIGRAFIA.** Superficialmente, en algunos sitios se encuentran estratos de materiales arcillosos con materia orgánica y arcillo-limosos de origen volcánico hasta una profundidad de 9 m. Subyace también un estrato muy heterogéneo de roca en el que se encuentran fragmentos de caliza, caliza parcialmente metamorfozada y mármol hasta una profundidad de 20 m sin haberse llegado a la roca sana, Figs. 3.17 y 3.18. En esta zona es tan abundante y superficial la roca caliza que se localiza una cantera que explota estos yacimientos.
- d) **PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS.** Los estratos de arcilla, se clasifican como arcillas de alta compresibilidad, CH, su resistencia media a la compresión sin confinar es de 0.8 kg/cm²; el número de golpes que resisten en la prueba de penetración estándar varía de 5 a 20. Se han reportado problemas de expansividad en estos estratos superficiales en áreas bien delimitadas (López Bretón, 1990). Con respecto a los estratos de calizas y mármol, se han obtenido resistencias a la compresión sin confinar de boleos de mármol y tienen un valor de 950 a 1432 Kg/cm².

3.8 DEPOSITOS DE ARCILLA.

Bajo una gran parte de la ciudad, en los cuatro puntos cardinales se encuentra un manto muy superficial de 0.3 a 0.6 m de profundidad de arcilla plástica de color negro de probable origen volcánico de alta compresibilidad, su espesor es de aproximadamente 0.2 a 0.3 m. Sus propiedades mecánicas no han sido determinadas ya que en los lugares donde aflora es mejor removerla para desplantar cualquier tipo de estructura.

En la riera Oeste del río San Francisco cerca del parque Benito Juárez existe un depósito de arcilla con un espesor superior a 4 m, Figs. 3.19 y 3.20. La extensión de este depósito es muy limitada ya que otros estudios cercanos no lo registran.

3.9 ZONIFICACION DE ACUERDO AL TIPO DE SUELOS.

El origen, minerales, agentes de transporte geológicos y medio ambiente de depósito diferente explican las grandes variaciones estratigráficas en dirección vertical como horizontal del subsuelo de la ciudad de Puebla. De acuerdo al tipo de suelo predominante se puede dividir en tres zonas:

- a) **ZONA COMPRESIBLE.** Se caracteriza por una sucesión de estratos de suelo orgánico, arcillas y limos inorgánicos de alta compresibilidad con un espesor máximo aproximado de 16 m, que yacen sobre caliza lacustre y travertino. El nivel de aguas freáticas se localiza a una profundidad menor de 5 m y no presenta grandes variaciones estacionales. En esta zona se localizan varios manantiales permanentes de agua termal sulfurosa. El nivel dinámico del agua se encuentra a 45-60 m de profundidad. Se puede decir que es una subzona de las calizas lacustres y travertinos. La roca base es caliza su profundidad es de 45 a 60 m y pertenece a la formación Maltrata.
- b) **ZONA DE CALIZAS LACUSTRES Y TRAVERTINOS.** Esta zona se caracteriza por la interstratificación de caliza o travertino con espesores de 2 a 4 m con materiales de compresibilidad media y eólicos de origen volcánico. Los suelos eólicos depositados en esta zona tienen una resistencia notablemente menor en la prueba de penetración estándar que los suelos de origen volcánico depositados en un medio seco que forman la zona de tobas.

La zona compresible y la de calizas lacustres y travertino se localizan en la zona que ocupó un cuerpo de agua dulce del Pliocénico (zona del lago). La roca base es la misma que la de la zona compresible.

- c) **ZONA DE TOBAS.** Es la más extensa y profunda, rodea a la zona compresible y a la zona de calizas lacustres y travertinos, está formada por materiales de origen volcánico fuertemente cementados. En algunos lugares la profundidad de los depósitos de toba es hasta de 50 m (Col. San Manuel, Fracc. Maravillas). Estos generalmente presentan alta resistencia al esfuerzo cortante y baja deformabilidad. El nivel de aguas freáticas presenta grandes diferencias, en la parte Norte de la ciudad se registra aisladamente (probablemente sean mantos acuíferos colgados); en la parte Sur se registra a una profundidad de 5 a 10 m durante todo el año en una área extensa.

Además, existen depósitos de suelo de pequeña extensión y diferentes al suelo predominante en la zona dentro de la cual están ubicados. A estas pequeñas áreas se les denominará subzonas. Así, la subzona de depósitos aluviales, que se ubican a lo largo del cauce de los ríos que cruzan la ciudad, la subzona de espumas basálticas llamada "CERRO DE LA PAZ"; la de roca basáltica de "LORETO Y GUADALUPE"; la de rellenos artificiales y la de depósitos de arcilla.

En la Fig. 3.21 y 3.22 se presentan los cortes longitudinales Norte-Sur y Este- Oeste respectivamente. La Fig. 3.23 presenta las zonas geotécnicas propuestas, su localización y extensión en el plano de la ciudad.

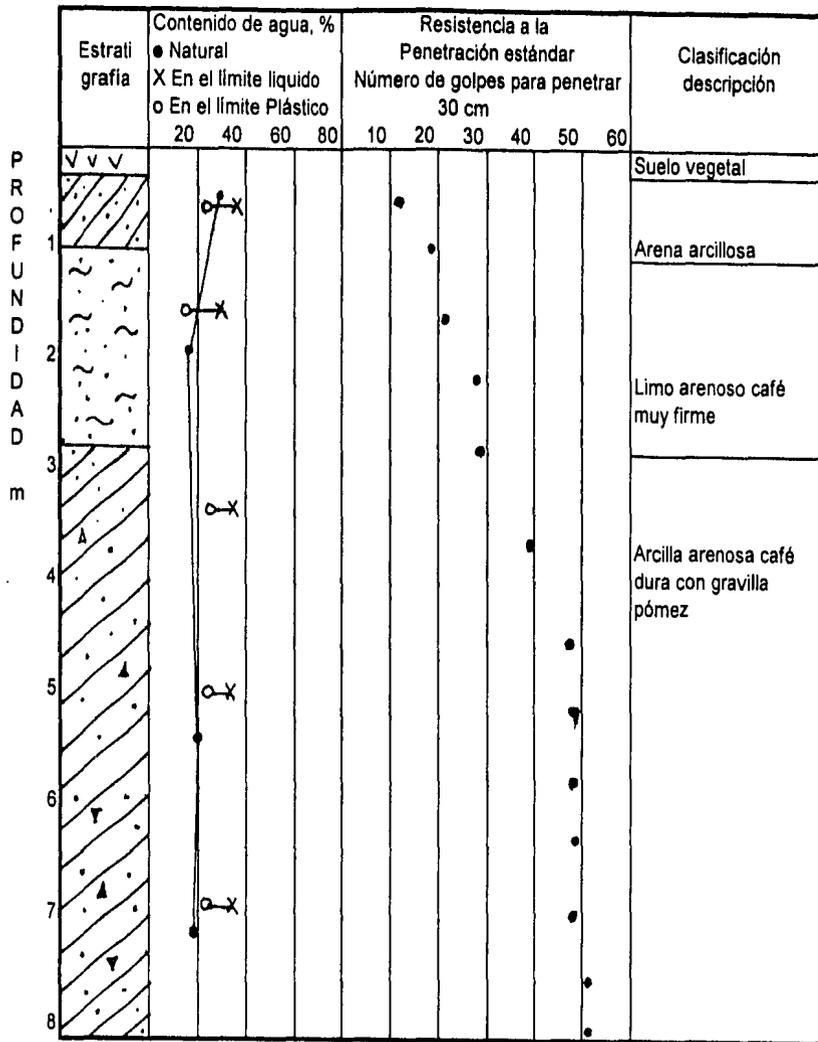
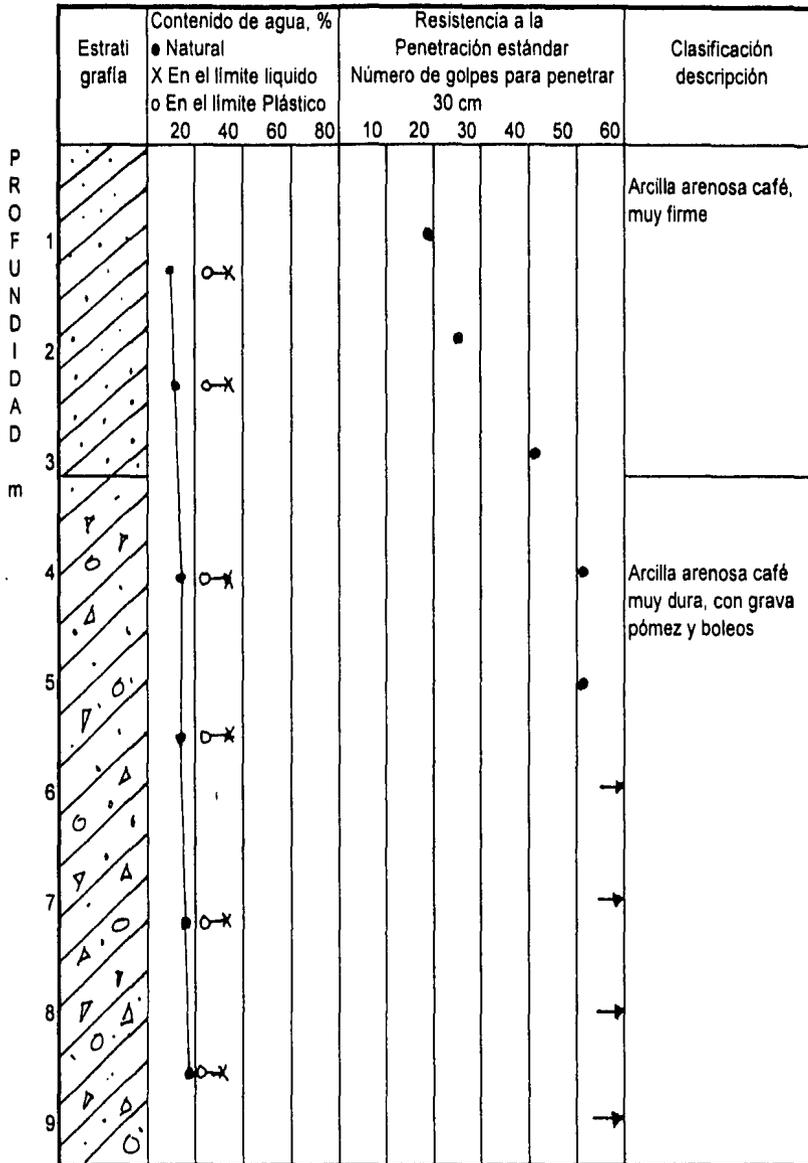
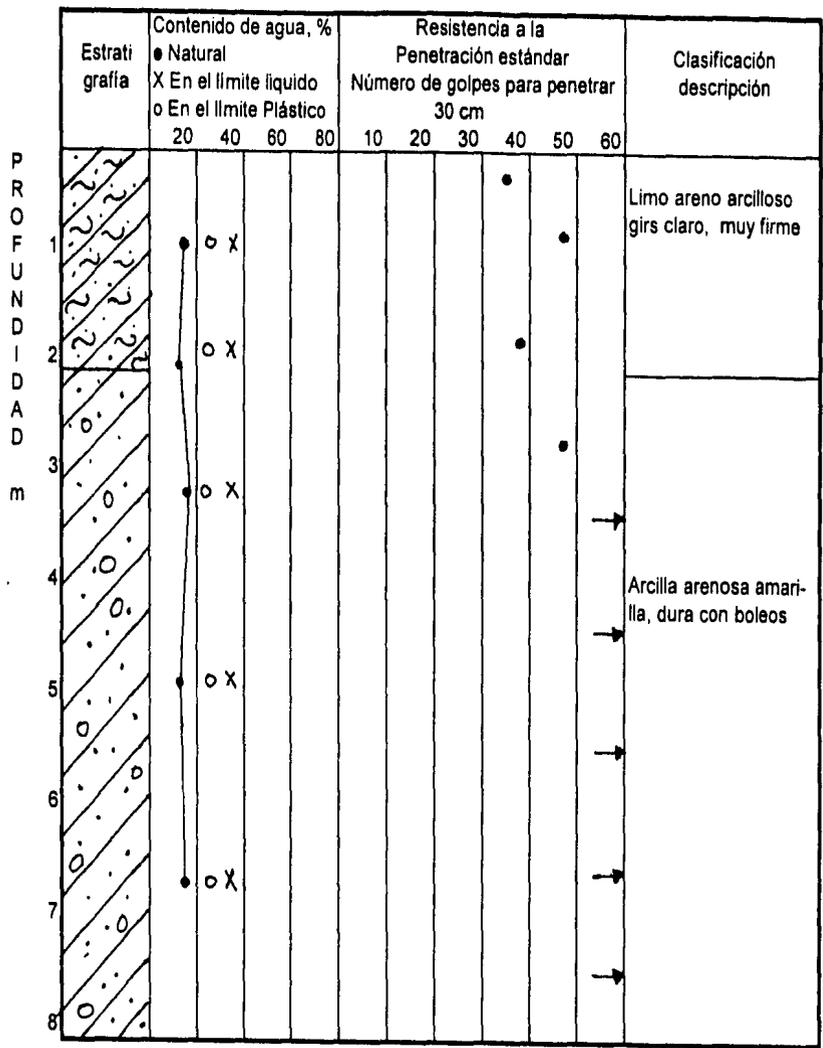


Fig. 3.1 Infonavit Villa Frontera



→ Más de 60 golpes

Fig. 3.2 Unidad habitacional San Pedro



→ Más de 60 golpes

Fig. 3.3 Calle 16 sur y 11 Ote. Finanzas

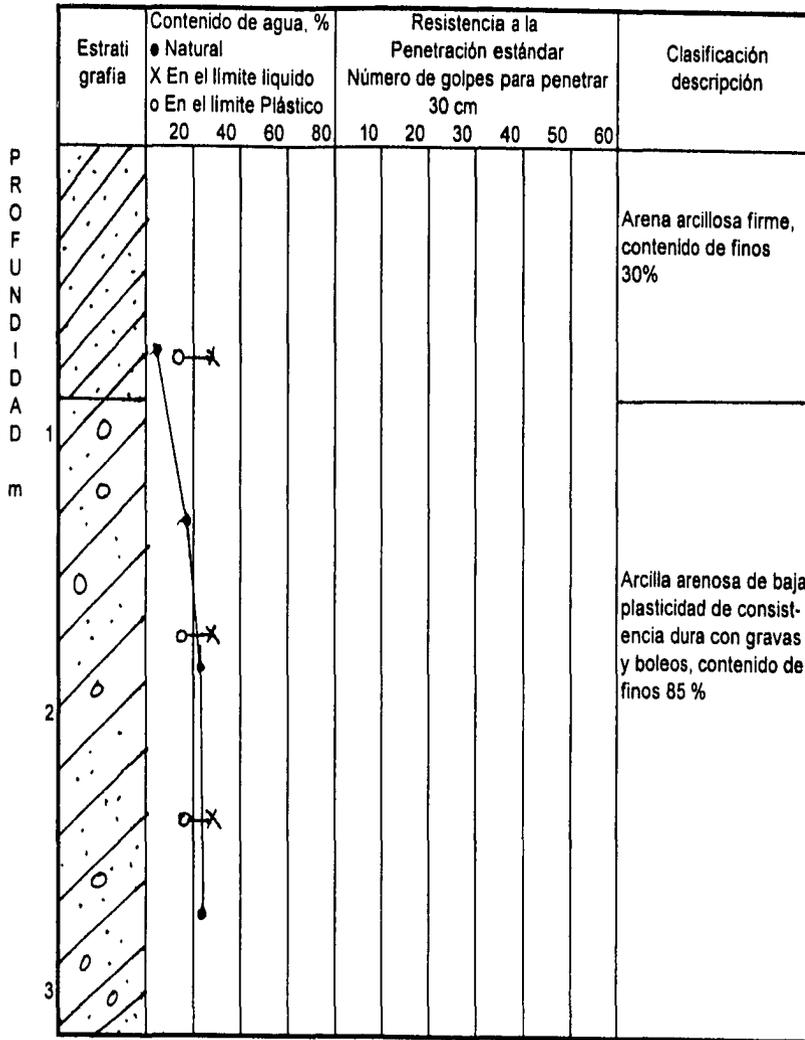


Fig. 3.4 Autopista Puebla-Orizaba corredor industrial Resurrección

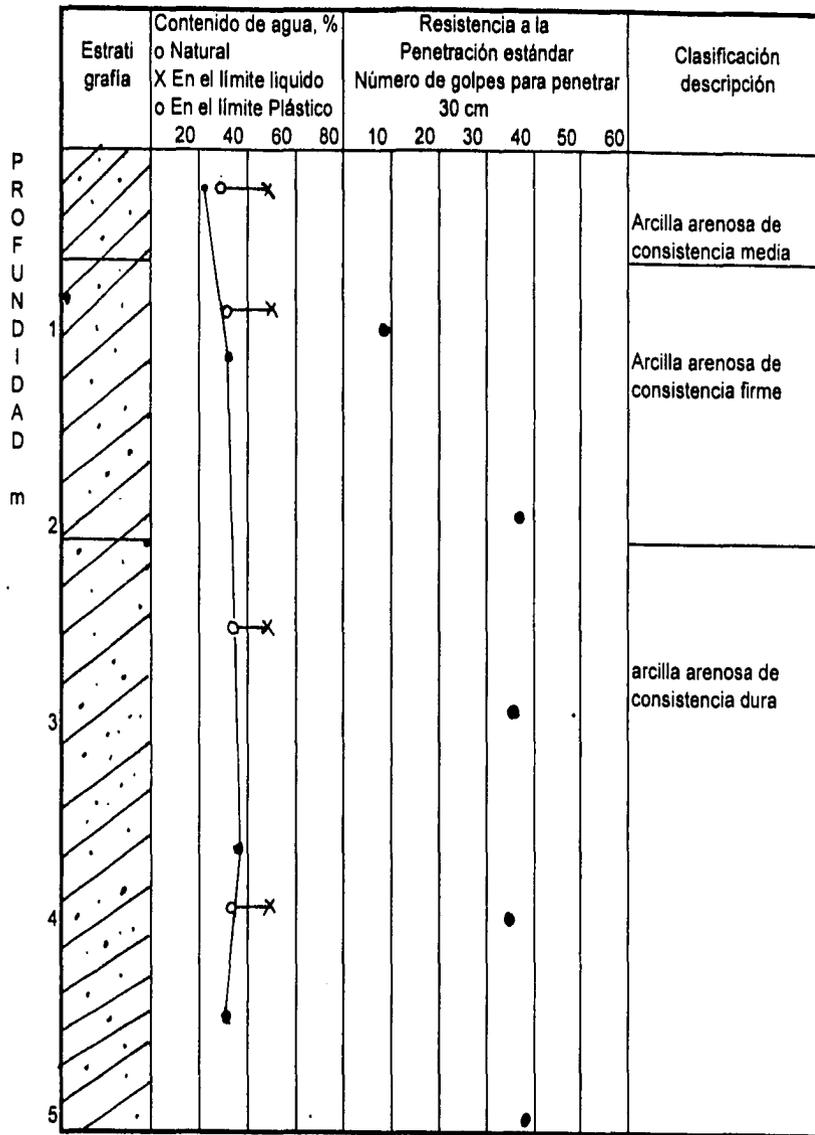
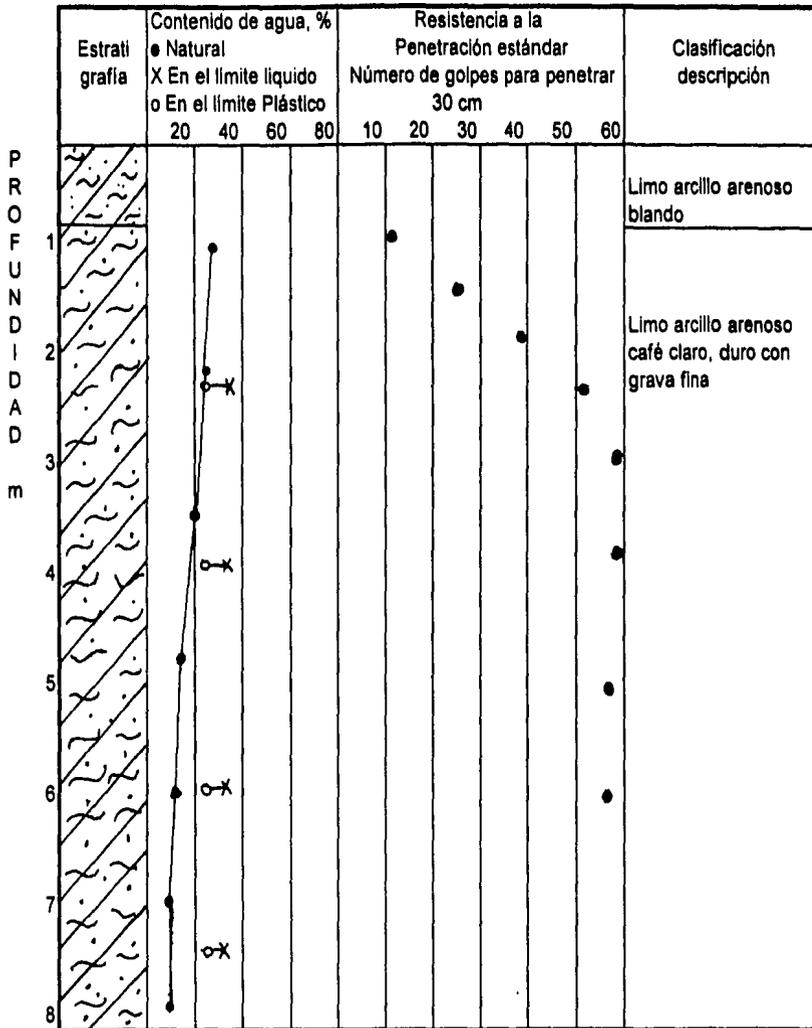


Fig. 3.5 Estacion de bomberos bulevar Valsequillo

P R O F U N D A D A m	Estratigráfica	Contenido de agua, %				Resistencia a la Penetración estándar						Clasificación descripción		
		o Natural				Número de golpes para penetrar 30 cm								
		X En el límite líquido	o En el límite Plástico			10	20	30	40	50	60			
20	40	60	80											
												→	Limo arenoso arcilloso duro	
3													Espuma volcánica (tezontle) color rojo muy compacto	
6											R			
9												R		
12												R		
15												R		
18												R		

R = Avance por Rotación
 → Más de 60 golpes

Fig. 3.6 Cerro de la Paz



Más de 70 golpes

Fig. 3.7 Museo de Historia natural, Cerro de los Fuertes

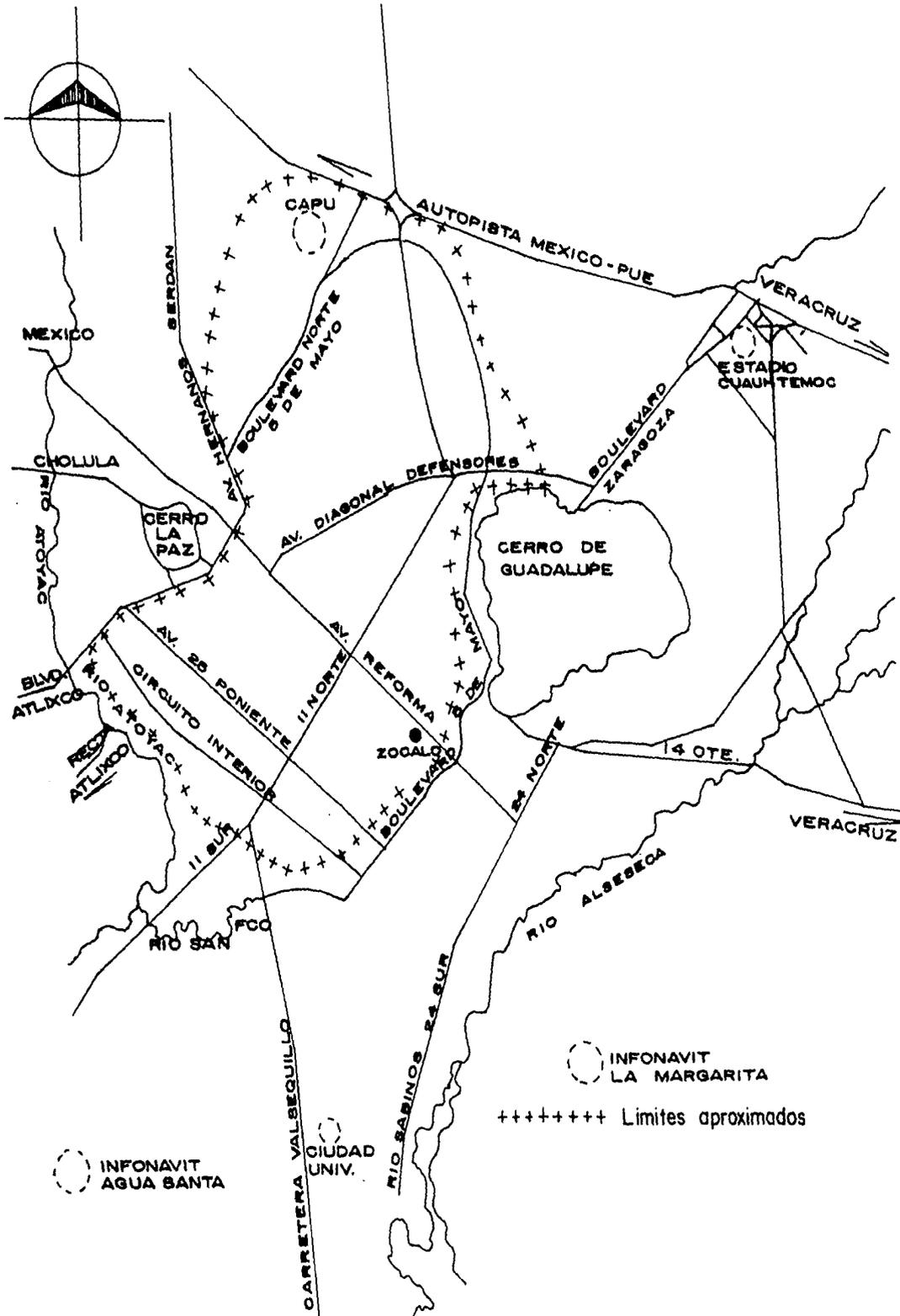
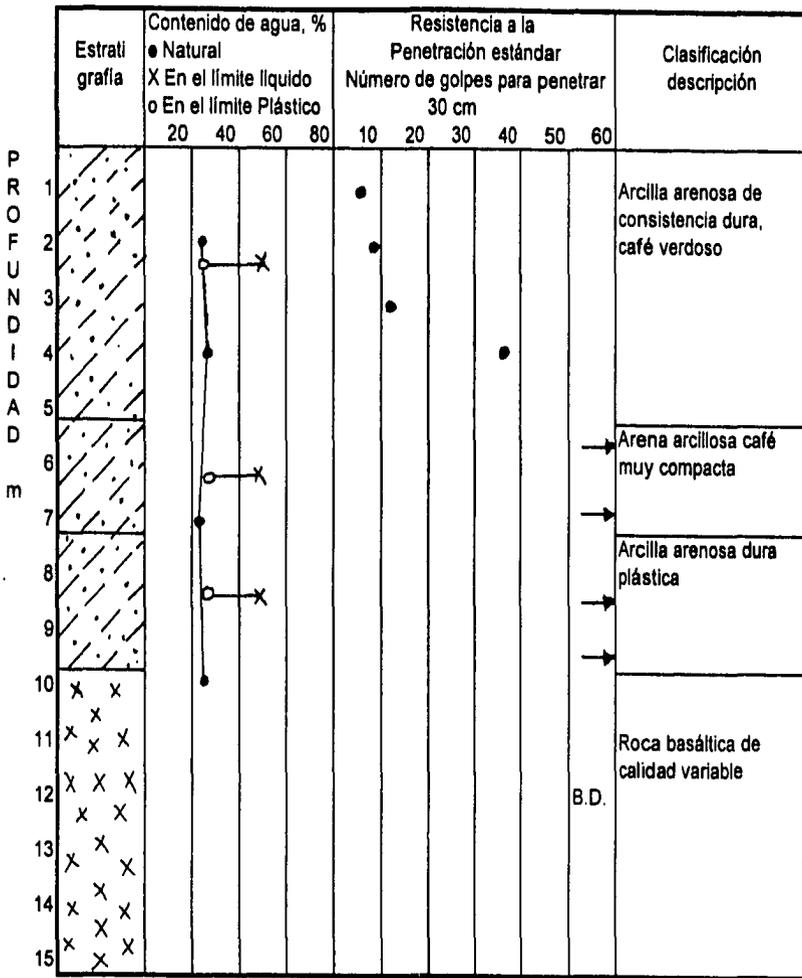


FIG. 3.8 Extensión aproximada del lago de edad pliocénica

P R O F U N D I D A D m	Estratigráfica	Contenido de agua, %				Resistencia a la Penetración estándar						Clasificación descripción	
		o Natural				Número de golpes para penetrar 30 cm							
		X En el límite líquido	o En el límite Plástico			10	20	30	40	50	60		
		20	40	60	80								
1													Limo arenoso
2													Roca caliza 97 % de carbonato de calcio 3 % otros minerales
3													
4													
5													
6													
7													
8												Toba andesítica de espesor indefinido	
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													

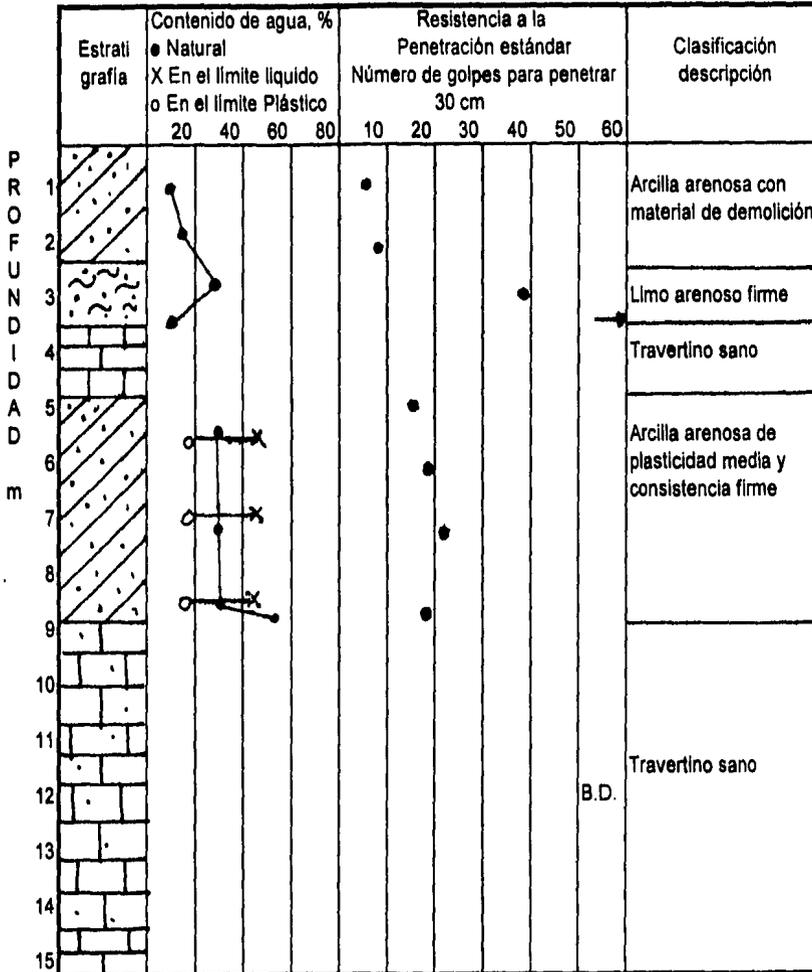
Fig. 3.9 Cementos Atoyac, estudio de resistividad eléctrica



→ 50 Golpes avanza 20 cm.

B. D. = Barril Denison

Fig. 3.10 Avenida Juárez y calle Chietla



→ 50 Golpes avance 20 cm.

