

127
20j



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL TOPOGRAFICA Y GEODESICA

**INTERACCION SUELO - ESTRUCTURA EN ESTACIONES
ACELEROGRAFICAS UBICADAS EN EL DISTRITO FEDERAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JORGE ALBERTO ROLDAN



MEXICO, D. F.

**TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1991



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 está 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.

I N D I C E

RESUMEN	3
1. INTRODUCCION	4
1.1 Consideraciones generales	
1.2 Interacción Suelo - Estructura	
1.3 Objetivo de la tesis	
2. LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS	12
2.1 Estaciones acelerográficas seleccionadas	
2.2 Características geométricas y constructivas de las estaciones seleccionadas	
2.3 Características de los suelos en donde se apoyan las bases de las estaciones seleccionadas	
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO - ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS SELECCIONADAS	35
3.1 Técnica de los microtemblores	
3.2 Equipo utilizado	
3.3 Diseño del experimento	
3.4 Descripción del experimento	

4. PROCESO Y ANALISIS DE LA INFORMACION	49
4.1 Procesamiento de la información	
4.2 Análisis de los resultados	
4.3 Comparación con otros resultados	
5. CONCLUSIONES	93
REFERENCIAS	95
APENDICE	99

RESUMEN

Se realizó un estudio experimental en estaciones acelerográficas con la finalidad de determinar la posible existencia de efectos de Interacción Suelo-Estructura, se seleccionaron cinco, tres de ellas en el Distrito Federal y dos en la Ciudad de Acapulco, Gro. Se localizan en diferentes tipos de suelos, FICA y FJBS en Zona de Lago, CUIP en Zona de Lomas, ACAC y ACAD en Zona de Transición, de acuerdo a los reglamentos de construcciones para cada Ciudad.

El experimento consistió en registrar simultáneamente en la base de cada estación y en puntos localizados en la vecindad de cada base, la velocidad de propagación de las ondas en el terreno, aplicando la Técnica de Microtemblores la cual utiliza la vibración ambiental como fuente de excitación dinámica; se obtuvieron las Funciones de Transferencia en los diferentes puntos seleccionados, para comparar la señal de campo libre con la registrada en la base.

De los resultados obtenidos se concluye que: se puede determinar la frecuencia fundamental del lugar con ayuda de los espectros de Fourier de velocidad; en todas las estaciones acelerográficas existen efectos de ISE; las mayores amplificaciones se presentan en FJBS y ACAD; las máximas atenuaciones se registran en CUIP y FICA. El desigual comportamiento que tienen las estaciones lo provoca: el ubicarse en distintas estratigrafías y la diferencia que existe en la geometría y profundidad de desplante en sus bases. Por lo que se recomienda realizar estudios enfocados a la adecuada elección del tipo de base y/o estructura acorde al tipo de suelo en donde será desplantada para minimizar los efectos de ISE, respaldando el trabajo experimental con un análisis teórico que modele el problema.

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

1.1 Consideraciones generales.

Las vibraciones producidas por un sismo se propagan en forma de ondas a partir del foco o fuente en todas las direcciones y su curso es reflejado y refractado en las discontinuidades entre los distintos estratos de los materiales que atraviesan y en los límites entre las capas que conforman el interior del planeta. Asimismo, la velocidad de propagación es función de la densidad y propiedades físicas de los estratos y medios en que se propagan las ondas. [Ref. 1 y 2]

Existen dos tipos de ondas sísmicas principales, las ondas que se propagan en el interior de la Tierra, denominadas ondas internas o de cuerpo y las que se propagan por la superficie terrestre, llamadas superficiales. [Ref. 3]

Ondas internas.- Se han clasificado en ondas primarias (P) y ondas secundarias (S).

A. Ondas primarias u ondas P, hacen vibrar una partícula en el sentido de su propagación ; cuyo movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio sólido a través del cual viajan (Fig. 1.1.1a); a las ondas P se les denomina también ondas longitudinales o de compresión. [Ref. 1 y 3]

B. Ondas secundarias u ondas S, hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a su trayectoria de propagación, produciendo esfuerzos de corte en el medio sólido y atenuándose completamente en medios líquidos (Fig. 1.1.1b), a las ondas S se les denomina también ondas transversales o de cortante. [Ref. 1 y 3]

Ondas de superficie.- Desde el punto de vista ingenieril las ondas Rayleigh y Love son consideradas las más importantes.

C. Ondas Rayleigh u ondas R cuyo movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente (Fig. 1.1.1c). [Ref. 1 y 3]

D. Ondas Love u ondas L cuyo movimiento es similar al de las ondas S, haciendo vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, careciendo de movimiento vertical (Fig. 1.1.1d). [Ref. 1 y 3]

Las ondas P se transmiten a mayor velocidad que las ondas S, la velocidad de propagación en el suelo de las ondas P es del orden de 13.6 km/s, las ondas de cuerpo a su vez viajan más rápido que las ondas de superficie, y de estas últimas las ondas Love son más veloces que las ondas Rayleigh [Ref. 3].

Al arribar las ondas de un sismo a un sitio formado por diferentes estratos, los depósitos o formaciones que se encuentran más cercanos a la superficie son excitados y vibran de manera característica ante cada temblor, este movimiento difiere del de la base de los depósitos. A este fenómeno se le llama amplificación local o filtrado local y da lugar a la intensificación de las ondas de ciertas frecuencias y a la reducción en otras. [Ref. 4]

1.2 Interacción Suelo-Estructura.

Al tener una estructura desplantada en un sitio determinado y ser excitada dinámicamente, los movimientos que sufre en su base difieren de los que tendría el suelo si la estructura no existiera, esto no sólo ocurre por el filtrado de las ondas sino que se debe también a que la presencia de la estructura provoca un cambio en el estado de esfuerzos existente en el suelo (Fig. 1.2.1). A este fenómeno se le denomina Interacción Suelo-Estructura (ISE).

Entre los factores que influyen en los efectos de ISE, se pueden mencionar: profundidad de desplante de la estructura, características geométricas y constructivas, tipo de suelo en donde se desplanta, etc.

Para estudiar el problema de ISE se pueden considerar dos partes: una puramente cinemática y otra inercial.

Cuanto más amplia y rígida es la cimentación de la estructura más se reduce la amplitud del movimiento del terreno a que se ve sometida, pues la cimentación promedia, en cada instante, los movimientos de campo libre de todos los puntos bajo ella; los efectos de este tipo se denominan interacción cinemática. El conjunto estructura-suelo deformable tiene una rigidez menor que la de la misma estructura desplantada en una base indeformable. En consecuencia el período fundamental y el amortiguamiento del sistema aumentan. Esto puede dar lugar a respuestas mayores o menores según la posición del período natural de la estructura con respecto al máximo del espectro de respuesta. Efectos como éste se llaman de interacción inercial. [Ref. 4]

Estudios recientes han demostrado que los efectos de ISE también se pueden presentar en estaciones acelerográficas y sismológicas, lo cual puede dar motivo a que las señales registradas por los instrumentos sean diferentes a las denominadas de "campo libre", es decir las que se observarían en el sitio si la estación no existiera. La importancia que tiene la cuantificación de éstos efectos en las estaciones mencionadas estriba en que el uso ulterior de las señales registradas en las mismas, parte de la hipótesis de que dichas señales son de "campo libre". [Ref. 5]

1.3 Objetivo de la Tesis.

El presente trabajo tiene por objetivo determinar si existen efectos de ISE en las estaciones acelerográficas seleccionadas en el estudio, valorarlos y conocer que tan significativos son, comparar los efectos de ISE en diferentes tipos de suelo y en las estaciones que tienen estructuras similares como base.

El estudio se estructura en cinco capítulos, en el primero se hace una breve introducción sobre el tema, el segundo se destina a la localización de las estaciones acelerográficas consideradas en el estudio y a los tipos y propiedades de los suelos en donde están apoyadas, así como sus características geométricas y constructivas; el estudio experimental se presenta en el tercer capítulo, describiendo el equipo utilizado, la técnica que se aplica, y la realización del experimento; el proceso de la información obtenida y el análisis de los resultados se incluye en el cuarto; finalmente las conclusiones integran el quinto capítulo.

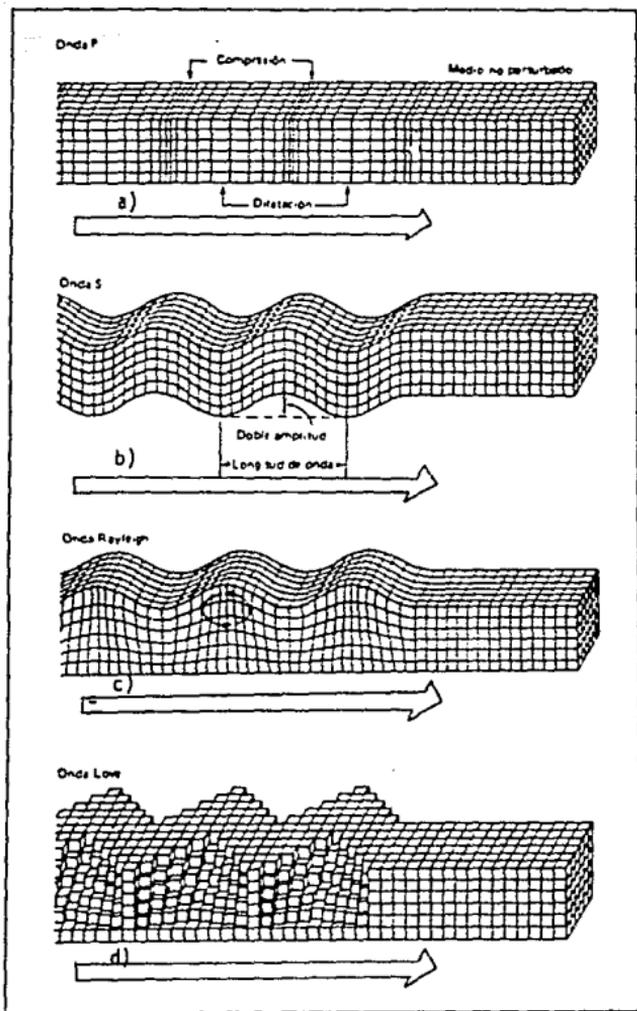


Figura 1.1.1 Movimiento de los cuatro tipos de ondas sísmicas (Ref. 1)

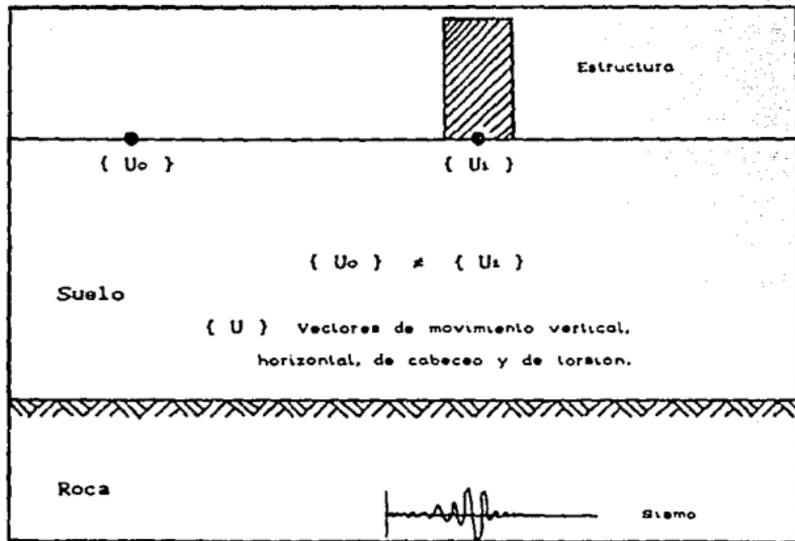


Figura 1.2.1 Fenómeno de Interacción Suelo - Estructura

2. LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

2. LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS.

Para llevar a cabo el estudio propuesto se eligieron cinco estaciones acelerográficas; tres son operadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, las otras pertenecen a los centros de investigación privados Fundación ICA y Fundación Javier Barros Sierra. Tres se localizan en el Distrito Federal y dos en la Ciudad de Acapulco, Gro. las características geométricas y constructivas son diferentes en cuatro estaciones, y los suelos en donde están apoyadas difieren en sus propiedades.

2.1 Estaciones acelerográficas seleccionadas.

Se han seleccionado cinco estaciones, a las cuales denominamos con las claves CUIP (Ciudad Universitaria, patio del Instituto de Ingeniería, D.F.), FICA (Fundación ICA, D.F.), FJBS (Fundación Javier Barros Sierra, D.F.), ACAC (Centro Cultural, Acapulco, Gro.) y ACAD (La Diana, Acapulco, Gro.).

ESTACION CUIP

La estación CUIP está ubicada dentro de Ciudad Universitaria, frente al Edificio 1 del Instituto de Ingeniería, la vía principal de acceso es por el Circuito Interior (fig. 2.1.1), es necesario aclarar que en este lugar estaba habilitada una estación denominada CUI (Ciudad

Universitaria Patio del Instituto de Ingeniería), integrada sólo por la base y un compartimento para el acelerógrafo; por otro lado en la Coordinación de Sismología e Instrumentación Sísmica del I. de I. (Edificio 1), se localizaban las estaciones CU01 y CU02; en 1989 se construyó una caseta en donde se instalaron las tres estaciones mencionadas, actualmente está en servicio y cuenta con tres equipos registradores, CUP1, CUP2 y CUP3. En el desarrollo del estudio la referiremos con la clave CUIP.

ESTACIONES FICA y FJBS

Ambas estaciones se localizan en la colonia Roma Sur, entre las calles de Orizaba y Av. Cuauhtémoc, dentro de un parque recreativo frente al Centro Médico (fig. 2.1.2). Las estaciones están prácticamente alineadas en dirección E-O, existiendo entre ellas una distancia de 6.50 m.

ESTACION ACAC

Se localiza en Av. Costera Miguel Alemán cerca de la playa de Icacos, en el Centro Cultural Guerrerense (fig. 2.1.3), a 16.848 Latitud N y 99.851 Longitud W, forma parte de la Red Acelerográfica de Guerrero operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Esta estación se localiza en la Escuela Secundaria Federal No. 1, cerca de la glorieta de La Diana ubicada sobre la Av. Costera Miguel Alemán (fig. 2.1.3), a 16.867 Latitud N y 99.880 Longitud W, operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, también forma parte de la Red Acelerográfica de Guerrero.

2.2 Características geométricas y constructivas de las estaciones seleccionadas.

La estación CUIP, está construida de concreto reforzado y muros de ladrillo rojo recocido, tiene una altura aproximada de 1.90 m a partir del nivel de piso terminado y sus dimensiones son de 1.40 m de ancho por 3.20 m de largo (fig. 2.2.1); la base está anclada al suelo y tiene una profundidad de 1.30 m. La caseta, de forma rectangular, tiene muros de 15 cm de espesor aplanados en el interior y exterior; la base, losas, dallas y castillos son de concreto reforzado. Situada en una zona verde; al norte, este y oeste no existen estructuras cercanas a la estación, al sur a 30 m aproximadamente se ubica un edificio de concreto reforzado.

La estación FICA, es sólo una base circular de concreto reforzado que tiene un diámetro de 2.60 m (fig. 2.2.2), el espesor de los muros de concreto es de 15 cm, su altura sobre el terreno es de apenas 10 cm, la profundidad a la que ha sido desplantada es de 1.30 m, en su interior opera el acelerógrafo instalado. A 15 m al norte y oeste de la

base están las instalaciones del Centro de Exposiciones de la Ciudad de México; en dirección este se ubica la estación FJBS existiendo entre ellas una distancia de 6.50 m, al sur se encuentra un parque recreativo.

La estación FJBS, está integrada en dos módulos, la caseta de protección y la base de la estación. La caseta es de lámina metálica de 3.40 m por lado y 2.80 m altura sobre el terreno, desplantada en un firme de concreto de 10 cm de espesor. La base se desliga del firme de concreto por medio de un relleno de gravilla de 7 cm de ancho, es cuadrada de 2.00 m por lado (fig. 2.2.3), tiene 2.00 m de profundidad, en la parte superior sobresale otra base más pequeña de 1.05 X 0.85 X 0.30 m donde está ubicado el acelerógrafo con su caja de protección. El material que se ha empleado en la construcción es concreto reforzado. Las instalaciones del Centro de Exposiciones de la Ciudad de México se ubican 20 m al norte. La estación FICA está a 6.50 m al oeste, en las direcciones sur y este se encuentra un parque recreativo.

Las estaciones ACAC y ACAD son idénticas, se ha usado concreto reforzado en su construcción y son bases rectangulares de 1.05 m de largo por 0.85 m de ancho, la altura sobre el nivel del terreno es de 0.30 m (fig. 2.2.4), la profundidad de desplante de las bases es de aproximadamente 1.00 m, en la parte superior tienen una caja metálica sujeta a la base que resguarda al equipo; ACAC sólo tiene terreno libre en la dirección oeste, a menos de 3 m se ubica la biblioteca del Centro Cultural Guerrerense; ACAD se encuentra en el patio de la Secundaria Federal No. 1, disponiendo de terreno libre en sus alrededores, a excepción de la dirección sur en donde a menos de 3 m se localiza uno de los edificios del plantel.

2.3 Características de los suelos en donde se apoyan las bases de las estaciones seleccionadas.

De acuerdo al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [Ref. 6], la caracterización del suelo para el Valle de México comprende tres diferentes zonas:

La *Zona de Lomas* (Tipo I). Está constituida principalmente por suelos areno-limosos compactos, gravas y tobas pumíticas bien cementadas, hacia el sur y en algunas partes del oriente se tienen derrames lávicos de espesor variable.

La *Zona de Transición* (Tipo II). Ubicada entre la zona de lago y lomas, presenta una estratigrafía muy irregular de materiales arcillosos blandos con limos y arenas compactas.

La *Zona de Lago* (Tipo III). Se encuentra constituida por la formación arcillosa superior (intercalación de estratos de arcilla, arena, vidrio volcánico y fósiles), primera capa dura (limo arenoso cementado), formación arcillosa inferior y depósitos profundos.

En la Fig. 2.3.1 se muestra la localización de las estaciones de acuerdo a la zonificación sísmica del Distrito Federal.

En la Bahía de Acapulco, Gro. se han tomado como base las secciones geológicas y datos geotécnicos suministrados [Ref. 7], dando lugar a la siguiente zonificación:

Tipo I Terreno firme, tal como tepetate compacto, arenisca medianamente cementada y arcilla muy compacta. Se incluye la roca basal.

Tipo II Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas o limos, de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad y depósitos aluviales compactos, todo lo anterior de espesor menor de 40 m.

Tipo III Arcillas blandas muy compresibles, depósitos aluviales sueltos y depósitos de barras en las costas, todo lo anterior de espesor no menor de 40 m.

En la figura 2.3.2 se muestra la localización de las estaciones de acuerdo a la zonificación sísmica de la Bahía de Acapulco.

Las condiciones de trabajo de los suelos pueden clasificarse burdamente en dos categorías: una en la que prevalecen condiciones de cambio libre de volumen y otra en la que el suelo se deforma a volumen constante. Los problemas de ingeniería sísmica caen más usualmente en la segunda categoría. [Ref. 4]

Interesan cinco propiedades que caracterizan el comportamiento de un medio continuo bajo cargas dinámicas, a saber: el módulo de rigidez G (o el de elasticidad E), la relación de amortiguamiento D, las relaciones esfuerzo-deformación y la resistencia bajo carga cíclica; la relación de Poisson (aunque varía poco y casi no afecta la respuesta sísmica).

Los módulos de rigidez G, de elasticidad E, y la relación de Poisson ν , pueden determinarse midiendo en campo las velocidades de propagación C_p y C_s de las ondas de compresión y de corte, conociendo la densidad del material ρ , al aplicar las relaciones:

$$G = \rho C_s^2$$

$$E = \rho (3 / C_p^2 - 4 C_s^2) / (C_p^2 / C_s^2 - 1)$$

$$\nu = -(C_p^2 / 2 C_s^2 - 1) / (C_p^2 / C_s^2 - 1)$$

Es posible evaluar estas propiedades dinámicas realizando algunas pruebas de laboratorio, entre ellas podemos mencionar: triaxial cíclica, columna resonante, torsión cíclica y corte simple cíclico. Existen procedimientos de campo que permiten estimar parámetros del suelo (como lo es la velocidad de propagación de ondas), que combinados con expresiones teóricas conducen a características de interés en el suelo, los métodos más usuales son el de refracción y pruebas en pozos, dentro de éstas últimas las más comunes son: pozos cruzados, down hole, up hole y sonda suspendida.