B. D. = Barril Denison

Fig. 3.11 Avenida 5 poniente 715

P R O F U N D I D A D m	Estrati grafia	Contenido de agua, %				Resistencia a la Penetración estándar					Clasificación descripción	
		● Natural				Número de golpes para penetrar 30 cm						
		X En el límite líquido o En el límite Plástico				10	20	30	40	50		60
1		●	○	X								Limo arcilloso blando
2		●	○	X								Arcilla arenosa con grava fina, consis- tencia firme
3		●										Caliza sana
4		●										Limo arcilloso
5		●										Caliza con travertino
6		●										Limo arcilloso
7		●										Roca andesita sana
8		●										Limo arcilloso
9		●										Travertino sano
10		●										Limo arenoso muy firme
11		●										
12		●										
13		●										
14		●										
15		●										

Fig. 3.12 Avenida Juárez 2111 Col. la Paz

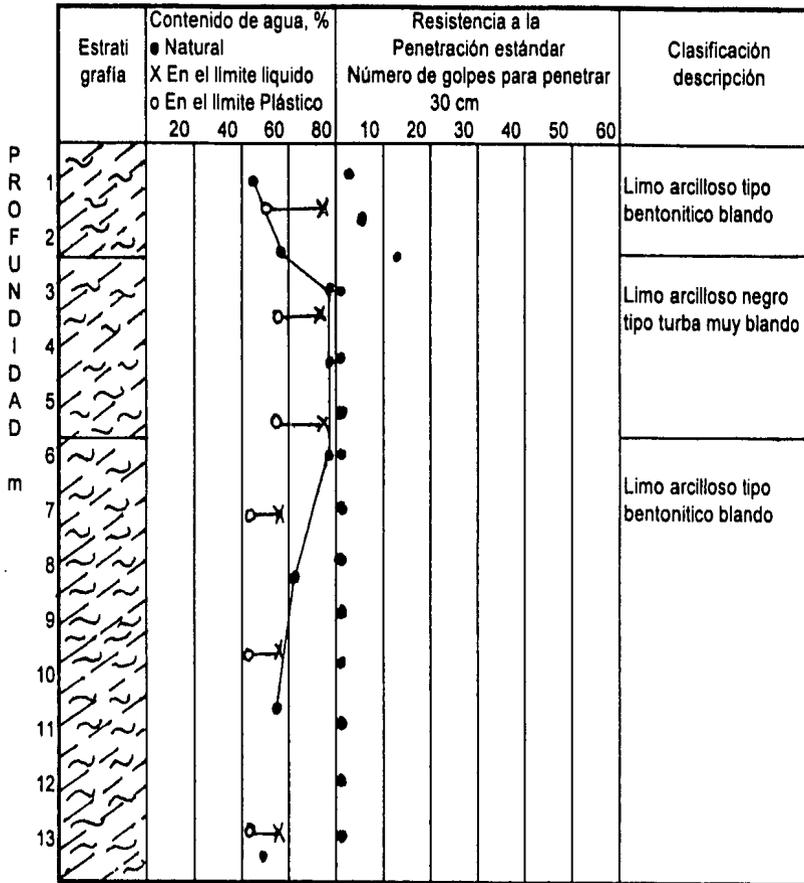


Fig. 3.13 Calle 29 Norte 1003

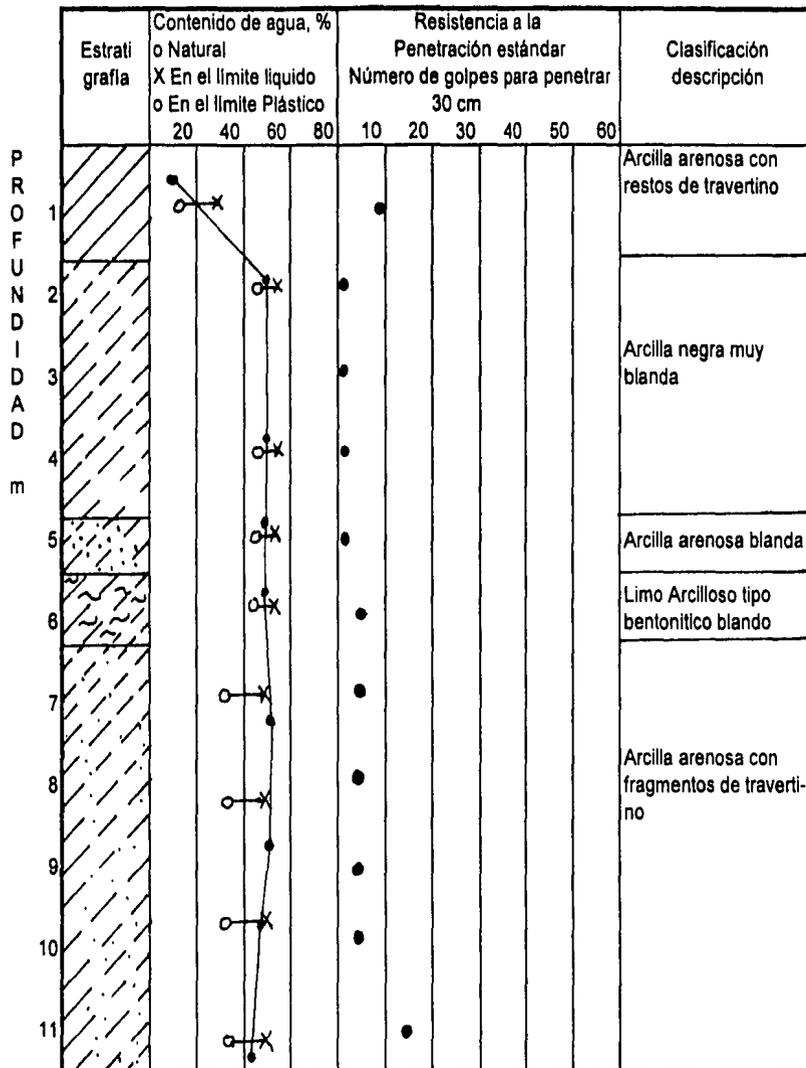


Fig. 3.14 Avenida 4 Poniente 1903

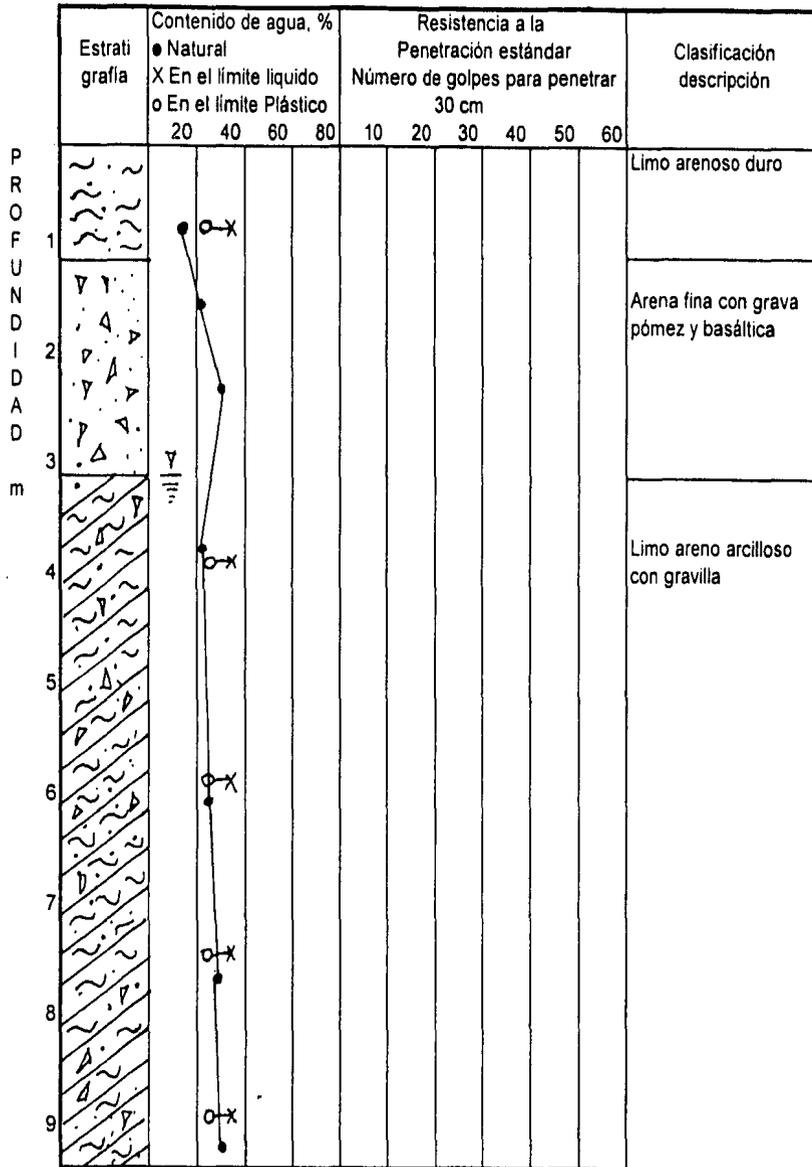


Fig. 3.15 Bulevar Heroes del 5 de mayo y 27 Ote.

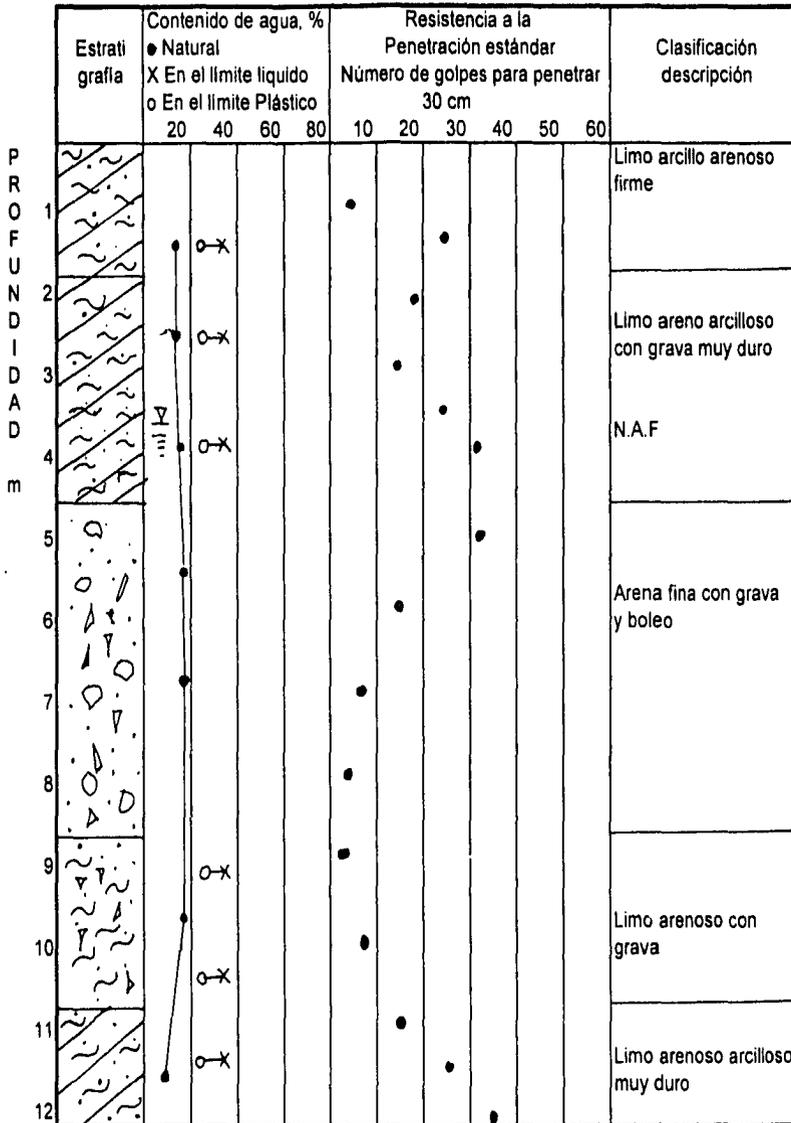
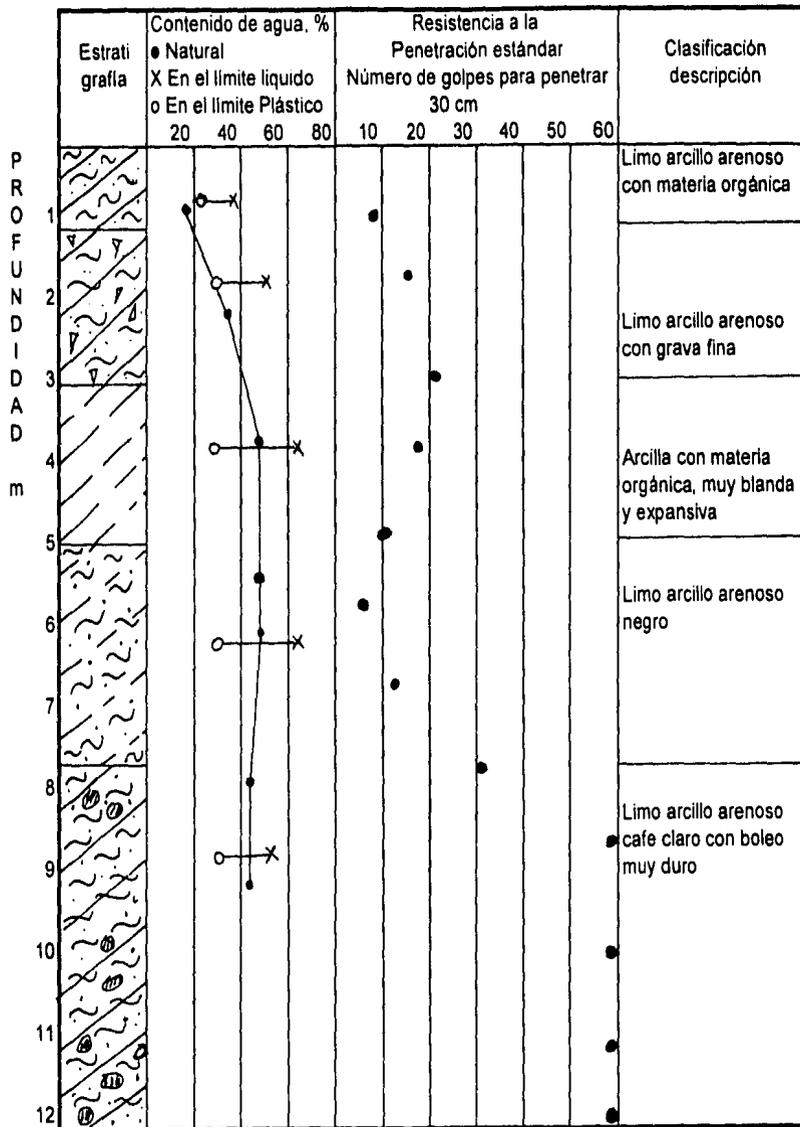


Fig. 3.16 Centro escolar bulevar 5 de mayo y 13 Ote.



Más de 60 golpes

Fig. 3.18 Cerezo, zona la calera

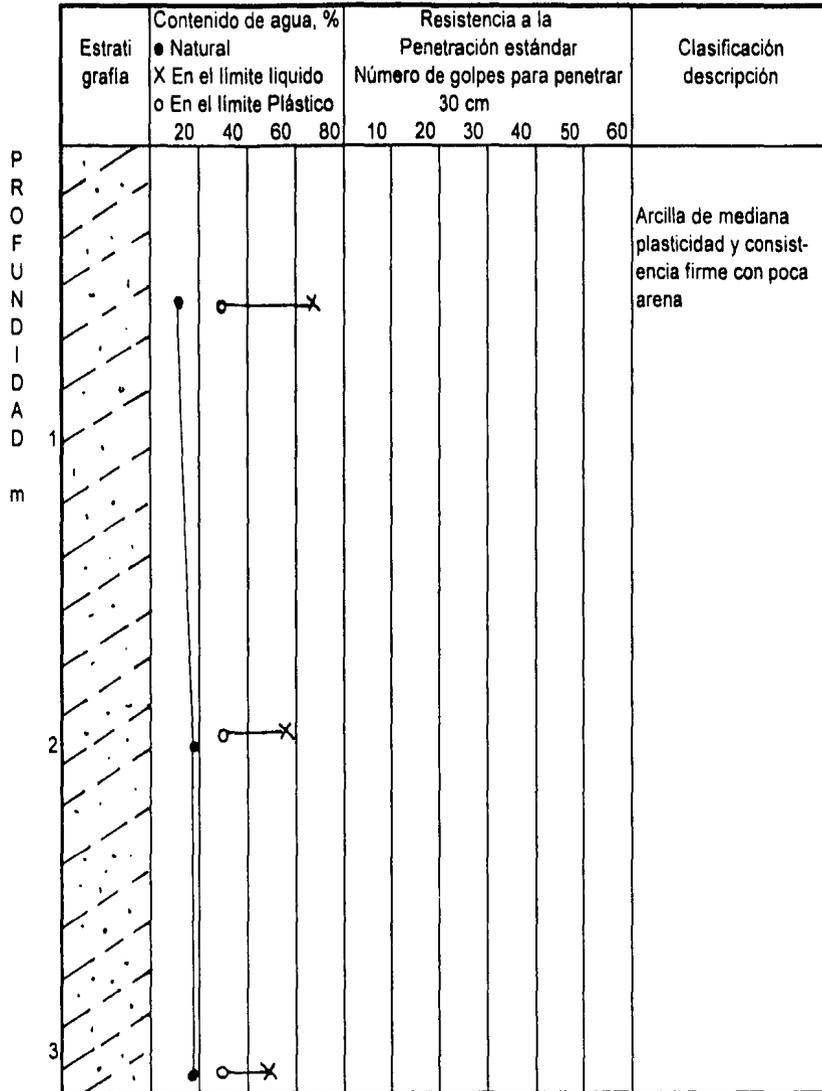
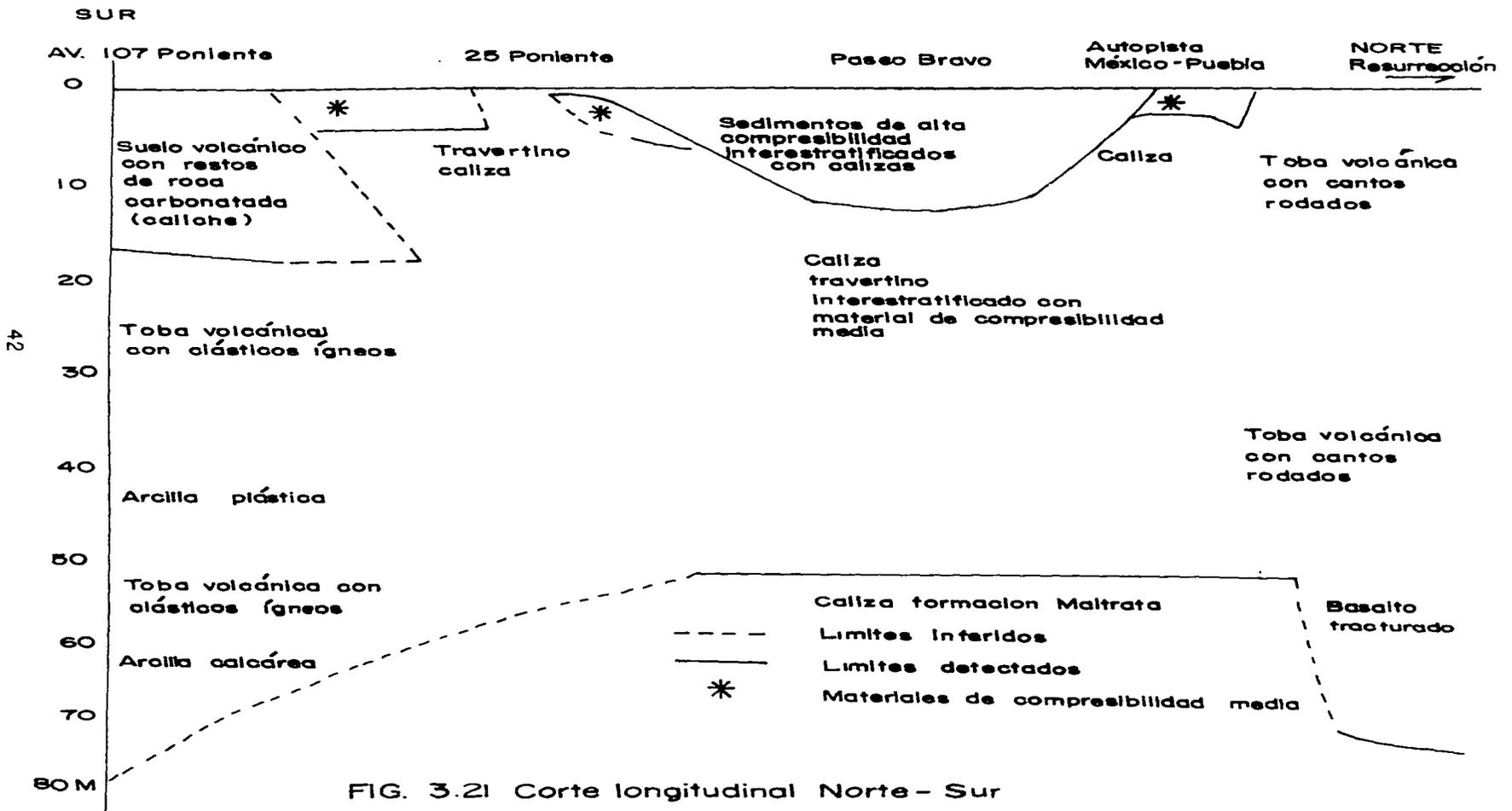


Fig. 3.19 Avenida 27 Poniente 3509



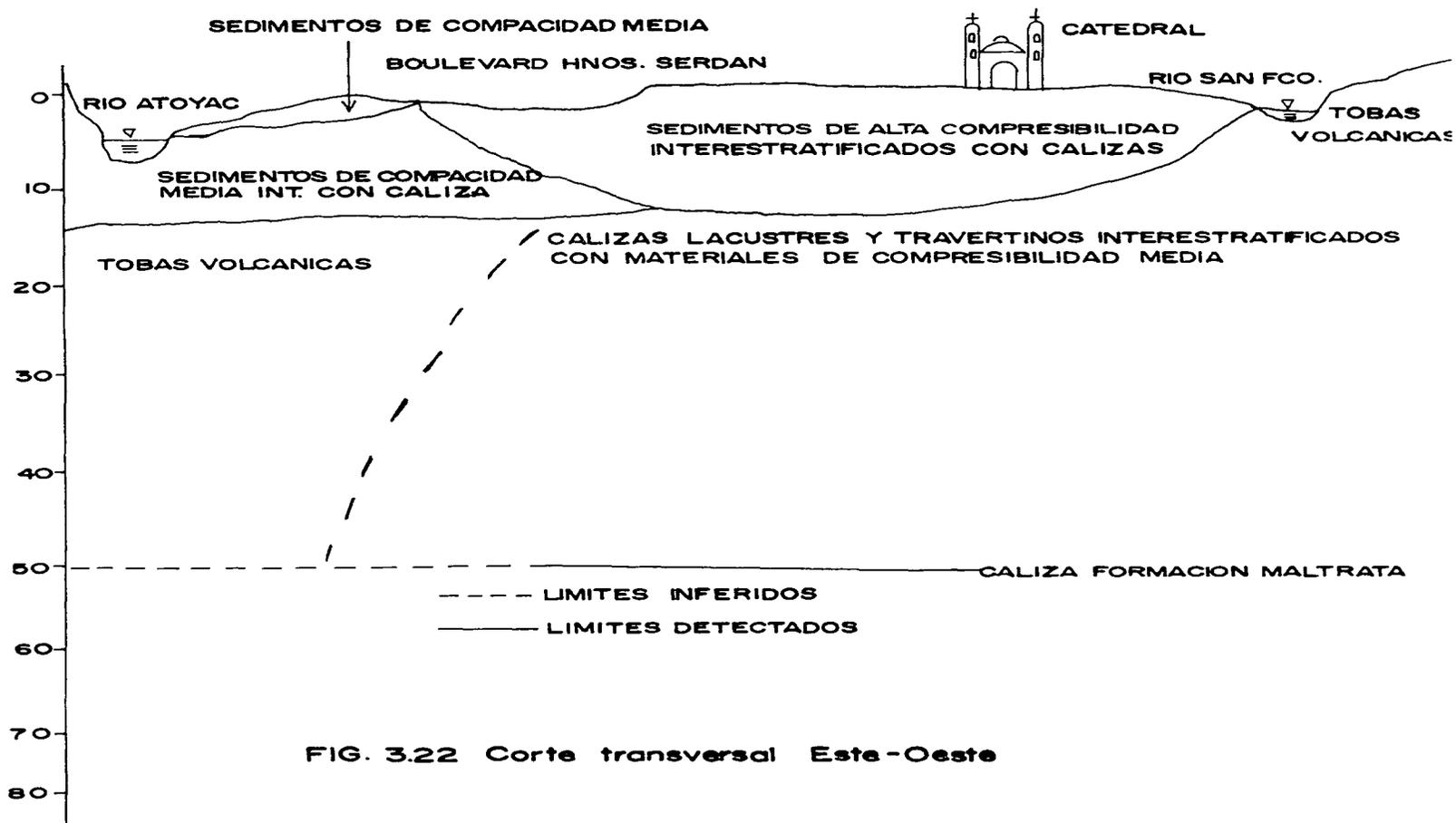


FIG. 3.22 Corte transversal Este-Oeste

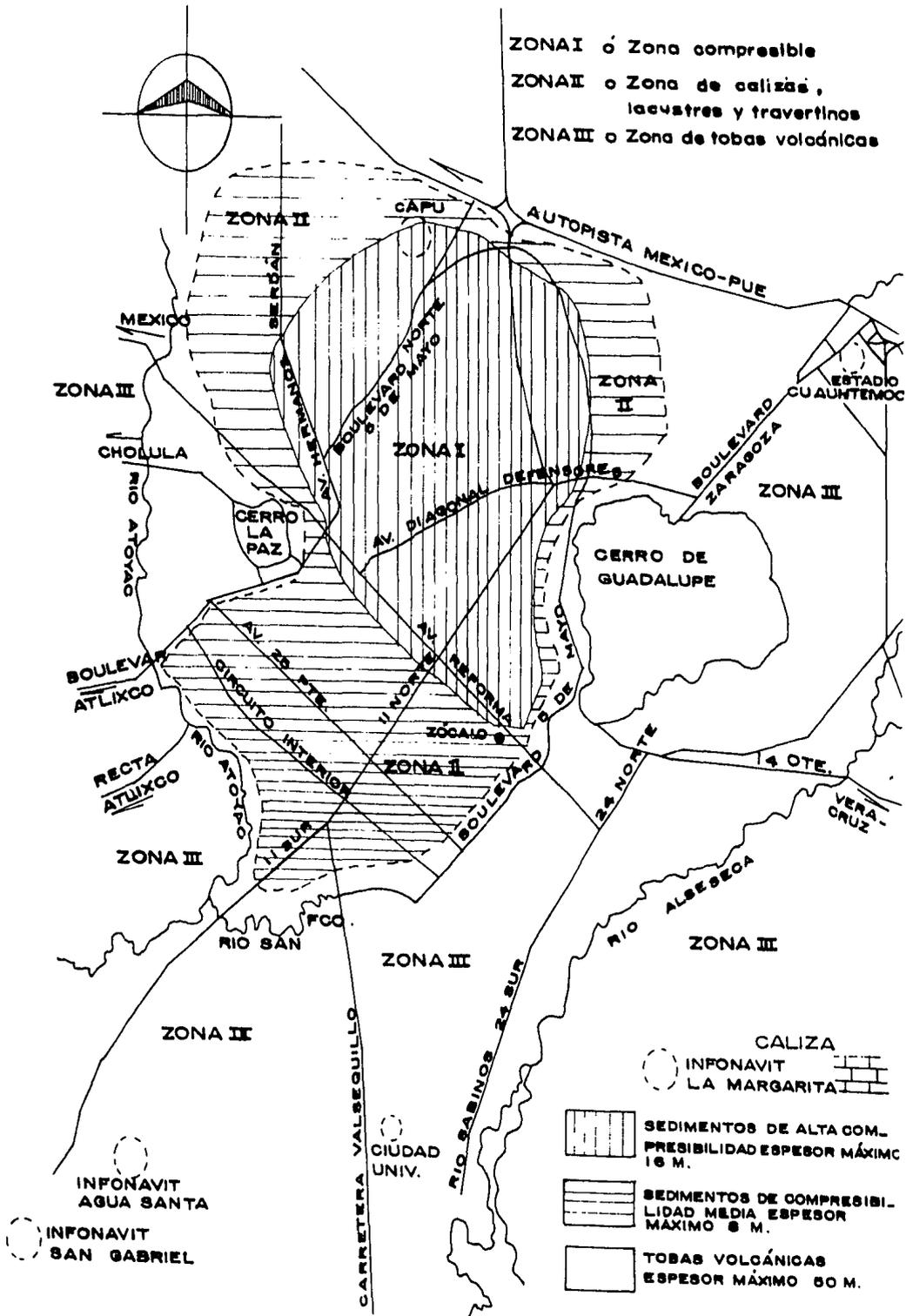


Fig. 3.23 zonas geotécnicas propuestas

CAPITULO IV

EFFECTOS DE SITIO

4.1 INTRODUCCION

Como parte de un trabajo de microzonificación es indispensable identificar las áreas en que se presenta el fenómeno de amplificación sísmica como consecuencia de sus condiciones geológicas, topográficas y geotécnicas.

Los efectos de la amplificación del movimiento sísmico se manifiestan en daños de intensidad variable en las estructuras, principalmente por la absorción de energía sísmica. Entre mayor sea la amplificación, mayor energía por unidad de área existe en el terreno y por lo tanto, mayor energía se transmite a las estructuras.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo del presente capítulo es:

Analizar los acelerogramas, espectros de respuesta de sitio, y determinar la amplificación sísmica en la ciudad de Puebla por medio de dos técnicas: a) La técnica estándar b) La técnica de Nakamura. Para analizar los efectos de sitio se utilizan como señal de excitación temblores y vibración sísmica ambiental.

4.3 CONCEPTOS BASICOS

ACELEROGRAMA

Es un registro continuo de las aceleraciones del terreno como función del tiempo durante un sismo. Para conocer las características del movimiento en un sitio, es necesario conocer el acelerograma de tres componentes ortogonales dos horizontales y una vertical.

El acelerograma es una función aleatoria en el dominio del tiempo formada por una sucesión no periódica de impulsos. El valor del contradominio de la función es la aceleración del terreno en la superficie. La amplitud de la aceleración del terreno indica la severidad del movimiento.

ONDAS SISMICAS

El foco sísmico (hipocentro) situado bajo la superficie terrestre a profundidades que oscilan de decenas hasta centenas de km, libera energía que al propagarse en un medio elástico produce dos tipos de ondas llamadas de cuerpo: ondas primarias o de compresión (P), las cuales se propagan en la misma dirección de su propia vibración y ondas secundarias o de cortante (S), las cuales se propagan en una dirección perpendicular a su propia vibración. Los acelerogramas registran tres tipos de ondas sísmicas: primarias, secundarias y superficiales.

Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie del suelo originan ondas de superficie, las cuales viajan paralelamente a ésta y cuya amplitud tiende a cero conforme aumenta la profundidad. Las ondas

superficiales son las Rayleigh y las Love. En las Rayleigh, para una frecuencia dada el movimiento del terreno en un punto dado es una elipse contenida en un plano vertical, mientras que en las de Love, que sólo se presentan en medios estratificados, el movimiento de las partículas es paralelo a la superficie y perpendicular a la dirección de propagación.

La velocidad de propagación (V_p) de la onda de compresión está dada por:

$$V_p = \left[\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

La velocidad de la onda de corte está dada por:

$$V_s = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

donde

E módulo de elasticidad

$G = E/2(1 + \nu)$ módulo de rigidez al corte

ρ densidad de masa

ν relación de Poisson

SISTEMA SENCILLO

Se llama sistema sencillo a una estructura que tiene un solo grado de libertad y parámetros constantes. Un sistema de este tipo se presenta en la Fig.4.1 en la que:

C Constante del amortiguador (fuerza que a velocidad unitaria, se opone a la deformación)

K rigidez (fuerza por unidad de deformación que se opone a esta)

M masa

x_0 desplazamiento total de la base

x desplazamiento de la masa

$y = x - x_0$ el desplazamiento de la masa con respecto al suelo

El principio de D'Alembert (condición de equilibrio dinámico) permite expresar:

$$M\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = 0 \quad (4.3)$$

donde los puntos sobre las literales indican diferenciación con respecto al tiempo.

Sustituyendo $x = (x_0 + y)$ se obtiene :

$$M\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{x} \quad (4.4)$$

Dividiendo la igualdad entre M

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2 y = -\ddot{X}_0 \quad (4.5)$$

donde $\zeta = C/C_c$, $C_c = 2\sqrt{KM}$ y $\omega = \sqrt{K/M}$

En estas condiciones el sistema se rige por una ecuación diferencial lineal .

El caso especial en que $x_0 = 0$, es decir, en que la base tiene movimiento uniforme, corresponde a vibraciones libres. La solución de la ecuación 4.5 es

$$y = y_0 e^{-\zeta\omega t} \text{sen } \omega'(t - t_0) \quad (4.6).$$

Cuando x no es idénticamente nula y el sistema se encuentra en reposo en el instante $t=0$ (es decir $y(t) = 0$, y $(0) = 0$), la solución de la ec. (4.5) se puede expresar en forma de la llamada integral de Duhamel:

$$y(t) = -\frac{1}{\omega'} \int_0^t \ddot{x}_0(\tau) e^{\zeta\omega(t-\tau)} \text{sen } \omega'(t-\tau) d\tau \quad (4.7)$$

donde $\omega' = \omega\sqrt{1-\zeta^2}$, y_0 y t_0 son constantes que satisfacen las condiciones iniciales-

La cantidad $C_c = 2\sqrt{KM}$ se conoce como amortiguamiento crítico. Cuando la constante del amortiguador C es igual o mayor que C_c no oscila al desplazarlo o al hacerlo adquirir velocidad, sino que regresa gradualmente a su estado original no deformado, el cual recupera después de un tiempo infinitamente largo. Cuando la constante del amortiguador es menor que C_c , el sistema tiende a oscilar con amplitudes cada vez más pequeñas a su posición original. ζ se define como la relación C/C_c y se usa como medida del amortiguamiento. Esta cantidad se conoce como relación de amortiguamiento (Rosenblueth, 1976).

ESPECTRO DE RESPUESTA

Es la respuesta máxima a un sismo de un conjunto de sistemas elástico-lineales de un grado de libertad con un determinado valor de amortiguamiento y de diferentes periodos naturales de vibración Fig.4.2. Si cada una de esas estructuras se excita en su base con la historia de aceleraciones de un temblor dado, el valor máximo absoluto de su respuesta representa la ordenada del espectro de respuestas para un amortiguamiento y período natural elegidos.

Para facilitar el cálculo y la representación conviene observar que:

$$V \approx \omega D = S_v \quad (4.8)$$

$$A \approx \omega^2 D = S_a \quad (4.9)$$

donde:

ω es la frecuencia circular natural, D, V, A , son el desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta del sistema de un grado de libertad bajo la excitación aplicada en su base. Los segundos miembros de

estas expresiones se conocen como espectros de pseudovelocidad y pseudoaceleración (Reséndiz et al, 1979).

AMPLIFICACION DEL MOVIMIENTO SISMICO. Es el cociente de la amplitud del movimiento en un punto A de la superficie libre del depósito de suelo y un punto B de la frontera de la roca base Fig. 4.3. En la anterior definición se hace la hipótesis de que la roca base es rígida y la amplificación del movimiento sísmico que tiene lugar en el depósito de suelo es independiente de las propiedades índice y mecánicas de la roca base.

EFFECTOS DE SITIO. Se refiere a la alteración que sufren las características de la onda sísmica de corte tales como: velocidad, frecuencia, longitud de onda y amplitud al pasar de la interfase entre la roca base rígida y el depósito de suelo con menor rigidez y propagarse a través de éste hasta alcanzar la superficie.

La alteración de las ondas de corte se manifiesta con un cambio en las amplitudes y el contenido de frecuencias del movimiento.

Los factores inherentes al sitio que principalmente intervienen en la alteración de las ondas son:

1. Propiedades mecánicas dinámicas del depósito de suelo.
2. Condiciones de frontera y la inclinación de la superficie de contacto entre la roca base y el depósito de suelo.
3. Extensión y profundidad del depósito de suelo.

ESPECTRO DE AMPLITUD DE FOURIER. El espectro de un acelerograma de un sismo es una medida de la energía como función de la frecuencia en un sistema lineal de un grado de libertad al final de la excitación. Se calcula por medio de la siguiente expresión

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} e^{i\omega t} x_0(t) dt \quad (4.10)$$

FUNCION DE TRANSFERENCIA EMPIRICA. Es el cociente de las ordenadas del espectro de Fourier para un mismo temblor, correspondientes a una misma frecuencia en dos estaciones sísmicas. Una estación debe estar sobre terreno blando y otra en terreno rígido (Ordaz et al, 1988; Singh et al, 1988).

$$A(\omega) = F_1(\omega)/F_2(\omega) \quad (4.11)$$

$F_1(\omega)$ espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal (Norte-Sur o Este-Oeste) en terreno blando.

$F_2(\omega)$ espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal (Norte-Sur o Este-Oeste) en terreno rígido.

VIBRACION AMBIENTAL

La vibración sísmica ambiental se debe a la energía que produce la actividad humana como, tráfico de autos, trenes, metro, operación de maquinaria, explosiones subterráneas, movimiento de edificios etc. Esta energía se propaga a través de la estratigrafía más superficial en forma de ondas de corte y Rayleigh. Su principal ventaja y característica es su estabilidad, ya que al obtener un registro tomado

en diferentes tiempos (incluso años) y obtener su espectro de Fourier para un mismo sitio, se tiene el mismo período dominante. En cambio, su amplitud varía de acuerdo con la intensidad de la excitación ambiental (Lermo, 1990). Las vibraciones ambientales originadas por actividad humana se denominan microtemores o microtrepidaciones y son de período corto (Masaki y Lermo, 1988). La vibración ambiental originada por causas naturales como viento, presión atmosférica, oleaje es de período largo.

4.4 INFORMACION ACELEROGRAFICA

Los datos provienen de la red sísmica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla que inició su funcionamiento desde el año de 1987. Dicha red tiene tres estaciones en la zona urbana de la ciudad de Puebla y se complementa con la estación SXPU del Instituto de Ingeniería de la UNAM que opera desde el año de 1978. Las estaciones de la BUAP son: estación CAPS (central de abastos de Puebla), localizada al Norte de la ciudad; estación PBPP (Paseo Bravo), localizada en el centro histórico de la ciudad; estación UAPP localizada al Sur de la ciudad (Escuela de ingeniería civil, Ciudad universitaria) y cuentan con acelerógrafos digitales DCA-333. La estación SXPU se localiza en la Avenida 25 Pte. entre 15 y 17 Sur y cuenta con un acelerógrafo digital DCA-310. De la red acelerográfica se analizan acelerogramas, espectros de respuesta de sitio y cocientes espectrales. Los eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica se relacionan en la tabla 4.1.

4.5 INFORMACION SISMOGRAFICA

Se contó con la información de una red temporal de sismógrafos digitales. Los datos que proporciona esta red permiten evaluar los efectos de sitio en varios puntos de la ciudad y compararlos con los de vibración sísmica ambiental. Los registros de vibración ambiental por su facilidad de operación y rapidez de obtención permiten efectuar un número de mediciones mucho mayor en menor tiempo. Los instrumentos utilizados en la red fueron 6 sismógrafos digitales PRS-4 de Scintres con memoria de estado sólido. Los sensores utilizados fueron sismómetros Lennartz L-3d de tres componentes y frecuencia natural de 1 s. Estos instrumentos se distribuyeron en la zona urbana de la ciudad de Puebla, en función de resultados preliminares de vibración ambiental.

La operación de la red temporal de sismógrafos y el equipo para obtener los registros de vibración sísmica ambiental así como también el procesamiento de la información fue hecha por becarios egresados de la B.U.A.P. y personal del departamento de sismología del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. Lo anterior forma parte de un proyecto de investigación sobre los efectos de sitio del subsuelo en la ciudad de Puebla patrocinado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; los resultados fueron proporcionados gentilmente por el Dr. Francisco Chávez-García y el M.C. Javier Lermo Samaniego responsables del proyecto.

Las estaciones sismográficas temporales fueron 10 en total y de estas estaciones sólo se analizan los cocientes espectrales. La tabla 4.2 presenta la información de todos los eventos sísmicos registrados por la red temporal de sismógrafos.

4.6 MEDICIONES DE VIBRACION AMBIENTAL

Para estimar los períodos dominantes por medio de esta técnica, se registraron microtemores en 39 sitios ubicados en diferentes zonas estratigráficas de la ciudad de Puebla. Se utilizaron tres sensores de velocidad (uno por cada componente espacial del movimiento) con período natural de 5 s y

amortiguamiento de 70 % del crítico. Estos sensores se acoplaron a un registrador Sprengnether DR-100, el cual digitaliza las señales con una velocidad de muestreo de 100 Hz y las graba multiplexadas en cinta magnética.

En cada punto de medición de vibración sísmica ambiental se obtuvieron dos registros de 1 min. de duración, en cada uno de estos se seleccionaron de 4 a 6 ventanas para las tres señales (NS, EW y vertical) con una duración aproximada de 20 s. Para las tres componentes se calcularon sus respectivos espectros de amplitud de Fourier. Para estimar el período dominante de cada sitio se realizó únicamente la razón espectral con la técnica de Nakamura.

La Tabla 4.3 presenta la localización de los puntos de medición de microtemblores, y los valores promedio del período dominante y la amplificación relativa A_r . En la última columna se indica el peso de cada observación. Esto se refiere a la confianza que se pueden tener en cada una de las estimaciones. El peso P1 corresponde a aquellas observaciones en las que aparece muy claramente el período dominante. El peso P2 corresponde a aquellas observaciones en las cuales, aunque aparece un pico de resonancia, el período dominante es menos claro. El peso P3 indica aquellos puntos en los que es difícil identificar con confianza un pico de resonancia, y por lo cual las estimaciones de T_0 y A_r son menos confiables (Lermo J. y Chávez-García, 1994).

4.7 ANALISIS DE ACELEROGRAMAS

Cuando un tren de ondas llega a la superficie de contacto, entre terreno blando y terreno rígido, parte de la energía es reflejada a la formación inferior por la que llegó y la otra parte continúa viajando hacia arriba, cambiando su velocidad de propagación y reflejándose parcialmente cada vez que alcance una nueva frontera entre materiales con propiedades mecánicas diferentes. El resultado es que el acelerograma que se obtiene en la parte superior de un suelo blando es distinto al que se obtendría en terreno firme si no existiesen las formaciones superiores.

Las condiciones de la geología superficial se manifiestan en los acelerogramas cuando:

- a) Un tren de ondas sísmicas de corte llega a la base del depósito de suelo suave y el período de la onda coincide con el período natural de vibración del depósito de suelo. En consecuencia se obtienen respuestas máximas cuando estos períodos son coincidentes (Zeevaert, 1988).
- b) Los períodos dominantes del movimiento sísmico son más largos en terreno blando que en terreno rígido.
- c) El tiempo de duración del movimiento sísmico es mayor en terreno blando que en terreno rígido.
- d) Las aceleraciones presentan una amplitud más uniforme en el acelerograma registrado en terreno blando que en el registrado en terreno rígido.
- e) Para pequeños temblores las aceleraciones registradas en terreno blando son considerablemente más grandes que en terreno rígido, (Seed et al, 1969).

En las Figs. 4.4 a 4.8 se presentan los acelerogramas de las estaciones CAPS, PBPP, UAPP. En las Figs. 4.9 a 4.10 se presentan algunos acelerogramas de la estación SXP. La estación SXP no se toma en cuenta en el análisis debido a que no existen sismos registrados simultáneamente con las demás estaciones, pero se presentan algunos acelerogramas para proporcionar una mayor información acerca de las características de los movimientos sísmicos en esta estación.

Para hacer una evaluación tentativa de los efectos de sitio en los acelerogramas examinemos los que pertenecen al sismo ocurrido el 04-25-89 con relación al tiempo de duración de la fase fuerte y el período en que se registran las aceleraciones:

En la estación PBPP para las dos componentes horizontales la fase fuerte del sismo tiene una duración mayor que en la estación CAPS y UAPP. En relación al período la estación UAPP para las dos componentes horizontales es la que presenta períodos notablemente más cortos que PBPP y CAPS.

Con respecto al sismo del 09-16-89 los efectos de sitio se manifiestan en los acelerogramas de la estación PBPP para las dos componentes horizontales en la mayor duración de la fase fuerte del sismo, la mayor amplitud de las aceleraciones y los períodos más largos en que éstas se registran con relación a la estación UAPP. En la tabla 4.4 se concentran los datos más importantes de los acelerogramas.

Con base en la estratigrafía de las estaciones y en las propiedades mecánicas del subsuelo (capítulo III), se observa en los acelerogramas que en las estaciones sobre terreno blando PBPP y CAPS la duración de la fase fuerte del sismo y los períodos de la aceleración son mayores que en la estación UAPP. Para sismos pequeños, la amplitud de las aceleraciones es mayor en la estación PBPP que en la estación UAPP que se ubica sobre terreno rígido.

4.8. ANALISIS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DE SITIO

Para obtener los espectros de respuesta de sitio, se toman como datos la historia de las aceleraciones del terreno. El espectro de respuesta se realiza mediante un programa de computadora denominado Shake (Schnabel et al, 1972).

La forma del espectro de respuesta en un sitio y su máxima (as) amplitudes así como el período asociado a ésta (as) (Ovando Shelley comunicación personal) dependen de:

- a) La profundidad de la roca basal y las propiedades dinámicas de la columna estatigráfica y su variación con el nivel de deformación.
- b) Las características de la excitación de la fuente sísmica y ruta de propagación de las ondas sísmicas.

En las Figs. 4.11 a 4.20 se presentan los espectros de respuesta. En la tabla 4.5 se presentan las ordenadas espectrales máximas y sus períodos correspondientes.

El estudio de los espectros de respuesta de los registros de temblores de las cuatro estaciones nos indica que:

- 1) Las amplitudes de los diferentes espectros tiene relación con la magnitud del sismo: a mayores valores de la magnitud del sismo mayores valores de amplitud se presentan en las ordenadas de los espectros. Por lo tanto la amplitud de los espectros de respuesta da una idea de la severidad del movimiento del terreno.
- 2) La estación que presenta mayores valores de las ordenadas espectrales para el sismo del 04-25-89 es la estación CAPS seguida de la estación UAPP y por último la estación PBPP.
- 3) El valor del período para el cual se presentan las ordenadas espectrales máximas en los espectros de respuesta se presenta en un intervalo de variación muy similar. En consecuencia, a partir de los

espectros aquí presentados, no es posible identificar en qué estación influyen más las condiciones de la geología superficial.

4.9 AMPLIFICACION CON LA TECNICA ESTANDAR

Para aplicar esta técnica se debe cumplir con la condición de tener estratos horizontales que puedan considerarse planos sometidos a un estado de deformación plana; ya que no permite considerar condiciones de frontera en donde tengan lugar efectos bidimensionales ó tridimensionales. La función de amplificación relativa se calcula empíricamente por medio de la técnica de la razón espectral utilizando la expresión (4.11). Esta técnica requiere de una serie de estaciones ubicadas dentro de la zona en estudio, así mismo, es necesario registrar varios temblores o vibración sísmica ambiental y elegir una estación de referencia que esté ubicada sobre un afloramiento de roca o sobre el depósito de suelo que presente mayor rigidez; con respecto a esta estación se calcula la amplificación del movimiento sísmico de todas las demás estaciones. Al utilizar esta técnica se suponen válidas las dos hipótesis siguientes:

- 1) La estación de referencia está libre de efectos de sitio y únicamente tiene efectos de la fuente sísmica y de la ruta de propagación de las ondas sísmicas de corte (Lermo, 1993). Esta hipótesis no es absolutamente cierta en todos los casos ya que un afloramiento de roca puede tener efectos de sitio cuando se asienta en depósitos más profundos de suelo o como consecuencia de sus condiciones topográficas.
- 2) La distancia entre las estaciones de registro es despreciable para que no haya lugar a efectos de atenuación.

El inconveniente de la técnica estándar es que no siempre se registran simultáneamente los eventos sísmicos en la estación de referencia y en la estación en suelo blando. En ciertos casos también puede constituir un problema la selección del lugar para ubicar la estación de referencia, sobre todo en aquellos casos en que existe poca información acerca de la geología superficial.

4.10 ANALISIS DE LAS RAZONES ESPECTRALES

Las funciones de transferencia o razones espectrales se calcularon valuando numéricamente la expresión (4.11) con la ayuda de un programa de computadora. Con base en lo enunciado en el párrafo 4.9 se escogió como estación de referencia a la estación UAPP pues está localizada en un sitio constituido por toba volcánica compacta que no tiene rasgos topográficos que puedan modificar apreciablemente los movimientos sísmicos y por consiguiente se puede aceptar que está libre de efectos de sitio. Para la red temporal de sismógrafos digitales la estación de referencia se escogió a la estación museo localizada sobre toba compacta y roca basáltica en la zona cultural del cerro de Loreto y Guadalupe. El análisis de esta información se realizó por medio de la técnica de la función estándar y la técnica de Nakamura.

En la razón espectral CAPS/UAPP del sismo del 04-25-89 componente NS el nivel de amplificación alcanza un valor de 20 entre las frecuencias de 0.7 a 0.8 Hz. En la componente EW, el nivel de amplificación alcanza un valor de 20 para 0.9 Hz. La frecuencia dominante se ubica entre 0.7 y 0.9 Hz.
Fig. 4.21

En la razón espectral PBPP/UAPP del sismo 09-16-89 en la componente NS, el nivel de amplificación es de 2.5 entre 1 y 1.2 Hz. En la componente EW, el factor de amplificación tiene un valor aproximado de 3 entre 1 y 2 Hz. En éste sismo como el factor de amplificación es un poco mayor de 2 existe una pequeña amplificación sísmica en la estación PBPP. Para las dos componentes horizontales la frecuencia dominante de vibración es de 1.6 a 2 Hz ; Fig. 4.22

En la razón espectral PBPP/UAPP correspondiente al sismo del 04-25-89 se presentan dos picos en la componente NS con un nivel de amplificación de 1.7 y 1.5 entre las frecuencias de 0.3 a 0.4 y 0.9 a 1 Hz respectivamente. En la componente EW, el factor de amplificación alcanza un valor aproximado de 1.7 entre 0.6 a 0.7 Hz sin poder definirse cual es la frecuencia dominante del sitio. Cuando en la razón espectral de una estación el factor de amplificación es menor de dos se dice que no existen efectos de sitio y el factor de amplificación se puede atribuir a otras causas, tales como ruido sísmico ambiental o imprecisión en los aparatos de registro (Chávez-García, 1993); Fig. 4.23

Se puede concluir que mediante la técnica estándar se determinó que el periodo dominante de mayor valor (1.2) y la máxima amplificación (20) se presentan en la estación CAPS. En la estación PBPP se observa una amplificación casi nula y el periodo dominante es de 0.5 a 0.67. Por lo tanto de las tres estaciones acelerográficas la que presenta mayores efectos de sitio es la estación CAPS. En la tabla 4.6 se concentran los principales datos de las razones espectrales calculadas con la técnica estándar, de las estaciones acelerográficas.

4.11 TECNICA PARA CALCULAR AMPLIFICACION CON UNA SOLA ESTACION

La técnica para valuar efectos de sitio usando la relación del espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal entre el espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical de la misma estación, se basa en la hipótesis de que la componente vertical del terreno contiene más información de la fuente sísmica que las componentes horizontales. (Lermo, Chávez-garcía, 1993).

Tomemos en primer lugar a la ciudad de México, el caso típico por excelencia para ilustrar los efectos de sitio durante un sismo. La amplificación del movimiento del terreno se debe a una capa de arcilla delgada y extremadamente blanda que produjo un factor de amplificación de 50 en algunas frecuencias durante el gran temblor de Michoacán de 1985 (Singh et al, 1988a). A pesar de ser tan notorios los efectos de sitio, la Fig. 4.24 muestra que la componente vertical del desplazamiento tiene las mismas características y amplitudes similares independientemente del tipo de suelo de cada estación (Campillo et al, 1989). De acuerdo a lo anterior, se propone que la componente vertical del movimiento sísmico no depende de las propiedades dinámicas de la capa superficial.

La técnica originalmente fue propuesta para interpretar medidas de microtemblores por Nakamura (1989). Al respecto Liam (1991) dice: la hipótesis de partida es que la energía del microtemblor consiste principalmente de ondas Rayleigh, y la amplificación por efectos de sitio se debe a la presencia en la superficie de una capa de suelo blando sobre un semiespacio. En estas condiciones se tienen seis componentes del movimiento del terreno involucradas: componentes horizontal y vertical del movimiento en el semiespacio, y componentes horizontal y vertical del movimiento en la superficie de la capa de suelo blando.

De acuerdo con Nakamura, es posible estimar el efecto de amplitud de la fuente, A_S , por medio de la relación

$$A_s = V_s / V_B \quad (4.12)$$

donde V_s = espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical del movimiento en la superficie.

V_B = espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical del movimiento en el semiespacio.

Nakamura entonces, procedió a definir una expresión que estimara los efectos de sitio, S_E , como la relación

$$S_t = H_s / H_B \quad (4.13)$$

donde H_s = espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal en la superficie de suelo y H_B = espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal en la base de la capa suelo. Ahora, para compensar S_t por los efectos de la fuente, se calcula una función modificada de efectos de sitio, S_M , como

$$S_M = S_t / A_s \quad (4.14)$$

la cual manipulada algebraicamente es equivalente a

$$S_M = (H_s / V_s) / (H_B / V_B)$$

y finalmente, si aceptamos que la relación H_B / V_B es igual a la unidad, la función de efectos de sitio, puede escribirse como

$$S_t = H_s / V_s \quad (4.15)$$

donde H_s = espectro de Fourier de la componente horizontal y V_s = espectro de Fourier de la componente vertical de la misma estación para el mismo sismo.

La suposición que H_B / V_B es igual a la unidad fue verificada experimentalmente por Nakamura usando medidas de microtemores en perforaciones en el subsuelo.

4.12 CALCULO DE LA AMPLIFICACION CON LA TECNICA NAKAMURA

El procedimiento para calcular los espectros de Fourier para cada estación consistió en seleccionar en el acelerograma un intervalo en el dominio del tiempo para las tres componentes en el cual las ondas de corte alcanzan sus máximas amplitudes. Los espectros fueron suavizados con una ventana cuadrada de 1/3 de octava de ancho (octava: cuando el límite superior del rango de frecuencia de una banda es el doble del límite inferior, se dice que la frecuencia cubre una octava). Por ejemplo, la banda de 10 -20 Hz es una octava, el ancho de la banda es 10 Hz (Thomson, 1981).

Las razones espectrales definidas con la técnica de Nakamura se calcularon por medio de la expresión (4.15) con la ayuda de un programa de computadora.

El análisis de las gráficas de los espectros de Fourier de las estaciones acelerográficas CAPS, UAPP, PBPP y SXPB muestra que en la componente vertical del movimiento sísmico el nivel de amplitud en casi todas las frecuencias es menor que la amplitud de las dos componentes horizontales y de acuerdo con la hipótesis inicial, se presenta amplificación del movimiento sísmico en algunas frecuencias.

A continuación se presenta un breve análisis de las razones espectrales de las cuatro estaciones acelerográficas.

ESTACION CAPS. El nivel de amplificación medio para las dos componentes horizontales es de 6.5, correspondiente a una frecuencia promedio de 0.55 Hz; Fig. 4.25. Solo se tiene registrado un sismo.

ESTACION PBPP. El nivel de amplificación medio es de 6 para una frecuencia dominante de 0.55 Hz; el número de sismos registrados en esta estación es de cuatro, Figs. 4.26 a 4.29.

ESTACION UAPP. El nivel de amplificación medio es de 4 para un frecuencia dominante entre 1 y 2 Hz; el número de sismos registrados en esta estación es de tres; Figs. 4.30 a 4.32.

ESTACION SXPU. Es evidente la dispersión de los valores de las frecuencias para los cuales se presentan los valores máximos de amplificación; Figs. 4.33 a 4.37. Al respecto el Dr. Chávez-García investigador del Instituto de Ingeniería UNAM opina:

- a) La técnica de Nakamura en éste sitio no es la adecuada para determinar la amplificación del movimiento sísmico.
- b) Para los eventos registrados los efectos de sitio en esta estación no son de importancia para ser detectados por la razón espectral.

En la tabla 4.7, se presentan las estimaciones de los periodos dominantes y la amplificación relativa de las estaciones acelerográficas calculadas con la técnica de Nakamura

En la tabla 4.8, se presenta de las estaciones acelerográficas la amplificación relativa promedio y el periodo dominante promedio estimado por medio de la técnica Nakamura.

En la tabla 4.9, se presenta de las estaciones sismográficas los periodos dominantes y amplificación relativa estimados por medio de la técnica estándar y la técnica de Nakamura.

En la Fig. 4.38, se presenta la ubicación de las estaciones sismográficas y acelerográficas y los puntos de medición de vibración ambiental

En la Fig. 4.39, se presenta la distribución de los periodos dominantes determinados en la ciudad de Puebla.

En las Figs. 4.40 a 4.41, como ejemplo se presentan las razones espectrales de cuatro puntos de medición ambiental calculadas aplicando la técnica de Nakamura.

4.10 CONCLUSIONES

Se han presentado resultados preliminares de amplificación relativa en la ciudad de Puebla utilizando las razones espectrales de dos técnicas: la técnica estándar y la de Nakamura.

En la red temporal de estaciones sismográficas los periodos y la amplificación relativa en la mayor parte de las veces coinciden cuando se calculan por ambas técnicas con excepción de las estaciones CONALEP y ARTURO en las que los periodos dominantes determinados con ambas técnicas difieren.

La técnica de Nakamura para determinar efectos de sitio es mejor porque:

- a) No es necesario esperar a que sean registrados sismos simultáneamente en la estación de referencia y en el sitio en donde se desean evaluar los efectos de sitio.
- b) Es posible determinar los efectos de sitio de un lugar con una sola estación.
- c) Desaparece el problema de encontrar terreno firme y plano en que no haya efectos de sitio para ubicar la estación de referencia.
- d) De acuerdo con la hipótesis de partida es más representativo del depósito superficial el periodo dominante estimado por medio de la técnica Nakamura.

Tabla 4.1 Sismos registrados por la red acelerográfica de la ciudad de Puebla.

Estación	Fecha	Epicentro		Distancia (Km)	Profundidad (Km)	Magnitud
		Lat.	Long.			
CAPS	04/25/89	16.50	99.50	314	15	6.8
PBPP	04/25/89	16.50	99.50	314	15	6.8
	09/16/89	17.40	96.3	276	-	5.3
	05/02/89	16.41	99.54	325	33	5.2
	05/31/90	17.14	100.71	344	20	5.8
UAPP	04/25/89	16.50	99.50	314	15	6.8
	05/30/89	17.91	96.41	232	33	5.0
	09/16/89	17.40	96.30	276	15	5.3
SXPU	11/29/78	16.18	96.63	377	22	5.7
	14/03/79	17.81	101.2	351	49	6.5
	07/02/84	16.61	98.56	271	34	5.4
	11/02/85	16.00	95.32	461	-	5.5
	21/09/85	16.00	95.32	477	33	7.6
	19/09/85	18.82	102.57	400	-	8.1

Tabla 4.2 Sismos registrados por la red temporal de sismógrafos digitales de Puebla.

Evento	Día Juliano	Fecha	Tiempo origen	Lat. N	Long. W	Prof.	Mag. Mc
1	262	09/19/93	141057.3	14.00	93.44	11	5.1
2	270	09/27/93	060611.7	16.63	100.24	58	4.8
3	270	09/27/93	063758.3	16.51	100.42	50	4.6
4	273	09/30/93	182749.8	14.74	95.00	15	6.5
5	287	10/14/93	060448.0	14.19	93.26	10	4.9
6	289	10/16/93	093340.0	14.01	92.93	32	4.9
7	297	10/24/93	075217.7	16.5	99.00	10	6.7
8	261	09/18/93	020144.8	14.14	92.96	14	4.9
9	261	09/19/93	050117.3	14.31	93.37	99	4.9
10	261	09/19/93	054712.4	14.37	93.50	74	4.6
11	261	09/19/93	054712.4	14.20	93.30	83	4.8
12	263	09/20/93	012250.3	14.07	93.41	19	4.9
13	263	09/20/93	070631.4	13.85	92.86	61	4.9
14	287	10/14/93	094110.5	14.92	94.81	15	4.6

Tabla 4.3 Resumen de los resultados obtenidos con registros de vibración ambiental.

Sitio	Localización	Promedio		
		To	A	Peso
A01	Tepexi entre Amozoc y Esperanza.	0.4	2	P3
A02	Tehuacán entre Av. Juárez y Petalzingo.	0.4	3	P2
A03	Tlaxco cerca de Av. Juárez.	0.5	3	P3
A04	Chipilo y Av. Reforma Sur.	0.3	6	P1
A05	23 Norte entre 4 y 6 Poniente.	0.3	4	P1
A06	22 Poniente entre 17 Norte y Diag. Def. De la República.	0.3	5	P2
A07	Privada del Jaball entre 30 y 26 poniente.	0.8	2	P1
A08	Privada del jaguar y av. 30 Poniente.	0.8	3	P3
A09	18 Poniente entre 11 y 9 Sur.	0.7	4	P1
A10	5 Norte entre 28 y 30 Poniente.	0.7	3	P1
A11	frente al Fuerte de Loreto.	0.1	3	P1
B01	Av. Unidad deportiva cerca Estadio México 68.	2.0	3	P1
B02	Pino entre Sierra Guadarrama y Sierra Malumbre.	0.2	3	P2
B03	Parque Industrial Puebla 2000 en el cruce de calle B y D.	2.5	4	P1
B04	Manzanilla cerca al cruce del ferrocarril.	2.0	4	P3
B05	Josefa Ortiz de Domínguez cerca a Manzanillo.	0.7	2	P2
B06	Entre el mercado Xonaca y el Polideportivo.	0.8	4	P2
B07	Paseo San Francisco entre 14 y 16 Oriente.	0.7	3	P3
B08	13 Oriente entre 10 y 14 Sur.	0.8	17	P1
B09	35 Oriente y 16 Sur.	0.7	5	P1
B10	Río Balsas entre Av. San Ignacio y circunvalación.	0.7	3	P1
B11	Ingeniería y economía junto a la Av. Valsequillo.	0.4	3	P2
B12	Héroes de Zotoluco junto al Río Alseseca	0.2	5	P1
B13	Junto al CERESO.	0.7	2	P2
B14	Unidad Vicente Suárez entre calle 13 y Av. 5 de Mayo.	0.8	11	P1
C01	14 Oriente entre 5 y 7 Norte.	0.7	2	P2
C02	25 Poniente entre 13 y 17 Sur.	0.5	3	P2
C03	calle Opalo No 3931 Colonia Villa Posada.	0.3	1	P3
C04	Al frente fábrica Cementos Atoyac.	1.5	4	P2

**tabla 4.3 Resumen de los resultados obtenidos con registros de vibración ambiental.
(continuación)**

Sitio	Localización	Promedio		
		T ₀	A ₀	P ₀
C05	Cerrada 5 Oriente Col. La libertad.	0.3	3	P1
C06	Calle Huamantla y Av. 15 Poniente.	0.7	3	P1
C07	calle Resurrección a la altura de Xaltonal	0.0	0	P2
C08	Calle Toxqui y Centenario.	0.0	0	P2
C09	104 Poniente a la altura de la col. Villa Frontera.	0.9	2	P1
C10	Cerrada Ignacio Zaragoza entre av. l. Zaragoza y Analco.	1	2	P2
C11	Entre Dramaturgos y Av. Educadores.	0.8	2	P2
C12	Entre Av. Del Tecnológico y Ferrocarril.	1.2	2	P2
C13	Central de Abastos y eje 11 norte.	1.4	2	P3
C14	Paseo Bravo entre 3 y 11 Poniente.	2.2	1	P2

Tabla 4.4 Principales características de los acelerogramas.

Evento	Estación	Componente	Fase fuerte	Periodo
04-25-89	CAPS	NS	22.22	0.69
		EW	29.18	0.56
	PBPP	NS	28.2	0.60
		EW	29.3	0.70
	UAPP	NS	14.34	0.43
		EW	18.26	0.47
09-16-89	PBPP	NS	10.00	0.48
		EW	11.66	0.33
	UAPP	NS	4.00	0.27
		EW	5.97	0.26

Tabla 4.5 Principales características de los espectros de respuesta.

Evento	Estación	Componente	Ordenada máx. (Gales)	Periodo
04-25-89	CAPS	NS	49.8	1.25
		EW	68.0	1.25
	PBPP	NS	28.0	1.60
		EW	31.0	1.00
	UAPP	NS	56.0	0.80
		EW	30.0	1.25
09-16-89	PBPP	NS	18.0	1.00
		EW	8.0	0.81
	UAPP	NS	7.9	0.60
		EW	12.0	0.64
85-02-11	SXPU	NS	29.9	0.31
		EW	18.00	0.48
07-02-84		NS	13.0	0.99
		EW	27.00	1.00

Tabla 4.6 Estaciones acelerográficas, razones espectrales técnica estándar.

Evento	Cociente	Componente	A _r	Frecuencia Hz
04-25-89	CAPS/UAPP	NS	20	0.7-0.8
		EW	20	0.9-1
04-25-89	PBPP/UAPP	NS	1.5	0.9-1
		EW	1.6	0.6-0.7
09-16-89	PBPP/UAPP	NS	2.3	1.6-2.00
		EW	2.8	1.6-2.00

Tabla 4.7 Estaciones acelerográficas, razones espectrales técnica Nakamura.

Evento	Estación	Componente	A _r	Frecuencia Hz
04-25-89	CAPS	NS	6	0.5-0.6
		EW	7	0.5-0.6
	PBPP	NS	5	0.4-0.5
		EW	5	0.4-0.5
	UAPP	NS	6	1.00-2.00
		EW	2.5	1.00- 2.00
09-16-89	PBPP	NS	5	0.6-0.7
		EW	3	0.3-0.4
	UAPP	NS	4	2.00
		EW	3	2.00
05-02-89	PBPP	NS	6	0.5
		EW	5	0.6
05-31-90	PBPP	NS	7	0.7
		EW	9	0.7
05-30-89	UAPP	NS	5	2.00
		EW	4	2.00

Tabla 4.8 Periodo dominante promedio de las estaciones acelerográficas técnica Nakamura

Estación	Factor de amplificación	Periodo dominante
CAPS	6.5	1.82
UAPP	4	0.66
PBPP	6	1.82
SXPU	4.75	0.51

Tabla 4.9 Estimaciones de periodos dominantes y amplificación relativa con registros de velocidad y microtremores.