De las estaciones seleccionadas sólo en CUIP se ha realizado con anterioridad una prueba de velocidad de propagación de onda de cortante, con lo que se ha determinado una estratigrafía preliminar del lugar; en las demás estaciones sólo existen perfiles estratigráficos cercanos.

La prueba efectuada en CUIP (Fig. 2.3.3) define el perfil estratigráfico preliminar de la estación (Fig. 2.3.4). Entre 0 y 4 m de profundidad existe material de relleno, encontrándose basalto alterado entre los 4 y 16 m, el siguiente estrato integrado por arena con arcilla, limo y grava, tiene un espesor aproximado de 12 m, habiendo arcilla y limo en la capa más profunda. [Ref. 8]

En las estaciones FICA y FJBS existen básicamente tres capas de suelo: material de relleno con limo de 0 a 10 m de profundidad, formación arcillosa de 10 a 30 m y una capa de limo con vidrio volcánico y arcilla con espesor de 15 m [Ref. 8]. Los sondeos efectuados en esta zona sólo alcanzan la primera capa dura del Valle de México (Fig. 2.3.5).

Para la Bahía de Acapulco, Gro. se ha tomado como base las secciones geológicas y datos geotécnicos suministrados tales como información de cono eléctrico, penetración estándar y descripción de muestras, se han logrado establecer secciones que permiten diferenciar los depósitos aluviales y lagunares que cubren el granito a lo largo de la costa de la bahía y predecir la distribución fuera de ella. [Ref. 10 y 11]

Las propiedades que caracterizan los suelos en esta región se pueden enumerar:

Propiedades índice. La mayor parte de los suelos de la bahía son arenas limosas con contenido de arcilla variable a excepción de los de la sub-bahía de Icacos y la península de Caleta en las que se tienen arcillas orgánicas y turbas compresibles. El contenido natural de humedad para los suelos arenosos varía de 5% a 40% y la relación de vacíos entre 0.5, para aquellos con bajos porcentajes de finos, a aproximadamente 1.0. En los suelos arcillosos orgánicos son mayores de 250% y 10.0 respectivamente. Para suelos granulares con diferente contenido de finos, los índices de plasticidad varían entre 10% y 60%. En las turbas lagunares son mayores de 200% . [Ref. 12]

Propiedades mecánicas. La información con que se cuenta hasta el momento es escasa, pues la mayor parte de los estudios geotécnicos son sondeos de penetración estándar, lo que sólo proporciona en forma aproximada los valores de los parámetros, de los cuales se tiene que: la resistencia a la compresión no confinada para suelos areno-limosos varía entre 14 y 18.4 t/m^2 , el ángulo de fricción entre 26° y 42° ; para arcillas lagunares la resistencia oscila entre 7.6 y 12.4 t/m^2 . Existe una gran carencia de datos bajo cargas dinámicas, pues sólo en casos muy específicos dentro de la depresión granítica se cuenta con ellos. Aún cuando se han desarrollado expresiones para caracterizar a los suelos a partir de estos datos y así establecer una microzonificación sísmica, el avance logrado hasta el momento es pequeño. [Ref. 12]

Para la estación ACAC se cuenta con una sección geológica próxima a este sitio (fig. 2.3.6), en la cual se ve la existencia de depósitos aluviales con espesores hasta de 20 m; la capa superior es una secuencia de abanicos aluviales con grava, arenas y limos arcillosos alcanzando espesores de 20 a 23 m. En esta sección el granito se encuentra en algunos puntos hasta los 40 m. [Ref. 13]

En ACAD, apoyada sobre arenas, arcillas y limos con espesores entre 15 y 20 m, aflora en la sección oriental el granito alterado que alcanza profundidades hacia el poniente de 16 a 24 m (fig. 2.3.7), bajo esta capa se encuentra el granito sano, en los extremos de la sección se localizan formaciones de abanicos aluviales. [Ref. 13]



Figura 2.1.1 Localización de la Estación CUIP

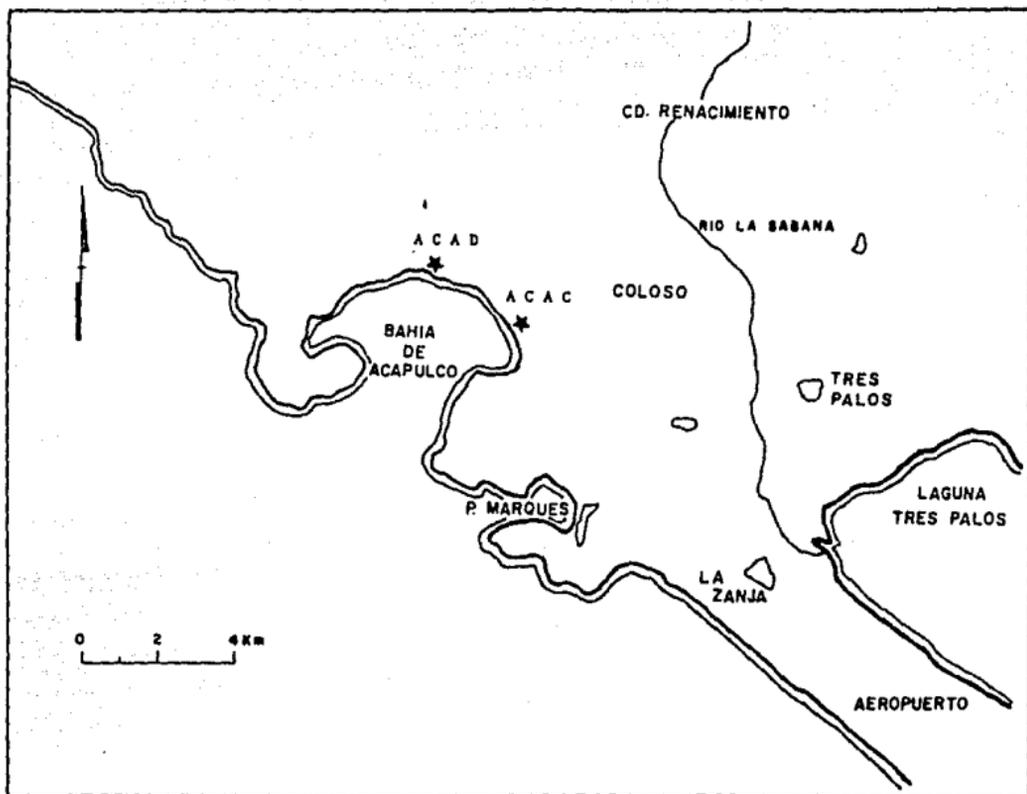
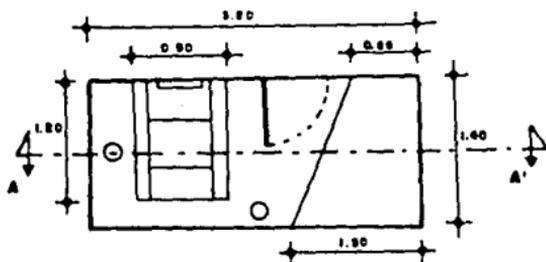
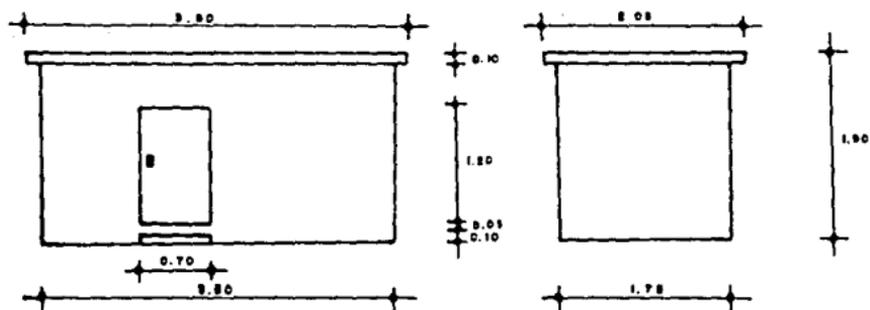


Figura 2.1.3 Localización de las estaciones ACAC y ACAD.



Acel. m/s

CORTE A-A'

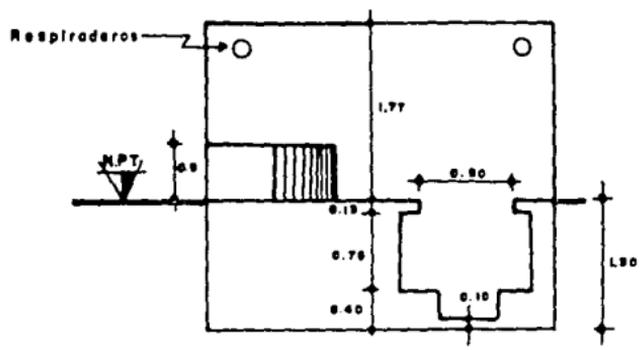


Figura 2.2.1 Características geométricas de la estación CUIP.

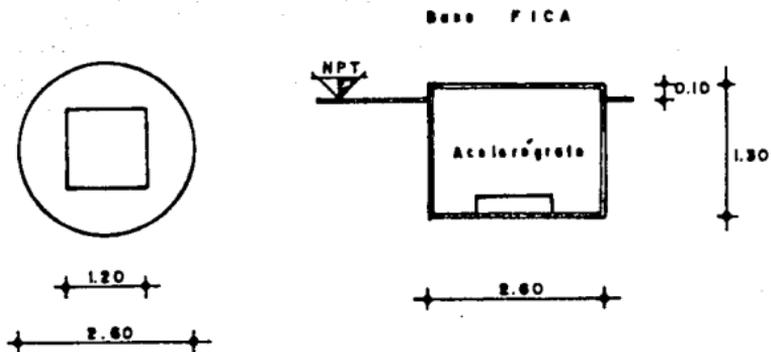


Figura 2.2.2 Características geométricas de la estación FICA.

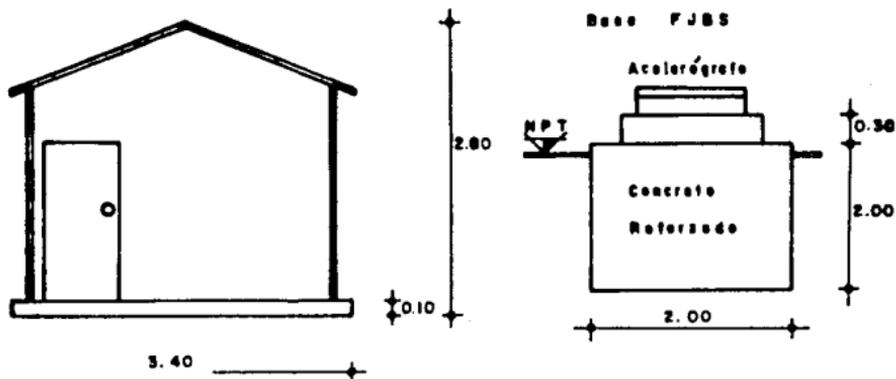


Figura 2.2.3 Características geométricas de la estación FJBS.

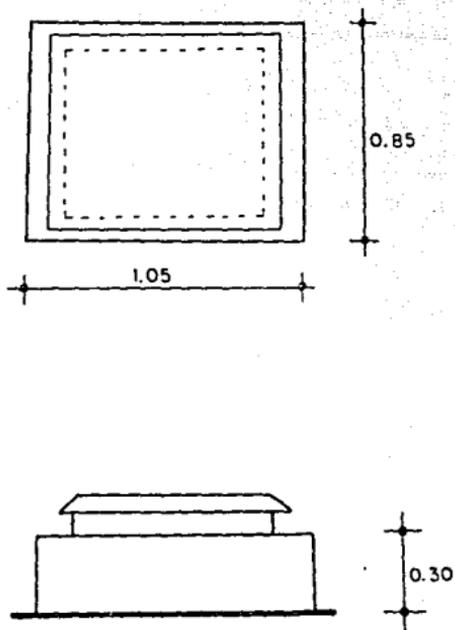
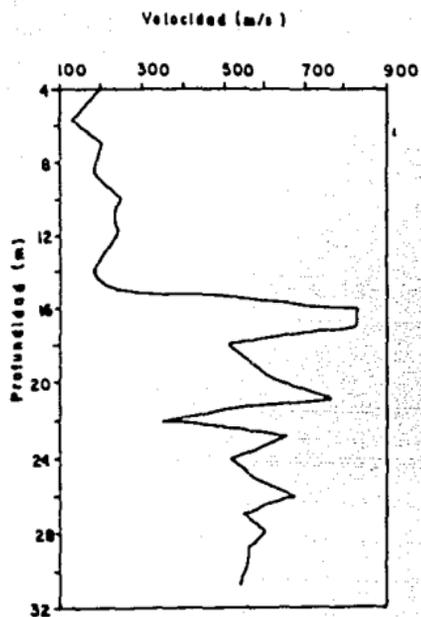
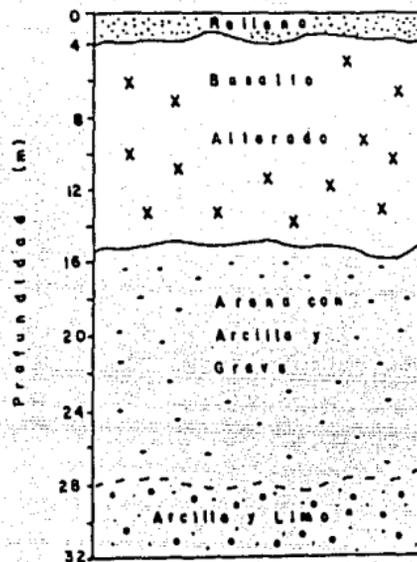


Figura 2.2.4 Características geométricas de las estaciones
ACAD y ACAC.

ESTACION CUIP



Propagación de Onda S



Estratigrafía preliminar

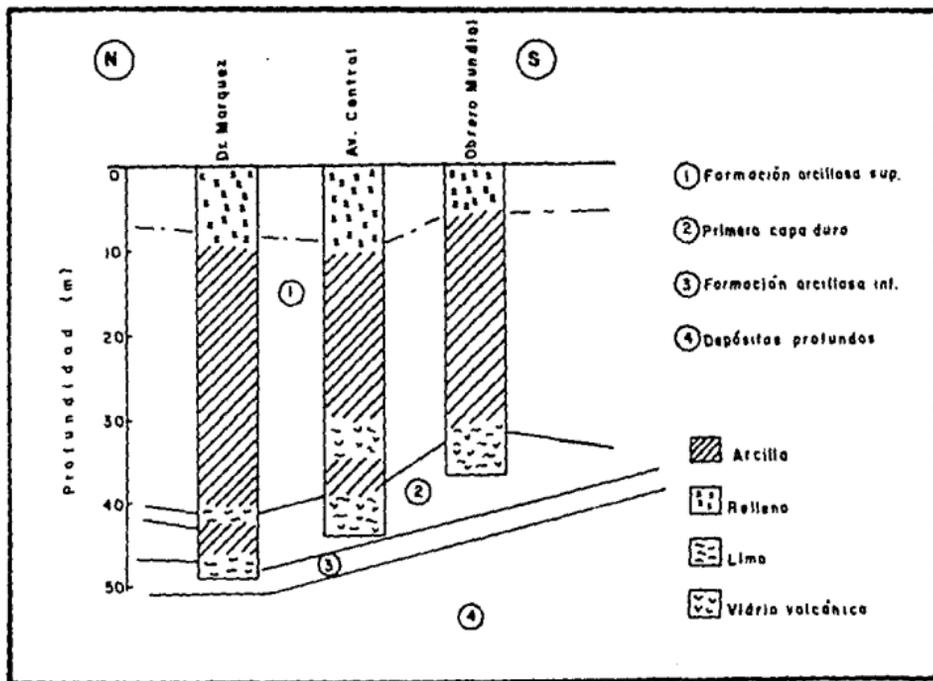


Figura 2.3.5 Sondeos realizados en las cercanías de las Estaciones FICA y FJBS (Ref. 8)

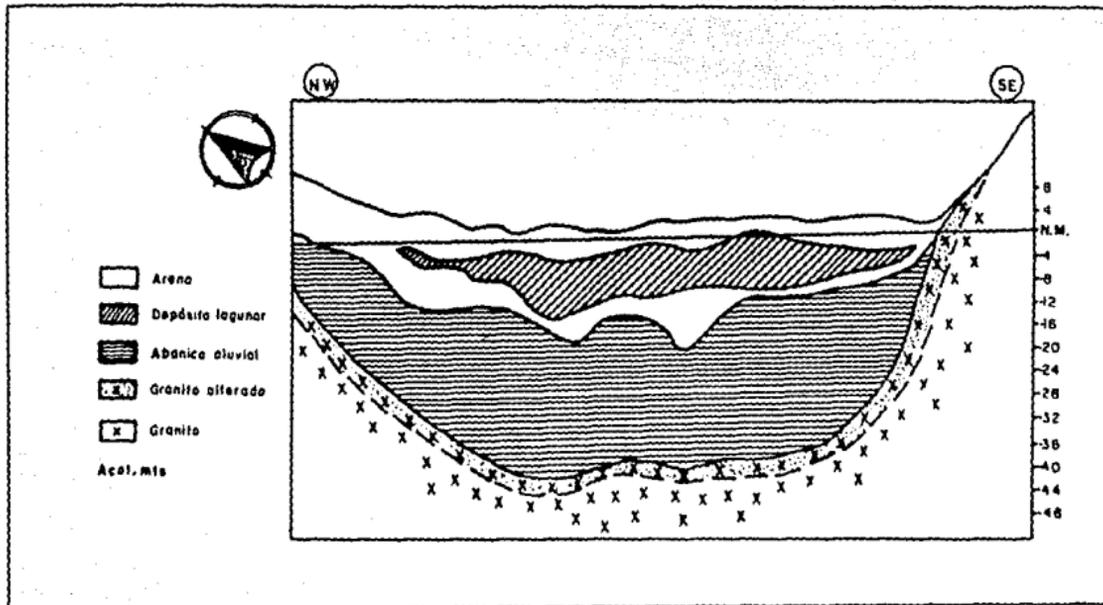


Figura 2.3.6 Perfil estratigráfico cercano a la Estación ACAC (Ref. 13)

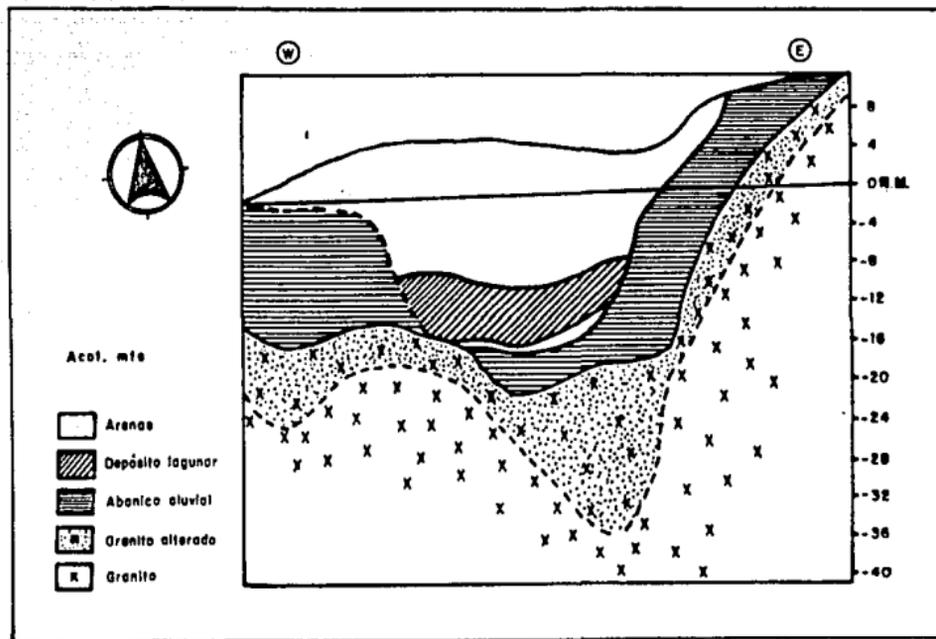


Figura 2.3.7 Perfil estratigráfico cercano a la Estación ACAD (Ref. 13)

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS SELECCIONADAS.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS SELECCIONADAS.