Estación	Evento	Registros de velocidad				Registros de vibración	
		Técnica Estándar		Técnica Nakamura		Técnica Nakamura	
		T ₀	A ₀	T ₀	A ₀	T ₀	A ₀
Museo	2,3,4,6,7,8,9,10,11			0.25-0.3	4	0.25-0.3	2
TV3	2,3,4	0.5	4	0.5	4	0.4	3
Carolino	1,2,3,4	0.9-0.5	4	2.0	3	-	-
Conalep	1,2,4	1.2-1.0	4	2.5-2.0	4	-	-
CFE	7	0.9-0.6	2	-	-	0.7	2
Civil	1,2,3	0.6	3	0.6	2	0.7	3
Missouri	5,6	0.9-0.6	7	0.9-0.6	6	1.0	3
Arturo	5,6,7,17	1.0	3	2.0	3	-	
Hugo	6,7	0.9	3	0.0,3	3	0.3	2
Hotel	7	0.9	3	0.8	3	0.8	2

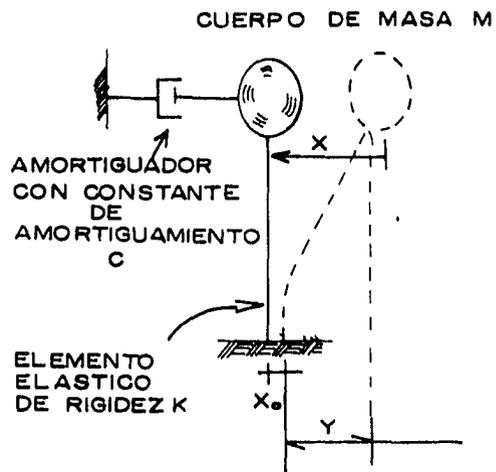


FIG. 4.1 Sistema sencillo

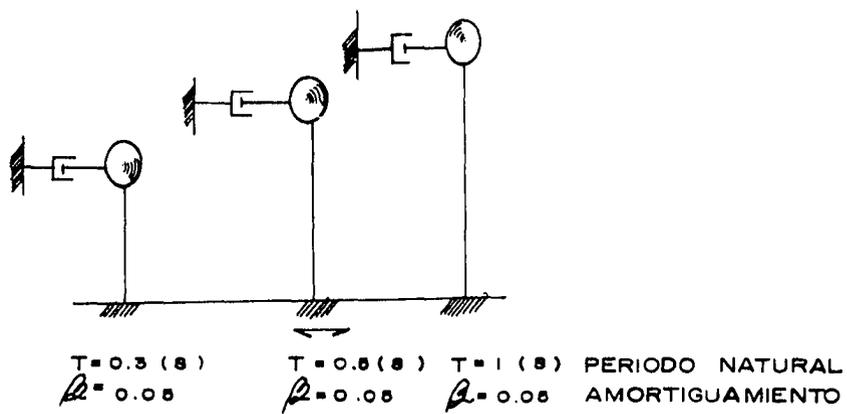


Fig. 4.2 Conjunto de sistemas sencillos

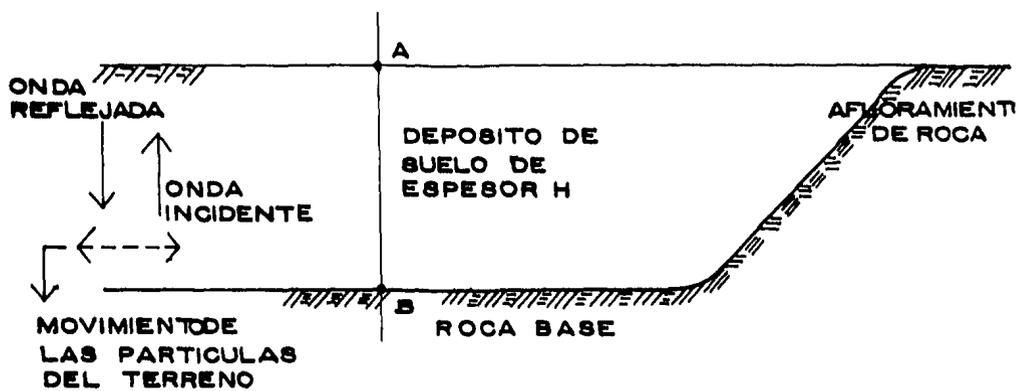


FIG. 4.3 Amplificación del movimiento sísmico

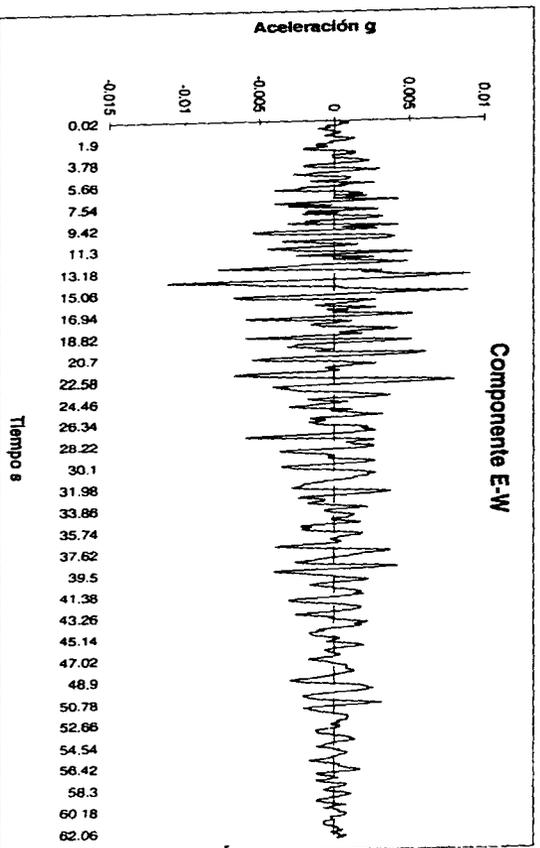
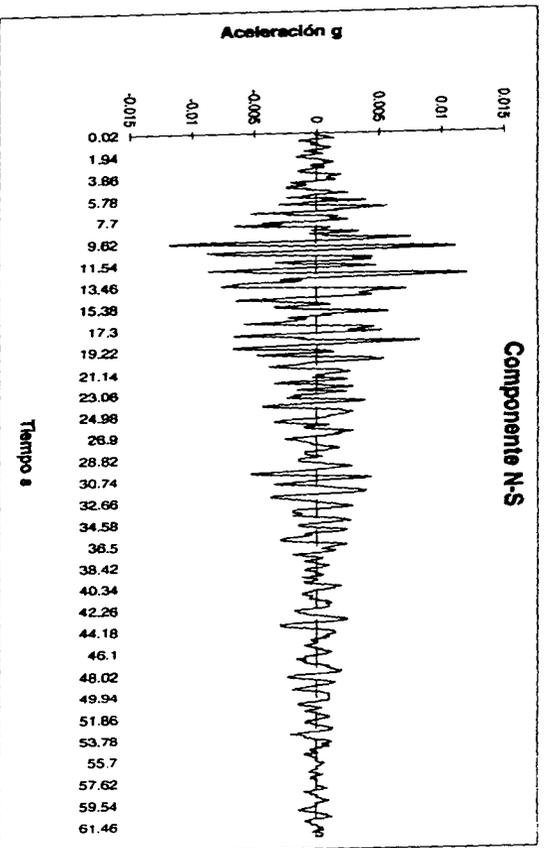


Fig. 4.4 Acelerograma registrado en la estación UAPP sismo 04-25-89

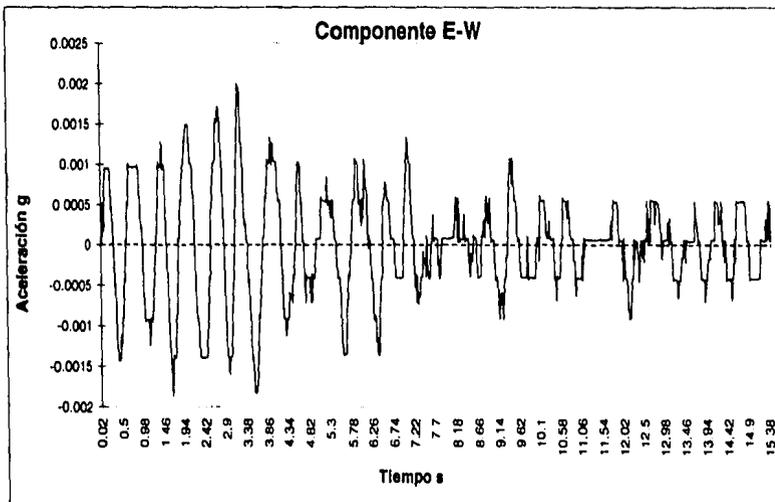
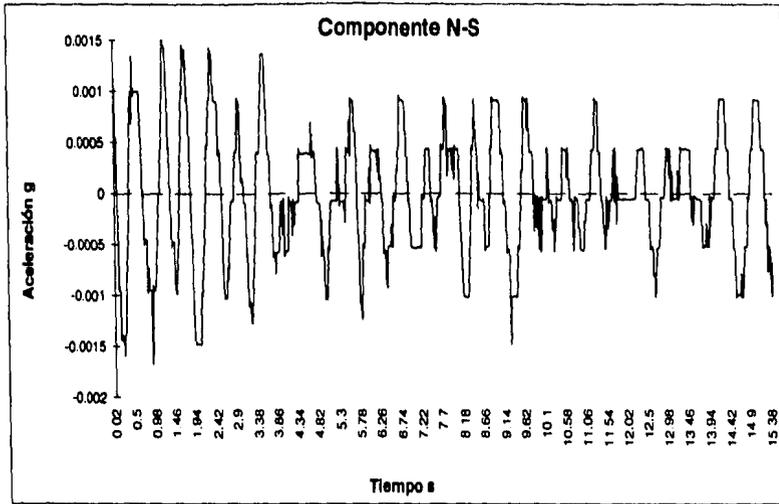


Fig. 4.5 Acelerograma registrado en la estación UAPP sismo 09-16-89

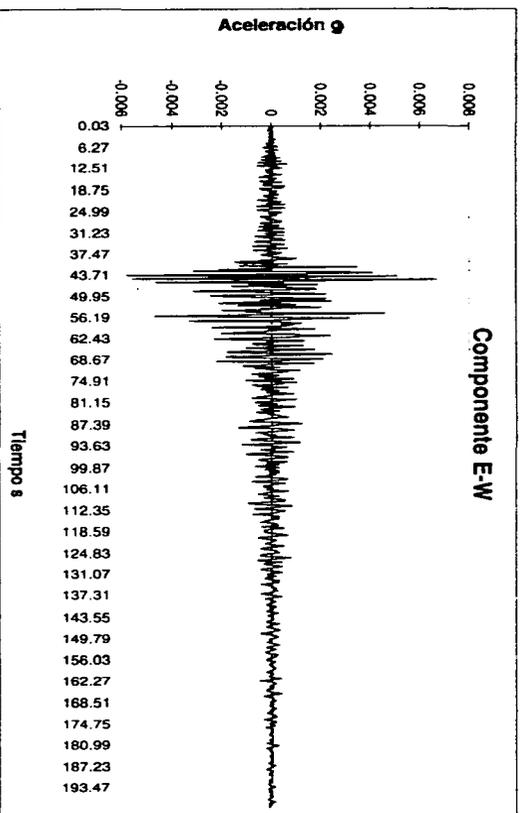
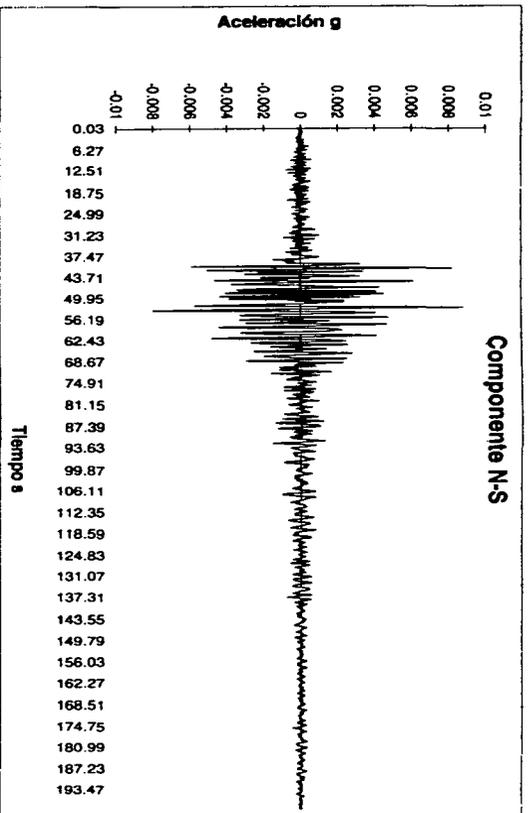


Fig. 4.6 Acelerograma registrado en la estación PBPP sismo 04-25-89

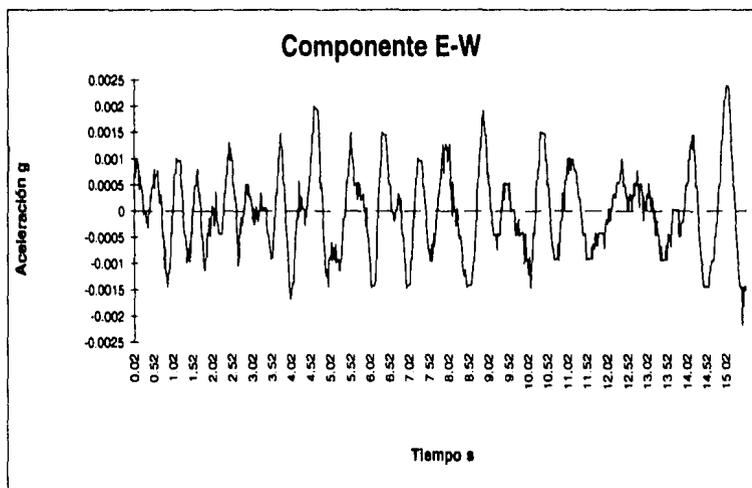
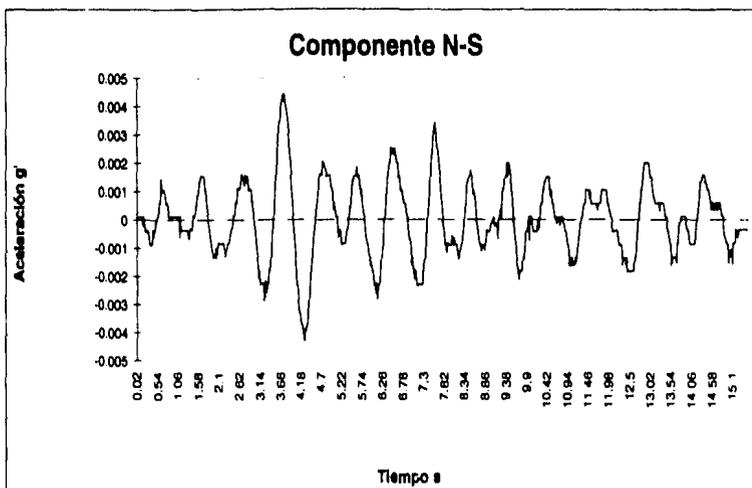


Fig. 4.7 Acelerograma registrado en la estación PBPP sismo 09-16-89

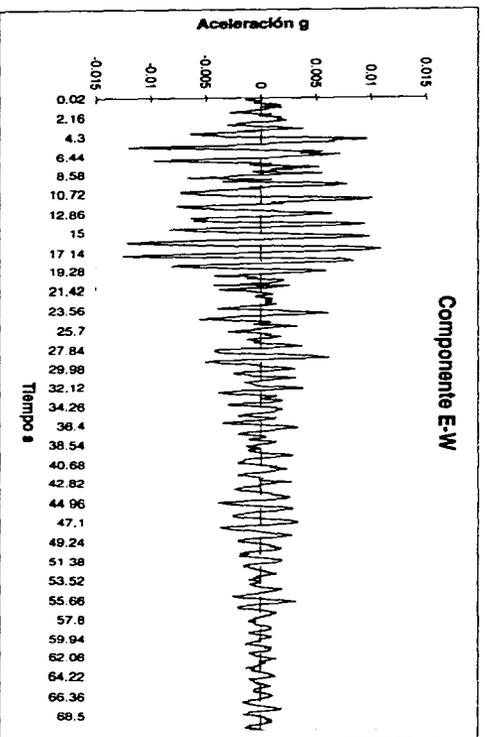
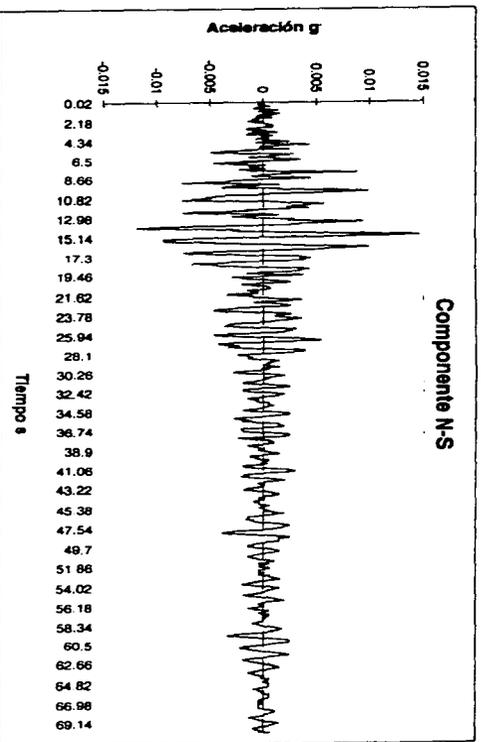


Fig. 4.8 Acelerograma registrado en la estación CAPS sismo 04-25-89

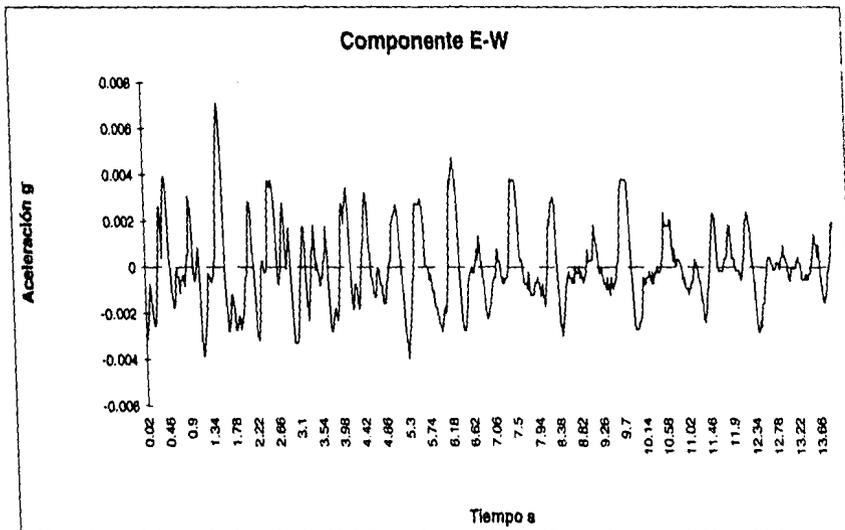
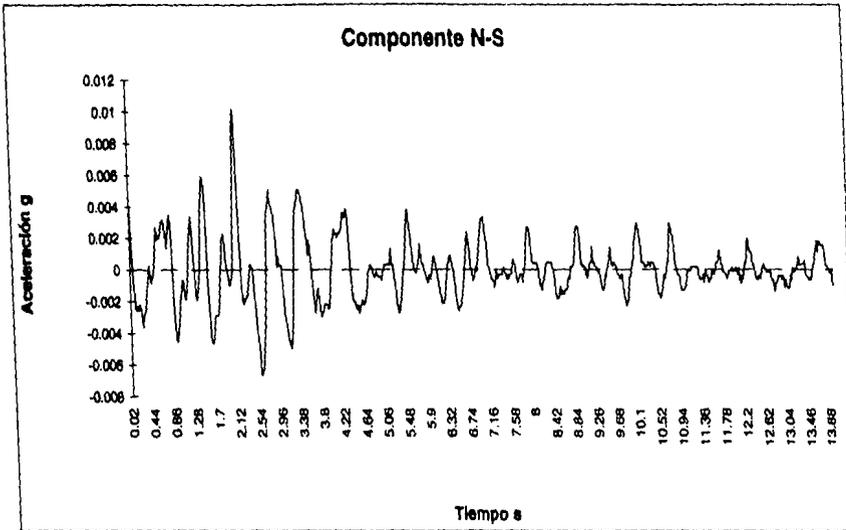


Fig. 4.9 Acelerograma registrado en la estación SXPÚ sismo 02-11-85

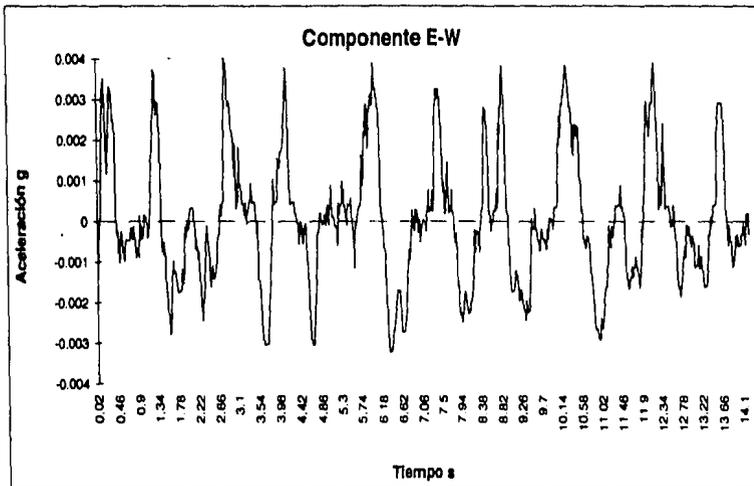
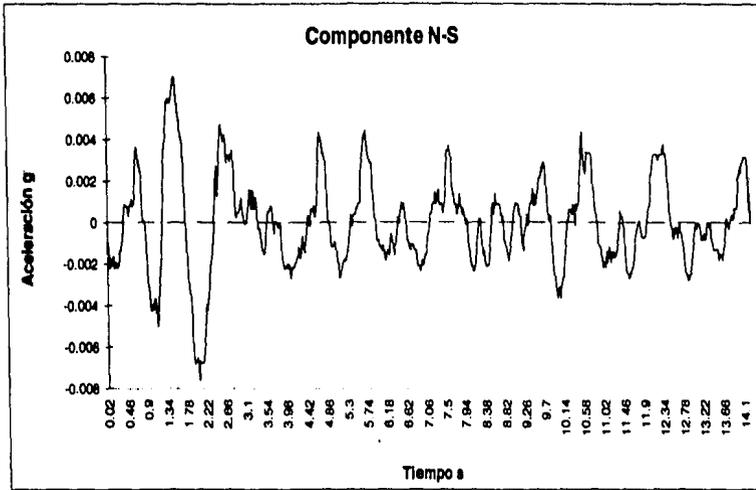
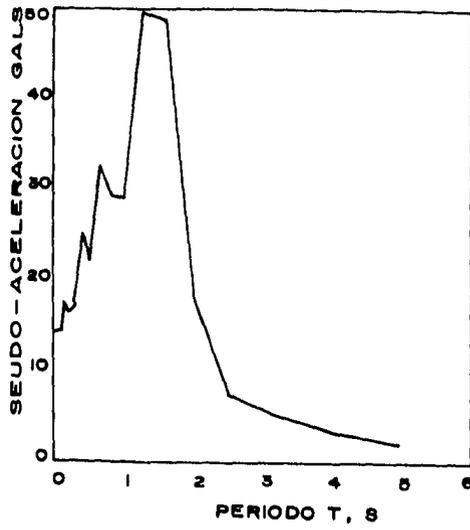


Fig. 4.10 Acelerograma registrado en la estación SXPÚ sismo 07-02-84

Componente N-S



Componente E-W

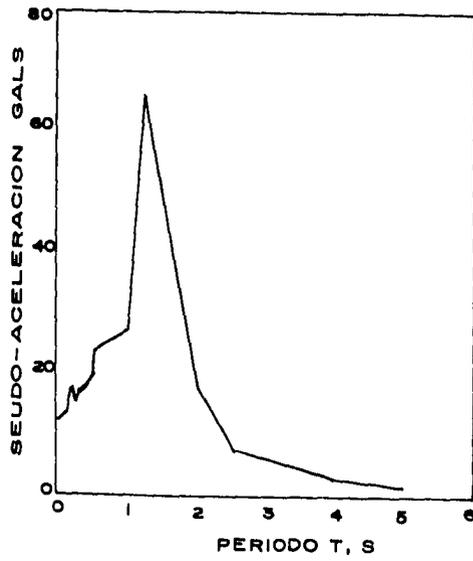


FIG. 4.11 Estación CAPS, espectro de respuesta sismo 04-25-89

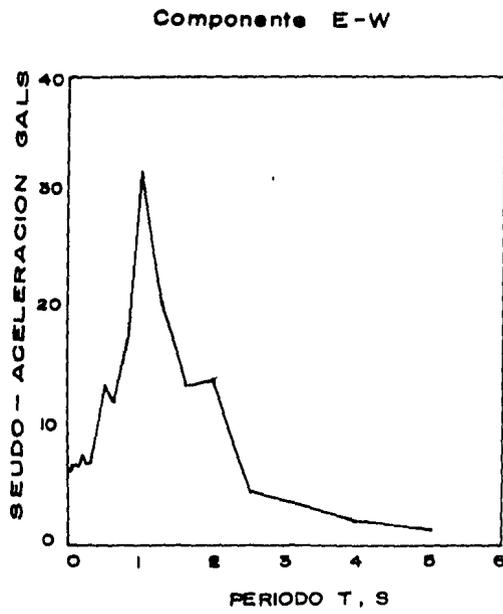
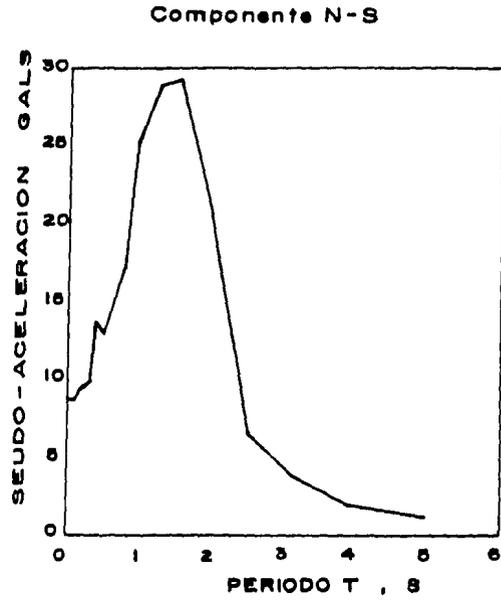


FIG. 4.12 Estación PBPR, espectro de respuesta sismo 04-25-89

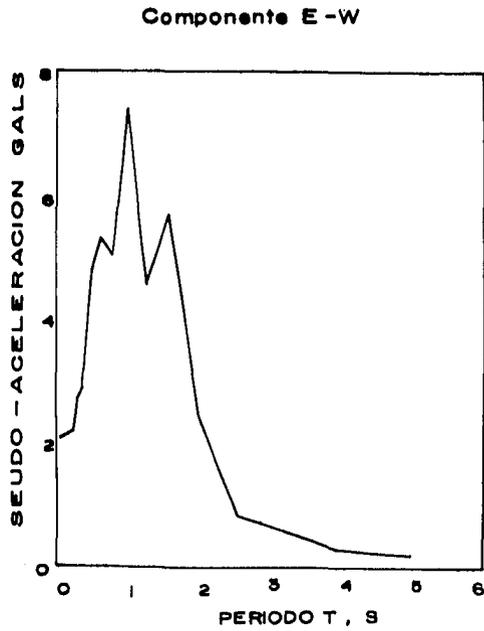
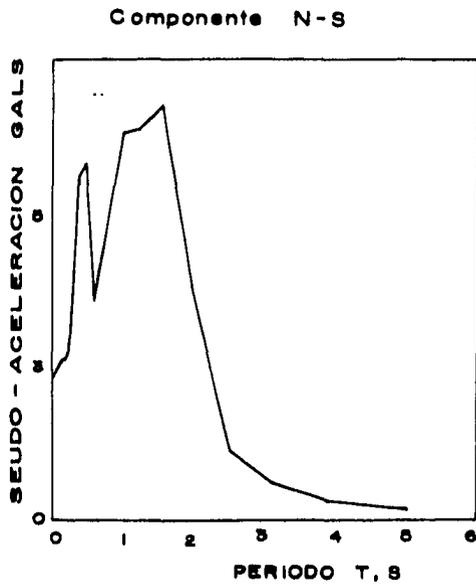


FIG. 4.13 Estación PBPP, espectro de respuesta sísmica 03-02-89

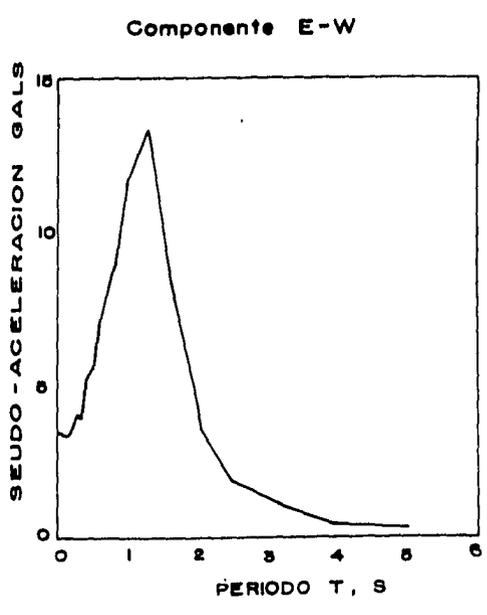
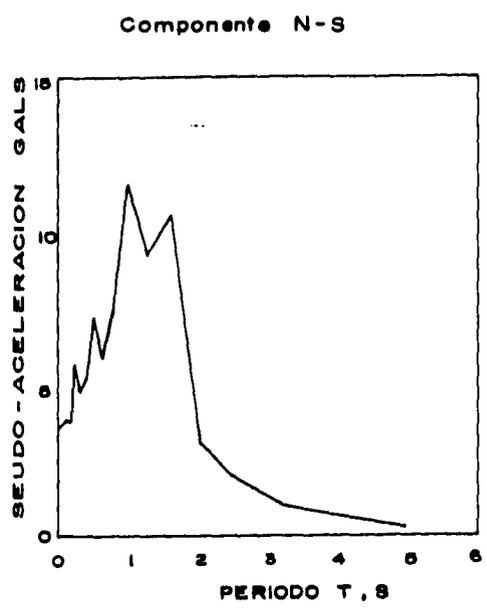


FIG. 4.14 Estación PBPP, espectro de respuesta sismo 09-16-83

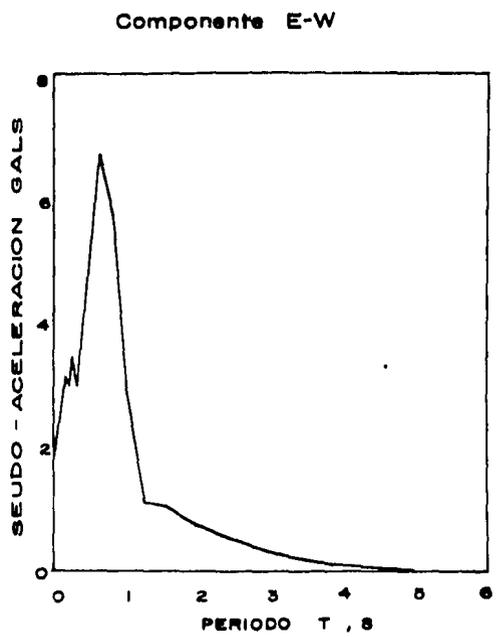
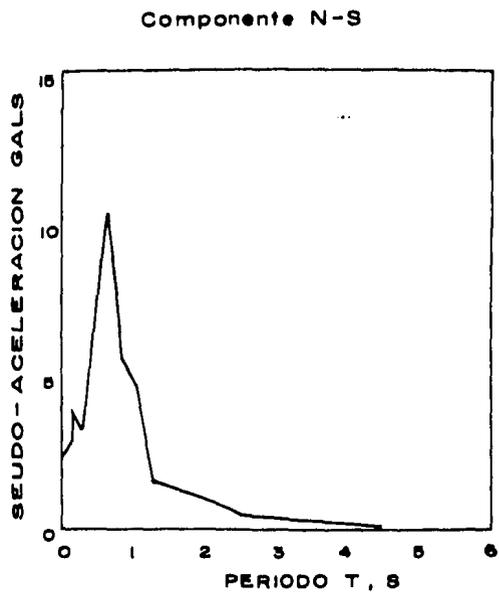


FIG. 4.15 Estación PBPP, espectro de respuesta sismo 05-31-90

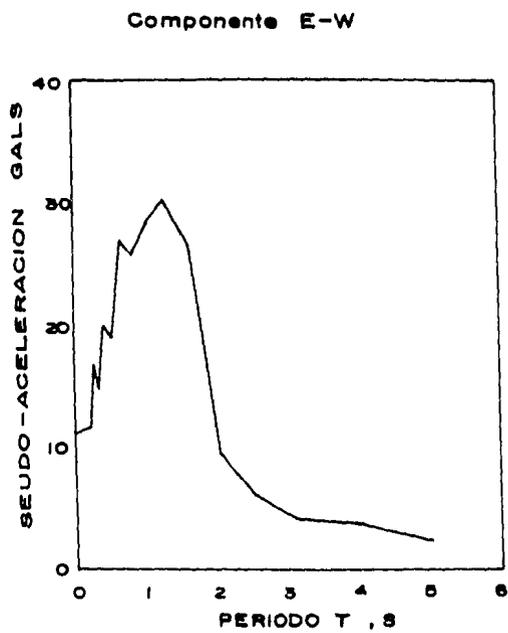
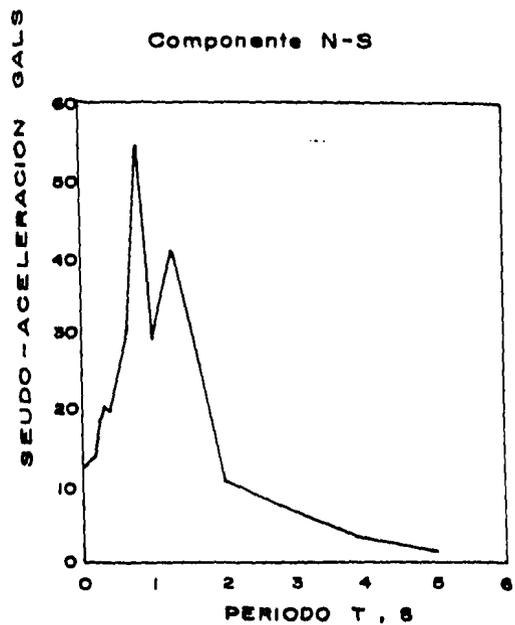


FIG. 4.16 Estación UAPP, espectro de respuesta sismo 04-25-89

ESTA TERCERA NO DEBE
SALIR DE LA COPIA

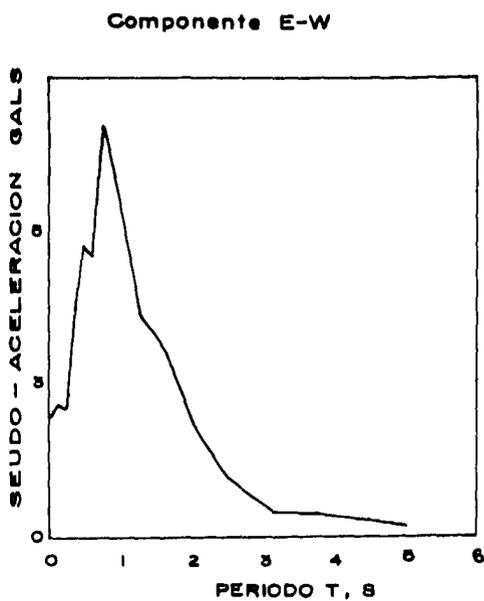
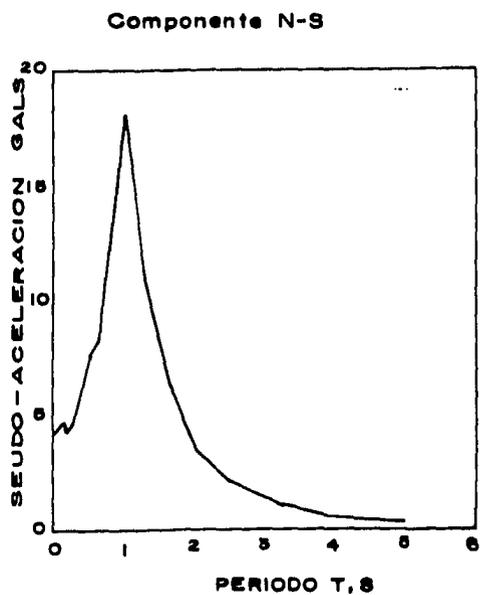


FIG. 4.17 Estación UAPP, espectro de respuesta sismo 09-16-89

ESTA TERCERA NO DEBE
SALIR DE LA CARPETA

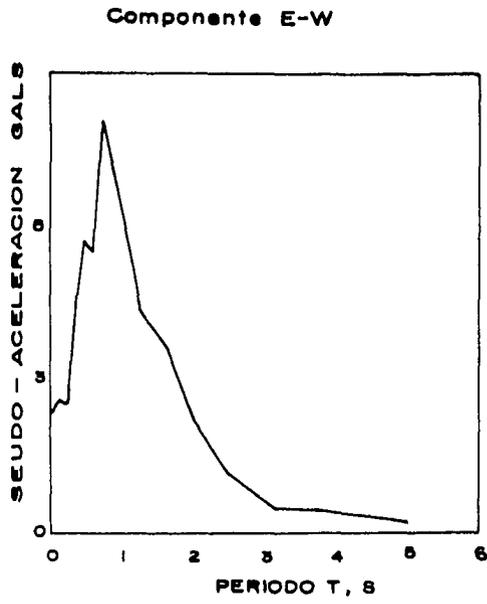
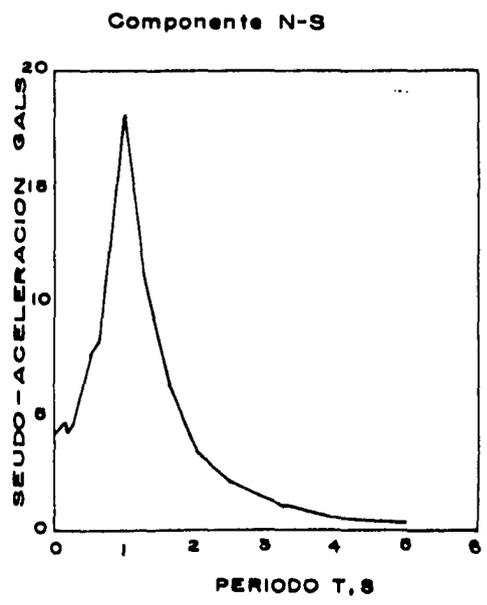


FIG. 4.17 Estación UAPP, espectro de respuesta sismo 09-16-89

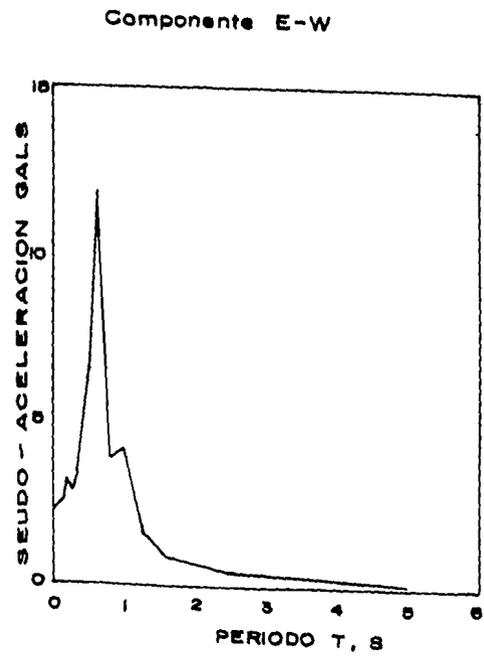
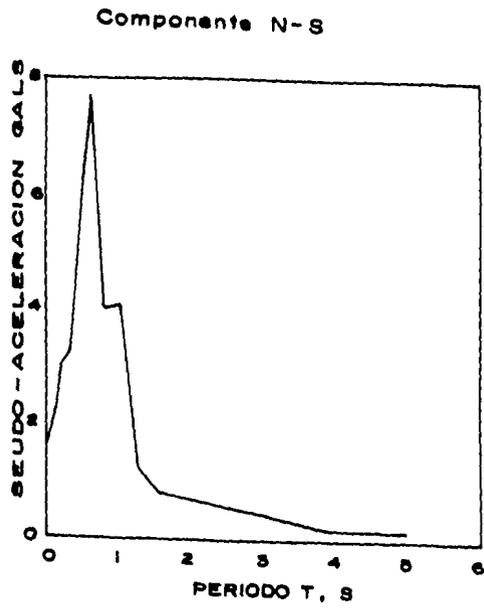


FIG. 4.18 Estación UAPP, espectro de respuesta sismo 05-30-89

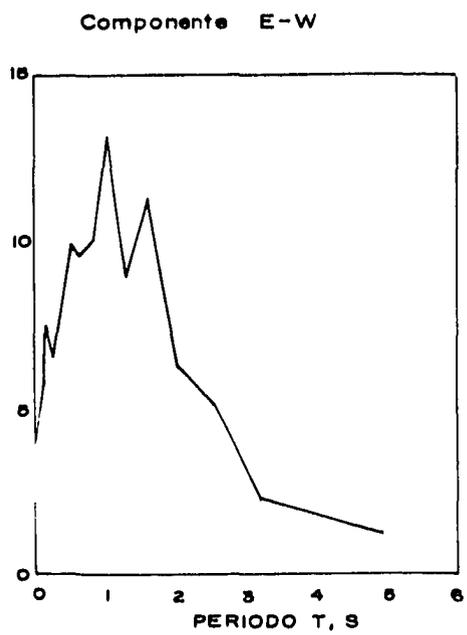
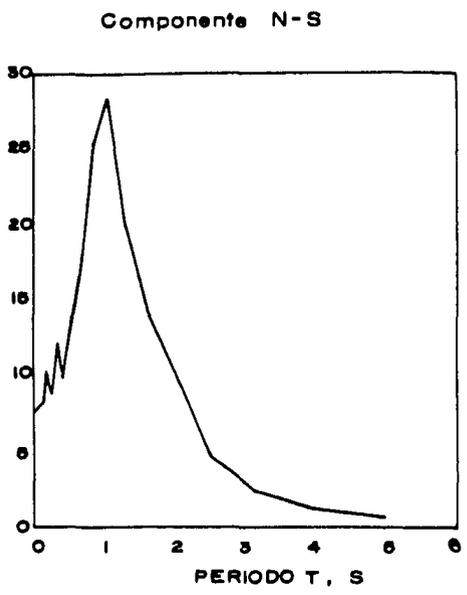
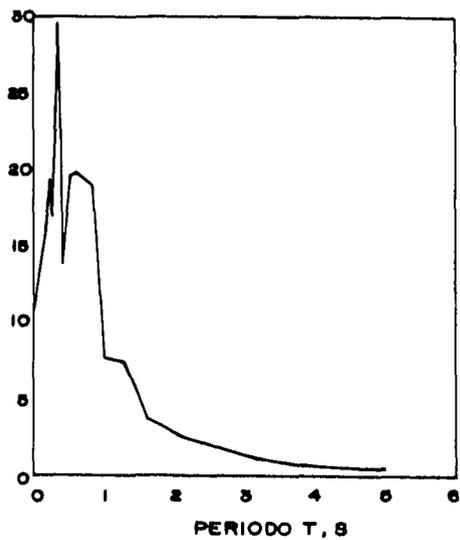


FIG. 4.19 Estación SXPU espectro de respuesta sismo 07-02-84

Componente N-S



Componente E-W

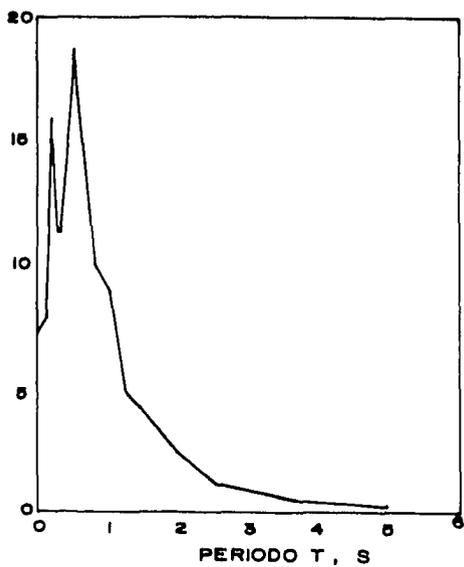


FIG. 4.20 Estación SXP. espectro de respuesta sismo 02-11-85

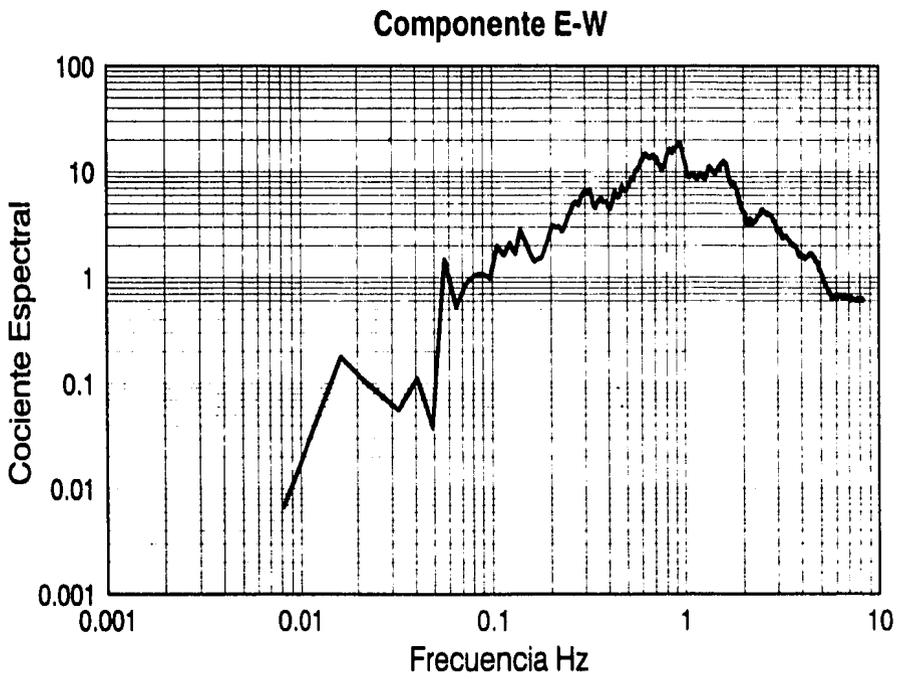
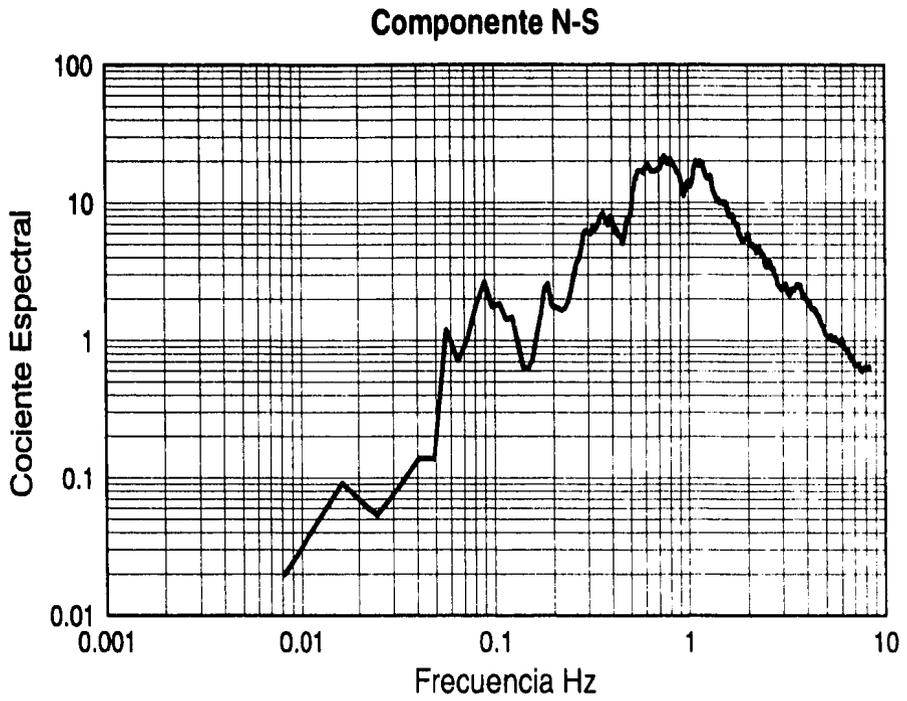


Fig. 4.21 Cociente Espectral CAPS/UAPP sismo 04-25-89 Técnica estándar

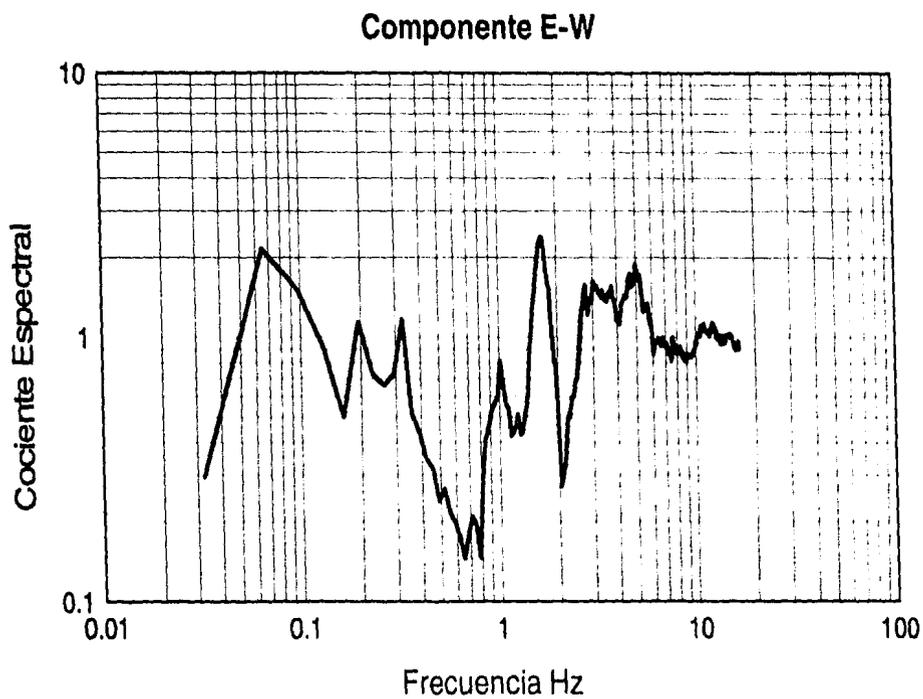
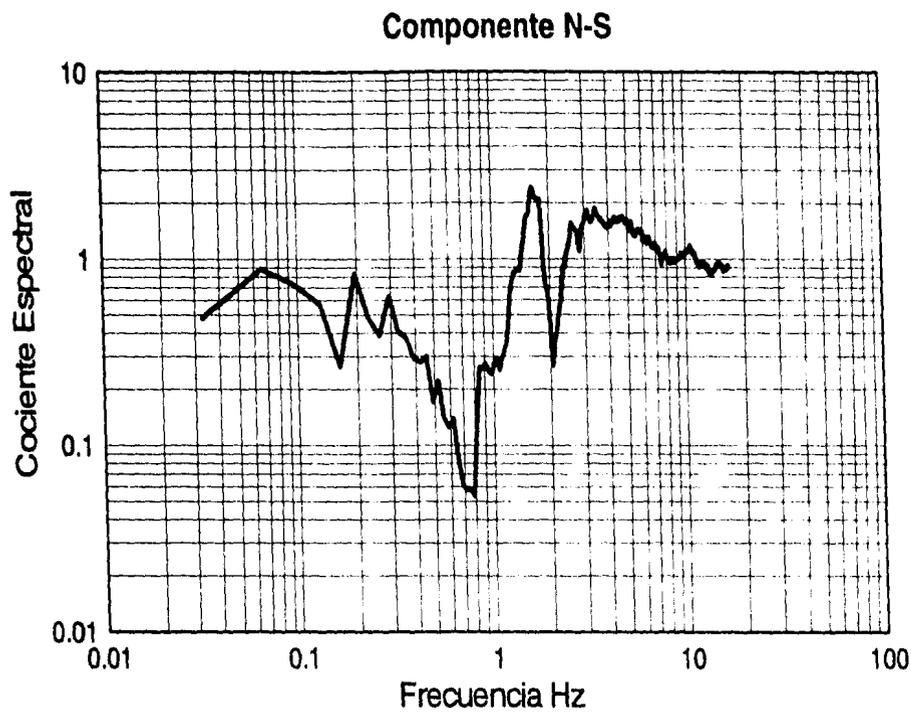


Fig. 4.22 Cociente Espectral PBPP/UAPP sismo 09-16-89. Técnica Estándar

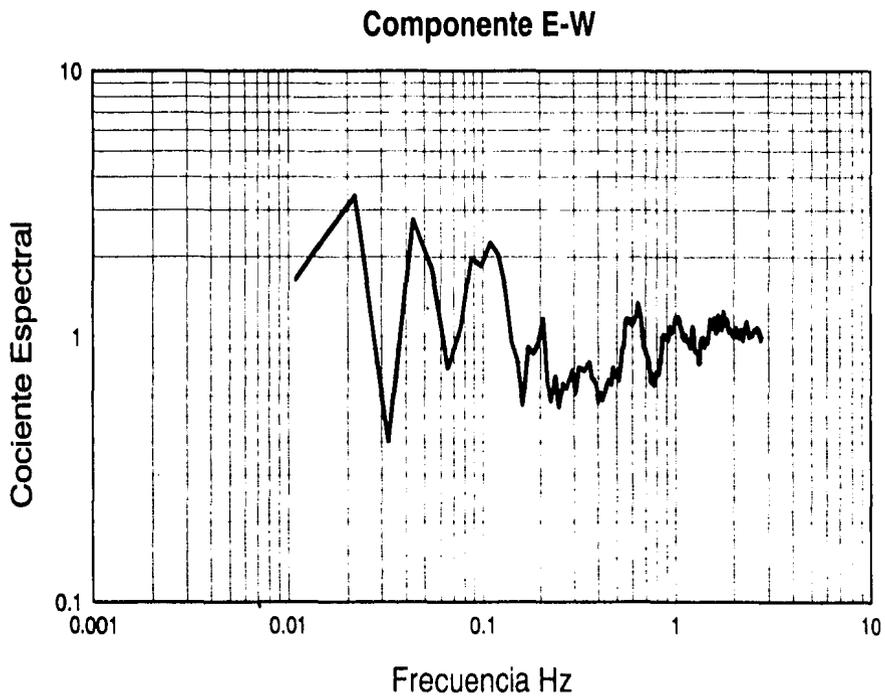
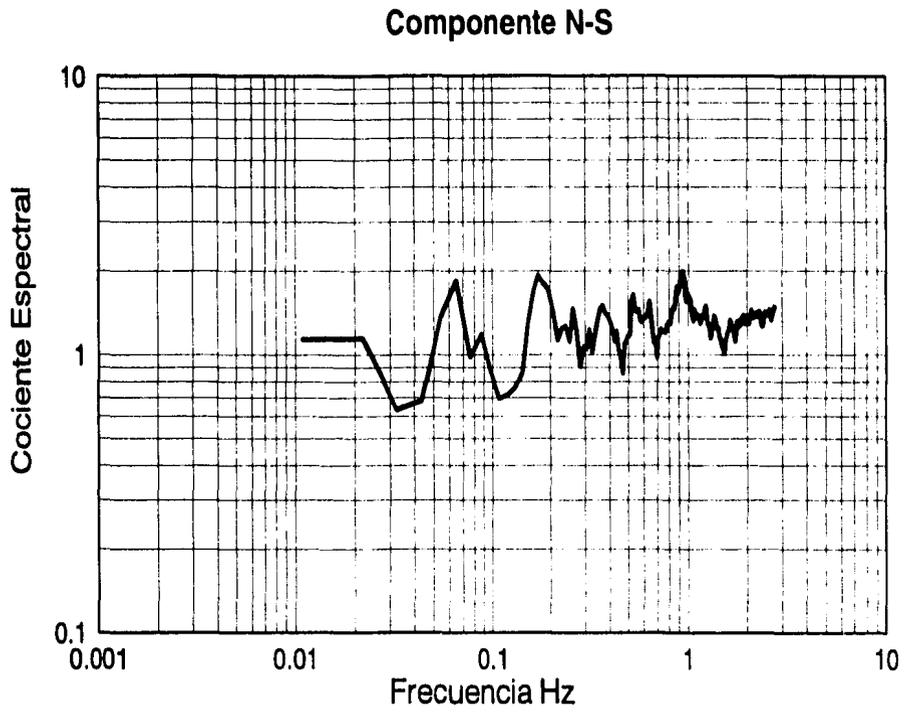


Fig. 4.23 Cociente Espectral PBPP/UAPP sismo 04-25-89. Técnica Estándar

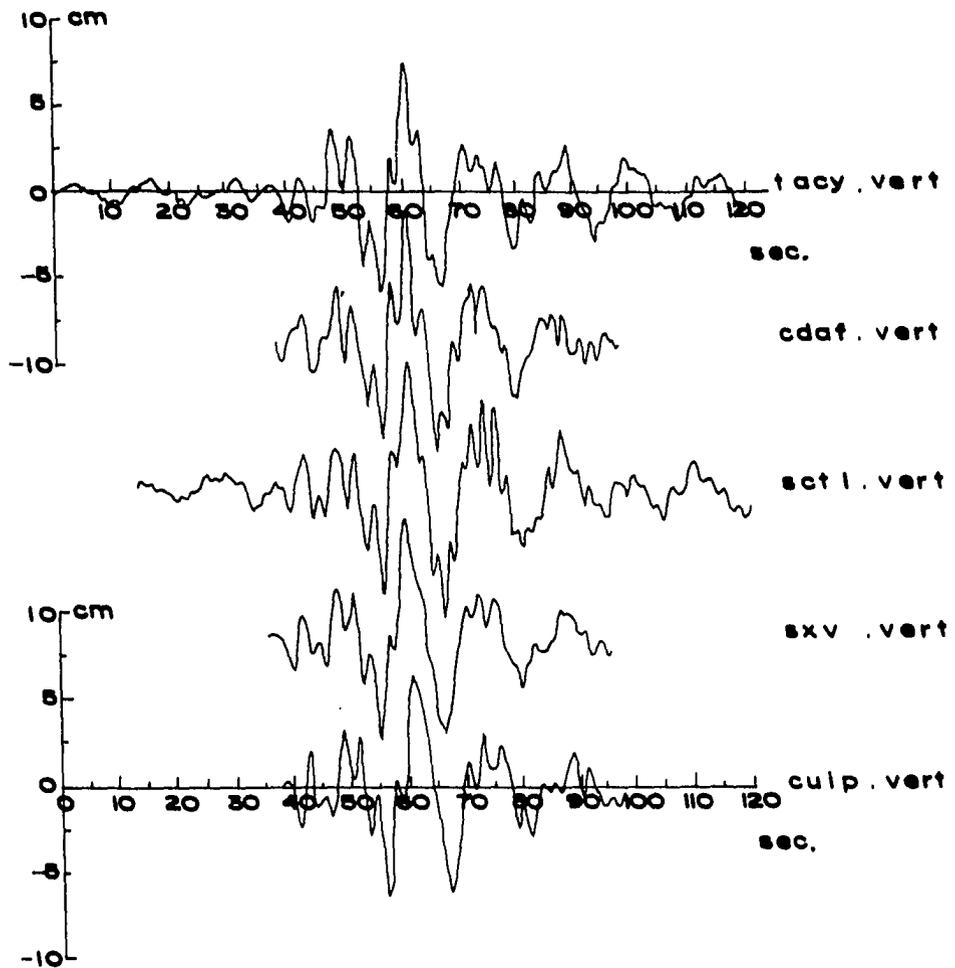
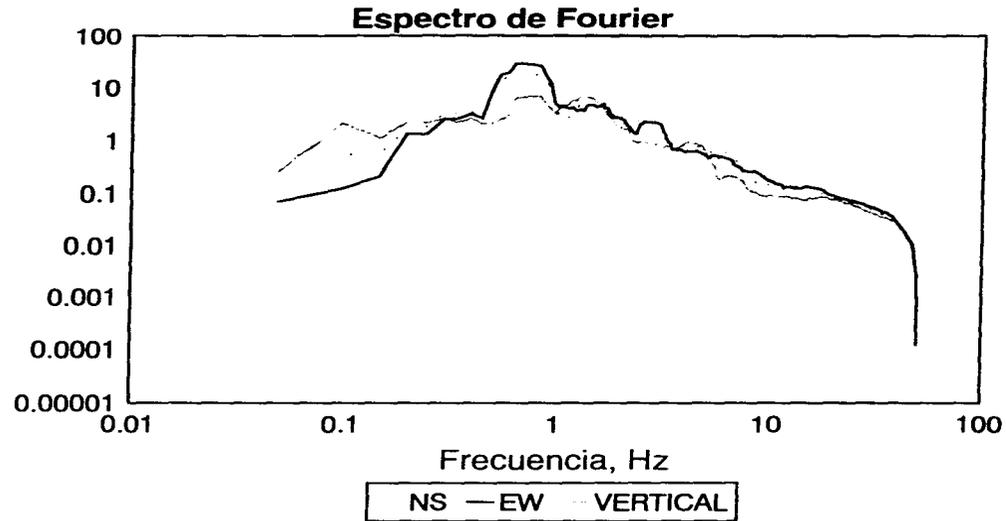


Fig. 4.24 Componente vertical de desplazamiento para diferentes estaciones y tipo de suelo.

México, D.F. 19-09-85, (Campillo, 1989)



28

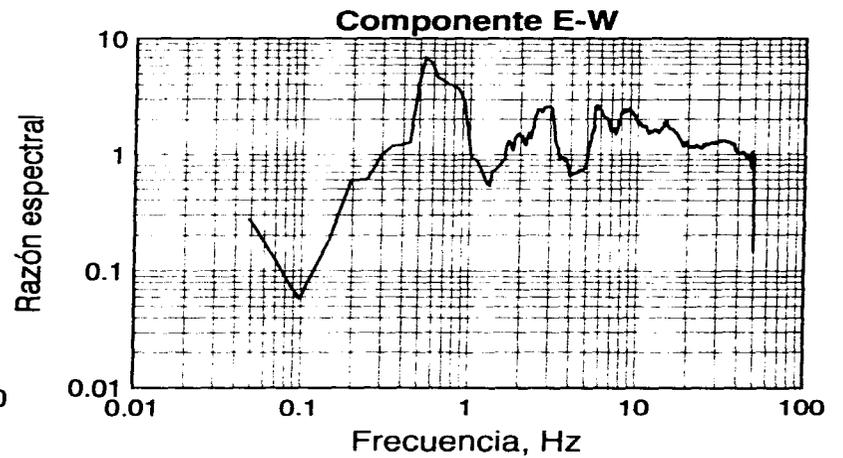
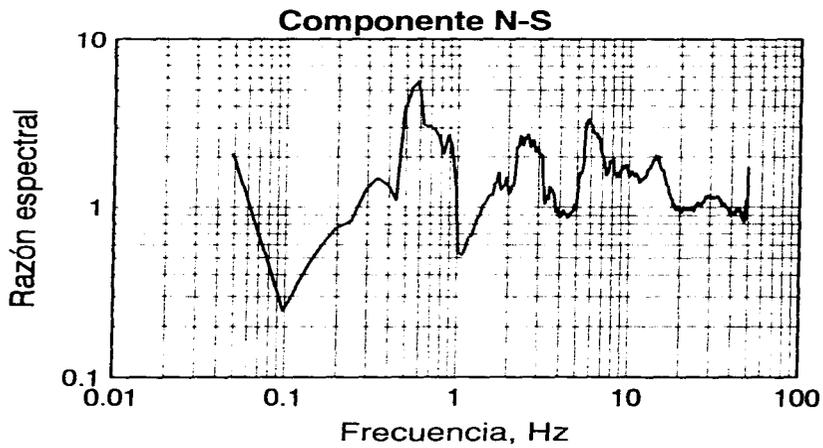


FIG. 4.25 Estación CAPS sismo 04-25-89. Razón espectral técnica Nakamura.