Se analizan los posibles efectos de interacción suelo-estructura (ISE), aplicando la técnica de microtemblores; mediante ésta será posible conocer si las bases y/o estructuras de las estaciones acelerográficas seleccionadas intervienen de manera importante en la amplificación o deamplificación de los movimientos generados por un sismo o si el contenido de frecuencias en una señal sísmica es o no alterado al registrarse en las estaciones acelerográficas. Además se hace una breve reseña de la técnica de los microtemblores y se explica con detalle el desarrollo del experimento efectuado.

3.1 Técnica de los microtemblores.

La técnica de microtemblores consiste en medir la vibración ambiental del lugar, la cual tiene dos fuentes de origen: natural y artificial. Las causas de origen natural pueden dividirse en internas y externas, las primeras son provocadas por el oleaje, temblores volcánicos, fracturamiento de rocas, geysers, etc. Las segundas por viento, presión atmosférica, tormentas eléctricas, lluvia, etc., dando lugar a microsismos, sin embargo, sus características son inestables, el periodo y amplitud dominante varían de acuerdo a las condiciones del tiempo [Ref. 14 y 15]. La vibración ambiental originada por causas de origen artificial, la provocan fuentes externas como tráfico vehicular, maquinaria de fábricas, perforación de pozos, explosiones subterráneas, etc., dando lugar a microtemblores (ondas S, ondas Rayleigh), el periodo dominante es estable y la amplitud varía durante el día de acuerdo a la actividad.

entre las aplicaciones que tiene está la estimación de períodos de suelos a partir de espectros de potencia. (Fig. 3.1.1).

A raíz de los daños causados en la Ciudad de México debido al sismo de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 Ms=8.1, se realizaron mediciones de microtemblores, y se observó que las frecuencias asociadas a los máximos en los espectros de velocidad de microtemblores ocurren, aproximadamente, para las mismas frecuencias en que éstos se presentan en los espectros de aceleración de movimientos fuertes; sin embargo, para tener validez la técnica de microtemblores debe cumplir dos requisitos: para los espectros de microtemblores la amplitud debe ser del mismo orden y la función de transferencia entre los registros de aceleración de dos sitios debe ser similar a la que se obtenga con los registros de microtemblores de los dos mismos sitios. [Ref. 15 y 16]

La técnica ha sido aplicada con buenos resultados para otros fines como son: la microzonificación de las Ciudades de Acapulco y México [Ref. 2 y 14], determinación de frecuencias naturales de vibrar en edificios y como medio en la obtención de parámetros en el estudio de las propiedades dinámicas de un sitio específico [Ref. 16] .

En el estudio que se realizó se empleó la técnica de microtemblores como medio para evaluar los efectos de ISE y de acuerdo al equipo disponible, se decidió utilizar como fuente de excitación dinámica la vibración ambiental, en trabajos similares, efectuados con anterioridad, los resultados han sido satisfactorios. [Ref. 5 y 17]

Aunque no constituye la única alternativa, ya que se podría recurrir a otras fuentes como: explosivos, cañones de sondeo, o bien, realizar un análisis teórico modelando el problema.

3.2 Equipo utilizado.

En acelerogramas, las máximas amplitudes se asocian a periodos comprendidos en la banda de 0.1 a 5.0 segundos [Ref. 18, 19 y 20], por lo cual se decidió usar sismómetros con periodo natural de 5.0 segundos.

Se utilizaron dos sistemas de adquisición de datos, cada sistema consta de un registrador digital y tres sensores (dos sismómetros horizontales y uno vertical), la grabación de los movimientos (velocidades) se hizo en un cassette (cinta magnética) en forma digital, el registrador captura cien muestras por segundo en cada componente las cuales se graban multiplexadas, la capacidad de grabación del cassette es de aproximadamente 15 minutos en tiempo real.

La calibración de cada sistema de adquisición de datos se efectúa excitando al sistema mediante una señal de ruido binario pseudoaleatorio [Ref. 16], el resultado de la calibración es la curva de magnificación del sistema (Fig. 3.2.1). En ella se observa que la respuesta del sistema es plana en la banda de 0.3 Hz a 20.0 Hz.

En la tabla 3.2.1 se muestran las principales características de los sistemas de adquisición.

3.3 Diseño del experimento.

En cada estación seleccionada se situaron varios puntos en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste en los alrededores de la base. A continuación se procede a la instalación de dos equipos registradores uno de ellos siempre fijo en la base de la estación (Denominado Fijo) y el otro estuvo siendo instalado en cada punto fuera de la base que fué fijado con anticipación (Denominado Móvil). Esto nos permitió poder comparar las señales registradas en la base del acelerógrafo con las registradas en campo libre, para así conocer y evaluar los efectos de ISE que existen entre la base y el suelo, de cada una de las estaciones.

En la estación CUIP se seleccionaron dos sitios en la dirección E-O a 2.00 y 7.00 m de la base de la estación (puntos 001 y 002 respectivamente), en la dirección N-S a 8.00 m el punto 003 y uno más en la azotea de la estación (Punto 004) (Fig. 3.3.1).

Para la estación FICA se designaron tres puntos, uno en la dirección N-S (Punto 002) y dos en la E-O, de éstos últimos uno es la base de la estación FJBS (Punto 003) (Fig. 3.3.2).

La configuración en la estación FJBS la integraron dos sitios en la dirección E-O, la base de la estación FICA (Punto 001) y Punto 002 a 6.50 y 13.50 m respectivamente; a 33.50 m de la base en la dirección N-S el Punto 003 (Fig. 3.3.3).

Por estar ubicada dentro del jardín del Centro Cultural Guerrerense, en la estación ACAC sólo fué posible seleccionar los puntos 001 y 002 ambos en la dirección E-O a 3.50 y 5.50 m (Fig. 3.3.4). En ACAD se eligieron tres, uno en la dirección N-S a 2.00 m de la base (Punto 001) y dos en la dirección E-O a 2.00 y 4.00 m puntos 002 y 003 (Fig. 3.3.5).

3.4 Descripción del experimento.

Los equipos se sincronizaron en tiempo y el juego de sensores fué orientado y nivelado, tanto el situado en la base como el del punto seleccionado en los alrededores de la estación. Un sismómetro horizontal registró el movimiento en dirección Norte-Sur y el otro en la Este-Oeste, el vertical lo hizo en esta dirección, es recomendable que entre ellos exista una distancia no menor de sesenta centímetros para que trabajen sin problemas de interferencia provocados por su cercanía.

Las ganancias en los aparatos fueron seleccionadas en función a la actividad de la zona, ya que de esto depende una grabación señal-ruido aceptable sin saturar los registros. Se instaló un cassette (cinta magnética) en el registrador, la energía de alimentación fué suministrada al equipo por baterías.

Cuando los equipos están preparados comienza una etapa en el desarrollo del experimento muy importante, pues se deben efectuar registros simultáneos de por lo menos un minuto de duración, tiempo durante el cual se debe evitar el paso de peatones o ruidos intensos

cercanos a ambos equipos registradores, si los eventos no son registrados al mismo tiempo o bien existen perturbaciones como el paso de un camión pesado, es necesario repetir la medición, de lo contrario se registraría esta señal y no la vibración del lugar. Anteriormente se han realizado estudios de estacionaridad en la Cd. de México [Ref. 16], que consisten en realizar mediciones de microtemblores cada dos horas durante 24 horas. Se observó que los espectros forman dos grupos de acuerdo a la hora del día en que se registran, los de mayor amplitud asociados al horario comprendido entre las 06 y 24 horas y el correspondiente a aquellos registros obtenidos entre las 02 y las 04 horas; de tal manera, las mediciones de vibración que se realizan durante el día tienen una mejor relación señal-ruido.

Adicionalmente, en una hoja de trabajo se anotaron la fecha, hora, número de serie de los sensores y registradores, así como la configuración utilizada en los registradores. Datos que nos serán de gran utilidad para el proceso posterior de los eventos.

Sensores.					
Sismómetro (Kinematics)	#Serie	To	ht	G	R
Verticales	123	5.15	0.61	2.98	31.00
	171	5.00	0.70	2.27	-----
	172	5.70	0.70	2.50	24.00
Horizontales N-S	244	5.00	0.69	1.93	16.60
	245	5.20	0.70	2.02	18.75
	246	4.20	0.65	1.95	-----
Horizontales E-O	240	4.5	0.65	1.83	12.98
	242	4.8	0.69	1.69	12.48
	243	4.5	0.68	1.64	15.34
Registrador					
	Canancias	Muestreo (Muestras/s)		VOLT. máx	
Spregnether DR-100	0, 6, 12, 18 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60	100		+15, -15	
Resolución de 0.0024 Volts / Cta.					

En donde:

To = periodo natural en s.

ht = factor de amortiguamiento

G = constante del motor en Volts s / cm.

R = resistencia de derivación en K Ω dentro del sismómetro.

Tabla 3.1.1 Características de los sistemas de adquisición de datos

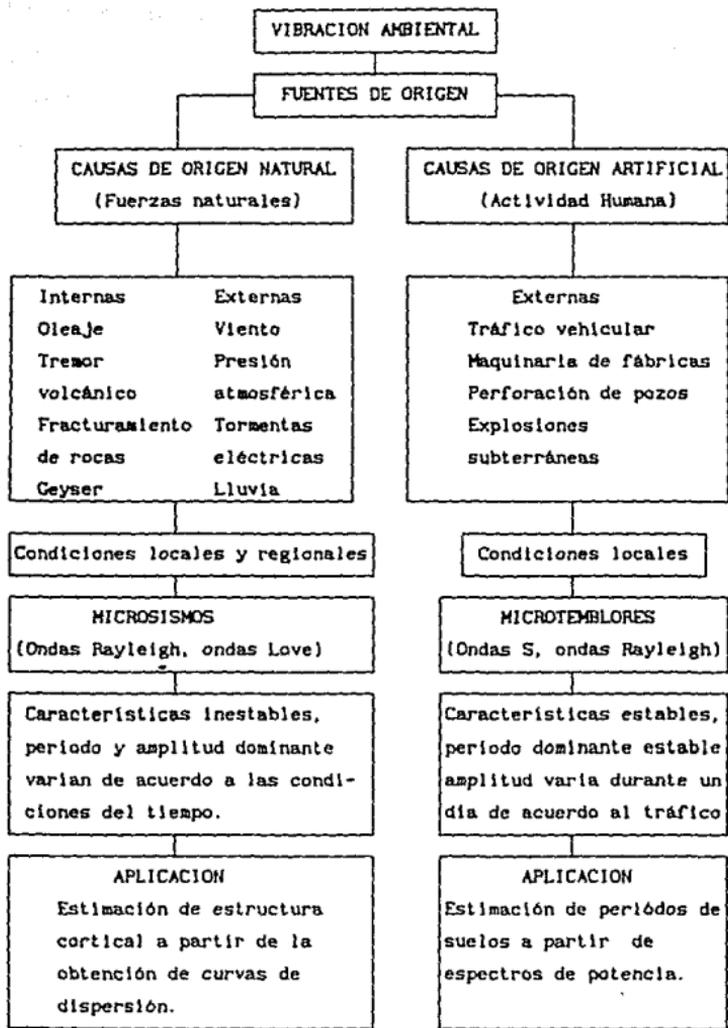


Figura 3.1.1 Clasificación de la Vibración ambiental [Ref. 15]

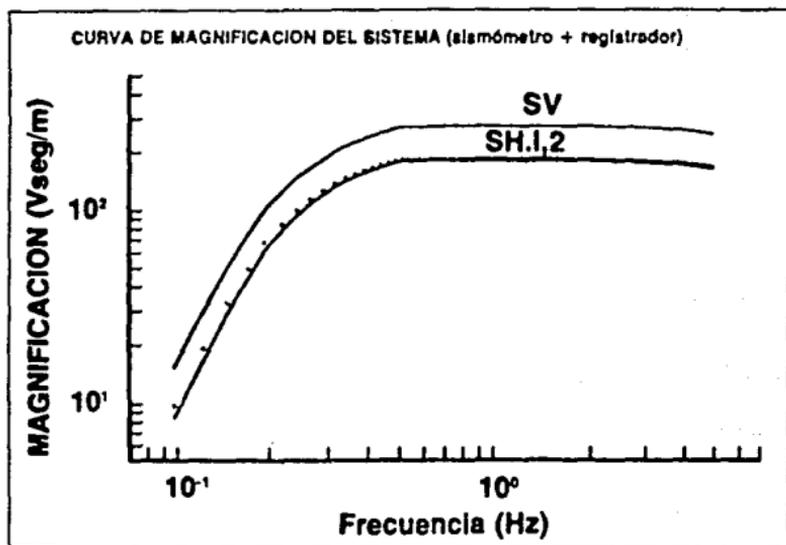


Figura 3.2.1 Curva de magnificación del sistema (Ref. 16)
 SV Componente del sismómetro vertical
 SH Componentes de los sismómetros horizontales

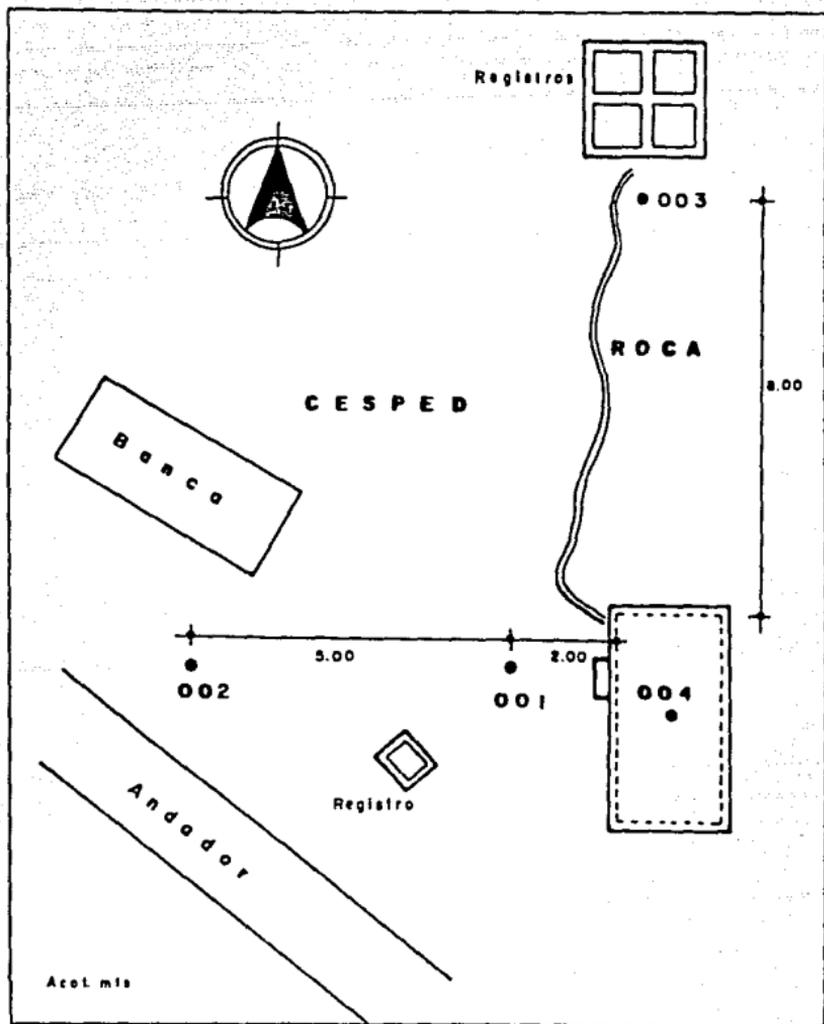


Figura 3.3.1 Estación CUIP. Puntos seleccionados para realizar las mediciones.

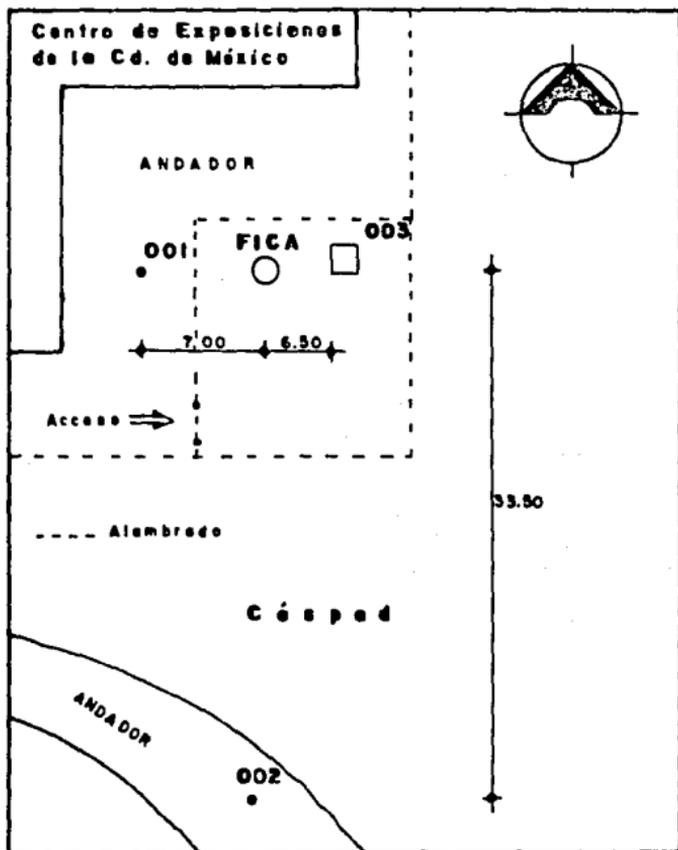


Figura 3.3.2 Estación FICA. Puntos seleccionados para realizar las mediciones.

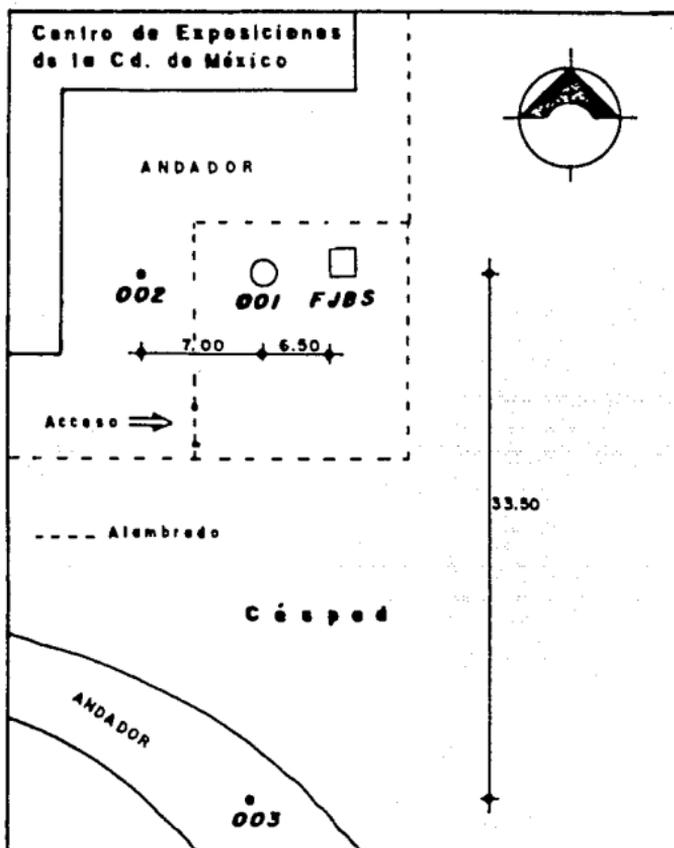


Figura 3.3.3 Estación FJBS. Puntos seleccionados para realizar las mediciones.

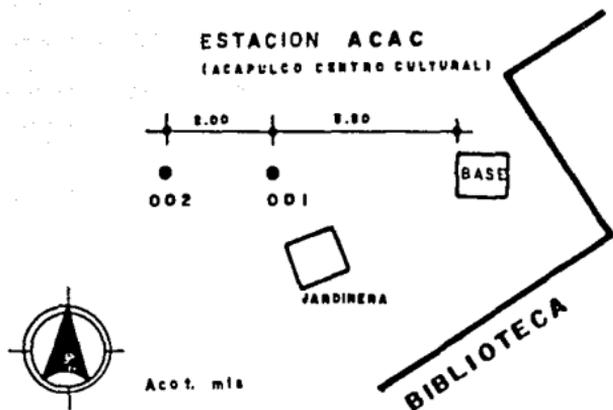


Figura 3.3.4 Estación ACAC. Puntos seleccionados para realizar las mediciones.