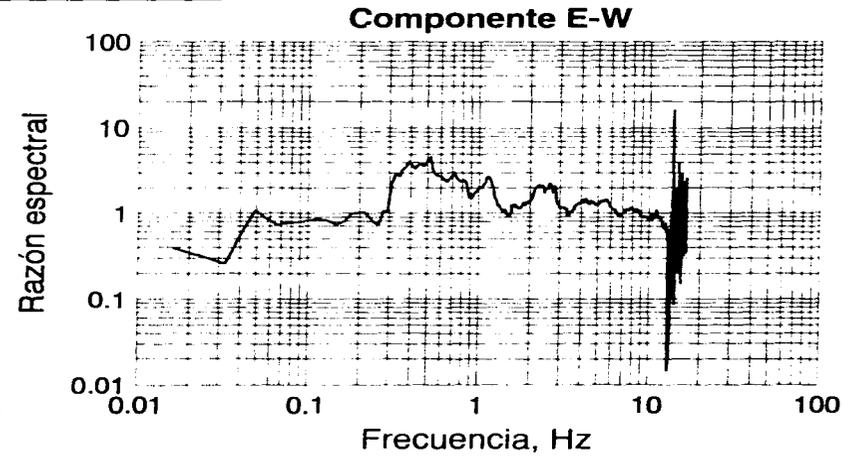
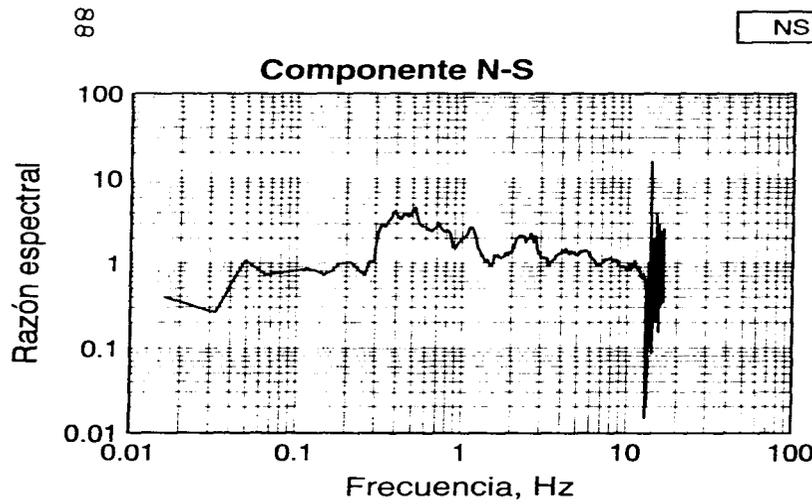
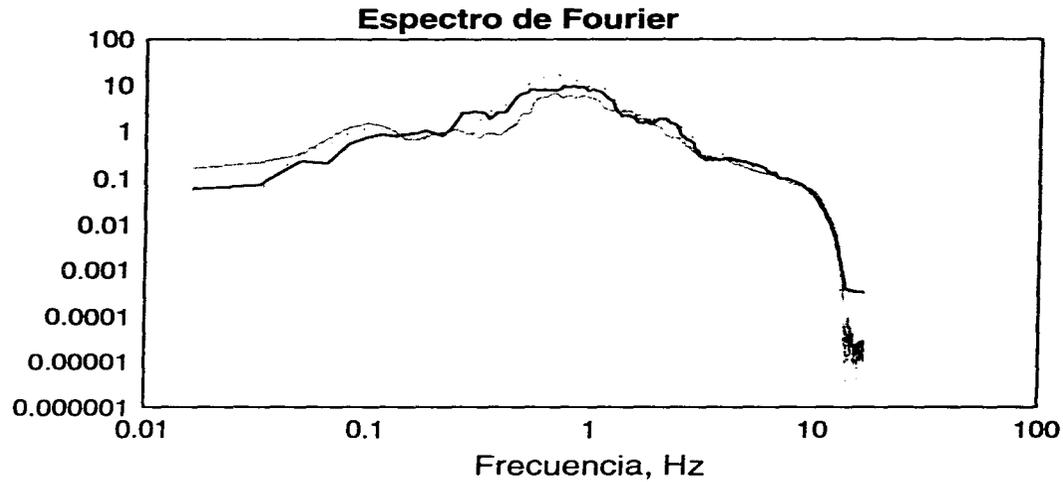
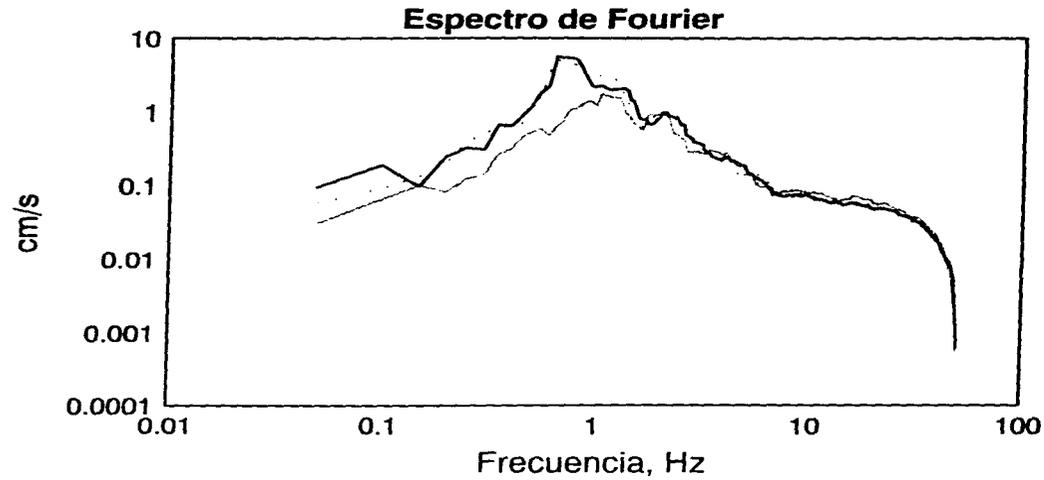


FIG. 4.26 Estación PBPP sismo 04-25-89. Razón espectral técnica Nakamura.



NS — EW — VERTICAL

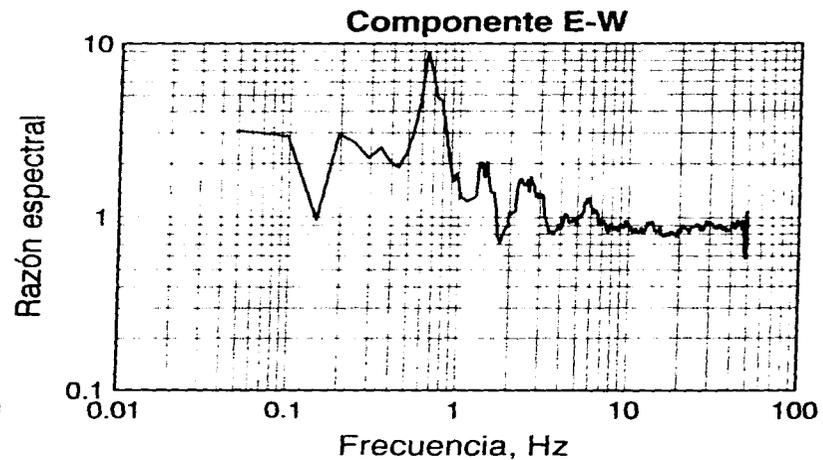
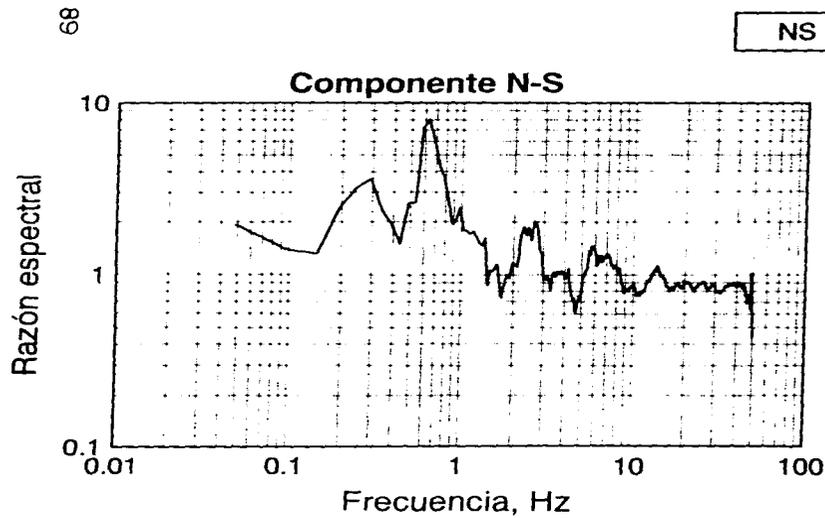


FIG. 4.27 Estación PBPP sismo 05-31-89. Razón espectral técnica Nakamura.

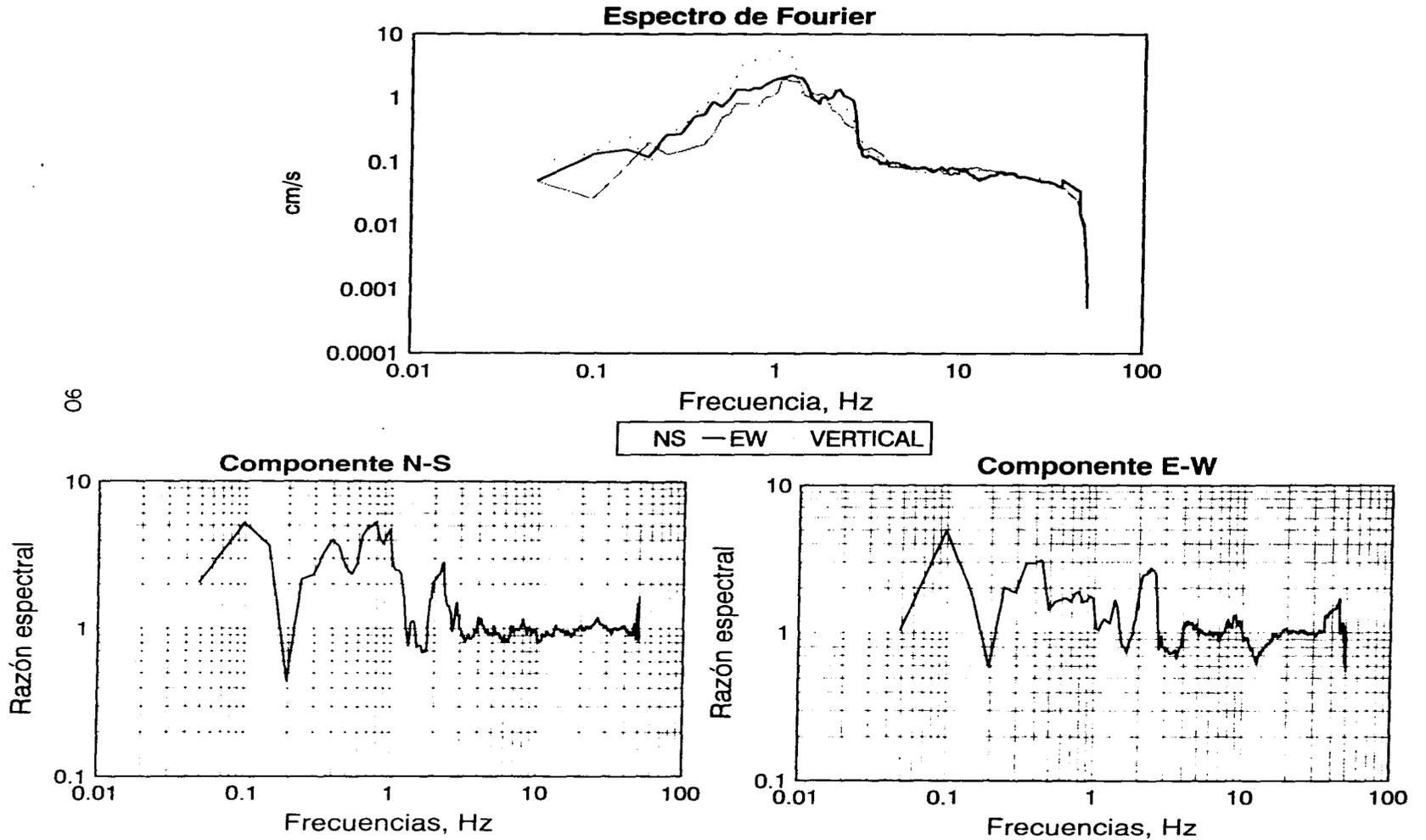
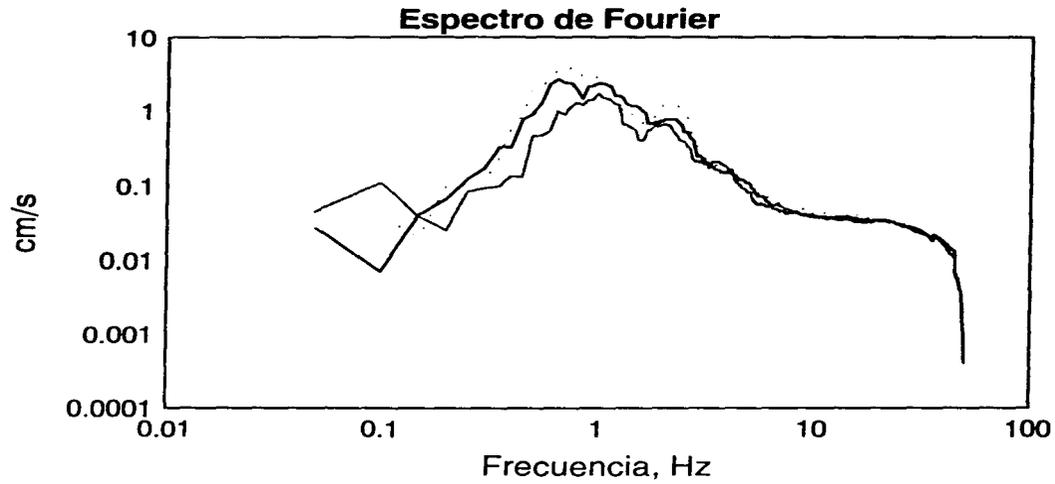


FIG. 4.28 Estación PBPP sismo 09-16-89. Razón espectral técnica Nakamura.



NS — EW — VERTICAL

16

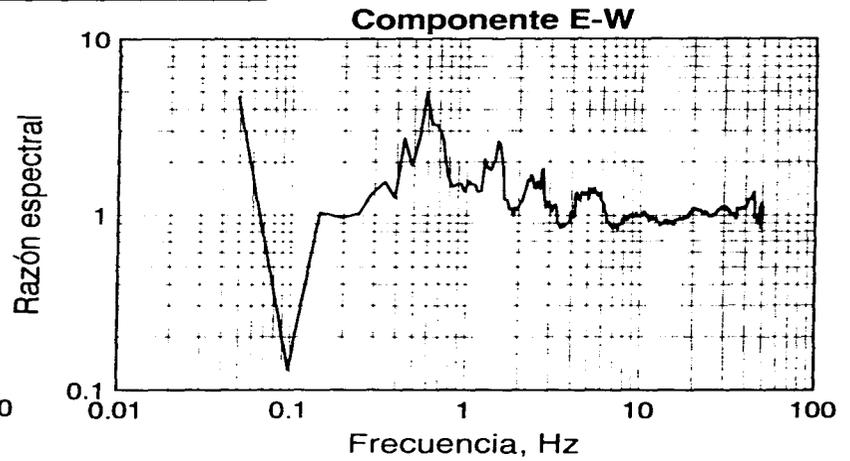
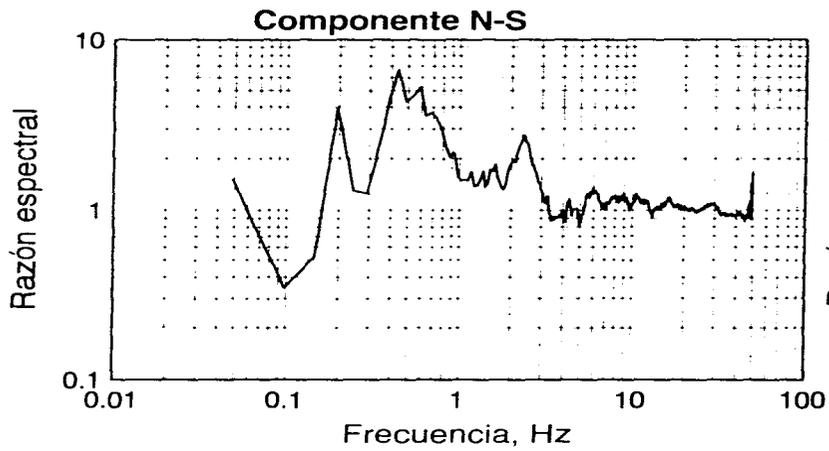
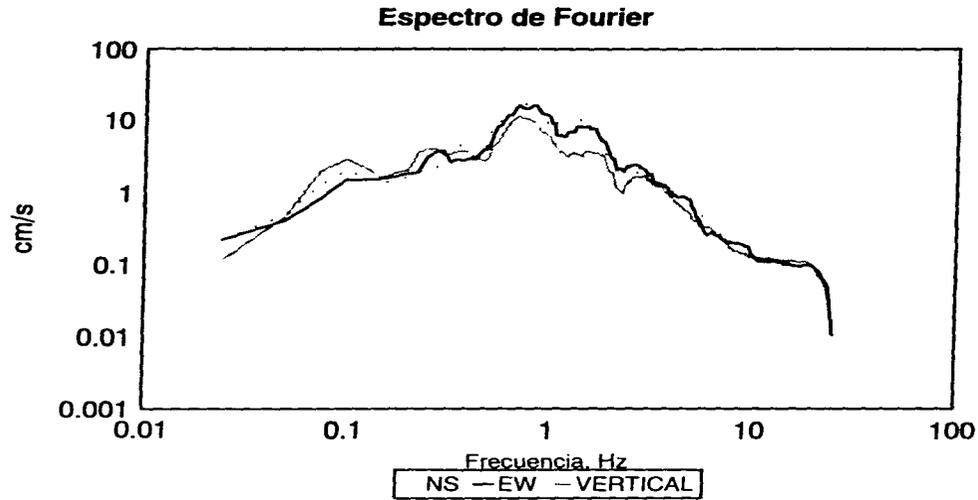


FIG. 4.29 Estación PBPP sismo 05-02-89. Razón espectral técnica Nakamura.



92

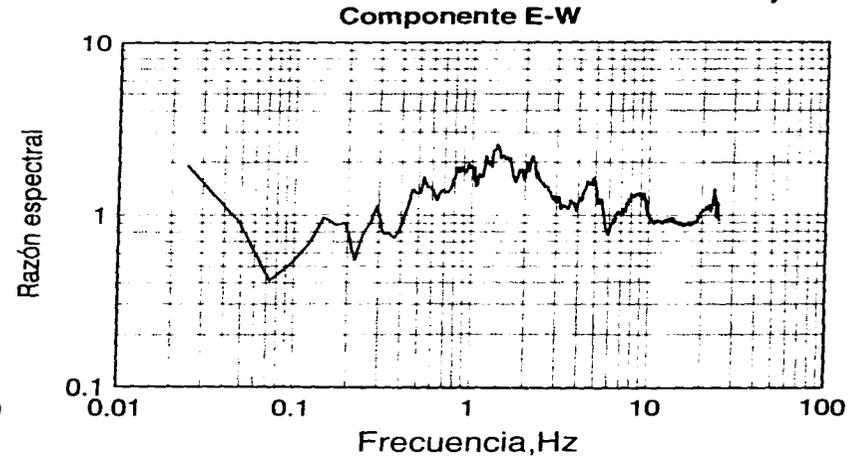
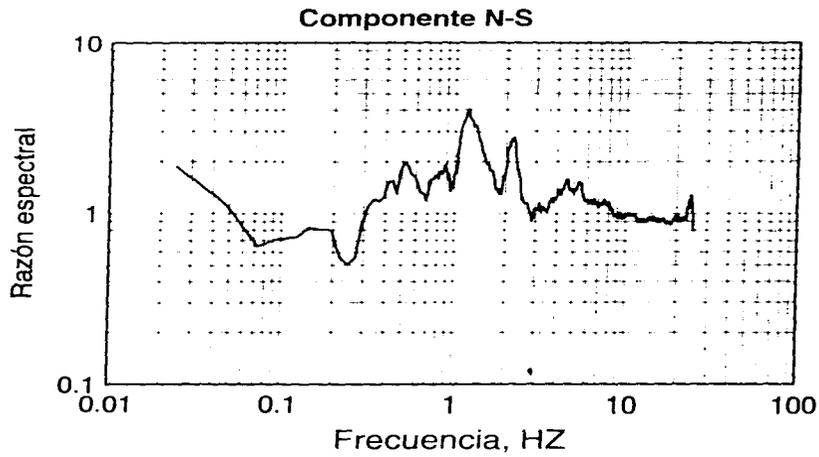
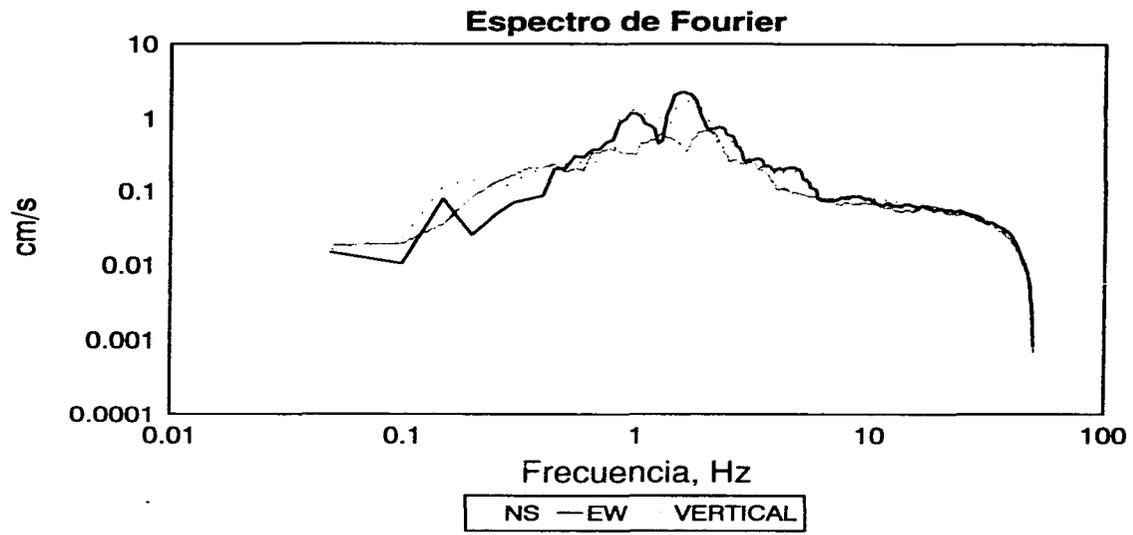
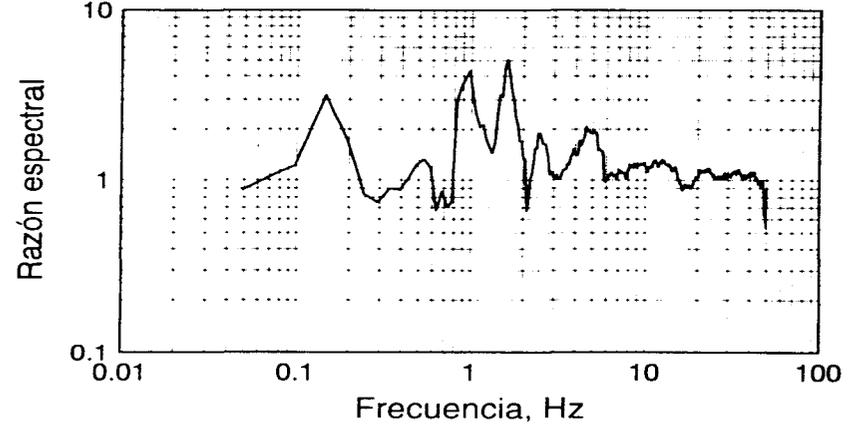


FIG. 4.30 Estación UAPP sismo 04-25-89. Razón Espectral Técnica Nakamura



93

Componente N-S



Componente E-W

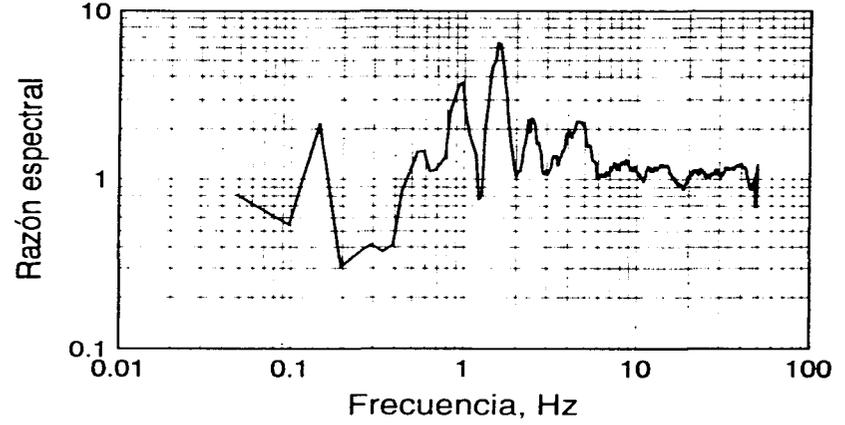
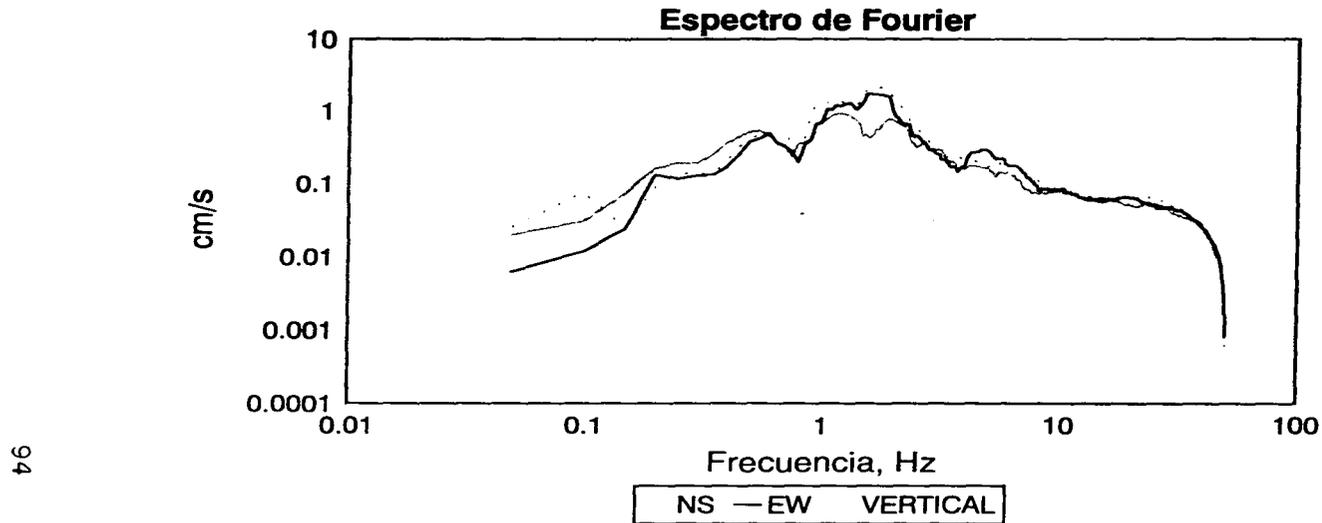


FIG. 4.31 Estación UAPP sismo 09-16-89. Razón espectral Técnica Nakamura.



94

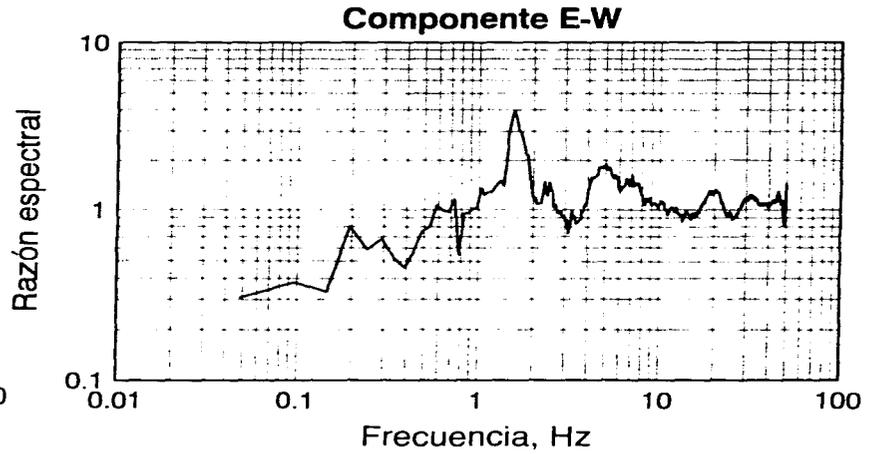
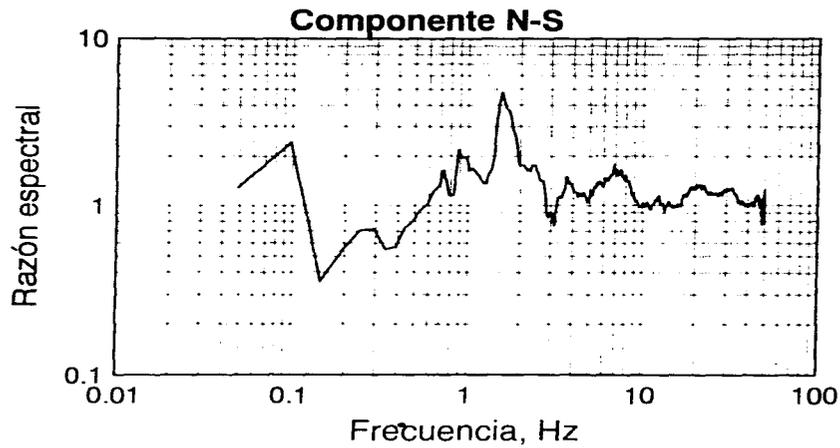


FIG. 4.32 Estación UAPP sismo 05-30-89. Razón espectral técnica Nakamura.

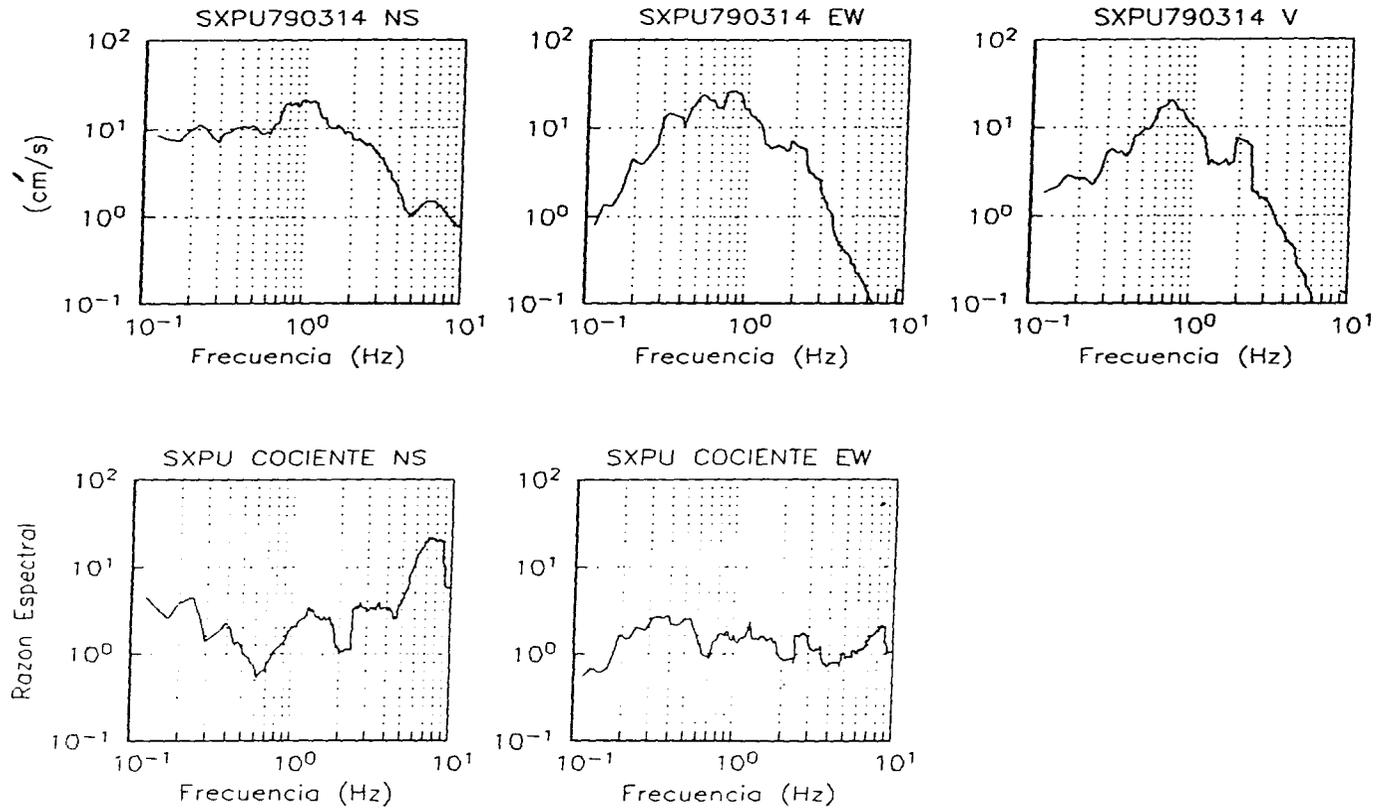


FIG. 4.33 Estación **SXP790314** Sismo 79-03-14 Técnica Nakamura

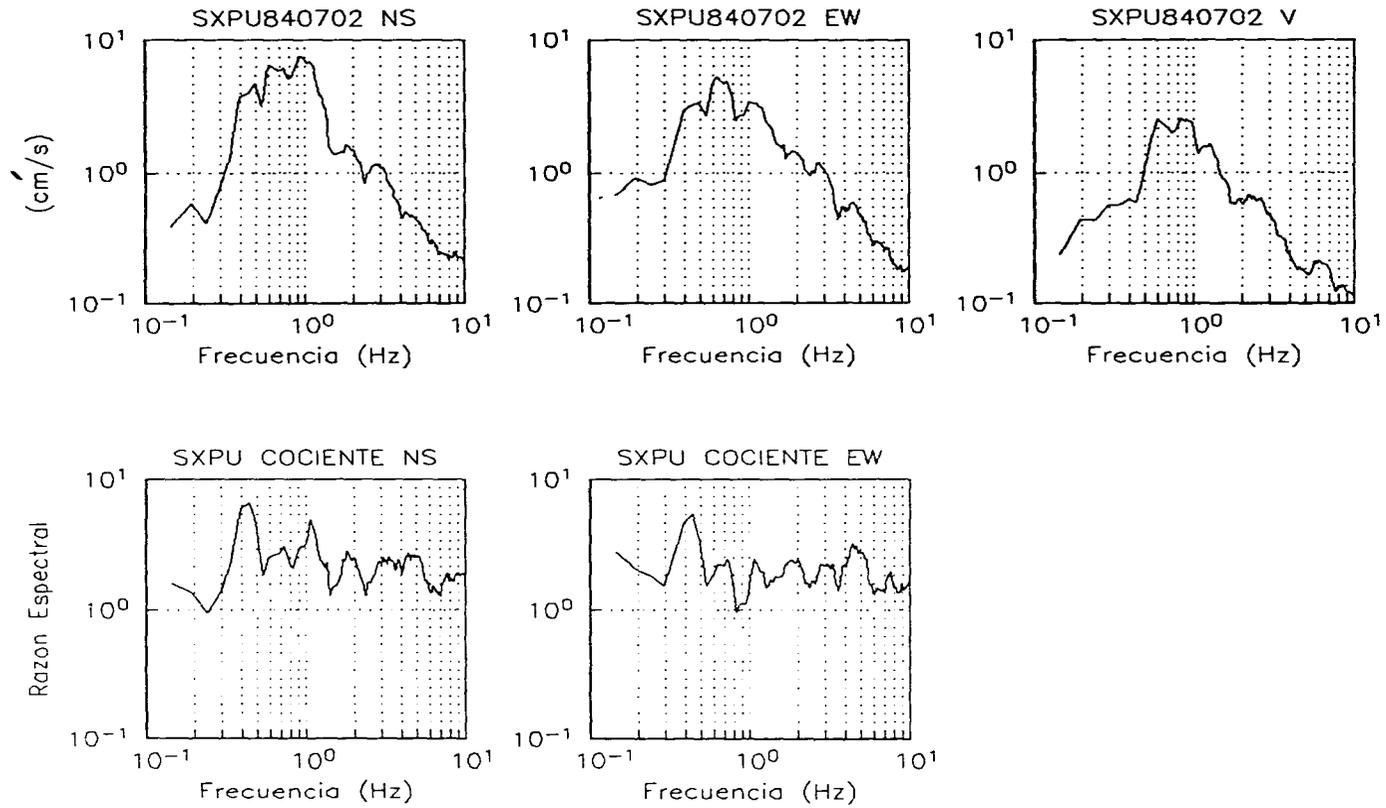


FIG. 4.34 Estación SXP840702 Sismo 84-07-02 Técnica Nakamura

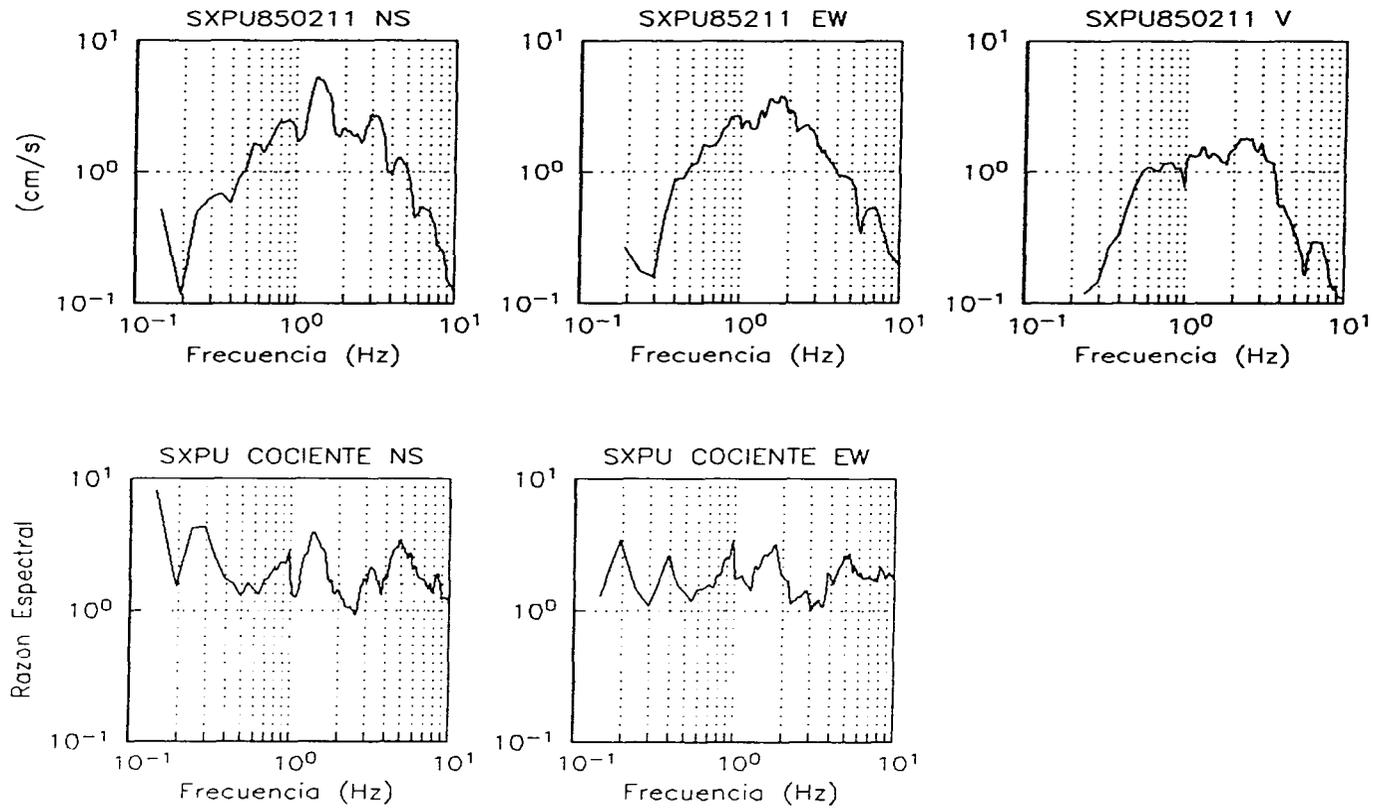


FIG. 4.35 Estación **SXP850211** Sismo 85-02-11 Técnica Nakamura

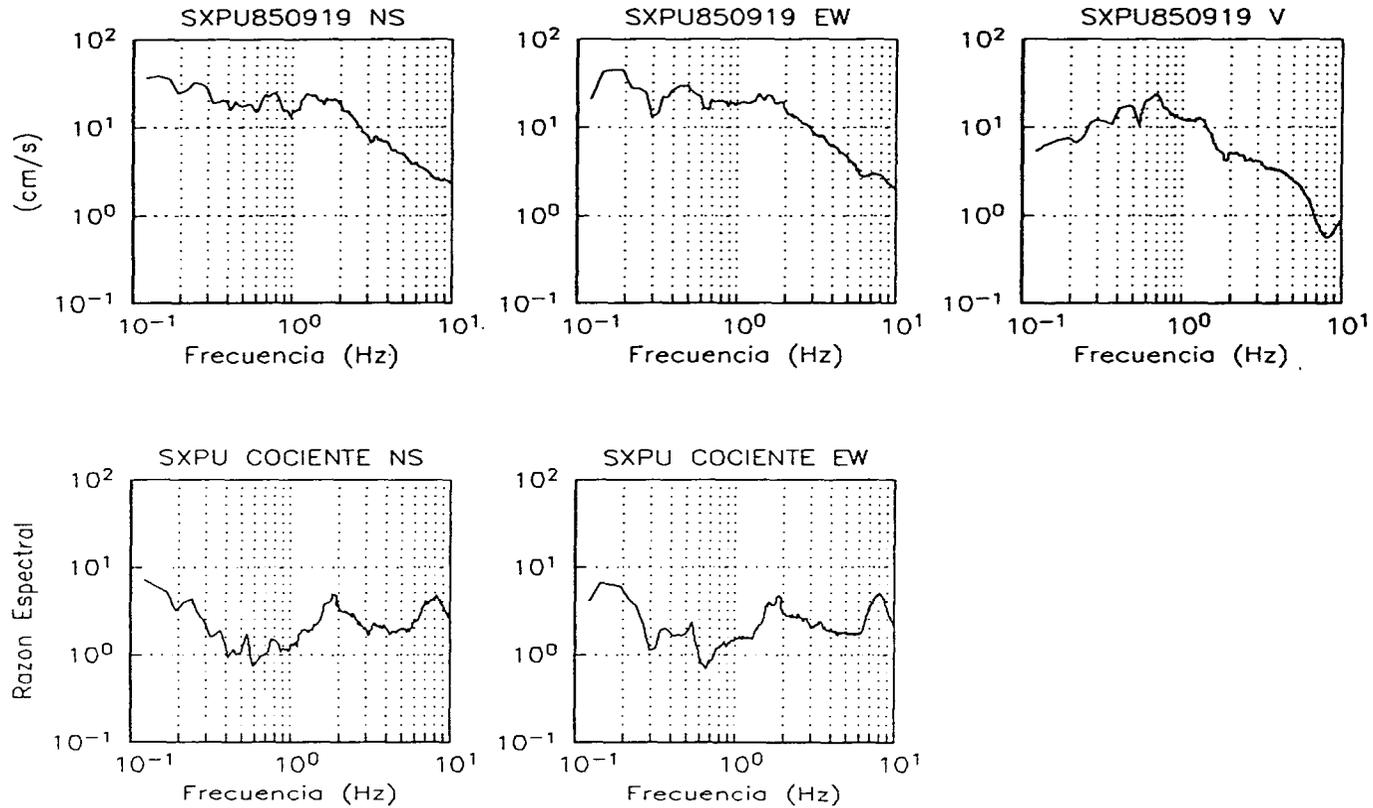


FIG. 4.36 Estación **SXP850919** Sismo 85-09-19 Técnica Nakamura

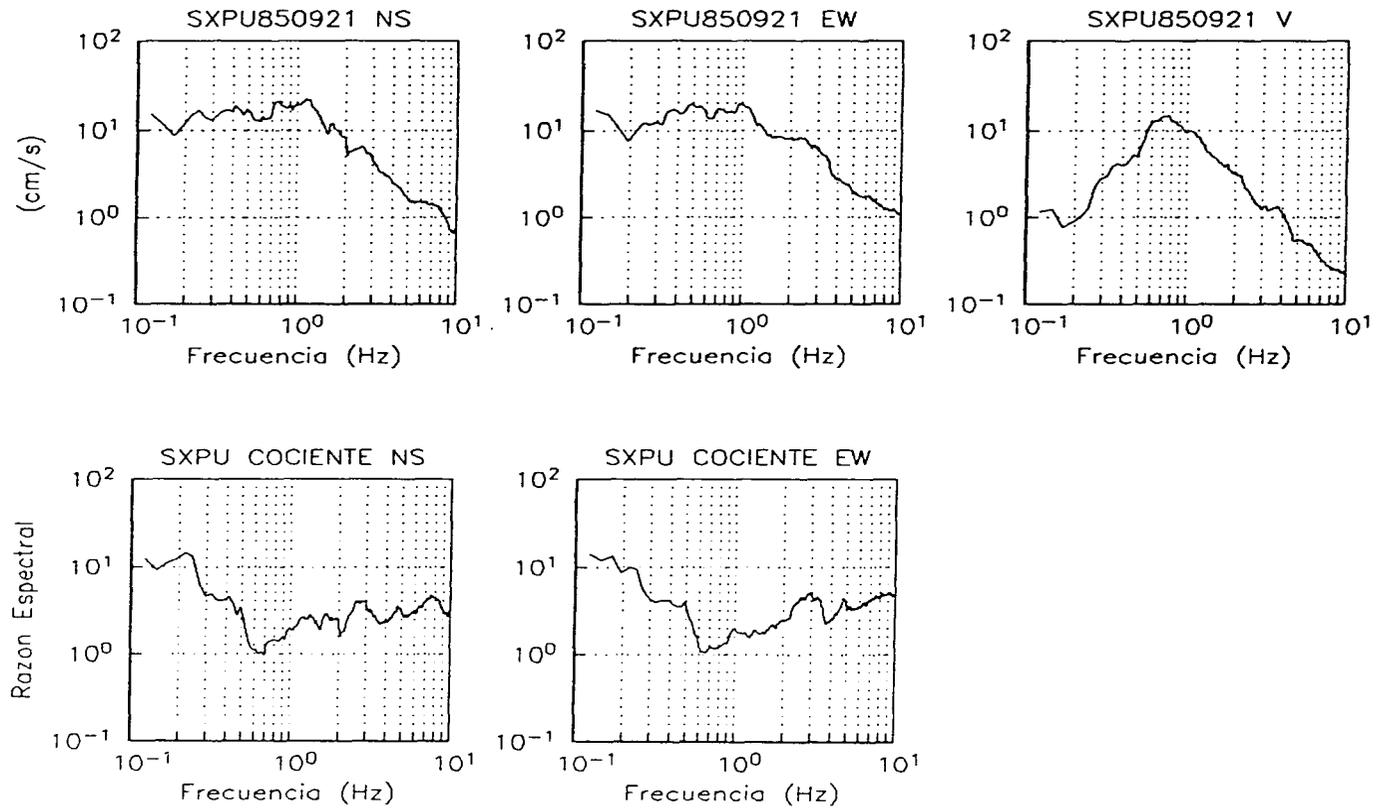


FIG. 4.37 Estación **SXP850921** Sismo 85-09-21 Técnica Nakamura

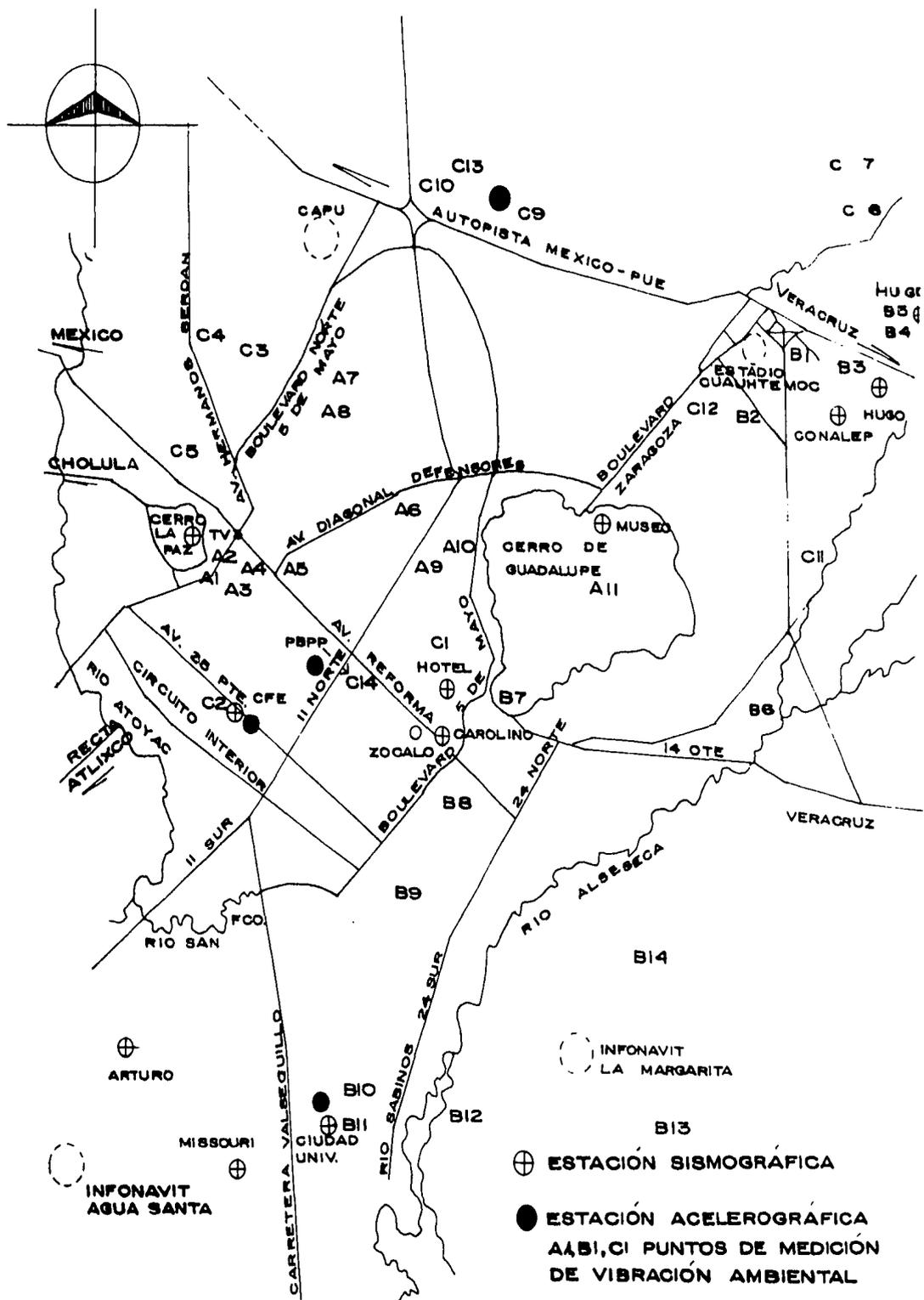


FIG 4.38 Ubicación de las estaciones sismográficas acelerográficas y puntos de medición de vibración ambiental

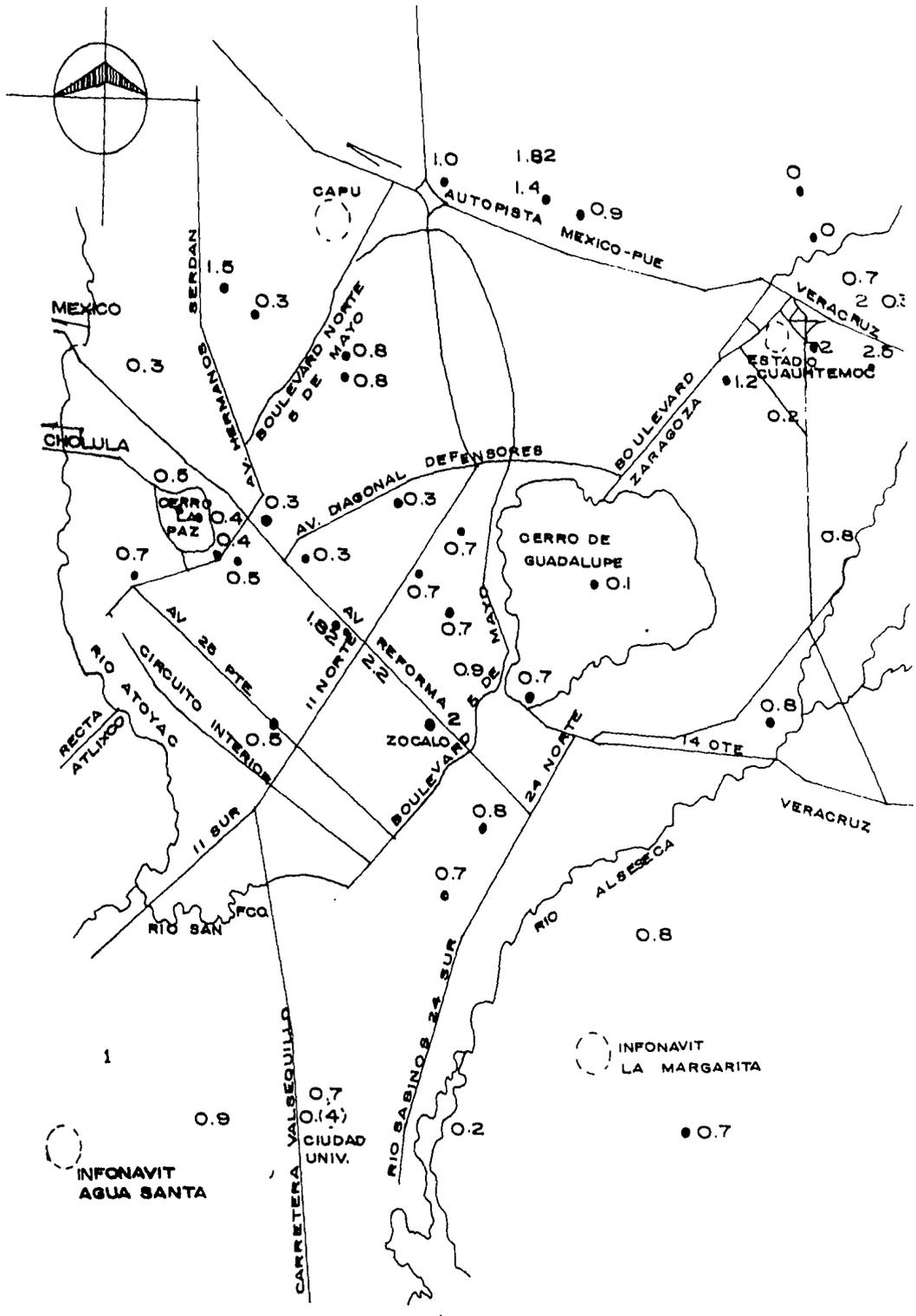


Fig. 4.39 Distribución de los períodos dominantes en la ciudad de Puebla

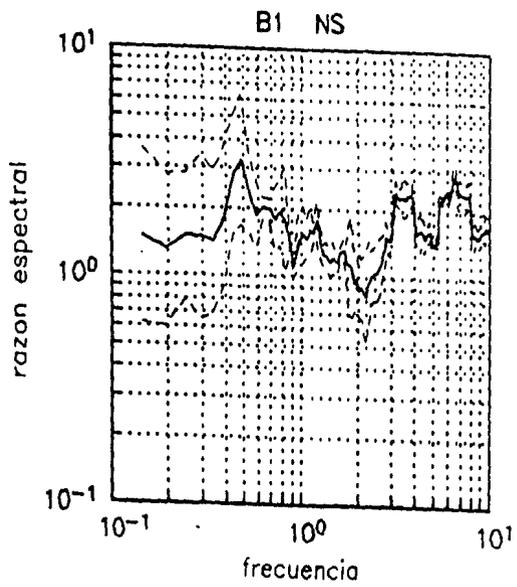
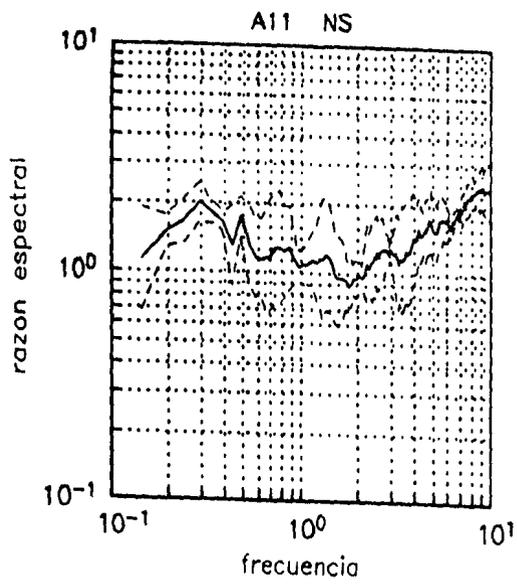


Fig. 4.40 Razón espectral, con vibración ambiental

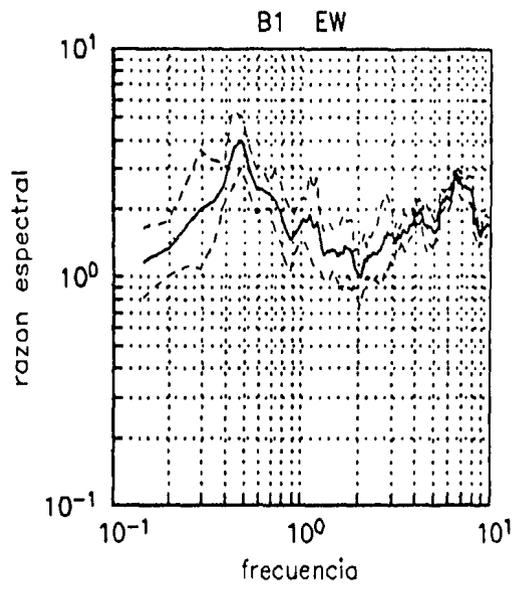
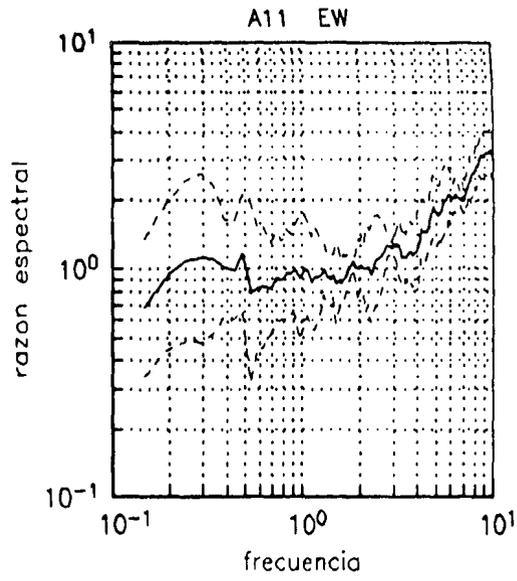


Fig. 4.41 Razón espectral, con vibración ambiental

CAPITULO V

ANALISIS DE LA RESPUESTA SISMICA

5.1 INTRODUCCION

El uso de modelos matemáticos unidimensionales para representar el comportamiento de depósitos de suelo muestra que en ocasiones no es necesario conocer con detalle las propiedades dinámicas del suelo de cada estrato y las condiciones de frontera para analizar su respuesta sísmica para fines de ingeniería civil. Los valles generalmente cumplen con los requisitos geométricos de los modelos unidimensionales: estratigrafía horizontal y dimensión horizontal mucho mayor en comparación con la profundidad; las formaciones geológicas que presentan esta configuración son generalmente depósitos de suelo de origen lacustre.

5.2 OBJETIVO

El objetivo de éste capítulo es:

Analizar la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en donde se ubican dos de las tres estaciones acelerográficas de la red sísmica de la B.U.A.P. por medio de un modelo unidimensional de propagación de ondas de corte.

5.3 CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS DEPOSITOS DE SUELOS.

Para proponer la microzonificación de una región además de conocer las dimensiones de los depósitos de suelo y clasificar los suelos, se requiere caracterizarlos a partir de sus propiedades dinámicas promedio.

Con base en los resultados de estudios para fines de microzonificación sísmica (Romo y Jaime, 1986; et al, 1989) se ha concluido que una caracterización de los suelos suficientemente aproximada para fines de microzonificación sísmica, se obtiene determinando el período dominante del sitio T_0 , el perfil de las velocidades \bar{V}_s de la onda sísmica de corte y su valor medio y la profundidad H de los depósitos de suelo. El conocimiento de estos tres parámetros del sitio constituye la base para establecer una microzonificación sísmica (Ovando y Romo, 1989). La relación elástica entre estos tres parámetros es:

$$T_0 = 4H/\bar{V}_s \quad (5.1)$$

La expresión (5.1) implica que los depósitos de suelo se idealizan como formados por un solo estrato, es decir un medio estratificado se sustituye por un estrato equivalente. Esta simplificación, aunque útil como primera aproximación en estudios de microzonificación sísmica, puede no ser suficientemente aproximada en otros más detallados.

\bar{V}_s puede determinarse aproximadamente calculando el promedio pesado de las velocidades de propagación de la onda de corte V_{si} de cada estrato i de espesor h_i .

$$\frac{1}{\bar{V}} = \frac{\sum h_i}{\sum V_i h_i} \quad (5.2)$$

La velocidad de la onda sísmica de corte en el estrato que equivale a un medio estratificado se determina por medio de la ecuación (5.2).

Los valores de V_i se pueden obtener con mediciones en campo, utilizando algún método geofísico como el de pozos cruzados (cross-hole), el de pozo abajo (down hole) o el de sonda suspendida (suspensión logging technique).

Otro método para determinar las V_i es a partir del conocimiento del módulo de rigidez al corte para cada estrato, G_i , empleando la ecuación:

$$G_i = \rho_i V_i^2 \quad (5.3)$$

en donde $\rho_i \left(\frac{\gamma}{g} \right)$ es la densidad de masa del estrato i siendo γ su peso volumétrico y g la aceleración de la gravedad. Los valores de ρ_i o γ de se obtienen de muestras inalteradas de suelo y los de G_i , ensayándolas en el laboratorio bajo condiciones dinámicas en un aparato de columna resonante o en una cámara triaxial cíclica.

Determinación de T_n . Conocidos H y V , el período T_0 se determina con la ecuación (5.1) aunque también se puede determinar en campo analizando la excitación producida por ruido sísmico ambiental, o mediante el cociente espectral.

Determinación de H . El espesor del depósito de suelo que sobreyace a la roca base se denota por H . En gran parte de la ciudad de Puebla la profundidad media a la que se encuentra la roca base es de 45-60 m determinada por medio de la columna estratigráfica de pozos de agua potable. La roca base se clasifica como una roca caliza perteneciente a la formación Maltrata.

Alternativamente en lugar de determinar la profundidad real a la roca base, puede determinarse la "profundidad significativa" para fines de respuesta dinámica. La profundidad significativa se define como aquella a partir de la cual la aceleración del subsuelo es aproximadamente constante. Con base en la experiencia adquirida en el análisis de la respuesta sísmica de un gran número de depósitos de suelo en distintas ciudades usando modelos unidimensionales de propagación de ondas de cortante, la "profundidad significativa" se puede estimar como aquella en la que la velocidad de la onda de corte V_{si} es mayor o igual a 800 m/s (Ovando y Romo, 1989).

Con base en los datos generados en este trabajo y en la información disponible en la literatura técnica hasta la fecha, los parámetros dinámicos del subsuelo estimados en algunos puntos de la ciudad de Puebla son el período dominante de sitio T_0 , estimado a partir de razones espectrales por medio de vibración sísmica ambiental y temblores, y la profundidad H media de los depósitos de suelo que yacen sobre la roca base.

5.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO

Para analizar la respuesta sísmica de un depósito de suelo éste se representa por un sistema viscoelástico formado por N capas horizontales de extensión infinita y como última capa tiene un semiespacio elástico Fig. 5.1. Cada capa es homogénea e isotrópica y esta caracterizada por la

profundidad, h , densidad de masa, ρ , módulo de cortante, G , factor de amortiguamiento β . Se considera que la respuesta del modelo se debe a la propagación vertical de ondas sísmicas de corte.

Se hace la hipótesis de que la propagación vertical de ondas de corte a través del sistema viscoelástico mostrado en la Fig. 5.1 únicamente da lugar a desplazamientos horizontales dentro de la masa de suelo. La función de desplazamientos de dos variables esta dada por:

$$u = u(x,t) \quad (5.4)$$

donde

x desplazamiento de cada capa en sentido vertical

t tiempo

la función de desplazamientos debe satisfacer la ecuación de onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (5.5)$$

siendo

ρ densidad

G módulo de corte

η viscosidad

Una función que cumple con la ecuación de onda es:

$$u(x,t) = Ee^{i(kx+\omega t)} + Fe^{-i(kx-\omega t)} \quad (5.6)$$

donde el primer término del segundo miembro de la ecuación (5.6) representa el viaje de la onda de cortante incidente hacia arriba y el segundo término el de la onda reflejada hacia abajo. ω es la frecuencia del movimiento, E y F son constantes que dependen de las condiciones de frontera, G^* es el módulo de cortante complejo.

La solución de la ecuación diferencial en derivadas parciales que representa el comportamiento del modelo conocida como ecuación de onda (Kanai, 1951) se calcula por medio de un programa de computadora denominado Shake (Schnabel et al, 1972).

5.5 DATOS REQUERIDOS POR EL MODELO

Cuando la respuesta sísmica del terreno no involucra desplazamientos grandes (comportamiento esfuerzo-deformación no lineal), la respuesta dinámica del depósito de suelo queda determinada principalmente por el módulo de rigidez al esfuerzo cortante y las características de amortiguamiento del suelo.

El modelo requiere de las siguientes propiedades estáticas y dinámicas del suelo:

- a) Peso específico del suelo.
- b) Velocidad de la onda de corte en cada estrato de suelo.

- c) Relación de amortiguamiento crítico. Esta relación se determinó por prueba y error, ajustando los valores hasta lograr la mejor aproximación al espectro calculado con base en el acelerograma registrado en cada sitio.
- d) Módulo de rigidez al corte (no es necesario en caso de que se conozca aproximadamente la velocidad de la onda de corte de cada estrato de suelo).

Las características del depósito de suelo que se requieren como datos son:

- a) Espesor del depósito de suelo.
- b) Tipo de material que forma cada uno de los estratos. El modelo sólo reconoce tres: arcilla, arena, roca.
- c) Espesor de cada uno de los estratos.
- d) Número de estratos de suelo.
- e) Sucesión estratigráfica.
- f) Profundidad del estrato en el que se localiza el nivel de aguas freáticas.
- g) Velocidad de la onda de cortante, profundidad y peso específico de la roca base (considerada como semiespacio).

Datos del sismo empleados en el modelo:

- a) Número de puntos muestreados.
- b) Intervalo de muestreo.

5.6 ESPECTROS DE SITIO

Para analizar la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en donde se ubican las estaciones de registro se consideró que los acelerogramas registrados en la estación UAPP ubicada sobre un depósito de toba compacta de 50 m de profundidad son representativos de los que ocurren en terreno rígido.

Como señal de excitación en la base de los depósitos de suelo analizados se utilizaron las componentes horizontales de los acelerogramas correspondientes a los sismos del 25 de abril de 1989 y el del 16 de septiembre de 1989, (únicamente se emplean estos eventos ya que los demás sólo se registraron en una estación).