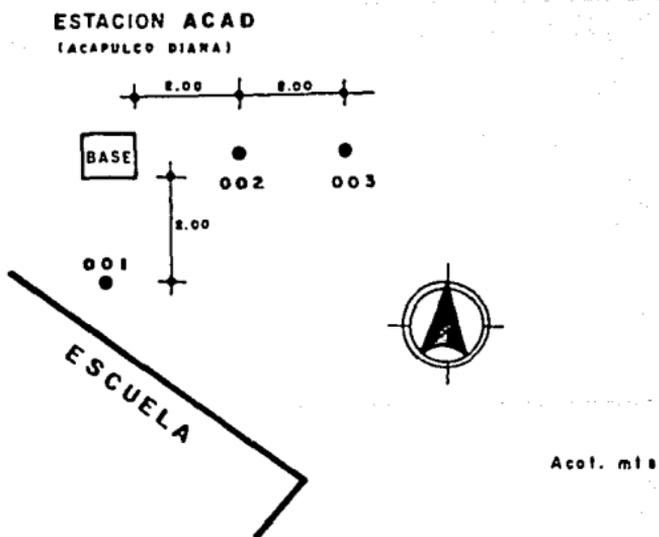


Figura 3.3.5 Estación ACAD. Puntos seleccionados para realizar las mediciones.

4. PROCESO Y ANALISIS DE LA INFORMACION.

4. PROCESO Y ANALISIS DE LA INFORMACION

En este capítulo hablaremos del proceso realizado a la información obtenida, el análisis hecho y la comparación de los resultados con los obtenidos en otros estudios similares. El proceso es el mismo para la información de todas las estaciones, aunque se analiza por separado en cada una de ellas.

4.1 Procesamiento de la información.

Para poder iniciar el proceso de la información, se cuenta con un paquete de programas auxiliares y el hardware necesario para acceder los datos. Primeramente se coloca la cinta magnética en una lectora de cassettes, la cual con ayuda de un programa transmite los eventos a una computadora, para después decodificarlos y demultiplexarlos, constituyendo un archivo en ASCII, que contiene los datos del evento por canal y el encabezado (Fecha, hora). La información se almacena en discos flexibles y se transmite al sistema PRIME en donde será procesada.

Con la información en Sistema PRIME se ejecuta un programa llamado PROC4, en el cual como primer paso se lee el archivo con datos ya corregidos y se selecciona el canal a procesar (Vertical, N-S, E-O), continuando con el desplegado en pantalla del canal seleccionado, se elige una ventana del registro de por lo menos 30 segundos que no presente variaciones fuertes en los valores de velocidad (caídas de voltaje en el registrador, picos, etc.), se calcula el espectro de Fourier de velocidad, al cual se le aplica un suavizado a $1/3$ de octava de ancho de banda y se

efectúa un corte a 20 Hz para minimizar el efecto instrumental. El espectro calculado puede desplegarse en pantalla y ser guardado en un archivo creado por el programa, además se almacena el archivo corregido en tiempo.

Habiendo almacenado los espectros de Fourier y los datos en tiempo corregido de todos los eventos y por canal, el segundo paso es obtener la Función de Transferencia (FT), a partir del cociente que resulta de dividir los espectros de Fourier suavizados del punto fijo entre los del punto móvil. El cociente se efectúa por componente. Esta parte del proceso de la información es muy importante, ya que los resultados que se obtengan serán utilizados para determinar si existen efectos de interacción suelo-estructura en cada estación.

En las figuras 4.1.1 a 4.1.30 se muestran las señales tiempo-velocidad de cada estación que han sido consideradas en el proceso, las cuales fueron obtenidas en tiempo corregido. El ancho de la ventana para efectuar el cálculo del espectro de Fourier es de 30 segundos para todos los casos; el canal 1 equivale a la componente vertical del registro, el canal 2 a la componente N-S y el canal 3 a la componente E-O; la velocidad está en micras sobre segundo (MIC/SEG).

4.2 Análisis de los resultados.

Los resultados que se han obtenido a partir del proceso de la información, se estudian con detalle en este apartado. Para esto es menester recordar la forma en que se ha diseñado el experimento (3.3), se cuenta con puntos situados en la vecindad de cada estación seleccionada y en la base de éstas. De aquí que cada punto tanto fijo (base) como móvil (vecindad) cuente con tres componentes, una en la dirección N-S, otra en dirección E-O y una vertical, además los puntos estarán alineados en dos diferentes direcciones con respecto a la base, N-S y E-O.

En las figuras 4.1.1 a 4.1.30 se observa la similitud que existe entre los registros de las estaciones CUIP, ACAC y ACAD, sin embargo, difieren con respecto a los de FICA y FJBS. Esto se debe a que se tomaron en suelos duros y blandos respectivamente, en los primeros predomina el contenido de frecuencias altas y frecuencias bajas en los segundos.

Para facilitar el análisis de los resultados en cada estación, se ha conformado un arreglo de las gráficas, de tal manera, para cada punto en particular y para cada estación, los espectros de Fourier del punto fijo se encuentran en el ángulo superior izquierdo, a su derecha los espectros de Fourier del punto móvil en que se ha efectuado la medición simultáneamente, al centro se localiza la FT resultante (Figs. 4.2.1 a 4.2.15.).

En el análisis se considera el intervalo de 0,3 a 20 Hz., que corresponden a la respuesta plana de la curva de magnificación del sistema (Fig. 3.2.1.).

Los resultados se discuten por separado para cada estación comprendida en el estudio.

Al efectuar el cociente y obtener la FT tomamos como referencia la base, entonces si los movimientos en la vecindad de ella fuesen los mismos, la FT resultaría una línea recta con razón espectral constante igual a 1. Claro está, que al existir efectos de Interacción Suelo-Estructura (ISE), los movimientos en la base de la estación sufrirán amplificaciones y/o deamplificaciones, con respecto a los de campo libre. Al mencionar que existe una amplificación en la función de transferencia, significará que los movimientos en la base son mayores que los de campo libre, asimismo una deamplificación implicará que el movimiento en campo libre es mayor al de la base.

ESTACION CUIP.

Los espectros de Fourier presentan un máximo a aproximadamente 2 Hz. Sin embargo a 10 Hz se encuentran los mayores valores de amplitud. La tendencia es similar en las tres componentes de todos los puntos.

Las FT muestran en general similitud en el intervalo de 1 a 10 Hz, en donde los valores son muy próximos a 1.0 de Razón Espectral (RE); para todos los casos en el rango de frecuencias comprendido entre 0.3 y

1 Hz, se observa un comportamiento irregular en las tres componentes, a partir de los 10 Hz las FT se atenúan. La componente E-O está deamplificada en todo el rango de frecuencias en los cuatro sitios de medición.

Las máximas amplificaciones son de 2.00 veces a 2 Hz en la componente vertical del punto 004 y de 1.8 veces en 0.9 Hz y 2 Hz para la componente N-S del punto 001, los valores máximos de atenuación (deamplificación) son de 0.3 en el punto 004 a 1.5 Hz y 0.1 para el punto 001 en 20 Hz, ambos en la componente E-O.

La componente N-S del punto 002 es deamplificada en todo el rango de frecuencias, para este caso el mayor valor es de 0.1 veces en las frecuencias de 0.5 y 20 Hz.

La frecuencia dominante del lugar es de aproximadamente 1 Hz [Ref. 14 y 15], para este valor la RE es muy cercana a 1.0; salvo en la componente N-S del punto 002 que está deamplificada 2 veces y la componente E-O, que en todos los casos presenta en promedio esta atenuación (Figs. 4.2.1. a 4.2.4).

ESTACION FICA.

En los tres sitios de medición los espectros de Fourier presentan un máximo aproximadamente a 0.5 Hz en las componentes horizontales, sin embargo, los mayores valores de amplitud se tienen a partir de 10 Hz en las tres componentes.

En general, los valores de las FT son de amplificación; se observa una tendencia similar en las componentes horizontales, en la componente vertical se registran los mayores valores de amplificación (Punto 001) y también las máximas atenuaciones (Punto 002).

Para el Punto 001 las máximas amplificaciones son de 3.0 veces en la frecuencia de 3 Hz para la componente vertical y de 2.2 veces en 1.3 Hz para las horizontales. Cabe señalar que la componente vertical está amplificada en todo el rango de frecuencias en estudio. En el Punto 002 la componente E-O presenta un máximo de 3.0 veces a 0.7 Hz, en la componente vertical ocurre la mayor atenuación en 10 Hz. y es de 0.1. En las componentes horizontales del Punto 003 (base de la estación FJBS) los valores de RE son mayores a 1.0 antes de 1.3 Hz y después de 5 Hz, mientras que la componente vertical está atenuada hasta 5 Hz y luego tiende a amplificarse.

En este lugar la frecuencia dominante es de aproximadamente 0.5 Hz (Ref. 14 y 15), para dicha frecuencia en todos los casos, las FT están amplificadas en promedio 1.8 veces, a excepción de la componente vertical del punto 003 que sufre una atenuación de 0.5 (Figs. 4.2.5 a 4.2.7).

ESTACION FJBS

Las máximas amplitudes en los espectros de Fourier se localizan a partir de los 7 Hz, existe un pico en las componentes horizontales entre 0.5 Hz y 0.7 Hz, la tendencia es similar en las tres componentes de todos los sitios.

En el caso de las FT, se observan en general valores de amplificación en las tres componentes, alcanzando los máximos valores en los puntos 002 y 003.

En las FT del punto 001 las componentes horizontales tienen un comportamiento muy parecido, mientras que la vertical está amplificada en el intervalo de 0.3 Hz a 5 Hz, a partir de 6 Hz las tres componentes se atenúan. En el punto 002 la componente vertical es amplificada en todo el rango de frecuencias, la máxima amplificación es de 5.00 veces y ocurre en 0.3 Hz, 0.9 Hz, y 4 Hz; a partir de 0.4 Hz las componentes horizontales se amplifican, siendo la máxima de 2.8 veces en 1.2 Hz para la N-S que se atenúa después de 6 Hz. La mayor amplificación corresponde a la componente E-O del punto 003, cuyo valor es de 6.0 veces y se localiza en 3 Hz.

Para la frecuencia de 0.5 Hz, que es la dominante del lugar [Ref. 14 y 15], la RE de las componentes verticales es mayor a 1.0, presentando el punto 002 una amplificación de 2.2 veces, mientras que en las componentes horizontales la RE es en promedio 0.7 en los puntos 001 y 002, para el punto 003 la componente N-S se amplifica 1.6 veces y la E-O se atenúa 0.6 (Fig§. 4.2.8 a 4.2.10).

ESTACION ACAC.

En todos los sitios el comportamiento de los espectros de Fourier es parecido, presentan las mayores amplitudes a partir de 1.5 Hz. Existe un máximo en las componentes horizontales aproximadamente a 2 Hz.

La tendencia de las FT es a deamplificarse, el mayor valor de atenuación es de 0.2 en 0.8 Hz y corresponde a la componente vertical en

el Punto 002, para los dos sitios de medición está deamplificada en todo el rango de frecuencias. En el Punto 001, la componente N-S presenta una amplificación de 1.8 veces en 1.2 Hz.

Las RE de la componentes horizontales son muy próximas a 1.0 en 2 Hz, mientras que la componente vertical está deamplificada 0.5 (Figs. 4.2.11 a 4.2.12). El valor de 2 Hz representa la frecuencia fundamental del lugar. [Ref. 2]

ESTACION ACAD.

Los espectros de Fourier alcanzan las mayores amplitudes a partir de los 7 Hz, en las componentes horizontales se observa un máximo en 4 Hz, esta tendencia es similar en todos los sitios.

Las FT presentan en general, valores de amplificación en las componentes horizontales y de deamplificación en la componente vertical.

Las componentes horizontales están amplificadas en todo el rango de frecuencias, los valores máximos son de 4.0 y 5.5 veces en los puntos 001 y 002 respectivamente, ambas en 0.4 Hz; la componente vertical está atenuada en todos los sitios a partir de 1.5 Hz, sin embargo, en el intervalo de 0.3 Hz a 1.5 Hz se amplifica, registrando en el Punto 001 los máximos valores.

En 3.5 Hz, considerada como la frecuencia fundamental del lugar [Ref. 2]; Las componentes horizontales están amplificadas 1.2 veces (punto 001), 2.0 veces (punto 002) y 2.2 veces (punto 003) y la vertical

deamplificada en promedio 0.55 en los puntos 001 y 002, en el punto 003 existe una amplificación de 1.2 veces (Figs. 4.2.13 a 4.2.15).

4.3 Comparación con otros resultados.

Se han realizado estudios con anterioridad, similares al presente trabajo, en ellos se han incluido estaciones acelerográficas ubicadas en el Distrito Federal en diferentes tipos de suelo, algunas son: Central de Abasto Oficina (CDAO), Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Tláhuac Bombas (TLHB), Tláhuac Deportivo (TLHD) y Sismológico Nacional de Tacubaya (TACY). [Ref. 5 y 17]

Sabiendo que las estaciones CDAO, SCT, TLHB, TLHD, FICA, y FJBS están dentro de la Zona de Lago y en la Zona de Lomas se localizan CUIP y TACY; se hizo una comparación de los resultados obtenidos en este estudio con los de los trabajos mencionados anteriormente.

Estaciones ubicadas en zona de lago .- En las figuras 4.3.1 y 4.3.2 se muestra el promedio de las FT obtenido en cada estación. La tendencia general es a amplificarse a excepción de CDAO; los comportamientos que se observan en las FT promedio son diferentes, sin embargo, se aprecian intervalos de similitud, en FICA y FJBS prácticamente en todo el rango de frecuencias y en SCT, TLHB y TLHD en el rango de 1.3 Hz a 5 Hz; las mayores amplificaciones ocurren en TLHB y TLHD, siendo de 5 veces en 5 Hz para la primera y de 6 veces en 15 Hz para la segunda; en CDAO la FT está deamplificada de 0.8 Hz a 10 Hz, la atenuación máxima es de 0.4 de RE y se localiza en 10 Hz.

Estaciones ubicadas en zona de lomas .- Se ha obtenido para cada estación el promedio por componente de las FT (Figs. 4.3.3 y 4.3.4). No existe una tendencia general definida. En cada estación las componentes horizontales siguen un comportamiento muy parecido, para TACY se atenúan antes de 0.8 Hz y se mantienen muy próximas a 1.0 de RE en el restante rango de frecuencias, la deamplificación máxima es de 0.6 en 0.3 Hz; en CUIP se observa una tendencia a atenuarse, siendo 0.4 el valor máximo en 0.38 Hz. En cambio, las componentes verticales de ambas estaciones muestran un gran similitud, conservando valores de RE cercanos a 1.0, existen amplificaciones, para TACY en 0.8 Hz de 1.6 veces y para CUIP de 1.4 veces en 0.38 Hz y de 1.3 veces a partir de 9 Hz.

Finalmente en la figura 4.3.5 se muestra el promedio de las FT en las estaciones consideradas en este estudio, en donde es evidente el desigual comportamiento de las ubicadas en zona de lago (FICA y FJBS) con respecto a la de zona de lomas (CUIP).

La discordancia en el comportamiento de las estaciones ubicadas en la Zona de Lago, puede deberse a que esta zona la integra el área que era ocupada por los lagos de Texcoco y Xochimilco, al centro y sur de la Ciudad respectivamente; por su ubicación el suelo ha tenido un uso desigual, en el centro existe una alta densidad de estructuras lo que ha originado fuerte preconsolidación de los estratos, en cambio, en Tláhuac, no se presenta la situación anterior. En la Zona de Lomas la estratigrafía es totalmente distinta a los casos anteriores, lo que probablemente provoca tendencias no muy similares en las FT.

Es importante señalar que las bases de las estaciones difieren en su geometría y profundidad de desplante, además como se señaló se localizan en suelos con estratigrafías diferentes; factores que influyen de manera directa en su comportamiento.

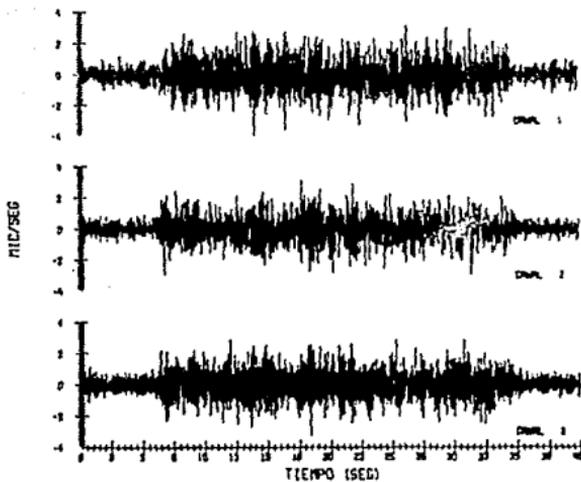


Figura 4.1.1 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Fijo 001

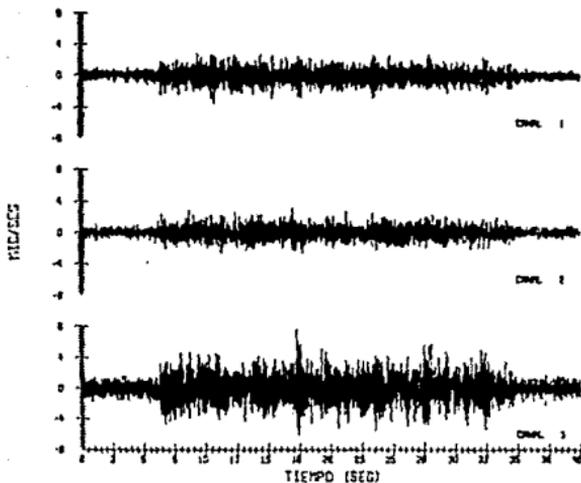


Figura 4.1.2 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto móvil 001

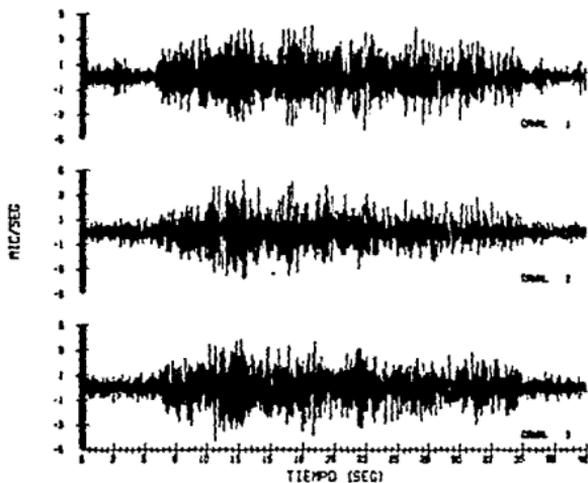


Figura 4.1.3 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Fijo 002.

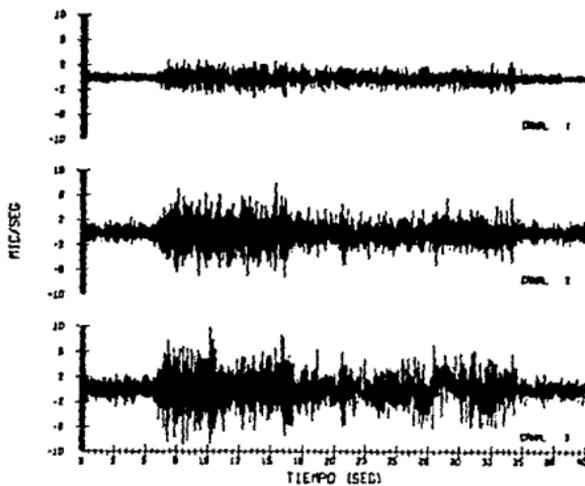


Figura 4.1.4 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Móvil 002.

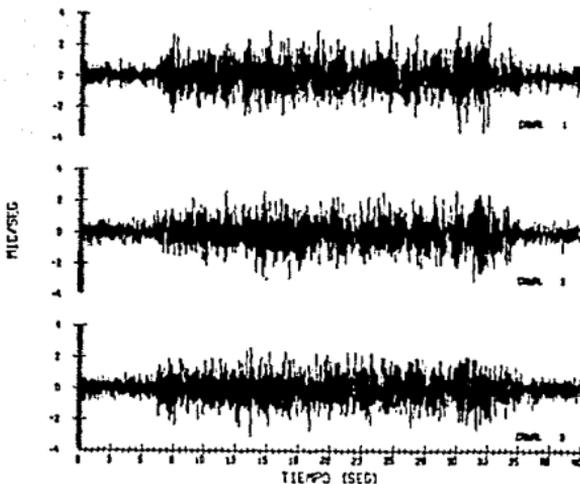


Figura 4.1.5 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Fijo 003.

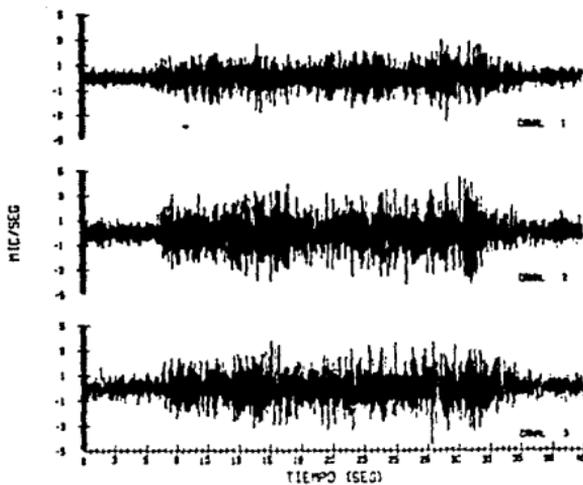


Figura 4.1.6 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Móvil 003.

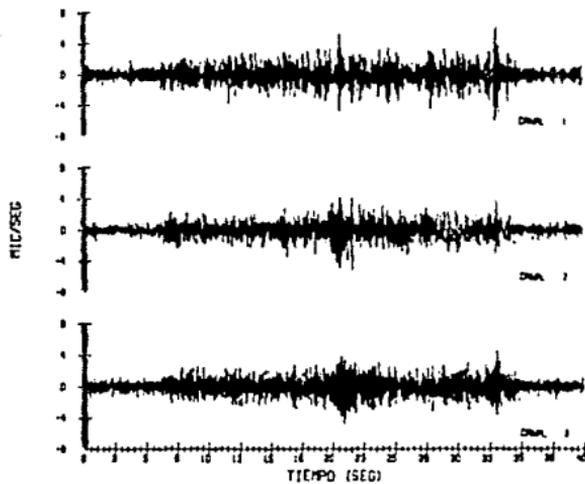


Figura 4.1.7 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Fijo 004.

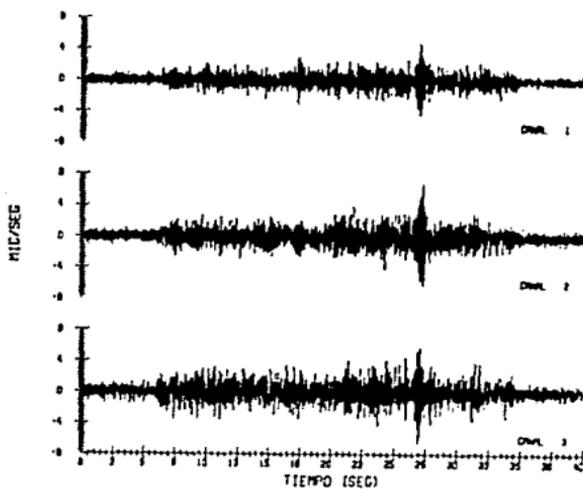


Figura 4.1.8 Registro Tiempo-Velocidad en CUIP.
Punto Móvil 004.

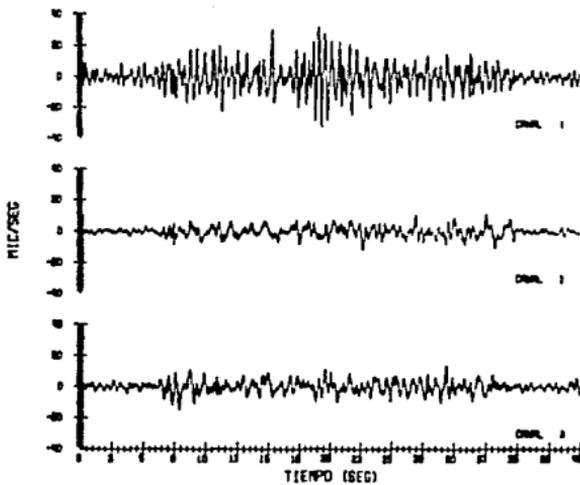


Figura 4.1.9 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Fijo 001.

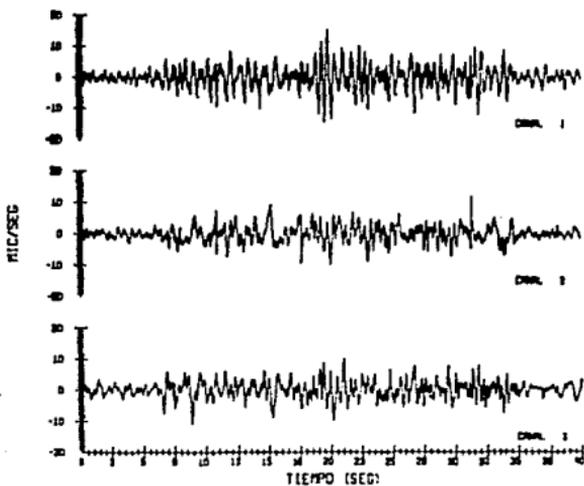


Figura 4.1.10 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Móvil 001.

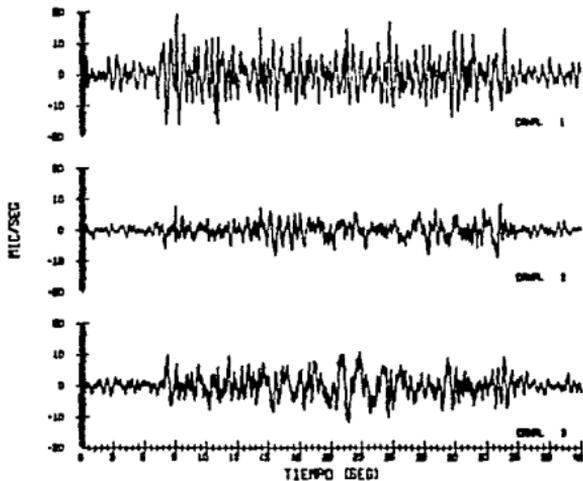


Figura 4.1.11 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Fijo 002.

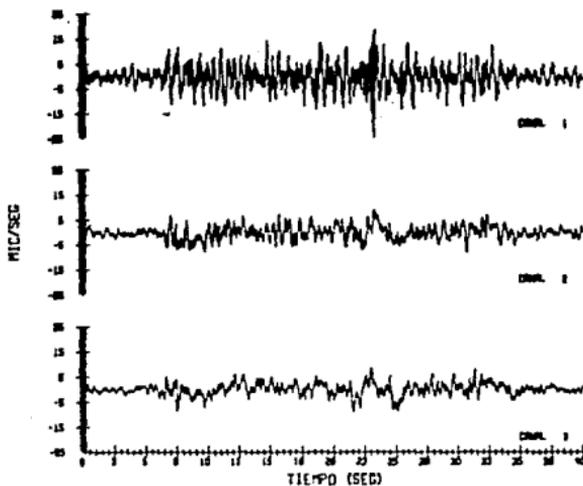


Figura 4.1.12 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Móvil 002.

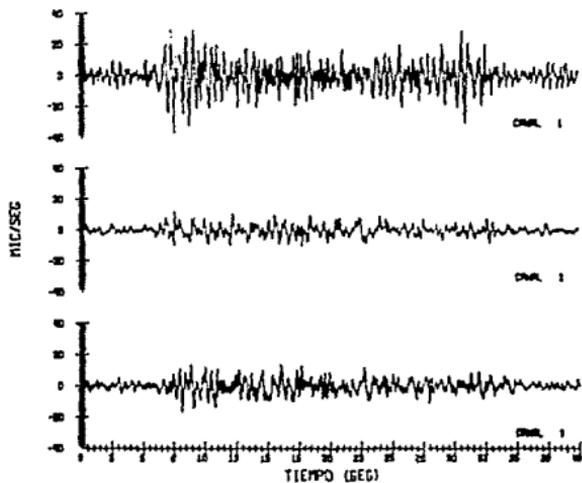


Figura 4.1.13 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Fijo 003.

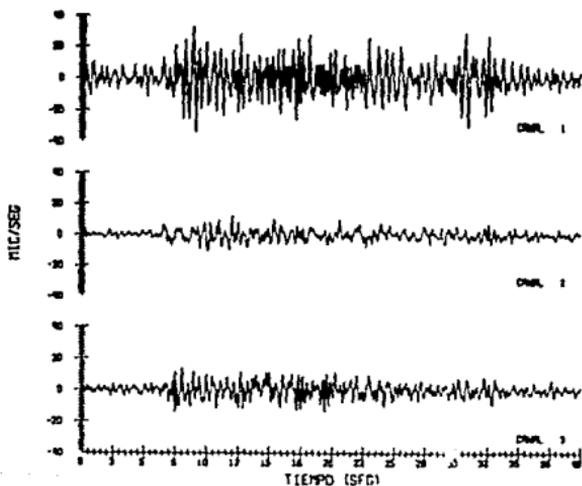


Figura 4.1.14 Registro Tiempo-Velocidad en FICA.
Punto Móvil 003.

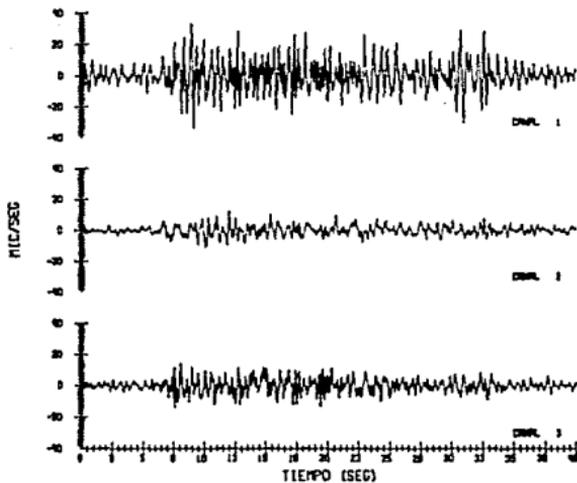


Figura 4.1.15 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Fijo 001.

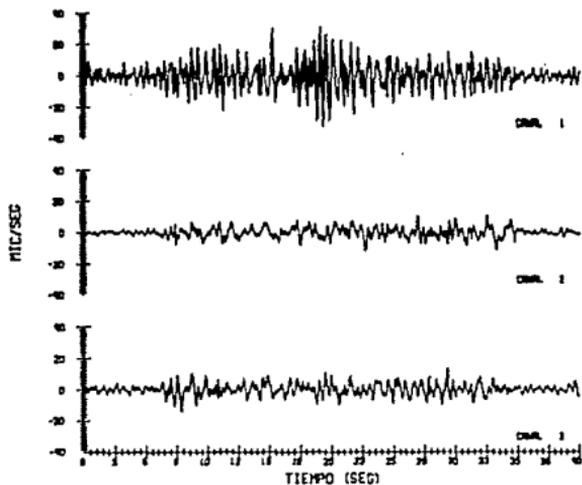


Figura 4.1.16 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Móvil 001.

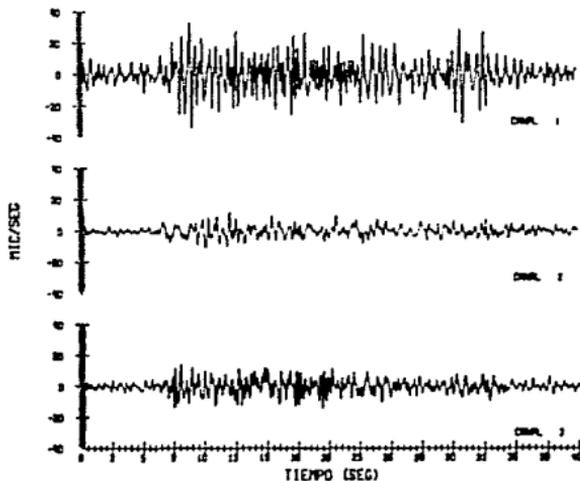


Figura 4.1.17 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Fijo 002.

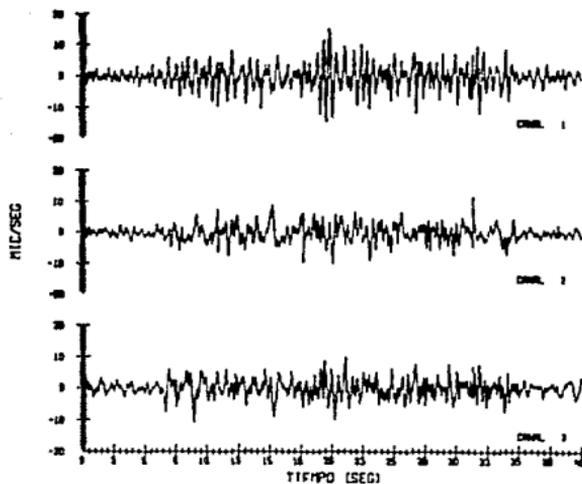


Figura 4.1.18 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Móvil 002.

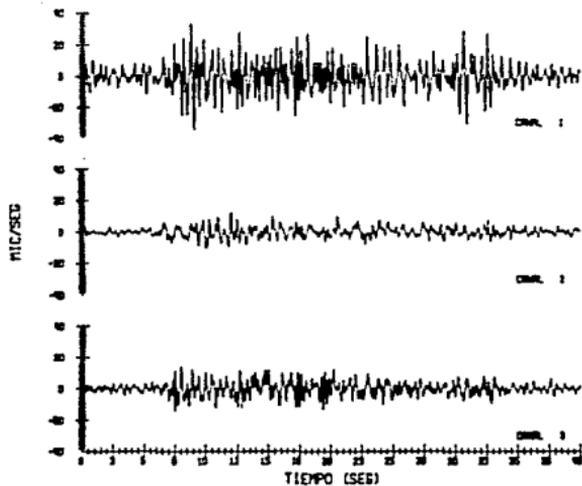


Figura 4.1.19 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Fijo 003.

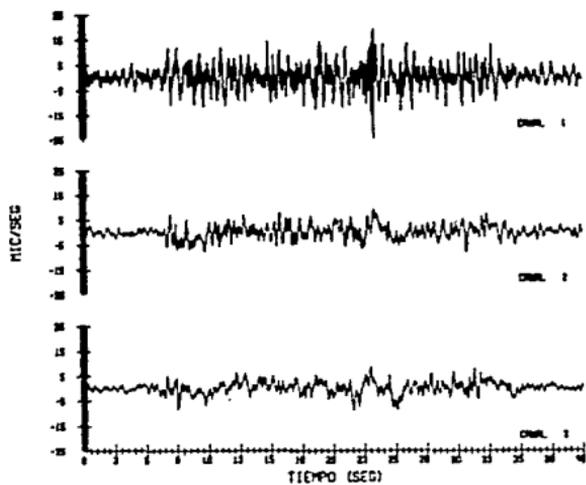


Figura 4.1.20 Registro Tiempo-Velocidad en FJBS.
Punto Móvil 003.

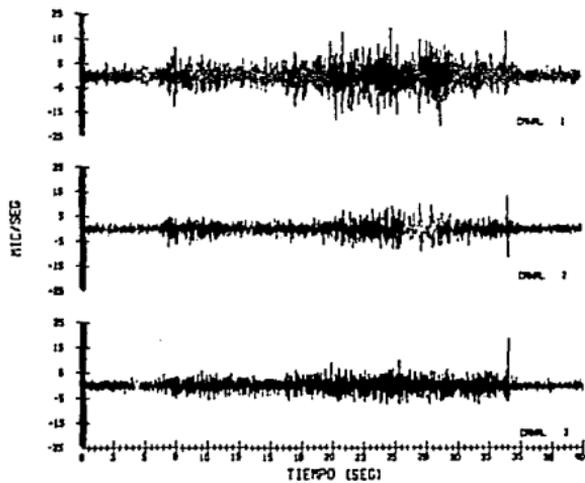


Figura 4.1.21 Registro Tiempo-Velocidad en ACAC.
Punto Fijo 001.

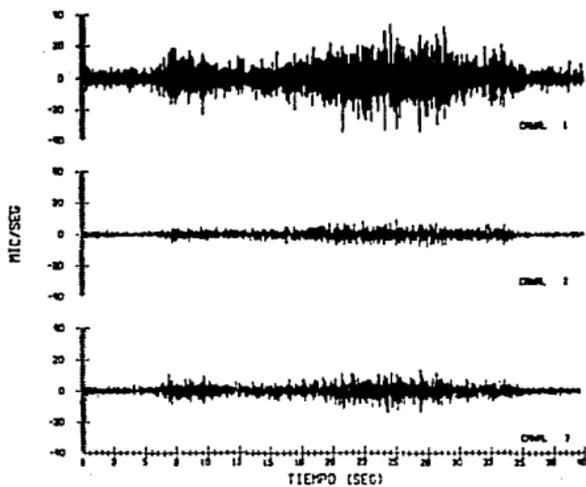


Figura 4.1.22 Registro Tiempo-Velocidad en ACAC.
Punto Móvil 001.

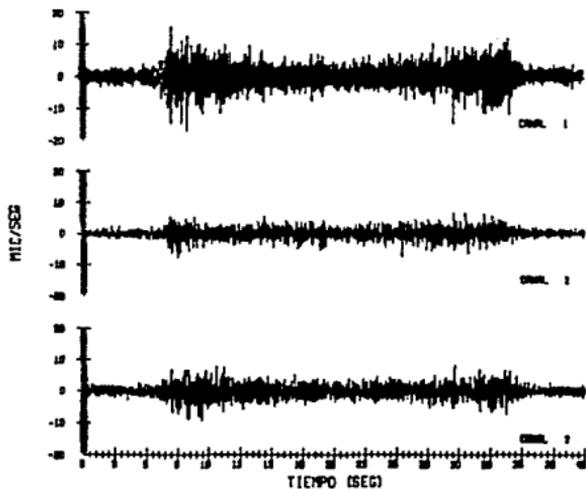


Figura 4.1.23 Registro Tiempo-Velocidad en ACAC.
Punto Fijo 002.

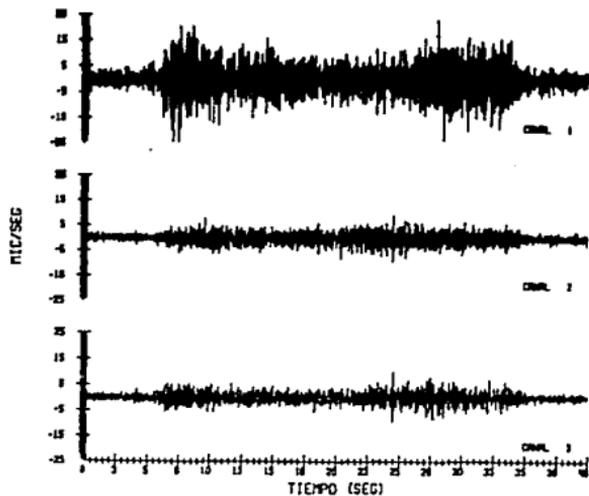


Figura 4.1.24 Registro Tiempo-Velocidad en ACAC.
Punto Móvil 002.

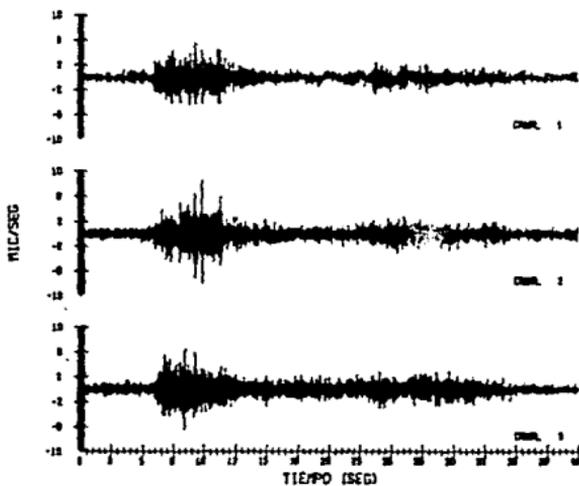


Figura 4.1.25 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Fijo 001.