ESTACION PBPP

Con respecto al sismo ocurrido el 25-04-89, la Fig. 5.2 presenta los espectros de respuesta registrados y calculados. Se observa que se reproducen adecuadamente los espectros de respuesta de las dos componentes horizontales los movimientos registrados tanto en ordenadas como en periodo. En la componente EW se observa que el espectro de respuesta calculado es mayor en amplitud que el registrado. Para aproximarlos más en los datos del modelo se intentó bajar el valor del amortiguamiento del depósito de suelo pero se obtenía un espectro muy distinto de mayor periodo y amplitud al espectro de respuesta registrado. Con respecto al sismo ocurrido el 09-16-89 se observa en la Fig. 5.3 que para la componente NS el espectro calculado reproduce adecuadamente el movimiento registrado tanto en

amplitud como en período. Para la componente EW el espectro calculado es muy distinto en período y en amplitud al espectro registrado.

ESTACION CAPS

La Fig. 5.4 presenta los espectros de respuesta para el evento registrado el 25-04-89. Para la componente NS el espectro calculado reproduce adecuadamente el movimiento registrado pero en la componente EW no, pues las ordenadas espectrales calculadas son ligeramente menores y el período calculado es menor que el período registrado.

La poca aproximación de algunos de los espectros de respuesta calculados con los espectros registrados en la estaciones acelerográficas PBPP se puede deber a las causas siguientes:

- a) El sitio en que se localiza la estación PBPP no cumple con las condiciones del modelo unidimensional en relación a estratigrafía horizontal y condiciones de frontera. Los sondeos de mecánica de suelos cercanos a la estación así lo indican.
- b) Las dimensiones del depósito de suelo no cumplen con lo requerido por el modelo unidimensional.
- c) Como consecuencia de lo anterior los efectos bidimensionales y tridimensionales en el comportamiento sísmico pueden ser importantes.
- d) Las propiedades dinámicas del suelo no son lo suficientemente aproximadas.

Para analizar los aspectos enunciados anteriormente se requieren estudios adicionales y otros modelos para representar al depósito de suelo lo cual cae fuera de los objetivos de éste trabajo.

TABLA 5.1 Propiedades dinámicas de los depósitos de suelo analizados.

Estación	V_s m/s	β %	γ t/m ³	H m
CAPS	171	9	1.92	61
PBPP	40	8	1.92	15
UAPP			1.92	55
SEMIESPACIO	1200	5	2.2	

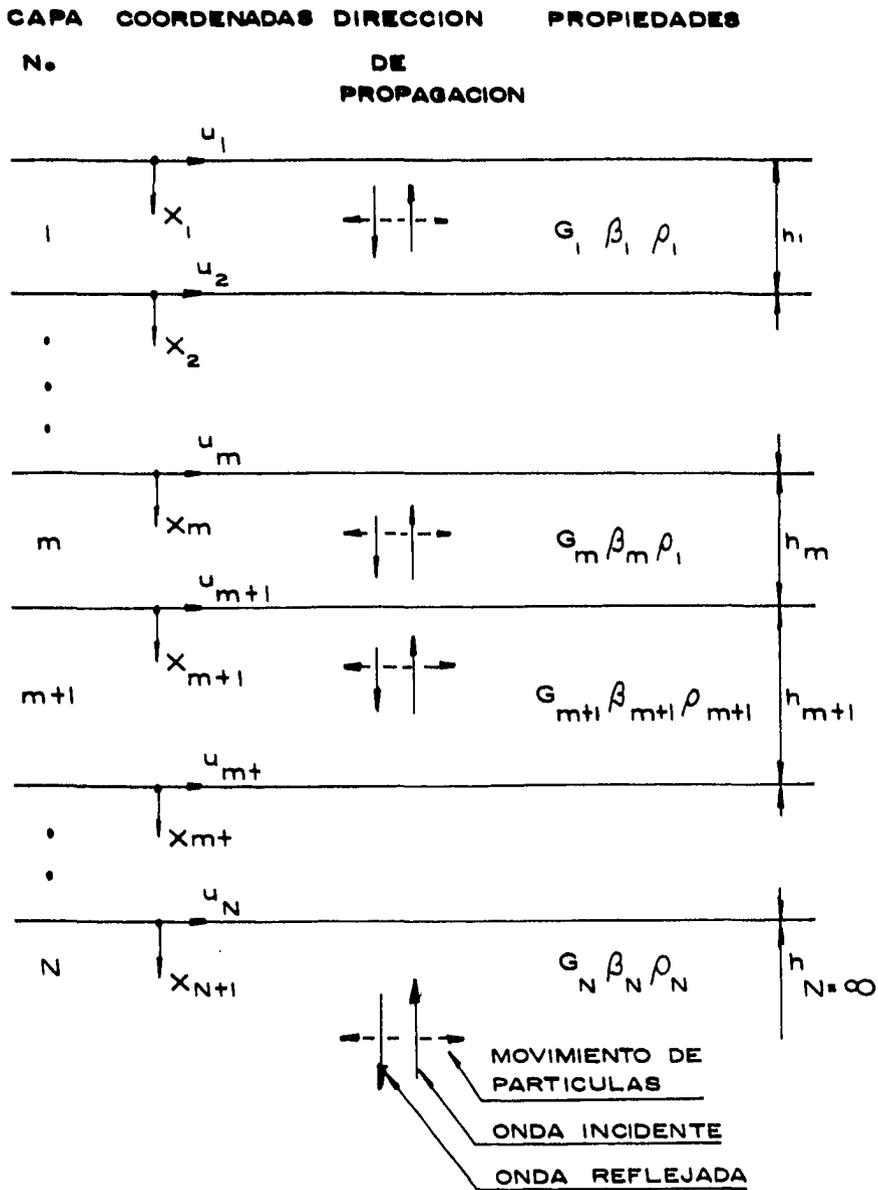


Fig. 5.1 Sistema unidimensional

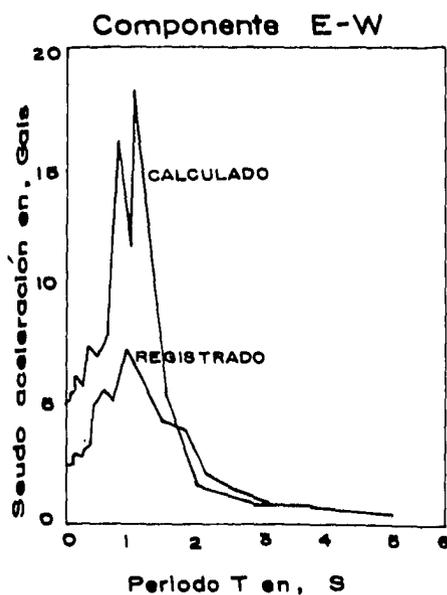
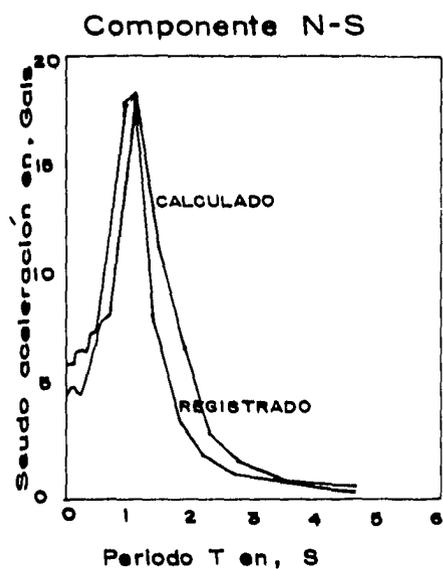


Fig. 5.2 Estación PBPP sismo 04-25-89. Espectro de respuesta registrado y calculado con el modelo unidimensional de ondas de corte

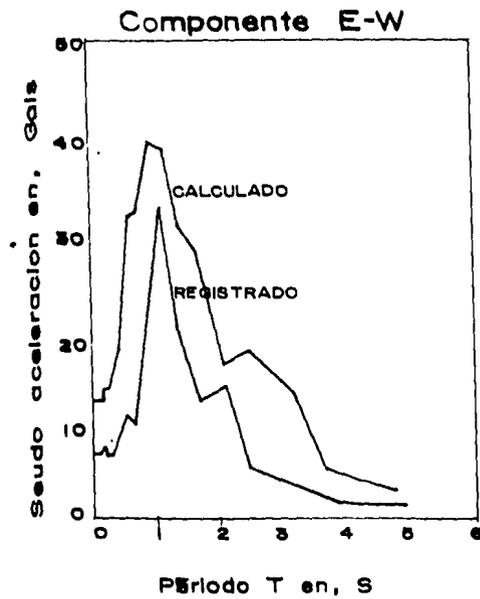
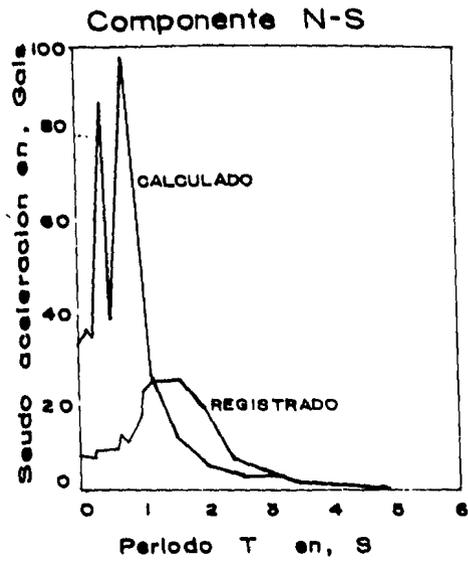


Fig. 5.3 Estación PBPP SISMO 09-16-89. Espectro de respuesta registrado y calculado con el modelo unidimensional de ondas de corte

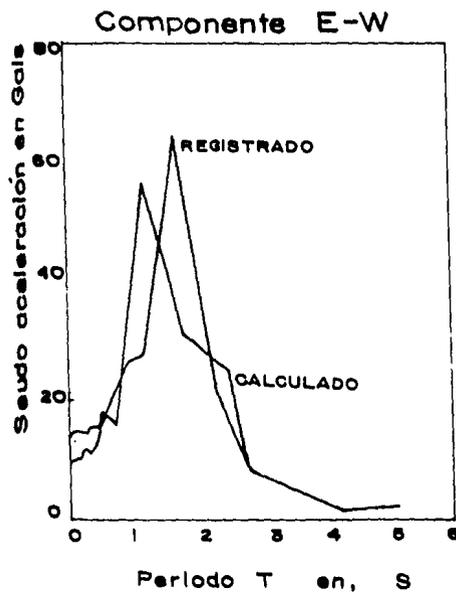
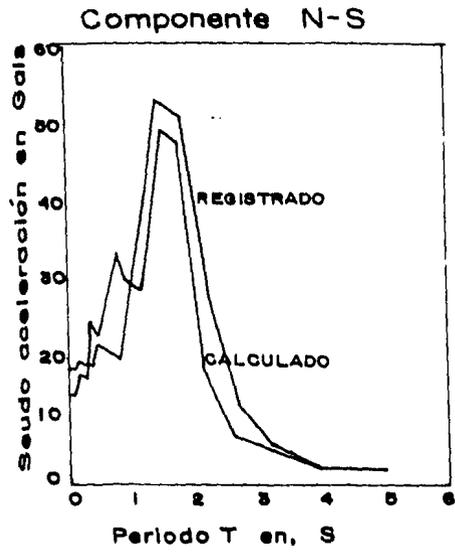


Fig. 5.4 Estación CAPS sismo 04-25-89. Espectro de respuesta registrado y calculado con el modelo unidimensional de ondas de corte

CAPITULO VI

MICROZONIFICACION SISMICA PRELIMINAR PARA LA CIUDAD DE PUEBLA

6.1 ASPECTOS GENERALES

En éste trabajo se define la microzonificación sísmica como: la división de una región en zonas cuyos depósitos de suelos tienen la misma profundidad, las mismas condiciones de frontera, y las mismas propiedades dinámicas medias. En consecuencia, similar respuesta sísmica y se prevé que potencialmente experimentarán la misma intensidad de daños ante un sismo.

Los estudios de microzonificación requieren el conocimiento de los mecanismos focales de los temblores que contribuyen significativamente al riesgo sísmico en una región, las características de la ruta de propagación de las ondas sísmicas, y por lo tanto la forma en que las condiciones locales afectarán a dichas ondas (Esteva, 1980). Además, se requiere conocer la geología histórica, zonificación geotécnica, determinar la existencia de fallas, fracturas, taludes naturales y en general el entorno geológico e hidrológico de la región.

6.2 MICROZONIFICACION SISMICA

A la fecha existen dos trabajos que proponen preliminarmente la microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla.

Chávez-García F. y Lermo Javier (1994), presentan una propuesta de microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla que consta de 5 zonas en función del comportamiento que se espera ante la ocurrencia de sismos. Es importante comentar que en esta microzonificación el valor de los periodos dominantes de las zonas I a III y V son muy similares de 0.1 a 0.8 s, con excepción de la zona IV en que los periodos dominantes se encuentran en la vecindad de 2 s. El criterio utilizado por los autores para dividir las zonas son el valor del periodo dominante, la amplificación y la intensidad de daños ocurridos durante el sismo de agosto de 1973.

Ruiz Acevedo C. et al (1993), utilizando vibración sísmica ambiental presentan un mapa de isoperiodos y con base en éste proponen dos zonas, una con periodos dominantes menores a 0.4 s y otra con periodos dominantes de 0.4 a 0.74 s. Para determinar los periodos dominantes utilizan dos técnicas:

- a) A partir de los espectros de Fourier.
- b) Determinan el periodo dominante de cada estrato, obtienen el promedio y lo consideran representativo de la columna estratigráfica.

De acuerdo a Ruiz et al (1993), el valor máximo del periodo dominante en Puebla es de 0.74 s, lo cual difiere de los periodos determinados en éste trabajo en las estaciones acelerográficas PBPP y CAPS (1.82 s). También se observan diferencias significativas en el valor de los periodos en algunas zonas con los periodos dominantes presentados por Chávez-García y Lermo (1994).

Ruiz et al (1993), en su trabajo no determinan la amplificación del movimiento sísmico, por lo tanto, el único criterio que emplean para proponer su microzonificación sísmica es el valor del periodo dominante.

Finalmente es conveniente agregar algunos comentarios acerca del valor de los periodos dominantes y su relación con la geología superficial. En la zona geotécnica clasificada como compresible en donde los sedimentos blandos alcanzan una profundidad aproximada de 16 m el valor de los periodos dominantes determinados con vibración sísmica ambiental tiene valores de 0.3 a 0.8 s, con excepción del punto C14 que tiene un valor de 2.2 s. El bajo valor de los periodos dominantes estimados no corresponde a la consistencia blanda de los materiales que forman el perfil estratigráfico. Para explicar lo anterior se proponen tres hipótesis:

- a) Los estratos de caliza y travertino rigidizan la columna estratigráfica.
- b) El espesor total de los estratos blandos no influye de manera determinante en la respuesta sísmica del subsuelo.
- c) El periodo dominante estimado por medio de vibración sísmica ambiental no es representativo del sitio, ya que en esta zona el periodo estimado en la estación acelerográfica PBPP es de 1.82 s.

En la zona del estadio Cuauhtémoc el perfil estratigráfico está formado por tobas volcánicas muy resistentes de acuerdo a los resultados de la prueba de penetración estándar y alcanzan espesores hasta de 60 m que sobreyacen a calizas cavernosas en algunas zonas y a basaltos en otras. En esta parte los valores del periodo dominante alcanzan valores de 1.2 a 2.5 s lo cual no está de acuerdo con la resistencia de los materiales que forman el estrato superficial. Para explicar lo anterior se propone la siguiente hipótesis:

La profundidad de los estudios de mecánica de suelos no alcanzan el estrato que posiblemente determina la respuesta sísmica de esta zona.

Integrando la información generada en este trabajo y la proporcionada por Chávez-García F. y Lermo J. (1994) no es posible proponer un mapa definitivo de microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla para fines de ingeniería civil. Sin embargo, con base en el intervalo de variación de los periodos dominantes estimados se proponen 2 zonas las cuales no coinciden con las zonas geotécnicas propuestas (CAP. III). Ordenando las zonas de acuerdo a su peligrosidad potencial en orden ascendente se tiene:

- ZONA I. Corresponde a la mayor parte de la ciudad y comprende la zona compresible, y parte de la zona de calizas lacustres y travertinos y una parte de la zona de tobas. El valor del periodo dominante varía de 0.2 a 0.8 s, aunque dos puntos en el centro de esta zona indican valores de 1.82 a 2.2 s (Paseo Bravo). Los valores de amplificación se encuentran entre los valores de 1 a 6. Con excepción de dos puntos que alcanzan valores de 11 y 17. A pesar de la existencia de dos puntos que difieren en el valor del periodo dominante y dos puntos que difieren en el factor de amplificación no se encuentran elementos suficientes para proponer una división más fina.
- ZONA II. Comprende la zona Norte de Este a Oeste de la ciudad en donde afloran tobas volcánicas y una parte de la zona de calizas lacustres y travertinos. Los valores del periodo dominante varían de 0.9 a 2.5 s. y son los periodos más grandes de la ciudad, aunque un punto de medición de vibración ambiental indica un valor de 0.2 s. los valores de amplificación determinados por medio de vibración ambiental varían de 2 a 4 y los determinados con la estación acelerográfica CAPS varían de 6 a 20. La distribución de valores del periodo dominante en esta zona no permite establecer una división más fina.

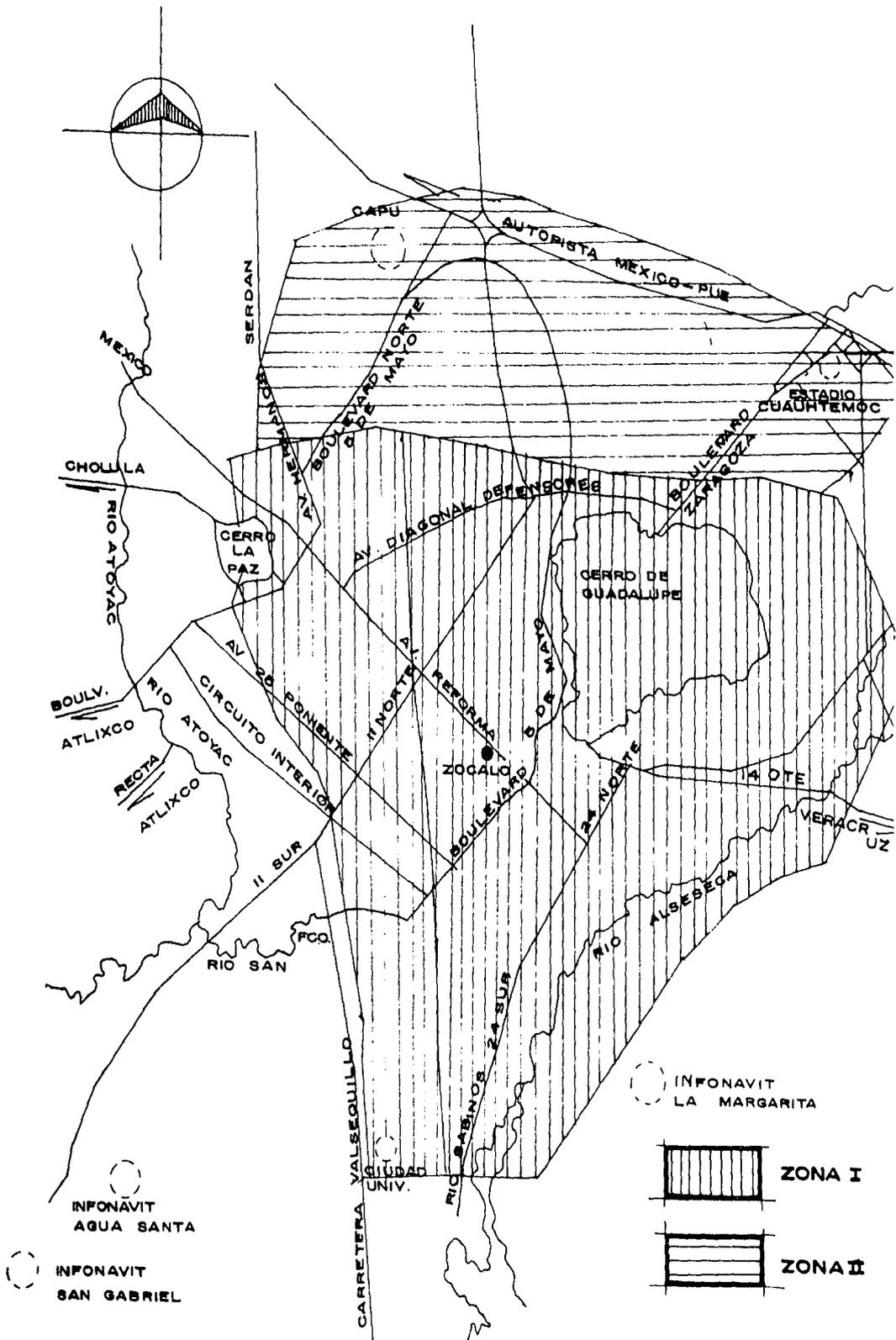


FIG. 6.1 Microzonificación sísmica preliminar de la ciudad de Puebla.

CONCLUSIONES

1. El valle de Puebla, como parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano, debe sus principales características geomorfológicas e hidrológicas a los eventos geológicos que dieron origen y evolución al Eje neovolcánico. La presencia de varios tipos de roca ígnea dentro del valle son consecuencia de las emisiones alternantes de productos piroclásticos y lávicos de cuatro aparatos volcánicos que pertenecen al Eje Neovolcánico, el Pico de Orizaba, el Iztaccihuatl, el Popocatepetl y la Malintzi.
2. Se propone la zonificación geotécnica de la ciudad de Puebla para fines de ingeniería civil. De acuerdo al tipo de material predominante el subsuelo se divide en tres zonas:
ZONA COMPRESIBLE. Formada por una sucesión de estratos de suelo de origen orgánico de alta compresibilidad, edólicos sueltos, con una profundidad máxima detectada en algunos sitios de hasta 16 m y que yacen sobre roca caliza lacustre y travertino.
ZONA DE CALIZA LACUSTRE Y TRAVERTINO. Esta zona se caracteriza por la interestratificación de estratos de roca caliza y travertino de 2 a 4 m de espesor con materiales de origen volcánico de compacidad media.
La zona compresible y la de calizas lacustres y travertino se localizan en el lecho que ocupó un lago del pliocénico que probablemente se extinguió debido a que alguna erupción volcánica modificó la cuenca hidrológica que alimentaba el lago.
ZONA DE TOBAS. Formada por material de origen volcánico. Es la más extensa rodea a la zona compresible y la de calizas lacustres y travertinos; la profundidad detectada de estos depósitos es hasta de 60 m. En esta Zona también existen subzonas de pequeña extensión formadas por depósitos de suelo con propiedades índice y mecánicas distintas al tipo de suelo predominante en la zona.
3. En los acelerogramas de los sismos que se registraron simultáneamente en las estaciones de la red sísmica de la B.U.A.P., se manifiestan claramente los efectos de las condiciones locales de sitio.
4. El análisis de los espectros de respuesta de sitio no indica una marcada diferencia en los periodos y amplitudes máximas en función del tipo de suelo.
5. El cálculo de los efectos de sitio se hizo con dos técnicas, la estándar y la de Nakamura. En las estaciones acelerográficas no hay concordancia en los resultados de los cocientes espectrales entre ambas técnicas. Para las estaciones temporales sismográficas los resultados coinciden aceptablemente con las dos técnicas. Los periodos estimados con las estaciones acelerográficas y sismográficas son del orden a los estimados por vibración ambiental en puntos cercanos a estas.
6. Los periodos dominantes estimados en la ciudad de Puebla presentan una amplia variación entre 0.2 y 2.5 s. Los periodos más largos se tienen en la zona del estadio Cuauhtémoc y el parque Industrial Puebla 2000, al Noroeste de la ciudad.

7. La amplificación varía de 0 a 20 pero su promedio se encuentra entre 3 y 4, sin que se puedan establecer diferencias en función del tipo de suelo. Por esta razón se considera que el valor del periodo dominante es un mejor indicador de los efectos de sitio que la amplificación relativa máxima.
8. Por las razones expuestas en el capítulo 5, la técnica Nakamura presenta mayores ventajas para estimar los efectos de sitio que la técnica estándar
9. Debido a que en la mayoría de los estudios de mecánica de suelos los sondeos son someros, no se alcanzó la profundidad necesaria para detectar estratos más profundos que pueden influir en la respuesta sísmica del sitio.
10. El comportamiento del depósito de suelo perteneciente a la estación PBPP no pudo ser analizado por medio de un modelo unidimensional de ondas de corte probablemente por la siguiente razón:
La estratigrafía del sitio no cumple con las dimensiones horizontal, vertical y condiciones de frontera del modelo.
En consecuencia el modelo no es confiable para estimar la respuesta sísmica de la zona de calizas lacustres y travertinos. con el conocimiento actual sobre las propiedades dinámicas de su subsuelo.
11. Con base en el intervalo de variación de los periodos dominantes para fines de microzonificación sísmica se han propuesto dos zonas sísmicas en la ciudad de Puebla.
ZONA I. Corresponde a la mayor parte de la ciudad, comprende la zona compresible, parte de la de calizas lacustres y travertinos y parte de la zona de tobas. El valor del periodo dominante estimado en varios puntos de esta zona es de 0.2 a 0.8 s.
ZONA II. Comprende la zona Norte de la ciudad de Este a Oeste, formada por tobas volcánicas y una parte de la zona de calizas lacustres y travertinos. El periodo dominante estimado en varios puntos de esta zona es de 0.9 a 2.5 s.
En algunos puntos de las dos zonas sísmicas el valor del periodo dominante parece no estar asociado a la rigidez del terreno, por esta razón no se puede establecer una división más precisa.

RECOMENDACIONES

1. En la zona de Plaza San Pedro, Av. Juárez, parte del Bulevar Hnos. Serdan y Av. Diagonal Defensores de la República y a lo largo de las riveras del río Alseseca, se recomienda que para calcular la capacidad de carga del suelo se hagan estudios detallados y mediciones puntuales para estimar el periodo dominante del sitio y la amplificación relativa ya que en esta zona es donde se localizan los estratos más blandos, profundos y compresibles de la ciudad.
2. Se recomienda aumentar el número estaciones de registro para incrementar la precisión de la microzonificación sísmica propuesta.
3. También se requieren estudios de campo y de laboratorio para definir los perfiles de propagación de velocidad de ondas de corte en sitios con estratigrafías representativas de áreas extensas y las propiedades esfuerzo-deformación en condiciones dinámicas en muestras de suelo inalteradas de depósitos de suelos típicos de cada zona.

AGRADECIMIENTOS

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a la Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por el apoyo brindado para que este trabajo se realizara.

La acertada dirección, paciencia e interés científico de mi maestro Dr. Efrain Ovando Shelley hicieron posible este trabajo.

Expreso un reconocimiento al M.C. Javier Lermo Samaniego y al Dr. Franciso Chávez-García por la información proporcionada y comentarios.

Al Dr. Gabriel Auvinet, y al Ing. Sergio Herrera Castañeda por sus observaciones.

REFERENCIAS

- Auvinet, Gabriel (1976). El subsuelo de la ciudad de Puebla VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos Secretaría de Obras Públicas, Instituto de Ingeniería, UNAM, Guanajuato México.
- Bard, P. Y. (1982). Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies, *Geophys. J. R. astr. Soc.* 71, 731-760.
- Campillo M. J.C. Gariel, K. Aki, and F.J. Sánchez-Sesma (1989). Destructive strong ground motion in Mexico City: source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 79, 1718-1735.
- Chávez-García Francisco J. Dr. Instituto de Ingeniería UNAM Comunicación personal.
- Chávez-García F. J. Lermo J. et al. Microzonificación Sísmica de la Zona urbana de la Ciudad de Puebla. Informe técnico final del Instituto de ingeniería, UNAM a CONACYT. Proyecto 2548 Febrero 1994.
- Cruz Hernández, E. Tesis de Ing. Geólogo ESIA. "Prospección geohidrológica de la zona de aguas freáticas de la porción central del valle de Puebla con aguas sulfídricas. Instituto Politécnico Nacional 1991.
- Demant, A., 1978, Características del eje Neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, V. 2. No. 2 p.p. 172-187.
- Espíndola, J.M., Las Catástrofes Geológicas. Cuadernos del Instituto de Geofísica No. 3 UNAM, junio 1990 México D.F.
- Esteva, L. (1980). Excitaciones Sísmicas en estructuras y cimentaciones. Memorias, X reunión Nacional de Mecánica de suelos, vol. 1, Soc. Mex. de Mec. de suelos, Morelia Michoacán, México.
- Esteva, L. (1970). Regionalización Sísmica de México para fines de Ingeniería, UNAM, 37 pp
- Figueroa, J. Sísmicidad en Puebla; Macrosismo del 28 de agosto de 1973, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM No. 343 México D.F. 1974.
- Housner G. W. Strong Ground Motion. *Earthquake Engineering*. Robert L. Wiegel Coordinating Editor Prentice-Hall, inc Englewood cliff, N.J. 1970
- Kanai, K. (1951) "Relation Between the nature of surface layer and the amplitude of earthquake Motions, *Bulletin Tokyo Earthquake Research Institute*.
- Liam, W.D. (1991) Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc. Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California*, I, 199-259.
- Lermo Samaniego J. Microzonificación de México, D.F. usando Microtemblores Informe Interno Instituto de Ingeniería UNAM 1990. Mexico D.F.
- Lermo Samaniego Javier and Francisco J. Chávez-García Site Effect Using Spectral Ratios With Only One Station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.83 No 5, pp. 1574-1594, October 1993.
- Lermo Samaniego Javier M.C. Instituto de Ingeniería UNAM 1994 Comunicación personal.

- López Bretón Raul M.I. Comunicación Personal BUAP.
- López Ramos, E. 1979. geología de México. 2a Edición Escolar 3 tomos.
- Matthews H. William Geología Simplificada Compañía General de Ediciones., S.A. México D.F. 1968
- Marsal J. R. Reséndiz Nuñez D. Diseño de Presas de Tierra y Enrocamiento 1979 México D.F. Editorial Limusa.
- Masaki, K. AND J. LERMO (1988). "Observation of microtremors in Mexico Valley", Proceedings of the 79th SEGJ Conference, The Society of Exploration Geophysists of Japan, pp 69-70.
- Mooser, F. 1975, Historia Geológica de la Cuenca de México. Memoria de las obras del Sistema de drenaje Profundo del Distrito Federal Tomo I. DDF. p.p. 7-38.
- Mooser F. y Seele, Tectónica del valle de Puebla, Geofísica Internacional, Vol 12, No. 2 1972.
- Nakamura Y. (1989). A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR RTR31 30, 1, February.
- Ordaz, M., S.K. Singh y Otros (1988). Estimation of response spectra in the lake bed zone of the valley of Mexico during the Michoacan earthquake, Earthquake Spectra, this issue.
- Ovando Shelley Efrain Dr. Instituto de Ingeniería UNAM. comunicación Personal.
- Ovando Efrain Romo P. M. Problemática para la Microregionalización Sísmica y Espectros de Sitio en acapulco 1989. Memórias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México.
- Ovando, Efrain Dr. Notas de Clase no Publicadas Imperial College of London 1982.
- Rosenblueth D. E. y Neumark. M. N. Fundamentos de Ingeniería Sísmica. Editorial Diana 1976.
- Ruiz Acevedo C. Características Geodinámicas de la Ciudad de Puebla.(1993).Tesis de Maestría Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. (U.P.A.E.P).
- Ruiz Acevedo C. J. Juárez, M. Ruiz J. Aguilar, J. Carballo, J.J. Guerrero, H. J. Iglesias (1993). Zonificación Sísmica de la Ciudad de Puebla, Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, octubre, Puerto Vallarta, 785-791.
- Seed, H.B. "Influencia de las Condiciones Locales del Suelo en Movimientos del Terreno y en daños a Edificios Durante Sismos". Octava Conferencia Nabor Carrillo XIII Reunión Nacional de Mec. de Suelos, Mazatlán, México Noviembre 22 de 1986.
- Seed, H.b. and Idriss, I.M. (1970). "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analisis", "Report No. EERC 70-10, Univerity of California, Berkeley, December.
- Seed Bolton H. Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquaques. Journal of the Soil Mechanics and Foundations División January, 1969. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Schnabel, Lysmer, Seed. Shake A Computer Program For Earthquake Response Analisis of Horizontally Layered Sites. Report No. EERC 72-12 December 1972. Earthquake Engineering Research Center University of California Berkeley, California.

Singh, S.K., E. Mena, and R. Castro (1988 a). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacán earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data, Bull. Seis. Soc. Am. 78, 451-477.

Singh, S.K., M. Rodríguez y J. M. Espíndola (1984) A catalog of Shallow earthquakes of Mexico From 1900 to 1981, Bull, Seism. Soc. Am. 74, 267-279.

Suárez R. G. y Jiménez J. Z. Sismos en la ciudad de México y el Terremoto del 19 de Septiembre de 1985, Cuadernos del Instituto de Geofísica No. 2 UNAM 1988 México D.F.

William T. Thomson Teoría de Vibraciones editorial PRENTICE/HALL INTERNACIONAL 1981.

Zeevaert W. Leonardo. Sismo-Geodinamica de la Superficie del Suelo. Editora Internacional 1998. Mexico D.F.