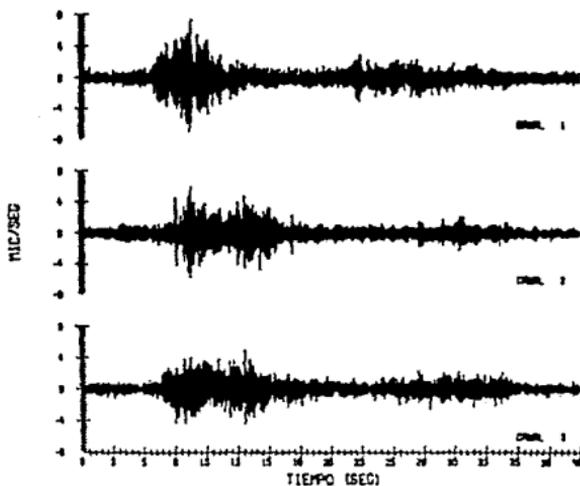


Figura 4.1.26 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Móvil 001.

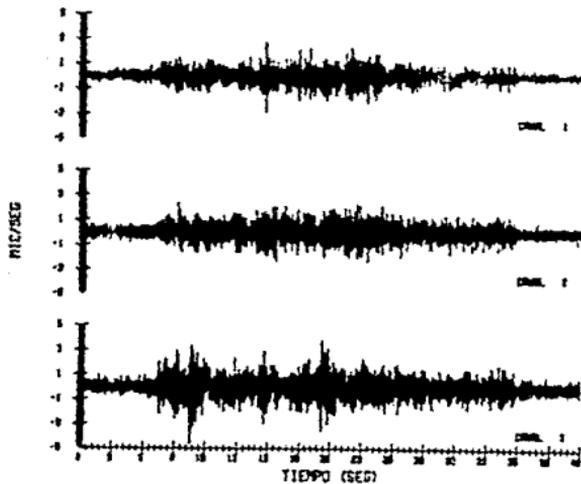


Figura 4.1.27 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Fijo 002.

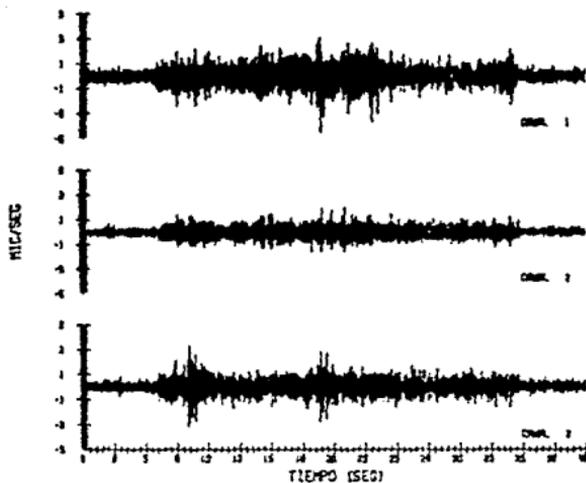


Figura 4.1.28 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Móvil 002.

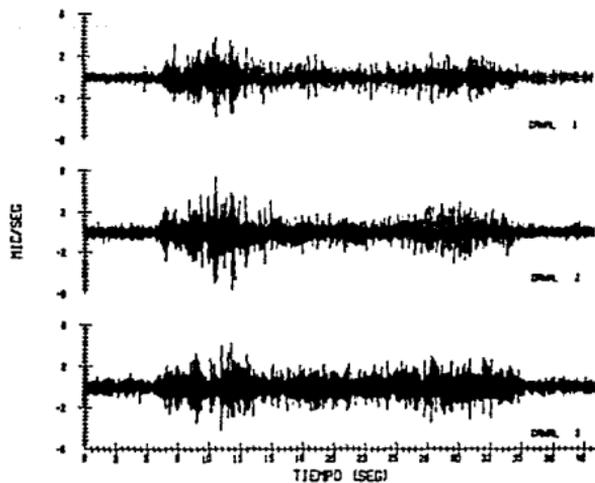


Figura 4.1.29 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Fijo 003.

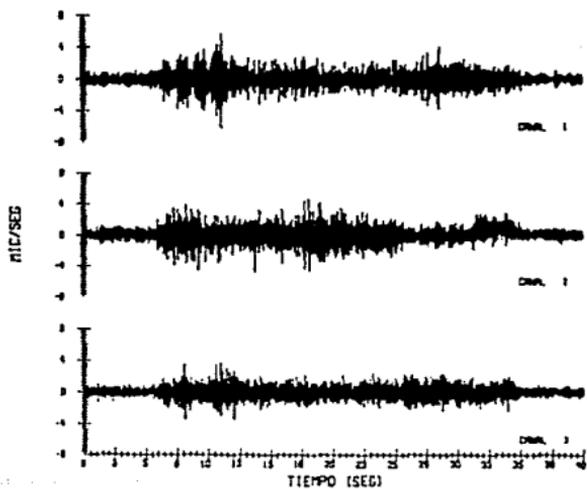
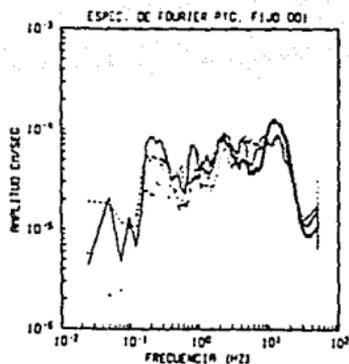
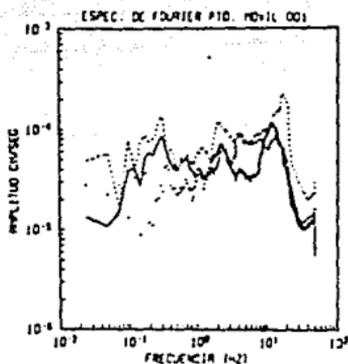


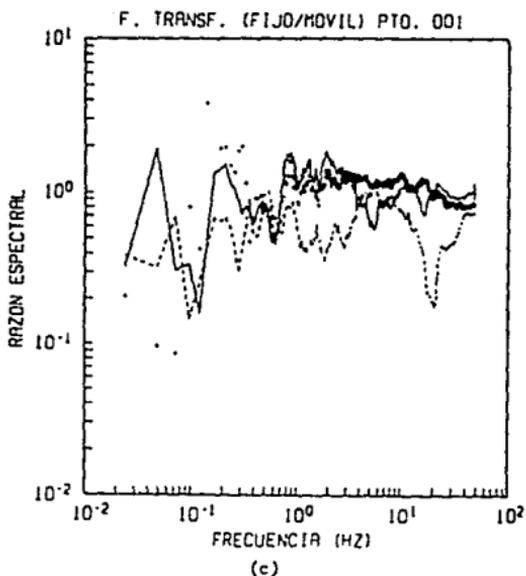
Figura 4.1.30 Registro Tiempo-Velocidad en ACAD.
Punto Móvil 003.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2.1 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en CUIP.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (--).

a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 001

c) Función de Transferencia para el Punto 001

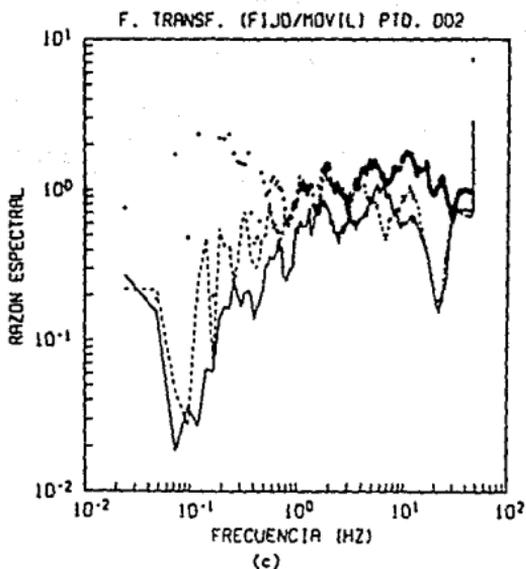
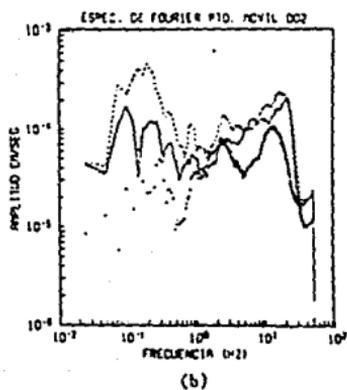
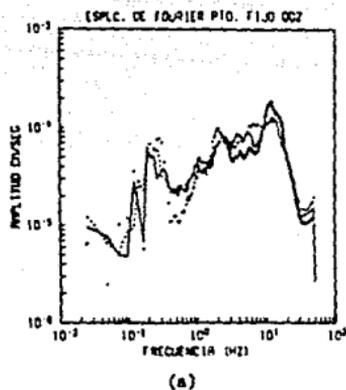


Figura 4.2.2 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en GUP.
 Componente Vert. (· · ·), Componente N-S (—),
 Componente E-O (---).
 a) Espectro de Fourier en la base
 b) Espectro de Fourier Punto 002
 c) Función de Transferencia para el Punto 002

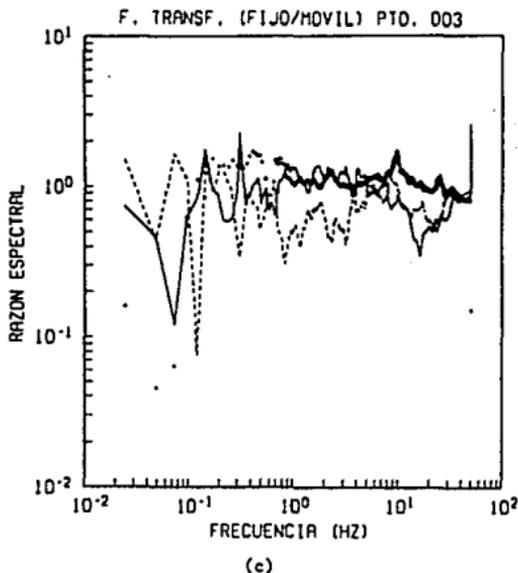
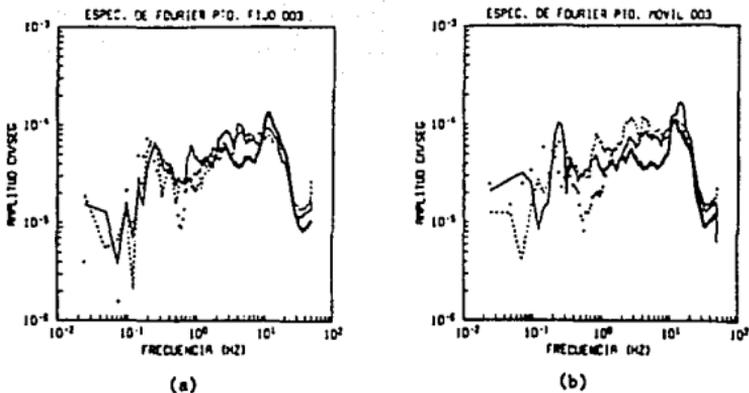


Figura 4.2.3 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en CUIP.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 003

c) Función de Transferencia para el Punto 003

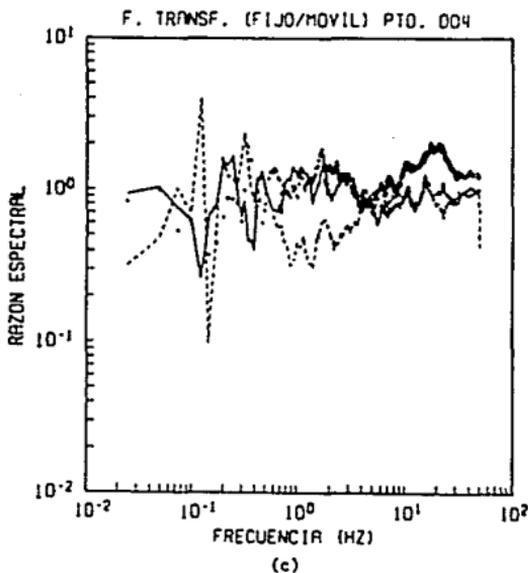
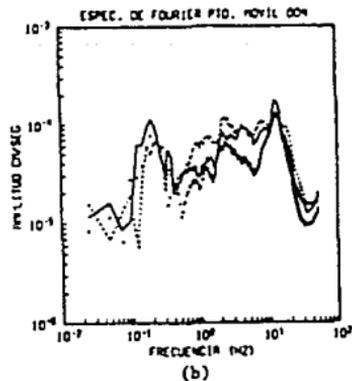
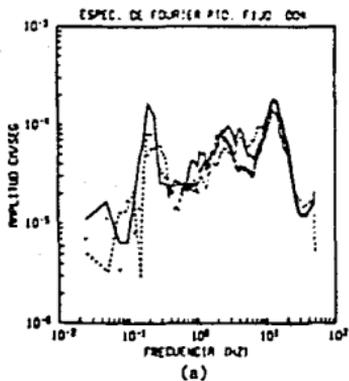


Figura 4.2.4 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en CUIP.
 Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
 Componente E-O (---).
 a) Espectro de Fourier en la base
 b) Espectro de Fourier Punto 004
 c) Función de Transferencia para el Punto 004

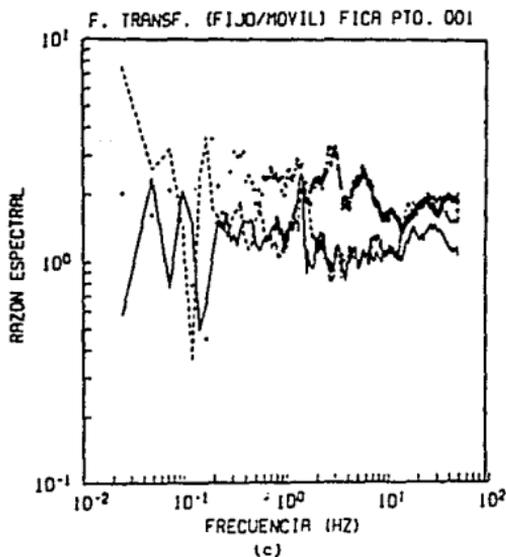
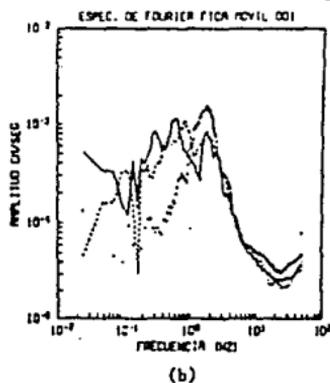
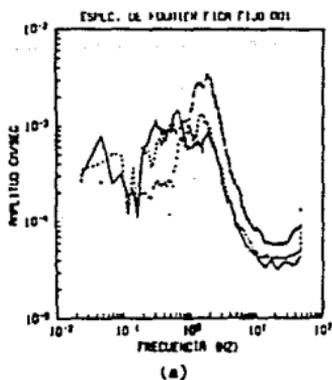


Figura 4.2.5 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en FICA.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 001

c) Función de Transferencia para el Punto 001

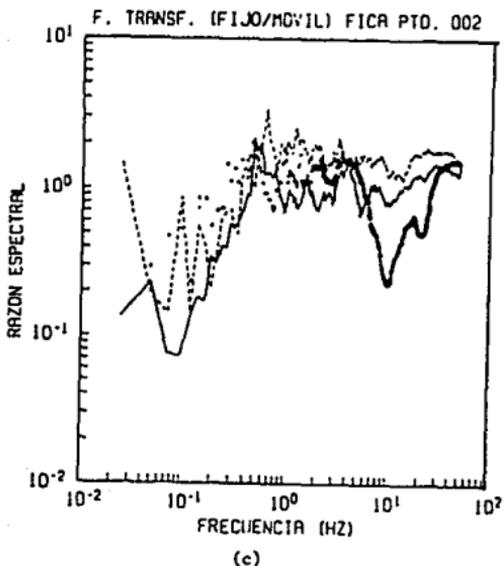
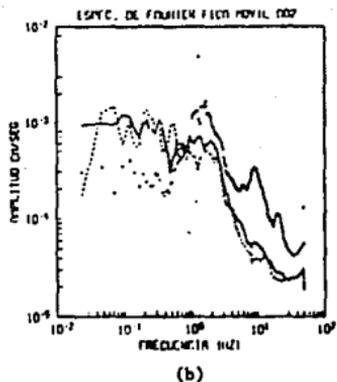
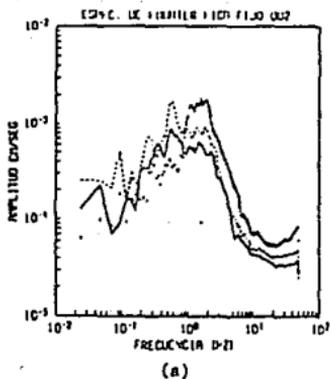
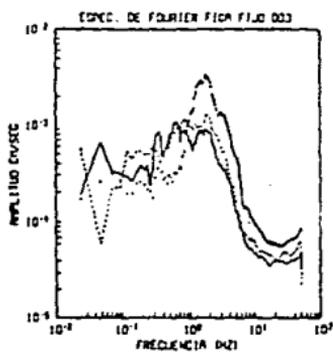
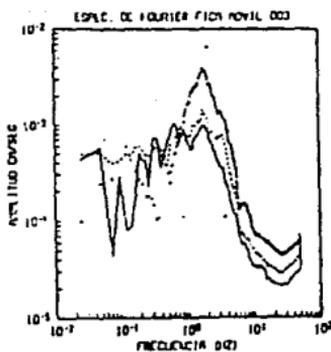


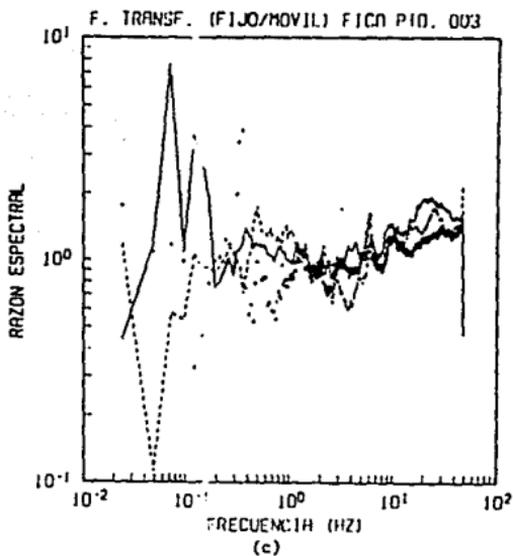
Figura 4.2.6 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en FICA.
 Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
 Componente E-O (---).
 a) Espectro de Fourier en la base
 b) Espectro de Fourier Punto 002
 c) Función de Transferencia para el Punto 002



(a)



(b)



(c)

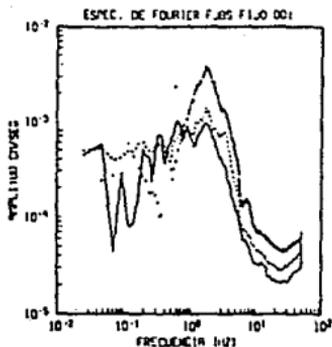
Figura 4.2.7 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en FICA.

Componente Vert. (· · ·), Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

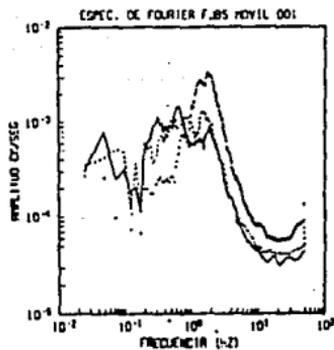
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 003

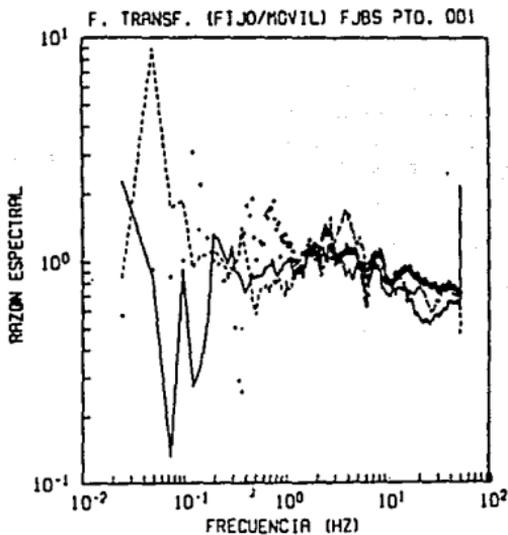
c) Función de Transferencia para el Punto 003



(a)



(b)



(c)

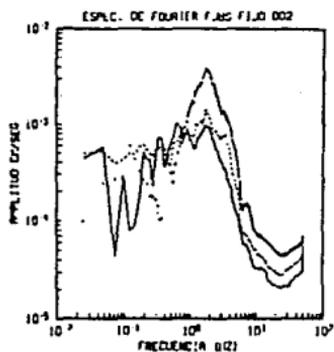
Figura 4.2.8 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en FJBS.

Componente Vert. (· · ·), Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

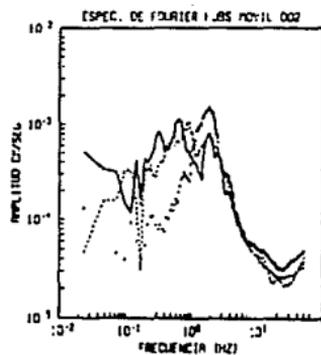
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 001

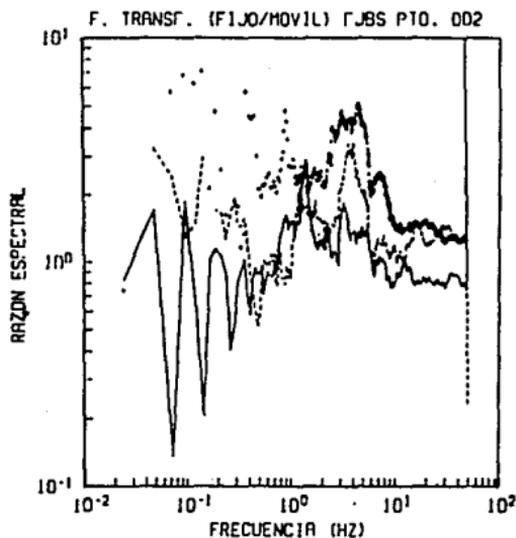
c) Función de Transferencia para el Punto 001



(a)



(b)



(c)

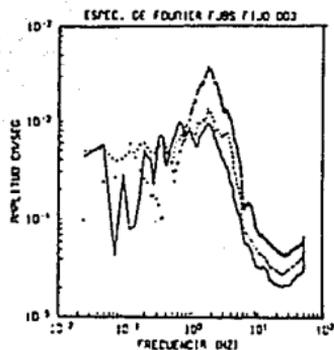
Figura 4.2.9 Espectros de Fourier y Función de Transferencia en FJBS.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—) ,
Componente E-O (---).

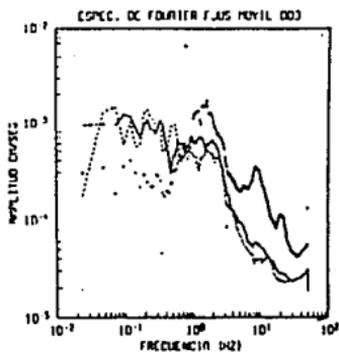
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 002

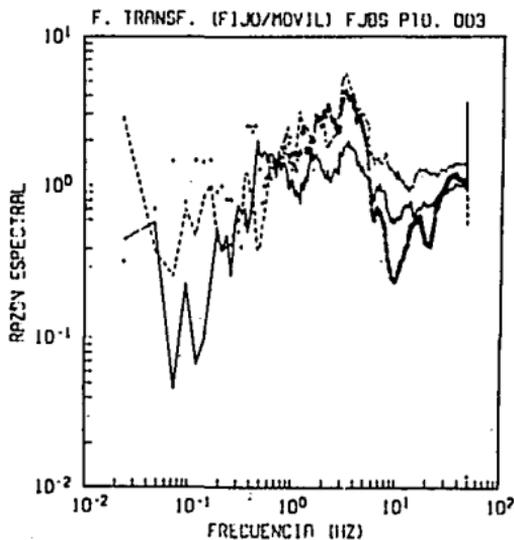
c) Función de Transferencia para el Punto 002



(a)



(b)



(c)

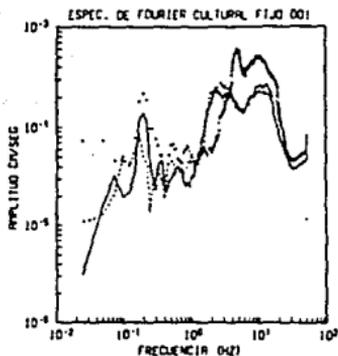
Figura 4.2.10 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en FJBS.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

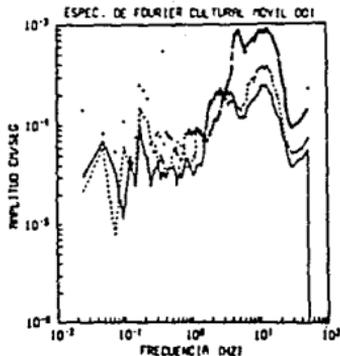
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 003

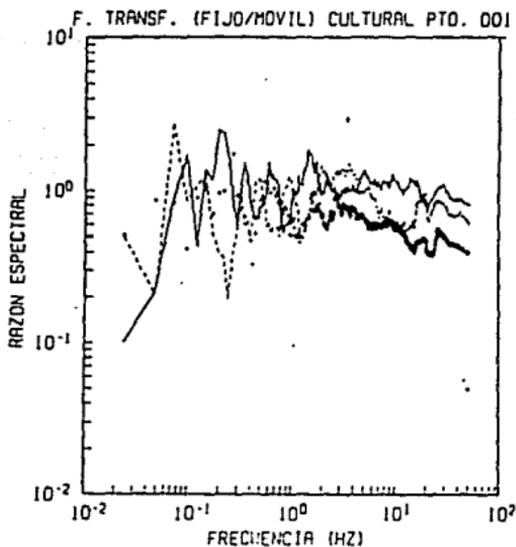
c) Función de Transferencia para el Punto 003



(a)



(b)



(c)

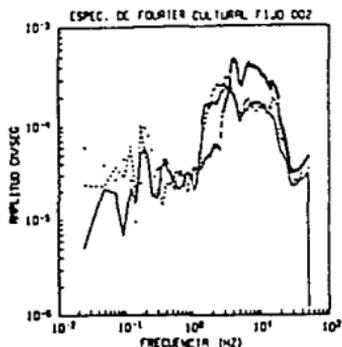
Figura 4.2.11 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en ACAC.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

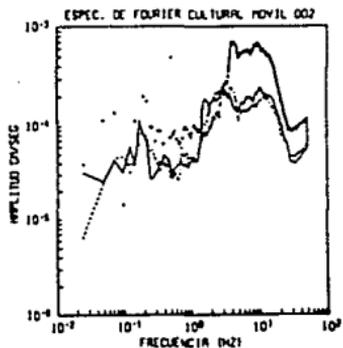
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 001

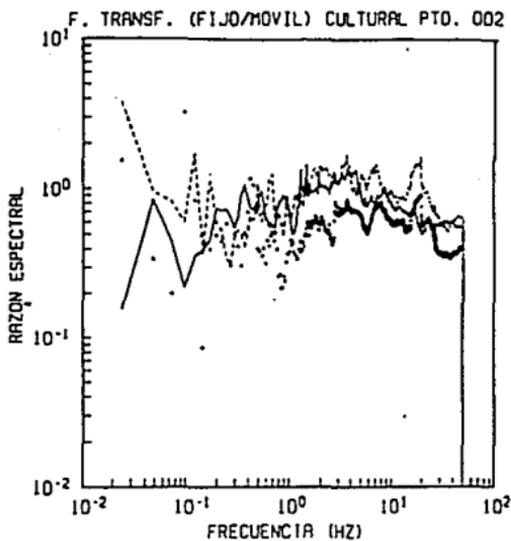
c) Función de Transferencia para el Punto 001



(a)

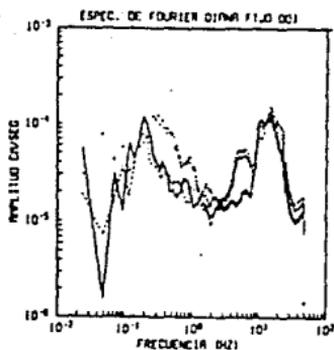


(b)

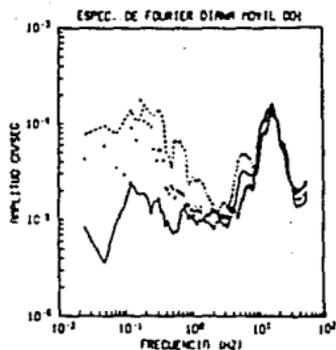


(c)

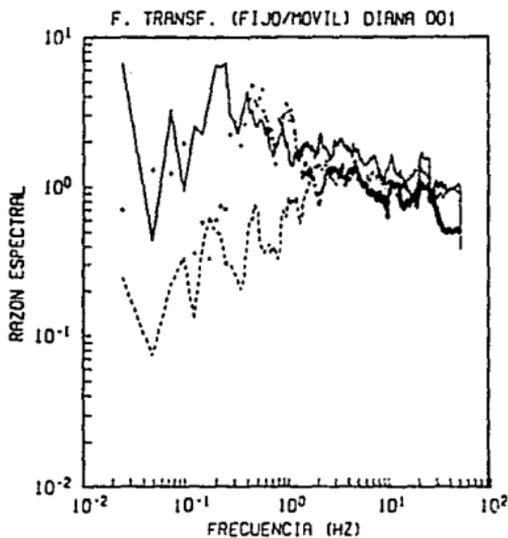
Figura 4.2.12 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en ACAC.
 Componente Vert. (+), Componente N-S (—),
 Componente E-O (---).
 a) Espectro de Fourier en la base
 b) Espectro de Fourier Punto 002
 c) Función de Transferencia para el Punto 002



(a)



(b)



(c)

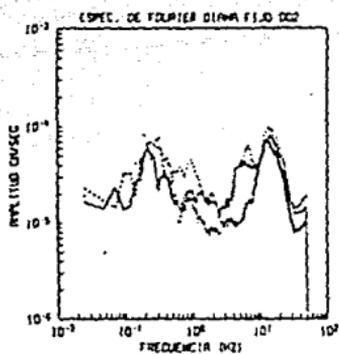
Figura 4.2.13 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en ACAD.

Componente Vert. (++) , Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

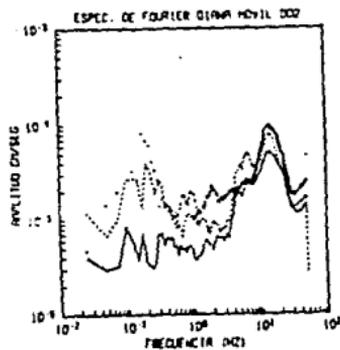
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 001

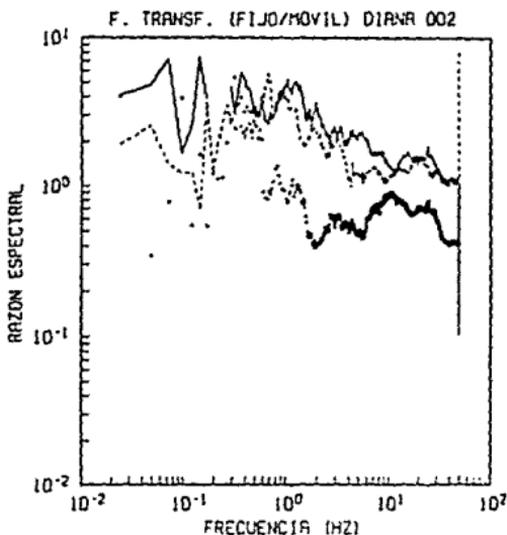
c) Función de Transferencia para el Punto 001



(a)



(b)



(c)

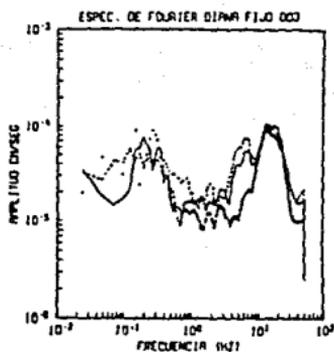
Figura 4.2.14 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en ACAD.

Componente Vert. (· · ·), Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

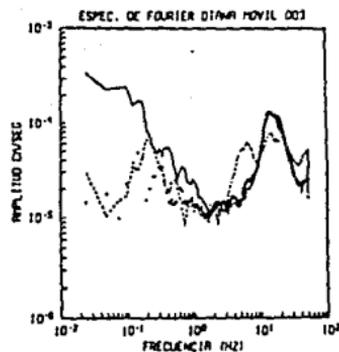
a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 002

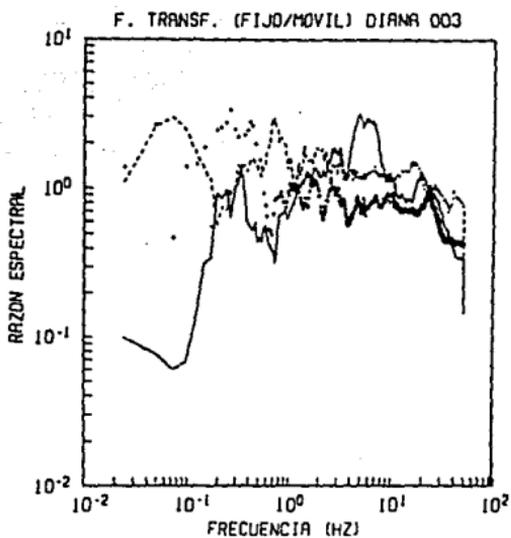
c) Función de Transferencia para el Punto 002



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2.15 Espectro de Fourier y Función de Transferencia en ACAD.

Componente Vert. (· · ·), Componente N-S (—),
Componente E-O (---).

a) Espectro de Fourier en la base

b) Espectro de Fourier Punto 003

c) Función de Transferencia para el Punto 003

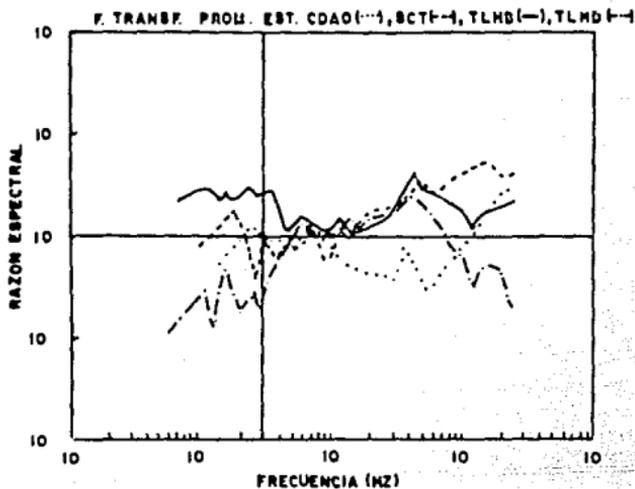


Figura 4.3.1 Promedio de las Funciones de Transferencia (Ref. 17)

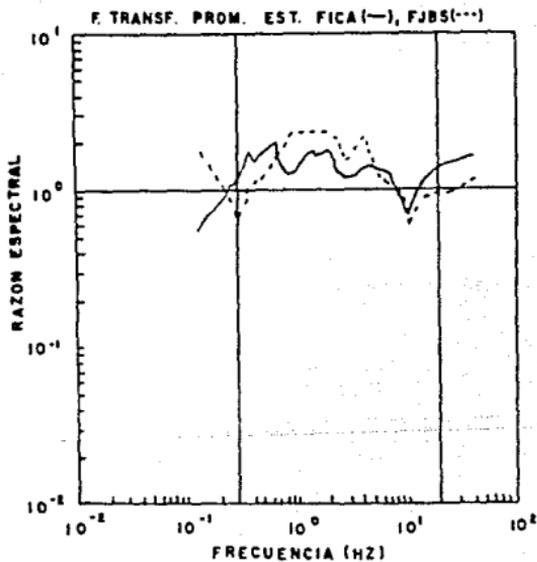


Figura 4.3.2 Promedio de las Funciones de Transferencia

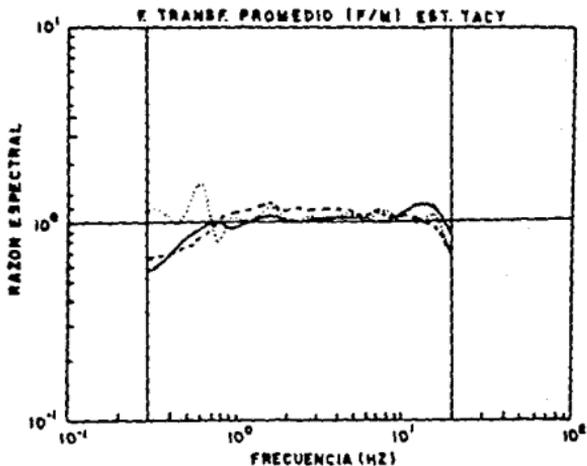


Figura 4.3.3 Promedio de las Funciones de Transferencia (Ref 5)
 Componente Vertical (...)
 Componente N-S (—)
 Componente E-O (---)

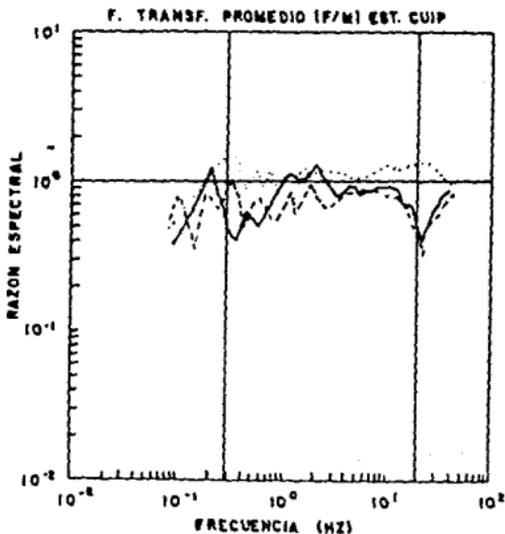


Figura 4.3.4 Promedio de las Funciones de Transferencia
 Componente Vertical (...)
 Componente N-S (—)
 Componente E-O (---)

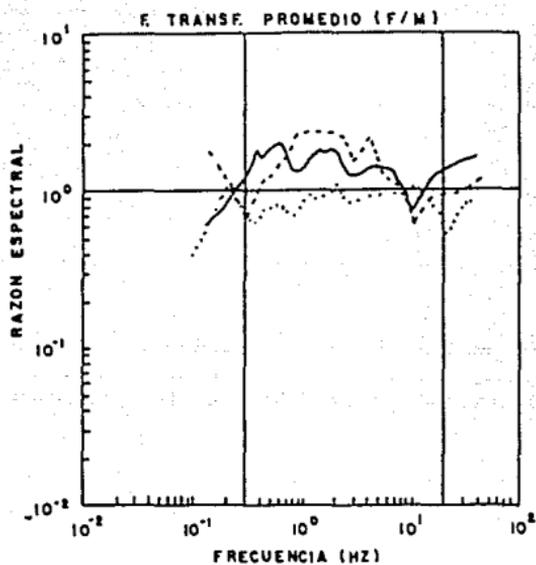


Figura 4.3.5 Promedio de las Funciones de Transferencia
 Estación CULP (···)
 Estación FICA (—)
 Estación FJBS (---)

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el estudio, las conclusiones más relevantes son:

Se aplicó la Técnica de Microtemblores en la evaluación de los efectos de Interacción Suelo-Estructura en las estaciones acelerográficas seleccionadas.

Se puede determinar la frecuencia fundamental del lugar con ayuda de los espectros de Fourier de velocidad, obtenidos a partir de los registros de microtemblores.

En todas las estaciones acelerográficas seleccionadas existen efectos de Interacción Suelo-Estructura, los cuales se traducen en amplificaciones y/o atenuaciones en toda la banda de frecuencias en estudio (0.3 Hz a 20 Hz).

Las estaciones FJBS y ACAD presentan las mayores amplificaciones, 6.0 veces en 3 Hz y 5.5 veces en 0.4 Hz respectivamente, en general, las atenuaciones máximas se registran en CUIP (0.1 en 0.5 Hz) y FICA (0.1 en 10 Hz).

Las propiedades mecánicas influyen directamente en el comportamiento del suelo en donde se apoyan las bases de las estaciones. Este efecto se refleja en ACAC y ACAD que teniendo bases similares y distintas propiedades mecánicas, las FT presentan un comportamiento diferente; contrariamente, en FICA y FJBS con bases de distinta geometría y propiedades iguales, las tendencias en las FT son parecidas.

En la comparación de resultados realizada en estaciones acelerográficas estudiadas con anterioridad y localizadas en el Distrito Federal se encontraron comportamientos desiguales, tanto en zona de lago como en lomas, provocada por ubicarse en suelos con distintas propiedades mecánicas y por la diferencia que existe en la geometría y profundidad de desplante en sus bases.

Se recomienda realizar estudios enfocados a la adecuada elección del tipo de base y/o estructura acorde al tipo de suelo en donde será desplantada para minimizar los efectos de ISE, considerando la geometría mínima (forma, profundidad de desplante, etc.). El trabajo experimental deberá apoyarse con un análisis teórico que modele el problema.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Bolt, B. A. (1981), "Earthquakes", W. L.L. Freeman and Company, USA.
2. Gutiérrez, C. y Lerma, J. (1989), "Registro de temblores pequeños y medición de microtemblores en Acapulco para microzonificación de la ciudad", Elaborado para el Gob. del Edo. de Guerrero. Informe interno del Instituto de Ingeniería UNAH, México.
3. Sauter, F. (1979) "Introducción a la Sismología", Editorial Tecnológica de Costa Rica.
4. Reséndiz, D. (1987), "Problemas geotécnicos de la Ingeniería Sísmica", Revista Ciencia, Vol. 38, Número 1. México.
5. Macías, M. A. (1989), "Estudio experimental sobre los efectos de Interacción Suelo-Estructura en algunas bases de los acelerógrafos instalados en el Distrito Federal", Tesis de Licenciatura, UNAH México.
6. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo (1987).
7. Reglamento de construcciones para los municipios del Edo. de Guerrero. Normas Técnicas complementarias para diseño por Sismo (1989).

8. Romo, M. (1987), "Espectros de diseño considerando la Interacción Suelo-Estructura", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México.
9. Zeevaert, L. (1988), "Sismo-Geodinámica de la superficie del suelo", Edit. E.I.I., S.A. de C.V. México.
10. Flamand, C. (1972), "Información sobre el subsuelo y la práctica de la Ingeniería de cimentaciones en la Cd. de Acapulco, Gro.", SMMS VI Reunión Nacional. México.
11. Técnica Geomécanica de la Construcción, Perfil geotécnico del hotel La Palapa.
12. Ovando, S. E. (1989), "Recopilación y análisis de datos geotécnicos de Acapulco", Gobierno del Estado de Gro. México.
13. Montiel, R. J. (1988) "Informe geológico en relación al riesgo sísmico de la región de Acapulco, Gro.", Centro de Investigación Sísmica, Fundación Barros Sierra. México.
14. Lermo, J. y Rodríguez M. (1987), "Microzonificación de México D.F. usando microtemblores", Primer informe técnico. Informe interno del Instituto de Ingeniería UNAM, México.
15. Lermo, S. J. (1990), "Microzonificación de México, D.F. usando microtemblores", Informe técnico final, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
16. Lermo, J., Rodríguez, M. y Singh, S.K. (1988), "Observación de microtemblores y su aplicación en la Ingeniería sísmica", Revista Geofísica, número 28, Enero-Junio 1988, México.

17. Alcántara, L. (1989), "Estudios sobre los efectos de Interacción Suelo-Estructura en las estaciones de registro de aceleraciones del D.F. que registraron los sismos de 1985", Tesis de Maestría (Mecánica de Suelos) UNAM, México.
18. Mena, E. et al. (1986), "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de Septiembre de 1985", Parte I, Serie Azul No. 497, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
19. Carmona, C. et al. (1987), "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de Septiembre de 1985 Parte II. Réplica del 21 de Septiembre en la Cd. de México", Serie Azul No. 503, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
20. Alcántara, L. et al. (1990), "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de Septiembre de 1985", Parte III Red Acelerográfica de Guerrero, Serie Azul No. 529, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
21. Chávez, M. et al. (1989), "Estudio teórico experimental de los efectos de Interacción Suelo-Estructura en la estación acelerográfica SCT que registró el sismo de septiembre de 1985", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica Acapulco, Gro. México.
22. Suárez, G. (1990), "El potencial Sísmico en la República Mexicana", Revista Ingeniería, Vol. LX, Número 2. México.
23. Newland, D. E. (1983), "Vibraciones aleatorias y análisis espectral", Editorial AC, Madrid, España.
24. Randall, R. B. (1977), "Frequency Analysis", Application of B & K Equipment. USA.
25. Brigham, E. O. (1974), "The fast Fourier transform", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

APENDICE A

APENDICE A

Análisis de Fourier.

El concepto de análisis en el dominio de la frecuencia, mediante el cual una función periódica puede ser descompuesta en sus componentes armónicos, es de gran utilidad en el estudio de señales [Ref. 23]. Siendo importante hacer una breve reseña en este apartado.

Se sabe que si $x(t)$ es una función periódica del tiempo t , con periodo T tal como se muestra en la figura A-1, siempre es posible expresar $x(t)$ como serie infinita de términos trigonométricos de la forma:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad (A.1)$$

donde a_0 , las a_k y b_k son los coeficientes de Fourier constantes dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

$$a_k \quad k \geq 1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad (\text{A.2})$$

$$b_k \quad k \geq 1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt$$

Supóngase que se ajusta la altura del eje t en la fig. A-1 de forma que el valor medio de $x(t)$ sea cero. Entonces, de acuerdo con la primera ecuación de (A.2), el coeficiente a_0 será nulo. Los restantes coeficientes, a_k y b_k serán en general diferentes entre sí; sus valores se ilustran gráficamente en la figura A-2 se ha elegido para representar la frecuencia, y la situación del k -ésimo coeficiente es:

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad (\text{A.3})$$

que es la frecuencia del k -ésimo armónico. El espacio entre armónicos adyacentes es:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{A.4})$$

cuanto mayor es el periodo T , más pequeño es el espacio $\Delta\omega$, y los coeficientes de Fourier están más estrechamente espaciados en la fig. A-2. En el límite de $T \rightarrow \infty$, llegarán a fundirse. Como en este caso $x(t)$ ya no representa un fenómeno periódico, no nos será posible descomponerla en componentes de frecuencia discreta. Sin embargo, la serie de Fourier (A.1) se convertirá en una integral de Fourier y los coeficientes de Fourier (A.2) en funciones continuas de la frecuencia, denominadas transformadas de Fourier.

Integral de Fourier.

Sustituyendo (A.2) en (A.1) se obtiene para $a_0 = 0$

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \right] \cos \frac{2\pi kt}{T} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \right] \sin \frac{2\pi kt}{T}$$

A continuación, sustituyendo el valor de $2\pi k/T$ obtenido de (A.3) y el de $1/T$ de (A.4), tenemos:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \omega_k t dt \right] \cos \omega_k t +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \omega_k t dt \right] \sin \omega_k t$$

Si el periodo $T \rightarrow \infty$, entonces $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ y el sumatorio se convierte en una integral con límites $\omega = 0$ y $\omega = \infty$. En tal caso:

$$x(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \right] \cos \omega t + \\ + \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \right] \sin \omega t$$

o bien:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \quad B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \quad (A.5)$$

resulta:

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega \quad (A.6)$$

Los términos $A(\omega)$ y $B(\omega)$ definidos por (A.5) son las componentes de la transformada de Fourier de $x(t)$ y la ecuación (A.6) es una representación de $x(t)$ mediante una integral de Fourier o una transformada inversa de Fourier.

Forma compleja de la transformada de Fourier.

Se ha hecho habitual en la teoría de vibraciones aleatorias escribir las ecuaciones (A.5) y (A.6) en forma compleja, para lo cual se utiliza el hecho de que:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (\text{A.7})$$

Definiendo $X(\omega)$ como:

$$X(\omega) = A(\omega) - i B(\omega) \quad (\text{A.8})$$

se pueden combinar las ecuaciones (A.5), resultando:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) (\cos \omega t - i \sin \omega t) dt$$
$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (\text{A.9})$$

donde se ha tomado en cuenta (A.7). Esta última ecuación es la definición formal de $X(\omega)$, que recibe el nombre de transformada de Fourier de $x(t)$.

La mayor parte de las medidas experimentales sobre procesos aleatorios se llevan a cabo mediante técnicas digitales. Para ello se introduce una función típica $x(t)$ del proceso en un convertidor analógico-digital. El convertidor muestrea $x(t)$ en una serie de instantes regularmente espaciados fig. (A-3).

Si el intervalo de muestreo es Δ (constante), el valor discreto de $x(t)$ en el instante $t = r\Delta$ se representa por x_r ; la sucesión $\{x_r\}$, $r = \dots, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$, recibe el nombre de serie temporal discreta. Dado que la serie discreta ha sido obtenida de una función continua en el tiempo, a esta última suele llamársele serie temporal continua. Así, el término <serie temporal> se refiere, o bien a la sucesión de valores discretos x_r ordenados en el tiempo, o bien a la función continua en el tiempo, $x(t)$ de la que la serie discreta ha sido obtenida. El objetivo del análisis de series temporales es la determinación de las características estadísticas de la función original $x(t)$ mediante la manipulación de sucesiones de valores x_r . Nos interesa sobre todo la composición de $x(t)$ en el dominio de la frecuencia. [Ref. 24]

Entonces si tenemos que:

$$x_k = \frac{1}{T} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-j(2\pi k/T)(r\Delta)} \Delta \quad (A.10)$$

lo cual equivale a suponer que el área total comprendida entre la curva y el eje r de la figura (A-4) viene dada por la suma de todas las bandas

rayadas. Sustituyendo $T = NA$ en (A.10) se obtiene:

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-j(2\pi kr/N)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (\text{A.11})$$

Expresión de la definición formal de transformada discreta de Fourier (DFT).

A pesar de que (A.11) no suministra toda la información necesaria para permitir la reconstrucción de la serie temporal $x(t)$, el hecho de que permita la recuperación exacta de los valores discretos de la serie $\{x_r\}$ es de gran importancia. Cualquier valor x_r de la serie $\{x_r\}$ viene dado por la fórmula inversa:

$$x_r = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j(2\pi kr/N)} \quad (\text{A.12})$$

Transformada rápida de Fourier (FFT).

La transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) es un algoritmo de computador para el cálculo de transformadas discretas de Fourier (DFT). Entonces de (A.11), si se quisiera calcular los valores de x_k de forma directa, tendríamos que hacer N multiplicaciones de la forma $\{x_r\}$ por $\{e^{-j(2\pi kr/N)}\}$ para cada uno de los valores de x_k , con lo

que el cálculo de la sucesión requeriría N^2 multiplicaciones; mientras que la FFT reduce este número de aproximaciones a $N \log_2 N$.

La FFT funciona partiendo la sucesión completa $\{x_r\}$ en un cierto número de sucesiones más cortas. No se calcula la DFT de la sucesión original, sino la de éstas sucesiones más cortas. A continuación la FFT cambia estas DFT de forma ingeniosa para dar la DFT completa de $\{x_r\}$. Esto suena complicado pero en realidad el fundamento lógico es sorprendentemente sencillo. [Ref. 25]

Si suponemos que $\{x_r\}$, $r=0,1,2,\dots,(N-1)$, es la sucesión de la fig. A-5 (a), donde N es un número par, y que la partimos en dos sucesiones más cortas, $\{Y_r\}$ y $\{Z_r\}$, fig. A-5 (b).

$$\begin{aligned}
 Y_r &= X_{2r} \\
 Z_r &= X_{2r+1}
 \end{aligned}
 \quad r = 0,1,2,\dots,(N/2 - 1)
 \quad (A.13)$$

Las DFT de estas dos sucesiones cortas son, según (A.11)

$$\begin{aligned}
 Y_k &= \frac{1}{(N/2)} \sum_{r=0}^{N/2-1} Y_r e^{-j \frac{2\pi kr}{N/2}} \\
 Z_k &= \frac{1}{(N/2)} \sum_{r=0}^{N/2-1} Z_r e^{-j \frac{2\pi kr}{N/2}}
 \end{aligned}
 \quad k = 0,1,2,\dots,(N/2 - 1)
 \quad (A.14)$$

Volvamos ahora a la DFT de la sucesión original $\{x_r\}$ y reordenemos la suma en dos sumas separadas similares a las que aparecen en (A.13). En primer lugar, separamos los términos pares e impares de $\{x_r\}$:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-j \frac{2\pi r k}{N}} =$$

$$= \frac{1}{N} \left[\sum_{r=0}^{N/2-1} X_{2r} e^{-j \frac{2\pi(2r)k}{N}} + \sum_{r=0}^{N/2-1} X_{2r+1} e^{-j \frac{2\pi(2r+1)k}{N}} \right]$$

sustituyendo (A.13) en esta expresión, y comparando con (A.14) encontramos que:

$$X_k = \frac{1}{2} \left[Y_k + e^{-j(2\pi k/N)} Z_k \right] \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1) \quad (A.15)$$

Así pues, la DFT de la sucesión original puede ser obtenida directamente a partir de las DFT de las dos semisucesiones Y_k y Z_k . Estas ecuaciones constituyen la base del método FFT, si el número de muestras N de la sucesión $\{x_r\}$ es una potencia de 2, las semisucesiones $\{Y_r\}$ y $\{Z_r\}$ pueden a su vez ser partidas en semisucesiones, y así sucesivamente, hasta que finalmente las últimas subsucesiones contengan cada una un sólo término. [Ref. 25]

La fórmula (A.15) es válida solamente para valores de k comprendidos entre 0 y $N/2 - 1$, es decir, solamente se aplica a la mitad de los coeficientes de la serie $\{X_k\}$.

Para obtener la otra mitad correspondiente a $N/2 \leq k \leq (N-1)$, tendremos en cuenta el hecho de que Y_k y Z_k son periódicas en k y se repiten con periodo $N/2$, de forma que:

$$Y_{k-N/2} = Y_k \quad \text{y} \quad Z_{k-N/2} = Z_k \quad (\text{A.16})$$

La formulación completa para el cálculo de los valores de X_k a partir de Y_k y Z_k es:

$$X_k = \frac{1}{2} [Y_k + e^{-j(2\pi k/N)} Z_k] \quad \text{para } k=0,1,2,\dots,(N/2-1)$$

$$X_k = \frac{1}{2} [Y_{k-N/2} + e^{-j(2\pi k/N)} Z_{k-N/2}] \quad \text{para } k=N/2,(N/2+1),\dots,(N-1) \quad (\text{A.17})$$

recordando que $e^{-j\pi} = -1$, esta expresión se puede simplificar a:

$$X_k = \frac{1}{2} [Y_k + e^{-j(2\pi k/N)} Z_k]$$

$$X_{k+N/2} = \frac{1}{2} [Y_k - e^{-j(2\pi k/N)} Z_k] \quad \text{para } k=0,1,2,\dots,(N/2-1)$$

finalmente, si definimos una nueva variable compleja:

$$W = e^{-j(2\pi/N)}$$

podemos obtener la denominada mariposa de cálculo:

$$X_k = \frac{1}{2} [Y_k + W^k Z_k]$$

para $k = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$

$$X_{k+N/2} = \frac{1}{2} [Y_k - W^k Z_k]$$

Que aparece en la mayor parte de los programas de cálculo de FFT, una característica de la mayor parte de los algoritmos FFT es que la longitud N de la sucesión de datos que se analizan ha de ser potencia de 2, es decir, $N=2^n$, siendo n un entero positivo, sin embargo, difícilmente esta condición se cumplirá; antes que abandonar parte de los datos para ajustar N a la potencia de 2 más baja, será preferible añadir a los datos una sucesión de ceros, hasta hacer coincidir N con la potencia de 2 siguiente más alta. [Ref. 25].

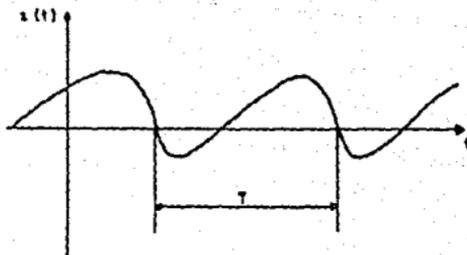


FIG. A-1 Función periódica arbitraria en el tiempo.

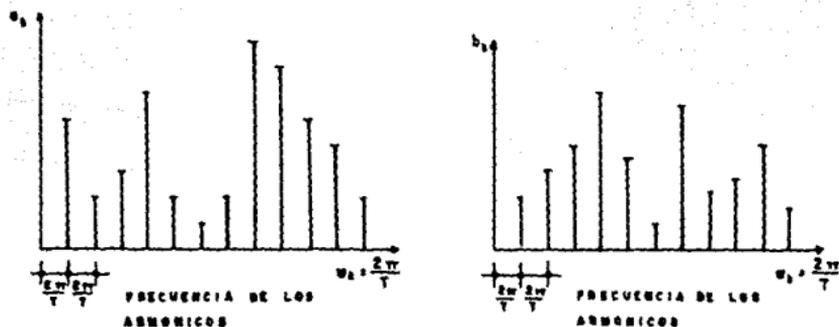


FIG. A-2 Representación gráfica de los coeficientes de Fourier.

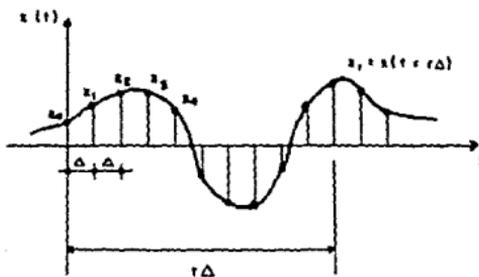


FIG. A-3 Muestreo de una función continua en el tiempo a intervalos regulares.

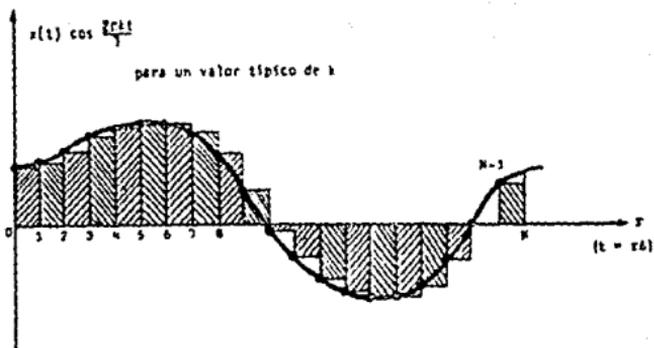


Figura A-4 Aproximación resultante de calcular los coeficientes de Fourier de una serie discreta en lugar de los de una serie continua.

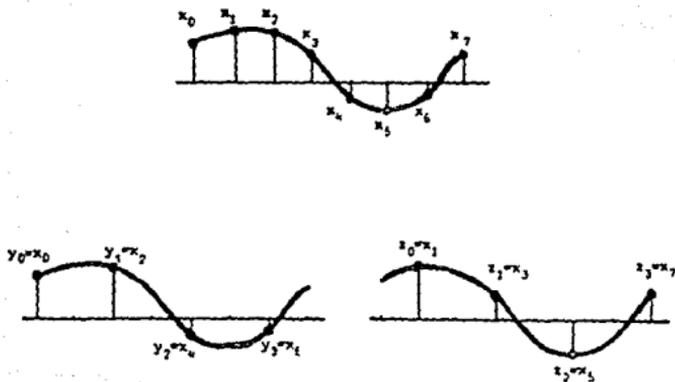


Figura A-5 Partición de la sucesión (X_r) en dos semisucesiones (Y_r) y (Z_r).